

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

Кафедра электротехники

В. Н. ГАЛУШКО, И. Л. ГРОМЬКО

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности для обучающихся по специальностям: 1-37 02 02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования», 1-44 01 03 «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте» в качестве учебно-методического пособия*

Гомель 2021

УДК 621.3(075.8)  
ББК 31.2  
Г16

Рецензенты: доцент кафедры электроснабжения канд. техн. наук, доцент *Т. В. Алфёрова* (ГГТУ им. П. О. Сухого); заведующий кафедрой физики и энергоэффективных технологий канд. техн. наук, доцент *А. Н. Пехота* (БелГУТ)

### **Галушко, В. Н.**

Г16 Электротехника и основы электроники: учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, И. Л. Громько ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 299 с.  
ISBN 978-985-554-959-9

Содержит теоретическую часть, необходимую для освоения курса «Электротехника и основы электроники». Состоит из восьми разделов: основные понятия и определения, линейные электрические цепи постоянного тока, цепи однофазного и трехфазного переменного тока, магнитные цепи, нелинейные цепи, электрические измерения и приборы, электрические машины, основы электроники.

Предназначено для студентов дневной формы обучения специальностей 1-37 02 02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования», 1-44 01 03 «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте».

**УДК 621.3(075.8)**  
**ББК 31.2**

**ISBN 978-985-554-959-9**

© Галушко В. Н., Громько И. Л., 2021  
© Оформление. БелГУТ, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
2 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	11
2.1 Закон Ома и законы Кирхгофа для цепей постоянного тока.....	11
2.1.1 Закон Ома.....	11
2.1.2 Первый закон Кирхгофа.....	11
2.1.3 Второй закон Кирхгофа.....	12
2.2 Эквивалентные преобразования схем электрических цепей.....	12
2.3 Баланс мощностей в цепях постоянного тока.....	19
2.4 Расчет сложных цепей постоянного тока.....	20
2.4.1 Метод уравнений Кирхгофа.....	21
2.4.2 Метод контурных токов.....	22
2.4.3 Метод межузлового напряжения.....	26
2.5 Потенциальная диаграмма электрической цепи.....	27
3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.....	30
3.1 Основные характеристики переменного тока.....	30
3.2 Цепи синусоидального тока с пассивными элементами.....	32
3.3 Применение комплексных чисел для расчета цепей переменного тока.....	36
3.4 Мощность в цепи синусоидального тока.....	47
3.5 Трехфазные электрические цепи.....	50
4 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ.....	62
4.1 Нелинейные электрические цепи постоянного тока.....	62
4.2 Нелинейные элементы электрической цепи переменного тока.....	68
5 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ.....	70
5.1 Основные понятия о магнитных цепях.....	70
5.2 Исследование магнитных цепей.....	75
6 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ.....	80
6.1 Классификация и основные характеристики измерений.....	80
6.2 Погрешности измерений и электроизмерительных приборов.....	82
6.3 Классификация электроизмерительных приборов и технические требования, предъявляемые к ним.....	86
6.4 Основные системы электроизмерительных приборов.....	90
6.5 Методы измерения электрических величин.....	96
7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	99
7.1 Трансформаторы.....	105
7.1.1 Назначение трансформаторов и их применение.....	105
7.1.2 Принцип действия трансформатора.....	109
7.1.3 Приведенный трансформатор и его схема замещения.....	112
7.1.4 Режим холостого хода.....	114
7.1.5 Короткое замыкание трансформатора.....	119
7.1.6 Работа трансформатора под нагрузкой.....	121
7.1.7 Потери и коэффициент полезного действия трансформатора.....	126
7.1.8 Специальные типы трансформаторов.....	128

7.2 Асинхронные машины.....	134
7.2.1 Общие сведения. Устройство.....	134
7.2.2 Принцип действия асинхронного двигателя.....	140
7.2.3 Схемы замещения асинхронного двигателя.....	149
7.2.4 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.....	152
7.2.5 Электромагнитный момент асинхронного двигателя.....	153
7.2.6 Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	159
7.2.7 Пуск в ход асинхронных двигателей. Реверс.....	162
7.2.8 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.....	170
7.2.9 Режим генератора и электромагнитного тормоза.....	174
7.3 Синхронные машины.....	179
7.3.1 Применение, классификация и устройство синхронных машин.....	179
7.3.2 Синхронный генератор.....	181
7.3.3 Синхронный двигатель и компенсатор.....	191
7.4 Машины постоянного тока.....	197
7.4.1 Конструкция и принцип действия машин постоянного тока.....	198
7.4.2 Магнитный поток, магнитная цепь машины постоянного тока.....	206
7.4.3 Реакция якоря. Коммутация.....	209
7.4.4 Генераторы постоянного тока.....	214
7.4.5 Двигатели постоянного тока.....	218
7.4.6 Пуск, реверсирование и торможение двигателей.....	227
7.4.7 Потери мощности в машинах постоянного тока.....	231
7.4.8 Универсальные коллекторные двигатели.....	233
8 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	237
8.1 Основные свойства полупроводников.....	237
8.2 Полупроводниковые диоды.....	245
8.3 Транзисторы.....	248
8.4 Тиристоры.....	253
8.5 Выпрямители переменного тока.....	255
ПРИЛОЖЕНИЕ А Электробезопасность.....	267
А.1 Действие тока на организм человека.....	267
А.2 Факторы, определяющие опасность поражения током.....	269
А.3 Условия и основные причины поражения током.....	273
А.4 Оказание первой доврачебной помощи при поражении током.....	277
А.5 Безопасность эксплуатации электроустановок.....	283
А.6 Защитное заземление. Зануление.....	285
А.7 Средства защиты от поражения током.....	290
А.8 Устройство защитного отключения.....	293
А.9 Памятка по выполнению лабораторных работ.....	297
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	298

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

У голландского профессора Мушенбрека из г. Лейдена возникла идея «накопить» электрические заряды в стеклянном сосуде. В 1745 г. он взял стеклянную банку, наполненную водой, опустил в нее медную проволоку, соединенную с электростатической машиной, и, взяв банку в правую руку, попросил своего помощника вращать шар машины. После того как в банке накопилось достаточное количество зарядов, он решил левой рукой отсоединить медную проволоку. При этом он ощутил сильнейший удар.

Опыт Мушенбрека повторил в присутствии французского короля аббат Нолле. Он образовал цепь из 180 гвардейцев, взявшихся за руки, причем первый держал банку в руке, а последний прикасался к проволоке, извлекая искру. Удар чувствовался всеми в один момент. Десятки людей мгновенно вскрикивали и делали произвольные жесты. От этой цепи солдат и произошел термин «электрическая цепь».

**Электротехника** – это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях.

*Электрический ток* – это явление направленного движения заряженных частиц. Количественную меру этого движения определяют как силу тока, но в электротехнических дисциплинах принято говорить просто – ток.

Величину тока определяют как скорость изменения заряда во времени:

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

где  $q$  – заряд.

Стрелкой на схемах обозначают направление движения положительно заряженных частиц. В результате расчетов ток может получиться с разными знаками. Ток положительный, если его выбранное направление совпадает с направлением движения положительных зарядов.

Ток может быть постоянным (неизменяющимся) или переменным (изменяющимся в зависимости от времени) и измеряют его в амперах (А).

Человек начинает ощущать ток в своем теле при его величине от 0,005 А. Ток 0,05 А опасен для жизни. В люминесцентной лампе величина тока составляет 0,15 А, в лампе накаливания – 0,2–1 А, в холодильнике – 0,5–0,8 А, в бытовых нагревательных приборах – 2–8 А, в электродвигателе трамвайного вагона – от 100 А и выше, в индукторе печи для плавления алюминия – 18000 А.

*Напряжение* – количество энергии, затраченной на перемещение единичного заряда из одной точки электромагнитного поля в другую:

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{dW}{dq}, \quad (1.2)$$

где  $W$  – энергия.

*Потенциал* – количество энергии, затраченной на перемещение единичного заряда из бесконечности в какую-либо точку электромагнитного поля. Отсюда напряжение – это разность потенциалов.

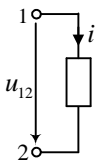


Рисунок 1.1 –  
Участок  
электрической  
цепи

Величина напряжения и тока скалярная, может принимать положительные и отрицательные значения. Напряжение положительно, если потенциал точки 1, из которого направлена стрелка  $u_{12}$  (рисунок 1.1), выше потенциала точки 2. Индексация показывает направление – ко второму индексу.

*Электродвижущая сила (ЭДС)* – скалярная величина, характеризующая способность стороннего и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

Единица измерения напряжения, потенциала и ЭДС – вольт (В).

*Мощность* – это скорость изменения энергии во времени:

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \Delta W / \Delta t = dW / dt.$$

Умножив и разделив на  $dq$ , получим

$$p = (dW / dq)(dq / dt) = UI. \quad (1.3)$$

Следовательно, мощность – это произведение напряжения на ток. Единица измерения мощности в общем случае – В·А.

Для работы любого электротехнического устройства необходимо, чтобы через него проходил ток, обязательным условием существования которого является наличие замкнутого контура – электрической цепи.

*Электрической цепью* называется совокупность элементов и устройств, образующих путь для тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе (ЭДС), токе и напряжении.

*Элемент электрической цепи* – отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней определенную функцию. Основными элементами электрической цепи являются источники (ЭДС и тока) и приемники (резистивный, индуктивный и емкостный элементы) электрической энергии. Кроме этих элементов, электрическая цепь может содержать измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, провода.

В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую. Так, в генераторах электростанций в электрическую преобразуется механическая энергия, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т. д.

В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в тепловую (нагревательные элементы), световую (электрические лампы), химическую (электролизные ванны) и т. д.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных знаков, отражающее реальную взаимосвязь всех элементов между собой, называется *принципиальной схемой*. Принципиальная схема показывает назначение электротехнических устройств (лампа, двигатель, аккумулятор и т. д.), но неудобна при расчетах. Для выполнения расчета необходимо каждое электротехническое устройство представить его электрической схемой замещения.

*Электрическая схема замещения* состоит из совокупности различных идеализированных элементов, наглядно представляющих сущность процессов в замещаемой схеме и дающих полное представление о принципах работы изделия. Понятие идеализированного элемента цепи непосредственно связано с вполне определенным математическим соотношением, которое существует между током и напряжением, действующим на его зажимах.

*Пассивные элементы* – это элементы электрической цепи, в которых рассеивается или накапливается энергия. Различают три идеализированных пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостный (рисунок 1.2).

Резистивный элемент, или идеальный резистор (см. рисунок 1.2, *а*), учитывает преобразование электрической энергии в другие виды энергии. Обладает сопротивлением  $r$ , которое измеряют в омах (Ом).

Индуктивный элемент, или идеальная индуктивная катушка (см. рисунок 1.2, *б*), учитывает энергию магнитного поля катушки, а также ЭДС самоиндукции. Обладает индуктивностью  $L$ , которую измеряют в генри (Гн).

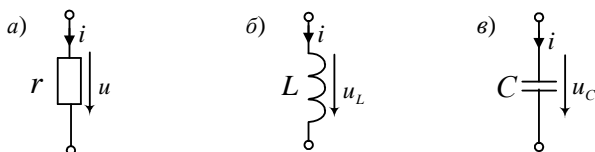


Рисунок 1.2 – Пассивные элементы:

*а* – резистивный; *б* – индуктивный; *в* – емкостный

Емкостный элемент, или идеальный конденсатор (см. рисунок 1.2, *в*), учитывает энергию электрического поля конденсатора, а также токи смещения. Обладает емкостью  $C$ , измеряемой в фарадах (Ф).

Пассивные элементы могут быть линейными и нелинейными, с постоянными и переменными параметрами.

*Линейными элементами* называются элементы цепи, параметры которых не зависят от приложенного к ним напряжения и проходящего через них тока (см. рисунок 1.2). Если параметры элементов зависят от значения или направления действующего напряжения и силы проходящего тока, то их называют *нелинейными* (рисунок 1.3, *а*). Примерами нелинейных элементов могут служить полупроводниковые и электронные приборы, катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками и др.

Элементы с постоянными параметрами – это линейные элементы, параметры которых не зависят от времени. Элементы цепи, параметры которых меняются во времени по определенному закону, называются *элементами с переменными параметрами* (рисунок 1.3, б).

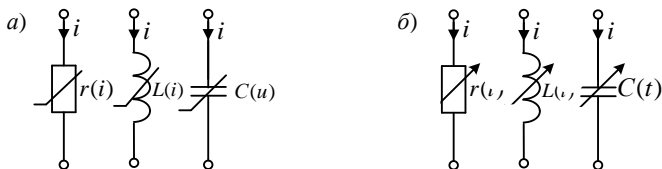


Рисунок 1.3 – Нелинейные (а) элементы и элементы с переменными параметрами (б)

*Активные элементы* – это источники энергии. Различают источники ЭДС и источники тока.

*Идеальный источник ЭДС* – источник электрической энергии, напряжение на зажимах которого не зависит от силы проходящего через него тока (рисунок 1.4, а). В реальных источниках ЭДС сила тока короткого замыкания имеет конечное значение, поскольку такие источники характеризуются наличием конечного внутреннего сопротивления  $r_{вн}$  (рисунок 1.4, б). При равном значении ЭДС источники с малым внутренним сопротивлением могут развивать в нагрузке мощность большую, чем те, у которых внутреннее сопротивление велико. Вольт-амперные (внешние) характеристики идеального (2) и реального (1) источников ЭДС представлены на рисунке 1.4, в).

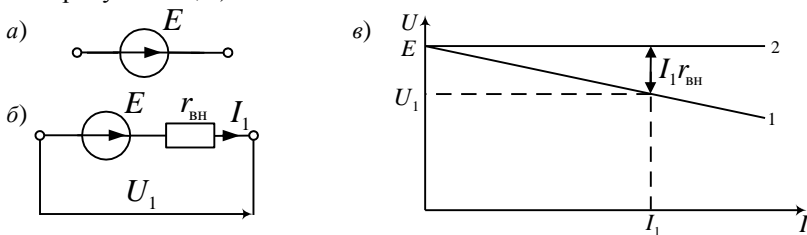


Рисунок 1.4 – Идеальный (а), реальный (б) источник ЭДС и вольт-амперные характеристики реального (1) и идеального (2) источников ЭДС (в)

*Идеальный источник тока* – это источник электрической энергии, сила тока которого не зависит от напряжения на его зажимах (рисунок 1.5, а). При разомкнутых зажимах идеального источника тока напряжение на них достигает бесконечно большого значения. В реальных источниках тока напряжение холостого хода на их зажимах имеет ко-



нечное значение, поскольку такие источники характеризуются конечным внутренним сопротивлением  $r_{\text{ин}} = 1/g_{\text{ин}}$  (рисунок 1.5, б)

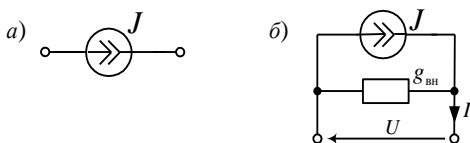


Рисунок 1.5 – Идеальный (а) и реальный (б) источник тока

Электрическая схема замещения определяется следующими геометрическими (топологическими) понятиями: ветвь, узел, контур.

*Ветвь* – участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток.

*Узел* – точка в схеме, где сходится не менее трех ветвей. Тогда ветвь – участок электрической цепи от одного узла до другого.

Линии, связывающие ветви в схеме, представляют соединения без сопротивлений. Поэтому схемы на рисунке 1.6 содержат один узел. Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называются параллельными.



Рисунок 1.6 – Узел электрической цепи

*Контур* – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречается больше одного раза. Независимыми контурами являются такие, при выборе которых в каждый последующий контур входит хотя бы одна новая ветвь, не входившая в предыдущие.

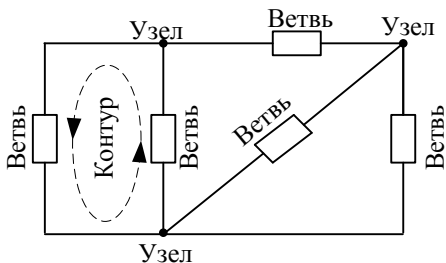


Рисунок 1.7 – Схема электрической цепи

Рисунок 1.7 в виде примера иллюстрирует электрическую схему, содержащую пять ветвей и три узла, стрелкой указано направление обхода одного из контуров, образованных в данной электрической схеме.

Классификация электрических цепей осуществляется в соответствии с характером элементов, из которых состоит цепь, и уравнений, которыми она описывается. Цепь, на всех участках которой протекает один и тот же ток,

называется неразветвленной. Если же цепь содержит участки с различными токами, то она является разветвленной. На рисунке 1.7 приведен пример разветвленной электрической цепи.

### **Контрольные вопросы**

1 Дайте определение следующим величинам: электрический ток, напряжение, мощность.

2 Определите понятия : электрическая схема, ветвь, узел, источник ЭДС и источник тока.

3 Нарисуйте ВАХ реального источника ЭДС.

4 Что такое положительное направление тока?

5 Зависит ли выбор положительного направления напряжения от положительного направления тока?

6 Что такое электрическая цепь?

7 Дайте определение для схемы замещения и принципиальной схемы электрической цепи.

8 Какие элементы электрической цепи относят к пассивным?

9 Какие элементы электрической цепи относят к активным?

## 2 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1 Закон Ома и законы Кирхгофа для цепей постоянного тока

#### 2.1.1 Закон Ома

Основными законами, лежащими в основе анализа электрических цепей, являются законы, установленные немецкими физиками Г. С. Омом и Г. Р. Кирхгофом.

В схемах замещения цепей постоянного тока только один вид приемников – резистивный элемент. Все электрические величины обозначают заглавными буквами:  $I$ ,  $U$ ,  $E$ , кроме тока источника тока, который обозначают буквой  $J$ .

По *закону Ома* напряжение на резистивном элементе (рисунок 2.1) пропорционально току в нем. Коэффициент пропорциональности назван сопротивлением:

$$U = rI. \quad (2.1)$$

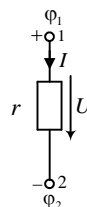


Рисунок 2.1 –  
Участок цепи

#### 2.1.2 Первый закон Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа сформулирован для узла. Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0. \quad (2.2)$$

Правило знаков: токи, одинаково направленные относительно узла, записывают с одинаковыми знаками.

Например, для узла, изображенного на рисунке 2.2, *a*, по первому закону Кирхгофа можно записать:  $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$ .

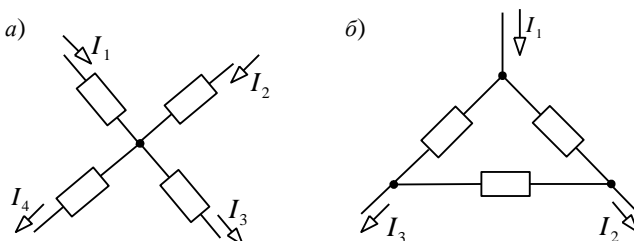


Рисунок 2.2 – Иллюстрация к первому закону Кирхгофа

Следует отметить, что первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда: заряд, приходящий за какой-то интервал времени к узлу, равен заряду, уходящему за это время от узла, т. е. электрический заряд в узле не накапливается и не расходуется.

Первый закон Кирхгофа применим не только к узлу, но и к любой замкнутой поверхности, охватывающей часть цепи. Так, например, для схемы на рисунке 2.2, б запись следующая:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ .

### 2.1.3 Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа относится к контуру. Алгебраическая сумма напряжений на приемниках в любом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{k=1}^m r_k I_k. \quad (2.3)$$

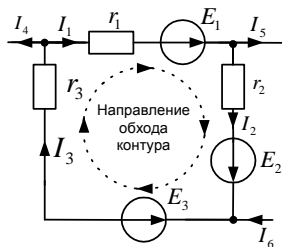


Рисунок 2.3 –  
Иллюстрация ко второму  
закону Кирхгофа

Для составления этого уравнения необходимо задаться направлением обхода контура, которое обычно обозначается на схеме стрелкой. При алгебраическом суммировании ЭДС и напряжений следует брать со знаком «+» те из них, направления которых совпадают с направлением обхода, а со знаком «-», направленные противоположно обходу контура. Например, для контура, изображенного на рисунке 2.3, второй закон Кирхгофа можно записать в виде:

$$E_1 + E_2 - E_3 = r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3.$$

Второй закон Кирхгофа можно применять и для контуров, которые состоят не только из участков схемы, но и из напряжений между какими-либо точками схемы. Уравнение по второму закону Кирхгофа для участка на рисунке 1.4, б:

$$U_1 = E - I_1 r_{\text{вн}}.$$

## 2.2 Эквивалентные преобразования схем электрических цепей

*Эквивалентным преобразованием* части схемы электрической цепи называют такое изменение, при котором токи и напряжения вне преобразованной ее части остаются прежними.

Метод эквивалентных преобразований применяют как самостоятельный для расчета токов в схемах с *одним источником* энергии и несколькими приемниками. Его можно использовать и для упрощения частей сложной схемы при расчетах другими методами.

Все приемники заменяют одним с эквивалентным сопротивлением. При этом токи и напряжения в частях схемы, не затронутых преобразованием, должны оставаться неизменными. Находят токи в свернутой схеме, а затем возвращаются к исходной с определением остальных токов.

Преобразование схемы проводят постепенно, рассматривая участки с последовательными и параллельными соединениями приемников. Предварительно нужно выявить узлы и ветви.

**Преобразование схем с последовательным, параллельным и смешанным соединением сопротивлений.** Произвольное число *последовательно* соединенных сопротивлений (рисунок 2.4, а) можно заменить одним эквивалентным сопротивлением (рисунок 2.4, б), значение которого равно сумме сопротивлений:

$$r_{\text{ЭКВ}} = \sum_{k=1}^m r_k. \quad (2.4)$$

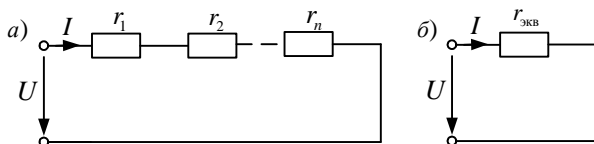


Рисунок 2.4 – Схема с последовательным соединением резисторов (а) и упрощенная схема этой цепи с эквивалентным сопротивлением (б)

Ток  $I$ , протекающий по этим сопротивлениям, *один и тот же*, а напряжения на каждом резисторе различны.

При *параллельном* соединении  $n$  потребителей (рисунок 2.5, а) эквивалентная проводимость  $g_{\text{ЭКВ}}$  (рисунок 2.5, б) равна сумме проводимостей отдельных элементов, включенных параллельно,

$$g_{\text{ЭКВ}} = g_1 + g_2 + \dots + g_n. \quad (2.5)$$

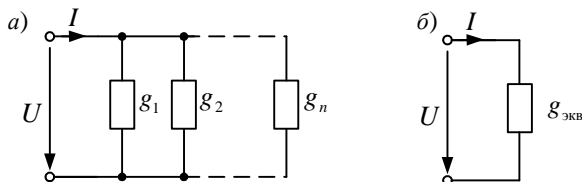


Рисунок 2.5 – Схема с параллельным соединением резисторов (а) и упрощенная схема этой цепи с эквивалентным сопротивлением (б)

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

$$1/r_{\text{экв}} = 1/r_1 + 1/r_2 + \dots + 1/r_n = 1/\sum_{k=1}^n 1/r_k, \quad (2.6)$$

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

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

$$r_{\text{экв}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Параллельное включение – основной способ включения различных приемников (потребителей) электрической энергии, так как на параллельно соединенных приемниках напряжения равны.

**Пример 2.1.** Для заданной цепи постоянного тока, изображенной на рисунке 2.6, определить токи в ветвях.

Д а н о:  $E = 50$  В,  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 3$  Ом,  $r_3 = 2,5$  Ом,  $r_4 = 0,5$  Ом,  $r_5 = 1,5$  Ом.

*Решение.* Задаемся направлением токов всех ветвей и обозначаем эти токи на схеме. Стрелка источника ЭДС показывает направление увеличения потенциала. При определении направления тока следует учитывать тот факт, что ток в ветви течет от большего потенциала к меньшему. Далее выполняем эквивалентные преобразования в цепи и последовательно упрощаем схему. Начинаем с замены двух последовательно включенных резисторов  $r_3$  и  $r_4$  одним эквивалентным. Схема упрощается и имеет вид, изображенный на рисунке 2.7, а.

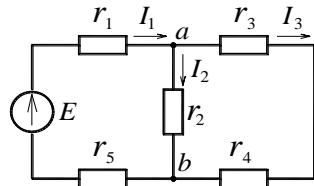


Рисунок 2.6 – Схема разветвленной электрической цепи постоянного тока

Эквивалентное сопротивление двух последовательно включенных резисторов  $r_3$  и  $r_4$ :

$$r_{34} = r_3 + r_4 = 2,5 + 0,5 = 3 \text{ Ом.}$$

Дальнейшее упрощение схемы происходит в результате замены параллельно включенных резисторов  $r_2$  и  $r_{34}$  одним  $r_{234}$  (рисунок 2.7, б). Эквивалентное сопротивление двух резисторов, включенных параллельно, можно определить из выражения:

$$r_{234} = r_2 r_{34} / (r_2 + r_{34}) = 3 \cdot 3 / (3 + 3) = 1,5 \text{ Ом.}$$

Окончательное упрощение цепи происходит после замены трех последовательно соединенных резисторов  $r_1, r_{234}, r_5$  одним эквивалентным, соответствующим сопротивлению всей цепи (рисунок 2.7, в):

$$r_{\text{экв}} = r_1 + r_{234} + r_5 = 2 + 1,5 + 1,5 = 5 \text{ Ом.}$$

Применяем закон Ома для замкнутой цепи  $I_1 = E/r_{\text{экв}} = 50 / 5 = 10$  А.

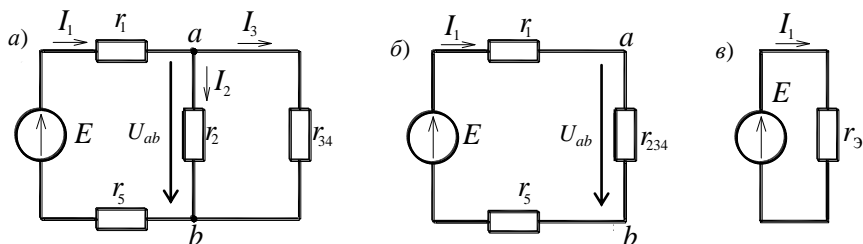


Рисунок 2.7 – Эквивалентные схемы заданной цепи

Так как преобразования выполнялись эквивалентными, то ток  $I_1$  будет одинаковым для всех цепей на рисунках 2.6 и 2.7.

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

Междузловое напряжение  $U_{ab}$  находим из схемы, изображенной на рисунке 2.7, б. Здесь оно равно падению напряжения на резисторе  $r_{234}$ :

$$U_{ab} = I_1 r_{234} = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ В.}$$

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

$$I_2 = U_{ab} / r_2 = 15 / 3 = 5 \text{ А}, \quad I_3 = U_{ab} / r_{34} = 15 / 3 = 5 \text{ А.}$$

Для случая *параллельного* соединения резисторов, зная входной ток  $I_1$ , можно воспользоваться *формулой разброса токов*.

Структура формулы разброса – ток одной из ветвей после разветвления равен току до разветвления, умноженному на дробь. В числителе этой дроби – сопротивление соседней по отношению к определяемому току параллельной ветви, а в знаменателе – сумма сопротивлений ветвей, включенных параллельно.

Для определения тока  $I_2$  формула разброса токов имеет вид

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

Третий ток в соответствии с этой формулой

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

**Преобразование схем с соединением сопротивлений в виде треугольника и звезды.** Эквивалентные преобразования схем с соединением сопротивлений в виде треугольника (рисунок 2.8, а) и звезды (рисунок 2.8, б) иногда могут привести к упрощению решения задачи по расчету цепи.

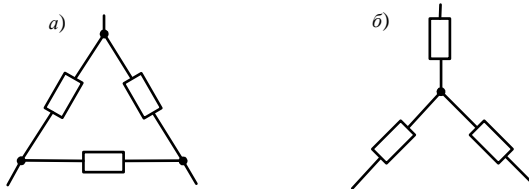


Рисунок 2.8 – Схемы соединения резисторов

На рисунке 2.9, *а* треугольник элементов образуют потребители  $r_1, r_2, r_3$ . На рисунке 2.9, *б* этот треугольник заменен эквивалентными элементами  $r_a, r_b, r_c$ , соединенными звездой. Чтобы не происходило изменение потенциалов в точках *a, b, c* схемы, сопротивления эквивалентных потребителей определяются из следующих выражений:

$$r_a = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}; \quad r_b = \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}; \quad r_c = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_3}. \quad (2.7)$$

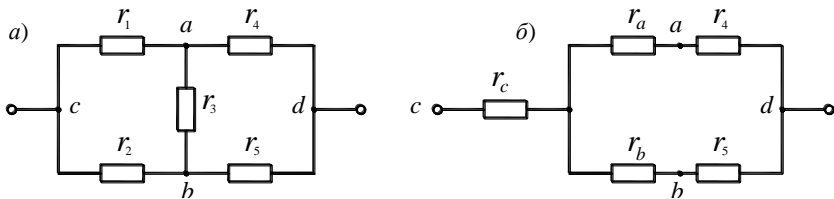


Рисунок 2.9 – Преобразование элементов цепи, соединенных треугольником, в эквивалентную звезду

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

В схеме, изображенной на рисунке 2.10, *а*, можно выделить звезду, образованную потребителями  $r_1, r_3, r_4$ . Эти элементы включены между точками *c, b, d*. На рисунке 2.10, *б* между этими точками находятся эквивалентные потребители  $r_{bc}, r_{cd}, r_{bd}$ , соединенные треугольником. Сопротивления эквивалентных потребителей определяются из следующих выражений:

$$r_{cd} = r_1 + r_4 + \frac{r_1 r_4}{r_3}; \quad r_{bc} = r_1 + r_3 + \frac{r_1 r_3}{r_4}; \quad r_{bd} = r_3 + r_4 + \frac{r_3 r_4}{r_1}. \quad (2.8)$$



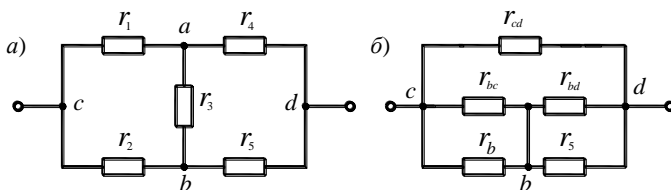


Рисунок 2.10 – Преобразование элементов цепи, соединенных звездой, в эквивалентный треугольник

Дальнейшее упрощение схем, приведенных на рисунках 2.9, б и 2.10, б, можно осуществлять путем замены участков с последовательным и параллельным соединением элементов их эквивалентными потребителями.

При практической реализации метода расчета простой цепи с помощью преобразований, в цепи выявляются участки с параллельным и последовательным соединением потребителей, а затем эквивалентные сопротивления этих участков. Если в исходной цепи в явном виде нет таких участков, то, применяя описанные ранее переходы от треугольника элементов к звезде или от звезды к треугольнику, они проявятся. Данные операции позволяют упростить цепь. Применяв их несколько раз, приходят к одноконтурной схеме с одним источником и одним эквивалентным потребителем энергии. Далее, применяя законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают токи и напряжения на участках цепи.

**Пример 2.2.** Для электрической цепи (схема приведена на рисунке 2.11) известны ЭДС и все сопротивления:  $E = 30$  В,  $r_{12} = 8$  Ом,  $r_{23} = 12$  Ом,  $r_{31} = 12$  Ом,  $r_4 = 5,5$  Ом,  $r_5 = 7$  Ом,  $r_6 = 2$  Ом. Определить силу тока в ветви с источником ЭДС.

*Решение.* Заменяв треугольник сопротивлений 123 звездой сопротивлений (рисунок 2.12), в соответствии с выражениями (2.7) найдем сопротивления звезды:

$$r_1 = r_{12} r_{31} / (r_{12} + r_{23} + r_{31}) = 8 \cdot 12 / (8 + 12 + 12) = 3 \text{ Ом};$$

$$r_2 = r_{12} r_{23} / (r_{12} + r_{23} + r_{31}) = 8 \cdot 12 / (8 + 12 + 12) = 3 \text{ Ом};$$

$$r_3 = r_{23} r_{31} / (r_{12} + r_{23} + r_{31}) = 12 \cdot 12 / (8 + 12 + 12) = 4,5 \text{ Ом}.$$

Сопротивление между точками 1 и 4

$$r_{14} = \frac{(r_2 + r_5)(r_3 + r_4)}{r_2 + r_3 + r_4 + r_5} = \frac{(3+7)(4,5+5,5)}{3+7+4,5+5,5} = 5 \text{ Ом}.$$

Окончательное упрощение цепи происходит после замены трех последовательно соединенных резисторов  $r_1$ ,  $r_{14}$  и  $r_6$  одним эквивалентным, соответствующим сопротивлению всей цепи:

$$r_{\text{экр}} = r_1 + r_6 + r_{14} = 3 + 2 + 5 = 10 \text{ Ом}.$$

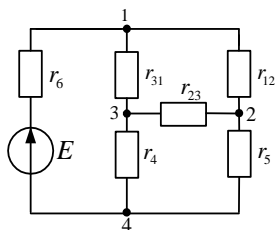


Рисунок 2.11 – Схема цепи

Сила тока в ветви с источником ЭДС

$$I = E / r_{\text{экв}} = 30 / 10 = 3 \text{ А.}$$

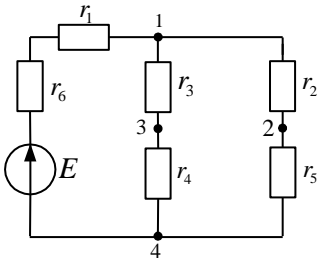


Рисунок 2.12 – Преобразованная схема цепи

Цели исследования электрических цепей могут быть самыми различными: определение падения напряжения на зажимах приемника, определение тока при коротком замыкании в какой-либо точке и др. Из этих расчетов находят требуемые сечения проводов или при данных сечениях проводов – падение напряжения. По данным расчетов выбираются устройства для отключения при значимом увеличении тока по сравнению с расчетным и коротком замыкании.

Практически обычно рассчитывают отклонения напряжения от номинального значения. Отклонения напряжения в сторону уменьшения ограничены тем, что при снижении напряжения резко уменьшается световой поток лампы накаливания; электрические двигатели при данных нагрузках требуют токи, превосходящие нормальные. При отклонении напряжения в сторону увеличения лампы накаливания могут быстро выйти из строя, а двигатели работают в недопустимых условиях.

Отклонения напряжения в сторону уменьшения ограничены величиной 2,5–5 %, а в сторону увеличения – 5 %.

Для сложных цепей решение перечисленных задач требует определения токов в ветвях цепи, что является наиболее трудоемкой задачей. Поэтому методы исследования и расчета сложных цепей – это в основном методы расчета распределения токов в ветвях цепи.

Рассмотрим простую электрическую цепь, состоящую из источника энергии (генератора), имеющего ЭДС  $E_{\Gamma}$  и внутреннее сопротивление  $r_{\text{в}}$ , линии передачи сопротивлением  $r_{\text{л}}$  и приемника энергии с сопротивлением  $r_{\text{пр}}$  (рисунок 2.13).

Напряжение  $U_{\Gamma}$  в начале линии меньше ЭДС на величину падения напряжения в источнике энергии:  $U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - Ir_{\text{в}}$ , а напряжение  $U_{\text{пр}}$  на зажимах приемника меньше  $U_{\Gamma}$  на величину падения напряжения в линии.

При передаче мощности  $P_{\Gamma} = U_{\Gamma}I$  от источника к потребителю увеличенным напряжением источника и пониженным током уменьшаются потери мощности в линии  $\Delta P = \Delta UI = I^2 r_{\text{л}}$ , увеличивается коэффициент полезного

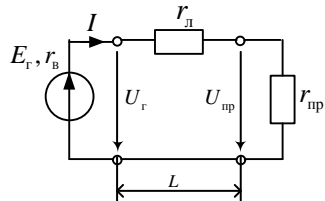


Рисунок 2.13 – Простая электрическая цепь

действия линии  $\eta = \frac{P_{\Gamma} - \Delta P}{P_{\Gamma}} \cdot 100 = \frac{U_{\Gamma} I - \Delta UI}{U_{\Gamma} I} \cdot 100$  и уменьшаются потери напряжения в линии  $U_{\text{пр}} = U_{\Gamma} - \Delta U$ , так как  $\Delta U = I r_{\Gamma}$ . Поэтому передача больших мощностей на дальние расстояния осуществляется по линиям высокого напряжения.

### 2.3 Баланс мощностей в цепях постоянного тока

**Баланс мощностей** – это интерпретация закона сохранения энергии в электротехнике.

Закон Джоуля – Ленца позволяет определить количество тепловой энергии, которая выделяется на сопротивлении  $r$  при протекании по нему электрического тока:

$$W = I^2 r t, \quad (2.9)$$

где  $I$  – значение тока;

$r$  – сопротивление нагрузки;

$t$  – время протекания тока.

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

$$P = W/t = I^2 r = U^2 / r = UI. \quad (2.10)$$

Если в участке цепи с активным сопротивлением под действием приложенного к нему напряжения проходит ток, то выделяемая на сопротивлении мощность  $P = I r^2$ . Данная мощность всегда положительна.

Мощность источника ЭДС, по которому протекает ток  $I$ :  $P = EI$ . Источник может как вырабатывать, так и потреблять (заряд аккумулятора) электрическую энергию. Если направления ЭДС и тока через источник ЭДС совпадают, мощность источника записывают в уравнении баланса мощностей с положительным знаком. Он работает в режиме генератора. При противоположных направлениях ЭДС и тока мощность в уравнении баланса учитывают с отрицательным знаком (режим потребителя).

Согласно закону сохранения энергии, в элементах цепи потребляется столько энергии, сколько ее отдается находящимися в ней источниками. Так как мощность – это энергия, потребляемая в единицу времени, то *алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых всеми источниками энергии в цепи, равна сумме мощностей, потребляемых в ее резистивных элементах:*

$$\sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{k=1}^m r_k I_k^2. \quad (2.11)$$

Это равенство называют *уравнением баланса мощностей*.

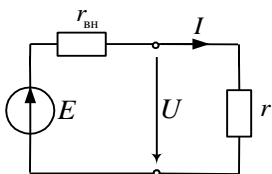


Рисунок 2.14 – Схема цепи

В качестве примера запишем уравнение баланса мощностей для схемы цепи, приведенной на рисунке 2.14:  $EI = r_{\text{вн}} I^2 + rI^2$ .

Мощность  $EI$ , вырабатываемую источником ЭДС, называют *полной мощностью*, мощность  $rI^2$ , потребляемую нагрузкой, – *полезной мощностью*, а мощность  $r_{\text{вн}} I^2$ , расходуемую внутри источника ЭДС, – *мощностью потерь*. Мощность  $P$  в цепях постоянного тока измеряется в

ваттах (Вт).

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

Электрические цепи могут работать в различных режимах.

*Согласованным* называется режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение. Максимальные значения мощностей получаются при определенном соотношении (согласовании) параметров электрической цепи.

Под *режимом холостого хода* (ХХ) понимается такой режим, при котором через источник не протекает ток.

*Режимом короткого замыкания* (КЗ) называется режим, возникающий при соединении между собой без какого-либо сопротивления (накоротко) зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение.

При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи, электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания часто является аварийным.

## 2.4 Расчет сложных цепей постоянного тока

В ходе расчета сложной цепи необходимо определить некоторые электрические параметры (в первую очередь токи и напряжения на элементах) на основе исходных значений величин, заданных в условии задачи. Если электрическая цепь с помощью эквивалентных преобразований *не сводится* к одноконтурной цепи, то для ее расчета используются специальные методы: уравнений Кирхгофа, контурных токов, наложения, узловых потенциалов, эквивалентного генератора.

Для проверки правильности вычисления токов необходимо составить баланс мощностей. Если баланс мощностей соблюдается, то расчет токов выполнен правильно.

Рассмотрим каждый из перечисленных методов.

### 2.4.1 Метод уравнений Кирхгофа

Самым общим методом расчета электрических цепей является *метод уравнений Кирхгофа* (МУК). Суть его заключается в составлении системы уравнений в соответствии с первым и вторым законами Кирхгофа и решении этой системы относительно неизвестных токов. Система уравнений разрешима, если все входящие в нее уравнения являются линейно независимыми и число уравнений в системе равно числу неизвестных величин.

Для электрической цепи, содержащей  $y$  узлов и  $b$  ветвей, *по первому закону Кирхгофа* можно составить столько уравнений, сколько узлов имеет электрическая цепь, т. е.  $y$  уравнений. Однако линейно независимыми будут только  $y - 1$  уравнения.

*По второму закону Кирхгофа* можно составить  $n = b - (y - 1)$  линейно независимых уравнений. При этом общее число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, будет равно числу ветвей электрической цепи.

Расчет электрических цепей с помощью законов Кирхгофа целесообразно проводить в следующем порядке.

1 Определить число узлов  $y$  и число ветвей  $b$  в электрической цепи. В соответствии с этим найти количество уравнений, которые необходимо составить по первому и второму законам Кирхгофа.

2 Обозначить на схеме цепи токи в ветвях и *произвольно* выбрать их направления. Выбрать независимые замкнутые контуры электрической цепи таким образом, чтобы в каждый контур входило возможно меньшее число ветвей, а каждый последующий контур включал хотя бы одну новую ветвь. Произвольно задаться направлением обхода контуров.

3 Составить  $y - 1$  уравнений по первому закону Кирхгофа. При этом считать положительными токи, входящие в узел, а отрицательными – выходящие из узла, или наоборот.

4 Составить  $n = b - (y - 1)$  уравнений по второму закону Кирхгофа. В этих уравнениях значение ЭДС берется со знаком «+», если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура. Падения напряжений на сопротивлениях в замкнутом контуре электрической цепи берутся со знаком «+», если направление обхода контура совпадает с выбранным направлением тока, и со знаком «-», если не совпадает.

5 Решить составленную систему уравнений относительно неизвестных токов. Если при этом некоторые токи получаются отрицательными, это означает, что их действительные направления противоположны произвольно выбранным. Положительные направления этих токов на схеме обратные.

6 Проверить правильность решения задачи путем составления уравнения баланса мощностей.

### Расчет сложной цепи с помощью законов Кирхгофа

**Пример 2.3.** В электрической цепи (рисунок 2.15)  $E_1 = 50$  В,  $E_2 = 10$  В,  $r_{i1} = 0,4$  Ом,  $r_{i2} = 1$  Ом,  $r_1 = 3$  Ом,  $r_2 = r_3 = 2$  Ом. Требуется определить токи в ветвях.

*Решение.* В схеме два узла и три ветви. Следовательно, по первому закону Кирхгофа необходимо составить одно уравнение, а по второму – два. Обозначим на схеме электрической цепи узлы и стрелками произвольно укажем положительные направления токов в ветвях. Выберем два независимых контура и стрелками покажем направления их обхода. Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для первого узла:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для выбранных независимых контуров:

$$\begin{cases} (r_1 + r_{i1})I_1 + r_3I_3 = E_1; \\ -(r_2 + r_{i2})I_2 - r_3I_3 = -E_2. \end{cases}$$

Полученные уравнения образуют систему независимых уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ 3,4I_1 + 2I_3 = 50; \\ -3I_2 - 2I_3 = -10. \end{cases}$$

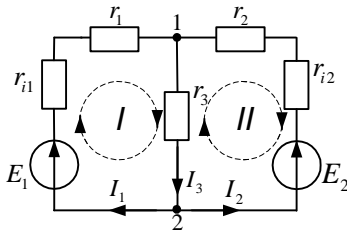


Рисунок 2.15 – Схема цепи

Решив эту систему, определим токи в ветвях:  $I_1 = 10$  А,  $I_2 = -2$  А,  $I_3 = 8$  А. По полученным знакам токов устанавливаем, что действительные направления токов  $I_1$  и  $I_3$  совпадают, а тока  $I_2$  – противоположно произвольно выбранному положительному направлению.

Правильность расчета токов проверяем уравнением баланса мощностей:

$$\begin{aligned} E_1I_1 + E_2I_2 &= I_1^2(r_{i1} + r_1) + I_2^2(r_{i2} + r_2) + I_3^2r_3; \\ 50 \cdot 10 + 10 \cdot (-2) &= 10^2 \cdot (0,4 + 3) + (-2)^2 \cdot (1 + 2) + 8^2 \cdot 2; \\ 480 \text{ Вт} &= 480 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Баланс мощностей соблюдается – значит расчет выполнен *правильно*.

Недостатком рассмотренного метода расчета электрических цепей является его громоздкость (число уравнений равно числу ветвей). Поэтому на его основе разработаны методы, позволяющие упростить решение.

#### 2.4.2 Метод контурных токов

Метод контурных токов (МКТ) является одним из основных методов расчета сложных электрических цепей, которым широко пользуются на практике. Расчет сложных электрических цепей *методом контурных токов* сводится к решению системы уравнений, составленных только по второму закону Кирхгофа. Таких уравнений получается  $n - b - (y - 1)$  (для цепи, со-

держашей  $u$  узлов и  $b$  ветвей), т. е. на  $u - 1$  меньше, чем при расчете электрической цепи методом уравнений Кирхгофа. В этом заключается преимущество метода контурных токов.

Полагается, что в каждом независимом контуре существует контурный ток, который независимо от других токов создает падение напряжения на тех сопротивлениях электрической цепи, по которым он проходит. Контурные токи обозначают буквой  $I$  с римскими цифрами в индексе или арабскими сдвоенными цифрами:  $I_I, I_{II}, I_{III}$  или  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$  и т. д. Контурный ток – это условный ток, замыкающийся по контурам схемы.

Направления контурных токов выбирают произвольно (по ходу часовой стрелки или против) и показывают стрелками внутри контуров, как это сделано на рисунке 2.16. Эти токи по абсолютному значению равны токам  $I_1$  и  $I_2$  в ветвях, по которым проходит только один из контурных токов, т. е.  $I_I = I_1$  и  $I_{II} = I_2$ .

При расчете электрических цепей рассматриваемым методом кроме контурных токов вводят еще ряд понятий: контурные ЭДС, собственные и взаимные сопротивления.

*Контурной ЭДС* называют алгебраическую сумму всех ЭДС контура. При этом обход контура производят по направлению контурного тока и ЭДС берут со знаком «+», если ее направление совпадает с направлением контурного тока, и со знаком «-», если эти направления противоположны. Контурные ЭДС обозначают аналогично контурным токам. В рассматриваемом примере контурные ЭДС  $E_I = E_1$  и  $E_{II} = -E_2$ .

*Собственным сопротивлением контура* называют сумму всех сопротивлений, входящих в данный контур. При этом каждое сопротивление берется с положительным знаком. Собственные сопротивления контуров обозначаются буквой  $r$  с двойными индексами, соответствующими номеру контура. В рассматриваемом примере собственные сопротивления контуров  $r_{11} = r_1 + r_3$ ,  $r_{22} = r_2 + r_3$ .

*Взаимным (или смежным) сопротивлением контуров* называют сопротивление, входящее одновременно в два разных контура. Его обозначают буквой  $r$  с двумя индексами, первый из которых соответствует номеру рассматриваемого контура, а второй – номеру контура, имеющего общее (смежное) сопротивление с рассматриваемым контуром.

Взаимное сопротивление берут со знаком «+», если контурные токи, проходящие по этому сопротивлению, имеют одинаковое направление, и со знаком «-», если направления контурных токов противоположны. В рассматриваемом примере взаимное сопротивление первого и второго контуров

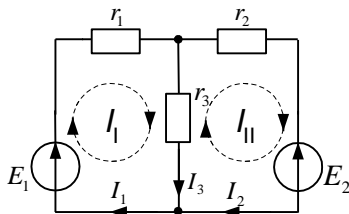


Рисунок 2.16 – Схема цепи

$r_{12} = -r_3$ , и  $r_{21} = -r_3$ . Отсюда видно, что  $r_{12} = r_{21}$ , т. е. взаимные сопротивления, отличающиеся одно от другого порядком индексов, равны между собой.

С учетом введенных понятий систему уравнений для рассматриваемого примера можно записать в виде:

$$\begin{cases} r_{11}I_1 + r_{12}I_{II} = E_1; \\ r_{21}I_1 + r_{22}I_{II} = E_{II}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Решив систему уравнений (2.12), определим контурные токи  $I_1$  и  $I_{II}$ . Зная контурные токи, можно определить токи в ветвях. Если в ветви проходит только один контурный ток, то истинный ток в ветви будет равен контурному току по значению и одинаково направлен. Токи в ветвях, по которым проходит несколько контурных токов, равны их алгебраической сумме.

В рассмотренном примере токи в ветвях равны:  $I_1 = I_1$ ,  $I_2 = I_{II}$ ,  $I_3 = I_1 - I_{II}$ . Если полученное значение тока имеет знак «-», то действительное его направление в ветви противоположно произвольно выбранному.

В общем случае для электрической цепи, содержащей  $N$  независимых контуров, система контурных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} r_{11}I_1 + r_{12}I_{II} + \dots + r_{1n}I_N = E_1; \\ r_{21}I_1 + r_{22}I_{II} + \dots + r_{2n}I_N = E_{II}; \\ \dots\dots\dots \\ r_{n1}I_1 + r_{n2}I_{II} + \dots + r_{nn}I_N = E_N, \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $r_{kk}$  – собственное сопротивление  $k$ -го контура;

$r_{jk}$  – взаимное сопротивление  $j$ -го и  $k$ -го контуров ( $j = \overline{1, n}$ ;  $k = \overline{1, n}$ );

$E_k$  – контурная ЭДС  $k$ -го контура.

Решая систему уравнений (2.13) с помощью определителей, находим ток в любом контуре:

$$I_k = \Delta_k / \Delta, \quad (2.14)$$

где определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{vmatrix}. \quad (2.15)$$

Определитель  $\Delta_k$  получается из определителя  $\Delta$  путем замены элементов  $k$ -го столбца свободными членами:



$$\Delta_k = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & E_1 & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & E_{11} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & E_N & \dots & r_{nn} \end{vmatrix}. \quad (2.16)$$

Таким образом, при расчете электрических цепей методом контурных токов целесообразно придерживаться следующего порядка.

- 1 Вычерчиваем принципиальную схему цепи и обозначаем все элементы.
- 2 Определяем все независимые контуры.
- 3 Произвольно задаемся направлением протекания контурных токов в каждом из независимых контуров (по часовой стрелке или против). Обозначаем эти токи.
- 4 По второму закону Кирхгофа, относительно контурных токов, составляем уравнения для всех независимых контуров.
- 5 Решаем любым методом полученную систему уравнений относительно контурных токов и определяем их.
- 6 Произвольно задаемся направлением реальных токов всех ветвей и обозначаем их. Маркировать реальные токи надо таким образом, чтобы не путать с контурными. Для нумерации реальных токов можно использовать одиночные арабские цифры ( $I_1, I_2, I_3$  и т. д.).
- 7 Переходим от контурных токов к реальным, считая, что реальный ток ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих по данной ветви. При алгебраическом суммировании без изменения знака берется контурный ток, направление которого совпадает с принятым направлением реального тока ветви. В противном случае контурный ток умножается на минус единицу.
- 8 Проверяем правильность решения, составив уравнение баланса мощностей.

#### Расчет сложной цепи с помощью метода контурных токов.

**Пример 2.4.** В электрической цепи (см. рисунок 2.16)  $E_1 = 6$  В,  $E_2 = 3$  В,  $r_1 = r_2 = r_3 = 1$  Ом. Требуется определить силу тока в ветвях.

*Решение.* В схеме цепи два независимых контура. Произвольно обозначим на схеме положительные направления контурных токов  $I_I$  и  $I_{II}$  стрелками. Собственные сопротивления контуров  $r_{11} = r_1 + r_3 = 1 + 1 = 2$  Ом,  $r_{22} = r_2 + r_3 = 1 + 1 = 2$  Ом. Взаимные сопротивления  $r_{12} = r_{21} = -r_3 = -1$  Ом. Контурные ЭДС  $E_I = E_1 = 6$  В,  $E_{II} = -E_2 = -3$  В. Подставив найденные значения в систему контурных уравнений (2.12), получим:

$$\begin{cases} 2I_I - I_{II} = 6; \\ -I_I + 2I_{II} = -3. \end{cases}$$

Решая данное уравнение, находим контурные токи  $I_I = 3 \text{ А}$  и  $I_{II} = 0 \text{ А}$ .

Сила токов в ветвях  $I_1 = I_I = 3 \text{ А}$ ,  $I_2 = I_{II} = 0$ ,  $I_3 = I_I - I_{II} = 3 - 0 = 3 \text{ А}$ .

Баланс мощностей соблюдается ( $18 \text{ Вт} = 18 \text{ Вт}$ ) – значит расчет выполнен правильно.

Достоинством метода контурных токов по сравнению с методом уравнений Кирхгофа является меньшее число уравнений и возможность формализации решения, что позволяет рассчитывать сложные электрические цепи с применением вычислительных машин.

### 2.4.3 Метод межузлового напряжения

Метод межузлового напряжения дает возможность весьма просто, без решения систем уравнений, провести анализ и расчет электрической цепи, содержащей несколько параллельно соединенных активных и пассивных ветвей, включенных между двумя узлами, например, между  $a$  и  $c$  на рисунке 2.17.

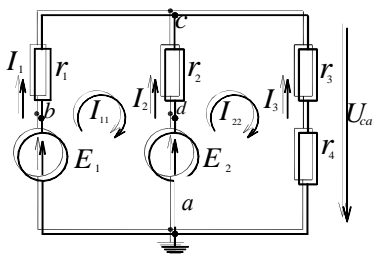


Рисунок 2.17 – Схема цепи

Идея метода состоит в том, что по расчетной формуле (2.17) определяют напряжение между узлами, называемое межузловым напряжением ( $U_{ca}$  на рисунке 2.17), а затем по формуле (2.17) рассчитывают токи в ветвях.

Порядок расчета.

1 Произвольно принимаем, что потенциал узла  $c$  больше потенциала узла  $a$  ( $\varphi_c > \varphi_a$ ). Тогда напряжение  $U_{ca}$ , общее для всех ветвей схемы, будет направлено так, как показано на рисунке 2.17.

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

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

4 Определяем межузловое напряжение из выражения

$$U_{ca} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}, \quad (2.17)$$

где  $n$  – число ветвей, заключенных между узлами;

$E_k$  – ЭДС, находящаяся в ветви с номером  $k$ ;

$g_k$  – проводимость ветви с номером  $k$ .

Если ЭДС в ветви направлена к узлу  $c$  большим потенциалом, обозначенному первым индексом ( $c$ ), то произведение  $E_k g_k$  записывается со

знаком плюс, если от этого узла – со знаком минус. При отсутствии в ветви источника ЭДС соответствующее произведение  $E_k g_k = 0$ .

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

$$I_k = (E_k - U_{ca}) / r_k = E_k g_k - U_{ca} g_k. \quad (2.18)$$

### Расчет сложной цепи методом межузлового напряжения

**Пример 2.5.** Для цепи, изображенной на рисунке 2.17, рассчитать все токи методом межузлового напряжения.

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

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

Рассчитываем проводимости всех ветвей:

$$g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{4} \text{ См}, \quad g_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{4} \text{ См}, \quad g_3 = \frac{1}{r_3 + r_4} = \frac{1}{1+3} = \frac{1}{4} \text{ См}.$$

Для определения межузлового напряжения используем выражение (2.17):

$$U_{ca} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{24 \cdot \frac{1}{4} + 12 \cdot \frac{1}{4}}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}} = 12 \text{ В}.$$

Рассчитываем токи ветвей на основании формулы (2.18):

$$I_1 = E_1 g_1 - U_{ca} g_1 = 24 \cdot \frac{1}{4} - 12 \cdot \frac{1}{4} = 3 \text{ А}, \quad I_2 = E_2 g_2 - U_{ca} g_2 = 12 \cdot \frac{1}{4} - 12 \cdot \frac{1}{4} = 0 \text{ А}, \\ I_3 = -U_{ca} g_3 = -12 \cdot 1/4 = -3 \text{ А}.$$

## 2.5 Потенциальная диаграмма электрической цепи

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

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

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

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

После расчета потенциалов всех точек строят в прямоугольной системе координат потенциальную диаграмму. По горизонтальной оси откладывают значения сопротивлений, а по вертикальной – потенциалы. Потенциальная диаграмма начинается с нулевого потенциала и заканчивается после обхода контура таковым.

### Построение потенциальной диаграммы электрической цепи.

**Пример 2.6.** В качестве примера рассмотрим электрическую цепь, часть которой приведена на рисунке 2.18, имеющую следующие параметры:  $E_3 = 2$  В,  $E_4 = 1,2$  В,  $E_5 = 5,6$  В,  $r_3 = 10$  Ом,  $r_4 = 20$  Ом,  $r_5 = 10$  Ом.

Для дальнейшего использования при построении потенциальной диаграммы используем следующие расчетные данные:  $I_3 = 0,4$  А,  $I_4 = 0,12$  А,  $I_5 = 0,4$  А.

*Решение.* Разбиваем данный контур на участки, границы которых обозначаем буквами  $a, b, c, d, e, f$ . Заземляем точку  $a$ , условно считая ее потенциал нулевым, и обходим контур по часовой стрелке от этой точки в той последовательности, в какой точки встречаются на пути. Таким образом,  $\varphi_a = 0$ . Следующей точкой на пути обхода контура будет точка  $b$ . На участке  $ab$

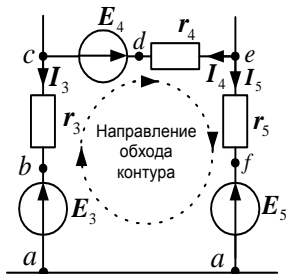


Рисунок 2.18 – Контур электрической цепи

находится источник ЭДС  $E_3$ . Так как на данном участке перемещение совершается от отрицательного полюса источника к положительному, то потенциал повышается на значение величины  $E_3$ ,

$$\varphi_b = \varphi_a + E_3 = 0 + 2 = 2 \text{ В.}$$

При переходе от точки  $b$  к точке  $c$  происходит увеличение потенциала на значение величины падения напряжения на резисторе  $r_3$  (направление обхода контура не совпадает с направлением тока в резисторе  $r_3$ ),

$$\varphi_c = \varphi_b + I_3 r_3 = 2 + 0,4 \cdot 10 = 6 \text{ В.}$$

Выполнив аналогичные расчеты, найдем потенциалы остальных точек:

$$\varphi_d = \varphi_c + E_4 = 6 + 1,2 = 7,2 \text{ В;}$$

$$\varphi_e = \varphi_d + I_4 r_4 = 7,2 + 0,12 \cdot 20 = 9,6 \text{ В;}$$

$$\varphi_f = \varphi_e - I_5 r_5 = 9,6 - 0,4 \cdot 10 = 5,6 \text{ В};$$

$$\varphi_a = \varphi_f - E_5 = 5,6 - 5,6 = 0 \text{ В}.$$

Если расчет токов и потенциалов произведен верно, потенциал последней точки должен быть равен нулю, что дает возможность проверить правильность решения.

Результаты расчета используют для построения потенциальной диаграммы. На оси абсцисс откладывают сопротивление участков в той последовательности, как они встречаются при обходе контура от точки с нулевым потенциалом. Вдоль оси ординат откладывают рассчитанные ранее потенциалы соответствующих точек (рисунок 2.19).

Из потенциальной диаграммы можно найти напряжение между двумя любыми точками как разность потенциалов между ними.

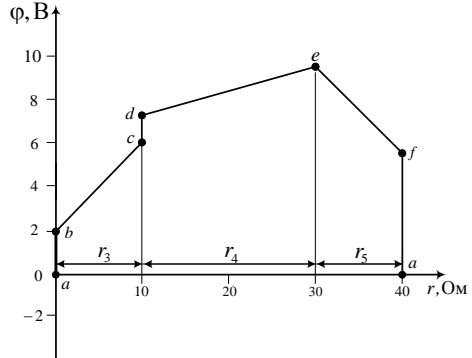


Рисунок 2.19 – Потенциальная диаграмма контура

### Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте и запишите закон Ома.
- 2 Как формулируются первый и второй законы Кирхгофа?
- 3 Как определить эквивалентное сопротивление участка цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением сопротивлений?
- 4 Как распределяются ток и напряжение при последовательном и параллельном соединении приемников электрической энергии?
- 5 Каковы условия и методика эквивалентного преобразования схем с соединением сопротивлений в виде треугольника и звезды?
- 6 Запишите уравнение баланса мощностей, укажите для чего оно используется.
- 7 В чем суть и каков порядок расчета электрических цепей постоянного тока методом уравнений Кирхгофа?
- 8 Каким образом составляется система уравнений, определяются собственные и взаимные сопротивления, контурные ЭДС и токи в ветвях цепи?
- 9 В каких случаях целесообразно применение метода межузлового напряжения для расчета электрических цепей?
- 10 Почему результат расчета электрической цепи не зависит от выбора положительных направлений токов?
- 11 Опишите методику построения потенциальной диаграммы.

## 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### 3.1 Основные характеристики переменного тока

Более широкое применение переменного тока в сравнении с постоянным обусловлено следующими преимуществами: трансформация, способствующая передаче на большие расстояния; простое и рациональное производство; легкое преобразование электрической энергии в механическую.

Процессы в цепях переменного тока принципиально отличаются от процессов в цепях постоянного, токи и напряжения которых неизменны. В цепях переменного тока, в отличие от постоянного, при изменениях напряжений и токов изменяются магнитные и электрические поля, связанные с цепью.

*Переменным током* называется ток, который изменяется с течением времени. Это определение относится также к переменным напряжениям и ЭДС.

Значение переменной величины в данный момент называют мгновенным. Мгновенные значения обозначают строчными буквами:  $i$ ,  $u$ ,  $e$ .

Переменные токи могут быть периодическими и непериодическими. *Периодическим* называют ток, мгновенные значения которого повторяются через равные промежутки времени. На практике широкое применение находит периодический ток, являющийся синусоидальной функцией времени и называемый синусоидальным током (рисунок 3.1).

Преимущества синусоидальной формы кривых тока и напряжения перед другими периодическими формами: форма кривых после трансформации постоянная; плавное изменение величины, отсутствие перенапряжений и толчков тока, которые недопустимы в энергетике.

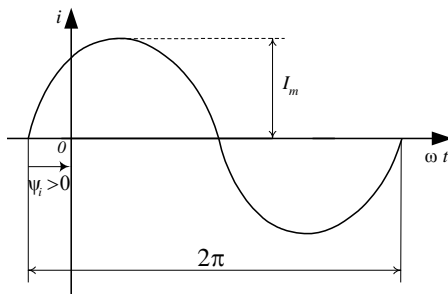


Рисунок 3.1 – Синусоидальный ток

Наименьший промежуток времени, через который мгновенные значения повторяются, называют *периодом*  $T$ :  $i(t) = i(t + T)$ .

Период – время одного полного колебания.

Величину, обратную периоду, называют *частотой*  $f$ :  $f = 1/T$ . Частота – число полных колебаний в единицу времени, измеряется в герцах (Гц). Один герц соответствует одному колебанию в

секунду. Частота сети прямо связана с частотой вращения ротора генератора электростанции.

Диапазон частот, применяемых на практике, очень широк: от долей герца в геологоразведке до десятков тысяч мегагерц (МГц) в радиолокации. В энергосистеме Республики Беларусь и стран Европы частота промышленного тока равна 50 Гц, а, например, в США – 60 Гц.

Аналитическая запись синусоидального тока имеет вид

$$i = I_m \sin(2\pi f t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (3.1)$$

Аналогичное выражение можно записать и для синусоидального переменного напряжения и ЭДС:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad e = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

где  $i, u, e$  – мгновенные значения;

$I_m, U_m, E_m$  – максимальные (амплитудные) значения;

$(\omega t + \psi)$  – фаза колебания, характеризующая развитие процесса во времени;

$\omega t$  – текущий угол, который отсчитывают от начала отсчета времени;

$\omega$  – угловая циклическая частота, определяющая скорость изменения фазы,  $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$ ;

$\psi$  – начальная фаза, т. е. угол, определяющий значение функции в начальный момент времени.

При графическом изображении синусоидального тока по горизонтальной оси откладывают текущий угол  $\omega t$  (рисунок 3.2). Начальная фаза ( $\psi$ ) показывает значение фазы в момент времени  $t = 0$ . Если имеется несколько синусоидальных величин, изменяющихся с одинаковой частотой, начальные фазы которых не одинаковы (см. рисунок 3.2), то говорят, что они сдвинуты одна относительно другой по фазе.

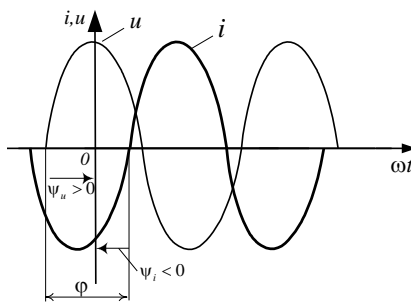


Рисунок 3.2 – Начальные фазы синусоидальных величин

*Сдвиг фаз* – это алгебраическая величина, равная разности начальных фаз. Например, для тока и напряжения, графики которых приведены на рисунке 3.2,  $\phi = \psi_u - \psi_i$ . Здесь  $\phi > 0$ , т. е. напряжение опережает по фазе ток. При  $\phi < 0$  напряжение отстает по фазе от тока. Если  $\phi = \pi$ , то напряжение и ток в противофазе. Если  $\phi = 0$ , то напряжение и ток совпадают по фазе.

Кроме рассмотренных выше параметров переменный ток характеризуют также его действующим и средним значениями.

*Действующим значением периодического переменного тока (действующим током) I* называют среднеквадратичное его значение за период:

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

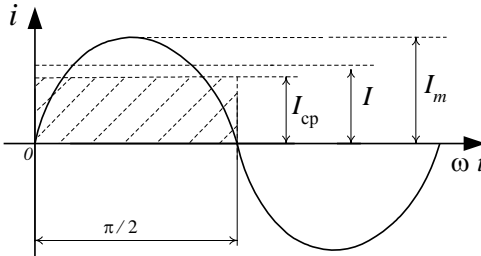
Возведя обе части этого выражения в квадрат и умножив их на  $rT$ , где  $r$  – некоторое активное сопротивление, получим  $rTI^2 = \frac{1}{T} \int_0^T ri^2 dt$ .

Это равенство показывает, что *действующий периодический ток по значению равен такому постоянному току  $I$* , который в активном сопротивлении  $r$  за период  $T$  выделяет такое же количество энергии, как и данный переменный ток  $i$ .

Для обозначения действующих значений тока и напряжения используют прописные латинские буквы  $I$ ,  $U$ . Действующие значения токов и напряжений показывают большинство электроизмерительных приборов (амперметры, вольтметры). В действующих значениях указываются номинальные токи и напряжения в паспортах различных электроприборов и устройств.

Для переменного тока, изменяющегося по синусоидальному закону, можно установить зависимость между его действующим значением  $I$  и амплитудным  $I_m$

$$I = I_m / \sqrt{2} \approx 0,707I_m. \quad (3.2)$$



Соотношения, аналогичные выражению (3.2), справедливы для напряжения и ЭДС.

Среднее значение синусоидального переменного тока  $I_{cp}$  за полупериод (рисунок 3.3) определяется вы-

рисунок 3.3 – Действующее и амплитудное значения синусоидального тока

$$I_{cp} = \frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637I_m.$$

### 3.2 Цепи синусоидального тока с пассивными элементами

Цепи переменного тока могут обладать резистивным сопротивлением  $r$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ .

*Индуктивность* есть коэффициент пропорциональности между потокоцеплением и током:

$$L = \Psi / i. \quad (3.3)$$



Сила тока и напряжение на зажимах индуктивного элемента (рисунок 3.4) связаны через дифференцирование:

$$u_L = L \frac{di}{dt}. \quad (3.4)$$

При прохождении тока  $i$  через индуктивный элемент с числом витков  $w$  в ней возникает магнитный поток  $\Phi$ .

Потокоцеплением  $\Psi$  индуктивного элемента называют произведение потока  $\Phi$  и числа витков  $w$ :

$$\Psi = w\Phi. \quad (3.5)$$

Индуктивность измеряется в генри (Гн).

Емкость  $C$  есть коэффициент пропорциональности между величиной заряда и напряжением:

$$q = C u. \quad (3.6)$$

Ток и напряжение на зажимах емкостного элемента (рисунок 3.5) связаны через интегрирование:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt. \quad (3.7)$$

На емкостном элементе накапливается заряд  $q$ , величина которого пропорциональна напряжению на зажимах элемента. Емкость позволяет выразить заряд через напряжение; ее значение определяется отношением заряда к напряжению:

$$C = q / u_c. \quad (3.8)$$

Емкость измеряется в фарадах (Ф).

В цепях переменного тока изменение во времени питающего напряжения влечет за собой изменение тока, а также магнитного и электрического полей, связанных с цепью. Результатом этих изменений является возникновение ЭДС само- и взаимной индукции в цепях с катушками индуктивности, а в цепях с конденсаторами появляются зарядные и разрядные токи, которые создают сдвиг по фазе между напряжениями и токами в таких цепях. Отмеченные физические процессы учитывают введением реактивных сопротивлений, что усложняет расчет цепей переменного тока, так как приходится определять не только значение величины тока, но и его угол сдвига по отношению к напряжению.

Все основные законы цепей постоянного тока справедливы и для цепей переменного тока, но только для мгновенных значений или значений в векторной (комплексной) форме. На основе этих законов можно составить уравнения, позволяющие осуществить расчет цепи. Как правило, целью расчета цепи переменного тока является определение токов, напряжений, углов сдвига фаз и мощностей на отдельных участках.

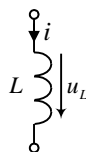


Рисунок 3.4 –  
Индуктивный  
элемент

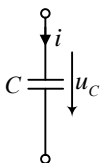


Рисунок 3.5 –  
Емкостный  
элемент

*Цепь синусоидального тока с резистивным элементом.* Если к резистивному элементу  $r$  подключить синусоидальное напряжение  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ , то синусоидальный ток

$$i(t) = u(t) / r = I_m \sin(\omega t + \psi_i);$$

$$I_m = U_m / r; \quad \psi_i = \psi_u.$$

Таким образом, в цепи синусоидального тока с резистивным элементом напряжение и ток совпадают по фазе, т. е. сдвиг фаз между напряжением и током  $\phi = \psi_u - \psi_i$  равен нулю.

Векторная диаграмма и временные графики напряжения и тока для рассматриваемой цепи приведены на рисунке 3.6.

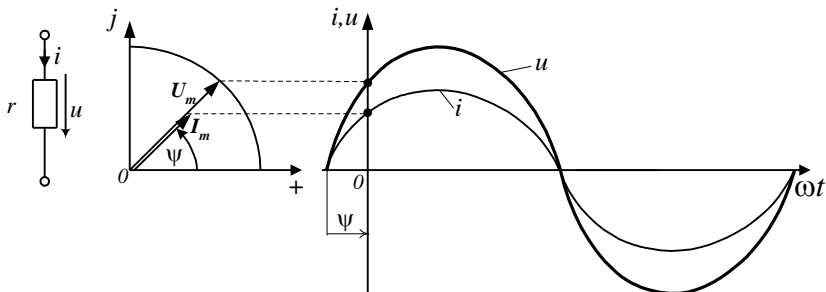


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма и временные графики напряжения и тока

Следует отметить, что при переменном токе резистивное сопротивление проводника, определяемое как отношение активной мощности к квадрату действующего тока ( $r = P / I^2$ ), больше его сопротивления при постоянном токе, определяемого по формуле

$$r = \rho l / s,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;

$l$  – длина проводника;

$s$  – площадь поперечного сечения.

Это происходит из-за так называемого поверхностного эффекта, который заключается в том, что плотность переменного тока в поперечном сечении проводника возрастает от оси к поверхности проводника и особенно проявляется на высоких частотах.

*Цепь синусоидального тока с индуктивным элементом.* Если к идеальной катушке индуктивности, не имеющей активного сопротивления, приложено синусоидальное напряжение  $u(t)$ , то по ней проходит ток  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ . Этот ток наводит ЭДС самоиндукции  $e_L = -L di/dt$ , которая уравнивает приложенное к катушке напряжение  $u(t)$ . При

увеличении тока ЭДС  $e_L$  действует навстречу току, а при уменьшении – в направлении тока, противодействуя его уменьшению.

На основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений можно записать:  $u + e_L = 0$  или  $u = -e_L = L di/dt$ .

Подставив в последнюю формулу выражение для тока, после дифференцирования получим:

$$u(t) = L(di/dt) = \omega LI_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где  $U_m = \omega LI_m$ ;  $\psi_u = \psi_i + \pi/2$ .

Следовательно, в цепи с индуктивным элементом  $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$ , т. е. ток отстает по фазе от приложенного к ней напряжения на  $\pi/2$  (рисунок 3.7).

Для упрощения расчетов вводят понятие индуктивного сопротивления  $x_L = \omega L$ . Физический смысл индуктивного сопротивления заключается в препятствии прохождению тока из-за ЭДС самоиндукции, возникающего в индуктивном элементе при прохождении по нему переменного тока, и направленной навстречу приложенному напряжению.

Сопротивление  $x_L$  является линейной функцией частоты  $\omega$ . При  $\omega = 0$ , т. е. для постоянного тока, оно равно нулю. С увеличением  $\omega$  сопротивление  $x_L$  увеличивается.

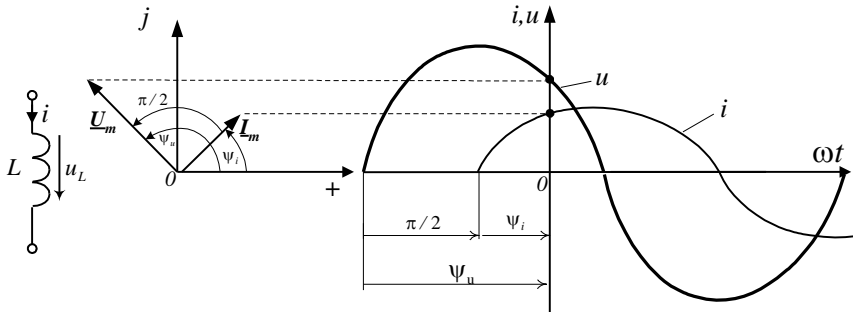


Рисунок 3.7 – Векторная диаграмма и временные графики напряжения и тока

*Цепь синусоидального тока с емкостным элементом.* Если к емкостному элементу приложено синусоидальное напряжение  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ , то ток в цепи

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} = -\omega CU_m \cos(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где  $I_m = \omega CU_m$ ;  $\psi_i = \psi_u + \pi/2$ .

При увеличении напряжения ток в цепи емкостного элемента будет зарядным, а при уменьшении – разрядным.

Следовательно, в цепи с емкостным элементом сдвиг фаз  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$ , т. е. ток, проходящий через емкостный элемент, опережает приложенное к нему напряжение по фазе на  $\pi/2$  (рисунок 3.8).

Для упрощения расчетов вводят понятие емкостного сопротивления  $x_C = 1/(\omega C)$ . Физический смысл емкостного сопротивления заключается в препятствии прохождению тока через конденсатор из-за наличия заряда на его обкладках. Сопротивление  $x_C$  обратно пропорционально частоте. При  $\omega = 0$ , что соответствует постоянному току, оно равно бесконечности, т. е. в установившемся режиме конденсатор не пропускает постоянный ток. С увеличением  $\omega$  сопротивление  $x_C$  уменьшается.

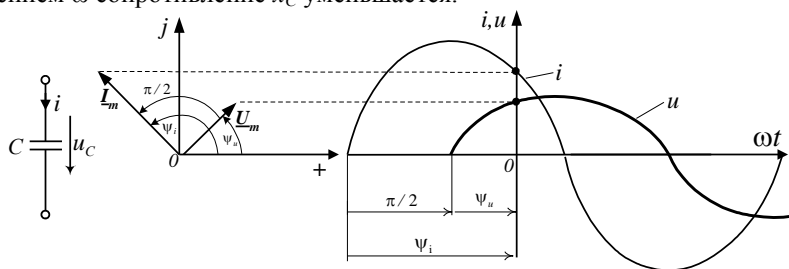


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма и временные графики напряжения и тока

Индуктивный и емкостный элементы имеют принципиальное отличие от резистивных элементов в том, что в них не происходит *необратимого* преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Поэтому, когда элементы сопоставляют по своему характеру, то резистивные элементы называют *активными*, а индуктивный и емкостный элементы – *реактивными*. Наличие тока в реактивном элементе объясняется периодическим обменом энергией между таким элементом и сетью.

### 3.3 Применение комплексных чисел для расчета цепей переменного тока

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

Комплексным числом  $\underline{A}$  называют выражение вида

$$\underline{A} = a + jb = Ae^{j\alpha} = A\cos\alpha + jA\sin\alpha, \quad (3.9)$$

где  $a$  – вещественная (действительная) часть комплексного числа;

$j$  – мнимая единица;

$b$  – мнимая часть;

$A$  – модуль;

$\alpha$  – аргумент;

$e$  – основание натурального логарифма.

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

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

Модуль комплексного числа

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3.10)$$

аргумент этого числа

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a} = \arccos \frac{a}{A} = \arcsin \frac{b}{A}, \quad (3.11)$$

вещественная часть

$$a = A \cos \alpha, \quad (3.12)$$

мнимая часть

$$b = A \sin \alpha. \quad (3.13)$$

Сопряженным комплексным числом называется такое число, которое отличается от исходного противоположным знаком перед мнимой частью. Например, исходное комплексное число  $\underline{A} = 5 + j3$ , тогда сопряженное ему число  $\underline{A}^* = 5 - j3$ . Звездочка над буквенным обозначением комплексного числа указывает на сопряженный характер выражения.

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

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

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi}. \quad (3.14)$$

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

$$\underline{z} = r + j(x_L - x_C). \quad (3.15)$$

После замены реальных параметров цепи на их комплексные символы дальнейший расчет выполняют методами, которые применяли для расчета цепей постоянного тока. Отличие состоит в том, что все математические операции необходимо выполнять с комплексными числами.

Суммировать эти числа необходимо в алгебраической форме записи. При этом отдельно складывают алгебраически вещественные части и

получают вещественную часть результата, а затем аналогично складывают мнимые части слагаемых и получают мнимую часть результата.

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

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

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

Сумма этих чисел

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

Произведение двух комплексных чисел

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

Частное от деления этих чисел

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

Квадрат комплексного числа

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

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

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

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

Комплексные токи и напряжения можно изображать в виде векторов на комплексной плоскости (рисунок 3.9), у которой ось ординат является мнимой, а ось абсцисс – вещественной. Для построения вектора комплексного числа в показательной форме  $\underline{A} = Ae^{j\alpha}$  достаточно из начала координат под углом  $\alpha$  (аргумент) к вещественной оси построить отрезок, в масштабе соответствующий модулю этого числа  $A$ .

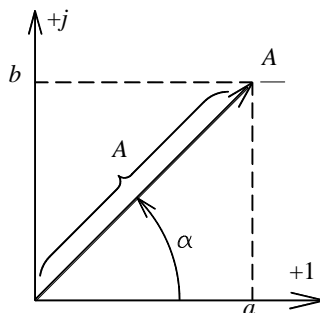


Рисунок 3.9 – Изображение вектора на комплексной плоскости

Если комплексное число задано в алгебраической форме, то начинается вектор из начала координат. Заканчивается он в точке, ордината которой соответствует мнимой части  $b$ , а абсцисса – вещественной части  $a$  изображаемого комплексного числа. На рисунке 3.9 показан пример изображения на комплексной плоскости в виде вектора комплексного числа

$$\underline{A} = Ae^{j\alpha} = a + jb.$$

*Цепь синусоидального тока с последовательным соединением элементов*

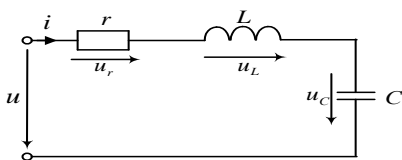


Рисунок 3.10 – Схема цепи с последовательным соединением элементов

$r, L, C$ . Если к цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов  $r, L, C$  (рисунок 3.10), приложено напряжение

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

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

то ток в ней

Так как напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, на индуктивности опережает, а на емкости отстает от тока на  $\pi/2$ , на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений можно записать  $u(t) = u_r + u_L + u_C$ .

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме для рассматриваемой цепи будет иметь вид:  $\underline{U}_m = \underline{I}_m (r + j\omega L - j1/(\omega C))$ .

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{z} = \underline{U}_m / \underline{I}_m = r + jx = ze^{j\varphi},$$

где  $r$  – активное сопротивление;

$x$  – реактивное сопротивление,  $x = x_L - x_C$ ;

$z$  – полное сопротивление,  $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ .

Построим векторную диаграмму. Обычно при ее построении не привязываются к комплексной плоскости, так как имеет значение только взаимное расположение векторов.

Построение векторной диаграммы начинают с вектора общей для данной цепи величины. При последовательном соединении элементов такой величиной является ток. Входное напряжение складывается из напряжений на трех элементах при учете сдвига фаз. Напряжение на резисторе совпадает с током по фазе. Напряжение на индуктивном элементе опережает ток на  $90^\circ$ , на емкостном – отстает на  $90^\circ$ .

Угол  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  – угол сдвига фаз тока и полного напряжения.

При  $x_L > x_C$  угол сдвига фаз между приложенным к цепи напряжением и током в цепи положителен, т. е.  $\varphi > 0$  (рисунок 3.11, а). Ток в цепи отстает по фазе от приложенного к ней напряжения. Сопротивление цепи имеет активно-индуктивный характер.

При  $x_L < x_C$  угол сдвига фаз отрицателен, т. е.  $\varphi < 0$  (рисунок 3.11, б). Ток в цепи опережает по фазе приложенное к ней напряжение. Сопротивление цепи имеет активно-емкостный характер.

При  $x_L = x_C$  угол сдвига фаз  $\varphi = 0$  (рисунок 3.11, в). Ток в цепи совпадает по фазе с приложенным к ней напряжением. Сопротивление цепи имеет активный характер, и по отношению к входным зажимам эквивалентная цепь содержит только активное сопротивление  $r$ . При этом амплитуда тока в цепи  $I_m = U_m/r$  будет максимальна.

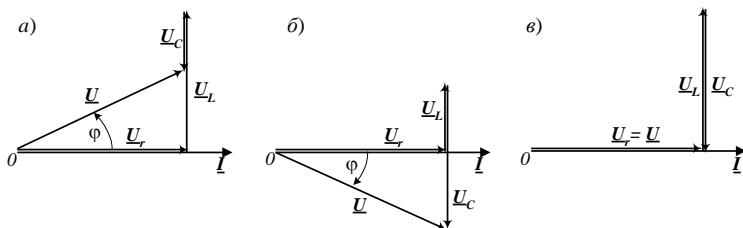


Рисунок 3.11 – Векторные диаграммы

Рассматриваемое явление в цепи синусоидального тока с последовательным соединением элементов  $r$ ,  $L$  и  $C$ , при котором ее общее полное сопротивление является активным, называют *резонансом напряжений*. При резонансе  $z = \sqrt{r^2 + x^2} = r$ , значит цепь имеет чисто активный характер.

Добиться резонанса напряжений можно изменением индуктивности  $L$ , емкости  $C$  или частоты  $\omega$ .

В электротехнике связи (радиотехника, проволочная телефония, автоматика) явление резонанса напряжений широко используют для «усиления» гармонических колебаний, поступающих на вход системы (рисунок 3.12).



В электроэнергетических устройствах в большинстве случаев явление, связанное с неожиданным появлением перенапряжений, нежелательное.

*Цепь синусоидального тока с параллельным соединением элементов  $r, L, C$ .*

Если к цепи, состоящей из параллельно соединенных элементов  $r, L, C$  (рисунок 3.13), приложено синусоидальное напряжение, то в ее неразветвленной части и ветвях будут проходить синусоидальные токи. Учитывая то, что ток в

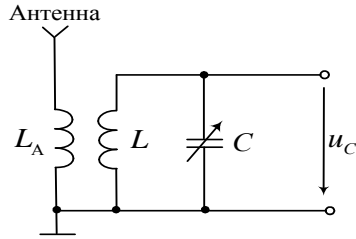


Рисунок 3.12 – Пример входной цепи радиоприемника

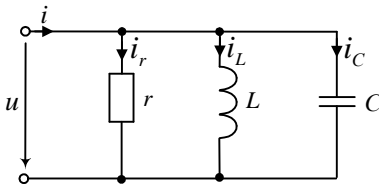


Рисунок 3.13 –  
Схема цепи с параллельным соединением элементов

активном сопротивлении  $i_r(t)$  совпадает по фазе с приложенным к нему напряжением, ток в индуктивности  $i_L(t)$  отстает, а ток в емкости  $i_C(t)$  опережает по фазе приложенное соответственно к  $L$  и  $C$  напряжение на  $\pi/2$ . На основании первого закона Кирхгофа запишем выражение для тока в неразветвленной части цепи:

$$I(t) = I_r(t) + I_L(t) + I_C(t),$$

где  $I_r = gU$ ;  $g = 1/r$ ;  $I_L = b_L U$ ;  $b_L = 1/(\omega L)$ ;  $I_C = b_C U$ ;  $b_C = \omega C$ .

Комплексная полная проводимость цепи

$$\underline{Y} = \underline{I}_m / \underline{U}_m = g + jb = ye^{-j\varphi},$$

где  $b = b_L - b_C$ ;  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ ;  $\varphi = \text{arctg}(b/g)$ .

Характер сопротивления цепи зависит от индуктивной  $b_L$  и емкостной  $b_C$  проводимостей.

При  $b_L > b_C$  (рисунок 3.14, а) сдвиг фазы между приложенным к цепи напряжением и током в ее неразветвленной части  $\varphi > 0$ , т. е. будет положительным. Ток в неразветвленной части цепи отстает от приложенного к ней напряжения. Сопротивление цепи в данном случае носит активно-индуктивный характер.

При  $b_L < b_C$  (рисунок 3.14, б)  $\varphi < 0$ , т. е. будет отрицательным. Ток в неразветвленной части цепи опережает приложенное напряжение по фазе. Сопротивление цепи носит активно-емкостный характер.

При  $b_L = b_C$  (рисунок 3.14, в)  $\varphi = 0$ . Ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с приложенным к ней напряжением. Сопротивление цепи активное, и по отношению к входным зажимам цепь содержит только ак-

тивное сопротивление  $r = 1/g$ . При этом амплитуда тока в неразветвленной части цепи  $I_m = gU_m$  будет меньше, чем в рассмотренных выше случаях, где  $I_m = U_m \sqrt{g^2 + b^2}$ . Рассматриваемое явление в цепи гармонического тока с параллельным соединением элементов  $r, L, C$ , при котором ее общая полная проводимость является активной, называют *резонансом токов*.

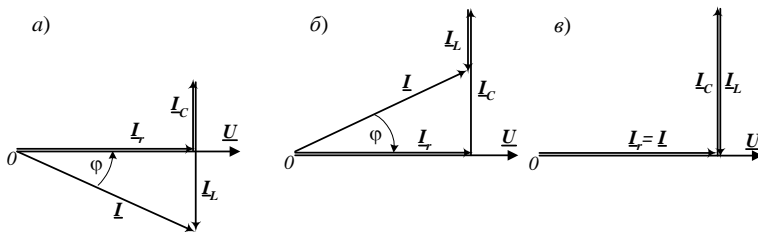


Рисунок 3.14 – Векторные диаграммы

Следует отметить, что при изменении частоты приложенного к цепи напряжения полная проводимость цепи и ее характер будут изменяться, так как реактивные проводимости  $b_L$  и  $b_C$  являются функциями частоты.

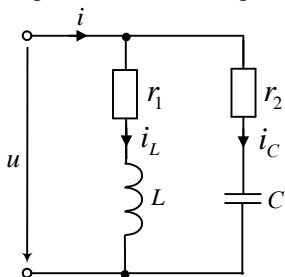


Рисунок 3.15 – Схема цепи

Для цепи, представленной на рисунке 3.15, условие резонанса токов

$$b = b_L - b_C = 0$$

или

$$\frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2} = \frac{x_C}{r_2^2 + x_C^2}.$$

Явление резонанса токов используют как фильтр-пробка для определенной частоты, для улучшения коэффициента мощности электроустановок.

### Расчет разветвленной цепи однофазного синусоидального тока

**Пример 3.1.** Электрическая цепь на рисунке 3.16, подключенная к сети переменного тока с действующим напряжением 220 В и частотой 50 Гц, имеет следующие численные значения параметров: активные сопротивления  $r_1 = 10$  Ом,  $r_2 = 5$  Ом,  $r_3 = 5$  Ом; индуктивности  $L_1 = 31,9$  мГн,  $L_2 = 22,3$  мГн,  $L_3 = 63,7$  мГн; емкость  $C_2 = 455$  мкФ.

Требуется определить токи ветвей, показания всех приборов, составить баланс мощностей. Рассчитать параметры реактивного элемента, который надо включить в неразветвленную часть цепи (последовательно с элементами  $r_1, L_1$ ), чтобы в цепи возник резонанс напряжений. Построить векторную диаграмму.

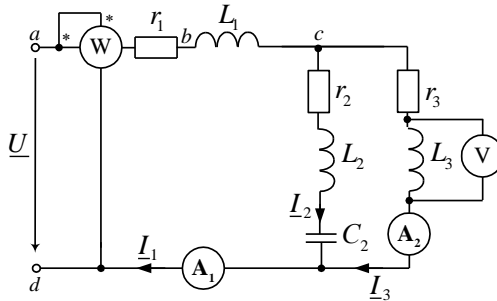


Рисунок 3.16 – Схема разветвленной цепи переменного тока

*Решение.* Задачу начинаем решать с преобразования реальных параметров цепи в их символьные изображения в комплексной форме. Первым преобразуем источник питания. В примере задано действующее значение его напряжения, начальную фазу принимаем равной нулю ( $\psi_U = 0$ ), что позволяет записать напряжение в комплексной форме записи

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_U} = 220 e^{j0^\circ} = 220 \text{ В.}$$

Угловая частота  $\omega$  в записанном выражении для мгновенного значения напряжения определяется в зависимости от заданной частоты источника переменного тока

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

Индуктивные сопротивления :

$$x_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 31,9 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Ом,}$$

$$x_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 7 \text{ Ом,}$$

$$x_{L3} = \omega L_3 = 314 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом.}$$

Емкостное сопротивление

$$x_{C2} = 1/(\omega C_2) = 1/(314 \cdot 455 \cdot 10^{-6}) = 7 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление участков в комплексной форме:

$$\underline{z}_1 = r_1 + jx_{L1} = 10 + j10 \text{ Ом,}$$

$$\underline{z}_2 = r_2 + jx_{L2} - jx_{C2} = 5 + j7 - j7 = 5 \text{ Ом,}$$

$$\underline{z}_3 = r_3 + jx_{L3} = 5 + j20 \text{ Ом.}$$

Преобразованная цепь представлена на рисунке 3.17, а.

В преобразованной схеме, чтобы не загромождать рисунок, исключены измерительные приборы, параметры которых в примере не учитываются, значит на расчет токов и напряжений они не влияют.

По аналогии с цепью постоянного тока осуществляем эквивалентные преобразования (рисунок 3.17, б и в).

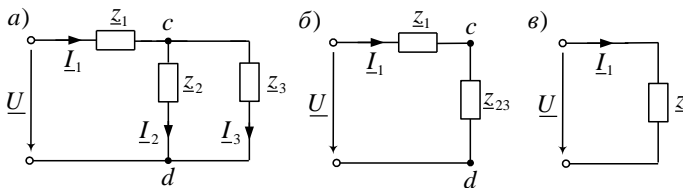


Рисунок 3.17 – Эквивалентная (а) и упрощенные (б, в) схемы цепи переменного тока

Параллельно соединенные элементы  $\underline{z}_2$  и  $\underline{z}_3$  заменяем одним эквивалентным

$$\underline{z}_{23} = \frac{\underline{z}_2 \underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = \frac{5 \cdot (5 + j20)}{5 + 5 + j20} = 4,5 + j1 \text{ Ом.}$$

Последовательно соединенные элементы  $\underline{z}_1$  и  $\underline{z}_{23}$  заменяем одним эквивалентным

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_{23} = 10 + j10 + 4,5 + j1 = 14,5 + j11 \text{ Ом.}$$

Ток в этой цепи можно определить по закону Ома:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{z}} = \frac{220}{14,5 + j11} = 9,63 - j7,31 = 12,09e^{-j37^\circ 11'} \text{ А.}$$

Далее определяем падение напряжения на участках:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_1 r_1 = (9,63 - j7,31) \cdot 10 = 96,3 - j73,1 = 120,9e^{-j37^\circ 11'} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{I}_1 jx_{L1} = (9,63 - j7,31) \cdot j10 = 73,1 + j96,3 = 120,9e^{-j52^\circ 48'} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{cd} = \underline{I}_1 \underline{z}_{23} = (9,63 - j7,31) \cdot (4,5 + j1) = 50,64 - j23,25 = 55,72e^{-j24,66^\circ} \text{ В.}$$

Токи в ветвях после разветвления:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{cd}}{\underline{z}_2} = \frac{50,64 - j23,25}{5} = 10,13 - j4,65 = 11,14e^{-j24^\circ 40'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{cd}}{\underline{z}_3} = \frac{50,64 - j23,25}{5 + j20} = -0,5 - j2,66 = 2,71e^{-j100^\circ 36'} \text{ А.}$$

Если разветвленный участок имеет только две ветви, включенные параллельно, то токи в них после разветвления можно определять без расчета  $\underline{U}_{cd}$ , используя формулу разброса. Эта формула использовалась в примере 1.1 для расчета цепи постоянного тока. В соответствии с этой формулой

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{\underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = (9,63 - j7,31) \frac{(5 + j20)}{10 + j20} = 11,14e^{-j24^\circ 40'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 \frac{\underline{z}_2}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = (9,63 - j7,31) \frac{5}{10 + j20} = 2,71e^{-j100^\circ 36'} \text{ А.}$$

Модули показательной формы выражений для токов есть действующие значения реальных токов ветвей, которые фиксируют приборы электромагнитной системы. Следовательно, амперметр в первой ветви покажет 12,09 А, а в третьей – 2,71 А.

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

$$\underline{U}_V = \underline{I}_3 \underline{z}_V,$$

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

Так как в примере падение напряжения находим на индуктивном элементе с сопротивлением  $x_{L3}$ , то полное сопротивление участка

$$\underline{z}_V = jx_{L3} = j20 = 20e^{j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Падение напряжения на индуктивном элементе

$$\underline{U}_V = (-0,5 - j2,66) \cdot j20 = 53,2 - j10 = 54,1e^{j10^\circ 39'} \text{ В.}$$

Показание вольтметра есть модуль выражения  $\underline{U}_V$ , т. е.  $U_V = 54,1 \text{ В}$ .

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

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}_1^* = 220 \cdot (9,63 + j7,31) = 2119 + j1608 = 2660e^{j37^\circ 11'} \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Активная мощность  $P_{\text{ист}} = 2119 \text{ Вт}$ , реактивная мощность  $Q_{\text{ист}} = 1608 \text{ вар}$ .

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

Активная мощность на входе определена, а активные мощности отдельных потребителей рассчитывают как произведение активного сопротивления участка на квадрат действующего значения тока этого участка. В рассматриваемой схеме три активных потребителя  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ .

Суммарная активная мощность нагрузки

$$P_{\text{нагр}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3 = 12,09^2 \cdot 10 + 11,14^2 \cdot 5 + 2,71^2 \cdot 5 = 2118,9 \text{ Вт.}$$

Относительная ошибка вычислений для активной мощности

$$\delta_p \% = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{нагр}}|}{0,5(P_{\text{ист}} + P_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|2119 - 2118,9|}{0,5(2119 + 2118,9)} \cdot 100 \% = 0,0047 \%$$

Ошибка менее одного процента допускается. Она возникает из-за округления числовых данных при расчете.

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

Суммарная реактивная мощность всех потребителей

$$\begin{aligned} Q_{\text{нагр}} &= I_1^2 x_{L1} + I_1^2 (x_{L2} - x_{C2}) + I_3^2 x_{L3} = \\ &= 12,09^2 \cdot 10 + 11,14^2 \cdot (7 - 7) + 2,71^2 \cdot 20 = 1608,6 \text{ вар.} \end{aligned}$$

Относительная ошибка вычислений для реактивной мощности

$$\delta_{\varrho} \% = \frac{|\varrho_{\text{ист}} - \varrho_{\text{нагр}}|}{0,5(\varrho_{\text{ист}} + \varrho_{\text{нагр}})} \cdot 100 \% = \frac{|1608 - 1608,6|}{0,5(1608 + 1608,6)} \cdot 100 \% = 0,037 \%$$

Таким образом, баланс активных и реактивных мощностей соблюдается. Токи определены правильно.

Для возникновения в цепи резонанса напряжений необходимо, чтобы полное сопротивление всей цепи было активным. Из выражения для полного сопротивления ( $\underline{z} = 14,5 + j11$  Ом) видно, что эквивалентное реактивное сопротивление исходной цепи равно  $+11$  Ом. Знак плюс указывает на индуктивный характер эквивалентной реактивности. Устранить эту реактивность можно включением в первую ветвь конденсатора с емкостным сопротивлением  $-11$  Ом (минус подчеркивает емкостный характер реактивности). После такого включения реактивные сопротивления взаимно компенсируются, а полное сопротивление становится активным и равно  $14,5$  Ом. В цепи наступает резонанс напряжений.

На рисунке 3.18 приведена векторная диаграмма, на которой относительно осей координат комплексной плоскости  $+1$  и  $+j$  в масштабе построены векторы напряжений и токов. Длина вектора должна в масштабе соответствовать модулю показательной формы комплексного выражения. Например, вектор входного напряжения ( $\underline{U} = 220$  В) должен иметь длину в 11 масштабных отрезков (в масштабном отрезке –  $20$  В).

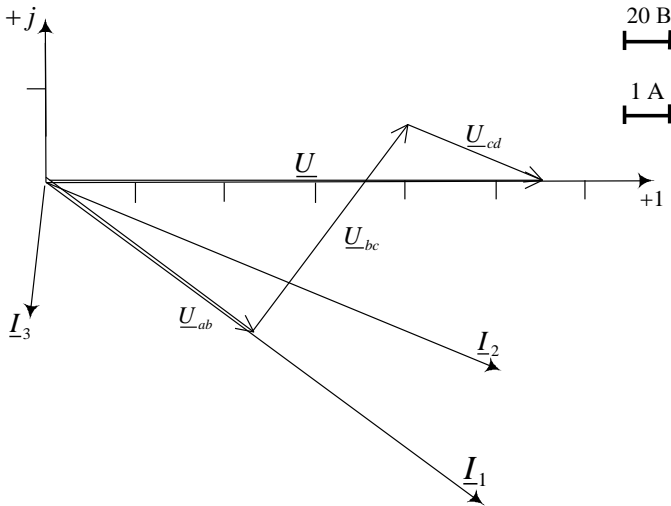


Рисунок 3.18 – Векторная диаграмма разветвленной цепи переменного тока

Вектор входного напряжения складывается из векторов трех напряжений:  $\underline{U}_{ab}$ ,  $\underline{U}_{bc}$ ,  $\underline{U}_{cd}$ . Между точками  $a$  и  $b$  находится резистор с сопротивлением  $r_1$ . Напряжение на нем совпадает по фазе с током  $\underline{I}_1$ , поэтому вектор  $\underline{U}_{ab}$  параллелен вектору тока  $\underline{I}_1$ . К вектору  $\underline{U}_{ab}$  прибавляем вектор напряжения  $\underline{U}_{bc}$ . Между точками  $b$  и  $c$  находится

индуктивный элемент с сопротивлением  $x_{L1}$ . Напряжение на индуктивном элементе опережает ток  $I_1$  на  $90^\circ$ , поэтому вектор  $\underline{U}_{bc}$  перпендикулярен вектору тока  $I_1$ .

### 3.4 Мощность в цепи синусоидального тока

Произведение мгновенного значения приложенного к цепи напряжения  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  и мгновенного значения проходящего по ней тока  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  называют *мгновенной мощностью*.

Приняв  $\psi_u = 0$ , получим:

$$p(t) = u(t)i(t) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi), \quad (3.16)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз напряжения и тока.

Из этого выражения видно, что мгновенная мощность в цепи синусоидального тока имеет постоянную составляющую и переменную, изменяющуюся во времени с удвоенной частотой.

Графики мгновенной мощности для трех различных значений сдвига фаз между напряжением и током приведены на рисунке 3.19.

При  $0 < \varphi < \pi/2$  (см. рисунок 3.19, а) положительные значения мощности соответствуют поступлению энергии в цепь, где она частично запасается в электрических полях конденсаторов и магнитных полях катушек индуктивности и частично расходуется, выделяясь в виде теплоты в активных сопротивлениях или преобразуясь в другие виды энергии (механическую, химическую и т. д.). *Отрицательные значения мощности соответствуют возвращению энергии к источнику.* В рассмотренном случае энергия, поступающая от источника в цепь, больше энергии, возвращаемой из цепи к источнику, так как часть ее расходуется в цепи.

При  $\varphi = 0$  (см. рисунок 3.19, б) энергия поступает в цепь, и по отношению к ее входным зажимам такая цепь эквивалентна активному сопротивлению. Это значит, что в резистивном элементе происходит необратимое

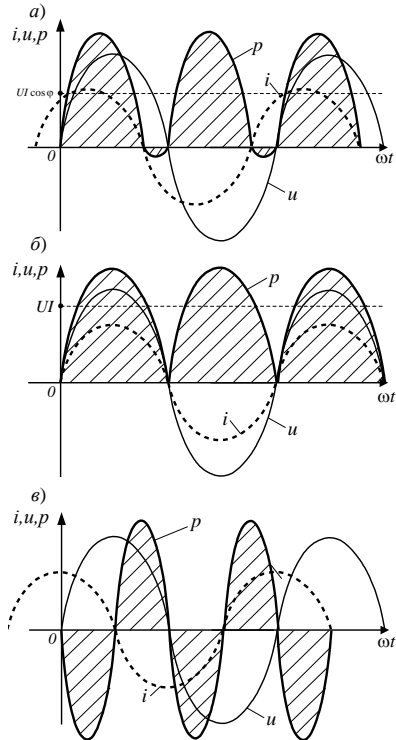


Рисунок 3.19 – Графики мгновенных мощностей

преобразование электрической энергии в другие ее виды. Если же в цепи при  $\varphi = 0$  имеются конденсаторы и катушки индуктивности, например при резонансе напряжений, то между ними происходит взаимный обмен энергией без возвращения ее к источнику.

При  $\varphi = \pi/2$  (см. рисунок 3.19, в) положительные и отрицательные участки мощности равны между собой. Это значит, что в течение одних четвертьпериодов, когда  $p > 0$ , энергия запасается (в виде энергии магнитного поля), а в течение других четвертьпериодов, когда  $p < 0$ , энергия возвращается в электрическую цепь. Такая цепь содержит лишь идеальные элементы  $L$  и  $C$ .

*Среднее значение* мгновенной мощности за период называют *активной мощностью*:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt. \quad (3.17)$$

Для цепи синусоидального тока после подстановки в формулу (3.16) выражения для мгновенной мощности (3.17) и интегрирования получим:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (3.18)$$

т. е. активная мощность в цепи с гармоническим колебанием равна произведению действующих напряжения, тока и косинуса угла сдвига фаз между напряжением и током. Она характеризует энергию, которая передается от источника к нагрузке, где превращается в другие виды энергии. Активная мощность измеряется в ваттах (Вт). Для измерения активной (потребляемой) мощности служат ваттметры, представляющие собой сочетание амперметра и вольтметра. Множитель  $\cos \varphi$  называют *коэффициентом мощности*.

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

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (3.19)$$

Единицей измерения реактивной мощности служит вольт-ампер реактивный (вар), а измеряется эта мощность варметрами. При  $\varphi > 0$ , т. е. при индуктивной нагрузке, реактивная мощность положительна, а при  $\varphi < 0$ , т. е. при емкостной нагрузке, отрицательна.

Произведение действующих значений напряжения  $U$  и тока  $I$  называют *полной мощностью*:

$$S = UI; S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.20)$$



Полная мощность измеряется в вольт-амперах (В·А) и характеризует предельную активную мощность источника при  $\cos\varphi = 1$ . Из выражений (3.18) и (3.20) имеем  $\cos\varphi = P/S$ , т. е. коэффициент мощности  $\cos\varphi$  показывает, какую часть полной мощности составляет активная мощность.

Если увеличение потребляемой мощности не требуется, то увеличение  $\cos\varphi$  необходимо для уменьшения тока. Полезную работу совершает только активная составляющая тока  $I_a$ , так называют проекцию вектора тока на вектор напряжения. Но в цепи циркулирует ток  $I > I_a$ , поэтому нужно делать большее сечение проводов линии передачи, обмоток генераторов, трансформаторов и других электрических машин. Кроме того, увеличиваются потери на нагрев проводников.

*Условия передачи максимальной активной мощности в нагрузку.*

Для определения условий передачи максимальной активной мощности в нагрузку рассмотрим цепь синусоидального тока, состоящую из источника ЭДС  $\underline{E}$  с внутренним сопротивлением  $\underline{z}_{вн} = r_m + jx_m$  и сопротивлением нагрузки  $\underline{z}_н = r_n + jx_n$  (рисунок 3.20). Действующий ток в рассматриваемой цепи

$$I = \frac{E}{z} = \frac{E}{\sqrt{(r_{вн} + r_n)^2 + (x_{вн} + x_n)^2}}.$$

Активная мощность в нагрузке

$$P_n = r_n I^2 = \frac{r_n E^2}{(r_{вн} + r_n)^2 + (x_{вн} + x_n)^2}.$$

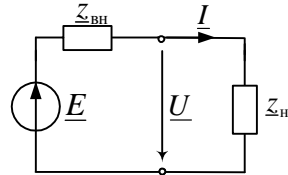


Рисунок 3.20 – Схема цепи

Из этого выражения видно, что первым условием передачи максимальной активной мощности в нагрузку является  $x_{вн} = -x_n$ , т. е. равенство по значению и противоположность по знаку реактивных сопротивлений источника и нагрузки.

При выполнении данного условия выражение для активной мощности принимает следующий вид:  $P_n = \frac{r_n E^2}{(r_{вн} + r_n)^2}$ . Взяв производную от этого вы-

ражения по  $r_n$  и приравняв ее к нулю, получим второе условие:  $r_{вн} = r_n$ , т. е. активное сопротивление нагрузки равно активному сопротивлению источника. Активная мощность в нагрузке в этом случае будет максимальной  $P_n = E^2 / (4r_{вн})$ . При этом коэффициент полезного действия  $\eta = 0,5$ .

### 3.5 Трехфазные электрические цепи

Многофазной системой называют совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся одна от другой по фазе и индуктируемые в одном источнике питания. Частным случаем многофазных систем является трехфазная цепь, получившая наибольшее распространение. Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга на одну треть периода, или, что то же, на угол  $2\pi/3$ . Эти три составные части трехфазной цепи называются фазами.

Трехфазные цепи позволили комплексно решить проблему создания электропривода и сетей электроснабжения. Основные достоинства трехфазных цепей: наличие вращающегося магнитного поля, на основе которого построен простой и дешевый трехфазный асинхронный двигатель; при передаче энергии на расстояние в трехфазных цепях по сравнению с однофазными достигается существенная экономия материала проводов; возможность иметь два эксплуатационных напряжения.

Трехфазная цепь переменного тока, состоящая из генератора, трансформатора, электрического двигателя и линии передачи, была впервые продемонстрирована на Всемирной электротехнической выставке в 1891 г. русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: генератора, линии передачи и приемника. Для получения трехфазной цепи необходимо определенным образом соединить фазы генератора и приемника с помощью линий передачи. Возможны два основных способа соединения в трехфазной цепи – соединение фаз генератора и приемника звездой или треугольником.

Условились в индексах буквенных обозначений напряжений и токов источника питания применять прописные буквы ( $A, B, C$ ), а в параметрах, присущих нагрузке, – строчные ( $a, b, c$ ).

Для получения ЭДС трехфазной цепи чаще всего используется трехфазный синхронный генератор. Обмотки, в которых наводятся ЭДС, помещаются в пазах статора. Обмотки фаз сдвинуты друг относительно друга на угол  $120^\circ$ . При вращении ротора в силу идентичности трех обмоток генератора в них наводятся ЭДС, имеющие одинаковые амплитуду и частоту. Однако линии магнитного поля вращающегося ротора пересекают провода фазных обмоток не одновременно, поэтому синусоидальные ЭДС обмоток сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на одну треть периода. Векторы, изображающие эти ЭДС, равны по модулю и расположены под углом  $120^\circ$ , такую систему называют *симметричной*.

Мгновенные ЭДС трехфазного генератора, показанные на рисунке 3.21, выражаются аналитически как синусоидальные функции времени следующим образом:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t; \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{cases} \quad (3.21)$$

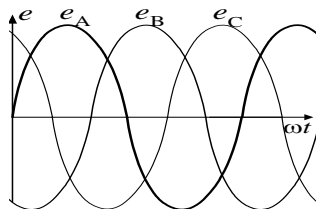


Рисунок 3.21 – Временные графики ЭДС трехфазного генератора

Алгебраическая сумма мгновенных значений фазных ЭДС генератора равна нулю:  $e_A + e_B + e_C = 0$ .

Фазы обмоток генератора могут соединяться звездой или треугольником. Соединение звездой находит большее распространение. При этом соединении условные начала фаз используют для подключения трех линейных проводников  $A, B, C$ , а концы фаз объединяют в одну точку, называемую *нейтральной точкой* источника питания (трехфазного генератора или трансформатора). В зависимости от требований нейтральная точка может быть выведена к отдельному выводу, обозначенному буквой  $N$ , к этой точке может подключаться нейтральный провод. Схема соединения фаз источника питания звездой приведена на рисунке 3.22, *a*.

При включении фаз треугольником фазные источники питания соединяют последовательно в замкнутый контур (рисунок 3.22, *б*). Начало одной фазной обмотки соединяется с концом следующей по порядку так, что все три обмотки образуют замкнутый треугольник, причем направления ЭДС в контуре треугольника совпадают и сумма ЭДС равна нулю. При отсутствии нагрузки, т.е. при режиме холостого хода в обмотках генератора, соединенных треугольником, ток не циркулирует, так как сумма трех фазных ЭДС равна нулю.

*Нейтралью* называется точка соединения обмоток трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству, либо присоединенная к нему через аппараты с большим сопротивлением (сеть с изолированной нейтралью), либо непосредственно соединенная с заземляющим устройством (сеть с глухозаземленной нейтралью).

В соответствии с ПУЭ глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформаторы тока). В свою очередь, изолированной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы

сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

Правила устройства электроустановок предусматривают использование при напряжениях до 1000 В лишь двух схем трехфазных сетей: трехпроводной с изолированной нейтралью и четырехпроводной с глухозаземленной нейтралью. По технологическим требованиям предпочтение отдается четырехпроводной сети, так как в ней возможно применение двух рабочих напряжений – линейного и фазного.

Из точек объединения источников между собой выводятся три линейных провода  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , идущие к нагрузке. Из рисунка 3.22 видно, что выводы фазных источников подключены к линейным проводникам, а следовательно, при соединении фаз источника треугольником фазные напряжения равны линейным. Нейтральный провод в этом случае отсутствует.

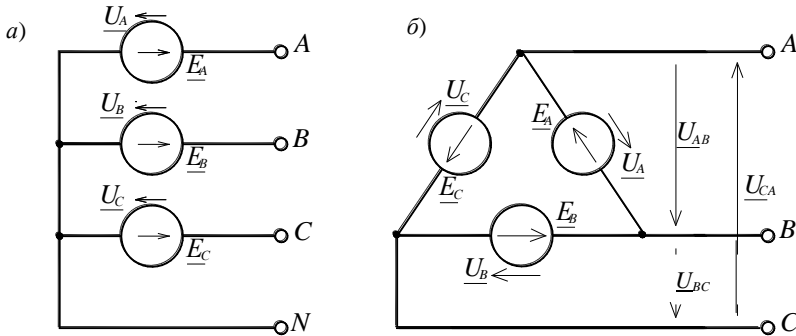


Рисунок 3.22 – Схемы соединения фаз источника питания:  
а – звездой; б – треугольником

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

Если внутренним сопротивлением фаз генератора пренебречь, то в комплексной форме записи выражения для фазных напряжений примут вид:

$$\underline{U}_A = U_\phi; \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}. \quad (3.22)$$

Соответствующие им линейные напряжения при соединении звездой:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_\Delta e^{j30^\circ}; \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_\Delta e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_\Delta e^{j150^\circ}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Здесь  $U_\phi$  – модуль фазного напряжения источника питания, а  $U_\Delta$  – модуль линейного напряжения. В симметричной трехфазной цепи, при соединении фаз источника *звездой*, между этими напряжениями есть взаимосвязь:

$$U_\Delta = \sqrt{3} U_\phi. \quad (3.24)$$

К трехфазному источнику может подключаться нагрузка. По значению величин и характеру трехфазная нагрузка бывает симметричной и несимметричной. В случае симметричной нагрузки комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы, а если эти сопротивления различны, то нагрузка несимметричная. Фазы нагрузки могут соединяться между собой звездой (рисунок 3.23, а) или треугольником (рисунок 3.23, б).

При соединении фаз звездой фазные токи равны линейным токам:  $I_{\phi} = I_{л}$ . При соединении фаз треугольником фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению  $U_{\phi} = U_{л}$ .

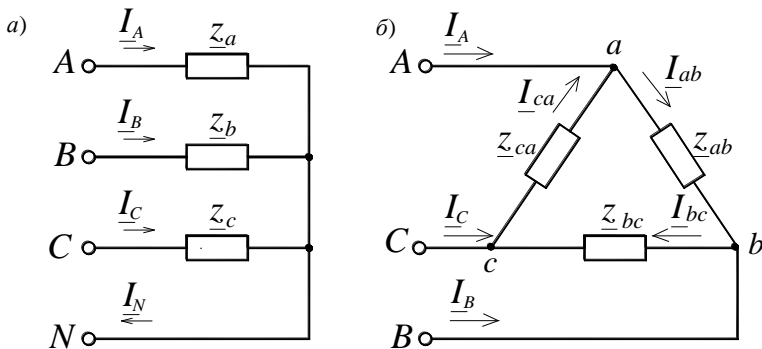


Рисунок 3.23 – Схемы соединения фаз нагрузки:  
а – звездой; б – треугольником

В этом отношении соединение нагрузки треугольником имеет преимущество: сопротивления фаз, т. е. сторон треугольника, могут быть неодинаковы и даже в крайнем случае могут включаться и отключаться независимо друг от друга. Такая же возможность имеется при соединении генератора и нагрузки звездой, если их нейтральные точки соединены нейтральным проводом или через землю. На самолетах и кораблях нейтральным проводом может служить металлическая обшивка (корпус), к которой присоединяются нейтральные точки генераторов и нагрузок.

#### Расчет трехфазных цепей.

При анализе трехфазных цепей алгоритм расчета зависит от схемы соединения нагрузки, исходных параметров и цели расчета.

Для соединения фаз генератора и приемника звездой с нейтральным проводом (условное обозначение  $\text{Y}$ ) схема приведена на рисунке 3.24. Сопротивлениями обмоток генератора и соединительных проводов ввиду их малости по сравнению с сопротивлениями нагрузки можно для начала пренебречь. Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному напряжению источника питания:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = U_\phi; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}.$$

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

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c. \quad (3.25)$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (3.26)$$

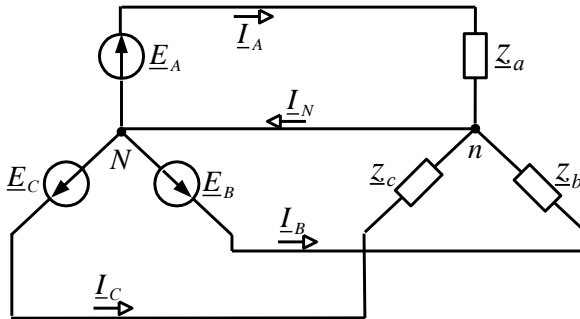


Рисунок 3.24 – Схема соединения фаз источника и приемника звездой с нейтральным проводом

Для симметричного приемника действующие значения токов всех фаз и сдвиги фаз относительно соответствующих фазных ЭДС одинаковы, а ток в нейтральном проводе равен нулю. Поэтому в случае симметричного приемника, или, как говорят, при симметричной нагрузке генератора, нейтральный провод не нужен и не прокладывается. Примером такого приемника является трехфазный асинхронный двигатель с соединением фазных обмоток звездой.

Для определения фазных напряжений при несимметричной нагрузке, соединенной звездой без нейтрального провода (рисунок 3.25, условное обозначение Y), используют метод двух узлов. В соответствии с этим методом расчет начинают с определения напряжения  $\underline{U}_N$  между нейтральными точками источника питания и нагрузки, называемого напряжением смещения нейтрали:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{y}_a + \underline{U}_B \underline{y}_b + \underline{U}_C \underline{y}_c}{\underline{y}_a + \underline{y}_b + \underline{y}_c}, \quad (3.27)$$

где  $\underline{y}_a$ ,  $\underline{y}_b$ ,  $\underline{y}_c$  – полные проводимости соответствующих фаз нагрузки в комплексной форме,

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

Напряжения на фазах несимметричной нагрузки находят из выражений:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (3.28)$$

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

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c. \quad (3.29)$$

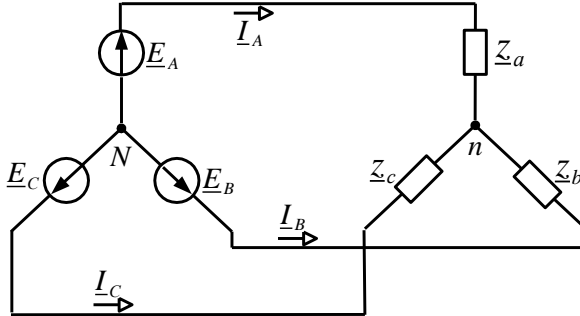


Рисунок 3.25 – Схема соединения фаз источника и приемника звездой без нейтрального провода

Соединение нагрузки звездой без нейтрального провода применяется только при одинаковой нагрузке всех трех фаз, так как при неравномерной нагрузке напряжения на фазах получаются неодинаковыми. Между тем условие равномерной загрузки фаз на практике не всегда выполняется. Для осветительной нагрузки нейтральный провод необходим, поскольку нет оснований рассчитывать на полную симметрию такого трехфазного приемника. Также в нейтральном проводе трехфазной четырехпроводной осветительной магистрали запрещена установка предохранителей или выключателей, так как при отключении нейтрального провода фазные напряжения могут стать неравными. Вследствие данного явления в одних фазах может наблюдаться недонакал, а в других быстрое перегорание ламп.

При подключении потребителей *треугольником* (условное обозначение  $\Delta$ ) схема приобретает вид, изображенный на рисунке 3.23, б. В этом режиме схема соединения фаз симметричного источника питания не играет роли. Фазные токи в нагрузке ( $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ ) определяют с помощью закона Ома для участка цепи

$$\underline{I}_\phi = \underline{U}_\phi / \underline{z}_\phi,$$

где  $\underline{U}_\phi$  – соответствующее линейное напряжение источника питания;  
 $\underline{z}_\phi$  – полное сопротивление соответствующей фазы нагрузки.

Токи в линейных проводах определяют через фазные на основании первого закона Кирхгофа для каждого узла (точки  $a, b, c$ ) схемы, изображенной на рисунке 3.23, б):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (3.30)$$

При любом характере нагрузки трехфазная активная и реактивная мощности равны соответственно сумме активных и реактивных мощностей отдельных фаз. Для определения этих мощностей фаз можно воспользоваться выражением

$$\underline{S}_\phi = \underline{U}_\phi \underline{I}_\phi^* = P_\phi + jQ_\phi, \quad (3.31)$$

где  $\underline{U}_\phi, \underline{I}_\phi^*$  – комплекс напряжения и сопряженный комплекс тока на фазе нагрузки;

$P_\phi, Q_\phi$  – активная и реактивная мощности в фазе нагрузки.

Трехфазная активная мощность

$$P = P_a + P_b + P_c. \quad (3.32)$$

Трехфазная реактивная мощность

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c. \quad (3.33)$$

Трехфазная полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.34)$$

### Расчет трехфазной цепи при соединении потребителей звездой

**Пример 3.2.** Рассмотрим трехфазную цепь с линейным напряжением  $U_L$  и нагрузкой, соединенной звездой с нейтральным проводом. Схема такой цепи приведена на рисунке 3.26. Параметры цепи:  $U_L = 380$  В,  $r_1 = 10$  Ом,  $x_{L2} = 20$  Ом,  $x_{C3} = 20$  Ом.

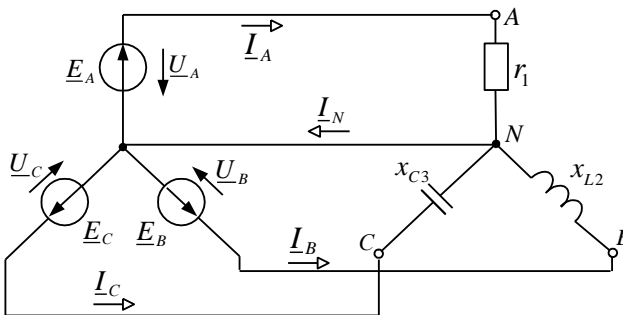


Рисунок 3.26 – Схема трехфазной цепи при соединении потребителей звездой

*Решение.* Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному напряжению источника питания:



$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ},$$

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

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

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

Применяя эту формулу для конкретного случая из примера, получим полные сопротивления фаз в следующем виде:

$$\underline{z}_a = r_1 = 10 = 10 e^{j0^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_b = jx_{L3} = j20 = 20 e^{j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_c = -jx_{C3} = -j20 = 20 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексные сопротивления фаз различны, следовательно, нагрузка несимметричная.

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

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{z}_a} = \frac{220}{10 e^{j0^\circ}} = 22 e^{j0^\circ} = 22 \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{z}_b} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{20 e^{j90^\circ}} = 11 e^{-j210^\circ} = -9,53 + j5,5 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{z}_c} = \frac{220 e^{-j240^\circ}}{20 e^{-j90^\circ}} = 11 e^{-j150^\circ} = -9,53 - j5,5 \text{ А}.$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 22 - 9,53 + j5,5 - 9,53 - j5,5 = 2,94 = 2,94 e^{j0^\circ} \text{ А}.$$

Полные мощности фаз:

$$\underline{S}_a = \underline{U}_a \underline{I}_a^* = 220 \cdot 22 e^{j0^\circ} = 4840 e^{j0^\circ} = 4840 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{S}_b = \underline{U}_b \underline{I}_b^* = 220 e^{-j120^\circ} \cdot 11 e^{j210^\circ} = 2420 e^{j90^\circ} = j2420 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{S}_c = \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 220 e^{-j240^\circ} \cdot 11 e^{j150^\circ} = 2420 e^{-j90^\circ} = -j2420 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

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

Активная трехфазная мощность

$$P = P_a + P_b + P_c = 4840 + 0 + 0 = 4840 \text{ Вт}.$$

Реактивная трехфазная мощность

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 0 + 2420 - 2420 = 0 \text{ вар}.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{4840^2 + 0^2} = 4840 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Векторную диаграмму размещаем на комплексной плоскости с осями  $+1$  и  $+j$ , рисунок 3.27. Выбираем масштаб векторов тока равным 10 А/деление, а векторов напряжения – 40 В/деление. Сначала строим векторы фазных напряжений, а затем векторы токов. Длина вектора соответствует в масштабе модулю показательной формы соответствующего выражения тока или напряжения, а угол, под которым этот вектор строится к вещественной оси, равен аргументу комплексного значения величины.

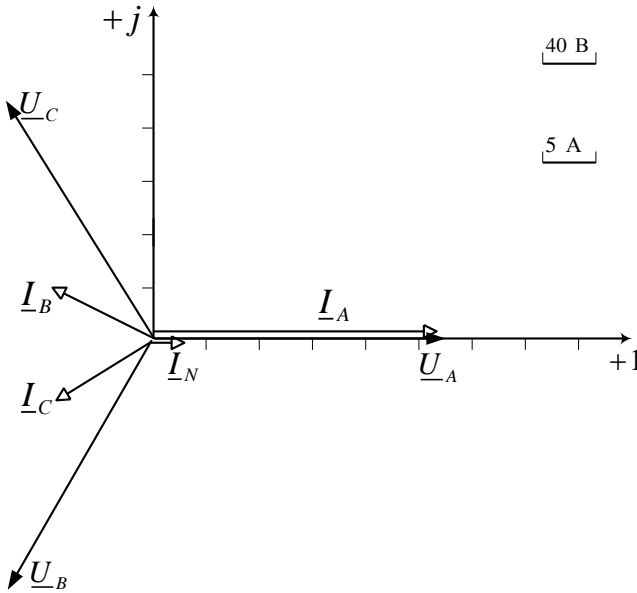


Рисунок 3.27 – Векторная диаграмма при соединении потребителей звездой с нейтральным проводом

### Расчет трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником

**Пример 3.2.** Параметры цепи:  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ ,  $r_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $x_{L1} = 8 \text{ Ом}$ ,  $x_{C2} = 10 \text{ Ом}$ ,  $x_{L3} = 10 \text{ Ом}$ .

Требуется определить для цепи, изображенной на рисунке 3.28, линейные и фазные токи, а также активную, реактивную и полную мощности. Построить векторную диаграмму.

*Решение.* В комплексной форме записи фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Сопrotивления фаз нагрузки в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{ab} &= r_1 + jx_{L1} = 6 + j8 = 10e^{j53^{\circ}8'} \text{ Ом,} \\ \underline{z}_{bc} &= -jx_{C2} = -j10 = 10e^{-j90^{\circ}} \text{ Ом,} \\ \underline{z}_{ca} &= jx_{L3} = j10 = 10e^{j90^{\circ}} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

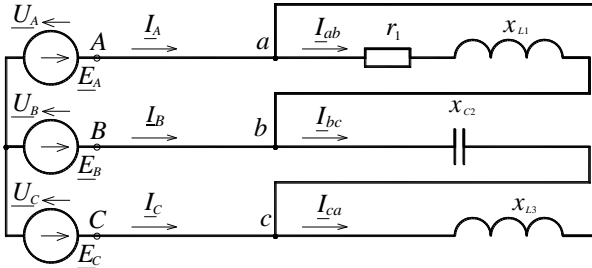


Рисунок 3.28 – Схема трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником

Фазные токи определяем по закону Ома:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{z}_{ab}} = \frac{380e^{j30^{\circ}}}{10e^{j53^{\circ}8'}} = 38e^{-j23^{\circ}8'} = 35 - j14,9 \text{ A,} \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{z}_{bc}} = \frac{380e^{-j90^{\circ}}}{10e^{-j90^{\circ}}} = 38 \text{ A,} \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{z}_{ca}} = \frac{380e^{j150^{\circ}}}{10e^{j90^{\circ}}} = 38e^{j60^{\circ}} = 19 + j33 \text{ A.} \end{aligned}$$

Для определения линейных токов используем первый закон Кирхгофа для точек  $a, b, c$  схемы на рисунке 3.28:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 35 - j14,9 - 19 - j33 = 16 - j47,9 = 50,5e^{-j71^{\circ}43'} \text{ A,} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 38 - 35 + j14,9 = 3 + j14,9 = 15,1e^{j78^{\circ}47'} \text{ A,} \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 19 + j33 - 38 = -19 + j33 = 38e^{j120^{\circ}} \text{ A.} \end{aligned}$$

Векторную диаграмму строим в масштабе на комплексной плоскости относительно осей  $+1$  и  $+j$  (рисунок 3.29).

Полные мощности фаз:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ab} &= \underline{U}_{AB} \underline{I}_{ab}^* = 380e^{j30^{\circ}} \cdot 38e^{j23,1^{\circ}} = 14400e^{j53,1^{\circ}} = 8666 + j11500 \text{ В} \cdot \text{А,} \\ \underline{S}_{bc} &= \underline{U}_{BC} \underline{I}_{bc}^* = 380e^{-j90^{\circ}} \cdot 38 = 14400e^{-j90^{\circ}} = -j14400 \text{ В} \cdot \text{А,} \\ \underline{S}_{ca} &= \underline{U}_{CA} \underline{I}_{ca}^* = 380e^{j150^{\circ}} \cdot 38e^{-j60^{\circ}} = 14400e^{j90^{\circ}} = j14400 \text{ В} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

Трехфазная активная мощность

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

Трехфазная реактивная мощность

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

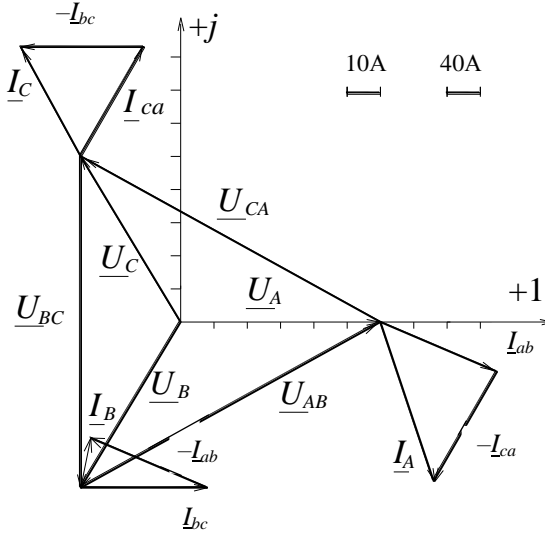


Рисунок 3.29 – Векторная диаграмма для нагрузки, соединенной треугольником

Трехфазная полная мощность

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

### Контрольные вопросы

- 1 Как связаны между собой амплитудные и действующие значения переменных токов и напряжений?
- 2 Какими параметрами характеризуется цепь переменного тока?
- 3 От каких факторов зависит величина реактивных сопротивлений цепи переменного тока?
- 4 По какому признаку можно разделить элементы цепи переменного тока на активные и реактивные?
- 5 Запишите закон Ома для цепи переменного тока.
- 6 Какова разница между активной, реактивной и полной мощностями? В каких единицах они измеряются?
- 7 Пояснить, как изменится реактивная мощность, потребляемая цепью, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора и подключенной к источнику синусоидального напряжения, при уменьшении сопротивления резистора.

8 Пояснить, является ли монотонной зависимость реактивной мощности, потребляемой в цепи, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора, от частоты синусоидального питающего напряжения.

9 Пояснить, как изменится коэффициент мощности цепи, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора, при уменьшении частоты питающего синусоидального напряжения.

10 Условие возникновения в цепи резонанса напряжений.

11 Условие возникновения в цепи резонанса токов.

12 В чем заключается преимущество трехфазного тока перед однофазным?

13 Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении симметричной нагрузки звездой и треугольником.

14 Как определяют фазные напряжения на несимметричной нагрузке, соединенной звездой?


15 Каково назначение нейтрального провода в трехфазной цепи?

16 Почему в нейтральном проводе не устанавливают предохранитель?

## 4 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

### 4.1 Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Нелинейными называются элементы, параметры которых зависят от величины и (или) направления связанных с этими элементами переменных (напряжения, тока, магнитного потока, заряда, температуры, светового потока и др.). Вольт-амперные характеристики линейных элементов – прямые линии, нелинейных – кривые. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – это зависимость электрического напряжения на выводах элемента электрической цепи от электрического тока в нем. В нелинейных электрических цепях постоянного тока с изменением приложенного напряжения сопротивление нелинейного элемента также меняется.

Условное графическое обозначение нелинейного резистивного элемента на принципиальных схемах имеет вид . Электрическая цепь считается *нелинейной*, если хотя бы один из ее элементов является нелинейным.

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

Нелинейные элементы делятся на две группы: неуправляемые и управляемые. В управляемых нелинейных элементах в отличие от неуправляемых кроме основной цепи есть еще по крайней мере одна управляющая цепь, воздействуя на ток или напряжение которой можно изменять ВАХ основной цепи. В группу неуправляемых нелинейных резистивных элементов входят лампы накаливания, бареттеры, диоды и другие элементы. К управляемым относят транзисторы, тиристоры, терморезисторы, фоторезисторы, фотодиоды и некоторые другие.

По другому признаку классификации нелинейные элементы можно разделить на безынерционные и инерционные. Безынерционными называются элементы, характеристики которых не зависят от скорости изменения переменных. Инерционными называются элементы, характеристики которых зависят от скорости изменения переменных. Понятия инерционных и безынерционных элементов относительны: элемент может рассматриваться как безынерционный в допустимом (ограниченном сверху) диапазоне частот, при выходе за пределы которого он переходит в разряд инерционных.

По типу характеристики можно также разделить все нелинейные элементы на элементы с однозначной и неоднозначной характеристиками. Однозначной называется характеристика  $y = f(x)$ , в которой каждому значению  $x$  соответствует единственное значение  $y$  и наоборот. В случае неоднозначной характеристики каким-то значениям  $x$  может соответствовать два или более значения  $y$  или наоборот. У нелинейных резисторов неоднозначность характеристики обычно связана с наличием падающего участка, а у нелинейных индуктивных и емкостных элементов – с гистерезисом.

Имея вольт-амперную характеристику (ВАХ) (рисунок 4.1) нелинейного элемента, можно определить его сопротивление при любых значениях напряжения или тока. Различают два вида сопротивления нелинейного элемента: статическое и дифференциальное.

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

$$r_{ст} = U / I,$$

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

$I$  – сила тока в этой точке.

Статическое сопротивление нелинейного элемента изменяется от точки к точке характеристики. Например, сопротивление в точке  $a$  характеристики (см. рисунок 4.1) определяется отношением напряжения  $U_a$  к току  $I_a$  для данной точки, т. е. пропорционально тангенсу угла  $\alpha$  наклона секущей  $Oa$  к оси абсцисс.

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

$$r_{д} = dU / dI.$$

При изменении тока в узких пределах относительно точки  $a$  следует считать сопротивление пропорциональным тангенсу угла  $\beta$  наклона касательной к характеристике в данной точке (см. рисунок 4.1). Поэтому дифференциальное сопротивление можно определить по формуле

$$r_{д} = \left| \frac{dU}{dI} \right|_{I=I_a} = k \operatorname{tg} \beta, \quad (4.1)$$

где коэффициент  $k$  равен отношению масштабов напряжения и тока.

В случае инерционного нелинейного резистора вводится понятие динамического сопротивления  $r_{дин} = du / di$ ,

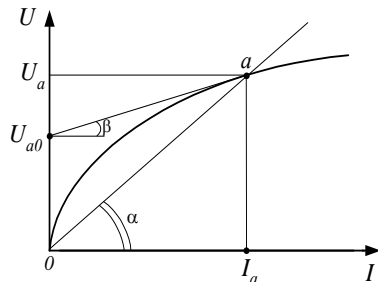


Рисунок 4.1 – Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента

определяемого по динамической ВАХ. В зависимости от скорости изменения переменной, например тока, может меняться не только величина, но и знак  $r_{\text{дин}}$ .

На рисунке 4.2, а показана ампер-вольтная характеристика полупроводникового диода, обладающего свойством *односторонней* проводимости. Ток в проводящем направлении диода (прямой ток) во много раз превосходит ток в непроводящем (обратном) направлении при тех же значениях напряжения.

*Термисторы* обладают высокой чувствительностью к изменениям температуры. Их сопротивление при изменениях температуры изменяется в несколько раз больше, чем у металлов. Они применяются в измерительных устройствах, где измеряемое значение величины в значительной мере зависит от температуры. Пример ВАХ термистора при двух температурах показан на рисунке 4.2, б.

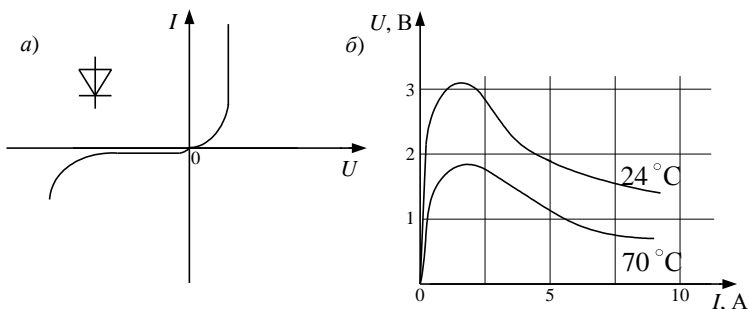


Рисунок 4.2 – Ампер-вольтная характеристика диода (а) и вольт-амперная характеристика термистора (б)

#### *Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока.*

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

Нелинейные электрические цепи можно исследовать при помощи графических, аналитических или графоаналитических методов. На практике чаще всего используется экспериментально снятая ВАХ нелинейного элемента. В таком случае для расчета можно применять графический метод.



*Графический метод расчета цепи с последовательным соединением нелинейных элементов.*

При последовательном соединении элементов строится результирующая ВАХ цепи путем сложения ВАХ отдельных элементов относительно оси тока, так как ток в цепи один. По этой характеристике определяется искомое значение величины. Чем больше точек будет получено, тем точнее результирующая ВАХ. Входное напряжение на основании второго закона Кирхгофа складывается из напряжений на отдельных элементах. В общем случае для цепи, состоящей из  $n$  элементов,  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ . Поэтому для построения результирующей ВАХ нужно при одном значении тока суммировать напряжения на элементах цепи.

На рисунке 4.3 показана цепь, состоящая из двух элементов, один из которых ( $r_2$ ) нелинейный; дана ВАХ нелинейного элемента  $I_2 = f(U_2)$ , а также его сопротивление. По этим данным построим ВАХ элементов и результирующую характеристику  $U = U_1 + U_2$ . Отрезок  $ad$  равен в масштабе напряжения  $m_v$  сумме отрезков  $ab$ ,  $ac$ . Ордината точки  $d$  соответствует напряжению  $U$ , а абсцисса – току  $I$ . Ординаты точек  $c$  и  $b$  соответствуют напряжениям на отдельных элементах цепи (отрезки  $ab$ ,  $ac$ ).

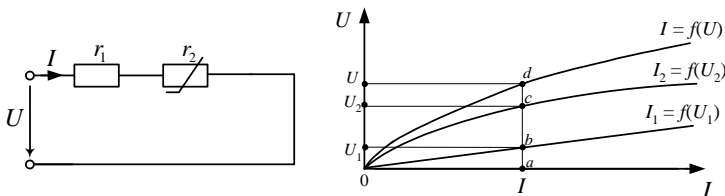


Рисунок 4.3 – Последовательное соединение элементов цепи

*Графический метод расчета цепи с параллельным соединением нелинейных элементов.*

При параллельном соединении напряжения на элементах одинаковы и равны входному напряжению  $U$ . Входной ток на основании первого закона Кирхгофа равен сумме токов в ветвях  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ . Значит, для параллельного соединения элементов результирующая характеристика получается путем суммирования ВАХ отдельных элементов относительно оси напряжения.

#### Расчет нелинейной цепи при параллельном соединении элементов

**Пример 4.1.** Необходимо определить, какие токи проходят в двух параллельных ветвях, содержащих нелинейные элементы  $r_1$  и  $r_2$  (рисунок 4.4, а), если ток  $I_{\text{вх}} = 0,92$  А. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов показаны на рисунке 4.4, б.

*Решение.* На основании первого закона Кирхгофа для данной схемы

$$I_{\text{вх}} = I_1 + I_2.$$

По вольт-амперным характеристикам для значений напряжения  $U$ , равных 0; 20; 40; 60 В, определяем соответствующие им значения величин токов  $I_1$  и  $I_2$ . Суммиру-

ем для каждого из выбранных значений напряжения эти токи и строим результирующую ВАХ всей цепи.

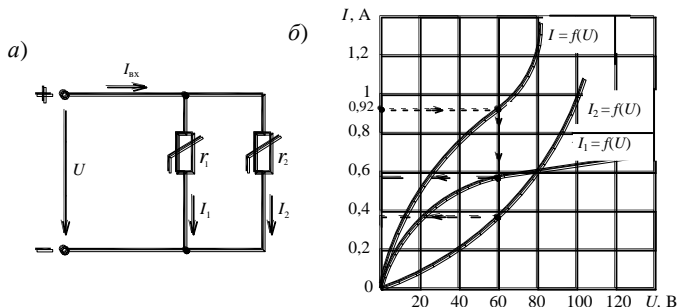


Рисунок 4.4 – Схема нелинейной цепи постоянного тока (а) и ее вольт-амперные характеристики (б)

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

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

*Графический метод расчета цепи со смешанным соединением нелинейных элементов.*

#### Расчет нелинейной цепи со смешанным соединением элементов

**Пример 4.2.** В цепи, изображенной на рисунке 4.5, известно входное напряжение  $U$  и заданы вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $r_1, r_2, r_3$ . Требуется определить токи во всех ветвях, если  $U = 9$  В.

*Решение.* Начинаем расчет с построения на рисунке 4.6 в одной системе координат ВАХ всех элементов цепи ( $r_1, r_2, r_3$ ).

Далее строим эквивалентную ВАХ резисторов  $r_2$  и  $r_3$ , включенных параллельно. Для этого на оси напряжений выбираем точки (удобно выбрать все оцифрованные). Из каждой точки мысленно проводим перпендикуляр к оси напряжений. В качестве примера на рисунке перпендикуляр восстановлен из точки (7 В). На перпендикуляре суммируем два отрезка, один из которых заключен между осью  $U$  и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ  $I_2 = f(U_{ab})$  (отрезок 1). Второй заключен между осью  $U$  и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ  $I_3 = f(U_{ab})$  (отрезок 2). Точка  $A$ , получаемая в результате суммирования на данном перпендикуляре отрезков 1 и 2, находится на эквивалентной ВАХ  $I_{23} = f(U_{ab})$  резисторов  $r_2$  и  $r_3$ . Выполнив рассмотренную операцию суммирования отрезков для каждого перпендикуляра, мы имеем ряд точек.

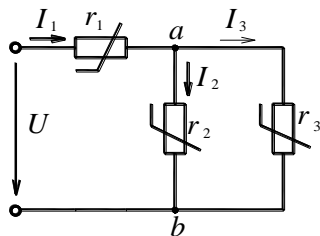


Рисунок 4.5 – Схема нелинейной цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов

Соединив эти точки линией, получаем эквивалентную ВАХ резисторов  $r_2$  и  $r_3$   $I_{23} = f(U_{ab})$ .

Затем выбираем точки на оси токов и мысленно проводим из них перпендикуляры к этой оси. На рисунке в качестве примера восстановлен перпендикуляр из точки  $4,6 \text{ mA}$ , на котором суммируем два отрезка. Один заключен между осью токов и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ  $I_{23} = f(U_{ab})$  (отрезок 3), а второй находится между осью токов и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ  $I_1 = f(U_1)$  (отрезок 4). После суммирования получаем на этом перпендикуляре точку  $B$ . Выполнив суммирование отрезков на всех перпендикулярах к оси токов, фиксируем ряд точек. Соединяем эти точки линией и получаем эквивалентную ВАХ всей цепи  $I_1 = f(U)$ .

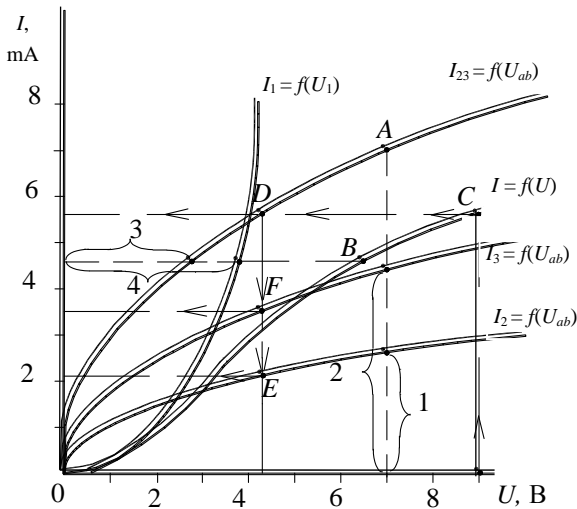


Рисунок 4.6 – Графический метод расчета нелинейной цепи со смешанным соединением элементов

Для определения токов ветвей из точки на оси напряжений, соответствующей заданному входному напряжению (в нашем примере  $U = 9 \text{ В}$ ), строим перпендикуляр к этой оси. Находим место пересечения перпендикуляра с ВАХ  $I_1 = f(U)$  всей цепи (точка  $C$ ). Ордината этой точки есть ток  $I_1$ , протекающий в первой ветви через резистор  $r_1$  (в нашем примере  $I_1 = 5,7 \text{ mA}$ ). Опускаем из точки  $C$  на ось токов перпендикуляр. Место пересечения его с ВАХ  $I_{23} = f(U_{ab})$  дает точку  $D$ . Абсцисса этой точки есть напряжение на разветвленном участке цепи (в нашем примере  $U_{ab} = 4,3 \text{ В}$ ). Из точки  $D$  проводим перпендикуляр на ось напряжений. В местах пересечения его с ВАХ  $I_2 = f(U_{ab})$  и ВАХ  $I_3 = f(U_{ab})$  отмечаем точки  $E$  и  $F$ . Ординатами этих точек являются токи  $I_2$  и  $I_3$  (в нашем примере  $I_2 = 2,1 \text{ mA}$ ,  $I_3 = 3,6 \text{ mA}$ ). Таким образом,  $I_1 = 5,7 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 2,1 \text{ mA}$ ,  $I_3 = 3,6 \text{ mA}$ . На рисунке путь от заданного напряжения до искоемых токов обозначен стрелками.

### *Аналитический метод расчета цепи.*

Точность расчетов графическими методами мала и существенно зависит от субъективных факторов. Аналитический метод исследования должен был бы заключаться в решении задач путем применения методов исследования сложных цепей при введении зависимостей сопротивлений нелинейных элементов от тока или напряжения. Эти зависимости обычно не всегда имеют точное аналитическое выражение и могут быть аппроксимированы некоторыми функциями. Но даже при такой аппроксимации задача исследования цепи становится очень трудной и в ряде случаев разрешима только путем применения специальных компьютерных программ расчета (например, программная среда OrCAD, Electronics Workbench V5.12, Multisim 11.0 и пр.).

## **4.2 Нелинейные элементы электрической цепи переменного тока**


Для нелинейных элементов переменного тока можно выделить три группы: резистивные, индуктивные и емкостные. Каждая из этих групп, в свою очередь, делится на управляемые и неуправляемые.

Неуправляемыми нелинейными резистивными элементами являются полупроводниковые диоды, термисторы и другие элементы.

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

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

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

В нелинейных емкостных элементах емкость  $C$  зависит от напряжения  $U$ , на электрических принципиальных схемах они имеют обозначение , имеют дополнительное название – вариконды.

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

### Контрольные вопросы

- 1 Дайте определения следующим понятиям: нелинейный резистор, нелинейная электрическая цепь, статическое и дифференциальное сопротивления.
- 2 В чем различие между линейным и нелинейным элементами?
- 3 Какая электрическая цепь является нелинейной?
- 4 Статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента и методика определения их величины из ВАХ.
- 5 Почему затруднено использование законов Ома и Кирхгофа для расчета нелинейной цепи?
- 6 Какие существуют методы расчета нелинейной цепи?
- 7 Назовите варианты применения нелинейных элементов.
- 8 Как определяется эквивалентная ВАХ нелинейных резисторов, включенных последовательно и параллельно?

## 5 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

### 5.1 Основные понятия о магнитных цепях

Магнитное поле определим как одну из двух сторон электромагнитного поля, характеризующуюся воздействием на движущиеся заряженные частицы, магниты, проводники с током и другими явлениями.

Рассмотрим магнитное поле постоянного магнита. Северным называется магнитный полюс, который обращается к северному земному полюсу. Графически магнитное поле изображается линиями действия магнитных сил, представление о которых, например, дает распределение стальных опилок вдоль линий определенной конфигурации на листе картона, положенном на магнит, или с помощью магнитной стрелки (рисунок 5.1).

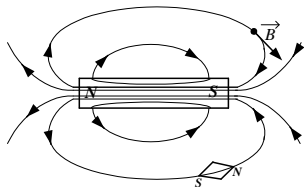


Рисунок 5.1 – Линии магнитного поля постоянного магнита

Магнитная индукция  $B$  – это векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся электрически заряженную частицу со стороны магнитного поля. Магнитную индукцию можно также определить как отношение элементарного магнитного потока  $d\Phi$ , пронизывающего в перпендикулярном направлении элементарную площадку площадью  $ds$ , к размеру этой площадки:  $B = d\Phi/ds$ .

Магнитная индукция является векторной величиной, векторы которой направлены по касательным к линиям поля. За направление вектора магнитной индукции принимается направление, показываемое северным полюсом магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Единицей измерения магнитной индукции служит тесла (Тл).

Магнитная индукция магнитного поля Земли составляет  $10^{-4}$  Тл. В электрических реле  $B = (0,2 \dots 0,3)$  Тл, в трансформаторах  $B = 1,4$  Тл, предельное значение в машинах постоянного тока составляет 1,71 Тл.

Магнитный поток  $\Phi$  или поток вектора магнитной индукции через данную поверхность площадью  $S$  пропорционален числу магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность. Значение величины магнитного потока, пронизывающего площадку, расположенную перпендикулярно к магнитным силовым линиям, можно определить из выражения:  $\Phi = BS$ . Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб).

В природе нет однополярных магнитов, так как при последовательном разделении любого магнита на любое число малых магнитов всегда будут

получаться дипольные магниты. Поэтому линии магнитной индукции непрерывны и замкнуты (см. рисунок 5.1). Следовательно, в любую замкнутую поверхность входит столько же линий, сколько из нее выходит. Математически принцип непрерывности линий вектора магнитной индукции выражается так:  $\int_s B ds = 0$ .

При расчете магнитных цепей пользуются напряженностью магнитного поля  $H$ , определяемой из выражения

$$H = B/\mu_a, \quad (5.1)$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, равная произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на относительную магнитную проницаемость  $\mu$ .

Направление вектора  $H$  в однородной и изотропной среде совпадает с направлением вектора  $B$ . Единицей измерения напряженности магнитного поля в системе СИ является ампер на метр (А/м).

Исходя из магнитных свойств, все вещества делят на три группы: диамагнитные ( $\mu < 1$ ), парамагнитные ( $\mu > 1$ ), ферромагнитные ( $\mu \gg 1$ ).

Относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость вещества  $\mu_a$  больше магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ , т. е.  $\mu = \mu_a / \mu_0$ . Величина магнитной постоянной  $\mu_0$  не изменяется ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). Магнитную проницаемость воздуха принимают равной магнитной постоянной, поэтому воздушные магнитные цепи являются линейными.

Для создания магнитных цепей используют преимущественно ферромагнитные материалы. Основными ферромагнитными материалами являются электротехнические стали Э11, Э21, Э32, Э44 и т. д. Относительная магнитная проницаемость электротехнических сталей порядка 1800–1900.

Магнитное поле создается электрическими токами. Закон полного тока определяет количественную связь между током и напряженностью магнитного поля:

$$\int_l H dl = \sum_{k=1}^n i_k. \quad (5.2)$$

Линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен полному току, охватываемому этим контуром.

При использовании этого выражения считают положительными токи, направление которых совпадает с направлением вращения правого винта.

Закон полного тока и закон электромагнитной индукции устанавливает не только качественную связь между возникновением магнитного поля и протеканием тока, но и является основой методов расчета магнитных цепей, используемых в электротехнике, радиотехнике и других областях.

Произведение напряженности магнитного поля  $H$  на длину участка цепи  $l$  называется падением магнитного напряжения или магнитным напряжением на данном участке:

$$U_M = Hl = R_M \Phi, \quad (5.3)$$

где  $R_M$  – магнитное сопротивление участка.

Измеряется магнитное напряжение амперами (А).

Магнитное сопротивление  $R_M$  зависит от геометрических размеров участка и значения величины магнитной проницаемости  $\mu_a$ . Его можно определить из выражения

$$R_M = l / (\mu_a S), \quad (5.4)$$

где  $l$  – длина однородного участка магнитной цепи;

$S$  – площадь его поперечного сечения.

Выражение (5.4) справедливо при неизменной магнитной проницаемости  $\mu$  магнитной цепи. Если магнитная цепь имеет  $n$  различных последовательных участков, то магнитное сопротивление  $R_M$  складывается из сопротивлений отдельных участков с различными  $\mu$ :

$$R_M = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_o \mu_k S_k}. \quad (5.5)$$

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

Электрические машины, трансформаторы и другие аппараты конструируют так, чтобы магнитный поток в них был по возможности наибольшим.

*Магнитной цепью* называется контур, по которому замыкается магнитный поток, включающий в себя источник магнитодвижущей силы (МДС), ферромагнитные или иные тела (среды), в том числе и воздушные зазоры.

По виду магнитные цепи делятся на неразветвленные и разветвленные, а по структуре – на однородные и неоднородные.

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

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

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



$$\sum \Phi = 0. \quad (5.6)$$

Для замкнутого контура магнитной цепи можно применять также второй закон Кирхгофа для магнитной цепи, согласно которому *алгебраическая сумма падений магнитных напряжений равна алгебраической сумме МДС*:

$$\sum U_M = \sum Iw, \quad (5.7)$$

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

Сравнивая выражения, описывающие законы Кирхгофа для электрических и магнитных цепей, можно отметить аналогию между ними. При этом току, напряжению, ЭДС и сопротивлению в электрических цепях соответствуют магнитный поток, магнитное напряжение, МДС и магнитное сопротивление в магнитных цепях. Отмеченная аналогия позволяет при расчетах изображать магнитные цепи в виде, напоминающем электрические принципиальные схемы. Такие схемы называются эквивалентными. На них источник ЭДС заменяется источником МДС, а вместо потребителей энергии изображаются прямоугольниками участки магнитной цепи с различным магнитным сопротивлением. Участки, образованные воздушными зазорами и немагнитными вставками, изображаются линейными элементами, а выполненные из ферромагнитного материала рисуются как нелинейные элементы. Пример эквивалентной схемы приведен на рисунке 5.2. Эта схема соответствует неразветвленной магнитной цепи, состоящей из двух последовательных участков. Нелинейный элемент магнитной цепи ( $R_M$ ) выполнен из ферромагнитного материала, а линейный ( $R_0$ ) содержит воздушный зазор.

Магнитное поле может возбуждаться постоянным магнитом или, чаще всего, проводником с током, который чаще всего навивается в виде катушки из изолированного провода.

При расчете магнитных цепей необходимо учитывать то, что магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от магнитной индукции. Если  $\mu = \text{const}$  вебер-амперная характеристика  $\Phi = f(I)$  линейная, то при изменяющейся магнитной проницаемости эта характеристика будет нелинейной. В электрических цепях ток протекает по проводам и мы пренебрегаем ничтожно малыми токами проводимости, протекающими в окружающей среде. Для магнитной цепи следует считаться с магнитными потоками, проходящими в окружающей среде, так как магнитные сопротивления для потоков в окружающей среде соизмеримы даже с магнитными сопротивлениями магнитопровода из ферромагнитного мате-

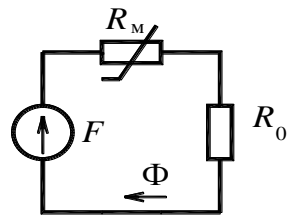


Рисунок 5.2 – Эквивалентная расчетная схема магнитной цепи

риала. Следовательно, магнитная цепь является нелинейным устройством и в этом случае для расчета можно использовать, например, методы анализа нелинейных цепей.

Для воздушного зазора характерна малая магнитная проницаемость ( $\mu = 1$ ) по сравнению с магнитопроводом из ферромагнитного материала, поэтому даже небольшой воздушный зазор резко уменьшает магнитный поток. Иногда воздушные зазоры делают специально, чтобы сердечник не намагничивался до состояния насыщения.

*Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.* Поместим проводник длиной  $l$ , по которому протекает ток  $I$ , перпендикулярно к линиям однородного магнитного поля с  $B = \text{const}$  (рисунок 5.3). Проводник будет стремиться перемещаться в том направлении, в котором на него действует электромагнитная сила Ампера, определяемая из выражения

$$F_{\text{эм}} = BIl \sin \alpha, \quad (5.8)$$

где  $l$  – длина проводника;

$\alpha$  – угол между током и магнитной индукцией.

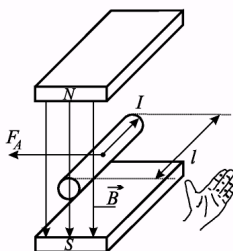


Рисунок 5.3 – Правило левой руки

Направление силы Ампера, действующей на проводник с током, определяется *правилом левой руки* (см. рисунок 5.3). В соответствии с этим правилом силовые магнитные линии должны входить в ладонь левой руки, четыре вытянутых пальца необходимо направить по направлению тока в проводнике, тогда отведенный в сторону большой палец укажет направление действия силы.

*Закон электромагнитной индукции.* ЭДС, индуцируемая в цепи при изменении магнитного потока, проходящего через поверхность, ограниченную контуром цепи, равна скорости изменения магнитного потока, взятой с отрицательным знаком:

$$e = -d\Phi / dt, \quad (5.9)$$

где  $d\Phi$  – элементарное изменение магнитного потока.

При изменении магнитного потока, связанного с цепью, в цепи индуцируется ЭДС такого направления, что вызываемый ею ток стремится воспрепятствовать изменению потока.

Для катушки с витками  $w$ , каждый из которых связан с магнитным потоком  $\Phi$ , ЭДС равна скорости изменения потокосцепления:

$$e = -d\Psi / dt = -w d\Phi / dt. \quad (5.10)$$

Если проводник длиной  $l$ , расположенный перпендикулярно к магнитным линиям, движется со скоростью  $v$  под углом  $\alpha \neq \pi/2$  по отношению к линиям магнитного поля с индукцией  $B$ , то ЭДС в нем определится как

$$e = Blv \sin \alpha. \quad (5.11)$$

Направление ЭДС, индуцированной в проводнике при пересечении магнитных линий, определяется по *правилу правой руки* (рисунок 5.4). Если расположить ладонь правой руки перпендикулярно магнитным линиям так, чтобы линии входили в ладонь, а большой палец, отставленный в сторону, направить по движению проводника, то вытянутые пальцы ладони будут указывать направление индуцированной ЭДС.

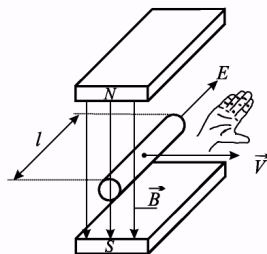


Рисунок 5.4 – Правило правой руки для определения направления ЭДС

## 5.2 Исследование магнитных цепей

На практике используется такой порядок расчета, при котором по необходимому магнитному потоку определяется МДС намагничивающей обмотки ( $F = Iw$ ), требуемая для проведения данного магнитного потока. В некоторых случаях для различных значений магнитного потока  $\Phi$  находят необходимые МДС и строится кривая намагничивания  $\Phi = f(F)$ .

Сущность метода состоит в разделении магнитной цепи на  $n$  участков, определении МДС  $H_k l_k$  для каждого участка в предположении неизменности напряженности магнитного поля на каждом из участков и суммировании этих МДС для замкнутого контура магнитной цепи. Выражение закона полного тока в этом случае будет иметь вид

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = F. \quad (5.12)$$

Для приближенного решения делают следующие допущения: пренебрегают магнитными потоками рассеяния; пренебрегают выпучиванием магнитных линий в воздушном зазоре; при расчете пользуются основной кривой намагничивания.

**Пример 5.1.** На рисунке 5.5 изображен чертеж магнитной цепи, магнитный поток в которой создается намагничивающей обмоткой  $w$ . Для заданной магнитной цепи, имеющей  $a = 100$  мм,  $b = 150$  мм,  $c = 50$  мм,  $l_0 = 1$  мм,  $B_0 = 1$  Тл, определить магнитодвижущую силу катушки. Рассчитать значение величины электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в воздушном зазоре, если по этому проводнику протекает ток  $I = 5$  А. Направление тока в проводнике указано на рисунке 5.5. Показать на чертеже направ-

ление этой силы. Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, кривая намагничивания которой приведена в [14].

*Решение.* Проводим на чертеже магнитопровода среднюю магнитную силовую линию (на рисунке она изображена пунктиром) и разбиваем цепь на участки, на которых индукция и магнитная проницаемость неизменны. Таких участков в заданной цепи два. Первым может быть воздушный зазор, а вторым – магнитопровод. При переходе от воздушной среды к ферромагнитному материалу магнитопровода происходит изменение магнитной проницаемости, поэтому эти две части магнитной цепи должны принадлежать различным участкам. В рассматриваемом примере магнитопровод выполнен из одного материала, имеет одинаковое сечение, а следовательно, одинаковую магнитную проницаемость и индукцию. Данный факт позволяет рассматривать магнитопровод лишь с одним участком. Длина первого участка  $l_1$  (воздушного зазора), измеренная по средней магнитной линии (АВ), равна  $l_0$ . Второй участок (АВВ) проходит по магнитопроводу и его длина  $l_2 = 2(a - c) + 2(b - c) - l_0 = 2 \cdot (100 - 50) + 2 \cdot (150 - 50) - 1 = 299 \text{ мм} = 0,299 \text{ м}$ .

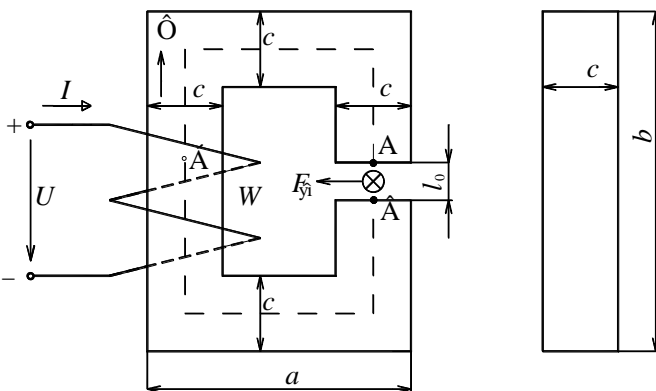


Рисунок 5.5 – Чертеж магнитной цепи

Эквивалентная схема замещения заданной магнитной цепи изображена на рисунке 5.2. С помощью элементов  $R_M$  и  $R_0$  учитывается соответственно магнитное сопротивление магнитопровода и воздушного зазора. Источник питания соответствует искомой намагничивающей силе  $F$ , создающей в цепи магнитный поток  $\Phi$ . Так как магнитное сопротивление ферромагнитных материалов нелинейно, то на эквивалентной схеме замещения магнитной цепи сопротивление  $R_M$  изображается в виде нелинейного элемента.

По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи можно составить уравнение

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

- где  $U_{M1}$  – магнитное напряжение на первом участке;  
 $U_{M2}$  – магнитное напряжение на втором участке;  
 $H_1$  – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре;  
 $l_1$  – длина первого участка;  
 $H_2$  – напряженность магнитного поля в ферромагнитном материале;

$l_2$  – длина второго участка.

Так как первым участком является воздушный зазор, то напряженность поля на нем определяем из выражения

$$H_1 = B_0 / \mu_0 = 1/4\pi \cdot 10^{-7} = 7,96 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Напряженность магнитного поля на втором участке находим по кривой намагничивания [14]. В соответствии с этой таблицей для стали марки 1211 при индукции  $B_2 = 1$  Тл напряженность поля  $H_2 = 5,02$  А/см = 502 А/м. Тогда магнитодвижущая сила  $F$  катушки

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 7,96 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 502 \cdot 0,299 = 946 \text{ А.}$$

Значение величины электромагнитной силы  $F_{эм}$ , действующей на проводник с током в воздушном зазоре,

$$F_{эм} = B_0 I l = B_0 c l = 1 \cdot 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ Н.}$$

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

Направление магнитного потока в магнитопроводе определяем по правилу буравчика, которое надо применять для намагничивающей катушки  $w$ . В соответствии с этим правилом совмещаем буравчик с осью катушки. Если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в намагничивающей катушке, то он будет перемещаться вверх. Так как это перемещение совпадает с направлением магнитного потока  $\Phi$  в катушке  $w$ , то магнитный поток в магнитопроводе замыкается по часовой стрелке. В воздушном зазоре магнитные силовые линии направлены сверху вниз.

Направление силы, действующей на проводник с током в воздушном зазоре, определяем по правилу левой руки (см. рисунок 5.5). В рассматриваемом примере сила  $F_{эм}$  направлена влево.

#### *Определение магнитной индукции в заданном сечении.*

Из-за нелинейности магнитной цепи выражения для  $\Phi$ ,  $H$ ,  $U_m$ ,  $R_m$  нельзя использовать для непосредственного определения магнитной индукции на участке по заданному значению величины магнитодвижущей силы (обратная задача). Для решения этой задачи разработаны специальные методы расчета, одним из которых является графоаналитический метод. В соответствии с этим методом необходимо произвольно задаться рядом значений индукции в воздушном зазоре, и по методике расчета прямой задачи (см. пример 5.1) для каждого из них определить соответствующее значение намагничивающей силы. Затем строится зависимость индукции в зазоре от намагничивающей силы и по ней для заданного значения МДС находится искомое значение величины  $B$ .

#### **Определение магнитной индукции в сечении магнитной цепи по заданной намагничивающей силе**

**Пример 5.2.** Для заданной МДС, которая получается удвоением значения  $F$ , рассчитанного в примере 5.1 ( $F' = 2F = 2 \cdot 946 = 1892$  А), требуется определить индукцию в воздушном зазоре.

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

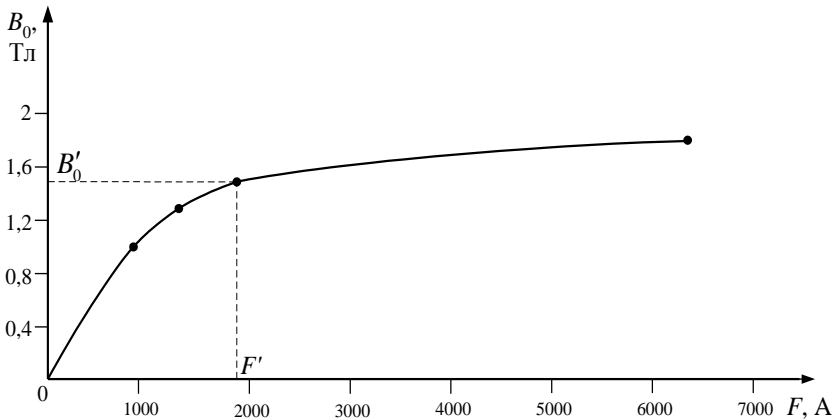
По методике решения прямой задачи определяем для каждого из выбранных значений индукции соответствующее значение величины магнитодвижущей силы. Результаты расчета заносим в таблицу 5.1.

**Таблица 5.1 – Результаты расчета намагничивающей силы**

$B_0$ , Тл	$H_1$ , А/м	$H_2$ , А/м	$H_1 l_1$ , А	$H_2 l_2$ , А	$F$ , А
1	$7,96 \cdot 10^5$	502	796	150	946
1,3	$10,35 \cdot 10^5$	1140	1035	341	1376
1,5	$11,94 \cdot 10^5$	2500	1194	747,5	1941
1,8	$14,33 \cdot 10^5$	12800	1433	3827	6373

По расчетным данным строим кривую зависимости  $B_0 = f(F)$  (рисунок 5.6) и по ней для значения  $F'$  определяем индукцию в зазоре  $B'_0$ .

Из построенной на рисунке 5.6 зависимости  $B_0 = f(F)$  видно, что при намагничивающей силе  $F' = 1892$  А индукция в зазоре  $B'_0 = 1,48$  Тл.



**Рисунок 5.6 – Зависимость магнитной индукции в зазоре от намагничивающей силы для заданной цепи**

### Контрольные вопросы

- 1 Из чего состоит магнитная цепь?
- 2 Укажите основные величины, характеризующие магнитное поле. Как они связаны между собой и в каких единицах выражаются?
- 3 Какие параметры используются для характеристики магнитных свойств материалов?
- 4 Сформулируйте законы Кирхгофа для магнитных цепей.
- 5 Как определить направление магнитного потока и электромагнитной силы?
- 6 Сформулируйте закон полного тока.
- 7 Как по известной индукции определяется напряженность поля в воздушной среде и ферромагнитном материале?
- 8 Что понимают под магнитным сопротивлением участка цепи? От каких факторов оно зависит?
- 9 Почему сердечники различных электромагнитных аппаратов выполняются из ферромагнитных материалов?
- 10 От чего зависит величина магнитной индукции в сечении магнитопровода?
- 11 С какой целью стремятся выполнить магнитную цепь с возможно меньшим воздушным зазором?

## 6 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

### 6.1 Классификация и основные характеристики измерений

Механические, тепловые и световые явления человек ощущает при помощи своих органов чувств. С их помощью люди, хоть и приблизительно, могут оценить размеры предметов, скорость их движения, яркость светящихся тел, но в тоже время одинаково реагировать на проводник с током 0,01 А или 1 А.

Мы можем определить форму проводника, его цвет, но органы чувств не позволяют оценить величину тока. Точно так же мы совершенно равнодушны к магнитному полю, созданному катушкой, электрическому полю между обкладками конденсатора. Медицина установила определенное влияние электрических и магнитных полей на организм человека, но это влияние мы не ощущаем. Все это заставило физиков и инженеров пользоваться электроизмерительными приборами.

Приборы – глаза и уши инженера-электрика. Без них его работа невозможна. Показания (сигналы) электроизмерительных приборов используют для оценки работы различных электротехнических устройств и состояния электрооборудования, в частности состояния изоляции. Электроизмерительные приборы отличаются высокой чувствительностью, точностью измерений, надежностью и простотой исполнения.

Показания электроизмерительных приборов можно передавать на дальние расстояния, использовать для непосредственного воздействия на производственные процессы (автоматическое регулирование) и т. д.

Материал электрических измерений лучше воспринимается, если известно содержание основных терминов и определений.

*Измерение* – это определение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерения выполняются в общепринятых единицах.

*Метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, способах достижения требуемой точности.

*Объект измерения* – это сложное, многогранное явление или процесс (например, электрические колебания), характеризующийся множеством отдельных физических параметров. Один из интересующих нас параметров, подлежащий измерению называется измеряемой физической величиной (например, частота колебаний).



*Средство измерений* – это техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства (например, вольтметр, амперметр или омметр).

*Принцип измерений* – это совокупность физических явлений, на которых основаны измерения (например, резонансный принцип измерения частоты).

*Метод измерений* представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений (например, метод сравнения измеряемой частоты с известной частотой).

*Методика измерений* в отличие от метода включает в себя детально разработанный порядок процесса измерений с использованием конкретных методов и средств измерений.

Как бы тщательно не проводилось измерение, его результат будет содержать некоторую неточность, которая характеризуется погрешностью. *Погрешность измерения* – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Широко применяемый термин *точность измерений* характеризует качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению. Большой точности соответствует меньшая погрешность измерения.

Значение физической величины, найденное путем ее измерения, называется *результатом измерения*. Результат измерения может быть получен в результате одного наблюдения или при обработке результатов нескольких наблюдений. При этом под наблюдением понимают экспериментальную операцию, при которой получают одно числовое значение величины.

В Республике Беларусь введена Международная система единиц (International System of Units), сокращенно СИ (SI) (таблица 6.1).

*Таблица 6.1 – Основные и дополнительные единицы СИ (SI)*

Единицы	Величина	Наименование	Обозначение
Основные	Длина	Метр	м
	Масса	Килограмм	кг
	Время	Секунда	с
	Сила тока	Ампер	А
	Термодинамическая температура	Кельвин	К
	Количество вещества	Моль	моль
	Сила света	Кандела	кд
Дополнительные	Плоский угол	РадIAN	рад
	Телесный угол	Стерaдиан	ср

Средства измерений в зависимости от их роли в процессе измерений разделяются на следующие виды.

*Мера* – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Мера может быть однозначной

(например, катушка индуктивности) и многозначной (например, магазин сопротивлений, генератор стандартных сигналов).

*Измерительный преобразователь* – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в удобной для передачи форме, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

*Измерительный прибор* – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Это наиболее многочисленный вид средств измерений.

*Измерительная система* – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

В зависимости от способа получения результата различают два метода измерения: прямой и косвенный.

*Прямым* называется такое измерение, результат которого получается непосредственно из опытных данных. Сюда относятся измерения различных физических величин при помощи приборов, градуированных в установленных единицах, например, измерение силы тока амперметром, сопротивления проводника – омметром, температуры – термометром и т. д. Прямые измерения широко применяются из-за их простоты и скорости получения результата.

*Косвенным* называется измерение, при котором искомое значение величины определяется на основании известной математической зависимости между ней и величинами, полученными при прямых измерениях. Например, мощность  $P$  в цепях постоянного тока вычисляют по формуле:  $P = UI$ ; напряжение  $U$  в этом случае измеряют вольтметром, а ток  $I$  – амперметром; сопротивление резистора  $R = U/I$  – по измеренным значениям напряжения  $U$  и тока  $I$ . Косвенные измерения используются, как правило, только в тех случаях, когда нельзя применять прямые.

## **6.2 Погрешности измерений и электроизмерительных приборов**

Важнейшими характеристиками средств измерения, отличающими их от других технических средств, являются метрологические характеристики, с помощью которых определяют значение измеряемой величины и аппаратную составляющую погрешности результата измерений.

К *метрологическим характеристикам* относятся погрешности средств измерения, чувствительность, цена деления и т. д.

*Погрешность средства измерения* – метрологическая характеристика, количественно выражающая отклонение номинального значения физической величины, измеряемое данным средством, от истинного значения.

В зависимости от причины возникновения погрешности различают *методическую, инструментальную и субъективную* погрешности. Методическая погрешность возникает из-за несовершенства метода, принципа или методики измерения. (Например, из-за недостаточно большого сопротивления вольтметра по сравнению с внешним сопротивлением между точками подключения вольтметра). Инструментальная погрешность определяется погрешностью средства измерения. Субъективная погрешность возникает из-за недостаточно точного отсчета оператором показаний средств измерений. От такой погрешности нужно отличать *промах* – неверный результат измерения, полученный в результате грубой ошибки в отсчете показаний.

В зависимости от устойчивости погрешности при повторении измерения различают *систематическую и случайную* погрешности. Систематическая погрешность – это погрешность, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины (например, погрешность градуировки шкалы, температурная погрешность и т. п.). Систематическая погрешность измерения принципиально предсказуема для последующих результатов наблюдений. Если она определена достаточно точно, то может быть исключена введением поправки или поправочного множителя. Случайная погрешность – погрешность, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Эта погрешность является следствием случайных процессов (закономерность которых установить не удастся) в измерительных цепях и во влияющей внешней среде, а также следствием некоторой неопределенности отсчета показаний. Например, погрешность обусловленная дискретным характером показаний цифрового прибора.

*Статическая и динамическая погрешности.* Статическая погрешность  $\Delta_{ст}$  – это погрешность, проявляющаяся при измерении постоянной величины (или величины, изменяющейся настолько медленно, что инерционные свойства объекта и средства измерения при этом не проявляются). Динамическая погрешность  $\Delta_{дин}$  – это дополнительно возникающая погрешность, обусловленная появлением инерционных свойств объекта или средств измерений.

При этом  $\Delta = \Delta_{ст} + \Delta_{дин}$ .

*Основная и дополнительная погрешности.* Основная погрешность – это погрешность в нормальных условиях. Нормальные условия – это допустимые диапазоны изменения влияющих на измерения величин, устанавливаемые в стандартах или в технических условиях на средства измерения данного вида. К влияющим на измерения величинам могут относиться например такие величины, как температура окружающей среды, напряжение питания,

частота источника питания, давление атмосферы и др. Погрешность, возникающая вследствие выхода влияющих величин за пределы нормальных значений, (вследствие нарушения нормальных условий) называется дополнительной погрешностью.

Нормирование – это установление норм, т. е. официально закрепленных параметров, зависимостей или условий. Очевидно, что при выполнении измерений необходимы хотя бы ориентировочные сведения об уровне инструментальных погрешностей используемых средств измерения (СИ).

*Цена деления* прибора равна значению измеряемой величины, которое вызывает отклонение указателя (стрелки) на одно деление шкалы прибора. Например, предел измерения вольтметра 10 В, шкала имеет 100 делений. Тогда цена деления этого прибора равна 0,1 В/дел.

*Чувствительностью* электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя прибора к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение:

$$s = \Delta / x,$$

где  $\Delta$  – линейное или угловое перемещение;

$x$  – показание прибора.

Например, при токе 3 А стрелка амперметра сместилась на 36 делений. Чувствительность данного прибора  $s = 36 / 3 = 12$  дел/А.

*Абсолютная погрешность* прибора в данной точке диапазона измерения

$$\Delta = x - x_i, \quad (6.1)$$

где  $x_i$  – истинное значение измеряемой величины.

В связи с тем, что истинное значение чаще всего неизвестно, на практике вместо него используется действительное значение  $x_d$ , в качестве которого применяют либо среднее арифметическое значение ряда измерений, либо показания образцового прибора. По этой причине на практике значение погрешности можно оценить только приближенно.

Абсолютная погрешность может быть положительной и отрицательной. Она выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина. Абсолютная погрешность с обратным знаком называется *поправкой*.

Абсолютная погрешность  $\delta$  прибора не характеризует в полной мере точность измерения, поэтому при измерениях определяется также *относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_d}; \quad \delta_{\%} = \frac{\Delta}{x_d} \cdot 100 \%. \quad (6.2)$$

*Относительная приведенная погрешность*  $\gamma$  электрического измерительного прибора равна отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению  $x_N$ , которое принимается видом шкалы (рисунок 6.1):

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N}; \quad \gamma_{\%} = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\%. \quad (6.3)$$

Относительная погрешность обычно существенно изменяется вдоль шкалы прибора и с уменьшением значений измеряемой величины увеличивается.

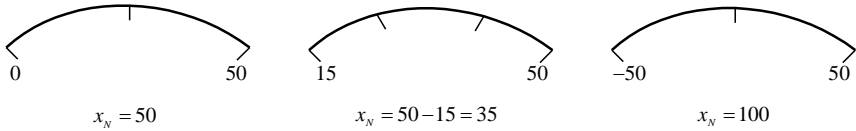


Рисунок 6.1 – Виды шкал измерительных приборов

*Точность* электроизмерительного прибора является одним из важнейших показателей, характеризующих его качество. Она определяется величиной погрешности (наибольшей ошибки), которая может иметь место при измерении какой-либо величины.

*Класс точности* – основная метрологическая характеристика прибора, определяющая допустимые значения основных и дополнительных погрешностей, влияющих на точность измерения.

Класс точности записывается в виде числа, которое указывает максимально возможную погрешность прибора, выраженную в процентах от наибольшего значения величины, измеряемой в данном диапазоне работы прибора. Так, для вольтметра, работающего в диапазоне измерений 0–30 В, класс точности 1,0 предполагает, что указанная погрешность при положении стрелки в любом месте шкалы не превышает 0,3 В.

Согласно ГОСТу, приборам непосредственной оценки присваивают классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Класс прибора обычно указывается на шкале. Если класс точности на приборе не указан, то он считается равным четырем.

**Пример 6.1.** Определить точность результата измерения напряжения сети 220 В с помощью двух вольтметров класса 2,5 каждый, если предел измерения одного вольтметра равен 250 В, второго – 500 В.

*Решение.* Абсолютные погрешности прибора со шкалой 250 В:  $(250/100) \cdot (\pm 2,5) = \pm 6,25$  В, со шкалой 500 В:  $(500/100) \cdot (\pm 2,5) = \pm 12,5$  В.

Из примера видно, что погрешность измерения в первом случае будет меньше. Поэтому необходимо пользоваться тем прибором, предел измерения которого ближе к предполагаемому значению измеряемой величины (например, стрелка измерительного прибора располагается в последней четверти шкалы).

### 6.3 Классификация электроизмерительных приборов и технические требования, предъявляемые к ним

Электрические методы измерений электрических и неэлектрических величин имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерений: незначительное потребление энергии; возможность дистанционной передачи измерительной информации; большая скорость измерений; высокая точность и чувствительность.

Электроизмерительные приборы – это средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем (например, вольтметр, амперметр, ваттметр, фазометр).

Электроизмерительная установка состоит из ряда средств измерений (мер, измерительных преобразователей, приборов) и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте. Электроизмерительные установки используются для поверки и градуировки электроизмерительных приборов и испытаний магнитных и электроизоляционных материалов.

По роду *измеряемой величины* электроизмерительные приборы подразделяют на амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики электрической энергии, фазометры, частотомеры, омметры и т. д. В таблице 6.2 приведены условные обозначения наиболее широко применяемых электроприборов.

Таблица 6.2 – Классификация электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины

Прибор	Условное обозначение
Амперметр	A
Вольтметр	V
Ваттметр	W
Варметр	var
Миллиамперметр	mA
Микроамперметр	$\mu$ A
Милливольтметр	mV
Омметр	$\Omega$
Мегаомметр	M $\Omega$
Частотомер	Hz
Фазометр, измеряющий: – сдвиг фаз	$\varphi$
– коэффициент мощности	cos $\varphi$
Счетчик активной мощности	Wh
Осциллограф	




Электроизмерительные приборы классифицируют по назначению, конструктивному исполнению, роду измеряемой величины, принципу, условиям эксплуатации, классу точности и другим критериям.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называются аналоговыми приборами. Электроизмерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называются цифровыми приборами.

В зависимости от вида получаемой информации измерительные приборы подразделяют на показывающие, интегрирующие, суммирующие.




Ниже перечислены основные обозначения, указываемые на приборах.

*Род измеряемого тока:*



- — постоянный;
-  — переменный;
-  — постоянный и переменный;
-  — трехфазный.

*Класс точности* обозначается числом (например: 0,5; 1,5; ...) и может быть обозначен как число, обведенное окружностью.

*Положение шкалы прибора:*

-  — горизонтальное;
-  — вертикальное;
-  — наклонное.

*Рекомендуемое положение прибора:*

-  — горизонтальное;
-  — вертикальное;

*Изоляция корпуса прибора от измерительной цепи:*



— изоляция выдерживает напряжение 5 кВ;



— предостерегающий знак высокого напряжения или знак красного цвета: «Осторожно! Прочность изоляции не соответствует нормам».

*Технические условия.* По условиям эксплуатации приборы разделяются на три группы (буква, иногда «буква в треугольнике»):

Группа А (на шкалу не наносится) — приборы предназначены для работы при температуре окружающего воздуха ( $t_{в}$ ) от +10 до +35 °С и при относительной влажности ( $\phi$ ) до 80 %.

Группа Б —  $t_{в}$ : -30...+40 °С,  $\phi$  до 90 %.

Группа В: В<sub>1</sub> —  $t_{в}$ : -40...+50 °С,  $\phi$  до 95 %; В<sub>2</sub> —  $t_{в}$ : -50...+60 °С,  $\phi$  до 95 %; В<sub>3</sub> —  $t_{в}$ : -50...+80 °С,  $\phi$  до 98 %.

По степени защищенности от внешних магнитных или электрических полей приборы разделяются на четыре категории:

Категория защищенности прибора от внешних полей	I	II	III	IV
Допускаемое изменение показаний прибора, %	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 2,5$	$\pm 5,0$

*По устойчивости к механическим воздействиям:*

ОП – обыкновенные с повышенной механической прочностью;

ТП (ВП, УП) – тряско- (вибро-, ударо-) прочные;

ТН (ВН) – нечувствительные к тряске (вибрации).

*Обозначения вспомогательных частей:*

ДС – добавочное сопротивление;

НШ – наружный шунт (отдельный).

*Другие обозначения:*

$\triangle$  – при работе с прибором руководствоваться указаниями в его паспорте или описанием;

– / + – знаки полярности у зажимов прибора при включении его в цепь постоянного тока;

$\bigcirc$  – магнитный экран.

На лицевой панели электрических измерительных приборов указывают также условные обозначения, отражающие род измеряемого тока, класс точности прибора, испытательного напряжения изоляции, рабочего положения прибора и т. д. (рисунок 6.2).

Наибольшее распространение в электротехнической практике получили показывающие приборы, т. е. приборы непосредственной оценки или прямого отсчета. Приборы этого типа независимо от принципа действия и назначения состоят из двух основных частей: измерительной цепи и измерительного механизма.

Простейшая измерительная цепь, например вольтметра, представляет собой катушку с последовательно подсоединенным добавочным сопротивлением. При постоянном сопротивлении такой цепи через катушку проходит ток, пропорциональный измеряемому напряжению.

В простейшем амперметре измерительная цепь состоит из измерительной катушки, последовательно подключенной к электрической сети, в которой необходимо измерить ток.

Измерительный механизм предназначен для преобразования подводимой к нему электрической энергии в механическую энергию перемещения подвижной части прибора и связанной с ней стрелкой или другим указательным устройством, каждому положению которого соответствует определенное значение измеряемой величины.





Рисунок 6.2 – Пример лицевой панели электрического измерительного прибора

Одинаковый по конструкции измерительный механизм в сочетании с различными измерительными цепями можно применять для измерения различных электротехнических величин (мультиметр).

Подвижная часть прибора вместе с пружиной образует систему, обладающую массой и упругостью, в которой возможны механические колебания. Поэтому при изменении измеряемой величины новое положение равновесия у подвижной части прибора получается не сразу, а в большинстве случаев только после нескольких колебаний около нового положения равновесия. Для того чтобы подвижная часть возможно скорее устанавливалась используются успокоители, поглощающие кинетическую энергию подвижной части. Для большинства стрелочных приборов время успокоения должно быть не более 4 с, причем временем успокоения считается время от момента включения прибора до момента, когда стрелка прибора отклоняется от положения равновесия не более чем на 1 % шкалы.

К электроизмерительным приборам предъявляются следующие основные требования:

- 1) погрешность не должна превышать указанного на лицевой стороне предела (класса точности) и не должна изменяться с течением времени;
- 2) шкала прибора должна быть проградуирована в единицах СИ;
- 3) прибор должен быть снабжен успокоительной системой;

4) магнитные и электрические поля, температура окружающей среды не должны оказывать заметного влияния на показания прибора;

5) прибор должен потреблять минимальное количество энергии и должен выдерживать установленную соответствующим ГОСТом перегрузку.

Измерительные приборы необходимо защищать от ударов и сотрясений. С течением времени точность электроизмерительных приборов снижается, вследствие износа отдельных деталей и узлов, неправильного обращения с ними при измерениях. Поэтому для поддержания приборов в хорошем состоянии их необходимо регулярно осматривать, очищать от пыли, своевременно ремонтировать и периодически поверять.









#### 6.4 Основные системы электроизмерительных приборов

Любой прибор непосредственного отсчета состоит из двух основных частей: измерительного механизма и измерительной цепи (схемы).




*Измерительная цепь* преобразует измеряемую электрическую величину (напряжение, мощность, ток и т. д.) в пропорциональную ей величину, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. Например, в вольтметре измерительная цепь состоит из катушки измерительного механизма и добавочного резистора. При постоянстве сопротивления измерительной цепи ток в измерительном механизме вольтметра пропорционален измеряемому напряжению.

По принципу действия электроизмерительных приборов выделяют следующие основные системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, индукционная, вибрационная, электростатическая, термоэлектрическая, электронная (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Системы электрических измерительных приборов и их условные обозначения

Система прибора	Обозначение
Биметаллическая	
Вибрационная	
Индукционная	
Магнитоиндукционная	
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом	
Ферродинамическая	
Электродинамическая	

Окончание таблицы 6.3

Система прибора	Обозначение
Электромагнитная	
Электростатическая	
Тепловая	

Ниже приведены основные сведения о наиболее распространенных системах электроизмерительных приборов.

*Приборы магнитоэлектрической системы.* Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке легкой подвижной катушки (рамки).

На рисунке 6.3 показана схема устройства приборов этой системы. неподвижный подковообразный магнит имеет полюсы, которые охватывают сплошной железный сердечник. Между сердечником и полюсами магнита имеется воздушный зазор. На одной оси с сердечником находится подвижная легкая прямоугольная рамка, имеющая обмотку из тонкого изолированного провода. Эта рамка может свободно вращаться в воздушном зазоре между сердечником и полюсами магнита. Рамка представляет собой часть подвижной системы, которая включает указатель-стрелку 2.

В результате взаимодействия магнитного поля магнита с током, протекающим по рамке, возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора поворачивается около оси. Противодействующий момент создается спиральными пружинами 1, которые служат также и для подвода тока к концам обмотки на рамке.

Зависимость угла поворота  $\alpha$  подвижной части от величины тока  $I$ , протекающего по обмотке рамки

$$\alpha = kI,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции.

Из этой зависимости видно, что магнитоэлектрические приборы имеют *равномерную* шкалу.

Магнитоэлектрические приборы применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока. Из всех электроизмерительных приборов с непосредственным отсчетом они дают наибольшую точность измерения.

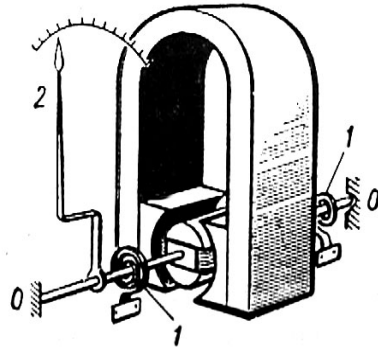


Рисунок 6.3 – Схема устройства приборов магнитоэлектрической системы

Измерительные приборы магнитоэлектрической системы находят применение также при измерениях в цепях переменного тока. В этом случае в цепь подвижной катушки включают выпрямитель.

К достоинствам магнитоэлектрических приборов относятся: равномерная шкала; большая точность при малой чувствительности; малая чувствительность к внешним магнитным полям; малое потребление энергии.

Недостатками таких приборов являются: пригодность только для постоянных токов (без выпрямителей); большая чувствительность к перегрузкам; сравнительно высокая стоимость.

*Приборы электромагнитной системы.* Принцип работы приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки, с подвижным железным сердечником, помещенным в этом магнитном поле, т. е. на втягивании стального сердечника в неподвижную обмотку с током.

На рисунке 6.4 показана схема электромагнитного прибора. Прибор состоит из прямоугольной катушки 1 с узкой щелью (просветом). Сердечник 5 изготовлен из мягкого железа и укреплен эксцентрично на оси 2. С осью сердечника скреплены стрелка, поршень 3 воздушного успокоителя 4 и спиральная пружина, создающая противодействующий момент.

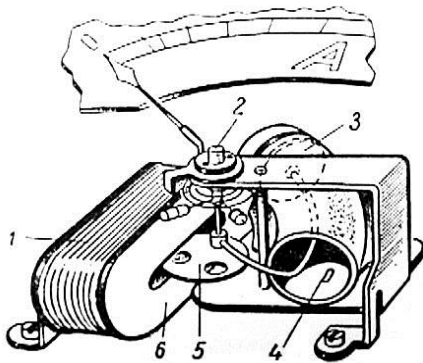


Рисунок 6.4 – Схема устройства приборов электромагнитной системы

Ток, протекающий по катушке 1, образует внутри нее магнитное поле, под действием которого железный сердечник, поворачиваясь вокруг оси, втягивается в щель катушки.

При увеличении тока возрастает магнитная индукция в щели катушки и увеличивается намагничивание железного сердечника.

Теория позволяет установить, что между углом отклонения стрелки и величиной тока должна быть квадратичная зависимость

$$\alpha = kI^2,$$

где  $k$  – некоторый коэффициент;

$I$  – величина тока.

Следовательно, шкала таких приборов *неравномерная*.

Точность приборов этой системы по сравнению с приборами магнитоэлектрической системы невысокая. Она зависит от внешнего магнитного поля, частоты измеряемого переменного тока и пр.

Достоинства проборов электромагнитной системы: простота конструкции, пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока; надежность в эксплуатации.

К недостаткам относятся: неравномерность шкалы; влияние посторонних магнитных полей на точность показаний. Последнее обусловлено тем, что магнитное поле обмотки расположено в воздушной среде и поэтому его магнитная индукция невелика.

*Приборы электродинамической системы.* Принцип действия электродинамических приборов основан на взаимодействии токов, протекающих по двум рамкам (катушкам), из которых одна подвижная, а другая неподвижная. На рисунке 6.5 показана схема такого прибора, состоящая из неподвижной катушки 1, внутри которой расположена подвижная ось 4, соединенная с подвижной катушкой 2 и стрелкой 6, а поршень воздушного успокоителя 3 и две пружины 5 создают противодействующий момент.

Вращающий момент  $M_1$ , обусловленный взаимодействием магнитных потоков, определяется уравнением

$$M_1 = k_1 I_1 I_2,$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от конструктивных данных прибора;

$I_1$  – ток, протекающий по неподвижной рамке;

$I_2$  – ток, протекающий по подвижной рамке.

Под действием вращающего момента  $M_1$  подвижная рамка повернется на угол  $\alpha$ . Создаваемый пружиной противодействующий момент

$$M_2 = k_2 \alpha,$$

где  $k_2$  – коэффициент, зависящий от конструктивных данных элементов, создающих противодействующий момент.

Из условия равенства моментов  $M_1 = M_2$  получаем, что

$$\alpha = k I_1 I_2,$$

где  $k = k_1 / k_2$ .

Из данной формулы видно, что шкала будет *неравномерна*.

В зависимости от назначения прибора рамки соединяют последовательно или параллельно. Электродинамические приборы применяют для измерения постоянного и переменного тока (амперметры, вольтметры и ватт-

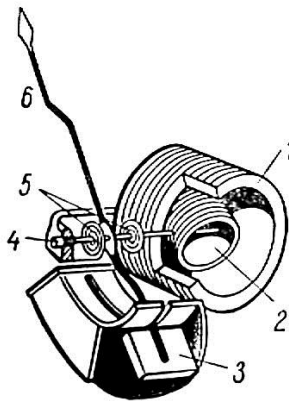


Рисунок 6.5 – Схема устройства приборов электродинамической системы

метры). Пригодность этих приборов для переменного тока обусловлена тем, что при одновременном изменении направления тока в обеих рамках направление вращения подвижной части остается без изменения. Точность и чувствительность электродинамических приборов для переменного тока достаточно высокие.

Электродинамические приборы обеспечивают наиболее высокую точность при измерениях в цепях переменного тока частотой до 20 кГц, однако они не выносят перегрузки, отличаются значительной мощностью собственного потребления электрической энергии, и на их показания влияют внешние магнитные поля. Для уменьшения этого влияния применяют экранирование и астатическое построение измерительной системы.

Расширение пределов измерения электродинамических амперметров обеспечивается разделением неподвижной обмотки на секции (это увеличивает диапазон измерений прибора вдвое), а также применением шунтов на постоянном токе и измерительных трансформаторов тока при измерениях в цепях переменного тока.

Расширение пределов измерения электродинамических вольтметров достигается применением добавочных резисторов, а при измерениях в цепях переменного тока, кроме того, использованием измерительных трансформаторов напряжения.

#### *Цифровые измерительные приборы (ЦИП).*

Цифровые электроизмерительные приборы благодаря своим свойствам получили широкое распространение в электронной аппаратуре. Сферы применения цифровых измерителей крайне разнообразны. Их применяют для измерения силы тока, напряжения постоянного и переменного тока, частоты переменного тока, мощности и электроэнергии. Соответственно в качестве измерителей применяются амперметры, вольтметры, частотомеры и ваттметры.

Принцип действия цифровых вольтметров и амперметров состоит в преобразовании аналогового сигнала в импульсы цифрового кода, которые преобразуются в десятичный код, отображаемый на табло. Для преобразования аналогового сигнала используют аналого-цифровой преобразователь, представляющий собой сложную электронную схему, собранную на цифровых микросхемах.

Цифровой вольтметр, амперметр и другие измерители обладают рядом достоинств, благодаря которым они со временем вытеснили стрелочные измерительные приборы. К таким достоинствам относятся их компактность, малая масса и отсутствие механических движущихся деталей, что позволяет применять цифровые приборы для измерения электрических величин в условиях механической тряски и сильной вибрации. Также электронные приборы оказываются малочувствительны к небольшим ударам, в то время как стрелочные приборы необходимо оберегать от механических воздей-

ствий. Например, цифровой частотомер, измеряющий частоту колебаний механической системы, может располагаться в непосредственной близости от механизмов.

Расположение цифровых приборов может быть осуществлено в зависимости от конкретных условий применения и работа приборов не зависит от их ориентации. Например, как на горизонтальном или вертикальном измерительном щите, так и на щите измерителей, расположенном под любым углом, позволяющим легко и быстро считывать показания с цифровой шкалы. Показания приборов так же легко передавать в цифровом виде на устройство считывания и записи, что позволяет отслеживать изменения величин в автоматическом режиме без присутствия оператора.

Неоспоримым преимуществом, которым обладает цифровой амперметр и вольтметр, является возможность работы аппаратов в широком диапазоне влажности, атмосферного давления и температур. Это позволяет применять цифровые устройства для измерения на открытом воздухе, в подвальных помещениях и в других сложных атмосферных условиях.

Применение шунтов, дополнительных сопротивлений позволяет существенно расширить диапазон измеряемых электрических величин. Цифровые приборы позволяют измерять крайне малые токи от нескольких мкА и большие токи потребления мощных установок вплоть до нескольких десятков кА.

Несмотря на эти достоинства цифровой частотомер, амперметр и вольтметр имеют и недостатки. В случае постоянного и быстрого изменения измеряемых параметров по абсолютной величине считать показания с цифрового прибора оказывается невозможным, в этом случае для измерений применяют стрелочные приборы, по шкале которых отследить пределы колебаний величины оказывается проще.

Кроме того цифровой вольтметр имеет сложную электронную схему и сложен как в ремонте, так и в настройках. Следовательно, самостоятельный ремонт и настройка цифровых измерителей тока крайне нежелательны и требуется обращение в специализированные мастерские.

ЦИП состоит из входного усилительного устройства (ВУУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который служит для преобразования непрерывного сигнала  $U$  в цифровой код, генератора импульсов (ГИ), цифровых счетчика и индикатора (ЦСИ), управляющего устройства (УУ) с коммутационными и логическими блоками (рисунок 6.6). В них входной сигнал усиливается и преобразуется в дискретный выходной сигнал в цифровой форме.

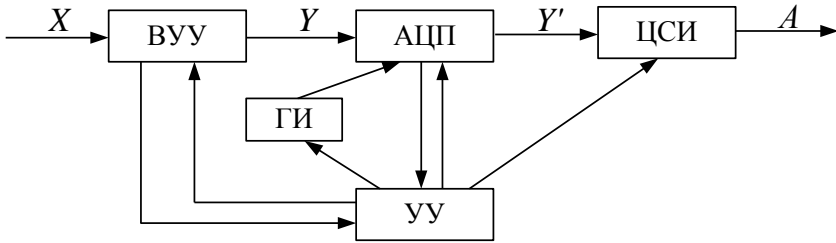


Рисунок 6.6 – Блок-схема цифрового электроизмерительного прибора

Цифровые измерительные приборы часто имеют возможность запоминать, передавать на расстояние и вводить в компьютер измерительные значения. Комбинированные цифровые измерительные приборы (мультиметры) позволяют измерять напряжение постоянного и переменного тока, сопротивление постоянному току, силу постоянного и переменного тока и другие величины.

### 6.5 Методы измерения электрических величин

Простейшим способом измерения тока и напряжения является непосредственное включение приборов в цепь, возможное при выполнении условий:

- максимальный предел измерения амперметра (вольтметра) не меньше максимального тока (напряжения) в цепи;
- номинальное напряжение амперметра не меньше номинального напряжения сети;
- сопротивление амперметра  $R_a$  намного меньше, а сопротивление вольтметра намного больше сопротивления измеряемой цепи  $R_n$ , т. к. значительное сопротивление амперметра снижает ток в цепи при его включении на величину

$$\Delta I = \frac{U}{R_a} - \frac{U}{R_n + R_a};$$

- соблюдение полярности включения приборов.

Для расширения пределов измерения приборов используют преобразователи в виде измерительных шунтов, добавочных сопротивлений, делителей напряжения, измерительных трансформаторов и измерительных усилителей.

#### *Измерение тока.*

Для измерения тока в какой-либо цепи *последовательно* в цепь включают амперметр. В установках постоянного тока для этой цели применяются главным образом приборы магнитоэлектрической системы и реже – приборы электромагнитной системы. В установках переменного тока используются преимущественно амперметры электромагнитной системы. Для



уменьшения погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление амперметра (или полное сопротивление амперметра и шунта) было на два порядка меньше сопротивления любого элемента измеряемой цепи.

Шунт представляет собой сопротивление, включаемое *параллельно* измерительному прибору в цепь измеряемого тока. Шунты на токи до 50–100 А обычно устанавливают внутри прибора. Для больших токов применяют наружные шунты, имеющие токовые зажимы для включения в цепь измеряемого тока и потенциальные зажимы для подключения измерительного прибора. С целью унификации измерительных приборов шунты изготавливают по ГОСТу 8042-78, а классы точности шунтов от 0,05 до 0,5.

Для расширения предела измерения амперметра (в  $k$  раз) в цепях постоянного тока служат шунты-резисторы, включаемые параллельно амперметру (рисунок 6.7, а).

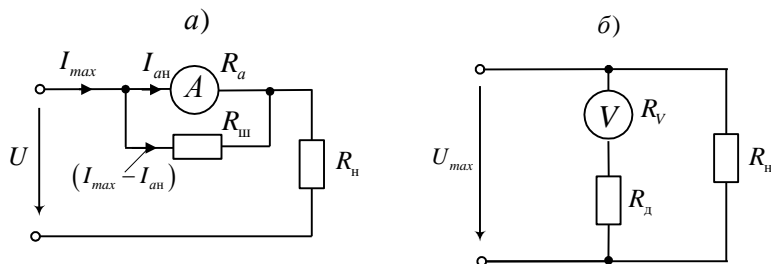


Рисунок 6.7 – Схемы соединения шунта к амперметру (а) и добавочного резистора к вольтметру (б)

Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$R_{\text{ш}} (I_{\text{max}} - I_{\text{ан}}) = R_a I_{\text{ан}},$$

где  $I_{\text{max}}$  – наибольшее значение тока в контролируемой цепи (предел измерения тока амперметром при наличии шунта);

$I_{\text{ан}}$  – предельное (номинальное) значение тока прибора при отсутствии шунта.

Шкалу амперметра часто градуируют с учетом включенного шунта.

В цепях переменного тока для расширения пределов измерения амперметров используют трансформаторы тока. Индуктивность катушки амперметра при переменном токе зависит от значения тока; соотношение токов в катушке амперметра и шунте здесь не остается постоянным. Поэтому шунты в цепях переменного тока не применяются.

*Измерение напряжения.*

Для измерения значения напряжения на каком-либо элементе электрической цепи (генераторе, трансформаторе, нагрузке) *параллельно* выводам элемента присоединяют вольтметр (см. рисунок 6.7, б). Для уменьшения

погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление вольтметра (или общее сопротивление вольтметра и добавочного резистора) было на два порядка больше сопротивления любого элемента измеряемой цепи.

Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с вольтметром прибором включают добавочное сопротивление  $R_d$ . Тогда измеренное прибором напряжение

$$U = U_v \left( \frac{R_d}{R_v} + 1 \right),$$

где  $\left( \frac{R_d}{R_v} + 1 \right)$  – коэффициент расширения предела измерения прибора;

$U_v$  – показание вольтметра;

$R_v$  – входное сопротивление вольтметра.

Добавочные сопротивления могут быть как внутренние (помещенные в корпус прибора), так и наружные для измерения напряжений свыше 500 В.

Номинальные токи добавочных сопротивлений стандартизированы ГОСТом 8623-78 при номинальном падении напряжения на них. Основная погрешность добавочных сопротивлений  $\pm(0,1-0,5)$  %. Для расширения пределов измерения приборов с высоким входным сопротивлением используют делители напряжения с фиксированным коэффициентом деления, обычно кратным десяти.

В цепях переменного тока высокого напряжения для расширения пределов измерения вольтметров применяют трансформаторы напряжения.

### Контрольные вопросы

- 1 Укажите классификацию погрешностей измерений.
- 2 Дайте определения систематическим погрешностям измерительных приборов.
- 3 Укажите достоинства, недостатки и область применения магнитоэлектрического измерительного механизма.
- 4 Укажите достоинства, недостатки и область применения электромагнитного измерительного механизма.
- 5 Укажите достоинства, недостатки и область применения электродинамического измерительного механизма.
- 6 По каким параметрам производится подбор измерительных приборов для измерений?
- 7 Укажите достоинства цифровых измерительных приборов.
- 8 Как выполняются измерения тока и напряжения?

## 7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Достижения науки и техники, обусловленные ускорением научно-технического прогресса, способствуют совершенствованию всех отраслей промышленности и транспорта. Это относится и к электрическим машинам, составляющим основу электроэнергетики, как в процессе производства электроэнергии, так и в процессе ее потребления.

**Электрическая машина** – это устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую и наоборот.

Работа всех электрических машин базируется на явлении электромагнитной индукции и на силовом действии электрического тока.

В процессе работы электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую. Природа этого процесса объясняется *законом электромагнитной индукции*: если внешней силой  $F$  воздействовать на помещенный в магнитное поле проводник длиной  $l$  и перемещать его (рисунок 7.1), например, слева направо перпендикулярно вектору индукции  $B$  магнитного поля со скоростью  $v$ , то в проводнике будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС)

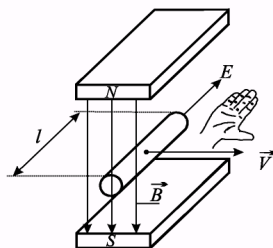


Рисунок 7.1 – Правило правой руки для определения направления ЭДС

$$E = Blv.$$

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом «правой руки» (см. рисунок 7.1). Применив это правило определим направление ЭДС в проводнике (от нас). Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление  $R$  (потребитель), то под действием ЭДС в проводнике возникнет ток такого же направления. Таким образом, движущийся проводник в магнитном поле в данном случае можно рассматривать как *элементарный генератор*.

В результате взаимодействия тока  $I$  с магнитным полем возникает действующая на проводник сила

$$F = BI l.$$

Направление этой силы можно определить по правилу «левой руки» (рисунок 7.2). В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево, т. е. противоположно движению проводника. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе сила  $F$  является тормозящей по отношению к движущей силе.

Умножив обе части равенства для электромагнитной силы на скорость движения проводника, получим

$$Fv = BIlv = EI.$$

Левая часть равенства определяет значение механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле, правая часть – значение электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре ток. Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую.

Если внешнюю силу к проводнику не прикладывать, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение  $U$  так, чтобы ток  $I$  в проводнике имел направление, указанное на рисунке 7.2, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила. Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле. При этом в проводнике индуцируется ЭДС с направлением противоположным напряжению. Таким образом, часть напряжения  $U$ , приложенного к проводнику сопротивлением  $r$ , уравновешивается наведенной в этом проводнике ЭДС  $E$ , а другая часть составляет падение напряжения в проводнике:

$$U = E + Ir.$$

Умножим обе части равенства на ток  $I$

$$UI = EI + I^2r.$$

С учетом формул для ЭДС и электромагнитной силы, получим

$$UI = Fv + I^2r.$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность ( $UI$ ), поступающая в проводник, частично преобразуется в механическую ( $Fv$ ), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике ( $I^2r$ ). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитное поле, можно рассматривать как *элементарный электродвигатель*.

Рассмотренные явления позволяют сделать следующие выводы:

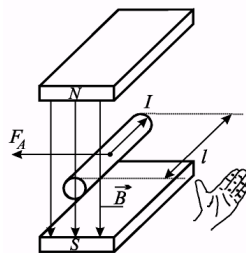


Рисунок 7.2 – Правило левой руки для определения направления электромагнитной силы

а) для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения;

б) при работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, одновременно наблюдаются создание ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании тока;

в) взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, т. е. одна и та же электрическая машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

#### *Классификация электрических машин*

Выделяют следующие виды электрических машин:

- трансформаторы;
- машины постоянного тока;
- машины переменного тока (асинхронные и синхронные).

Кроме того, электрические машины классифицируются по роду тока, назначению, мощности, напряжению.

По роду тока электрические машины принято разделять на машины постоянного и переменного тока.

По назначению их подразделяют на генераторы, двигатели и преобразователи (преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяют напряжение, частоту переменного тока, число фаз, преобразуют активную мощность в реактивную и т. д.).

Кроме того, электрические машины бывают общего и специального назначения. Машины общего назначения – это такие машины, которые выполнены без учета специальных требований потребителей и являются общими для большинства случаев применения. Специального назначения – с учетом специальных требований потребителей.

Классификация по мощности:

- микромашины (менее 0,5 кВт);
- малой мощности (от 0,5 до 10 кВт);
- средней мощности (более 10 кВт);
- машины большой мощности (более нескольких сотен МВт);

Следует учитывать, что четких границ по мощности нет.

Классификация по напряжению:

- низковольтные (менее 100 В);
- среднего напряжения (от 100 до 1000 В);
- высоковольтные (более 1000 В).

У каждой электрической машины имеется щиток, выбитый на металлической пластинке и прикрепленный к корпусу. На щитке указаны паспортные данные, в том числе характеризующие ее работу в номинальном режи-

ме. Номинальный режим – это такой режим, для работы в котором машина предназначена заводом-изготовителем. Его рассчитывают так, чтобы температура обмоток не превышала допустимую. Основным параметром, влияющим на степень загрузки машины, является температура ее обмоток, если точнее – изоляции, потому что температура, при которой изоляция выходит из строя (95–180 °С), зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Паспортная табличка обычно информирует о режиме работы электрической машины (S1–S8):

- S1 – продолжительный режим;
- S2 – кратковременный режим;
- S3, S4, S5 – повторно-кратковременные режимы;
- S6, S7, S8 – перемежающиеся режимы.

**Защита от внешних воздействий.** Конструктивное выполнение электрической машины во многом определяют требования, предъявляемые к защите ее от внешних воздействий. В зависимости от этого устанавливается буквенно-цифровое обозначение исполнений электрических машин, состоящее из двух букв IP (International Protection) и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты от проникновения в нее влаги (рисунок 7.3).

Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

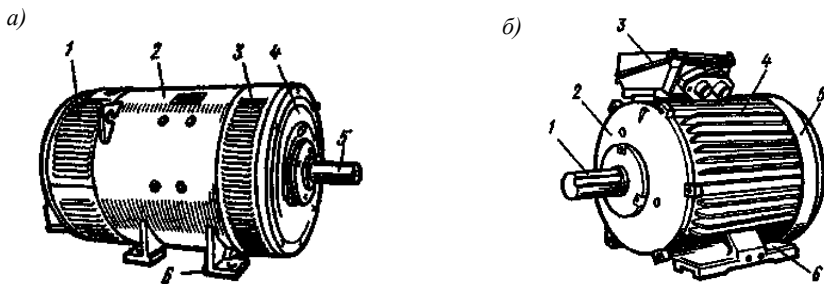


Рисунок 7.3 – Двигатель защищенного исполнения со степенью защиты IP22 (а):

- 1, 3 – вентиляционные окна; 2 – станина; 4 – подшипниковый щит; 5 – вал; 6 – лапы.  
 Асинхронный двигатель закрытого исполнения со степенью защиты IP44 (б):  
 1 – вал; 2, 5 – подшипниковые щиты; 3 – клеммная коробка;  
 4 – охлаждающие ребра станины; 6 – лапы

**Климатические условия и условия размещения.** При эксплуатации электрических машин в нормальных климатических условиях температура окружающей среды составляет  $(25 \pm 10)$  °С, относительная влажность воздуха 35–80 % и атмосферное давление 84–106 кПа. Электрические двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках и озерах в районах с умеренным климатом, имеют обозначение – У; с холодным – ХЛ; с влажным тропическим – ТВ; с сухим тропическим – ТС; с сухим и влажным тропическим – Т.

В зависимости от условий размещения предусматриваются следующие обозначения: при эксплуатации на открытом воздухе – 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от наружного воздуха, – 2; в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, – 3; в помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых помещениях) – 4; в помещениях с повышенной влажностью – 5. Например, двигатели, которые могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях – УЗ или У4.

**Способ охлаждения.** Для предотвращения чрезмерного нагрева частей электрических машин применяют различные способы их охлаждения. Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности.

Для большинства электрических машин охлаждающей средой служит воздух. Такие машины называют *вентилируемыми*. Вентилируемые машины, у которых охлаждающий воздух или иной газ проходит через внутреннее пространство машины, называют *продуваемыми*; если же они обдувают только наружную поверхность машины – *обдуваемыми*.

Обозначение способа охлаждения состоит из букв IC (International Cooling) и двух цифр: первая (от 0 до 6) условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая (от 0 до 7) – способ его перемещения.

Вращающиеся электрические машины малой и средней мощности обычно производят с самовентилиацией. В этом случае охлаждение нагретых частей осуществляется вентилятором, который насаживают на вал ротора. Машины закрытого исполнения обычно выпускают обдуваемыми.

Различные *марки электротехнической стали* обозначаются четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.). Первая цифра означает принадлежность стали к тому или иному классу (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой). Вторая цифра означает содержание кремния (от 0,4 до 4,8 %); третья цифра – группа по основной нормируемой характеристике (удельным магнитным потерям, при определенной индук-

ции и частоте перемагничивания); четвертая цифра – порядковый номер типа стали.

Корпуса машин постоянного тока изготавливают путем сварки из листовой низколегированной магнитномягкой стали или стального литья, так как они являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют также для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т. п.

*Проводниковые материалы.* В электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), что позволяет сократить габариты машин.

В качестве токопроводящего материала контактных колец и коллектора кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность и износостойкость.

*Изоляционные материалы.* Основные требования, предъявляемые к изоляции, – нагревостойкость, высокая электрическая прочность, влагостойкость, хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность и эластичность.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который обычно составляет 15–20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: *У, А, Е, В, F, H, С*, предельная допустимая температура которых приведена в таблице 7.1.

**Таблица 7.1 – Предельная допустимая температура классов нагревостойкости**

Класс изоляции	<i>У</i>	<i>А</i>	<i>Е</i>	<i>В</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>С</i>
Предельная допустимая температура при длительной работе, °С	80	105	120	130	155	180	Более 180

Стоимость изоляции составляет 30–70 % от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

В настоящее время электрические машины применяют в основном изоляцию классов *В* и *F*, а в специальных машинах, работающих в тяжелых



условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), – класса *H*. В трансформаторах с масляным охлаждением широко используют провода с изоляцией класса *A*; применение в них изоляционных материалов с большой нагревостойкостью нецелесообразно, так как допустимая температура обмоток определяется температурой трансформаторного масла (105 °С), относящегося к классу *A*. В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости *B*, *F*.

В электрических машинах различают межвитковую и корпусную изоляцию. *Межвитковая изоляция* (между витками обмотки) обеспечивается изоляцией самого проводника, наносимой на него в процессе изготовления на кабельных заводах или при изготовлении электрической машины. *Корпусная изоляция* отделяет проводники обмотки от корпуса электрической машины.

## 7.1 Трансформаторы

### 7.1.1 Назначение трансформаторов и их применение

**Трансформатор** – это статический электромагнитный аппарат, преобразующий посредством электромагнитной индукции переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте и мощности.

В трансформаторе нет вращающихся частей, поэтому он не является машиной в обычном смысле этого слова. Однако преобразование электроэнергии в нем происходит на основе тех же законов, что и в электрических машинах.

На электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6, 10, 20 кВ, передавать же ее на дальние расстояния, с целью уменьшения потерь, выгодно при значительно больших напряжениях (110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населенными пунктами, в городах, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям при напряжении 35, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены понижающие трансформаторы. На самом предприятии в сети и на приемниках потребление электроэнергии производится при напряжениях 380/220 В или 660/380 В, напряжение источников электроэнергии соответственно 400/230 В или 690/400 В (ГОСТ 721-77), что также требует использования понижающих трансформаторов.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3–5 раз).

Классифицируют трансформаторы по следующим признакам:

- назначению – на силовые и специальные (измерительные, согласующие, сварочные, автотрансформаторы, импульсные и т. д.);
- способу охлаждения – на сухие и масляные. В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется при естественной или искусственной конвекции воздуха, а в масляных – при естественной или принудительной циркуляции трансформаторного масла;
- числу фаз питающей сети – на одно-, трех- и многофазные;
- количеству обмоток на одну фазу – на одно-, двух-, многообмоточные;
- соотношению напряжений первичной и вторичной обмоток (коэффициент трансформации, представленный далее в формуле (7.3)) – на повышающие  $U_2 > U_1$  и понижающие  $U_2 < U_1$ , где  $U_1$  – напряжение питания первичной обмотки,  $U_2$  – напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора.

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

1 Номинальная мощность трансформатора  $S_n$  – полная мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выраженная в вольтамперах (В·А) или киловольт-амперах (кВ·А).

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

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

4 Номинальные токи обмоток – первичный  $I_{1н}$  и вторичный  $I_{2н}$  – токи, соответствующие номинальным значениям напряжений и мощности.

Для трехфазных трансформаторов в качестве номинальных значений напряжений и токов указывают линейные величины.

Современный силовой трансформатор состоит из следующих элементов: магнитопровода (сердечника), обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет активную часть трансформатора. Остальные его элементы называют неактивными (вспомогательными) частями.

Магнитопровод является магнитной цепью, по которой замыкается основной магнитный поток, и усилением магнитной связи между обмотками, а также он служит для крепления обмоток, отводов, переключателей. Изготавливается он из ферромагнитного материала, который позволяет усилить магнитный поток и увеличить магнитную связь между обмотками.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, в силовых трансформаторах магнитопровод и детали его крепления обязательно заземляют.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопровод собирают из листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. Листы перед сборкой сердечника изолируют с обеих сторон лаком. Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить потери энергии в трансформаторе.

Магнитопроводы силовых трансформаторов собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Межлистовая изоляция осуществляется путем односторонней оклейки листов стали изоляционной бумагой или двустороннего покрытия изоляционным масляным лаком.

По конструкции магнитопроводы бывают двух видов: стержневые и броневые (рисунок 7.4 [15]). В зависимости от вида магнитного материала (лист, лента, проволока, полоса, литье, порошок и т. д.), определяющегося технологией производства, магнитопроводы классифицируются на пластинчатые, ленточные и прессованные (литые).

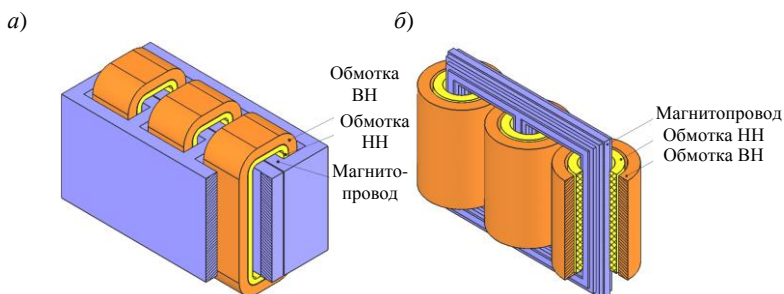


Рисунок 7.4 – Виды магнитопроводов трансформатора:  
а – броневой вид; б – стержневой вид

Индукции в стержнях трансформаторов мощностью 5 кВ·А и выше находятся в пределах 1,2–1,45 Тл для горячекатаных сталей и 1,5–1,7 Тл для холоднокатаных сталей у масляных трансформаторов и соответственно 1,0–1,2 Тл и 1,1–1,5 Тл у сухих трансформаторов.

Медные или алюминиевые обмотки трансформаторов выполняют из проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

При правильной эксплуатации масляных трансформаторов, когда температура изоляции в наиболее нагретом месте не превышает 105 °С, трансформатор может прослужить 20–25 лет. Повышение температуры на 8 °С приводит к сокращению срока службы трансформатора примерно в два раза.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рисунок 7.5 [16]). Трансформаторное масло омывает обмотки и магнитопровод, отбирая от них теплоту, а затем через стенки бака и трубы радиатора отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха.

Для компенсации объема масла при изменении температуры в контакте с воздухом применяют расширитель, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. В процессе работы трансформаторов не исключена возможность выделения газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков мощные трансформаторы снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака.

Модели трансформаторов ТМГ и ТМ чаще всего применяются для использования в составе комплектных трансформаторных подстанций, питающих электроэнергией городские и производственные объекты.

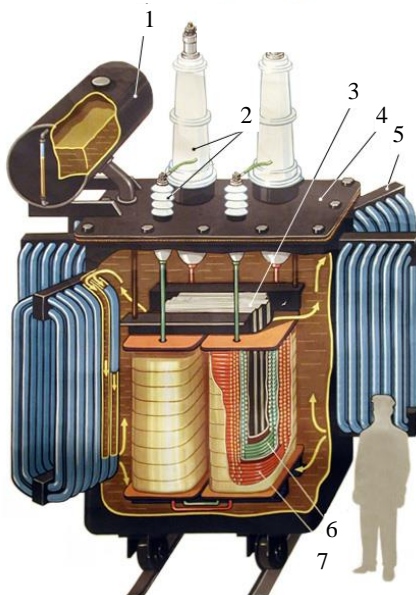


Рисунок 7.5 – Устройство силового трансформатора с масляным охлаждением:  
1 – расширительный бак; 2 – изолятор; 3 – сердечник трансформатора; 4 – крышка бака;  
5 – радиаторы; 6 – обмотка низкого напряжения; 7 – обмотка высокого напряжения

При подключении к рельсовым цепям, светофорам и прочим автоматическим блокировкам используются различные виды трансформаторов. Так-

же система железнодорожного тягового (рисунок 7.6) и нетягового электро-снабжения (линии автоматической блокировки, продольного электро-снабжения, железнодорожные узлы и различные электроустановки) основа-на на использовании свойств силовых, измерительных и других видов трансформаторов.

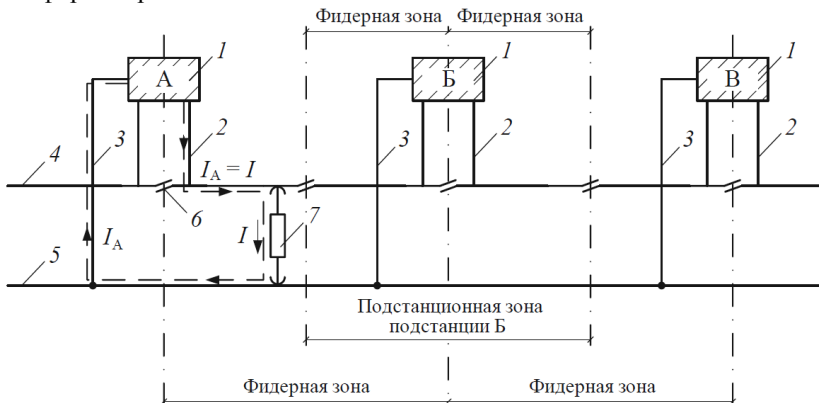


Рисунок 7.6 – Пример схемы одностороннего питания контактной сети:  
 1 – тяговая подстанция с трансформаторами; 2 – питающая линия тяговой подстанции;  
 3 – отсасывающая линия тяговой подстанции; 4 – контактная сеть; 5 – рельсы;  
 6 – нейтральная вставка или воздушный промежуток; 7 – электроподвижной состав

### 7.1.2 Принцип действия трансформатора

Работа трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим ее на примере однофазного двухобмоточного трансформатора (рисунок 7.7).

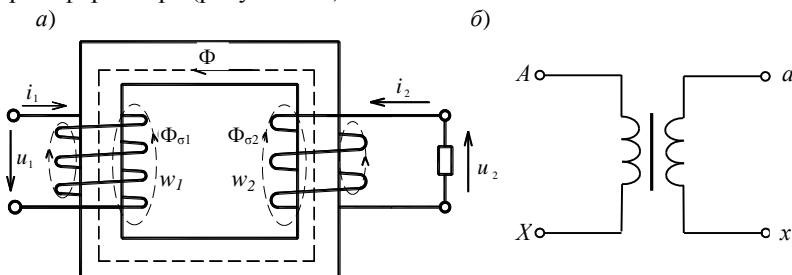


Рисунок 7.7 – Схема однофазного трансформатора (а)  
 и его условное графическое обозначение (б)

Первичная обмотка трансформатора, имеющая  $w_1$  витков, подключается к источнику синусоидального напряжения  $u_1$ . К вторичной обмотке с числом витков  $w_2$  присоединяют нагрузку с сопротивлением  $z_H$ . Начало и ко-

нец обмотки высшего напряжения (ВН) обозначают буквами  $A$  и  $X$ , обмотки низшего напряжения (НН) – буквами  $a$  и  $x$ . Первичная и вторичная обмотки не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем.

При подключении к сети переменного тока первичной обмотки в ней возникает ток, который создает переменный магнитный поток. Большая часть этого потока замыкается по ферромагнитному сердечнику и пронизывает как первичную, так и вторичную обмотки. Эта часть потока называется основным потоком  $\Phi$ . Меньшая часть потока первичной обмотки замыкается вокруг нее по воздуху и не проникает в сердечник. Этот поток называется потоком рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Основной поток  $\Phi$ , пронизывая первичную и вторичную обмотки, индуцирует в них переменные ЭДС –  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числу витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ . Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ .

При синусоидальном изменении этого потока для действующих значений ЭДС можно записать следующие выражения:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 B_m Q_{\sigma 1}; \quad (7.1)$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 B_m Q_{\sigma 2}, \quad (7.2)$$

где  $f$  – частота тока в сети;

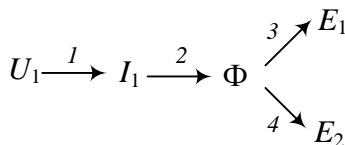
$w_1$  и  $w_2$  – число витков в первичной и вторичной обмотках;

$\Phi_m$  – амплитудное значение основного магнитного потока в сердечнике;

$B_m$  – амплитудное значение индукции в сердечнике магнитопровода;

$Q_{\sigma 1}$  – площадь поперечного сечения сердечника.

Обмотка, подключенная к сети, называется первичной; к другой обмотке (вторичной) подключена нагрузка. Принцип действия трансформатора можно описать следующей схемой:



На первичную обмотку подается переменное напряжение  $\underline{U}_1$  ( $I$ ), под действием которого возникает переменный ток  $\underline{I}_1$ , создающий переменный магнитный поток  $\Phi$  (2). Замыкаясь по магнитопроводу (путь с малым магнитным сопротивлением), магнитный поток пронизывает витки обмоток и

по закону электромагнитной индукции наводит противоЭДС в первичной обмотке (3) и ЭДС вторичной обмотки (4).

Отношение ЭДС в первичной и вторичной обмотках называется коэффициентом трансформации трансформатора

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2. \quad (7.3)$$

Поток рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$  создает в ней ЭДС рассеяния, которая отстает от потока рассеяния на угол  $90^\circ$ . Так как поток рассеяния замыкается по воздуху, то его значение прямо пропорционально току, создающему этот поток. Значит для ЭДС рассеяния первичной обмотки можно записать следующее выражение в комплексной форме записи

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -jx_1 I_1,$$

где  $x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки;

$I_1$  – ток первичной обмотки.

Если к вторичной обмотке подключить нагрузку, то под воздействием ЭДС  $E_2$  в ней протекает ток  $I_2$ . Этот ток создает магнитный поток вторичной обмотки, который также состоит из двух частей. Большая его часть замыкается по сердечнику и направлена навстречу потоку, создаваемому в сердечнике первичной обмоткой, пытаясь его уменьшить. Меньшая часть потока вторичной обмотки (поток рассеяния этой обмотки  $\Phi_{\sigma 2}$ ) замыкается вокруг нее по воздуху. Этот поток создает ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 2}$  вторичной обмотки

$$\underline{E}_{\sigma 2} = -jx_2 I_2,$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

$I_2$  – ток этой обмотки.

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепей трансформатора можно записать следующие уравнения электрического состояния:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{\sigma 1} + I_1 r_1; \quad (7.4)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} - I_2 r_2, \quad (7.5)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток.

Уравнения 7.4 и 7.5 можно переписать в следующем виде:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 (r_1 + jx_1) = -\underline{E}_1 + I_1 \underline{z}_1; \quad (7.6)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - I_2 (r_2 + jx_2) = \underline{E}_2 - I_2 \underline{z}_2, \quad (7.7)$$

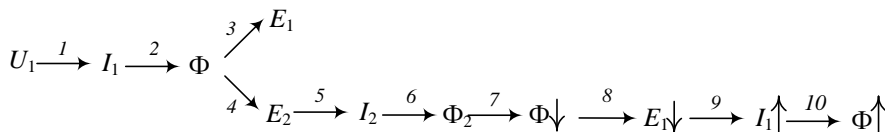
где  $\underline{z}_1$  и  $\underline{z}_2$  – полное сопротивление первичной и вторичной обмоток.

Если пренебречь падениями напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора ( $I_1 \underline{z}_1$  и  $I_2 \underline{z}_2$ ), которые обычно не превышают 3–5 % от номинальных значений напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , то можно считать, что

$$U_1 \approx E_1 \text{ и } U_2 \approx E_2. \quad (7.8)$$

Анализируя выражения (7.1) и (7.8) можно отметить, что, при постоянном значении напряжения на первичной обмотке, постоянным остается и значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора. Следовательно, можно считать, что изменение тока нагрузки практически не вызывает изменение магнитного потока в трансформаторе.

Режим нагрузки трансформатора можно описать следующей логической схемой:



1–4 – описаны в предыдущей схеме;

5 – так как к вторичной обмотке подключена нагрузка, ее ЭДС  $E_2$  вызовет ток нагрузки;

6 – протекая по вторичной обмотке, ток нагрузки  $I_2$  создает магнитный поток  $\Phi_2$ ;

7 – магнитный поток  $\Phi_2$  от вторичной обмотки направлен встречно основному магнитному потоку  $\Phi$  и уменьшает его;

8 – уменьшение основного магнитного потока  $\Phi$  приведет к уменьшению ЭДС первичной обмотки  $E_1$ ;

9 – согласно уравнению равновесия напряжений первичной стороны трансформатора (7.6), уменьшение ЭДС  $E_1$  приведет к увеличению тока первичной обмотки  $I_1$ ;

10 – увеличение тока  $I_1$  приведет к возрастанию основного магнитного потока  $\Phi$  до первоначального значения.

Таким образом, любое изменение нагрузки  $I_2$  вызовет такое изменение первичного тока  $I_1$ , чтобы магнитный поток остался неизменным.

Для магнитной цепи трансформатора можно записать уравнение магнитодвижущих сил (МДС) в следующем виде:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1, \quad (7.9)$$

где  $I_0$  – намагничивающий ток, часть тока первичной обмотки, которая создает магнитный поток.

Уравнения (7.6), (7.7), (7.9) образуют систему, с помощью которой можно анализировать процессы в трансформаторе, возникающие в различных режимах его работы.

### 7.1.3 Приведенный трансформатор и его схема замещения

На практике чаще всего у трансформатора число витков первичной обмотки  $w_1$  не равно числу витков вторичной обмотки  $w_2$  и, как следствие, различны ЭДС, токи и сопротивления обмоток. Это затрудняет непосредственное сопоставление и количественный учет процессов.



Чтобы устранить отмеченные выше трудности, теория трансформатора разработана для трансформатора с коэффициентом трансформации  $k$  равным единице, т. е. для трансформатора, у которого  $w_1 = w_2$ , а все многообразие реальных трансформаторов приводится к виду с  $k = 1$ . Таким образом *приведенный трансформатор – это трансформатор, который оказывает на цепь такое же влияние, как реальный трансформатор, но коэффициент трансформации его равен единице*. Приведение осуществляется путем перерасчета параметров вторичной обмотки и приведения их к параметрам первичной. Трансформатор с пересчитанными параметрами вторичной обмотки называется приведенным. На практике, приведенные параметры вторичной обмотки обозначаются буквами со штрихами. Чтобы процессы в приведенном и реальном трансформаторах были одинаковыми, процесс пересчета осуществляется по следующим формулам:

$$E'_2 = kE_2 = E_1; \quad (7.10)$$

$$U'_2 = kU_2; \quad (7.11)$$

$$I'_2 = I_2 / k; \quad (7.12)$$

$$r'_2 = k^2 r_2; \quad (7.13)$$

$$x'_2 = k^2 x_2. \quad (7.14)$$

Аналогично для приведенного значения полного сопротивления нагрузки можно записать

$$z'_n = k^2 z_n. \quad (7.15)$$

Для приведенного трансформатора уравнения (7.6), (7.7) и (7.9) приобретают вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \\ \underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2; \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{cases} \quad (7.16)$$

Так как у приведенного трансформатора ЭДС во вторичной обмотке равна ЭДС в первичной, то в этом случае электрические цепи первичной и вторичной обмоток можно объединить, заменив магнитную связь между обмотками электрической. Трансформатор в этом случае заменяется электрической цепью, называемой *схемой замещения трансформатора*.

На рисунке 7.8 приведена Т-образная (полная) схема замещения трансформатора. С помощью элементов  $r_1$ ,  $r'_2$  и  $x_1$ ,  $x'_2$  учитываются активные и реактивные сопротивления провода первичной и вторичной обмоток, а значение элементов  $r_0$  и  $x_0$ , образующих намагничивающую ветвь, зависят от параметров магнитопровода.

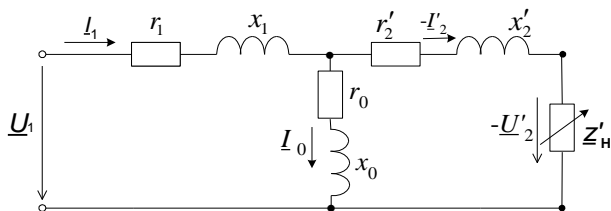


Рисунок 7.8 – Т-образная схема замещения трансформатора

Для приближенных расчетов Т-образной схемы замещения, принимают

$$r_1 = r_2' \ll r_0; \quad (7.17)$$

$$x_1 = x_2' \ll x_0. \quad (7.18)$$

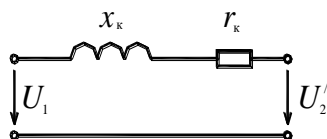


Рисунок 7.9 – Упрощенная схема замещения трансформатора

В некоторых случаях, из-за большого значения  $r_0$  и  $x_0$  намагничивающую ветвь схемы замещения можно исключить. В этом случае схема замещения упрощается. Упрощенная схема замещения однофазного трансформатора приведена на рисунке 7.9. На данном рисунке  $r_k = r_1 + r_2'$  и  $x_k = x_1 + x_2'$ .

Сопротивление нагрузки  $z_n$ , подключаемой к вторичной обмотке трансформатора, может находиться в пределах от нуля до бесконечности. В соответствии с этим трансформатор может работать в трех режимах:

- 1 Режим холостого хода, который получается при  $z_n = \infty$ ;
- 2 Режим короткого замыкания, возникающий при  $z_n = 0$ ;
- 3 Нагрузочный режим, в котором  $0 < z_n < \infty$ .

#### 7.1.4 Режим холостого хода

Холостым ходом называется такой режим, при котором к первичной обмотке трансформатора подведено напряжение сети  $U_1$ , а вторичная обмотка разомкнута ( $I_2 = 0$ ). В таком режиме трансформатор потребляет из сети очень малый ток  $I_0$ , значение которого может быть в десятки раз меньше номинального тока первичной обмотки  $I_{1н}$ . Ток холостого хода состоит из активной  $I_{0а}$  и реактивной  $I_{0р}$  составляющих.

Активная составляющая тока холостого хода (небольшая часть этого тока) идет на покрытие потерь в магнитопроводе, которые зависят от марки электротехнической стали, толщины ее листа, значения магнитной индукции и частоты перемагничивания. Реактивная составляющая (большая часть тока холостого хода) идет на создание магнитного потока в трансформаторе. Зависит она от марки стали, количества витков первичной

обмотки, подводимого к этой обмотке напряжения, геометрии сердечника, а также от количества и величины воздушных зазоров на пути магнитной силовой линии.

При холостом ходе, когда ток вторичной обмотки  $I_2 = 0$ , напряжение на ее зажимах  $U_{20} = E_2$ .

В данном режиме ток холостого хода  $I_0$  первичной обмотки создает МДС  $I_0 w_1$ , а та, в свою очередь, – магнитный поток, большая часть которого замыкается по стальному сердечнику и сцепляется с обеими обмотками трансформатора. Эта часть потока является основным потоком и обозначается  $\Phi$ . Небольшая часть магнитного потока замыкается частично по воздуху и сцепляется с первичной обмоткой, не принимая участия в индуктировании ЭДС во вторичной обмотке. Данная часть потока является потоком рассеяния и обозначается как  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Потоки  $\Phi$  и  $\Phi_{\sigma 1}$  являются переменными, создают ЭДС. Основной поток  $\Phi$  индуктирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $E_1$ , а во вторичной – ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  наводит в первичной обмотке ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$ , при этом  $E_{\sigma 1} \equiv \Phi_{\sigma 1}$ . Поскольку  $\Phi_{\sigma 1}$  замыкается частично по воздуху, то  $\Phi_{\sigma 1} \equiv I_0$ . С учетом отмеченного,  $E_{\sigma 1} \equiv I_0$ , а именно  $E_{\sigma 1} = x_1 I_0$ , где  $x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

ЭДС  $E_{\sigma 1}$  отстает от своего потока  $\Phi_{\sigma 1}$  на  $90^\circ$ , а ток  $I_0$  и поток  $\Phi_{\sigma 1}$  практически совпадают по фазе. Уравнение электрического состояния первичной цепи трансформатора в режиме холостого хода имеет вид:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = I_0 r_1,$$

или

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_0 (r_1 + jx_1) = -\underline{E}_1 + I_0 \underline{z}_1,$$

где  $\underline{z}_1$  – комплекс полного сопротивления первичной обмотки трансформатора.

При холостом ходе  $I_0 z_1 \ll E_1$ , поэтому, не делая большой погрешности, можно считать, что

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1.$$

Тогда модуль напряжения  $U_1$  можно выразить, как

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m,$$

откуда амплитуда основного магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 f w_1} \approx \frac{U_1}{4,44 f w_1}. \quad (7.19)$$

Анализ (7.13) показывает, что основной магнитный поток прямо пропорционален напряжению  $U_1$  и обратно пропорционален частоте сети  $f$  и числу витков первичной обмотки  $w_1$ :

$$\Phi_m \equiv U_1; \quad \Phi_m \equiv \frac{1}{f}; \quad \Phi_m \equiv \frac{1}{w_1}. \quad (7.20)$$

Отмеченный вывод справедлив не только для трансформаторов, но и для всех магнитных цепей переменного тока.

Величина основного магнитного потока не зависит от сопротивления магнитной цепи  $R_\mu$ , т. е. от длины и сечения магнитопровода. Однако  $R_\mu$  сильно влияет на величину тока холостого хода  $I_0$ , который по существу является намагничивающим током.

Действительно, так как

$$\Phi_m = \frac{I_0 w_1}{R_\mu}, \quad (7.21)$$

то

$$I_0 = \frac{\Phi_m R_\mu}{w_1}. \quad (7.22)$$

Магнитное сопротивление  $R_\mu$  зависит от геометрических размеров участка и значения величины магнитной проницаемости  $\mu$ . Его можно определить из выражения

$$R_\mu = l / (\mu_0 \mu S),$$

где  $l$  – длина однородного участка магнитной цепи;

$S$  – площадь его поперечного сечения.

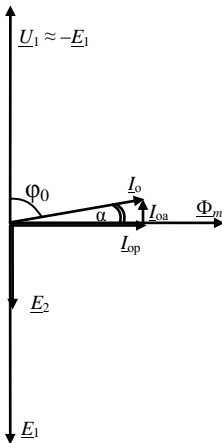


Рисунок 7.10 – Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

При постоянных  $U_1, f, w_1$  магнитный поток, как это следует из (7.13), практически постоянен, а это значит, что всякое изменение  $R_\mu$  ведет к пропорциональному изменению  $I_0$ .

Векторная диаграмма XX трансформатора приведена на рисунке 7.10. Представлена она для понижающего трансформатора, у которого  $E_1 > E_2$ .

Ток холостого хода  $I_0$  опережает  $\Phi_m$  на угол магнитного запаздывания  $\alpha$ , который равен  $5-7^\circ$ . Из векторной диаграммы угол сдвига по фазе ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  по отношению к  $\underline{\Phi}_m$  составляет  $90^\circ$ .

Полная мощность однофазного трансформатора в режиме холостого хода  $S = U_1 I_0$ . Ее реактивная составляющая  $Q_0 = U_1 I_0 \sin \varphi_0 = U_1 I_{0op}$  расходуется на создание основного потока  $\Phi$ , а активная составляющая  $P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0 = U_1 I_{0a}$  устраняет потери при холостом ходе:

$$P_0 = \Delta P_{эл1} + \Delta P_M = I_0^2 r_1 + \Delta P_M,$$

где  $\Delta P_{эл1}$  – потери в меди первичной обмотки при холостом ходе трансформатора;

$\Delta P_M$  – магнитные потери в стали сердечника в режиме холостого хода. Вследствие малого значения  $I_o$ , величина  $\Delta P_{эл1} \ll P_o$ , поэтому  $P_o \approx \Delta P_M$ . Действующее значение тока холостого хода

$$I_o = \sqrt{I_{оа}^2 + I_{ор}^2}. \quad (7.23)$$

Обычно соотношение между активной составляющей тока и самим током холостого хода  $I_{оа}/I_o \leq 0,1$ .

В силовых трансформаторах ток  $I_o$  невелик и составляет (2,5–10) % от  $I_{н1}$ . Большие значения относятся к трансформаторам малой мощности.

Потери в стали трансформатора  $\Delta P_M$  (потери на вихревые токи и гистерезис) не зависят от его нагрузки. Они пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции ( $B_m^2$ ) и могут быть определены по формуле

$$\Delta P_M = k_{уд} \left( \frac{B_m}{B_{мтабл}} \right)^2 \left( \frac{f}{f_{табл}} \right)^{1,5} m, \quad (7.24)$$

где  $k_{уд}$  – удельные потери для данной марки стали при заданных табличных значениях индукции ( $B_{мтабл}$ ) и частоты ( $f_{табл}$ ), величина  $k_{уд}$  указывается в справочниках;

$B_m$  – действительное амплитудное значение индукции в трансформаторе, Тл;

$f$  – действительная частота, Гц;

$m$  – масса стали сердечника, кг.

В приведенной формуле обычно  $B_{мтабл} = 1$  Тл,  $f_{табл} = 50$  Гц. Потери энергии в стали на вихревые токи и гистерезис нагревают сердечник.

В связи с вышеприведенным, опыт ХХ позволяет определить потери в сердечнике, коэффициент трансформации и параметры намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора.

Схема электрической цепи для проведения опыта ХХ представлена на рисунке 7.11, а схема замещения трансформатора для данного режима – на рисунке 7.12. Экспериментально коэффициент трансформации (7.3) можно определить только по результатам измерения напряжений в режиме ХХ. Это объясняется тем, что только при холостом ходе, когда ток  $I_2$  вторичной обмотки отсутствует, напряжение на выходе трансформатора равно ЭДС во вторичной обмотке  $E_2$ .

По первичной обмотке в режиме холостого хода протекает очень малый ток  $I_1 = I_o$ , вызывающий незначительное падение напряжения  $I_1 z_1$  на сопротивлении первичной обмотки трансформатора. Поэтому, в соответствии с (7.6), можно считать, что  $U_1 \approx E_1$ .

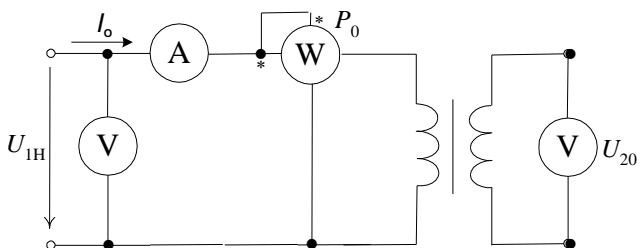


Рисунок 7.11 – Схема опыта холостого хода

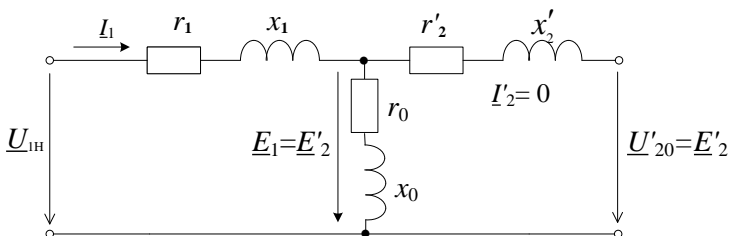


Рисунок 7.12 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

На основании вышеизложенного, коэффициент трансформации трансформатора, определяемый в ходе проведения опыта холостого хода,

$$k = E_1 / E_2 \approx U_{1H} / U_{20}.$$

Так как в режиме холостого хода во вторичной обмотке тока нет, а по первичной протекает незначительный ток, то потерями в обмотках можно пренебречь, т. к. они зависят от квадрата тока и сопротивления обмоток. Следовательно, можно считать, что вся активная мощность  $P_o$ , потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, идет на покрытие потерь в магнитопроводе.

При определении параметров намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора учитывается тот факт, что у реальных трансформаторов  $r_1 \ll r_0$  и  $x_1 \ll x_0$ . Приведенные неравенства позволяют пренебречь влиянием  $r_1$  и  $x_1$  на значение тока холостого хода, протекающего в левом контуре схемы замещения трансформатора, и определить *приблизительные* значения параметров намагничивающей ветви (см. рисунок 7.8).

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_o = P_o / (mI_o^2),$$

где  $m$  – число фаз (для однофазного трансформатора  $m = 1$ ).

Полное сопротивление намагничивающей ветви  $z_o$

$$z_o \approx U_{1H} / I_o.$$

Реактивное сопротивление намагничивающей ветви  $x_0$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

### 7.1.5 Короткое замыкание трансформатора

При коротком замыкании трансформатора начала и концы вторичной обмотки закорачиваются между собой. Это значит что сопротивление нагрузки равно нулю. Различают эксплуатационное замыкание и замыкание в опыте короткого замыкания. В первом случае к первичной обмотке трансформатора приложено все сетевое напряжение. В таком режиме по обмоткам трансформатора протекают значительные токи, которые в десятки раз могут быть больше номинальных значений. Большие токи быстро разогревают обмотки до температуры, при которой изоляция обмоток сгорает. Следовательно, эксплуатационное короткое замыкание является аварийным режимом для трансформатора. Для защиты трансформатора в этом режиме необходимо использовать плавкие предохранители или автоматические выключатели.

Для новых и отремонтированных трансформаторов проводят опыт короткого замыкания. В этом опыте, при замкнутых выводах вторичной обмотки, на первичную подают такое пониженное напряжение  $U_k$ , при котором по первичной обмотке трансформатора начинает протекать номинальный ток  $I_{1н}$ . Такое напряжение называется напряжением короткого замыкания трансформатора. При напряжении  $U_k$  измеряется активная мощность  $P_k$ , потребляемая из сети. В силовых трансформаторах величина  $U_k$  обычно составляет 5–10 % от  $U_{1н}$ , при этом, чем больше мощность трансформатора, тем меньше процент. На практике напряжение короткого замыкания приводится в процентах

$$u_{к\%} = (U_k / U_{1н}) \cdot 100 \%$$

Схема проведения опыта КЗ представлена на рисунке 7.13.

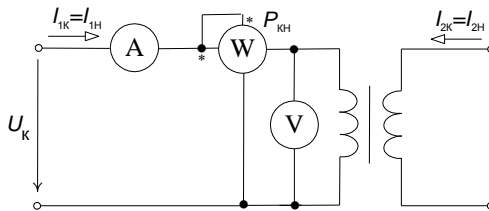


Рисунок 7.13 – Схема включения трансформатора для проведения опыта короткого замыкания

Опыт короткого замыкания позволяет определить потери в обмотках трансформатора при номинальных токах и рассчитать их сопротивления в

схеме замещения ( $r_1, r_2'$  и  $x_1, x_2'$ ). При определении  $r_1, r_2'$  и  $x_1, x_2'$  учитывается тот факт, что у реальных трансформаторов  $r_1 = r_2' \ll r_0$  и  $x_1 = x_2' \ll x_0$ . В опыте КЗ приведенные неравенства позволяют пренебречь током  $I_0$ , протекающим в намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора (рисунок 7.14) и перейти к упрощенной схеме (см. рисунок 7.9). В этом случае можно считать что ток  $I_{1н}$ , потребляемый из сети в опыте КЗ, определяется только подводимым напряжением  $U_k$  и значениями  $r_k$  и  $x_k$ .

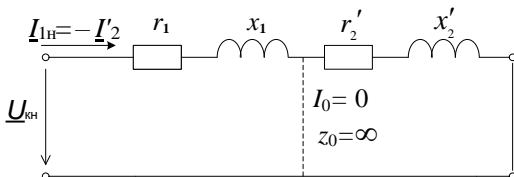


Рисунок 7.14 – Схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{m I_{1н}^2}.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_k / I_{1н}.$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Активное сопротивление обмоток

$$r_1 = r_2' = r_k / 2.$$

Реактивное сопротивление обмоток

$$x_1 = x_2' = x_k / 2.$$

При определении потерь в обмотках трансформатора учитывается тот факт, что в опыте короткого замыкания  $U_k \ll U_{1н}$ . Малое значение напряжения на первичной обмотке создает пропорционально низкое значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора.

Так как потери в магнитопроводе очень сильно зависят от значения магнитной индукции в нем, то в опыте короткого замыкания они настолько малы, что ими можно пренебречь. Следовательно, вся мощность  $P_k$ , потребляемая из сети в опыте короткого замыкания и измеряемая ваттметром, идет на покрытие потерь в обмотках трансформатора при номинальном то-



ке. Потери в обмотках пропорциональны квадрату тока и сопротивлению обмоток.

### 7.1.6 Работа трансформатора под нагрузкой

При работе под нагрузкой сопротивление потребителя энергии, подключаемого к вторичной обмотке трансформатора, больше нуля, но меньше бесконечности. Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же закономерностям, что и работа в режимах холостого хода и короткого замыкания. Эти зависимости выражаются в виде уравнений ЭДС (7.6), (7.7) и МДС (7.9).

Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке трансформатора для упрощенной схемы и формул (7.16) приведена на рисунке 7.15.

Порядок построения диаграммы:

- 1 Откладываем вектор тока  $I_1 = -I_2'$ .
- 2 Так как на активно-индуктивной нагрузке вектор напряжения опережает вектор тока, откладываем вектор напряжения  $U_1$  под углом  $\varphi_1$  к вектору тока  $I_1$ .
- 3 Находим вектор напряжения  $U_2'$  по формуле  $-U_2' = U_1' + I_2'(r_2' + x_2')$ .

Треугольник ABC называется характеристическим: его стороны показывают падения напряжения в трансформаторе.

Потребители энергии, подключаемые к вторичной обмотке, создают в ней ток  $I_2$ . Являясь индуктированным, ток вторичной обмотки по правилу Ленца противодействует причине, его вызывающей. В результате магнитный поток, создаваемый этим током, стремится уменьшить поток в сердечнике, образованный первичной обмоткой. Ранее было отмечено, что магнитный поток в сердечнике трансформатора практически не зависит от значения тока нагрузки, а, следовательно, и значение намагничивающего тока  $I_0$  не изменяется. Поэтому, в соответствии с уравнением МДС (1.9), размагничивающее действие тока вторичной обмотки компенсируется увеличением тока в первичной обмотке. Ток первичной обмотки увеличится настолько по сравнению с током холостого хода, что создаваемый им дополнительный магнитный поток полностью скомпенсирует собой поток вторичной обмотки и результирующий поток в сердечнике трансформатора практически не изменится. Строго говоря, он несколько уменьшится, так

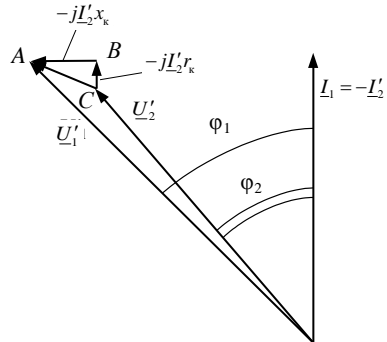


Рисунок 7.15 – Векторная диаграмма для упрощенной схемы замещения

как с увеличением тока первичной обмотки возрастает падение напряжения на ее сопротивлении и противоэлектродвижущая сила в ней уменьшается.

Таким образом, в трансформаторе изменяется величина тока при изменении нагрузки, а переход энергии из первичной цепи во вторичную совершается электромагнитным путем. Вторичная обмотка является источником энергии для потребителей, подключаемых к ней.

Как следует из уравнений (7.6), (7.7), (7.9), изменение тока нагрузки вызывает изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Данное изменение объясняется падением напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора. Для оценки степени изменения вторичного напряжения трансформатора при изменении параметров нагрузки вводится специальный показатель, называемый процентным изменением напряжения.

Процентное изменение напряжения:

$$\Delta u_{\%} = \left( \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \right) \cdot 100 \%. \quad (7.25)$$

Однако определять процентное изменение напряжения экспериментально с помощью выражения (7.25) не всегда рационально. Объясняется это тем, что для определения  $\Delta u_{\%}$  с помощью выражения (7.25) необходимо нагружать трансформатор с целью получения значения  $U_2$ . Из сети, в процессе эксперимента, потребляется значительная мощность, поэтому  $\Delta u_{\%}$  определяют на основании анализа векторной диаграммы, соответствующей упрощенной схеме замещения (см. рисунок 7.15), по формуле

$$\Delta u_{\%} \approx \beta \left( \frac{I_{1н} r_{к} \cos \varphi_2 + I_{1н} x_{к} \sin \varphi_2}{U_{1н}} \right) \cdot 100 = \beta (u_{ка\%} \cos \varphi_2 + u_{кр\%} \sin \varphi_2), \quad (7.26)$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки трансформатора равный отношению реального тока вторичной обмотки к номинальному значению тока в ней

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} \approx \frac{I_1}{I_{1н}};$$

$u_{ка\%}$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания,

$$u_{ка\%} = \frac{I_{1н} r_{к}}{U_{1н}} \cdot 100 \%;$$

$u_{кр\%}$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания,

$$u_{кр\%} = \frac{I_{1н} x_{к}}{U_{1н}} \cdot 100 \%.$$

Анализ уравнения (7.26) показывает, что  $\Delta u_{\%}$  зависит как от величины нагрузки ( $\beta$ ), так и от ее характера ( $\cos \varphi_2$ ).

При заданном значении  $\beta$  относительное изменение  $\Delta u_{\%}$  зависит от величины угла  $\varphi_2$ . В силовых трансформаторах при чисто активной нагрузке ( $\varphi_2 = 0$ ) величина  $\Delta u_{\%}$  невелика; при активно-индуктивной нагрузке ( $\varphi_2 > 0$ ) – возрастает; при активно-емкостной нагрузке ( $\varphi_2 < 0$ ) – может стать отрицательной. При некотором значении угла  $\varphi_2$  изменение тока нагрузки не вызывает изменения напряжения на выходе трансформатора. Для определения значения этого угла достаточно приравнять к нулю выражение (7.26).

Для иллюстрации влияния нагрузки на вторичное напряжение трансформатора используется его внешняя характеристика. Под внешней характеристикой подразумевается зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$ , снятая при неизменном напряжении сети и постоянном значении коэффициента мощности в нагрузке. Как правило, внешняя характеристика строится по расчетным данным, которые можно получить, используя выражения (7.25) и (7.26).

На рисунке 7.16 приведена внешняя характеристика трансформатора, полученная для различных значений коэффициента мощности нагрузки.

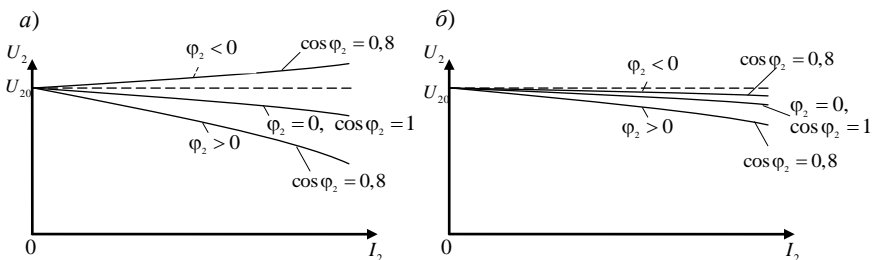


Рисунок 7.16 – Внешние характеристики трансформаторов:  
*a* – большой (десятьки МВ·А и более) и *б* – малой (до 10 кВ·А) мощности

Используя основные уравнения приведенного трансформатора, можно для нагрузочного режима построить векторную диаграмму. Вид этой диаграммы зависит от характера нагрузки.

Построим диаграмму для случая активно-индуктивной нагрузки, когда ток  $I'_2$  отстает по фазе от напряжения  $U'_2$  (рисунок 7.17, *a*).

Порядок построения.

Вначале вычерчивается вектор магнитного потока  $\Phi$ . Затем, используя значения  $I_{0a}$  и  $I_{0p}$ , строится вектор тока холостого хода  $I_0$ . При построении следует учитывать, что реактивная составляющая тока холостого хода  $I_{0p}$  совпадает по фазе с потоком  $\Phi$ , а активная  $I_{0a}$  – опережает поток на  $90^\circ$ .

Векторы ЭДС  $E_1$  и  $E'_2$  для приведенного трансформатора равны по величине и отстают по фазе от потока  $\Phi$  на  $90^\circ$ . С отставанием от вектора

ЭДС  $\underline{E}_2'$  на угол  $\psi_2$  (нагрузка активно-индуктивная), строится вектор тока  $\underline{I}_2'$ , где

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}, \quad (7.27)$$

а  $r'_n$  и  $x'_n$  – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений нагрузки.

Согласно второму уравнению системы (7.16), прибавив к  $\underline{E}_2'$  векторы  $(-j\underline{I}'_2 x'_2)$  и  $(-j\underline{I}'_2 r'_2)$ , можно получить вектор вторичного напряжения  $\underline{U}'_2$  и угол  $\varphi_2$ , на который он опережает по фазе ток  $\underline{I}'_2$  (угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке). Далее, используя третье уравнение системы (7.16), к вектору  $\underline{I}_0$  прибавим вектор  $(-\underline{I}'_2)$  и находим  $\underline{L}_1$ .

Затем, в соответствии с первым уравнением системы (7.16), определим вектор  $\underline{U}_1$ . Построив  $\underline{U}_1$ , найдем угол  $\varphi_1$  между векторами  $\underline{U}_1$  и  $\underline{L}_1$ .

Аналогично можно построить векторную диаграмму трансформатора при активно-емкостной нагрузке (рисунок 7.17, б). Сравнивая диаграммы при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках, нетрудно заметить, что при  $rL$ -нагрузке  $\underline{U}'_2 < \underline{E}'_2$ , а при  $rC$ -нагрузке может быть наоборот,  $\underline{U}'_2 > \underline{E}'_2$ .

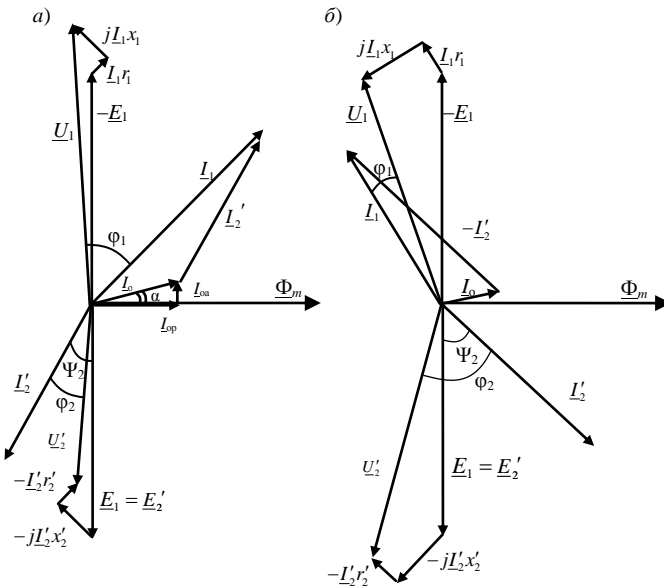


Рисунок 7.17 – Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

Векторные диаграммы весьма удобны при исследовании трансформаторов. По ним легко судить о соотношениях величин и о фазовых сдвигах между векторными величинами. Они позволяют решить целый ряд задач. Например, определить величину и фазу вторичного напряжения при различных нагрузках.

*Регулирование напряжения в трансформаторах необходимо:*

1) для стабилизации вторичного напряжения. Согласно ГОСТу 13109–97 отклонения напряжения у потребителей не должны превышать  $\pm 5\%$  от номинального;

2) для реализации особенностей технологического процесса (плавное регулирование напряжения в широком диапазоне).

Переключать ответвления обмоток можно при отключенном от сети трансформаторе (переключение без возбуждения – ПБВ) или же без отключения трансформатора (регулирование под нагрузкой – РПН). Наиболее простой способ – переключение без возбуждения. Он применяется во всех трансформаторах потребительских подстанций 10/0,4 кВ. Напряжение регулируют в пределах  $\pm 5\%$ , ступенями по 2,5 %, т. е. если на трансформатор подано 10 кВ, на вторичной стороне можно получить 380, 390, 400, 410 и 420 В. Такое регулирование на практике называют *надбавками трансформатора*. Ответвления обычно выполняют на обмотке высшего напряжения, потому что ее ток и сечение провода меньше, поэтому легче выполнить отпайки для регулирования, а также она имеет большее количество витков, что повышает точность регулирования.

Переключение без возбуждения осуществляется редко (один или два раза в году), при подключении новых потребителей или при сезонных изменениях нагрузки.

Регулирование под нагрузкой применяется у трансформаторов на районных подстанциях. Как правило, это трансформаторы большой мощности. Переключение необходимо производить без перерыва в электроснабжении потребителей (рисунок 7.18).

Регулирование под нагрузкой осуществляется постоянно [17]. Предположим, при нормальной работе трансформатора оба контакта находились в положении 2 (см. рисунок 7.18, а). Произошло уменьшение первичного напряжения. Возникла необходимость снизить вторичное напряжение путем увеличения числа витков первичной обмотки, т. е. переключить контакты из положения 2 в положение 3. Переключение будет проводиться в два этапа: сначала вторым контактом, при этом первый контакт будет осуществлять связь, чтобы не было разрыва цепи (см. рисунок 7.18, б). В момент положения 3 второго контакта, первый контакт будет еще в положении 2 и ток в замкнутом контуре, образованном витками и реактором Р, будет ограничи-

ваться реактором. Затем первый контакт переключается из положения 2 в 3 (см. рисунок 7.18, в).

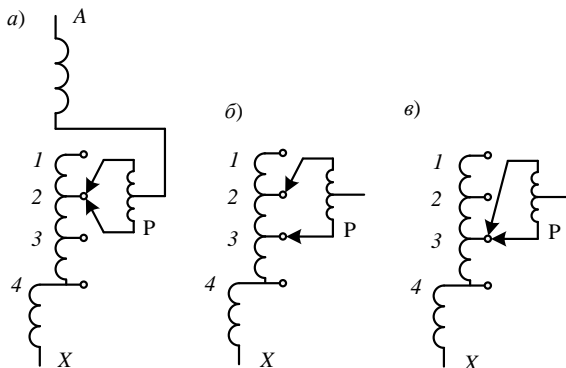


Рисунок 7.18 – Переключение контактов при регулировании под нагрузкой

Плавное регулирование напряжения в широком диапазоне используется в трансформаторах малой и средней мощности. Наиболее распространены автотрансформаторы со скользящими контактами.

### 7.1.7 Потери и коэффициент полезного действия трансформатора

При работе трансформатора имеют место магнитные и электрические потери.

*Магнитные потери*  $\Delta P_m$  – это потери в магнитопроводе трансформатора (определяются по формуле 7.24). Они складываются из потерь на *перемагничивание* магнитопровода (гистерезис) и потерь на *вихревые токи*. Величина магнитных потерь зависит от значения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, частоты ее изменений, марки и толщины пластин электротехнической стали из которой набран магнитопровод.

Ввиду того, что магнитный поток при неизменных  $U_1$  и  $f$  практически постоянен, то величина магнитных потерь также *неизменна*, т. е. не зависит от нагрузки трансформатора и практически равна потерям мощности при холостом ходе,  $\Delta P_m = P_0$ .

*Электрические потери*  $\Delta P_{эл}$  – это потери на нагрев обмоток трансформатора протекающими по ним токами:

$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_k.$$

Величина электрических потерь зависит от нагрузки трансформатора.

В связи с вышеприведенным магнитные потери называют постоянными, электрические – переменными.

Так как  $I_1 = \beta I_{1н}$ , то

$$\Delta P_{эл} = \beta^2 (I_{1н}^2 r_k) = \beta^2 P_{кн}, \quad (7.28)$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки;

$\Delta P_{кн}$  – мощность потерь в опыте короткого замыкания.

Суммарные потери в трансформаторе

$$\Delta P = \Delta P_M + \Delta P_{эл} = P_0 + \beta^2 P_{кн}. \quad (7.29)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора представляет собой отношение активной мощности  $P_2$  на выходе трансформатора к активной мощности  $P_1$  на его входе

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + (\Delta P_M + \Delta P_{эл})}. \quad (7.30)$$

Учитывая, что  $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$ , имеем

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + (P_0 + \beta^2 P_{кн})}. \quad (7.31)$$

Так как  $P_2 = P_1 - (\Delta P_M + \Delta P_{эл}) = P_1 - (P_0 + \beta^2 P_{кн})$ , то уравнение КПД можно представить в следующем виде:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}, \quad (7.32)$$

где  $S_H = U_{2н} I_{2н}$  – номинальная полная мощность однофазного трансформатора.

Значения  $P_0$  и  $P_{кн}$  для силовых трансформаторов приводятся в соответствующих каталогах.

Анализ уравнения (7.32) показывает, что  $\eta = f(\beta)$ . Эта зависимость при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  представлена на рисунке 7.19. Оптимальный коэффициент нагрузки  $\beta_{опт}$ , при котором КПД максимальный, можно определить, взяв первую производную  $\frac{d\eta}{d\beta}$  и приравняв ее к нулю.

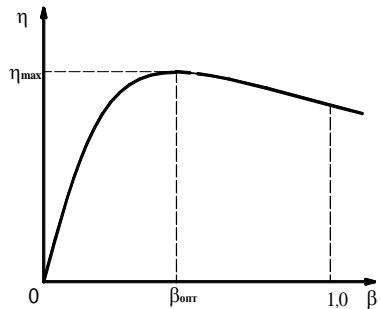


Рисунок 7.19 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$

При этом  $\beta_{\text{онт}}^2 P_{\text{кн}} = P_0$  или  $\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{м}}$ .

Следовательно, КПД имеет максимум при такой нагрузке, когда электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали.

Из формулы (7.32) имеем

$$\beta_{\text{онт}} = \sqrt{P_0 / P_{\text{кн}}}. \quad (7.33)$$

Для большинства трансформаторов  $\beta_{\text{онт}} = 0,5 \dots 0,7$ .

В мощных трансформаторах максимальное значение КПД может достигать весьма высоких значений (0,98–0,99). В трансформаторах малой мощности  $\eta_{\text{max}}$  может снижаться до 0,6, при  $S_{\text{н}}$  – до 10 В·А.

### 7.1.8 Специальные типы трансформаторов

**Автотрансформатор** – это трансформатор, у которого вторичная обмотка является частью первичной, служит он для получения нескольких вторичных напряжений или для плавного регулирования вторичного напряжения. В первом случае от первичной обмотки делают отводы, поэтому вторичные напряжения – дискретные, нерегулируемые (рисунок 7.20, а). Во втором случае напряжение  $U_2$  регулируется от 0 до  $U_1$  (рисунок 7.20, б).

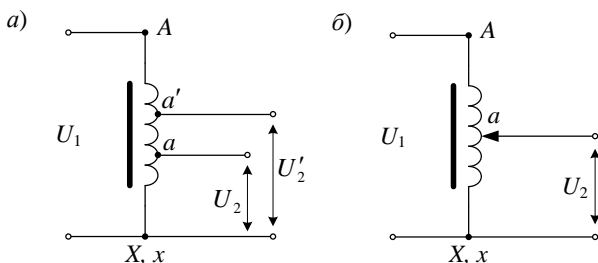


Рисунок 7.20 – Автотрансформаторы с нерегулируемым выходным (а) и регулируемым (б) напряжениями

Автотрансформатор, плавно регулирующий вторичное напряжение, называют ЛАТР – лабораторным автотрансформатором. Конструктивно он производится в виде цилиндрического сердечника, навитого из ленты электротехнической стали. Сердечник представляет собой пустотелый цилиндр, на изолированную поверхность которого наматывается первичная обмотка АХ. Движок ЛАТРа выполняется в виде ролика, перемещающегося по виткам обмотки. В некоторых случаях автотрансформатор имеет ряд преимуществ, в том числе по габаритам, в сравнении с обычным трансформатором.



Рассмотрим электрическую схему автотрансформатора, нагруженного на нагрузку (рисунок 7.21). Если к первичной обмотке  $Ax$  с числом витков  $w_1$  подвести напряжение  $U_1$ , а вторичную обмотку  $ax$  оставить разомкнутой, то ток, проходя по первичной обмотке, создаст магнитный поток  $\Phi$ , который будет индуцировать в каждом витке обмотки ЭДС  $E_b$ . Тогда ЭДС в обмотке  $Ax$  будет равна  $E_1 = E_b w_1$ , а в части обмотки  $ax$  –  $E_2 = E_b w_2$ . Отношение данных ЭДС есть коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При подключении нагрузки  $Z_n$  появится ток  $I_2$ . Пренебрегая потерями в автотрансформаторе, можно записать, что  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ , т. е. мощность, подведенная к автотрансформатору, равна мощности, полученной от него. Тогда  $U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1$ , т. е. имеем такое же соотношение, что и у обычного трансформатора. Электрические потери в обмотках автотрансформатора значительно меньше, чем в обмотках соответствующего по мощности обычного трансформатора, поскольку в первом только одна обмотка, а не две, и во вторичной обмотке протекает разность токов ( $I_{xa} = I_2 - I_1$ ), что дает возможность выполнить обмотку  $ax$  из провода небольшого сечения.

По первому закону Кирхгофа

$$I_2 = I_1 + I_{xa}. \quad (7.34)$$

Если пренебречь влиянием углов  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , то можно записать приближительное равенство:

$$I_2 \approx I_1 + I_{xa}. \quad (7.35)$$

Тогда, умножив обе части уравнения на  $U_2$ , получим

$$\begin{cases} U_2 I_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{xa}; \\ S_2 = S_{эл} + S_{эм}, \end{cases} \quad (7.36)$$

т. е. мощность вторичной обмотки состоит из двух составляющих – электрической  $S_{эл}$ , поступающей из сети, и электромагнитной  $S_{эм}$ , поступающей из вторичной обмотки  $ax$ , куда она передается электромагнитным путем при помощи потока  $\Phi$ . Так как электромагнитным путем во вторичную обмотку передается только часть всей мощности, то это позволяет уменьшить сечение магнитопровода, что дает экономию стали и снижает потери в ней. При

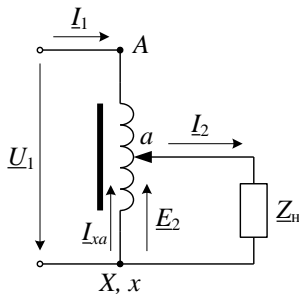


Рисунок 7.21 – Электрическая схема нагруженного автотрансформатора

уменьшении сечения магнитопровода сокращается средняя длина одного витка и общее количество меди, расходуемой на обмотку.

Коэффициент трансформации  $k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$ , а  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ , тогда получим

$$I_{xa} = I_2 - I_1 = I_2 \left( 1 - \frac{1}{k} \right). \quad (7.37)$$

Оптимальная величина коэффициента трансформации  $k \approx 1,25 \dots 2,0$ .

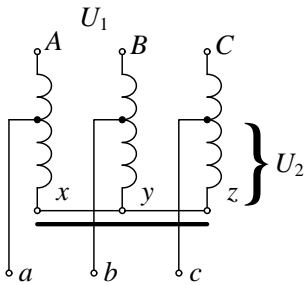


Рисунок 7.22 – Схема трехфазного автотрансформатора

Автотрансформаторы могут быть трехфазными, в этом случае обмотки их соединяют в звезду (рисунок 7.22). Используются трехфазные автотрансформаторы при пуске мощных синхронных и асинхронных двигателей. С помощью их при пуске осуществляется уменьшение пускового тока.

Автотрансформаторы могут быть и для повышения напряжения. В этом случае они оборудованы переключателями, которые позволяют изменять число витков вторичной обмотки  $w_2$  и ступенчато регулировать напряжение  $U_2$  на выходе, при этом  $w_2 > w_1$ .

В автотрансформаторах часть электрической мощности передается непосредственно (без трансформации) путем контактной связи между последовательной и общей обмотками, такая мощность называется электрической. *Проходной мощностью* называют полную мощность, передаваемую с первичной обмотки автотрансформатора на вторичную. Трансформаторной или типовой мощностью называют мощность, передаваемую магнитным полем. Полная мощность равна сумме трансформаторной и электрической мощностей. Под *номинальной мощностью* автотрансформатора понимают его проходную мощность при номинальных условиях.

Наряду с уже отмеченными преимуществами у автотрансформаторов имеются следующие недостатки.

1 Между первичной и вторичной обмотками существует электрическая связь. Поэтому вторичная обмотка и подключенные к ней потребители должны иметь такую же изоляцию по отношению к земле, как и первичная. По этой же причине при питании цепей низкого напряжения от сети высокого напряжения следует соблюдать особые меры предосторожности.

2 Незначительные коэффициенты трансформации (не выше 2), поскольку при  $k > 2$  автотрансформаторы невыгодны. Более того, при  $k > 2$  в автотрансформаторах большой мощности возможны перенапряжения во вто-

ричной цепи при появлении атмосферных и коммутационных перенапряжений в первичной.

3 Малое значение напряжения короткого замыкания и соответственно большие токи короткого замыкания, например, при замыкании точек  $aX$  (см. рисунок 7.21) напряжение сети  $U_1$  подводится к небольшой части витков  $Aa$ , которые обладают малым сопротивлением короткого замыкания.

**Измерительные трансформаторы** используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом они оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность расширять пределы измерения приборов, т. е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев они служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов.

Измерительные трансформаторы подразделяют на два типа: **трансформаторы напряжения** и **трансформаторы тока**. Первые служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на величину напряжения (например, обмоток напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Вторые служат для включения амперметров и токовых обмоток указанных приборов. Измерительные трансформаторы рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и 173 В).

*Трансформатор напряжения* (ТН). Его выполняют двухобмоточным, понижающим,  $w_1 > w_2$  (рисунок 7.23).

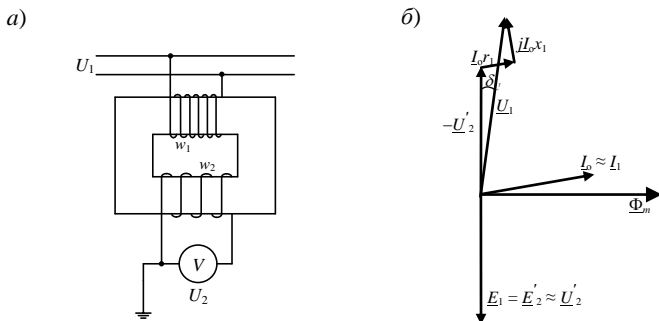


Рисунок 7.23 – Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора напряжения

Так как сопротивления обмоток вольтметра и других приборов, подключаемых к ТН, велики, то он практически работает в режиме ХХ

$$U_1 = U'_2 = k_U U_2, \quad (7.38)$$

где  $k_U$  – коэффициент трансформации,  $k_U = w_1 / w_2$ .

В действительности ток холостого хода  $I_0$  создает в трансформаторе падение напряжения, поэтому  $U'_2 \neq U_1$ , и между векторами этих напряжений имеется сдвиг по фазе  $\delta_U$ . В результате этого при измерениях образуются погрешности, которые существуют двух видов:

а) относительная погрешность напряжения

$$\Delta u \% = \left( \frac{U_2 k_U - U_1}{U_1} \right) \cdot 100 \% ; \quad (7.39)$$

б) угловая погрешность  $\delta_U$  за величину которой принимают угол между векторами  $\underline{U}_1$  и  $-\underline{U}'_2$ . Последняя влияет на результаты измерений, выполненных с помощью ватметров, счетчиков, фазометров и других приборов, показания которых зависят не только от величины тока и напряжения, но и от угла сдвига фаз между ними.

В зависимости от величины допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяются на ряд классов точности.

Для уменьшения погрешностей  $\Delta u\%$  и  $\delta_U$  сопротивления обмоток трансформатора  $z_1$  и  $z_2$  делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной электротехнической стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы  $B = 0,6 \dots 0,8$  Тл. Благодаря этому обеспечивается значительное уменьшение тока холостого хода.

С целью обеспечения безопасности обслуживающего персонала и приборов одна точка вторичной обмотки ТН заземляется.

ТН выполняются однофазными и трехфазными.

*Трансформатор тока (ТТ).*

Его выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рисунок 7.24) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода. Первичную обмотку трансформатора тока включают в линию последовательно с нагрузкой, а к его вторичной обмотке подключают измерительный прибор.

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, для которого

$$I_1 \approx I'_2 = I_2 / k_I, \quad (7.40)$$

где  $k_I$  – коэффициент трансформации,  $k_I = w_1 / w_2$ .

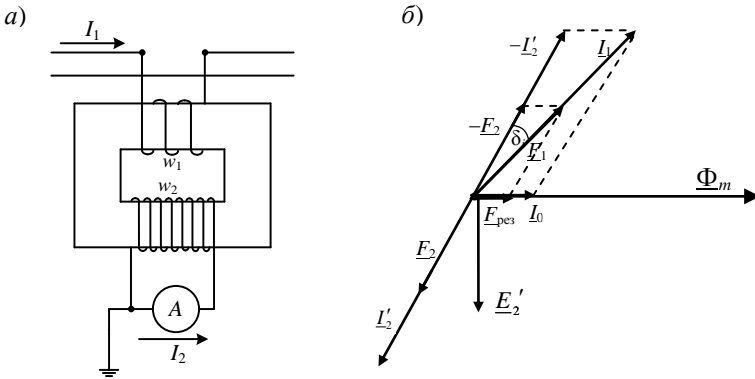


Рисунок 7.24 – Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора тока

В действительности из-за наличия намагничивающего тока  $I_\mu$ ,  $I_\mu \approx I_0$ , в рассматриваемом трансформаторе  $I_1 \neq I_2'$  и между векторами этих токов имеется угол  $\delta_I$ . В результате возникает относительная токовая погрешность ( $\Delta i\%$ ) и угловая, измеряемая углом  $\delta_i$ ,

$$\Delta i\% = \left( \frac{I_2/k_I - I_1}{I_1} \right) \cdot 100 \%. \quad (7.41)$$

В зависимости от величины допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяются на ряд классов точности.

Для уменьшения  $\Delta i\%$  и  $\delta_I$  магнитопроводы трансформаторов тока изготовляют из высококачественной электротехнической стали достаточно большого сечения так, чтобы  $B = 0,06..0,1$  Тл. При этом отсутствует насыщение магнитопровода, намагничивающий ток будет очень мал и им можно пренебречь в расчетах.

Следует отметить, что размыкание цепи вторичной обмотки ТТ недопустимо. В этом случае трансформатор переходит в режим холостого хода и его результирующая МДС, которая в рабочем режиме была мала, становится равной  $F_{\text{рез}} = F_1$  (см. рисунок 7.24, б). В результате резко (в десятки раз) возрастает магнитный поток в магнитопроводе и индукция в стали до-

стигает значения более 2 Тл. Соответственно, резко возрастают потери в стали, и трансформатор может сгореть.

Еще большую опасность представляет резкое повышение напряжения на зажимах вторичной обмотки до нескольких сот и даже тысяч вольт. Для предотвращения режима холостого хода нужно при отключении измерительных приборов замыкать вторичную обмотку трансформатора тока накоротко.

Трансформаторы тока широко применяются в виде токовых клещей. Замкнутый сердечник может размыкаться и внутрь клещей помещают провод с током, который надо измерить. Токоизмерительные клещи снабжены многопредельным амперметром и, таким образом, можно измерять силу тока без разрыва цепи.

*Применение измерительных трансформаторов для измерения больших мощностей или энергий.* При измерении больших мощностей токовую обмотку ваттметра подключают к вторичной обмотке трансформатора тока, а обмотку напряжения ваттметра к вторичной обмотке трансформатора напряжения. Тогда ваттметр показывает активную мощность  $P_2$ , пропорциональную активной мощности  $P_1$  первичной цепи:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (7.42)$$

где  $U_1$  – напряжение;

$I_1$  – ток первичной цепи;

$\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности первичной цепи.

После подстановки значений  $U_1$  и  $I_1$  получаем:

$$P_1 = k_U U_2 I_2 \frac{1}{k_I} \cos \varphi_2 = k_P P_2. \quad (7.43)$$

В формуле (7.49) сделано допущение, что  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

Обычно  $k_U > 1$ , а  $k_I < 1$ , тогда коэффициент пропорциональности по мощности  $k_P = k_U / k_I \gg 1$ .

На результат измерения мощности  $P_1$  влияют не только погрешности трансформатора по напряжению и току, но и угловые погрешности, в результате чего  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ .

## 7.2 Асинхронные машины

### 7.2.1 Общие сведения. Устройство

**Асинхронная машина** – это машина, в которой при работе возбуждается вращающееся магнитное поле, но ротор которой вращается асинхронно, т. е. со скоростью, отличной от скорости поля.

Асинхронные машины применяют главным образом в качестве электродвигателей. В зависимости от числа фаз статорной обмотки различают од-

но-, двух- и трехфазные асинхронные двигатели. Наибольшее распространение получили трехфазные электродвигатели: для привода колесных пар электровозов, станков, насосов, вентиляторов и т. д. Они потребляют около 50 % электрической энергии, вырабатываемой электрическими станциями. Двухфазные асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт применяют в системах автоматического управления в качестве исполнительных двигателей. Однофазные двигатели используют в бытовых приборах.

Трехфазные электродвигатели подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (их называют двигателями с контактными кольцами). Конструктивно статоры этих двигателей отличий не имеют. По степени защиты двигатели выполняют закрытыми обдуваемыми (исполнение IP44, IP54) и защищенными (исполнение IP23). В закрытых двигателях со степенями защиты IP44 и IP54 более 90 % тепла, обусловленного потерями мощности, отводится воздухом с поверхности корпуса.

Двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее дешевыми, надежными и поэтому самыми распространенными из всех электрических двигателей; электропромышленность выпускает их десятки миллионов в год.

Появление трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей связано с именем М. О. Доливо-Добровольского, изобретены они были им в 1889 г. Предложенная М. О. Доливо-Добровольским конструкция асинхронных двигателей в основных чертах сохранилась до наших дней.

На рисунке 7.25 показан общий вид наиболее распространенного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения. В сердечнике статора 1 расположена трехфазная обмотка 2. Обмотка ротора 3 – короткозамкнутая, в виде «беличьего колеса» (общепринятое название обмотка в виде «беличьей клетки»). Сердечник статора закрепляют в корпусе 4, а сердечник ротора 5 – на валу 6 (машины малой мощности) или на ободе с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности). Вал ротора вращается в подшипниках 7, установленных в подшипниковых щитах 8, прикрепляемых к корпусу статора. Конструкция оболочки (корпус, щиты и т. д.) в значительной степени зависит от исполнения машины по степени защищенности и от выбранной системы охлаждения. В обдуваемой машине (см. рисунок 7.25) для лучшего охлаждения корпус снабжен ребрами 9. Центробежный вентилятор 10, расположенный на валу двигателя снаружи оболочки машины, обдувает ребристый корпус двигателя. Вентилятор закрыт воздухонаправляющим кожухом 11.

Внутри машины воздух перемешивается вентиляционными лопатками 12, отлитыми вместе с короткозамыкающими кольцами 13 обмотки 3 ротора. От мощных двигателей для повышения интенсивности охлаждения воздух прогоняется через аксиальные каналы ротора, образованные воздухопроводящими трубками и дисками, предотвращающими попадание

наружного воздуха и влаги к обмоткам статора. На корпусе крепится коробка выводов 14, в которой установлена клеммная панель с выведенными концами обмотки статора. Количество выводов обмотки может быть шесть (начала и концы всех трех фаз обмотки, для возможности соединения обмотки статора по схеме «звезда» или «треугольник») или три, если в двигателе предусмотрена лишь одна схема соединения обмоток статора.

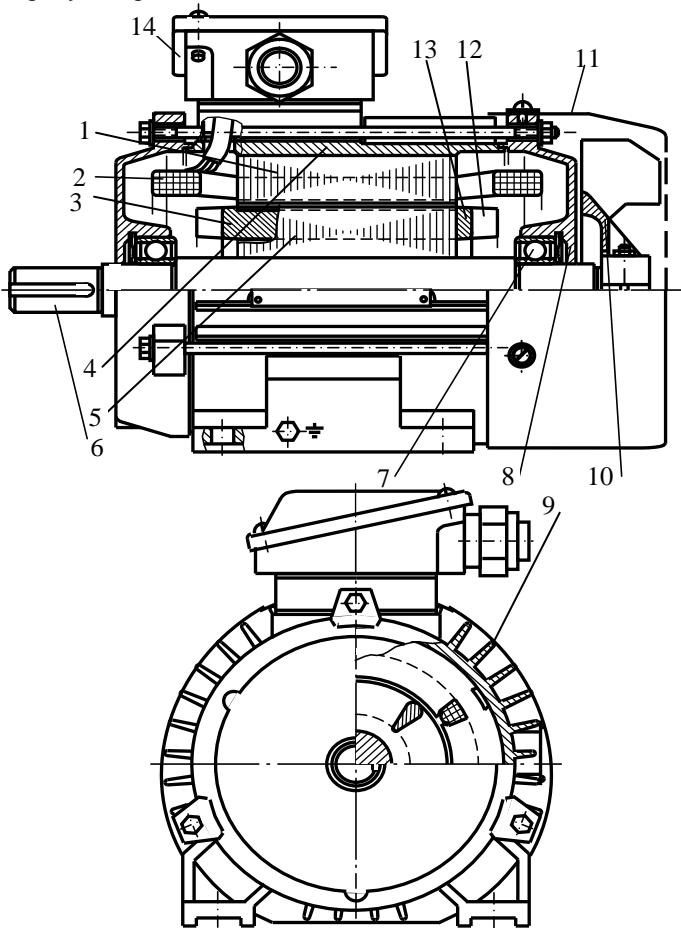


Рисунок 7.25 – Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором  
 Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник статора (магнитопровод) набирают из отштампованных кольцеобразных листов электротехнической стали.



тротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. С внутренней стороны кольца выштампованы пазы для размещения обмотки. Листы изолируют оксидной пленкой или лаком и спрессовывают в сердечник, скрепляя его сваркой, скобками или шпильками. В машинах свыше 400 кВт в сердечниках для лучшего охлаждения выполняют радиальные каналы: разделяют сердечник на ряд пакетов с установкой между ними стальных прокладок.

В пазы магнитопровода статора укладывают обмотку, изготовленную из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Обмотки из провода прямоугольного сечения изготавливают в виде жестких секций и укладывают в открытые или полуоткрытые пазы. Обмотки из провода круглого сечения всыпают в полузакрытые пазы трапециевидального сечения через шлиц в пазу. Концы фаз обмотки статора выводят на зажимы клеммной колодки машины.

Трехфазную обмотку статора можно соединять в «звезду» или «треугольник» в зависимости от напряжения сети. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то при напряжении сети 380 В обмотку статора соединяют в звезду, если же в сети напряжение 220 В, то обмотку статора соединяют в треугольник. В обоих случаях на фазу приходится напряжение 220 В.

В современных асинхронных машинах в качестве межвитковой и корпусной изоляции используют изоляционные материалы классов нагревостойкости *B* и *F*, а для специальных машин, работающих в тяжелых условиях, – материалы класса *H*.

Магнитопровод ротора также набирают из изолированных листов электротехнической стали с выштампованными пазами. Делается это для уменьшения потерь на вихревые токи. В короткозамкнутых роторах пазы заливают алюминием; при этом образуются стержни «беличьей клетки» (см. рисунок 7.25). Одновременно отливают короткозамыкающие торцевые кольца и вентиляционные лопасти. В более крупных машинах в пазы ротора вставляют медные (бронзовые, латунные) стержни, концы которых вваривают (впаивают) в короткозамыкающие медные кольца. Магнитопровод ротора вместе с короткозамкнутой обмоткой напрессовывают на вал.

Двигатели с фазным ротором находят меньшее применение, чем с короткозамкнутым ротором, и выпускаются главным образом мощностью свыше 100 кВт. На рисунке 7.26 представлен общий вид асинхронного двигателя с фазным ротором защищенного исполнения.

Статор двигателя с фазным ротором конструктивно не отличается от статора двигателя с короткозамкнутым ротором. Контактные кольца *12* расположены вне оболочки машины. Выводные концы *10* обмотки ротора *5* проходят через центральное отверстие в валу *7* и подключаются к трем контактными кольцам *12* болтами. Щеткодержатели *13* со щетками прикре-

пляются шеточной траверсой 14 к подшипниковому щиту 11. Токосъемное устройство закрыто коробкой 16.

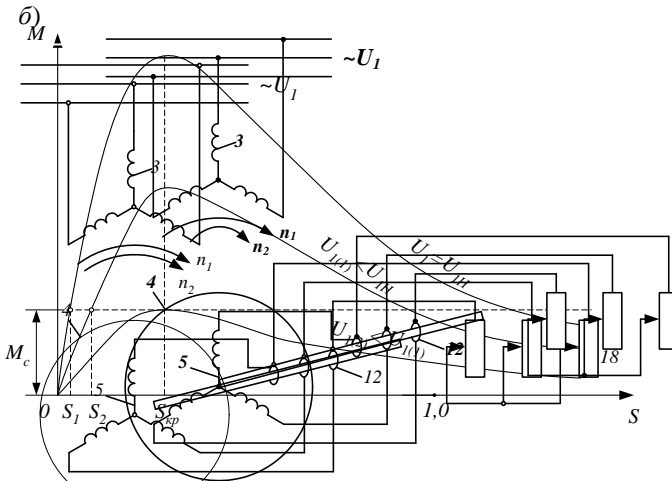
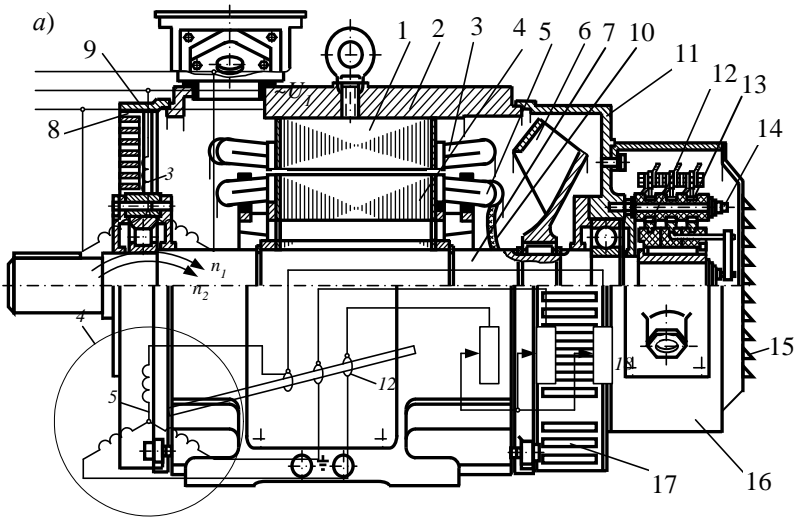
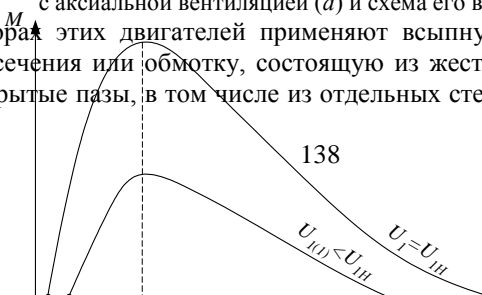


Рисунок 7.26 – Асинхронный двигатель с фазным ротором с аксиальной вентиляцией (а) и схема его включения (б)

В роторах этих двигателей применяют вспышную обмотку из провода круглого сечения или обмотку, состоящую из жестких секций, укладываемых в открытые пазы, в том числе из отдельных стержней, вкладываемых в



полузакрытые пазы с торца. Обмотку ротора при изготовлении соединяют в звезду. Три конца от фазных обмоток присоединяют к контактными кольцам, установленным на вал двигателя. С помощью щеток, касающихся контактных колец, к обмотке ротора подключается трехфазный пусковой или регулировочный реостат.

Реостат называется пусковым, если служит только для пуска двигателя и работает короткое время, или регулировочным, если работает длительное время и служит для регулирования частоты вращения двигателя. Пусковой реостат выполняется проводом меньшего сечения и допускает большую плотность тока, чем регулировочный реостат.

**Серии асинхронных двигателей (АД).** В настоящее время АД общего назначения выпускаются в виде серий. *Серия* – это ряд электрических машин, охватывающих определенные диапазоны мощностей, частот вращения и напряжения, имеющих однотипную конструкцию. В пределах серии характерны высокий уровень унификации деталей, узлов и их взаимозаменяемость. При серийном производстве удешевляется технология производства, уменьшается парк запасных частей.

В современных сериях размером, определяющим габарит машины, является высота оси вращения. За высоту оси вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины. С этим параметром жестко связана мощность, установочные и присоединительные размеры.

В 1970-е гг. промышленности освоила выпуск двигателей серии 4А в 17 габаритах с высотой оси вращения от 50 до 355 мм при 34 ступенях мощности от 0,06 до 400 кВт. В настоящее время двигатели серии 4А широко распространены. Они предназначены для работы в сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 220, 380 и 660 В при продолжительном режиме работы S1 (ГОСТ 183–74). Двигатели изготавливаются на синхронные частоты вращения от 3000 до 500 об/мин. Например, АДМ100L6:

- АДМ (а может быть 5АИ, АИР, А и т. п.) – это серия электродвигателя;
- 100 – габарит АД – расстояние от центра вала до опорной поверхности лап в миллиметрах;
- L – длина станины;
- 6 – количество пар полюсов, этот двигатель имеет частоты вращения вала 1000 оборотов в минуту (2 – 3000 об/мин, 4 – 1500 об/мин и т. д.).

В двигателях с высотами оси вращения от 50 до 132 мм применяется изоляция класса нагревостойкости В (130 °С), в остальных – F (155 °С).

В конце 80-х гг. XX в. был начат выпуск двигателей серии АИ, в которых применена более совершенная система вентиляции, широко используются более легкие и прочные алюминиевые сплавы и пластмассы, установлены подшипники с улучшенными виброакустическими характеристиками.

В сериях различают двигатели основного исполнения и с модификациями: повышенным скольжением, увеличенным пусковым моментом, многоскоростные.

Для перевода, замыкания и контроля положений острия стрелочного перевода используется стрелочный электропривод (рисунок 7.27). Электропривод редуктора может быть как асинхронный, как правило, серии АИР, так и постоянного тока серии МСП, МСТ или МСА.



Рисунок 7.27 – Пример стрелочного электропривода

### 7.2.2 Принцип действия асинхронного двигателя

Принцип действия асинхронного двигателя основан на двух законах электротехники: электромагнитной индукции и электромагнитных сил.

Закон электромагнитной индукции: если проводник перемещается относительно магнитного потока или поток перемещается относительно проводника, то магнитные линии потока пересекают проводник и в нем индуцируется ЭДС:

$$e_{\text{пр}} = Blv, \quad (7.44)$$

где  $B$  – магнитная индукция в месте нахождения проводника;

$l$  – активная длина проводника, т. е. длина проводника, пересекаемого магнитным потоком;

$v$  – линейная скорость перемещения проводника относительно потока или потока относительно проводника.

Направление индуцируемой ЭДС определяется по правилу правой руки.

Закон электромагнитных сил: на проводник с током, находящийся в магнитном потоке, действует электромагнитная сила:

$$F_{\text{пр}} = BIl, \quad (7.45)$$

где  $B$  – магнитная индукция;

- $l$  – активная длина проводника;
- $I$  – сила тока.

Направление силы определяется по правилу левой руки.

Выводы обмоток статора обозначаются буквой «С» и цифрой, которой пронумерованы начала и концы фаз: первая фаза – С1 и С4, вторая – С2 и С5, третья – С3 и С6.

В соответствии с международными стандартами в настоящее время выводы обозначают латинскими буквами: первая фаза обмотки статора – U, вторая – V, третья – W. Начало и конец фазы различаются цифрами 1 и 2, следующими за буквами (например, W1 и W2). На рисунке 7.28 приведен порядок соединения на клеммной панели двигателя выводов статорной обмотки при соединении фаз звездой и треугольником.

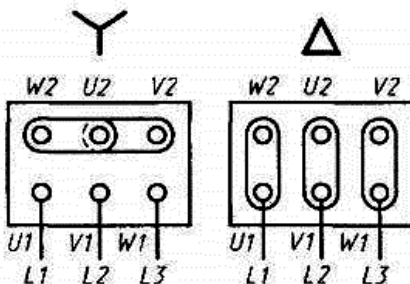


Рисунок 7.28 – Схема соединения статорной обмотки

Цветовые обозначения: первая фаза (A) – желтый (С1 или U1), вторая (B) – зеленый (С2 или V1), третья (C) – красный (С3 или W3).

*Создание вращающегося магнитного поля.* В пазах сердечника статора расположена трехфазная обмотка, каждая фаза которой в простейшем случае состоит из одного витка. Витки смещены в пространстве друг относительно друга на угол  $120^\circ$  (рисунок 7.29).

При подключении обмотки статора в сеть трехфазного тока в ее фазах появятся токи, сдвинутые (во времени) относительно друг друга на  $120^\circ$ . Ток каждой обмотки создает пульсирующий магнитный поток определенного направления, а совокупное действие этих магнитных потоков создает результирующее магнитное поле, вектор магнитной индукции которого с течением времени поворачивается в пространстве. Это результирующее магнитное поле называется вращающимся. Результирующий поток является постоянным по значению, но изменяющимся по направлению. Частота вращения магнитного потока статора (синхронная), об/мин,

$$n_1 = 60f_1 / p, \tag{7.46}$$

где  $f_1$  – частота переменного тока в сети;

$p$  – количество пар полюсов статорной обмотки.

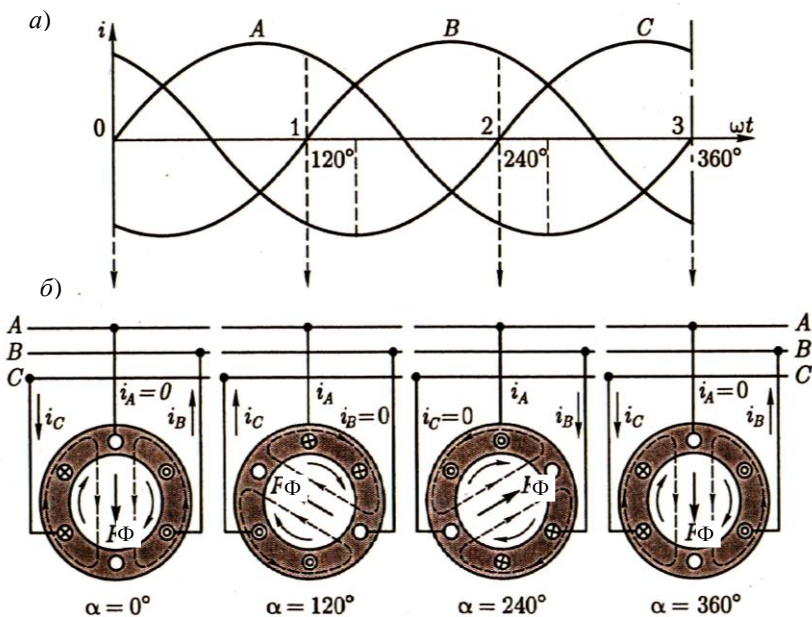


Рисунок 7.29 – Принцип получения вращающегося магнитного поля

Таким образом, для создания вращающегося магнитного поля необходимо наличие двух условий: наличие, как минимум, трех намагничивающих катушек, оси которых сдвинуты в пространстве, и питание этих катушек переменным током, сдвинутым во времени на некоторый угол.

Угловая скорость вращения магнитного поля

$$\omega_1 = \frac{2 \pi f_1}{p} \quad (7.47)$$

Если частота тока в обмотке статора  $f_1 = 50$  Гц, то вектор магнитной индукции вращается с частотой 50 об/с или 3000 об/мин. Анализ формул (7.46) и (7.47) показывает, что  $n_1$  и  $\omega_1$  не зависят от нагрузки. Увеличение числа пар полюсов приводит к уменьшению  $n_1$  и  $\omega_1$ , а увеличение частоты питающего напряжения – к их увеличению.

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в проводниках ротора ЭДС и по ним проходят токи, направление которых определяют по правилу правой руки (рисунок 7.30). При этом следует иметь в виду, что если магнитное поле вращается по часовой стрелке, то относительное направление вращения проводника ротора нужно принимать противоположным направлению движения часовой стрелки.

Взаимодействие магнитного поля статора и токов в роторе создает электромагнитные силы, направленные по правилу левой руки.

Суммарное усилие  $F_{\text{рез}}$ , приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент  $M$ , увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент превышает тормозной, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения  $n_2$  соответствует равенству электромагнитного момента  $M$  тормозному, приложенному к валу от рабочего механизма и внутренних сил трения. Такой режим работы асинхронной машины является двигательным и при нем  $0 \leq n_2 \leq n_1$ .

Относительную разность частот вращения магнитного поля статора и ротора называют скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad (7.48)$$

скольжение часто выражают в процентах:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \% \cdot \quad (7.49)$$

Для двигательного режима  $0 \leq s \leq 1$ .

При номинальной нагрузке скольжение обычно находится в пределах 0,015–0,03 или 1,5–3 %; при холостом ходе оно составляет доли процента. Поэтому частота вращения ротора близка к частоте вращения магнитного поля статора и мало изменяется при возрастании нагрузки.

При неподвижном роторе скольжение достигает максимального значения ( $s = 1$ ), так как  $n_2 = 0$ , а магнитное поле статора вращается с частотой  $n_1$ . Такой режим всегда возникает при включении машины. В первый момент, после подачи напряжения на статорную обмотку двигателя, магнитное поле статора, как практически безинерционная величина, начинает вращаться сразу с частотой  $n_1$ . Ротор двигателя, как механическая система, обладает определенным моментом инерции и не может мгновенно разогнаться до частоты вращения  $n_2$ . Поэтому при включении  $n_2 = 0$ , а  $s = 1$ .

Как следует из формулы (7.48), для частоты вращения ротора

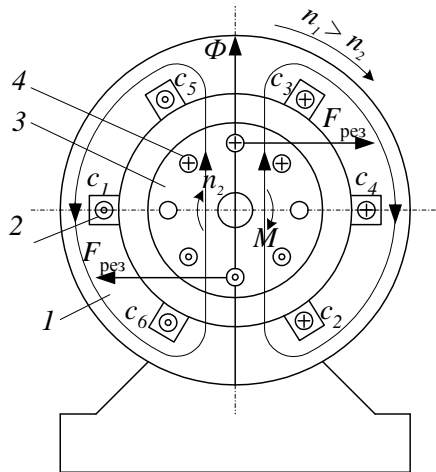


Рисунок 7.30 – Электромагнитная схема асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1 (1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s). \quad (7.50)$$

Асинхронная машина кроме двигательного режима может работать также в генераторном и в режиме электромагнитного тормоза. Генераторный режим возникает в том случае, когда ротор с помощью постороннего двигателя вращается в направлении вращения поля статора с частотой  $n_2$ , большей чем  $n_1$ . Скольжение в этом режиме отрицательно. Теоретически можно как угодно увеличивать частоту вращения ротора  $n_2$  относительно вращающегося магнитного поля. Поэтому работа асинхронной машины в генераторном режиме соответствует скольжению в пределах от 0 до  $-\infty$ . Если ротор под действием посторонних сил начнет вращаться в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля, то возникнет режим электромагнитного тормоза. Так как частота вращения ротора в этом режиме отрицательна, то, согласно (7.48),  $s > 1$ . Режим электромагнитного тормоза начинается при  $n_2 = 0$  и может продолжаться теоретически до  $n_2 = -\infty$ , поэтому скольжение находится в пределах от 1 до  $+\infty$ .

Таким образом, скольжение асинхронной машины может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ . На рисунке 7.31 даны пределы изменения скольжения, а также показаны направления вращения ротора и магнитного поля при различных режимах работы машины.

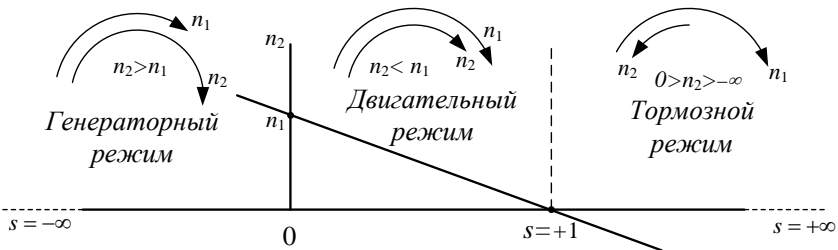


Рисунок 7.31 – Изменение частоты вращения ротора при работе асинхронной машины в различных режимах

Асинхронный двигатель имеет следующие номинальные данные, которые указаны на прикрепленной к корпусу двигателя табличке:

- 1 Номинальная мощность – это номинальная механическая мощность на валу.
- 2 Линейное напряжение обмотки статора. Обычно в виде дроби указываются два напряжения, отличающиеся друг от друга в  $\sqrt{3}$  раз. При большем напряжении сети обмотка соединяется по схеме «звезда», а при меньшем – по схеме «треугольник».



3 Линейные токи также указываются в виде дроби – при соединении обмотки по схеме звезда и треугольник.

4 Частота вращения ротора.

5 Коэффициент мощности.

6 Коэффициент полезного действия.

**Асинхронный двигатель при неподвижном роторе.** Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Обмотку статора асинхронного двигателя можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а обмотку ротора – как вторичную.

Если к обмотке статора двигателя подвести напряжение сети  $U_1$ , а обмотку ротора разомкнуть, что можно сделать в двигателе с фазным ротором путем подъема щеток, то вращающееся магнитное поле статора, пересекая неподвижные обмотки статора и ротора, будет индуцировать в них соответственно ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ :

$$\begin{cases} E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_m ; \\ E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{o2} \Phi_m , \end{cases} \quad (7.51)$$

где  $E_1, E_2$  – ЭДС обмоток фаз статора и ротора, В;

$f_1$  – частота тока сети, Гц;

$w_1$  и  $w_2$  – числа витков обмоток фаз статора и ротора;

$k_{o1}$  и  $k_{o2}$  – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора;

$\Phi_m$  – максимальное значение основного магнитного потока, Вб.

Отношение ЭДС

$$E_1 / E_2 = w_1 k_{o1} / (w_2 k_{o2}) = k_e \quad (7.52)$$

называют коэффициентом трансформации ЭДС. В отличие от коэффициента трансформации обычного трансформатора коэффициент  $k_e$  асинхронного двигателя зависит и от обмоточных коэффициентов, которые учитывают пространственное распределение обмоток.

Режим работы асинхронного двигателя без нагрузки называют режимом холостого хода. Этот режим аналогичен режиму холостого хода трансформатора, но ток холостого хода  $I_0$  асинхронного двигателя, из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором, значительно больше, чем в трансформаторе (20–40 % от номинального по сравнению с 2–5 % у трансформатора), вследствие чего здесь нельзя пренебрегать падениями напряжения  $\underline{L}_0 r_1$  и  $j \underline{L}_0 x_1$  и пользоваться приближенным уравнением  $\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = 0$ , как это делают при построении векторной диаграммы трансформатора для режима холостого хода. Как и в трансформаторе, активная составляющая

тока холостого хода у асинхронного двигателя  $I_{0a} \ll I_0$ , поэтому  $I_0 \approx I_\mu$ , где  $I_\mu$  – намагничивающий ток, создающий магнитный поток в двигателе.

Для неподвижного (заторможенного) короткозамкнутого ротора номинальном напряжении ЭДС вызывает большой ток, подобно короткому замыканию трансформатора. Этот режим называют коротким замыканием асинхронного двигателя.

При коротком замыкании обычно можно пренебречь током намагничивания, так как он относительно мал. В этом случае с учетом МДС обмоток статора и ротора

$$F_1 / F_2 = m_1 w_1 k_{o1} I_1 / m_2 w_2 k_{o2} I_2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – число фаз обмоток статора и ротора.

Коэффициент трансформации токов

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}} = \frac{m_1}{m_2} k_e.$$

Относительно большой ток холостого хода в АД является одним из главных недостатков, так как вызывает увеличение потерь в обмотке статора (особенно в небольших машинах) и уменьшение коэффициента мощности, особенно при малых нагрузках двигателя. Для уменьшения тока холостого хода заводы-изготовители стремятся выполнить в асинхронных двигателях минимально возможные по соображениям конструкции и технологии зазоры. Так, например, у двигателей мощностью 5 кВт и менее зазор между статором и ротором обычно равен 0,2–0,3 мм.

**Асинхронный двигатель при вращающемся роторе.** Если к статорной обмотке ненагруженного двигателя подвести номинальное напряжение, то его ротор будет вращаться вхолостую.

Ротор вращается в сторону вращения магнитного поля статора с частотой  $n_2 < n_1$ . Поэтому частота вращения магнитного поля статора относительно ротора

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (7.53)$$

Вращающийся магнитный поток статора, обгоняя ротор, индуцирует в нем ЭДС и токи с частотой

$$f_{2s} = p n_s / 60 = p(n_1 - n_2) / 60. \quad (7.54)$$

Учитывая, что  $p n_1 / 60 = f_1$  и  $(n_1 - n_2) / n_1 = s$ , представим (7.54) в следующем виде:

$$f_{2s} = p n_1 (n_1 - n_2) / 60 n_1 = f_1 s. \quad (7.55)$$

В связи с изменением частоты тока в роторе изменяются и все зависящие от частоты величины: ЭДС, индуктивное сопротивление, ток.

ЭДС фазы вращающегося ротора

$$E_{2s} = 4,44 f_{2s} w_2 k_{o2} \Phi_m = (4,44 f_1 w_2 k_{o2} \Phi_m) s = E_2 s, \quad (7.56)$$

где  $E_2$  – ЭДС фазы неподвижного ротора, когда  $s = 1$  и  $f_{2s} = f_1$ .

Индуктивное сопротивление фазы вращающегося ротора

$$x_{2s} = 2\pi f_{2s} L_2 = (2\pi f_1 L_2) s = x_2 s, \quad (7.57)$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление фазы неподвижного ротора.

Ток вращающегося ротора

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}}, \quad (7.58)$$

где  $r_2$  – активное сопротивление фазы ротора.

Величина  $r_2$  у обычных двигателей практически не зависит от частоты тока в роторе, поэтому у вращающегося ротора она такая же, как и у неподвижного.

Разделив числитель и знаменатель (7.58) на скольжение  $s$ , получим

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_2^2}}. \quad (7.59)$$

Токи, полученные по формулам (7.58) и (7.59), имеют одинаковое значение. Однако между этими токами имеется принципиальное различие. Если ток  $I_{2s}$  обусловлен ЭДС  $E_{2s}$  и имеет частоту  $f_{2s} = f_1 s$ , то ток  $I_2$  обусловлен ЭДС  $E_2$  с частотой, равной  $f_1$ . Следовательно, ток  $I_{2s}$  является током во вращающемся роторе, а ток  $I_2$  – в эквивалентном неподвижном.

Таким образом, режим асинхронного двигателя с вращающимся ротором приводится к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. В данном случае АД можно заменить неким трехфазным трансформатором и по аналогии с ним вторичную обмотку двигателя (роторную) можно привести к первичной, а все приведенные параметры обозначить штрихами. Тогда приведенный ток фазы ротора эквивалентного неподвижного двигателя

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{E}'_2}{\frac{r'_2}{s} + jx'_2}. \quad (7.60)$$

Приведение роторной обмотки осуществляется к числу витков и числу фаз статорной обмотки. При приведении магнитный поток машины и полная роторная МДС остаются без изменений, т. е.

$$I'_2 = \frac{m_2 w_2 k_{o2}}{m_1 w_1 k_{o1}} I_2, \quad E'_2 = \frac{w_2 k_{o2}}{w_1 k_{o1}} E_2.$$

Процессы, протекающие в асинхронном двигателе с эквивалентным неподвижным ротором, описываются системой уравнений, подобной системе уравнений для трансформатора, если первичной обмоткой считать обмотку статора, а вторичной – обмотку ротора.

Уравнение равновесия напряжений в обмотке статора

$$\underline{U}_1 = (-\underline{E}_1) + \underline{I}_1 \underline{z}_1, \quad (7.61)$$

где  $\underline{U}_1$  – напряжение, подводимое к фазной обмотке статора;

$\underline{E}_1$  – ЭДС, наводимая в фазной обмотке статора;

$\underline{I}_1$  – фазный ток обмотки статора;

$\underline{z}_1$  – комплексное сопротивление фазной обмотки статора ( $\underline{z}_1 = r_1 + j x_1$ ).

Поскольку обмотка ротора при работе АД замкнута накоротко, то напряжение на зажимах ротора  $\underline{U}'_2 = 0$ , а ЭДС  $\underline{E}'_2$ , согласно выражению (7.60),

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 \left( \frac{r'_2}{s} + j x'_2 \right). \quad (7.62)$$

Величину  $r'_2/s$  можно представить как

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (7.63)$$

Тогда выражение (7.62) получит вид:

$$\begin{cases} \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 (r'_2 + j x'_2) = \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}; \\ \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2 = \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}, \end{cases} \quad (7.64)$$

где  $\underline{z}'_2$  – комплекс полного приведенного сопротивления фазной обмотки ротора.

Так же как и для трансформатора, для асинхронного двигателя можно начертить диаграмму его МДС, которая подобна диаграмме МДС трансформатора с той лишь разницей, что векторы МДС в двигателе вращаются в пространстве с частотой  $n_1$ .

Результирующая МДС асинхронного двигателя  $I_0 w_1$  и создаваемый ею результирующий магнитный поток  $\Phi$ , как и в трансформаторе, будут постоянными при любой нагрузке и неизменных напряжениях  $U_1$  и частоте сети  $f_1$ .

По аналогии с трансформатором для приведенного асинхронного двигателя уравнение токов имеет вид:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \quad (7.65)$$

Основные уравнения приведенного асинхронного двигателя могут быть представлены в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = (-\underline{E}_1) + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \\ \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2 = \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}; \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{array} \right. \quad (7.66)$$

На основе (7.66) представлена векторная диаграмма асинхронного двигателя при нагрузке (рисунок 7.32). Методика ее построения такая же, как и у трансформатора.

На векторной диаграмме угол  $\varphi_1$  между векторами  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$  при нагрузке значительно меньше угла  $\varphi_0$  между соответствующими векторами при холостом ходе, а значит  $\cos\varphi_1$  значительно выше  $\cos\varphi_0$ . Отсюда следует, что ненагруженные асинхронные двигатели значительно ухудшают коэффициент мощности в сети, поэтому нужно стремиться к их полной загрузке.

Реактивная составляющая тока  $I_0$  является намагничивающей, так как она создает поток  $\Phi$ . Другая составляющая  $I_{0a}$  вызывается магнитными потерями в стали статора, возникающими от магнитного потока  $\Phi$ .

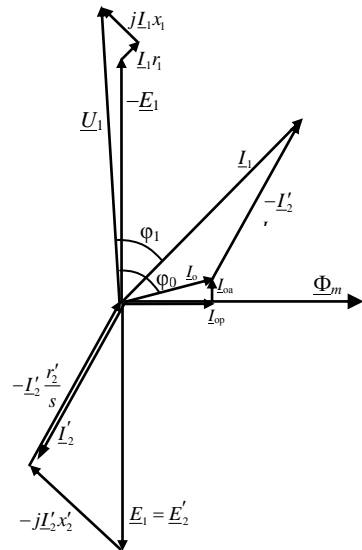


Рисунок 7.32 – Векторная диаграмма АД при нагрузке

### 7.2.3 Схемы замещения асинхронного двигателя

Для расчета характеристик асинхронного двигателя и исследования различных режимов его работы удобно использовать схемы замещения. При этом реальная асинхронная машина с электромагнитными связями между обмотками заменяется относительно простой электрической цепью, что позволяет существенно упростить расчет характеристик.

С учетом того, что основные уравнения асинхронного двигателя (7.66) аналогичны таким же уравнениям трансформатора (7.60), схема замещения будет иметь вид, представленный на рисунке 7.33, где  $r_1$  и  $x_1$  – активное и

индуктивное сопротивление фазной обмотки статора;  $r'_2$  и  $x'_2$  – приведенные активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора.

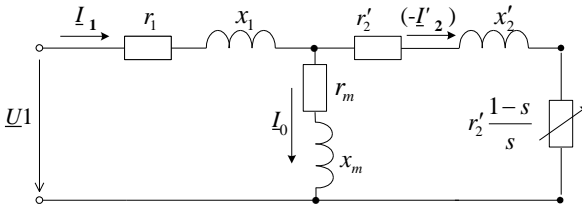


Рисунок 7.33 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Сопротивление  $\underline{z}_m = r_m + jx_m$  определяет параметры намагничивающей ветви схемы. Индуктивная составляющая  $x_m$  является индуктивным сопротивлением взаимной индукции. Посредством сопротивления  $r_m$  учитываются магнитные потери в стали статора  $[r_m = \Delta P_M / (m_1 I_0^2)]$ . Как и в трансформаторе, сопротивление  $\underline{z}_m$  зависит от подведенного напряжения  $U_1$ . С повышением  $U_1$  сопротивление  $\underline{z}_m$  уменьшается.

При расчете характеристик асинхронного двигателя с использованием схемы замещения ее параметры должны быть известны. Схема рисунка 7.33 полностью отражает физические процессы, происходящие в двигателе, но имеет узловую точку между сопротивлениями  $x_1$  и  $r'_2$ , что усложняет расчет токов при различных значениях скольжения. Поэтому большое практическое применение для анализа режимов работы асинхронных машин находит другая схема замещения, в которой намагничивающая ветвь подключена непосредственно на входе схемы, куда подводится напряжение  $U_1$  (рисунок 7.34). Данная схема называется Г-образной схемой замещения.

На рисунке 7.34, а комплексный коэффициент

$$\underline{C}_1 = 1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_m} \quad \text{или} \quad C_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}.$$

Так как  $x_1 \gg x_m$ , то  $C_1$  незначительно больше единицы ( $C_1 \approx 1,02 \dots 1,03$ ).

Если пренебречь коэффициентом  $\underline{C}_1$ , то получим упрощенную Г-образную схему замещения (рисунок 7.34, б), которую используют при практических расчетах асинхронных двигателей средних и больших мощностей. При этом погрешность в расчете не превышает 1–5 %. Коэффициент  $\underline{C}_1$  учитывается при расчете точных расчетов машин большой мощности.

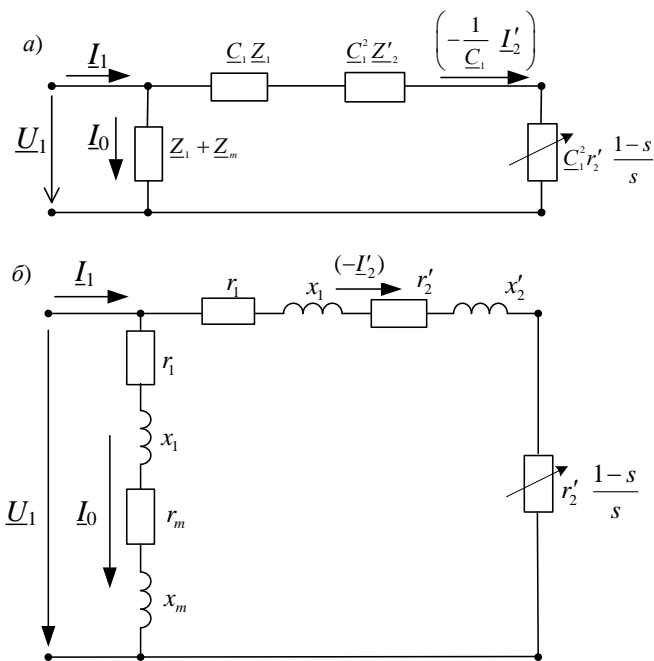


Рисунок 7.34 – Г-образная схема замещения асинхронного двигателя (а) и ее упрощенный вариант (б)

Согласно (7.63) активное сопротивление обмотки ротора двигателя разбито на две части:  $r'_2$  и  $r'_2(1-s)/s$ . Первое сопротивление не зависит от режима работы, и потери в нем равны электрическим потерям реального ротора. Второе сопротивление зависит от скольжения, и мощность, выделяемая в нем, численно равна механической мощности двигателя  $P_{\text{мех}}$ . Следовательно, сопротивление и  $r'_2(1-s)/s$  в схеме замещения выполняет роль нагрузки двигателя.

Из упрощенной Г-образной схемы замещения можно определить приведенный ток роторной обмотки

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (7.67)$$

В дальнейшем формула (7.67) будет использоваться при выводе уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя.

## 7.2.4 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Процесс преобразования электрической энергии, подведенной к двигателю из сети, в механическую, снимаемую с вала машины, сопровождается потерями. Наглядное представление о распределении подведенной к двигателю мощности дает энергетическая диаграмма (рисунок 7.35).

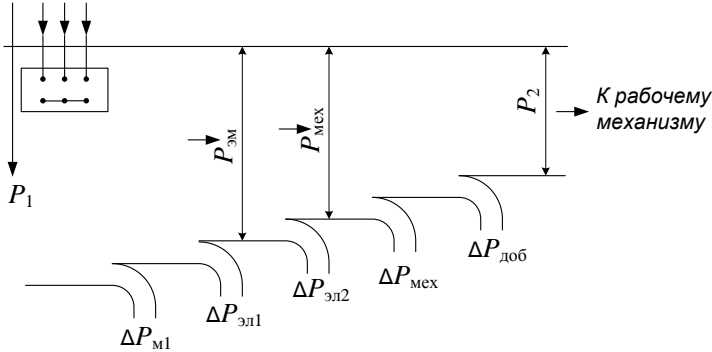


Рисунок 7.35 – Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

К асинхронному двигателю из сети подводится активная мощность

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\text{лн}} I_{\text{лн}} \cos \varphi_1. \quad (7.68)$$

Часть этой мощности затрачивается на магнитные потери в стали статора  $\Delta P_{\text{м1}}$  и электрические потери в обмотке статора  $\Delta P_{\text{эл1}}$ :

$$\Delta P_{\text{эл1}} = 3 I_{1\phi}^2 r_1'. \quad (7.69)$$

Остальная мощность электромагнитным путем передается на ротор и называется электромагнитной мощностью

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{м1}} - \Delta P_{\text{эл1}} = 3 I_{2\phi}^2 \frac{r_2'}{s}. \quad (7.70)$$

Частично  $P_{\text{эм}}$  расходуется на потери в обмотке ротора  $\Delta P_{\text{эл2}}$ ,

$$\Delta P_{\text{эл2}} = 3 I_{2\phi}^2 r_2'. \quad (7.71)$$

Магнитные потери в роторе из-за небольшой частоты перемагничивания становятся  $[f_{2s} \approx f_1 s = (0,5...2) \text{ Гц}]$  достаточно малы, что обычно позволяет не учитывать их при расчете.

$P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{эл2}} = P_{\text{мех}}$  представляет собой полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность  $P_2$ , снимаемая с вала двигателя, меньше  $P_{\text{мех}}$  на значение потерь внутри машины в виде механических  $\Delta P_{\text{мех}}$  (трение в подшипниках, вентиляция) и добавочных потерь  $\Delta P_{\text{доб}}$ , возникающих при нагрузке:

$$P_2 = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{доб}}. \quad (7.72)$$



Добавочные потери являются следствием наличия высших гармоник в магнитном поле из-за зубчатого строения статора и ротора и высших гармоник МДС. Данные потери трудно поддаются расчету и экспериментальному определению. Они обычно принимаются равными 0,5 % подводимой мощности при номинальной нагрузке. При других нагрузках эти потери пропорциональны квадрату тока статора.

КПД асинхронных двигателей достаточно высокий – от 0,7 до 0,95. Он рассчитывается по формулам

$$\eta = P_2 / P_1, \text{ или } \eta = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1}, \quad (7.73)$$

где  $\Sigma \Delta P$  – суммарные потери,  $\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}$ .

### 7.2.5 Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Из энергетической диаграммы следует, что

$$P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{эл2}}. \quad (7.74)$$

Учитывая, что  $P_{\text{эм}} = M \omega_1$ ,  $P_{\text{мех}} = M \omega_2$ , а  $\Delta P_{\text{эл2}} = 3I_2'^2 r_2'$ , имеем

$$M (\omega_1 - \omega_2) = 3I_2'^2 r_2', \quad (7.75)$$

где  $M$  – электромагнитный момент асинхронного двигателя;

$\omega_1$  – угловая скорость вращения магнитного поля статора;

$\omega_2$  – угловая скорость вращения ротора.

Умножив и разделив левую часть выражения (7.75) на  $\omega_1$ , получим

$$M \omega_1 \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \right) = M \omega_1 s = 3I_2'^2 r_2'. \quad (7.76)$$

Из выражения (7.76) определяем момент:

$$M = \frac{3I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s}. \quad (7.77)$$

В формулу (7.77) подставляем ток  $I_2'$  (7.67) из Г-образной схемы замещения. Окончательно уравнение электромагнитного момента получаем в следующем виде:

$$M = \frac{3 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (7.78)$$

где  $U_1$  – фазное напряжение обмотки статора;  $\omega_1 = 2 \pi f_1 / p$ .

Из формулы (7.78) можно сделать основной вывод: электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети, подводимого к статорной обмотке:  $M \equiv U_1^2$ , т. е. асинхронные двигатели чувствительны к колебаниям напряжения в сети, что является их недостатком.

Если принять, что параметры машины являются постоянными, то момент, определяемый по формуле (7.78), при  $U_1 = \text{const}$  является функцией только скольжения  $s$ . Поэтому данная формула удобна для построения механической характеристики машины  $M = f(s)$ .

Выявим характер изменения зависимости  $M = f(s)$  от скольжения.

Анализ показывает, что при  $s = 0$   $M = 0$ , при  $s = \pm \infty$   $M = 0$ . Следовательно, функция имеет максимум, для нахождения которого берем

$$\frac{dM}{ds} = 0. \quad (7.79)$$

Из условия (7.79) определяется критическое скольжение  $s_{\text{кр}}$ , при котором момент  $M_{\text{макс}}$  будет максимальным.

Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}, \quad (7.80)$$

максимальный (критический) момент

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{3 U_1^2}{2 \omega_1 (x_1 + x_2')}, \quad (7.81)$$

где знак плюс соответствует работе машины в двигательном или тормозном режиме, а знак минус – в режиме генератора.

Из выражения (7.81) следует, что максимальный момент  $M_{\text{макс}}$  не зависит от активного сопротивления обмотки ротора  $r_2'$ , однако, это сопротивление оказывает влияние на скольжение  $s_{\text{кр}}$ , при котором асинхронная машина развивает максимальный момент.

Анализ (7.78) также показывает, что при малых скольжениях ( $s \ll 1$ ) можно пренебречь в знаменателе всеми слагаемыми, кроме  $(r_2'/s)^2$ . Тогда получим:

$$M \approx \frac{3 U_1^2}{\omega_1 r_2'} s, \quad (7.82)$$

т. е. момент пропорционален скольжению и зависимость  $M = f(s)$  имеет линейный характер. При скольжениях близких к единице или более можно пренебречь активными сопротивлениями обмоток  $r_1$  и  $r_2'$  по сравнению с их индуктивными сопротивлениями  $x_1$  и  $x_2'$ . Тогда

$$M \approx \frac{3 U_1^2 r_2'}{\omega_1 (x_1 + x_2')^2} \frac{1}{s}. \quad (7.83)$$

Отсюда следует, что при больших скольжениях момент обратно пропорционален скольжению и кривая  $M = f(s)$  имеет гиперболический характер. При изменении скольжения в широких пределах и при  $U_1 = \text{const}$  кривая  $M = f(s)$  имеет вид, изображенный на рисунке 7.36. Столь сложный характер кривой объясняется аналогичным характером изменения активной составляющей тока ротора. С увеличением скольжения активная составляющая тока ротора сначала растет, а затем вследствие увеличения частоты  $f_{2s}$ , которая равна  $f_{2s} = f_1 s$ , индуктивное сопротивление ротора возрастает, угол  $\psi_2$  увеличивается и активная составляющая тока начинает уменьшаться, несмотря на увеличение всего тока ротора.

На рисунке 7.36 зависимость  $M = f(s)$ , называемая механической характеристикой, построена для трех возможных режимов работы асинхронной машины. На механической характеристике показаны наиболее важные точки (0, 1, 2, 3), соответствующие двигательному режиму асинхронной машины. Нормальная работа двигателя протекает на прямолинейной части характеристики. Здесь находится точка 1, соответствующая номинальному моменту. Скольжение при этом моменте называется номинальным и составляет  $s_n = 0,015 \dots 0,05$ ,  $s_n < s_{кр}$ , обычно  $s_{кр} = 0,08 \dots 0,25$ . Участок 0–2 является участком устойчивой работы двигателя, но длительная работа двигателя должна быть только на участке 0–1. Для участка устойчивой работы 0–2

выполняется условие  $\frac{dM}{ds} > 0$ .

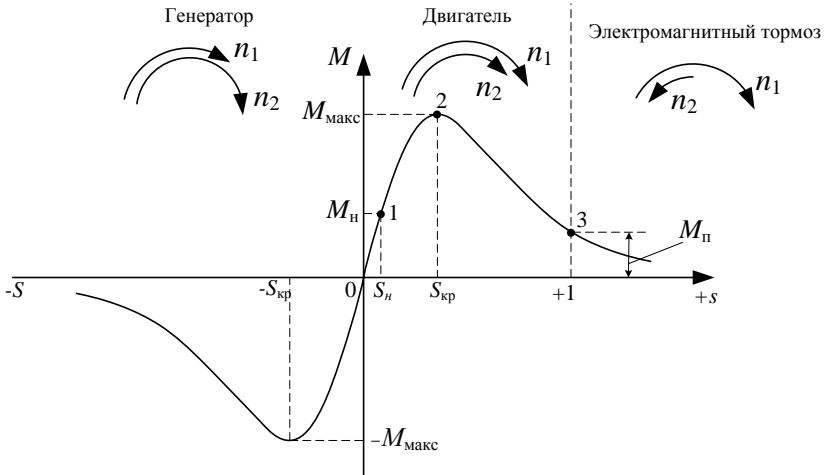


Рисунок 7.36 – Зависимость  $M = f(s)$  для асинхронной машины

Пусть под действием возросшего момента сопротивления  $M_c$  частота вращения ротора  $n_2$  уменьшилась. Следовательно, скольжение  $s$  увеличится и рабочая точка окажется правее исходной, например, точки 1. Если внешнее воздействие исчезнет, то под действием увеличенного момента ротор увеличит частоту вращения, скольжение уменьшится и произойдет переход снова в точку 1.

Участок 2–3 является неустойчивым участком механической характеристики, для него выполняется условие  $\frac{dM}{ds} < 0$ .

Если под действием внешнего воздействия  $M_c > M_{\max}$ , то рабочая точка будет правее точки 2, момент  $M$  уменьшится и произойдет лавинообразный спад  $n_2$  до полной остановки двигателя (точка 3,  $n_2 = 0$ ). При этом ток статорной обмотки  $I_1$  окажется намного больше номинального  $I_{1н}$ , поэтому двигатель необходимо срочно отключить от сети. С учетом отмеченного, участок 2–3 является неустойчивым участком механической характеристики.

Пуск двигателя возможен, если момент сопротивления на валу двигателя  $M_c$  будет меньше пускового момента  $M_n$ . При пуске  $n_2 = 0$ ,  $s = 1$ ,  $f_{2s} = f_1 = 50$  Гц (точка 3 характеристики), индуктивное сопротивление  $x_{2s}$  ротора имеет максимальное значение, угол  $\psi_2$  между векторами  $\underline{E}'_2$  и  $\underline{I}'_2$  наибольший, а  $\cos\psi_2$  наименьший, поэтому и пусковой момент  $M_n$  невелик.

При разгоне двигателя частота тока в роторе  $f_{2s} = f_1 s$  уменьшается, вследствие чего снижается его индуктивное сопротивление, что приводит к уменьшению угла  $\psi_2$ , увеличению  $\cos\psi_2$  и возрастанию момента. Пусковые свойства двигателя характеризуются кратностью пускового момента:

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{H}}. \quad (7.84)$$

Для двигателей нормального исполнения мощностью до 100 кВт  $k_{\Pi} = 0,9 \dots 1,5$ , причем для двигателей меньшей мощности это отношение больше.

Перегрузочная способность двигателя оценивается кратностью максимального момента:

$$k_{M} = \frac{M_{\max}}{M_{H}}. \quad (7.85)$$

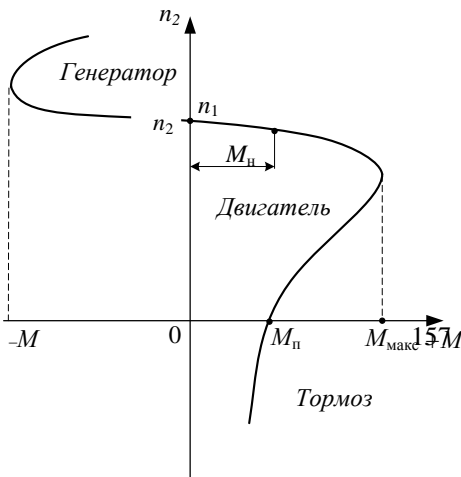
Для асинхронных двигателей нормального исполнения  $k_{M} = 1,7 \dots 3,4$ . Более высокие значения  $k_{M}$  соответствуют двигателям с меньшим числом полюсов.

Механическую характеристику асинхронной машины можно представить также в виде зависимости  $n_2 = f(M)$ , которую легко получить, определив по скольжению  $s$  частоту вращения ротора  $n_2 = n_1 (1 - s)$ . Зависимость  $n_2 = f(M)$  для всех трех режимов работы асинхронной машины представлена на рисунке 7.37, откуда видно, что асинхронные двигатели имеют на рабочем участке (до  $M_{H}$ ) жесткую механическую характеристику, при которой частота вращения ротора мало изменяется при увеличении нагрузки.

В двигательном режиме асинхронной машины момент  $M$  положителен, в генераторном – отрицателен, является тормозным. В генераторном режиме асинхронная машина отдает в сеть активную энергию, беря из сети намагничивающую составляющую тока

для создания вращающегося магнитного поля.

Как уже отмечалось,  $S_{кр}$  у асинхронного двигателя зависит от активного сопротивления фазы роторной обмотки, а  $M_{\max}$  от этого сопротивления не зависит [уравнения (7.80) и (7.81)]. Отмеченное имеет особое значение



для двигателей с фазным ротором, когда при пуске в цепь ротора включается пусковой реостат. При этом можно добиться, чтобы при пуске двигатель развивал момент  $M_{п}$ , равный мак-симальному.

Тогда

$$s_{кр} = \frac{r'_2 + r'_{пуск}}{x_1 + x'_2} = 1, \quad (7.86)$$

Рисунок 7.37 – Механическая характеристика  $n_2 = f(M)$  асинхронной машины

$$\text{откуда } r'_{пуск} = x_1 + x'_2 - r'_2, \quad (7.87)$$

где  $r'_{пуск}$  – приведенное сопротивление пускового реостата.

На рисунке 7.38 представлены зависимости  $M = f(s)$  при различных значениях активного сопротивления роторной цепи, откуда видно, что с увеличением активного сопротивления роторной цепи  $r'_2 + r'_d$  ( $r'_d$  – приведенное добавочное сопротивление, включаемое в роторную цепь) максимум момента смещается в область больших скольжений, сохраняя при этом свое значение. При  $r'_d = r'_{пуск} = (x_1 + x'_2) - r'_2$ , имеем  $M_{п} = M_{макс}$ .

Часто при проектировании электропривода известны только каталожные данные асинхронного двигателя. Но для решения ряда вопросов необходимо также иметь его механическую характеристику. Последнюю получают по упрощенным формулам М. Клосса:

$$M = \frac{2M_{макс}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (7.88)$$

$$s_{кр} = s_n \left( k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right). \quad (7.89)$$

Подставляя в формулу (7.89) различные значения скольжения  $s$ , можно получить соответствующие им значения моментов и построить кривую  $M = f(s)$ .

Данные формулы находят применение в расчетной практике, они справедливы при постоянных параметрах машины.

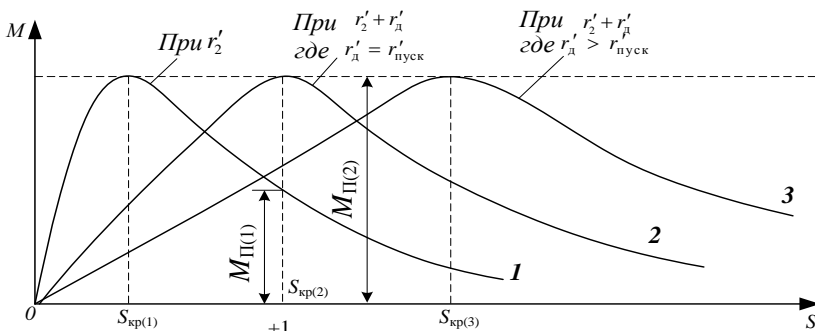


Рисунок 7.38 – Зависимости  $M = f(s)$  при различных значениях сопротивления пускового реостата

В соответствии с выражением (7.96) максимальный момент пропорционален квадрату приложенного к статору напряжения. Поэтому снижение  $U_1$  приводит к значительному уменьшению  $k_m$ . Например, если  $U_1$  понизится на 25 %, т. е.  $U_1 = 0,75 U_{1н}$ , то при этом  $k_m$  будет составлять  $0,75^2 \approx 0,56$  кратности при  $U_1 = U_{1н}$ . Допустим, что при  $U_1 = U_{1н}$   $k_m = 1,7$ , тогда при  $U_1 = 0,75 U_{1н}$  будем иметь  $k_m = 1,7 \cdot 0,56 = 0,95$ . Следовательно, при таком снижении напряжения двигатель не сможет работать с номинальным моментом, поэтому зависимость  $M \equiv U_1^2$  является недостатком асинхронного двигателя.

Если при снижении напряжения  $U_1$  на зажимах клеммной коробки АД момент сопротивления на валу  $M_c$  остается прежним, то уменьшится момент  $M$  и при  $M < M_c$  обороты двигателя начнут уменьшаться, скольжение  $s$  будет возрастать, будет увеличиваться и частота тока ротора ( $f_{2s} = f_1 s$ ). С уменьшением частоты вращения ротора начнет возрастать электромагнитный момент до такого положения, при котором наступит равенство  $M = M_c$ , но уже при пониженных оборотах.

### 7.2.6 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 опытно-исследовательском исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров. Этот метод обычно применяется для двигателей малой и средней мощности. С ростом мощности двигателя усложняется задача его нагрузки, растут непроизводительный расход электроэнергии и загрузка электросети. Широкое

применение получил метод, заключающийся в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания [18].

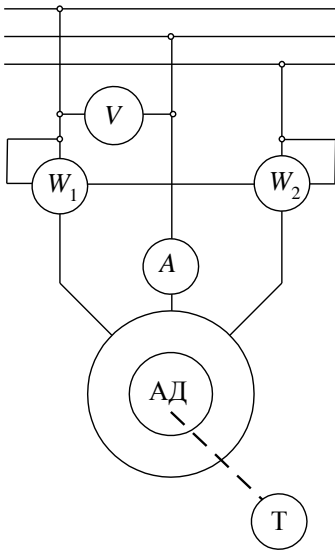


Рисунок 7.39 – Схема для определения экспериментальных характеристик АД

определяющий мощность  $P_2$ , снимаемую с вала двигателя, так как

$$P_2 = M_2 \omega_2. \quad (7.91)$$

Момент  $M_0$  относительно мал, поэтому можно принять, что  $M \approx M_2$ .

Зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta$  и  $P_1$  от  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$  называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Их примерный вид показан на рисунке 7.40.

При холостом ходе, когда  $P_2 = 0$  и  $M_2 = 0$ , ток  $I_1$  равен току холостого хода  $I_0$ . Как и у трансформатора, этот ток фактически является намагничивающим и создает основное магнитное поле.

Мощность  $P_{10}$ , потребляемая двигателем из сети при холостом ходе, расходуется на потери внутри машины: механические потери  $\Delta P_{\text{мех}}$ , магнитные потери в стали статора  $\Delta P_{\text{м1}}$ , электрические потери в обмотке статора от тока  $I_0$ .

Схема для снятия рабочих характеристик АД приведена на рисунке 7.39. На ней Т – тормозное устройство, назначение которого создавать регулируемый тормозной момент и определять нагрузку на валу двигателя.

В качестве тормозного устройства используется генератор постоянного тока или электромагнитный тормоз. Частота вращения двигателя измеряется тахометром. Ток в фазе обмотки статора определяется по амперметру, а мощность – по ваттметру.

При увеличении нагрузочного момента соответственно увеличивается электромагнитный момент, создаваемый двигателем:

$$M = M_0 + M_2, \quad (7.90)$$

где  $M_0$  – момент, обусловленный механическими и добавочными потерями в двигателе;

$M_2$  – механический момент на валу,

определяющий мощность  $P_2$ , снимаемую с вала двигателя, так как

$$P_2 = M_2 \omega_2. \quad (7.91)$$

Момент  $M_0$  относительно мал, поэтому можно принять, что  $M \approx M_2$ .

Зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta$  и  $P_1$  от  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$  называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Их примерный вид показан на рисунке 7.40.

При холостом ходе, когда  $P_2 = 0$  и  $M_2 = 0$ , ток  $I_1$  равен току холостого хода  $I_0$ . Как и у трансформатора, этот ток фактически является намагничивающим и создает основное магнитное поле.

Мощность  $P_{10}$ , потребляемая двигателем из сети при холостом ходе, расходуется на потери внутри машины: механические потери  $\Delta P_{\text{мех}}$ , магнитные потери в стали статора  $\Delta P_{\text{м1}}$ , электрические потери в обмотке статора от тока  $I_0$ .



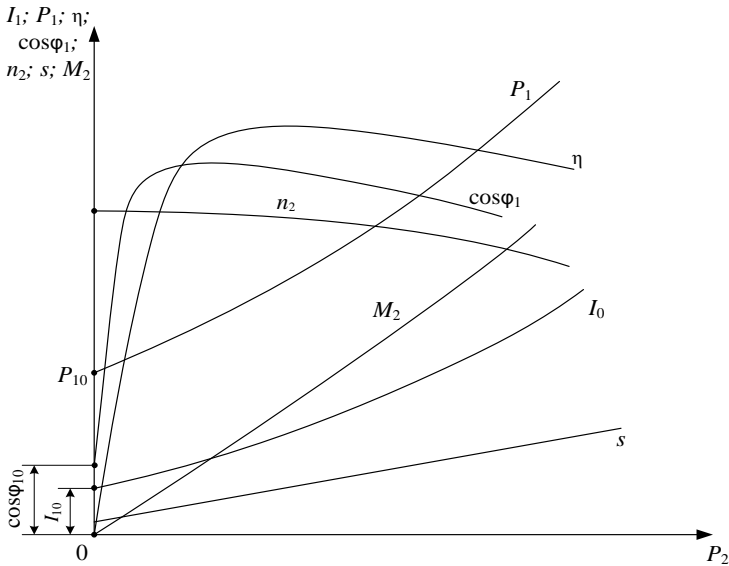


Рисунок 7.40 – Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя

Увеличение момента  $M_2$  сопровождается увеличением тока ротора  $I_2$ , что связано с увеличением ЭДС  $E_{2S}$  вследствие снижения частоты вращения  $n_2$  и увеличения  $s$ . Поэтому зависимость  $n_2 = f(P_2)$  слабо наклонена к оси абсцисс.

Из (7.91) имеем  $M_2 = 9,55P_2 / n_2$ , а так как  $n_2$  с увеличением нагрузки изменяется незначительно, то зависимость  $M_2 = f(P_2)$  имеет практически линейный характер, причем с увеличением нагрузки  $P_2$  частота вращения ротора уменьшается, а полезный момент на валу  $M_2$  возрастает несколько быстрее нагрузки.

Зависимость  $\eta = f(P_2)$  имеет максимум при нагрузке, когда постоянные потери в двигателе равны переменным, пропорциональным квадрату тока.

Зависимость  $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ . В связи с тем, что ток статора  $I_1$  имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода. Объясняется это тем, что ток холостого хода  $I_0$  при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ( $I_1 \approx I_0$ ). По мере увеличения нагрузки он возрастает, достигая наибольшего значения при нагрузке, близкой к номинальной. В

целях повышения коэффициента мощности важно, чтобы АД работал значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя могут быть получены экспериментально на специальных тормозных стендах либо расчетным путем по схеме замещения. Кроме того, для построения рабочих характеристик может быть использована круговая диаграмма.

### 7.2.7 Пуск в ход асинхронных двигателей. Реверс

Основными показателями пусковых свойств асинхронных двигателей являются пусковой момент  $M_p$  и пусковой ток. При пуске необходимо, чтобы пусковой момент был больше момента сопротивления рабочей машины  $M_c$ . Чем больше будет это превышение, тем легче будет пуск.

При пуске  $n_2 = 0$  и  $s = 1$ , а номинальное скольжение примерно равно 0,02–0,07. Отсюда следует, что пусковой ток  $I_p$  будет в несколько раз больше номинального и равен

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

При пуске двигателя этот ток, проходя по сети, вызывает снижение напряжения, что отрицательно сказывается на работе потребителей электроэнергии. При прохождении по обмоткам самого двигателя пусковой ток вызывает значительные динамические усилия и их нагрев. Поэтому при пуске двигателя в ход по возможности должны удовлетворяться следующие основные требования: процесс пуска должен быть простым; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи – по возможности малыми.

Практически используют следующие способы пуска:

- непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск);
- понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;
- подключение к обмотке ротора пускового реостата.

*Прямой пуск.* При прямом пуске двигатель подключается к сети без пусковых устройств. Благодаря своей простоте такой способ является одним из основных для пуска трехфазных АД с короткозамкнутым ротором.

Двигатели малой и средней мощности спроектированы на прямой пуск. Пусковой момент их составляет 100–130 % от номинального, а пусковой ток превышает номинальный в 4–7 раз. Длительность пуска составляет доли секунд у двигателей небольшой мощности и несколько секунд у более мощных двигателей. Обмотки статора при этом не успевают нагреться, а их крепления рассчитаны на динамические усилия, возникающие при пуске.

Двигатели обычно пускаются с помощью электромагнитного выключателя  $K$  (магнитного пускателя) по схеме, изображенной на рисунке 7.41, а.

Разгон АД выполняется автоматически по естественной механической характеристике  $M$  (рисунок 7.41, б) от точки П, соответствующей начальному моменту пуска, до точки Р, соответствующей работе двигателя при  $M = M_c$ . Ускорение при любой частоте  $n_2$  определяется разностью абсцисс кривых  $M$  и  $M_c$ . Если в начальный момент пуска  $M_{пн} < M_c$ , то двигатель разогнаться не сможет.

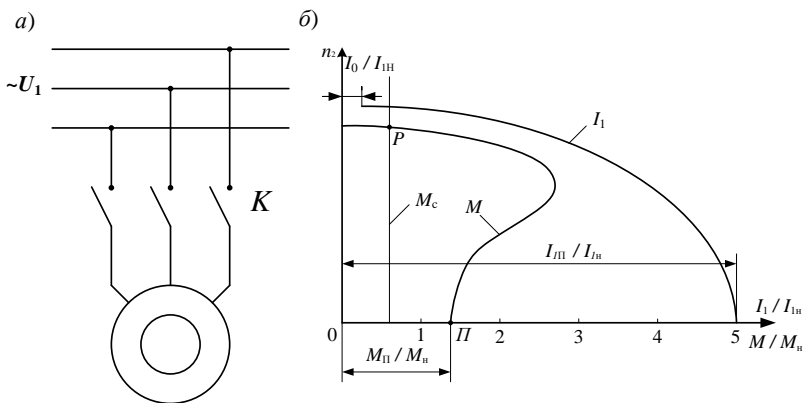


Рисунок 7.41 – Схема включения асинхронного двигателя при прямом пуске (а) и графики изменения момента двигателя, статического момента нагрузки  $M_c$  и тока  $I_1$  (б)

Величину начального пускового момента можно получить из формулы (7.78), в которой  $s = 1$ :

$$M_n = \frac{3 U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left[ (r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (7.92)$$

Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6–100 кВт кратность пускового момента  $k_{пн} = M_{пн} / M_n = 1,0 \dots 2,0$ ; мощностью 100–1000 кВт –  $k_{пн} = 0,7 \dots 1,0$ .

Недостатком данного способа пуска является большой бросок пускового тока, кратность пускового тока  $k_1 = I_{пн} / I_{1н} = 5 \dots 7$ .

*Пуск при пониженном напряжении.* Если запуск двигателя осуществляется на холостом ходу или с малым пусковым моментом и в то же время прямой пуск недопустим из-за большого падения напряжения в сети, то для уменьшения пускового тока применяют пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении.

Для снижения напряжения, подаваемого на двигатель, используют следующие способы:

- переключение со «звезды» на «треугольник»;

- пуск через реактор;
- пуск через автотрансформатор.

*Переключение со «звезды» на «треугольник».* Такой пуск применяется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения осуществляется путем переключения обмотки статора при пуске с рабочей схемы  $\Delta$  на пусковую схему  $Y$ , что можно выполнить с помощью трехполюсного переключателя  $\Pi$  (рисунок 7.42) или контактора.

При включении обмотки статора по схеме  $Y$  напряжение, подаваемое на фазы этой обмотки, уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что обуславливает уменьшение фазных токов в  $\sqrt{3}$  раз и линейных токов в 3 раза по сравнению с пуском по схеме  $\Delta$ . По окончанию процесса пуска и разгона двигателя обмотку статора переключают обратно на схему  $\Delta$ .

Однако подобному способу пуска свойствен весьма серьезный недостаток: пусковой и вращающий моменты двигателя, пропорциональные квадрату напряжения сети, уменьшаются в 3 раза. Кроме того, при напряжении сети 380/220 В двигатели этого же напряжения подобным способом пускать в ход нельзя, так как обмотки их статора при работе должны быть соединены в звезду.

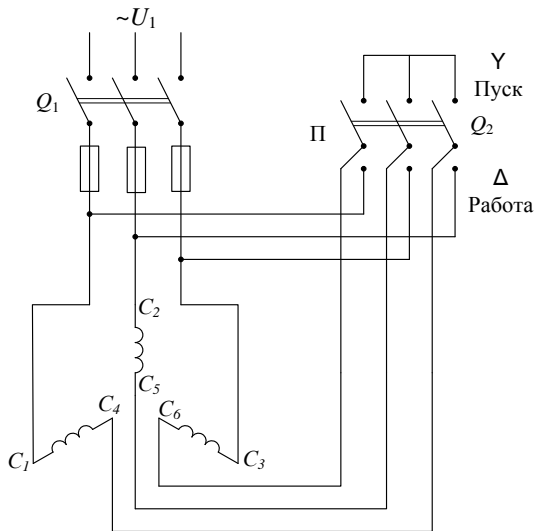


Рисунок 7.42 – Схема пуска в ход короткозамкнутого асинхронного двигателя переключением со «звезды» на «треугольник»

Таким образом, пуск двигателя переключением обмотки статора с треугольника на звезду применяется только в том случае, если при данном напряжении сети обмотка статора двигателя нормально соединена по схеме треугольник.

Значительное уменьшение моментов  $M_{п}$  и  $M_{макс}$  при отмеченном способе пуска приводит к тому, что данный способ можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки.

На рисунке 7.43 в качестве примера приведены механические характеристики двигателя при соединении обмотки статора по схемам Y и Δ.

Пуск через автотрансформатор (рисунок 7.44, а) осуществляется при разомкнутом выключателе  $Q_2$  и замкнутых  $Q_1$  и  $Q_3$ . При этом на АД подается напряжение через понижающий автотрансформатор, и пусковой ток двигателя определяется по формуле

$$I_{па} = I_{пн} \frac{U_{2а}}{U_{1н}},$$

где  $U_{2а}$  – вторичное напряжение автотрансформатора.

Пусковой ток в линии  $I_{пл} = I_{па} \frac{U_{2а}}{U_{1н}}$ , поэтому  $I_{пл} = I_{пн} \left( \frac{U_{2а}}{U_{1н}} \right)^2$ .

После разгона АД выключатель  $Q_3$  размыкается, а  $Q_2$  – замыкается.

При пуске через реактор (рисунок 7.44, б) в первый момент выключатель  $Q_1$  разомкнут, и пусковой ток идет через реактор. После разгона двигателя выключатель  $Q_2$  замыкается, тем самым шунтируя реакторы.

Из-за падения напряжения в реакторе напряжение на двигателе уменьшается. Пусковой ток линии уменьшается пропорционально отношению напряжений:

$$I_{пл} = I_{пн} \frac{U_1}{U_{1н}},$$

где  $I_{пн}$  – пусковой ток двигателя при номинальном напряжении;

$U_1$  – напряжение на двигателе;

$U_{1н}$  – номинальное напряжение.

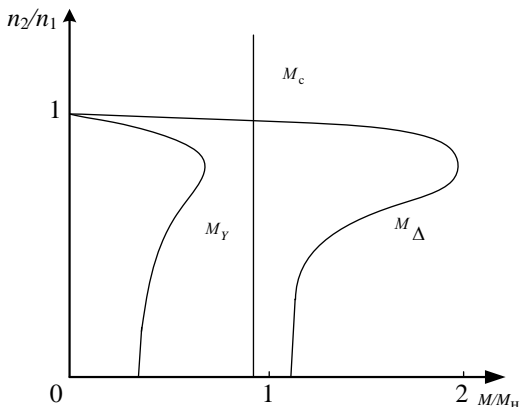


Рисунок 7.43 – Механические характеристики при соединении обмотки статора двигателя по схемам Y и Δ

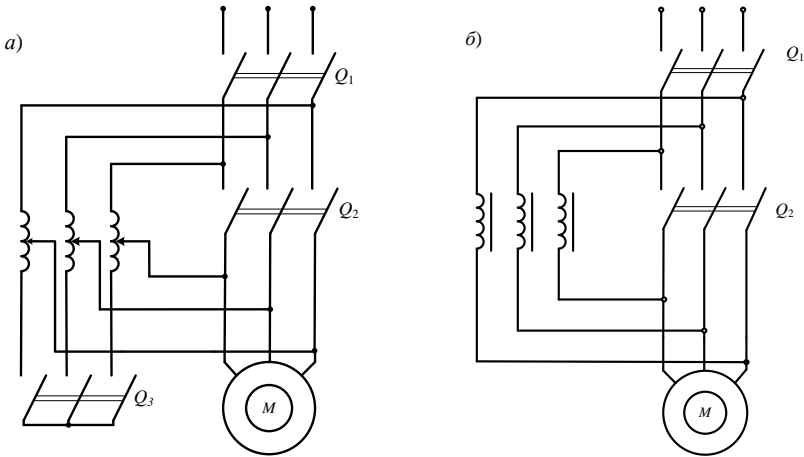


Рисунок 7.44 – Пуск АД с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении: а – с помощью автотрансформатора ; б – с помощью реактора

При этом нужно помнить, что и пусковой момент снижается пропорционально квадрату питающего напряжения.

Предположим, что с помощью реактора или понижающего автотрансформатора подаваемое на АД напряжение снизилось на 40 %. Пусковой момент асинхронного двигателя будет снижен на 64 %. При пуске через реактор ток будет снижен на 40 %, а через автотрансформатор – на 64 %, поэтому пуск через автотрансформатор предпочтительнее, чем через реактор, однако он дороже.

*Пуск с помощью реостата в цепи ротора.* Рассматриваемый способ применяют только для пуска двигателей с фазным ротором. Схема включения двигателя при реостатном пуске и его пусковая диаграмма, графики  $I_1 = f(t)$ ,  $n_2 = f(t)$  представлены на рисунке 7.45.

Пусковой реостат обычно имеет от трех до шести ступеней, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пускового момента в период разгона. В начале АД пускается по характеристике 4 (см. рисунок 7.45, б), соответствующей сопротивлению пускового реостата  $r_{\text{пуск}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}$ , и развивает вращающий момент  $M_{\text{п.макс}} = M_{\text{макс}}$  (точка П на диаграмме). Величина  $r_{\text{пуск}}$  может быть определена с помощью (7.87), а приведенное сопротивление пускового реостата  $r'_{\text{пуск}} = (x_1 + x'_2) - r'_2$ , реальное сопротивление пускового реостата

$$r_{\text{пуск}} = \frac{r'_{\text{пуск}}}{k_e^2} = r'_{\text{пуск}} \left( \frac{w_2 k_{02}}{w_1 k_{01}} \right)^2. \quad (7.93)$$

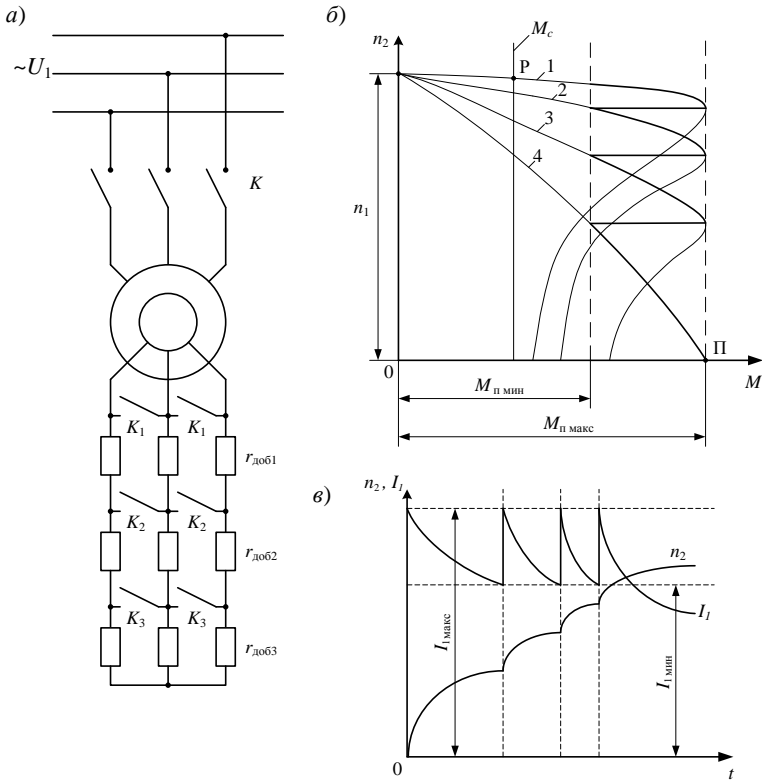


Рисунок 7.45 – Схема включения асинхронного двигателя при реостатном пуске (а), его пусковая диаграмма (б), графики изменения частоты вращения и тока при пуске (в)

Включение сопротивления  $r_{\text{пуск}}$  уменьшает также и пусковой ток двигателя, так как  $I'_2 = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2 + r'_{\text{пуск}})^2 + (x_1 + x'_2)^2}$ , а  $I_1 = I_0 + (-I'_2)$ .

По мере увеличения частоты вращения  $n_2$  вращающий момент  $M$  уменьшается и может стать меньше момента  $M_{\text{п.мин}}$ . Поэтому при  $M = M_{\text{п.мин}}$  часть сопротивления пускового реостата ( $r_{\text{доб}3}$ ) выводят, замыкая контактор  $K_3$ .

Вращающий момент при этом мгновенно возрастает до  $M_{п.макс}$ , а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата ( $r_{доб1} + r_{доб2}$ ). При дальнейшем уменьшении момента  $M$  до  $M_{п.мин}$  сопротивление  $r_{доб2}$  выключается контактором  $K_2$  и двигатель переходит на характеристику 2, соответствующую сопротивлению  $r_{доб1}$ . Таким образом, при ступенчатом уменьшении  $r_{пуск}$  вращающий момент двигателя изменяется от  $M_{п.макс}$  до  $M_{п.мин}$ , а частота вращения  $n_2$  возрастает по ломанной кривой, показанной на рисунке 7.45, б.

Процесс пуска продолжается до точки Р на диаграмме, в которой наступает равенство  $M = M_c$ . Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процессе разгона двигателя может осуществляться вручную или автоматически. Таким образом, включением  $r_{пуск}$  в цепь ротора можно осуществить пуск двигателя при  $M_{п} \approx M_{макс}$  и резко уменьшить при этом пусковой ток. На рисунке 7.45, в показан характер изменения тока  $I_1$  и частоты вращения  $n_2$  при пуске двигателя указанным способом. Ток также изменяется по ломанной кривой между двумя крайними значениями  $I_{1макс}$  и  $I_{1мин}$ .

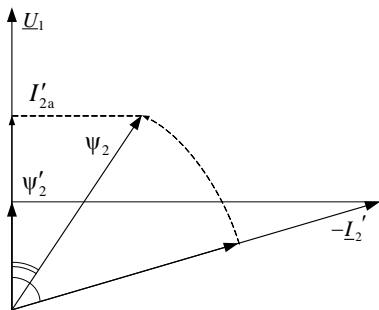


Рисунок 7.46 – Диаграмма пусковых токов АД при введении  $r_{пуск}$

Увеличение  $M_{п}$  за счет включения пускового реостата в цепь ротора при пуске двигателя может быть также объяснено рисунком 7.46: вращающий момент АД пропорционален амплитудному значению потока  $\Phi_m$ , приведенному току роторной обмотки  $I'_2$  и  $\cos \psi_2$ , где  $\psi_2$  – угол между ЭДС и током в роторной обмотке, т. е.

$$M = c_m \Phi_m I'_2 \cos \psi_2, \quad (7.94)$$

где  $c_m$  – коэффициент пропорциональности.

Из (7.94) следует, что вращающий момент зависит от активной составляющей приведенного тока  $I'_{2а}$  роторной обмотки ( $I'_{2а} = I'_2 \cos \psi_2$ ). С включением  $r_{пуск}$  при пуске АД уменьшается угол  $\psi_2$  и величина  $I'_2$ , а следовательно, уменьшается и ток  $I_1$ , что приводит к возрастанию новых значений  $I'_{2а}$ , а значит и момента  $M$ .



Недостатком рассмотренного способа пуска асинхронных двигателей с фазным ротором является его относительная сложность. Кроме того, двигатели с фазным ротором имеют не настолько хорошие рабочие характеристики, как двигатели с короткозамкнутым ротором такой же мощности (кривые  $\eta$  и  $\cos\varphi_2$  проходят ниже). В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска (когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент) и при малой мощности электрической сети.

Анализируя в целом данный способ пуска двигателей с фазным ротором, следует отметить, что введение в цепь ротора активного сопротивления целесообразно только до определенного предела. Если значение добавочного сопротивления превысит  $r_{\text{пуск}}$ , то пусковой момент  $M_{\text{п}}$  уменьшится.

*Частотный пуск.* При частотном пуске уменьшение пускового тока достигается за счет уменьшения ЭДС в роторной цепи. Это уменьшение происходит за счет снижения, на время разгона двигателя, частоты питающего трехфазного напряжения. Для реализации частотного пуска требуется специальный источник питания с регулируемой частотой. В настоящее время в качестве такого источника используется полупроводниковый преобразователь частоты, превращающий переменное однофазное или трехфазное напряжение с частотой 50 Гц в переменное трехфазное с регулируемой частотой. В процессе частотного пуска включение двигателя происходит при минимальной частоте питающего напряжения (несколько герц), а затем, по мере разгона двигателя, частота подводимого к двигателю напряжения постепенно повышается до номинального значения. Данный пуск позволяет уменьшить пусковой ток при сохранении вращающего момента на приемлемом уровне. Недостатком частотного пуска является необходимость иметь в наличии преобразователь частоты. Это сложное устройство силовой электроники, имеющее меньшее время наработки до отказа, чем асинхронный двигатель. Исходя из этого частотный пуск реализуется в тех случаях, когда непосредственный преобразователь частоты устанавливается для регулирования частоты вращения ротора двигателя.

Реверс – это изменение направления вращения ротора. Потребность в изменении направления движения или вращения, в зависимости от устройства, является иногда необходимой (краны, лебедки, лифты, привода задвижек, запирающих устройств), а в некоторых случаях лишь временной функцией (конвейерные ленты, эскалаторы, насосы). Также реверс двигателя могут использовать в целях торможения, так при отключении двигателя от сети ротор, обладая инерцией, продолжает свое вращение. При кратковре-

менном включении реверс в этот момент вызовет затормаживание. Такой способ торможения реверсом называют противовключением.

### 7.2.8 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Из формулы для частоты вращения ротора асинхронного двигателя  $n_2 = \frac{60f_1}{p}(1-s)$  следует, что эту частоту можно регулировать изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения, числа пар полюсов  $p$  и величины скольжения  $s$ .

*Частотное регулирование.* Этот способ позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне. Для его осуществления требуется, чтобы двигатель получал питание от отдельного источника с помощью преобразователя частоты (ПЧ) (рисунок 7.47).

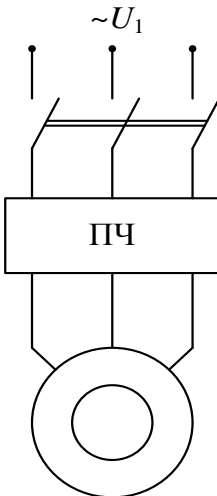


Рисунок 7.47 – Схема подключения АД при регулировании  $n_2$  преобразователем частоты

частоте  $f_1$  максимальный момент оставался неизменным (регулирование с  $M_{\text{макс}} = \text{const}$ ), то получим

$$U_{1(1)}/f_{1(1)} = U_{1(2)}/f_{1(2)} = \text{const}, \quad (7.96)$$

откуда следует, что для регулирования  $n_2$  при  $M_{\text{макс}} = \text{const}$  необходимо подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$  изменять пропорционально его частоте. При этом основной магнитный поток машины при различных значениях частоты  $f_1$  остается неизменным, т. е.

В зависимости от требований к механическим характеристикам асинхронного двигателя при частотном регулировании одновременно с изменением частоты  $f_1$  приходится по определенному закону изменять и подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$ .

Максимальный момент двигателя приблизительно (без учета сопротивления  $r_1$ ) определяется по (7.81):

$$M_{\text{макс}} = \frac{3 U_1^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2')}.$$

Учитывая, что  $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ ,  $x_1 = 2\pi f_1 L_1$ ,  $x_2' = 2\pi f_1 L_2'$ , получим

$$M_{\text{макс}} = k_1 \frac{U_1^2}{f_1^2}. \quad (7.95)$$

Если при регулировании частоты вращения требуется, чтобы при любой

частоте  $f_1$  максимальный момент оставался неизменным (регулирование с

$M_{\text{макс}} = \text{const}$ ), то получим

$$U_{1(1)}/f_{1(1)} = U_{1(2)}/f_{1(2)} = \text{const}, \quad (7.96)$$

откуда следует, что для регулирования  $n_2$  при  $M_{\text{макс}} = \text{const}$  необходимо

подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$  изменять пропорционально

его частоте. При этом основной магнитный поток машины при различных

значениях частоты  $f_1$  остается неизменным, т. е.

$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 w_1 k_{01}} \frac{U_1}{f_1} = \text{const}. \quad (7.97)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании с  $M_{\text{макс}} = \text{const}$  показаны на рисунке 7.48.

Недостатком частотного регулирования является относительно высокая стоимость преобразовательных установок.

*Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов статорной обмотки.* Для осуществления данного регулирования на статоре в общих пазах размещают не одну, а две обмотки, имеющие различные шаги и, следовательно, различное число пар полюсов. В зависимости от необходимой частоты вращения в сеть подключается та или иная обмотка. Этот способ применяется сравнительно редко, так как имеет существенный недостаток – малое использование обмоточного провода (в работе находится только одна из обмоток).

Значительно чаще изменение числа пар полюсов достигается изменением (переключением) схемы соединений обмотки статора. Принцип такого переключения показан на рисунке 7.49.

При переходе с последовательного соединения двух катушек на параллельное число пар полюсов изменяется с двух на одну. При наличии фазной обмотки на роторе ее также необходимо переключать одновременно с обмоткой статора, что является большим недостатком. Поэтому данный способ регулирования частоты вращения применяется только у АД с КЗР.

АД с переключением числа пар полюсов называют многоскоростными. Они выпускаются на две, три и четыре частоты вращения. Известно большое число схем, позволяющее осуществлять переключение числа пар полюсов. Эти схемы разделяются на схемы регулирования с постоянным моментом и схемы регулирования с постоянной мощностью. Механические характеристики двухскоростных двигателей показаны на рисунке 7.50.

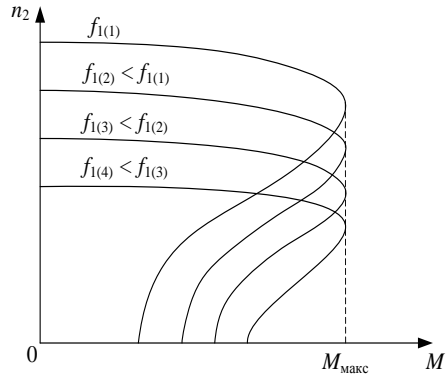


Рисунок 7.48 – Механические характеристики АД при частотном регулировании с  $M_{\text{макс}} = \text{const}$

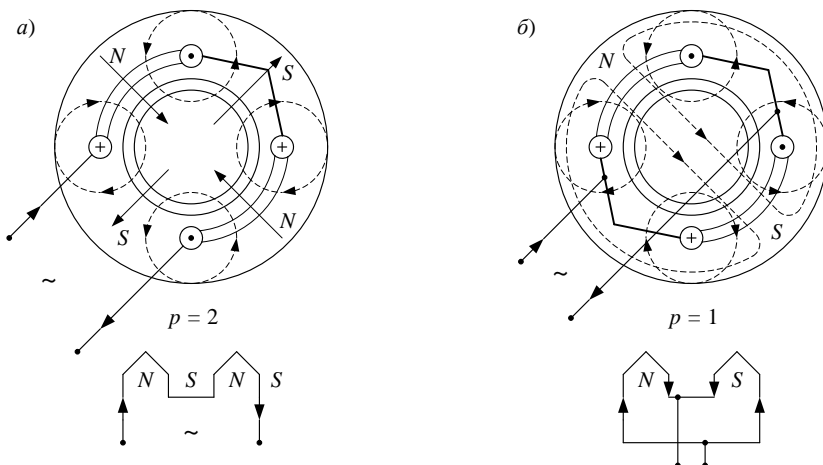


Рисунок 7.49 – Изменение числа пар полюсов переключением катушек обмотки:  
 а – две пары полюсов; б – одна пара полюсов

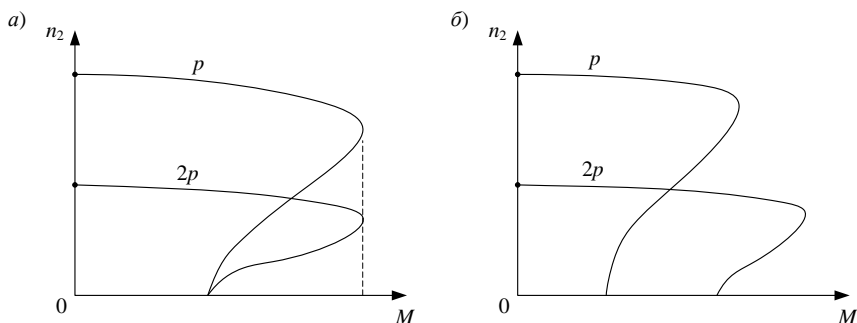


Рисунок 7.50 – Механические характеристики двухскоростного двигателя  
 с переключением числа пар полюсов в отношении 2:1  
 при постоянном моменте (а) и при постоянной мощности (б)

Из всех способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей способ переключения числа пар полюсов является наиболее экономичным, хотя он имеет следующие недостатки:

- двигатели имеют относительно большие габариты и массу по сравнению с двигателями нормального исполнения;
- регулирование частоты вращения ступенчатое.

Многоскоростные двигатели применяют для электропривода станков и различных механизмов, частоту вращения которых нужно регулировать в широких пределах (например, лифтовые асинхронные двигатели).

Регулирование частоты вращения за счет изменения питающего напряжения. Отмеченное регулирование можно осуществить посредством тиристорного регулятора напряжения РН (рисунок 7.51).

Так как вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален  $U_1^2$ , то механические характеристики при напряжениях, меньше номинального, пойдут ниже естественной.

Если момент сопротивления  $M_c$  остается постоянным, то, как следует из рисунка 7.52, при снижении напряжения скольжение АД увеличивается. Частота вращения ротора при этом уменьшается.

Регулирование скольжения этим способом возможно в пределах  $0 < S < S_{кр}$ .

Дальнейшее снижение напряжения (ниже кривой  $U_{1(2)}$  на рисунке 7.52) недопустимо, так как при этом  $M_{max} < M_c$  и двигатель остановится. Если его не отключить, то изоляция обмоток может расплавиться.

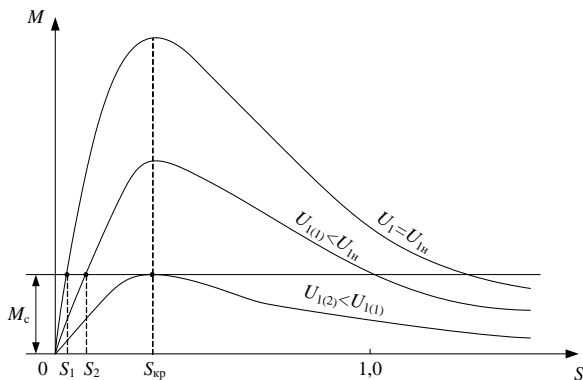


Рисунок 7.52 – Механические характеристики двигателя при различных  $U_1$

повышению нагрева двигателей. Поэтому рассматриваемый способ регулирования частоты вращения находит применение, главным образом, для машин небольшой мощности.

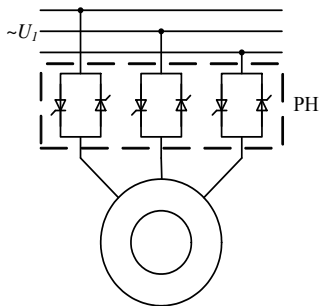


Рисунок 7.51 – Схема питания двигателя от тиристорного регулятора напряжения

Регулирование частоты вращения двигателей изменением подводимого напряжения  $U_1$  имеет существенный недостаток: увеличиваются потери и, таким образом, снижается КПД двигателя.

Магнитные потери в стали статора уменьшаются. Обычно при нагрузках двигателей, близких к номинальной, снижение  $U_1$  приводит к увеличению суммарных потерь и

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем включения в цепь ротора добавочного активного сопротивления. Данный способ регулирования применяется только в двигателях с фазным ротором.

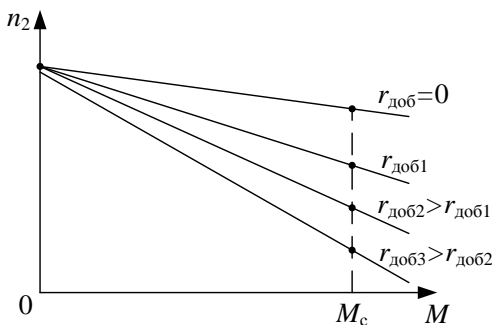


Рисунок 7.53 – Механические характеристики АД при различных  $r_{доб}$

Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах (рисунок 7.53). Недостатками его являются: большие потери энергии в добавочных сопротивлениях, чрезмерно «мягкая» механическая характеристика двигателя при большом сопротивлении в цепи ротора. В некоторых случаях последнее является недопустимым, так как небольшому изменению нагрузочного момента соответствует

существенное изменение частоты вращения.

При данном способе регулирования частоты вращения двигателя регулировочный реостат (добавочное активное сопротивление), включаемый в цепь ротора, должен быть рассчитан на длительный режим работы. Поэтому пусковые реостаты, рассчитанные на кратковременное прохождение тока в период пуска, не могут использоваться как регулировочные.

На практике данный способ применяется, главным образом, для регулирования частоты вращения небольших двигателей, например, в подъемных устройствах.

### 7.2.9 Режим генератора и электромагнитного тормоза

Тормозные режимы возникают в машине естественно при определенных условиях работы или создаются искусственно с целью ускорения процесса остановки двигателя. Торможение может быть: генераторное (с отдачей энергии в сеть), торможение противовключением и динамическое.

*Генераторный режим.* Если обмотку статора включить в сеть, а ротор асинхронной машины посредством приводного двигателя ПД (двигатель внутреннего сгорания, турбина и т. п.), являющегося источником механической энергии, вращать в направлении вращения магнитного поля статора с частотой  $n_2 > n_1$ , то направление движения ротора относительно поля статора изменится на обратное (по сравнению с двигательным режимом работы машины), т. к. ротор будет обгонять поле статора. Скольжение  $s$  при этом принимает отрицательное значение, и машина переходит в генераторный

режим. Следовательно, для работы в режиме генератора необходим источник переменного тока, который создаст вращающееся магнитное поле.

При отрицательных значениях скольжения момент машины принимает отрицательное значение, т. е. становится тормозящим. Согласно уравнению  $E_{2s} = sE_2$  значение ЭДС ротора  $E_{2s}$  станет отрицательным.

Для упрощения анализа работы машины в генераторном режиме рассмотрим векторную диаграмму (рисунок 7.54). Из нее видно, что угол  $\varphi_1$  больше, чем  $90^\circ$ . Следовательно, потребляемая активная мощность имеет отрицательное значение и она отдается в сеть. Регулирование отдаваемой генератором активной мощности осуществляется изменением скольжения. Реактивная же мощность, необходимая для создания магнитного поля, потребляется из сети всегда.

Для работы асинхронного генератора в автономном режиме необходимо его возбуждение. Для самовозбуждения генератора должны выполняться следующие условия: наличие остаточного магнитного потока  $\Phi_{ост}$  и наличие конденсаторных батарей достаточной емкости. Схема подключения конденсаторов приведена на рисунке 7.55, а.

При вращении генератора с достаточной скоростью остаточный магнитный поток  $\Phi_{ост}$  наводит остаточную ЭДС  $E_{ост}$  (рисунок 7.55, б), которая подводится к конденсаторам. Под ее воздействием по конденсаторам пойдет ток  $I_c$ , который будет проходить и по обмоткам статора, создавая магнитный поток  $\Phi_c$ . Создаваемый ток конденсаторов  $\Phi_c$  совпадает по направлению с остаточным магнитным потоком  $\Phi_{ост}$ .

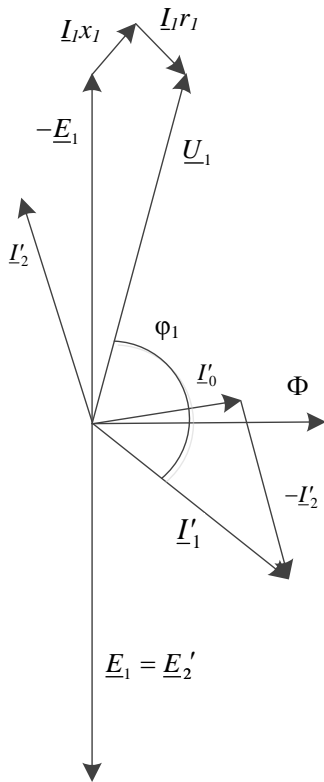


Рисунок 7.54 – Векторная диаграмма асинхронного генератора

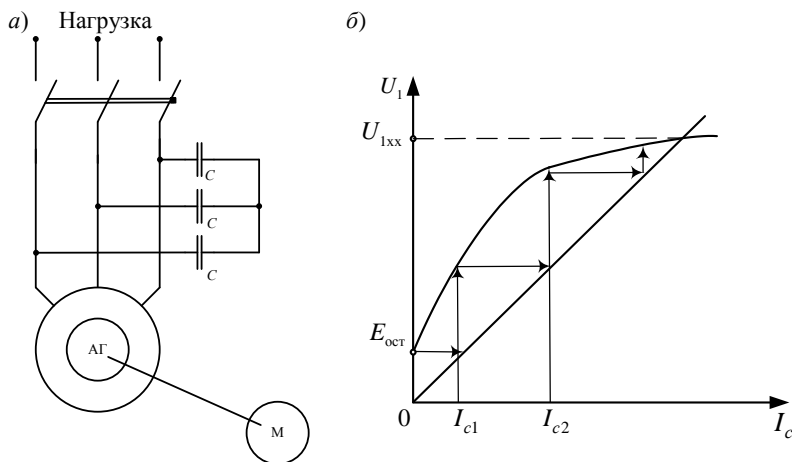


Рисунок 7.55 – Самовозбуждение асинхронного генератора:  
 а – схема; б – процесс самовозбуждения

Остаточная ЭДС  $E_{ост}$  отстает от потока  $\Phi_{ост}$  на угол  $90^\circ$ . Ток конденсаторов  $I_c$  опережает ЭДС на  $90^\circ$  и созданный им магнитный поток  $\Phi_c$  по фазе совпадает с током  $I_c$ , следовательно,  $\Phi_{ост}$  совпадает с  $\Phi_c$ . Поток  $\Phi_{ост}$  и  $\Phi_c$  суммируются в общий поток  $\Phi_0$ , который наводит ЭДС  $E_0$ . Так как  $E_0$  больше напряжения на конденсаторах  $U_{c1} = I_{c1}x_c$ , где  $x_c$  – сопротивление конденсаторов, ток конденсаторов увеличивается до значения  $I_{c2}$ . Процесс повторяется до тех пор, пока напряжение на конденсаторах не будет равно ЭДС генератора.

Проведем сравнение асинхронного генератора с синхронным. Недостатки асинхронного генератора:

- требуется источник реактивной мощности – конденсаторные батареи, емкость которых зависит от нагрузки;
- проблемы при работе на индуктивную нагрузку;
- большие зависимости напряжения и частоты тока от нагрузки в отличие от синхронных генераторов.

Достоинства:

- дешевизна, в сравнении с синхронными генераторами;
- высокая надежность из-за отсутствия скользящих контактов.

Таким образом, из-за перечисленных выше недостатков асинхронные генераторы применяются значительно реже синхронных.

Асинхронный генератор используется на гидроэлектростанциях малой мощности в ветроэнергетических и биогазовых установках.

*Режим электромагнитного торможения. Торможение противовключением.* Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять



местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов (см. рисунок 7.47), то направление вращающегося поля статора изменится на обратное. При этом ротор асинхронной машины под действием сил инерции будет продолжать вращение в прежнем направлении. Другими словами, ротор и поле статора асинхронной машины будут вращаться в противоположных направлениях. В этих условиях электромагнитный момент машины, направленный в сторону вращения поля статора, будет оказывать на ротор тормозящее действие.

В режиме электромагнитного торможения частота вращения ротора является отрицательной, а поэтому скольжение  $s$  приобретает положительные значения больше единицы. Практически вся поступающая в машину мощность в виде тепловых потерь выделяется в обмотке ротора. В тепловом отношении данный режим является особенно сложным.

Режим электромагнитного торможения используется для быстрой остановки двигателя, этот способ иногда называют торможением противовключением: для него изменяют порядок чередования фаз. Ротор при этом вращается против направления движения поля и постоянно замедляется. Когда скорость падает до нуля, двигатель должен быть отключен от сети, иначе его ротор будет вращаться в противоположном направлении.

При торможении противовключением токи в обмотке двигателя могут в несколько раз превышать соответствующие номинальные значения. С целью увеличения эффективности торможения двигателей с фазным ротором в цепи их роторов вводят добавочные сопротивления, что позволяет ограничить токи в обмотках и увеличить момент.

*Динамическое торможение* реализуется отключением обмотки статора от сети переменного тока и включением на постоянное напряжение (рисунок 7.56).

Этот тормозной режим используется для точной остановки двигателей. Во время торможения обмотка статора создает постоянное неподвижное магнитное поле. При вращении ротора относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС ротора, при этом его ток будет зависеть от сопротивления в цепи ротора (если такое имеется). Это приведет к изменению направления электромагнитного

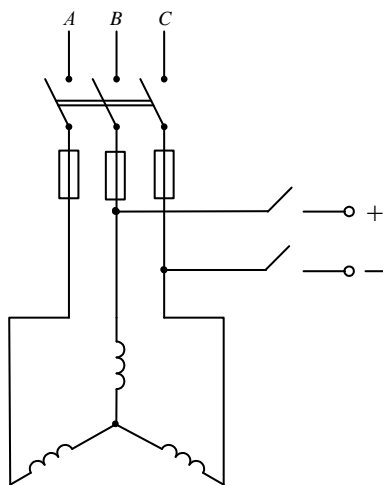


Рисунок 7.56 – Схема динамического торможения АД

относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС ротора, при этом его ток будет зависеть от сопротивления в цепи ротора (если такое имеется). Это приведет к изменению направления электромагнитного

момента, т. е. он станет тормозным и под действием этого момента происходит торможение. Кинетическая энергия вращающихся частей переходит в теплоту, выделяющуюся в цепи ротора за счет токов, индуктированных в ней неподвижным полем статора. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения либо сопротивление в цепи ротора, можно регулировать величину тормозного момента.

Данный вид торможения асинхронного двигателя применяется, например, в подъемно-транспортных машинах, в циркулярных пилах, в двухсистемных электровозах, в конвейерах для безопасной остановки механизмов при отключении электродвигателей и т. д.

*Использование трехфазного АД в режиме однофазного.* Если возникает необходимость использовать трехфазный АД в однофазной сети, его включают по схемам, приведенным на рисунке 7.57 [17].

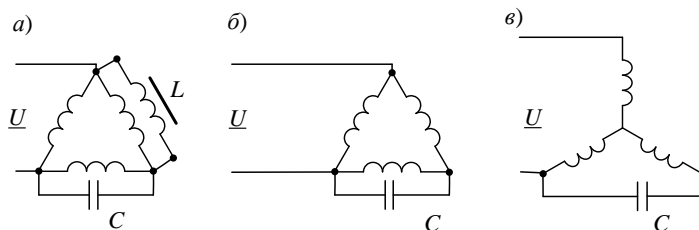


Рисунок 7.57 – Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя при питании его от однофазной сети

Так же как и в конденсаторном двигателе, емкость конденсаторов во всех схемах пропорциональна нагрузке. В двигателе, включенном по схеме, показанной на рисунке 7.57, а, при точном подборе емкости и индуктивности создается круговое вращающееся магнитное поле.

Это означает, что при расчетной нагрузке двигатель может развить такую же мощность как трехфазный. При использовании указанной схемы имеются технические трудности: если емкость конденсатора можно рассчитать по формуле  $C_p = 4800I_1/U_1$ .

При использовании схемы, показанной на рисунке 7.57, б, можно получить 70–80 % мощности трехфазного двигателя. Снижение мощности происходит за счет того, что магнитное поле получается не круговое, а эллиптическое.

По схеме, приведенной на рисунке 7.57, в, значение тока будет в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем в предыдущей схеме, поэтому мощность будет также в  $\sqrt{3}$  раз меньше и составит 40–46 % мощности трехфазного двигателя. Емкость конденсаторов в этом случае  $C_p = 2800I_1/U_1$ .

## 7.3 Синхронные машины

### 7.3.1 Применение, классификация и устройство синхронных машин

**Синхронные машины (СМ)** – это электрические машины переменного тока, частота вращения ротора которых равна частоте вращения магнитного поля статора  $n = 60f/p$ , где  $f$  – частота переменного тока,  $p$  – число пар полюсов. СМ, как и все электрические машины, обратимы, т. е. они могут работать как генераторами, так и двигателями.

Синхронные машины широко применяются в народном хозяйстве как электрические генераторы и двигатели преимущественно большой мощности. На современных электростанциях электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами (СГ), которые обычно соединяются с приводными двигателями без промежуточных редукторов. Приводными двигателями для мощных синхронных генераторов служат гидротурбины, паровые и газовые турбины и, относительно редко, двигатели внутреннего сгорания. СГ также служат источниками автономного электропитания на транспорте, в передвижных электростанциях.

Синхронные двигатели (СД) применяются там, где требуется постоянная частота вращения. Мощные синхронные двигатели используются в качестве электроприводов на металлургических заводах, холодильных и компрессорных установках, нефтеперекачивающих станциях магистральных трубопроводов, для привода некоторых станков, насосов вентиляторов и т. д.

Весьма ценным свойством СД является их способность работать при токе, опережающем по фазе питающее напряжение. Это свойство используется для увеличения коэффициента мощности сети ( $\cos\varphi$ ). Специальные СД, предназначенные для увеличения  $\cos\varphi$ , называются *синхронными компенсаторами*. Они устанавливаются на крупных промышленных предприятиях и на трансформаторных подстанциях энергосистемы.

По назначению СМ можно разделить на генераторы, двигатели и специальные машины.

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора, и вращающейся части – ротора, которая представляет собой электромагнит. В обмотки возбуждения ротора через щетки и кольца подается постоянный ток от возбудителя – машины постоянного тока или выпрямителя.

Якорем называется часть электрической машины, в которой индуцируется ЭДС (в СМ якорь чаще всего располагается на статоре). Устройство статора СМ принципиально не отличается от устройства статора асинхронной машины; существенные отличия имеются только в машинах большой мощности. Статор СМ (рисунок 7.58) состоит из чугунной станины – корпуса, внутри которого находится сердечник статора, собранный из отдельных, изолированных между собой листов электротехнической стали. В пазы сердечника укладывают обмотку статора из медного изолированного провода.

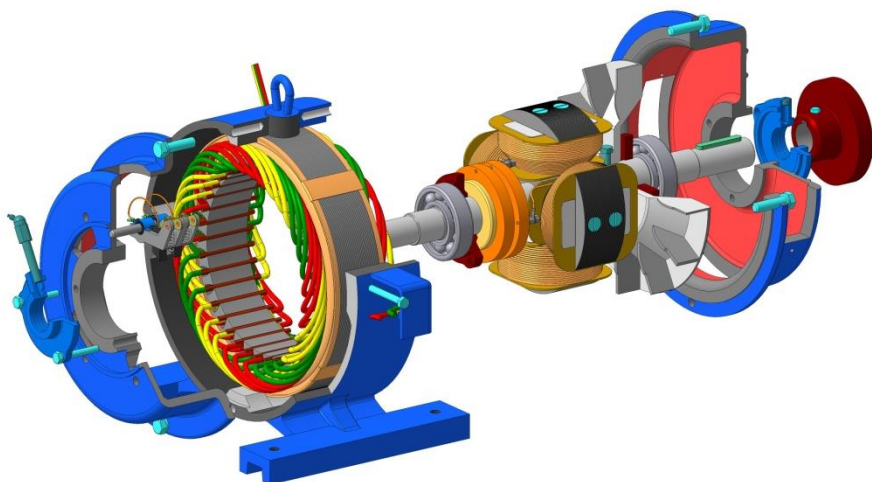


Рисунок 7.58 – Устройство синхронной машины

По способу возбуждения различают СМ с электромагнитным и магнитоэлектрическим (используются постоянные магниты) возбуждением.

По конструкции ротора существуют СМ с явнополюсным и неявнополюсным ротором. Конструкции различных роторов представлены на рисунке 7.59. *Явнополюсный* ротор, имеющий выступающие полюсы, применяется для тихоходных машин с частотами вращения значительно меньше 1000 об/мин. Для быстроходных мощных машин с частотами 1500–

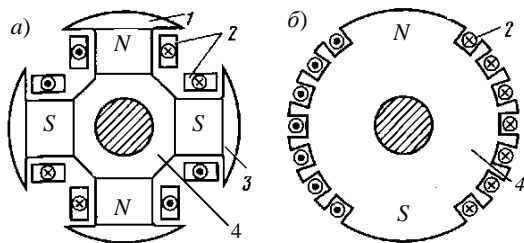


Рисунок 7.59 – Конструкции ротора явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины:

1 – полюсный наконечник; 2 – виток обмотки возбуждения; 3 – сердечник полюса; 4 – сердечник ротора

3000 об/мин явнополюсный ротор конструктивно невыполним из-за сложности надежного крепления полюсов при больших центробежных силах. Поэтому для быстроходных машин применяется *неявнополюсный* ротор, имеющий вид цилиндра без выступающих полюсов.

При *электромагнитном возбуждении* ротор представляет собой электромагнит, обмотка которого питается постоянным током через два изолированных контактных кольца, укрепленных на валу машины и вращающихся вместе с ротором. Этот ток

подводится к ротору извне от дополнительного генератора постоянного тока небольшой мощности (возбудителя, рисунок 7.60 [19]). Питание цепи возбуждения также можно осуществить от промышленной сети, используя управляемый тиристорный выпрямитель. В последние годы выпускаются синхронные машины с бесщеточным возбуждением. Обмотка ротора таких машин питается от полупроводникового выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель, в свою очередь, получает питание от возбудителя, в качестве которого выступает синхронный генератор небольшой мощности с якорем, размещенным на роторе, вал которого является продолжением вала основного генератора. Наведенная во вращающемся якоре возбудителя ЭДС по проводникам, проложенным внутри полого вала ротора, подается на выпрямитель и далее на обмотку возбуждения основного генератора.

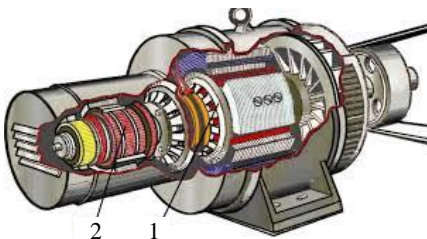


Рисунок 7.60 – Расположение возбудителя и генератора в синхронной машине:  
1 – генератор; 2 – возбудитель

Сердечники полюсов большей частью изготавливают из литой стали, а обмотку полюсов – из медных изолированных проводов. Для создания синусоидально изменяющейся ЭДС необходимо получить синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Это достигается неравномерностью воздушного зазора между наконечником полюса и стальной магнитопроводом статора: по краям полюсных наконечников воздушный зазор больше, чем под их серединой.

Существует прямое и обратное исполнение синхронной машины. Прямое исполнение: обмотка возбуждения расположена на роторе, а обмотка переменного тока – на статоре. Обратное исполнение: обмотка возбуждения расположена на статоре, а рабочая обмотка – на роторе.

### 7.3.2 Синхронный генератор

**Принцип действия синхронного генератора.** Частота тока в роторе синхронного генератора (СГ)

$$f = pn / 60, \quad (7.98)$$

где  $n$  – частота вращения ротора;

$f$  – частота тока;

$p$  – число пар полюсов ротора.

СГ трехфазного тока изготавливают на следующие номинальные напряжения: 230, 400, 690, 3150, 6300, 10500, 21000 В.

Работу синхронной машины рассмотрим на примере трехфазного СГ с явнополюсным ротором-электромагнитом (рисунок 7.61). Принцип действия СГ основан на двух законах электротехники: законе электромагнитной индукции и законе электромагнитных сил.

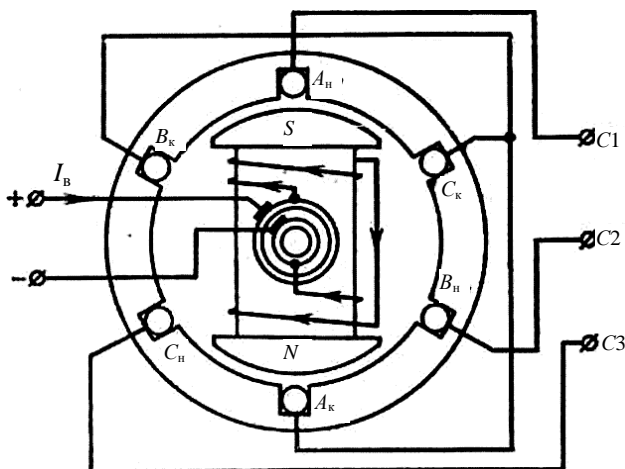


Рисунок 7.61 – Конструктивная схема трехфазного синхронного генератора

При холостом ходе ток якоря синхронной машины равен нулю. При вращении ротора приводным двигателем с моментом  $M_{вд}$  и частотой вращения  $n$  вместе с ним вращается и основной магнитный поток  $\Phi_0$ . Магнитный поток магнита  $\Phi_0$  идет по пути наименьшего магнитного сопротивления, замыкаясь по стали. Пересекая проводники каждой фазы статорной обмотки, магнитный поток индуцирует в них ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. Действующее значение синусоидальной ЭДС  $E_0$ , индуцируемой при холостом ходе в одной фазе статора синхронного генератора,

$$E_0 = 4,44k_{об}w_f\Phi_0, \quad (7.99)$$

где  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;

$w$  – число витков одной фазы статора, включенных последовательно;

$\Phi_0$  – магнитный поток полюса ротора при токе возбуждения  $I_B$ .

При вращении ротора частота ЭДС, индуцируемой в статорной обмотке, определяется выражением (7.98).

Магнитный поток статора, который называется потоком якоря, вращается в ту же сторону и с той же частотой, что и ротор. Следовательно, вращающееся поле статора неподвижно относительно ротора. Магнитный поток статора имеет две составляющие: основной магнитный поток якоря  $\Phi_a$  и

магнитный поток рассеяния  $\Phi_{\sigma}$ , силовые линии которого замыкаются вокруг проводов обмотки якоря и в ротор не проходят.

При вращении ротора ЭДС трех обмоток статора будут образовывать симметричную трехфазную систему:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t; \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{cases} \quad (7.100)$$

Присоединим к статорной обмотке трехфазную нагрузку. По фазам генератора и нагрузки начнет протекать переменный ток. Сдвиг тока относительно ЭДС определяется характером нагрузки. При активной нагрузке ток в фазе совпадает с ЭДС, при активно-индуктивной – отстает от ЭДС, а при активно-емкостной – опережает.

Для активной нагрузки токи в фазах, т. е. в обмотках статора, совпадают по направлению с ЭДС. В этом случае имеем симметричную трехфазную систему токов:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin \omega t; \\ i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{cases} \quad (7.101)$$

По закону электромагнитных сил на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила. Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Со стороны статора на ротор будет действовать такая же сила, но обратного направления, т. к. в этом случае будет соблюдаться равновесие сил.

Электромагнитная сила, действующая на ротор, создает электромагнитный момент, направленный против вращения ротора. Значит, электромагнитный момент в СГ является тормозным. Он тем больше, чем больше отбирается ток или электрическая мощность от генератора.

Под действием электромагнитного тормозного момента частота вращения ротора, а следовательно, и частота ЭДС, вырабатываемой генератором, начинает снижаться. Если изменение частоты недопустимо, то с возрастанием нагрузки на генератор необходимо увеличивать вращающий момент, создаваемый приводным двигателем.

*Уравнения напряжений синхронного генератора.* Отличие напряжения на выводах СГ под нагрузкой от режима холостого хода вызвано следующими причинами: реакцией якоря, магнитным потоком рассеяния, падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора.

Влияние магнитодвижущих сил на работу явнополюсного СГ обусловлено следующими фактами:

1 МДС обмотки возбуждения  $F_{в0}$  создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ , который, сцепляясь с обмоткой статора, наводит в ней основную ЭДС генератора  $\underline{E}_0$ .

2 МДС реакции якоря по продольной оси создает магнитный поток  $\Phi_{1d}$  (рисунок 7.62), который наводит в обмотке статора ЭДС реакции якоря  $\underline{E}_{1d}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по продольной оси  $x_{ad}$ . Это сопротивление характеризует уровень влияния реакции якоря по продольной оси на работу СГ. Так, при насыщенной магнитной системе машины магнитный поток реакции якоря  $\Phi_{1d}$  меньше, чем при ненасыщенной магнитной системе. Объясняется это тем, что поток  $\Phi_{1d}$  почти полностью проходит по стальным участкам магнитопровода, преодолевая небольшой воздушный зазор, а поэтому при магнитном насыщении сопротивление этому потоку заметно возрастает. При этом индуктивное сопротивление  $x_{1d}$  уменьшается.

3 МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{1q}$  создает магнитный поток  $\Phi_{1q}$ , который наводит в обмотке статора ЭДС  $\underline{E}_{1q}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по поперечной оси  $x_{aq}$ . Сопротивление  $x_{aq}$  не зависит от магнитного насыщения машины, так как при явнополюсном роторе поток  $\Phi_{1q}$  проходит в основном по воздушному межполюсному пространству.

4 Магнитный поток рассеяния обмотки статора  $\Phi_{\sigma 1}$  наводит в обмотке статора ЭДС рассеяния  $\underline{E}_{\sigma 1}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению рассеяния фазы обмотки статора

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_1 x_1.$$

5 Ток в обмотке статора  $\underline{I}_1$  создает активное падение напряжения в активном сопротивлении фазы обмотки статора

$$\underline{U}_{r1} = \underline{I}_1 r_1.$$

Геометрическая сумма всех перечисленных ЭДС, наведенных в обмотке статора, определяет напряжение на выходе СГ

$$\underline{U}_1 = \sum \underline{E} - \underline{I}_1 r_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1} - \underline{I}_1 r_1.$$

Здесь  $\sum \underline{E}$  – геометрическая сумма всех ЭДС, наведенных в обмотке статора результирующим магнитным полем машины, образованным совместным действием всех МДС ( $F_{в0}$ ,  $F_{1d}$ ,  $F_{1q}$ ) и потоком рассеяния статора  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Активное сопротивление фазы обмотки статора  $r_1$  у СГ средней и большой мощности невелико, и поэтому с некоторым допущением им можно пренебречь. Тогда уравнение напряжений *явнополюсного* СГ примет вид:

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1}.$$



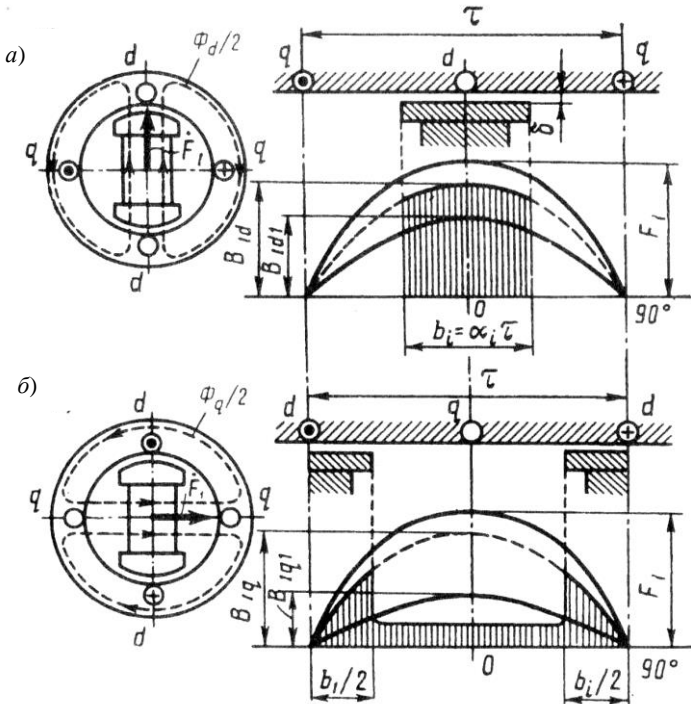


Рисунок 7.62 – Магнитные поля статора синхронной явнополюсной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

В неявнополюсных СГ реакция якоря характеризуется полной МДС статора  $F_1$  без разделения ее по осям, т. к. в этих машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы. Поэтому ЭДС статора в неявнополюсных машинах  $\underline{E}_1$ , равная индуктивному падению напряжения в обмотке статора, пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря  $\underline{E}_1 = -jL_1 x_a$ .

Поток реакции якоря  $\Phi_1$  и поток рассеяния статора  $\Phi_{\sigma 1}$  создаются одним током  $I_1$ , поэтому индуктивные сопротивления  $x_a$  и  $x_1$  можно рассматривать как суммарное индуктивное сопротивление  $x_c = x_a + x_1$ , представляющее собой синхронное сопротивление неявнополюсной машины. С учетом этого ЭДС реакции якоря  $\underline{E}_1$  и ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  следует рассматривать также как сумму  $\underline{E}_c = \underline{E}_1 + E_{\sigma 1} = -jL_1 x_c$ , представляющую собой синхронную ЭДС неявнополюсной машины. С учетом изложенного уравнение напряжений неявнополюсного СГ имеет следующий вид:

$$\underline{U}_1 = \sum \underline{E} - I_1 r_1 \approx \underline{E}_0 + \underline{E}_c.$$

Воспользовавшись уравнением ЭДС, построим векторную диаграмму для одной фазы *явнополюсного* синхронного генератора при симметричной нагрузке, работающего на активно-индуктивную нагрузку (ток  $I_1$  отстает по фазе от ЭДС  $E_0$ ). Векторную диаграмму (рисунок 7.63) строят на основании ЭДС генератора в режиме холостого хода  $E_0$ ; тока нагрузки  $I_1$  и его угла сдвига  $\psi_1$ , относительно ЭДС  $E_0$ ; продольного  $x_{ad}$  и поперечного  $x_{aq}$  индуктивных сопротивлений реакции якоря; активного сопротивления фазной обмотки статора  $r_1$ .

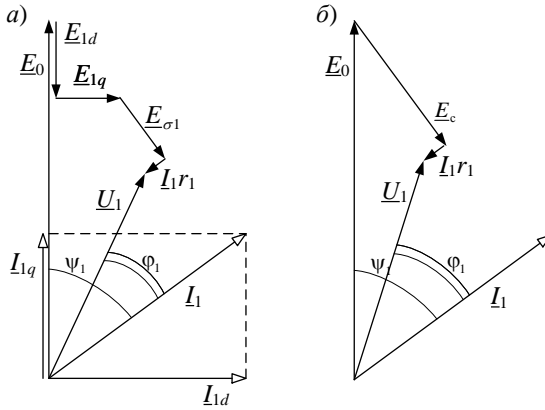


Рисунок 7.63 – Векторные диаграммы явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) СГ при активно-индуктивной нагрузке

**Реакция якоря синхронного генератора.** При протекании по обмотке

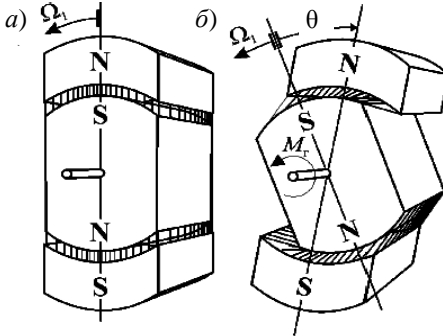


Рисунок 7.64 – Угол рассогласования  $\theta$ :  
а – при холостом ходе; б – при нагрузке

якоря тока нагрузки генератора создается собственное магнитное поле, которое воздействует на поле обмотки возбуждения. Влияние магнитного потока якоря  $\Phi_a$  на поле обмотки возбуждения  $\Phi_0$  называется *реакцией якоря*. Эти два потока вращаются с одинаковой частотой и создают результирующий вращающийся магнитный поток  $\Phi_{рез}$ .

Под воздействием потока  $\Phi_a$  результирующий поток  $\Phi_{рез}$  смещается относительно потока  $\Phi_0$  на

угол  $\theta$  в сторону отставания. Этот угол называют *углом рассогласования* (рисунок 7.64).

Ведущим звеном при электромагнитном преобразовании энергии является ротор, т. е. полюс ротора идет впереди полюса результирующего магнитного потока СГ при холостом ходе  $\theta = 0$ . При увеличении нагрузки растет электромагнитная сила, следовательно, растет и угол рассогласования  $\theta$ , но до некоторого предела, ограниченного мощностью приводного двигателя.

При чисто *активной нагрузке* реакция якоря поперечная, потому что магнитные линии потока  $\Phi_a$  якоря перпендикулярны магнитным линиям потока ротора  $\Phi_0$  (рисунок 7.65, а).

При *индуктивной нагрузке* ток  $I$  отстает от ЭДС на  $90^\circ$ , и реакция якоря будет продольной размагничивающей (рисунок 7.65, б), т. к.  $\Phi_a$  противоположен направлению основного потока ротора  $\Phi_0$ .

При *емкостной нагрузке* реакция якоря продольная намагничивающая (рисунок 7.65, в), т. к.  $\Phi_a$  совпадает по направлению с основным потоком ротора  $\Phi_0$ .

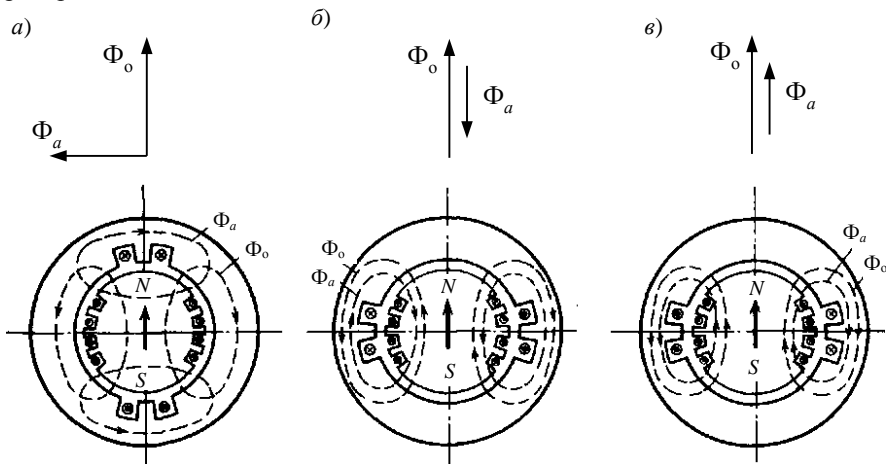


Рисунок 7.65 – Поперечная (а), продольная размагничивающая (б) и продольная намагничивающая (в) реакция якоря синхронной машины

В действительности на электростанциях имеет место смешанная, активно-индуктивная нагрузка, т. е. ток генератора включает в себя активную и индуктивную составляющие. Чем меньше составляющая активного тока, тем ниже значение коэффициента мощности.

Синхронные генераторы предназначены для работы в сети с коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 0,8$ . Более низкое значение коэффициента мощности в сети свидетельствует об увеличении реактивной составляющей тока нагрузки, что приводит к усилению размагничивающего действия реакции якоря и снижению напряжения на зажимах генератора. Для того чтобы

скомпенсировать размагничивающее действие реакции якоря при увеличении индуктивной нагрузки, нужно увеличить ток возбуждения в обмотке ротора. Этот ток может достигать значения, превышающего номинальное при номинальной нагрузке, что приводит к перегреву обмотки ротора СГ.

При низком коэффициенте мощности напряжение СГ будет неустойчиво, а при больших толчках индуктивной нагрузки, что бывает при пуске мощных двигателей, напряжение генератора может упасть до нуля.

**Характеристики синхронного генератора.** Свойства СГ определяются характеристиками холостого хода и короткого замыкания (внешними и регуляторными).

Характеристика холостого хода СГ представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода от тока в обмотке возбуждения  $I_b$ . Согласно формулам (7.99) и (7.100) ЭДС якоря при неизменной частоте  $n = \text{const}$  пропорциональна потоку, поэтому зависи-

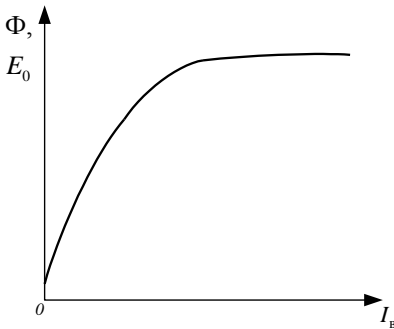


Рисунок 7.66 – Характеристика холостого хода СГ

мость  $E_0$  от  $I_b$ , т. е. *характеристика холостого хода* (рисунок 7.66) СГ подобна зависимости магнитного потока в нем от тока возбуждения.

Прямолинейная часть характеристики указывает на пропорциональность между индуцированной ЭДС и током возбуждения. В дальнейшем магнитная система генератора насыщается и кривая изгибается. Нормальная работа машины имеет место в насыщенной части характеристики.

*Характеристика короткого замыкания.* Характеристику трехфазного

КЗ получают следующим образом: выводы обмотки статора замыкают накоротко (рисунок 7.67, а) и при вращении ротора с частотой вращения  $n_1$  постепенно увеличивают ток возбуждения до значения, при котором ток КЗ превышает номинальный рабочий ток статорной обмотки не более чем на 25 % ( $I_{кз} = 1,25 I_{н}$ ). Так как в этом случае ЭДС обмотки статора имеет значение в несколько раз меньшее, чем в рабочем режиме генератора, и, следовательно, основной магнитный поток весьма мал, то магнитная цепь машины оказывается ненасыщенной. По этой причине характеристика КЗ представляет собой прямую линию (рисунок 7.67, б). Активное сопротивление обмотки статора невелико по сравнению с ее индуктивным сопротивлением, поэтому, принимая  $r_1 \approx 0$ , можно считать, что при опыте КЗ нагрузка СГ (его собственные обмотки) является чисто индуктивной – значит реакция якоря продольно-размагничивающая.

Векторная диаграмма СГ при опыте трехфазного КЗ представлена на рисунке 7.67, в. Из нее видно, что ЭДС  $\underline{E}_k$ , индуцируемая в обмотке статора, уравнивается ЭДС продольной реакции якоря  $\underline{E}_{ld}$  и ЭДС рассеяния  $\underline{E}_{\sigma 1}$ .

Один из важных параметров – отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой отношение тока возбуждения  $I_{B0}$ , соответствующего номинальному напряжению при ХХ, к току возбуждения  $I_{B,k}$  соответствующему номинальному току статора при опыте КЗ (см. рисунок 7.67, б):

$$\text{ОКЗ} = I_{B0} / I_{B,k}$$

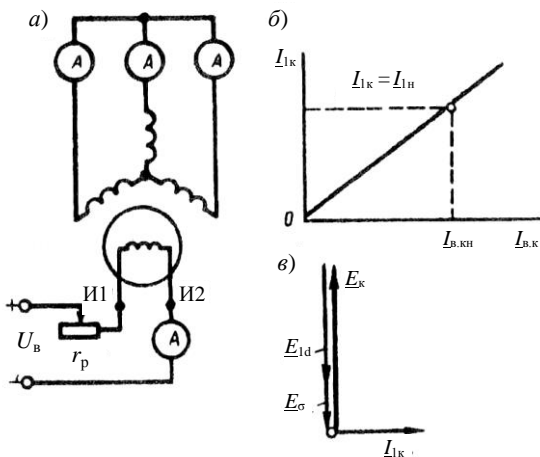


Рисунок 7.67 – Опыт короткого замыкания СГ

Для синхронных турбогенераторов ОКЗ = 0,4...0,7; для гидрогенераторов ОКЗ = 1,0...1,4. ОКЗ имеет большое практическое значение при оценке свойств СГ, т. к. машины с малым ОКЗ менее устойчивы при параллельной работе, имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки, но такие машины имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле [18].

*Внешняя характеристика* СГ определяет зависимость  $U = f(I)$  при  $I_B = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $f = f_n$  и показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора  $U$  при изменении нагрузки и неизменном токе возбуждения. Вид внешних характеристик при разных характерах нагрузки показан на рисунке 7.68, причем предполагается, что в каждом случае ток возбуждения отрегулирован так, что  $I = I_n$  и  $U = U_n$ .

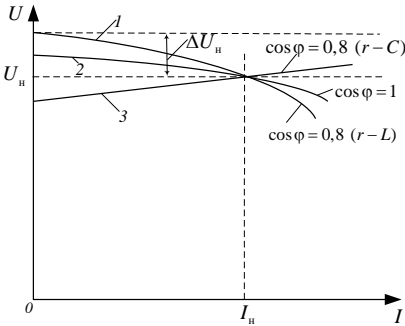


Рисунок 7.68 – Внешние характеристики СГ

ция якоря слабее и уменьшение  $U$  с увеличением  $I$  происходит медленнее. При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 7.68) возникает продольная намагничивающая реакция якоря, которая увеличивает результирующий магнитный поток машины. Поэтому с увеличением тока нагрузки  $I$  напряжение  $U$  на зажимах генератора возрастает.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора  $\Delta U_n$  – это изменение напряжения на его зажимах при изменении нагрузки от нуля до номинального значения  $U_n$  при неизменном токе возбуждения.

Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и  $\cos \varphi = 0,8$ .

*Регулировочная характеристика* определяет зависимость  $I_b = f(I)$  при  $U = U_n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (рисунок 7.69).

Вид регулировочных характеристик также объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 7.69) продольная реакция якоря является размагничивающей и для компенсации ее влияния на величины  $\Phi_0$  и  $U$  с увеличением  $I$  необходимо

значительно увеличивать ток возбуждения  $I_b$ . При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 7.69) размагничивающая реакция якоря слабее и тре-

Вид внешних характеристик СГ объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 7.68) существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки  $I$ , и поэтому напряжение  $U$  с увеличением тока  $I$  уменьшается. При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 7.68) также имеется продольная размагничивающая реакция якоря, но угол  $\psi$  между  $E$  и  $I$  меньше, чем в предыдущем случае, поэтому продольная размагничивающая реакция

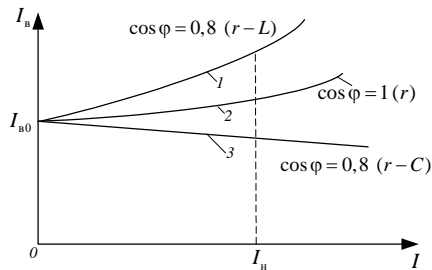


Рисунок 7.69 – Регулировочные характеристики синхронных генераторов

буется меньшее увеличение  $I_B$ . При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 7.69) продольная реакция якоря стремится увеличивать  $\Phi_0$  и  $U$ , вследствие чего для сохранения  $U = \text{const}$  необходимо с увеличением  $I$  уменьшать  $I_B$ . Обычно  $\cos\varphi = 0,8(r - L)$  и поэтому при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке необходимо увеличить ток возбуждения.

### 7.3.3 Синхронный двигатель и компенсатор

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора. К статору синхронного двигателя подводят трехфазный переменный ток, а к обмотке возбуждения ротора – постоянный.

По конструкции СД отличаются от СГ воздушным зазором (у двигателей он меньше), шириной полюсного наконечника (у двигателей он составляет 90 % ширины полюсного деления, а у генераторов – только 70 %), сечением короткозамкнутой (демферной) обмотки (у двигателей сечение обмотки больше, т. к. она используется для запуска). Поэтому промышленностью выпускаются серии генераторов и серии двигателей.

**Момент синхронного двигателя.** Электрическая мощность, подводимая к трехфазному синхронному двигателю при симметричной нагрузке,

$$P = 3IU \cos\varphi, \quad (7.102)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие фазные напряжение и ток.

Механическая мощность, вырабатываемая двигателем,

$$P_{\text{мх}} = \omega_p M, \quad (7.103)$$

где  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора;

$M$  – момент сопротивления вращению ротора.

Пренебрегая потерями в машине и приравнивая электрическую и механическую мощности, получим выражение для момента

$$M = \frac{3UI \cos\varphi}{\omega_p}. \quad (7.104)$$

В двигательном режиме момент  $M$  является движущим, а в генераторном – тормозящим.

Из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 7.63, следует

$$U_x \cos\varphi = E_0 \sin\theta$$

или

$$I \cos\varphi = \frac{E_0 \sin\theta}{x_c}, \quad (7.105)$$

где  $U_x$  – суммарное индуктивное падение напряжения от потока рассеяния и потока реакции якоря,

$$U_x = Ix_c, \quad (7.106)$$

$x_c$  – синхронное индуктивное сопротивление статора.

Угловая скорость вращения ротора

$$\omega_p = 2\pi n / 60 = 2\pi f / p = \omega / p, \quad (7.107)$$

где  $\omega$  – угловая скорость тока.

Подставляя выражения (7.106) и (7.107) в уравнение (7.105), находим

$$M = \frac{3UE_0}{\omega_p x_c} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta. \quad (7.108)$$

Отсюда следует, что вращающий момент синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла рассогласования. Зависимость момента синхронной машины от значения угла  $\theta$ , согласно формуле (7.108), называется *угловой характеристикой* синхронной машины (рисунок 7.70).

В двигательном режиме магнитное поле статора своими магнитными силовыми линиями связывается с полюсами ротора противоположной полярности. Вращающееся магнитное поле увлекает за собой полюса ротора и заставляет их вращаться.

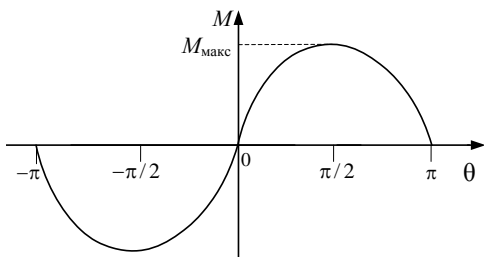


Рисунок 7.70 – Угловая характеристика синхронной машины

При нагрузке ротор синхронного двигателя отстает на некоторый угол от вращающегося магнитного поля, причем с увеличением нагрузки угол  $\theta$  увеличивается. Физически это означает, что в двигателе, в отличие от генератора, полюсы ротора отстают от вращающегося магнитного поля статора, теперь уже последнее «ведет» за собой ротор.

Если момент нагрузки превысит  $M_{\max}$ , то поддержание синхронной частоты вращения ротора будет невозможно и машина выпадет из синхронизма. При номинальной мощности двигателя угол  $\theta = 20...30^\circ$ , при этом перегрузочная способность двигателя  $M_{\max}/M_H = 2...3$ .

Максимальный момент

$$M_{\max} = 3 \frac{P}{\omega_p} \frac{UE_0}{x_c} = 3 \frac{P}{\omega_p} UI_K, \quad (7.109)$$

где  $I_K$  – ток короткого замыкания, устанавливающийся в СГ при замыкании обмотки статора, в которой индуцируется ЭДС  $E_0$ .

Исходя из формулы (7.109) следует, что вращающий момент синхронного двигателя пропорционален приложенному напряжению, а в асинхронном двигателе – квадрату напряжения. В связи с этим изменение напряжения в



сети не так значимо влияет на создаваемый момент синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.

**Рабочие характеристики синхронного двигателя.** Рабочими характеристиками синхронного двигателя называют зависимости частоты вращения ротора  $n$ , тока статора  $I$ , потребляемой из сети мощности  $P_1$ , полезного вращающего момента  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности па валу двигателя  $P_2$  при постоянных значениях напряжения сети  $U$ , частоты сети  $f$  и тока возбуждения  $I_B$  (рисунок 7.71).

Вид графика  $\cos\varphi$  зависит от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что  $\cos\varphi = 1$ , то с ростом нагрузки коэффициент мощности снижается; если же установить  $\cos\varphi = 1$  при номинальной нагрузке, то при недогрузке синхронный двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке – отстающий.

График  $M_2 = f(P_2)$  выходит из начала координат и линейно зависит от мощности на валу  $P_2$ , т. к. частота вращения  $n$  не изменяется.

Ток в обмотке якоря двигателя определяется по формуле  $I = \frac{P_1}{m_1 U \cos\varphi}$ . Из этого выражения видно, что с увеличением нагрузки на валу двигателя ток  $I$  растет быстрее, чем потребляемая мощность  $P_1$ , вследствие уменьшения  $\cos\varphi$ .

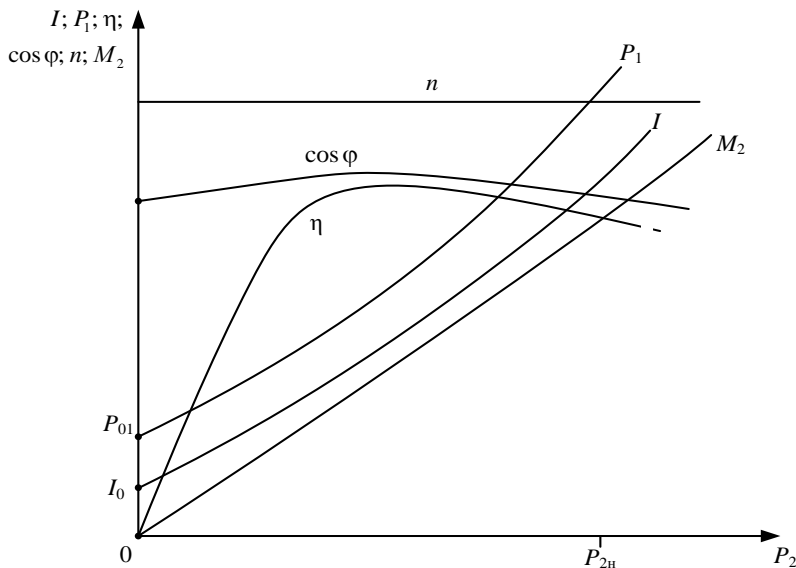


Рисунок 7.71 – Рабочие характеристики синхронного двигателя

С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются потери, поэтому потребляемая мощность  $P_1$  растет быстрее полезной мощности  $P_2$ , и график  $P_1 = f(P_2)$  имеет несколько криволинейный вид.

Коэффициент полезного действия синхронной машины обычно составляет 85–99 %. Наибольший КПД соответствует нагрузке  $0,5–0,75P_{н}$ , также существует тенденция к увеличению КПД при повышении мощности.

В синхронных машинах выделяют следующие потери мощности:

- механические, обусловленные трением в подшипниках, ротора о воздух, щеток о контактные кольца и вентиляционные потери;
- магнитные в стали статора, состоящие из потерь на гистерезис и вихревые токи;
- потери на возбуждение, куда входит мощность возбуждения и потери в самом возбuditеле;
- электрические в обмотках статора;
- добавочные, которые слагаются из потерь на вихревые токи в проводах обмотки статора, потерь в стали ротора, вызванных пульсацией магнитного потока вследствие зубчатости сердечника статора, и др.

**Пуск синхронного двигателя.** Пуск синхронного двигателя прямым включением в сеть невозможен, т. к. ротор, удерживаемый силами инерции, не может быть сразу увлечен магнитным полем статора, синхронная частота которого устанавливается сразу же после включения статорной обмотки в сеть.

Пуск синхронного двигателя возможен лишь при условии предварительного разгона до частоты, равной синхронной или близкой к ней. Для синхронных двигателей обычно применяется асинхронный пуск, заключающийся в том, что в начале пуска двигатель разгоняется как асинхронный (рисунок 7.72). Для этого на роторе размещается пусковая обмотка. Она представляет собой латунные или бронзовые стержни, уложенные в пазы на поверхности полюсных наконечников ротора и замкнутые между собой с двух сторон.

При подключении обмотки статора к сети возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует токи в пусковой обмотке ротора. В результате возникает вращающий момент, и двигатель разгоняется до некоторой установившейся частоты  $n_0$ . Все происходит так же, как и при пуске асинхронного двигателя, поэтому частота  $n_0$  оказывается близкой к частоте вращения магнитного поля, но меньшей ее на несколько процентов. Затем обмотка возбуждения отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока. В результате возникает обычный для СМ момент взаимодействия вращающегося поля статора и полюсов ротора, и СМ втягивается в синхронизм, т. е. ротор начинает вращаться синхронно с полем.

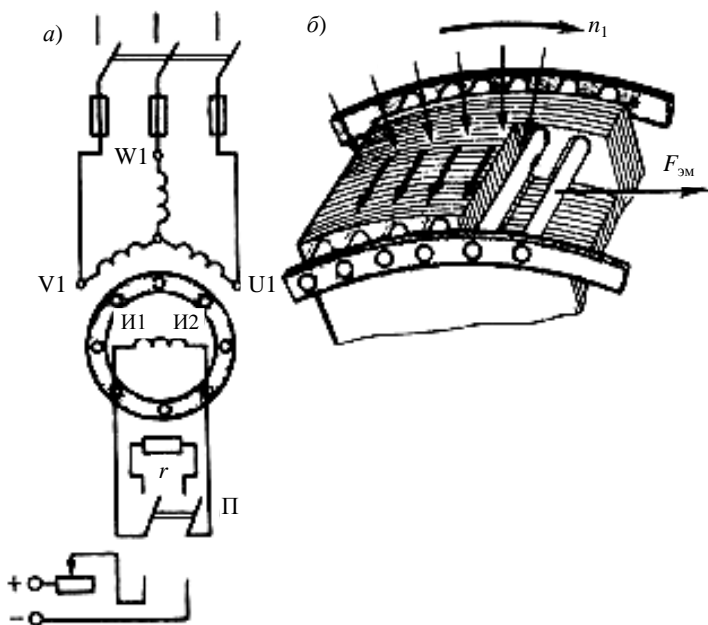


Рисунок 7.72 – Асинхронный пуск синхронного двигателя  
 а – схема включения; б – конструкция пусковой обмотки

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, т. к. магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, наводит в ней ЭДС. Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта ЭДС достигает значений, опасных как для целостности изоляции самой обмотки, так и для обслуживающего персонала. Чтобы это предотвратить, обмотку возбуждения на период разгона ротора замыкают на активное сопротивление, примерно в десять раз большее сопротивления обмотки возбуждения. Переключение зажимов И1 и И2 обмотки возбуждения с сопротивления на зажимы возбудителя осуществляют переключателем П (см. рисунок 7.72, а).

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче его вхождение в синхронизм. С увеличением нагрузочного момента на валу вхождение двигателя в синхронизм затрудняется. Наибольший нагрузочный момент, при котором ротор синхронного двигателя еще втягивается в синхронизм, называют *моментом входа двигателя в синхронизм*  $M_{вх}$ . Величина асинхронного момента при частоте вращения  $0,95n_1$  зависит от активного сопротивления пусковой клетки, т. е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены.

При значительном увеличении момента сопротивления синхронный двигатель может не втянуться в синхронизм.

Порядок остановки синхронного двигателя следующий:

- 1) уменьшают ток статора, изменяя ток возбуждения;
- 2) отключают обмотку статора от сети;
- 3) после отключения статорной обмотки снимают возбуждение, замыкая ротор на разрядное сопротивление.

У мощных синхронных двигателей для уменьшения пускового тока применяется, как правило, пуск при помощи автотрансформатора или реактивных сопротивлений (реакторов), включаемых последовательно с обмоткой статора. Непосредственный пуск применяется только для двигателей относительно небольшой мощности – до сотен киловатт.

Пусковая обмотка СД, в отличие от обмотки ротора асинхронной машины, рассчитывается для кратковременного процесса пуска и имеет относительно небольшую массу.

Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

- 1) возможность работы при  $\cos\varphi = 1$ ;
- 2) меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, т. к. их вращающий момент пропорционален напряжению в первой степени, а не квадрату напряжения, как у асинхронных двигателей;
- 3) строгое постоянство частоты вращения, независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатки синхронных двигателей:

1) конструкция сложнее, чем у короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током (кроме случая возбуждения СД от постоянных магнитов);

2) синхронные двигатели в большинстве случаев дороже АД;

3) сравнительная сложность пуска.

Сопоставление достоинств и недостатков синхронных двигателей показывает, что их целесообразно применять для установок большой мощности (более 200 кВт) с условиями редких пусков (вентиляторы, компрессоры, насосы, дробилки и т. п.).

**Синхронный компенсатор** – это синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода, назначение которого – компенсировать реактивную мощность в линии электропередач. У него та же функция, что и у батареи конденсаторов, используемых в электрических сетях для улучшения  $\cos\varphi$ . Отличие в том, что батарея конденсаторов компенсирует лишь индуктивную составляющую реактивной мощности, а компенсатор может компенсировать как индуктивную, так и емкостную составляющие. Синхронный компенсатор также можно использовать для регулирования напряжения системе электроснабжения.

Изменение тока возбуждения синхронного двигателя вызывает изменение общего тока статорной обмотки. Кривые изменения тока двигателя в зависимости от тока возбуждения имеют такие же характеристики, как и приведенные на рисунке 7.71. При перевозбуждении синхронный двигатель работает с опережающим током по отношению к току сети, улучшая  $\cos\varphi$  сети, а при недо возбуждении – с отстающим током, т. е. будет ухудшать  $\cos\varphi$  сети. С целью улучшения коэффициента мощности сети можно перевозбудить присоединенные к ней синхронные двигатели.

Синхронные компенсаторы, выпускаемые промышленностью, имеют следующие конструктивные отличия от синхронного двигателя:

- не имеют выходного конца вала;
- вал не передает вращающий момент, поэтому он может быть механически непрочным;
- уменьшен воздушный зазор, поэтому уменьшены размеры обмотки возбуждения.

Синхронные компенсаторы выпускаются на большую мощность – от 10 до 100 тыс. кВт·А.

Мощность синхронного компенсатора выбирают по величине реактивной мощности, которую он должен компенсировать, а также места установки. Подключают его к шинам трансформаторной подстанции, что позволяет разгрузить линию передачи и генератор от реактивных токов, а значит уменьшить падение напряжения в линии и снизить потери электрической энергии.

## 7.4 Машины постоянного тока

Машины постоянного тока (МПТ) используются в режиме двигателя и генератора. В качестве источников энергии постоянного тока раньше обычно применялись генераторы постоянного тока (для питания электроприводов с широким диапазоном регулирования частоты вращения, в электролизной промышленности, на судах, тепловозах и т. д.). В настоящее время они используются относительно мало, т. к. для получения энергии постоянного тока разработаны и широко применяются полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) используются на электротранспорте (электровозы, троллейбусы, трамваи, электрокары) в качестве привода различных станков, механизмов и т. д. Их применение обусловлено простотой регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами.

В таблице 7.2 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Таблица 7.2 – Примеры применения машин постоянного тока

Назначение	Использование	$P$ , кВт	$I$ , А	$U$ , В	Примечание
Двигатели	Трамвай (привод колес)	40–50	75–100	550	Достоинства: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент
	Электровоз (привод колес)	755–855	400–600	1500	
	Прокатный стан	11500	11500	1000	
	Атомоход (привод гребного винта)	18000	18000	1000	
Генераторы	Тепловоз	2700	3600	750	Сейчас чаще применяют синхронные генераторы

#### 7.4.1 Конструкция и принцип действия машин постоянного тока

Конструкция МПТ. Любая электрическая машина обратима, т. е. может работать генератором или двигателем, поэтому их конструкции не отличаются (рисунок 7.73 [20]).

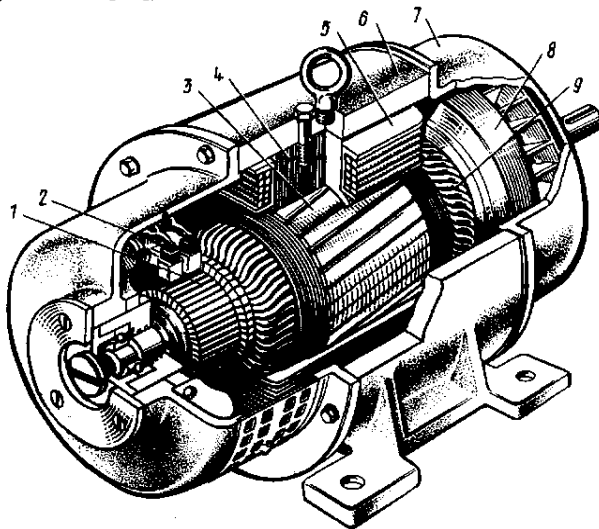


Рисунок 7.73 – Устройство электрической машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Конструктивно МПТ состоит из двух частей: неподвижной – статора (индуктора для создания неподвижного магнитного поля) и подвижной – ротора (якоря). Статор представляет собой пустотелый стальной цилиндр, называемый станиной, на внутренней поверхности которого располагаются полюса магнитной системы, создающие магнитный поток электрической машины. В зависимости от способа создания магнитного потока различают МПТ с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением.

При магнитоэлектрическом возбуждении полюса магнитной системы МПТ формируются постоянными магнитами. Такое возбуждение находит применение в машинах малой мощности.

В МПТ с электромагнитным возбуждением полюс магнитной системы создается электромагнитом, представляющим собой ферромагнитный сердечник с размещенной на нем обмоткой, по которой протекает постоянный ток. Эта обмотка получила название *обмотки возбуждения*. Полюсы, формирующие основной магнитный поток, называются главными (рисунок 7.74).

Между главными полюсами могут быть установлены дополнительные полюсы, при помощи которых корректируется искажение основного магнитного поля, вызванное влиянием нагрузки МПТ. Воздействие корректирующего магнитного поля дополнительных полюсов позволяет уменьшить искрение между щетками и коллектором.

Часть МПТ, создающая магнитный поток, называется *индуктором*.

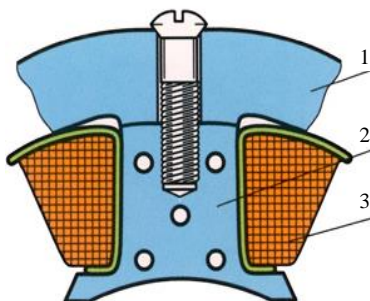


Рисунок 7.74 –  
Главный полюс:  
1 – станина; 2 – сердечник;  
3 – обмотка возбуждения

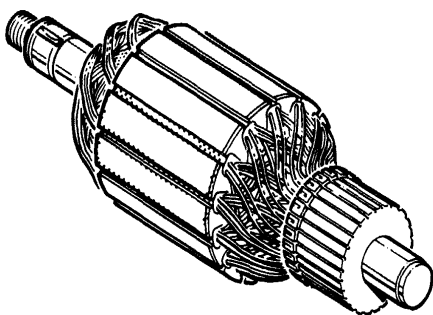


Рисунок 7.75 – Ротор МПТ

*Ротор* (рисунок 7.75) набирают из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь от вихревых токов и насаженных на вал. На внешней поверхности этого цилиндра имеются пазы, внутрь которых укладывается обмотка ротора. Обмотка состоит из отдельных секций, соединенных между собой.

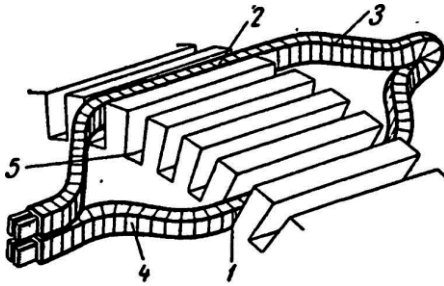


Рисунок 7.76 – Одна из секций обмотки:  
 1 – секция, 2 – активные стороны витка;  
 3, 4 – лобовые части витка;  
 5 – пазы сердечника

*Секция* – элементарная часть роторной обмотки (рисунок 7.76). Она может состоять из одного или нескольких витков. В пазы ротора секция укладывается таким образом, что одна ее часть находится под северным полюсом магнитной системы, а вторая – под южным. Часть секции, лежащая в пазу под полюсом, называется активной стороной секции. Каждая секция содержит две активные стороны, которые объединены лобовыми частями.

Точки соединения секций между собой подключаются к коллектору, который закреплен на валу. *Коллектор* (рисунок 7.77) представляет собой цилиндрическую конструкцию, набранную из пластин кадмированной меди (для увеличения износостойкости). Эти пластины располагаются на изоляционном основании и изолированы друг от друга. Число пластин коллектора зависит от количества точек соединения секций между собой. Коллекторные пластины осуществляют последовательное соединение секций обмотки якоря.

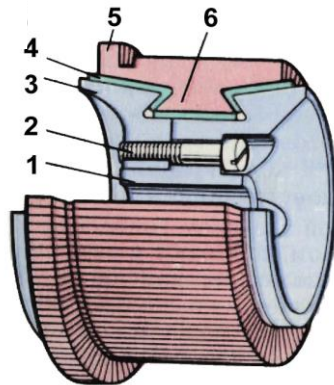


Рисунок 7.77 – Коллектор:  
 1, 3 – стальные части втулки;  
 2 – стягивающий винт;  
 4 – миканитовая прокладка;  
 5 – петушок; 6 – коллекторные пластины

К наружной поверхности коллектора прижимаются *щетки*, закрепленные на станине и изолированные от нее (рисунок 7.78). С помощью коллектора и щеток осуществляется электрическое соединение вращающегося коллектора с щетками.

В обмотке ротора МПТ, как в двигательном, так и в генераторном режимах, появляется ЭДС, поэтому вращающуюся часть МПТ чаще называют *якорем*.

Таким образом, в конструкции МПТ можно выделить две электрические цепи: возбуждения и якоря.



Возбудить машину – означает навести в ней основной магнитный поток. Системы возбуждения, которые создают его, зависят от конструкции и назначения машины постоянного тока.

При независимом возбуждении (рисунок 7.79) основной магнитный поток создается постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой от независимого источника. Для промышленных целей в основном применяют машины постоянного тока с *самовозбуждением*, для которых не требуется дополнительного источника питания. В машинах постоянного тока со смешанным возбуждением параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (МДС этих обмоток совпадают) и встречно (МДС обмоток направлены противоположно друг другу). Графическое и буквенно-цифровое обозначение обмоток приведено в таблице 7.3.

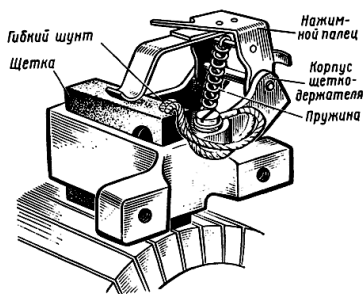
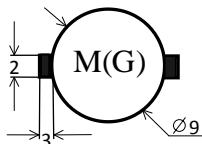
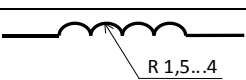


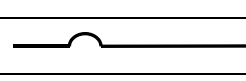



Рисунок 7.78 – Пример конструкции щеточного узла

Таблица 7.3 – Обозначение обмоток машин постоянного тока

Наименование	Обозначение	
	буквенно-цифровое	графическое
1 Обмотка якоря	Я1-Я2 (ГОСТ 183-74) А1-А2 (СТ СЭВ 3170-81) М – двигатель Г – генератор	
2 Независимая обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ 183-74) F1-F2 (СТ СЭВ 3170-81)	
3 Параллельная обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ 183-74) Е1-Е2 (СТ СЭВ 3170-81)	
4 Последовательная обмотка возбуждения	С1-С2 (ГОСТ 183-74) Д1-Д2 (СТ СЭВ 3170-81)	
5 Компенсационная обмотка	К1-К1 (ГОСТ 183-74) С1-С2 (СТ СЭВ 3170-81)	
6 Обмотка дополнительных полюсов	Д1-Д1 (ГОСТ 183-74) В1-В2 (СТ СЭВ 3170-81)	

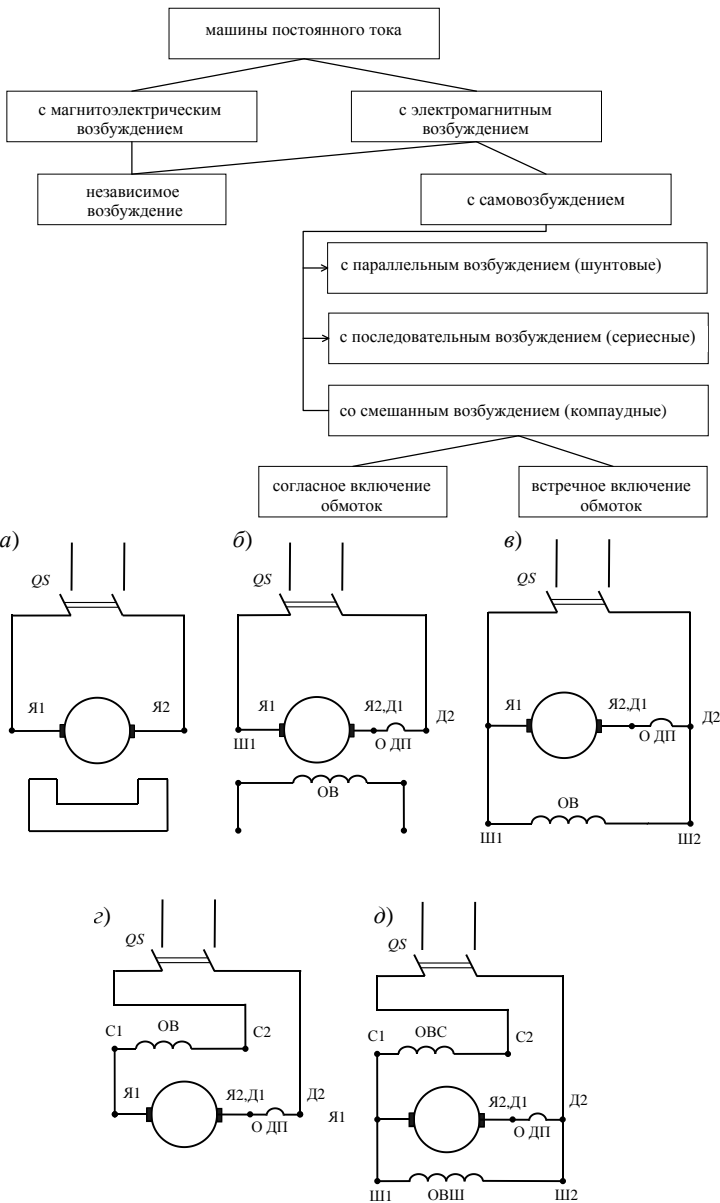


Рисунок 7.79 – Классификация систем возбуждения МПТ: магнитоэлектрическая (а), независимая (б), шунтовая или параллельная (в), сериесная или последовательная (г), компаундная или смешанная (д)

Обмотки параллельного возбуждения имеют большое количество витков, намотанных проводом малого сечения, поэтому их омическое сопротивление большое и по ним протекает небольшой ток. В результате мощность обмоток параллельного возбуждения составляет 1–5 % номинальной мощности машины [17].

Для подключения обмоток якоря и возбуждения используется клеммный щиток, выводы которого маркируются, как правило, следующим образом:

Я1, Я2 – обмотки якоря (ГОСТ 183-74) (A1, A2 по ГОСТ 26772-85);

K1, K2 – компенсационные обмотки (C1, C2);

D1, D2 – обмотки дополнительных полюсов (B1, B2);

C1, C2 – последовательные обмотки возбуждения (серийные) (D1, D2);

Ш1, Ш2 – параллельные обмотки возбуждения (шунтовые) (E1, E2).

*Современные серии МПТ.* В настоящее время используются машины постоянного тока серии П, 2П и более новой – 4П.

Машины серии П классифицируются по наружному диаметру сердечника якоря. Машины серии 2П классифицируются по высоте оси горизонтального вала от 90 до 315 мм. Каждый габарит серии П и 2П имеет две длины: М (Middle) – средняя и L (Long) – длинная. Машины изготавливаются как с параллельным, так и смешанным возбуждением. Исполнение защитное с самовентиляцией (Н), с независимой вентиляцией (Ф), закрытое обдуваемое (О), естественное охлаждение (Б). Климатическое исполнение – У, категория – 4, режим работы – 81.

Пример условного обозначения двигателя серии 2П: 2ПБ 112L У4 – двигатель с естественным охлаждением, высота оси горизонтального вала – 112 мм второй длины, климатическое исполнение – У4.

Серия 4П отличается от серии 2П тем, что магнитопровод статора выполнен из пластин электротехнической стали и все машины снабжены компенсационной обмоткой.

Принцип действия генератора постоянного тока. В генераторах постоянного тока (ГПТ) происходит преобразование механической энергии в электрическую, снимаемую со щеток МПТ. Работа генератора основана на явлении электромагнитной индукции.

Для пояснения принципа действия ГПТ воспользуемся рисунком 7.80. На этом рисунке основное магнитное поле создается полюсами N и S индуктора. Сердечники полюсов, якоря и станины являются частью магнитной цепи машины, через которые проходит основной магнитный поток, пересекая проводники якорной обмотки.

Представленная на рисунке секция якорной обмотки состоит из одного витка. Концы секции подключены к простейшему коллектору, состоящему из двух полуколец, изолированных между собой. Щетки A и B прижимаются к полукольцам (пластинам коллектора), и к ним подключается электрическая нагрузка R.

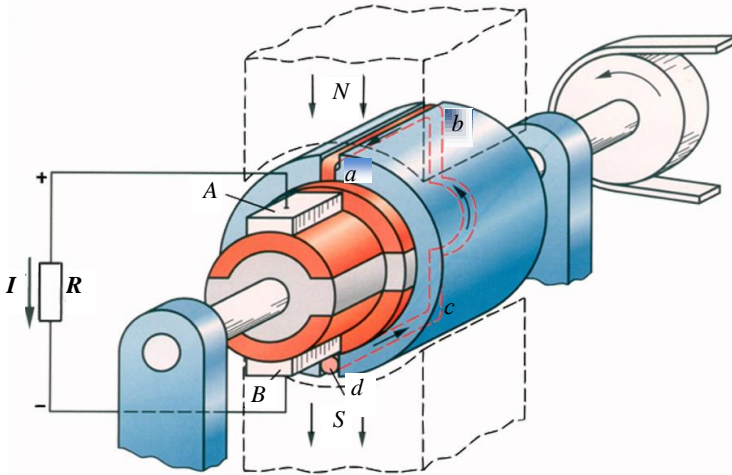


Рисунок 7.80 – Упрощенная модель ГПТ

При вращении якоря в каждой из активных сторон секции (витка) индуцируется ЭДС, мгновенное значение которой

$$e_b = Blv \sin \alpha$$

где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсом и якорем;

$l$  – активная длина двух сторон витка ( $ab$  и  $cd$ );

$v$  – линейная скорость движения проводника;

$\alpha$  – угол поворота витка относительно геометрической нейтральной (воображаемая линия, проходящая посередине между полюсами).

Из графика, приведенного на рисунке 7.81, следует, что ЭДС одного витка  $e_b$ , снимаемая со щеток, имеет неизменную полярность, но пульсирует от максимального значения до нуля.

Для получения во внешней цепи ЭДС, близкой к постоянной, необходимо увеличить количество секций в обмотке якоря, равномерно распределив их по поверхности сердечника ротора, и, соответственно, увеличить число коллекторных пластин. В этом случае суммируются ЭДС всех проводников, включенных последовательно в ветви обмотки, заключенной между щетками.

Таким образом ЭДС реальной МПТ, снимаемая со щеток,

$$E = e_1 + e_2 + \dots + e_{N/(2a)} = (B_1 + B_2 + \dots + B_{N/(2a)})lv = \sum_{i=1}^{N/(2a)} B_i lv,$$

где  $e_1, e_2, \dots, e_{N/(2a)}$  – ЭДС проводников обмотки якоря;

$B_1, B_2, \dots, B_{N/(2a)}$  – магнитная индукция, пронизывающая проводники;

$N$  – количество проводников в обмотке;

$2a$  – число параллельных ветвей.

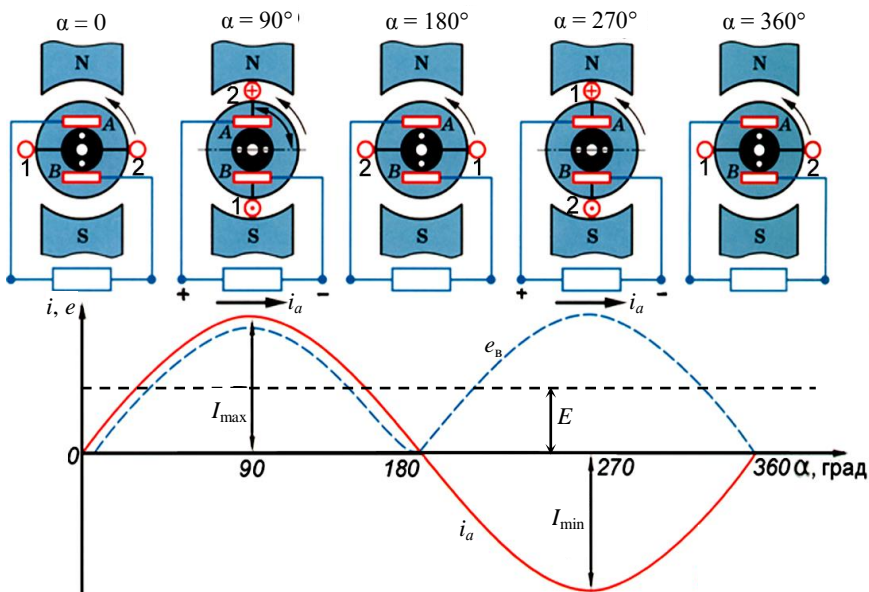


Рисунок 7.81 – Пример выпрямления тока коллектором

При достаточно большом количестве секций в обмотке можно считать

$$\sum_{i=1}^{N/2a} B_i = B_{cp} \frac{N}{2a} = \text{const},$$

где  $B_{cp}$  – среднее значение магнитной индукции под полюсом.

Согласно второму закону Кирхгофа, напряжение  $U$  на зажимах якоря ГПТ будет меньше ЭДС  $E$  на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E - I_a r_a. \quad (7.110)$$

Проводники обмотки якоря с током находятся в магнитном поле, поэтому на них действуют электромагнитные силы, направление которых определяется по правилу левой руки. Эти силы создают механический момент, который в режиме генератора постоянного тока является тормозящим, а в двигательном – движущим.

*Принцип действия двигателя постоянного тока.* В двигателях постоянного тока (ДПТ) происходит преобразование электрической энергии в механическую. При подключении двигателя к внешнему источнику питания в обмотке якоря начинает протекать постоянный ток  $I_a$ . При этом на проводники с током обмотки якоря в магнитном поле будут действовать элек-

тромагнитные силы и возникнет вращающий момент. Направление действия электромагнитной силы при переходе активной стороны секции от одного полюса к другому не изменяется, т. к. коллектор меняет направление тока в обмотке якоря.

Направление ЭДС в двигателе *не совпадает* с направлением тока якоря  $I_a$  и напряжения  $U$ , поэтому она называется *противоэлектродвижущей* силой.

Приложенное к якору двигателя напряжение  $U$  уравнивается противоЭДС  $E$  и падением напряжения в обмотке якоря  $I_a r_a$ :

$$U = E + I_a r_a. \quad (7.111)$$

Таким образом, в генераторном режиме  $U < E$ , а в двигательном –  $U > E$ .

Каждая электрическая машина характеризуется номинальными данными, которые указываются на ее заводском щитке. К основным номинальным данным машин постоянного тока относятся:

- 1) номинальная мощность  $P_n$  генератора – это мощность на его зажимах, которую можно отдать потребителям;
- 2) номинальное напряжение  $U_n$  – это напряжение, для работы на котором предназначена электрическая машина;
- 3) номинальная сила тока  $I_n$ , которая определяется номинальными значениями мощности и напряжения;
- 4) номинальная частота вращения  $n_n$  – это частота вращения якоря (ротора), развиваемая в номинальном режиме.

#### 7.4.2 Магнитный поток, магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитная система четырехполюсной машины в режиме холостого хода показана на рисунке 7.82. Магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения 4, проходит через полюсы 1, станину 2, зубцовую зону ротора 3 и воздушный зазор 5. Магнитный поток должен быть всегда замкнут.

*Основы расчета магнитной цепи.* Главная задача при проектировании – сконструировать машину с максимальной мощностью. Мощность зависит от значения магнитного потока, который, в свою очередь, создается магнитодвижущей силой (МДС). МДС необходима для того, чтобы магнитный поток проходил по магнитопроводу, подобно тому как благодаря ЭДС электрический ток проходит по проводнику. Размеренность МДС – амперы. Чтобы создать МДС в 100 ампер, можно намотать на магнитопровод 100 витков и пропустить ток равный 1 А или взять один виток с током 100 А.

При расчете магнитных цепей сначала задаются значением магнитного потока  $\Phi$ , а потом определяют ток обмотки возбуждения  $I_b$  и число витков.

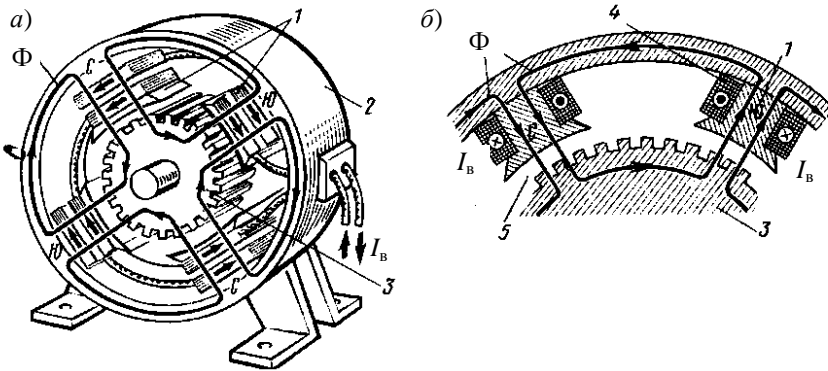


Рисунок 7.82 – Магнитная система четырехполюсной машины в режиме холостого хода:  
*a* – общий вид; *б* – разрез

Алгоритм решения задачи:

$$\Phi \rightarrow B \rightarrow H \rightarrow F \rightarrow I_B w ,$$

где  $B$  – магнитная индукция;

$H$  – напряженность магнитного поля;

$F$  – магнитодвижущая сила;

$w$  – количество витков обмотки возбуждения.

МДС, необходимая для создания требуемого магнитного потока, будет равна сумме МДС участков.

Магнитный поток зависит от тока возбуждения. *Зависимость магнитного потока от тока возбуждения называется кривой намагничивания машины* (рисунок 7.83). Ее можно разделить на два участка.

На первом участке зависимость прямолинейна. Это означает, что вся МДС машины тратится только на преодоление воздушного зазора, магнитное сопротивление которого постоянно. С ростом тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока сталь насыщается и начинает оказывать сопротивление магнитному потоку. Поэтому характеристика теряет свою линейность.

Обычно ток возбуждения принимают таким, чтобы рабочая точка находилась в месте перегиба характеристики. Это означает, что магнитная система практически всех электрических машин насыщена.

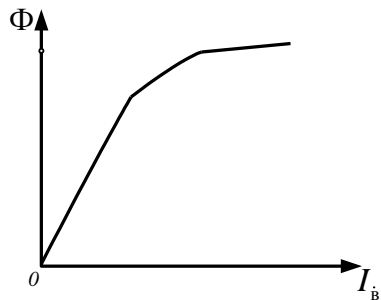


Рисунок 7.83 –  
 Кривая намагничивания

На рисунке 7.84 показано примерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре под главным полюсом и кривая распределения магнитной индукции в зазоре машины постоянного тока при холостом ходе. Магнитный поток  $\Phi$  в зазоре можно определить как

$$\Phi = B_{cp} l \tau,$$

где  $B_{cp}$  – средняя индукция в пределах полюсного деления;  
 $l$  – длина полюса по оси;  
 $\tau$  – полюсное деление.

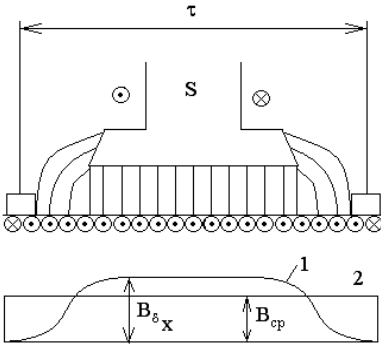


Рисунок 7.84 – Распределение магнитного поля в зазоре под полюсом

За время оборота якоря потокоцепление  $\Psi$  одного витка при  $p$  пар полюсов изменяется на величину  $\Delta\Psi = 2\Phi 2p$ ; время одного оборота якоря  $\Delta t = 60/n$ . Следовательно, в каждом витке секции индуцируется ЭДС  $e_b = -\Delta\Psi/\Delta t = -4\Phi p n/60$ .

Если число проводов на поверхности якоря равно  $N$ , число витков секций  $N/2$  и число параллельных ветвей обмотки  $2a$ , ЭДС машины постоянного тока  $E$  определяется как

$$E = \frac{4\Phi p n}{60} \frac{N}{2} \frac{1}{2a} = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n \Phi = c_E n \Phi, \quad (7.112)$$

где  $c_E = pN/(60a)$ .

Таким образом, можно определить ЭДС как результат пересечения линий магнитного поля  $N$  проводами якоря, вращающегося с частотой  $n$ .

Определим электромагнитный момент  $M_{эм}$ , действующий на провода и на якорь. Электромагнитная сила равна произведению числа проводов  $N$  на среднюю магнитную индукцию  $B_{cp}$ , активную длину проводов  $l$  и ток в ветви обмотки  $i_a = I_a/(2a)$ . Диаметр якоря выразим через полюсное деление  $D = 2p\tau/\pi$ . Тогда электромагнитный момент

$$M_{эм} = B_{cp} l \frac{I_a}{2a} \frac{p\tau}{\pi} = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} I_a \Phi, \quad (7.113)$$

где  $\Phi = B_{cp} l \tau$ .

Обозначив неизменную для данной машины величину  $c_M = pN/(2\pi a)$ , получим сокращенные выражения для  $E$  и  $M_{эм}$ , которыми часто пользуются на практике:

$$\begin{cases} E = c_E n \Phi, \\ M_{эм} = c_M I_a \Phi. \end{cases} \quad (7.114)$$



### 7.4.3 Реакция якоря. Коммутация

*Реакция якоря машин постоянного тока.* Для холостого хода распределение в зазоре магнитного поля, создаваемое основными полюсами, представлено на рисунке 7.85, а. Вокруг проводников якоря с током создается магнитный поток  $\Phi_a$ , направление которого определяется по правилу правого буравчика (рисунок 7.85, б). Поля якоря и индуктора, действующие совместно, образуют результирующее поле (рисунок 7.85, в). Воздействие поля якоря на поле индуктора называется *реакцией якоря*.

По величине результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  становится меньше магнитного потока индуктора  $\Phi$  из-за того, что вследствие насыщения магнитной цепи увеличение потока под краем полюса будет происходить меньше, а ослабление – больше.

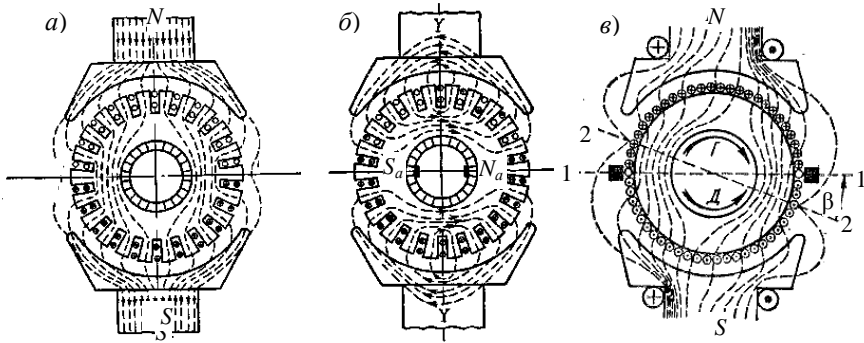


Рисунок 7.85 – Магнитное поле:  
а – полюсов; б – якоря; в – результирующее при нагрузке

Линия, проходящая через точки, на которых индукция результирующего магнитного поля равна нулю, называется *физической нейтралью* (линия 2–2 на рисунке 7.85, в). Таким образом, реакция якоря при нагрузке искажает магнитный поток, уменьшает его значение и сдвигает физическую нейтраль с геометрической нейтрали (при холостом ходе геометрическая и физическая нейтрали совпадают). В генераторе физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а в двигателе – против направления вращения ротора. Поэтому результирующее магнитное поле в генераторном режиме работы ослабевает под набегающей частью полюса, а в двигательном – под сбегающей.

Реакция якоря вызывает искажение результирующего магнитного поля машины, что приводит к следующим изменениям.

1 Повышается напряжение между соседними коллекторными пластинами, когда стороны секции, соединенные с указанными пластинами, проходят под краем полюса с большей индукцией. При перегрузках машины это

напряжение может вызвать искрообразование между пластинами и стать причиной кругового огня на коллекторе.

2 У машины с насыщенным магнитопроводом магнитный поток уменьшается, т. к. увеличение магнитной индукции у одного из краев полюса будет меньше, чем снижение его у другого. В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов понижается ЭДС, у двигателей – вращающий момент.

Для устранения нежелательного влияния реакции якоря при проектировании машины принимают следующие меры:

- устанавливают добавочные полюса;
- увеличивают воздушный зазор под главными полюсами;
- используют специальные материалы для изготовления машины;
- используют компенсационную обмотку.

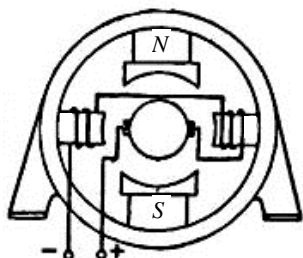


Рисунок 7.86 –  
Схема включения  
дополнительных полюсов

*Дополнительные полюсы.* Основным способом улучшения коммутации в современных МПТ является создание корректирующего магнитного поля с помощью дополнительных полюсов (рисунок 7.86) для  $P_n > 0,3$  кВт.

Намагничивающая сила дополнительных полюсов направлена против намагничивающей силы якоря, вследствие чего компенсируется магнитное поле якоря в зоне коммутации, а так как обе они пропорциональны току нагрузки, то получается автоматическая компенсация магнитного поля якоря при любой нагрузке. Число витков обмотки дополнительных полюсов рассчитывают так, чтобы магнитный поток, создаваемый ими, был на 15–30 % больше магнитного потока якоря. Магнитный поток дополнительных полюсов создает в короткозамкнутой секции коммутирующую ЭДС, равную по величине и противоположную по направлению реактивной ЭДС.

Можно сформулировать правило: за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря в режиме генератора должен следовать дополнительный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – той же полярности.

В машинах большой мощности, работающих с большими перегрузками, кроме дополнительных полюсов применяют *компенсационную обмотку* (рисунок 7.87), соединяемую последовательно с обмоткой якоря и укладываемую в пазы полюсных наконечников. Поле компенсационной обмотки нейтрализует поперечную реакцию якоря под главными полюсами.

Количество витков компенсационной обмотки подбирают такое, чтобы созданный ими поток был равен потоку реакции якоря. При встречном включении потоки реакции якоря и компенсационной обмотки будут ком-

пенсировать друг друга, и распределение магнитной индукции в зазоре главных полюсов остается практически неизменным. Компенсационная обмотка в машинах серии 2П применяется для машин постоянного тока средней и большой мощности, а в серии 4П – начиная с машин постоянного тока малой мощности.

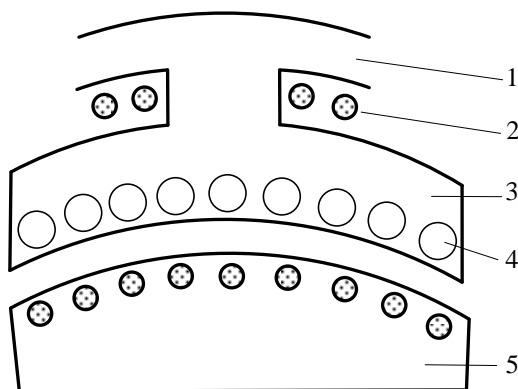


Рисунок 7.87 – Компенсационная обмотка:  
 1 – станина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюс;  
 4 – пазы для компенсационной обмотки; 5 – якорь

Увеличение зазора под главными полюсами только ослабляет поток реакции якоря, потому что воздух имеет большое сопротивление для магнитного потока. Но это также ослабляет и основной магнитный поток, поэтому в таких машинах требуется большая МДС обмоток главных полюсов, что ведет к увеличению размеров полюсных катушек, полюсов и размеров машины в целом. Применяется только для машин малой мощности.

Поперечная реакция якоря уменьшается также при изготовлении сердечников главных полюсов из листовой холоднокатаной стали. Магнитное сопротивление такой стали в продольном (направлении проката) и поперечном направлениях неодинаково. Поэтому главные полюса выполняют так, чтобы основной магнитный поток проходил в продольном направлении, а поток реакции якоря – в поперечном.

*Коммутация в машинах постоянного тока.* За время перехода щеток с одной коллекторной пластины на другую секция, заключенная между ними, замыкается накоротко щеткой, и направление тока в ней меняется на противоположное. Этот процесс называется *коммутацией*. При коммутации между щетками и коллектором может наблюдаться искрение. Сильное искрение приводит к повреждению поверхности коллектора и щеток – это наиболее слабый элемент в МПТ.

Причины искрения щеток на коллекторе разделяют на механические, потенциальные и электромагнитные.

Механические причины приводят к неполному прилеганию щеток к коллектору. Они связаны с некачественным изготовлением коллектора и щеточного узла: неровная или загрязненная поверхность коллектора, его эллиптичность, биение, слабое давление щеток на коллектор и т. д.

Потенциальные причины искрения связаны с напряжением между коллекторными пластинами. При вращении щетки стираются, а угольная пыль от них заполняет изоляционные промежутки между пластинами коллектора. При искрении угольная пыль сгорает. В машинах малой мощности данный процесс протекает относительно безвредно. При большом токе происходит оплавление смежных пластин, что отрицательно сказывается и на щетках (они быстро изнашиваются). Искры могут перейти в электрическую дугу (круговой огонь на коллекторе).

Электромагнитные причины связаны с протеканием электромагнитных процессов в коммутируемых секциях. Эти причины являются основными.

Как правило, искрение щеток – это результат совместного действия многих причин. Качество коммутации оценивается степенью искрения под сбегающим краем щетки (таблица 7.4).

**Таблица 7.4 – Характеристики степеней искрения по ГОСТ 183-74**

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 <sup>1/4</sup>	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
1 <sup>1/2</sup>	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках и перегрузке	Следы нагара на щетках, а также следы почернения на коллекторе, легко устранимые протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки	Следы нагара на щетках, почернение на коллекторе, не устранимое с его поверхности
3	Искрение под всем краем щетки с крупными вылетающими искрами. Допускается только для моментов прямого включения или реверса	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности бензином

При переходе секции из одной параллельной ветви в другую в ней происходит изменение направления тока. Промежуток времени, в течение которого направление тока в секции изменяется на противоположное, называется периодом коммутации  $T_k$  (рисунок 7.88).

Изменение тока секции на интервале коммутации вызывает появление в ней ЭДС самоиндукции

$$e_s = -L_s di/dt,$$

где  $L_s$  – индуктивность секции, поддерживающая то направление тока, которое было до коммутации, т. е. до замыкания секции щеткой.

Если в процессе коммутации щетка замыкает несколько коллекторных пластин, то изменение тока происходит в нескольких секциях. Так как секции имеют магнитную связь, то в коммутируемых секциях создается ЭДС взаимной индукции  $e_m$ . Кроме того, коммутируемая секция может пересекаться магнитными силовыми линиями результирующего магнитного поля МПТ, которые наводят в секции ЭДС вращения. Таким образом, закон изменения тока коммутируемых секций формируется под воздействием ЭДС  $e_s$ ,  $e_m$  и  $e_{вр}$ .

ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называют *реактивной ЭДС*, а вращения – *коммутирующей ЭДС*.

Если суммарное значение ЭДС секции  $e = e_s + e_m + e_{вр}$  равно нулю, то имеет место линейный закон изменения тока в секции (см. рисунок 7.88).

При  $e_s + e_m + e_{вр} > 0$  на начальном этапе ток изменяется медленнее, чем при прямолинейной коммутации, поэтому такая коммутация называется замедленной, а при  $e_s + e_m + e_{вр} < 0$  – ускоренной.

В связи с тем, что скорость изменения тока влияет на значения  $e_s$  и  $e_m$ , то при замедленной коммутации значение ЭДС в конце периода коммутации будет больше, чем в начале. Это может привести к искрению под сбегавшим краем щеток. При ускоренной коммутации искрение может наблюдаться под набегающим краем щетки. В связи с вышеизложенным, наиболее приемлемым видом коммутации является прямолинейная.

Основной причиной неудовлетворительной коммутации является наличие дополнительного тока. Коммутация – сложный процесс, зависящий от множества причин, поэтому используют следующие способы ее улучшения: устанавливают добавочные полюса, сдвигают щетки с геометрической нейтрали.

Установка добавочных полюсов в настоящее время является лучшим способом улучшения коммутации для машин мощностью свыше 1 кВт. В машинах мощностью до 1 кВт коммутирующее поле в зоне коммутации создается смещением щеток с геометрической нейтрали.

Добавочные полюса располагаются между основными по линиям геометрических нейтралей. Число витков обмотки добавочного полюса принимают несколько больше, чем необходимо для полной компенсации реактив-

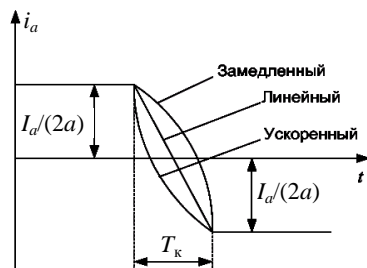


Рисунок 7.88 – Различный характер изменения тока в коммутируемой секции

ной ЭДС, чтобы коммутация была ускоренной. Сердечники добавочных полюсов работают в ненасыщенном режиме за счет увеличенных воздушных зазоров.

*Улучшение коммутации путем сдвига щеток* применяют в машинах малой мощности без дополнительных полюсов. Коммутирующее поле при этом можно создать путем сдвига щеток с геометрической нейтрали, благодаря чему в зоне коммутации начинает действовать поле главных полюсов. Чтобы индуцируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС  $e_{вр}$  имела правильное направление, поле главных полюсов в зоне коммутации должно быть направлено против поля реакции якоря. Для этого в генераторе щетки необходимо повернуть в сторону вращения, а в двигателе – наоборот. Установку щеток иногда производят экспериментально, наблюдая за искрением.

Недостатками указанного способа являются:

- необходимость сдвига щеток при изменении нагрузки;
- невозможность использования для реверсируемых машин, т. к. при изменении направления вращения меняется направление смещения физической нейтрали.

Для хорошей коммутации нужно также, чтобы коллектор был цилиндрическим и гладким, щетки хорошо притертыми к коллектору и легко передвигались в обоймах щеткодержателей, пружины щеткодержателей нормально натянутыми, а сама машина не была перегружена [17].

#### 7.4.4 Генераторы постоянного тока

Генератор, в котором обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника тока (аккумулятора, батареи или другой машины постоянного тока), называют *генератором с независимым возбуждением*. Генераторы независимого возбуждения делятся на генераторы с электромагнитным возбуждением, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от постороннего источника (аккумуляторной батареи, вспомогательного генератора, возбудителя постоянного тока или выпрямителя переменного тока (выпрямитель переменного тока – преобразователь электрической энергии; механическое, электровакуумное, полупроводниковое или другое устройство, предназначенное для преобразования входного электрического тока переменного направления в ток постоянного направления)), и на магнитоэлектрические генераторы с полюсами в виде постоянных магнитов. Генераторы последнего типа изготавливаются только на малые мощности.

Если напряжение на обмотку возбуждения подается с зажимов якоря того же генератора, то его называют *генератором с самовозбуждением*. В зависимости от того, каким образом присоединена в этих генераторах обмотка возбуждения к обмотке якоря, различают генераторы параллельного (шунтовые) (см. рисунок

7.79), последовательного (сериесные) и смешанного (компаундные) возбуждения.

На практике наиболее распространены ГПТ малой и средней мощности, которые большей частью имеют параллельное или смешанное возбуждение, т. к. они не требуют отдельного источника питания индуктора. Крупные машины постоянного тока часто работают с независимым возбуждением. Генераторы с последовательным возбуждением менее распространены.

*Генераторы независимого возбуждения.* Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными величинами, определяющими работу генераторов. Такими основными величинами являются: напряжение на зажимах  $U$ ; ток возбуждения  $I_B$ ; ток якоря  $I_a$  или ток нагрузки  $I$ ; частота вращения  $n$ .

Обычно генераторы работают при  $n = \text{const}$ . Поэтому основные характеристики генераторов определяются при  $n = n_n = \text{const}$ .

Рассмотрим три основные характеристики генераторов:

- 1) холостого хода;
- 2) внешняя;
- 3) регулировочная.

Характеристикой *холостого хода* генератора называется зависимость напряжения на зажимах якоря от тока возбуждения  $U = f(I_B)$ , снятая при отсутствии нагрузки ( $n = \text{const}$ ). Снятие характеристики целесообразно начать с максимального напряжения  $U \approx (1,15 \dots 1,25)U_n$  (рисунок 7.89). Из-за насыщения магнитной цепи напряжение вначале уменьшается по нисходящей ветви характеристики медленно, а затем быстрее.

При  $I_B = 0$  генератор развивает напряжение  $U_{\text{ост}}$ , которое обычно составляет 2–3 % от  $U_n$  вследствие остаточной намагниченности полюсов и ярма индуктора. Характеристика холостого хода имеет вид неширокой гистерезисной петли из-за явления гистерезиса в магнитной цепи индуктора. При снятии характеристики холостого хода ток  $I_B$  необходимо менять по нисходящей ветви (см. рисунок 7.89), т. к. в противном случае точки будут рассеиваться, а не ложиться на данную гистерезисную петлю.

Характеристика холостого хода позволяет судить о степени насыщения магнитной цепи машины при номинальном напряжении, проверять соответствие расчетных данных экспериментальным и составляет основу для исследования эксплуатационных свойств машины.



Рисунок 7.89 – Характеристика холостого хода

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения  $U = f(I_a)$  при  $I_b = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  (рисунок 7.90) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки в естественных условиях, когда ток возбуждения не регулируется.

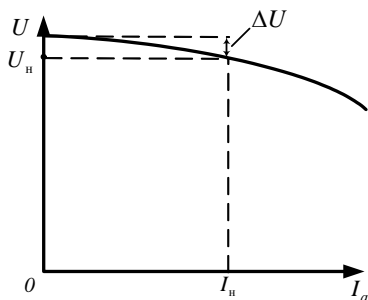


Рисунок 7.90 – Внешняя характеристика генератора

При увеличении тока  $I_a$  напряжение  $U$  несколько уменьшается по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря  $I_a r_a$  и уменьшения ЭДС  $E$ , ввиду снижения потока под воздействием поперечной реакции якоря. При дальнейшем увеличении  $I_a$  напряжение начинает падать быстрее, т. к. под воздействием реакции якоря поток уменьшается и рабочая точка смещается на более круто падающий участок кривой намагничивания.

Внешнюю характеристику рекомендуется снимать при токе возбуждения  $I_b = I_{bн}$ , который обеспечивает номинальное значение тока нагрузки при номинальном напряжении  $U = U_n$ . С уменьшением тока нагрузки до нуля напряжение на зажимах генератора возрастает на значение  $\Delta U$ , которое называется номинальным изменением напряжения генератора.

Регулировочная характеристика  $I_b = f(I_a)$  при  $U = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не изменялось (рисунок 7.91). С ростом  $I_a$  ток  $I_b$  необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения  $I_a r_a$  и реакцию якоря.

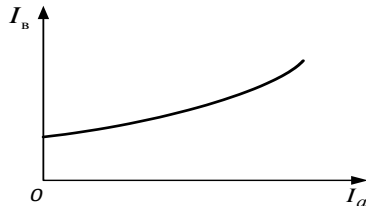


Рисунок 7.91 – Регулировочная характеристика генератора

*Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения.* При пуске генератора с самовозбуждением начальный ток в обмотке возбуждения возникает за счет ЭДС, наводимой в обмотке якоря остаточным магнитным полем главных полюсов. Для поддержания самовозбуждения необходимо, чтобы начальный ток усиливал это поле. Добавочный магнитный поток увеличивает ЭДС якоря и, как следствие, ток в обмотках главных полюсов. Однако из-за магнитного насыщения магнитопровода одинаковым приращением увеличивающегося тока возбуждения соответствуют все меньшие приращения магнитного потока (рисунок 7.92).



Процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока ЭДС якоря превосходит падение напряжения в обмотке возбуждения. При определенной величине магнитного потока наступает электрическое равновесие, а дальнейшее повышение магнитного потока, ЭДС якоря и тока возбуждения прекращается. Самовозбуждение может осуществляться при величине сопротивления обмотки возбуждения, не превышающей известного предельного значения, зависящего от электрических параметров генератора. Поэтому для самовозбуждения необходимо выполнение следующих трех условий:

- 1) наличие остаточного магнитного потока полюсов;
- 2) правильное подключение концов обмотки возбуждения, при котором остаточный магнитный поток совпадает по направлению с потоком обмотки возбуждения;
- 3) сопротивление цепи возбуждения  $r_v$  при данной скорости вращения  $n$  должно быть ниже некоторого критического значения, или частота вращения при данном  $r_v$  должна быть выше  $n_{кр}$ .

Для самовозбуждения ГПТ достаточно, чтобы остаточный поток составлял 2–3 % от номинального. Остаточный поток такого значения практически всегда имеется в уже работавшей машине. Вновь изготовленную или размагнитченную машину можно намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

Так как ток  $I_v$  мал, то  $U \approx E$ , и характер кривой холостого хода у генератора с параллельным возбуждением будет такой же, как и у генератора с независимым возбуждением. Внешняя характеристика  $U = f(I_a)$  при  $r_v = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  генератора параллельного возбуждения падает круче (рисунок 7.93, а, линия 2), чем у генератора независимого возбуждения, так как, помимо падения напряжения  $I_a r_a$  и реакции якоря, на это также влияет уменьшение тока  $I_v$  при уменьшении  $U$ . Регулировочная характеристика ГПТ параллельного возбуждения представлена линией 2 на рисунке 7.93, б.

*Генераторы смешанного возбуждения.* Они имеют две обмотки возбуждения, расположенные на общих главных полюсах: параллельную и последовательную. Если эти обмотки создают намагничивающую силу одинакового направления, то их включение называется согласным; в противном случае соединение обмоток возбуждения называется встречным. Обычно

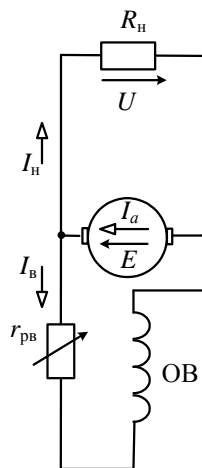


Рисунок 7.92 – Принципиальная электрическая схема ГПТ параллельного возбуждения

применяется согласное включение обмоток возбуждения, причем чаще всего основная часть намагничивающей силы возбуждения (65–80 %) создается параллельной обмоткой возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения самовозбуждается так же, как и генератор параллельного возбуждения, и их характеристики холостого хода аналогичны.

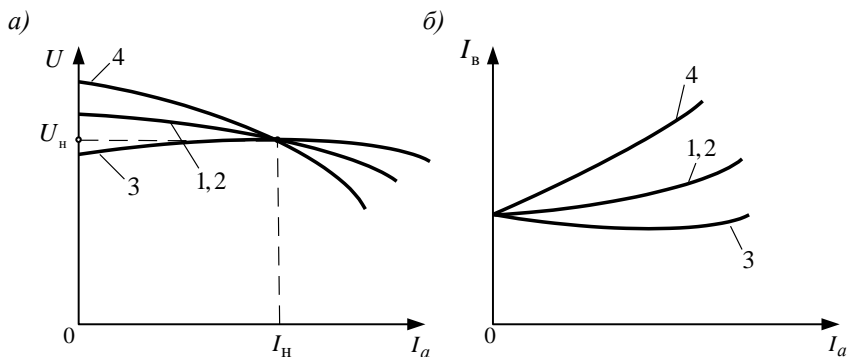


Рисунок 7.93 – Сравнение внешних (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов независимого (1), параллельного (2), смешанного возбуждения с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки

На рисунке 7.93 сопоставлены внешние и регулировочные характеристики генераторов различных типов. Генератор смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки возбуждения имеет самую благоприятную внешнюю характеристику. Его напряжение при надлежащем выборе намагничивающей силы последовательной обмотки мало изменяется с изменением нагрузки.

#### 7.4.5 Двигатели постоянного тока

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Двигатель параллельного возбуждения. Рассмотрим более подробно характеристики двигателя параллельного возбуждения (рисунок 7.94), которые определяют его рабочие свойства.

Решая совместно выражения (7.111) и (7.112) относительно  $n$ , находим уравнение скоростной характеристики  $n = f(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}. \quad (7.115)$$

Выразив  $I_a$  из формулы (7.114) и подставив в выражение (7.115), получим уравнение механической характеристики  $n = f(M)$ , которое определяет зависимость частоты вращения двигателя от развиваемого электромагнитного момента

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (7.116)$$

Скоростная и механическая характеристики двигателя определяются равенствами (7.115) и (7.116) при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . При отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря эти характеристики называются *естественными*.

При увеличении  $I_a$  поток  $\Phi$  несколько уменьшится вследствие действия поперечной реакции якоря. В результате этого частота  $n$ , согласно выражению (7.115), будет стремиться возрасти.

С другой стороны, падение напряжения  $I_a r_a$  вызывает уменьшение скорости. Ввиду того, что изменение  $\Phi$  относительно мало, механические характеристики  $n = f(M)$  двигателя параллельного возбуждения, определяемые равенством (7.116), при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  совпадают по виду с характеристиками  $n = f(I_a)$  (рисунок 7.95). По этой же причине эти характеристики практически прямолнейны.

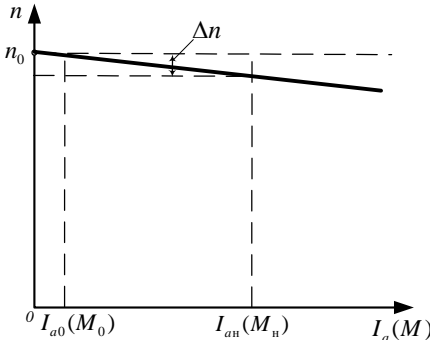


Рисунок 7.95 – Скоростная и механическая естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Изменение частоты вращения  $\Delta n$ , при переходе от холостого хода  $[I_{a0}(M_{a0})]$  к номинальной нагрузке  $[I_{ан}(M_{ан})]$ , для двигателя параллельного возбуждения при работе на естественной характеристике мало и составляет 2–8 % от  $n_n$ . Такие слабо падающие характеристики называются *жесткими*. Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения с жесткими характеристиками применяются в установках, требующих сохранения почти постоянной частоты вращения при изменении нагрузки (металлорежущие станки, прокатные станы).

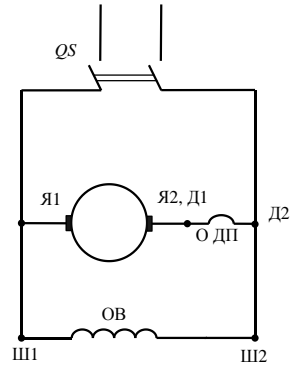


Рисунок 7.94 – Схема ДПТ параллельного возбуждения

Регулировать частоту вращения ДПТ, на основании формулы 7.115, можно тремя способами:

- 1) изменением магнитного потока  $\Phi$ ;
- 2) включением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря;
- 3) изменением питающего напряжения  $U$ .

Регулирование частоты вращения с помощью ослабления магнитного потока производится обычно с помощью реостата в цепи возбуждения  $R_{рв}$ . При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ( $R_{ра} = 0$ ) и  $U = \text{const}$  характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$  имеют вид, показанный на рисунке 7.96. На графике  $M_{ст}$  – статический момент нагрузки двигателя (момент сопротивления механизма, приводимого во вращение с учетом механических потерь в самом двигателе). Характеристики  $n = f(I_a)$  сходятся на оси абсцисс ( $n = 0$ ) в общей точке при весьма большом токе  $I_a = U/r_a$ .

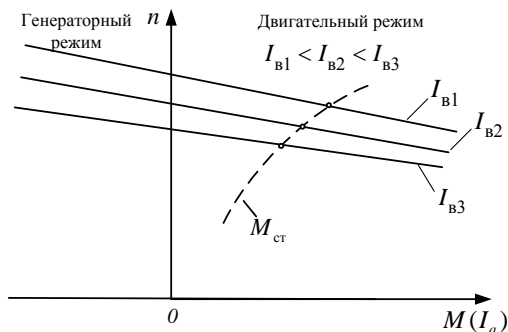


Рисунок 7.96 – Механические и скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при разных токах возбуждения

Нижняя характеристика на рисунке 7.96 соответствует номинальному потоку. Значения  $n$  при установившемся режиме работы соответствуют точкам пересечения рассматриваемых характеристик с кривой  $M_{ст} = f(n)$  для постоянной нагрузки (штриховая линия).

Значение наибольшего магнитного потока ограничено насыщением стали машины, а т. к. практически все электрические машины насыщены, существенно увеличить магнитный поток невоз-

можно, поэтому регулирование осуществляется в сторону увеличения частоты вращения. Магнитный поток при этом уменьшают. С уменьшением магнитного потока снижается момент двигателя  $M = C_M \Phi I_a$ . Диапазон регулирования,  $n_{max} / n_{min} = 3 \dots 4$ , ограничен «снизу» насыщением стали, а «сверху» – неустойчивой работой двигателя.

Регулирование частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря. Если последовательно в цепь якоря включить добавочное сопротивление  $R_{ра}$ , то вместо выражений (7.115) и (7.116) получим

$$n = \frac{U - I_a (r_a + R_{ра})}{c_E \Phi} \quad \text{и} \quad n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{(r_a + R_{ра}) M}{c_E c_M \Phi^2}.$$

Сопротивление  $R_{pa}$  может быть регулируемым и должно быть рассчитано на длительную работу.

Характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$  двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением для различных значений  $R_{pa}$  при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$  изображены на рисунке 7.97. Верхняя характеристика – естественная. При больших значениях  $R_{pa}$  характеристики становятся крутопадающими (мягкими, т. е. изменяются в широких пределах).

*Регулирование частоты вращения ДПТ путем изменения подаваемого*

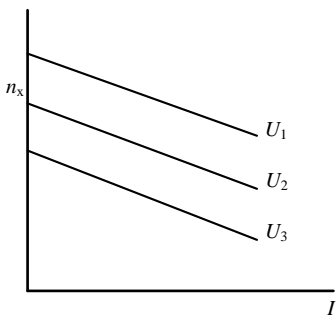


Рисунок 7.98 – Скоростные характеристики при изменении напряжения в цепи якоря  $U_1 > U_2 > U_3$

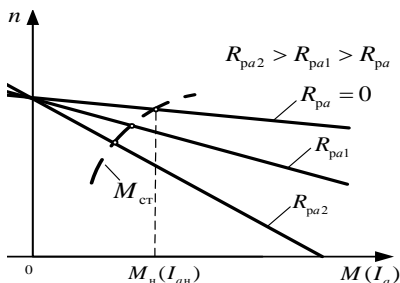


Рисунок 7.97 – Механические и скоростные характеристики регулирования частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря

*напряжения.* Как видно из рисунка 7.98, характеристики параллельны и смещены относительно друг друга только по высоте. Диапазон регулирования ограничен «сверху» условиями коммутации, «снизу» – нагревом двигателя, т. к. при снижении напряжения нужно увеличивать ток якоря, чтобы мощность не снижалась. При этом  $n_{\text{max}} / n_{\text{min}} < 20$ .

Для регулирования указанным способом необходим источник регулируемого напряжения. В качестве такого источника можно использовать:

– регулируемый автотрансформатор со скользящими контактами (рисунок 7.99). Данную схему можно использовать для управления двигателями малой и средней мощности;

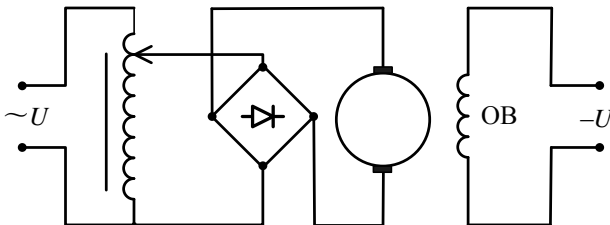


Рисунок 7.99 – Включение двигателя через регулируемый автотрансформатор

– тиристорный регулятор напряжения (рисунок 7.100), который преобразует переменное напряжение сети в регулируемое выпрямленное;

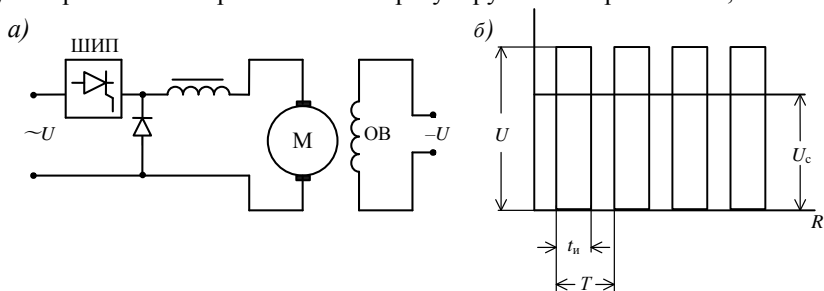


Рисунок 7.100 – Система с тиристорным регулятором напряжения:  
а – схема; б – форма кривой напряжения

– генератор с независимым возбуждением (рисунок 7.101). Двигатель  $M$  получает питание от генератора  $G$ , который приводится во вращение приводным двигателем  $M$ . Напряжение регулируется реостатом в цепи обмотки генератора  $R$ ;

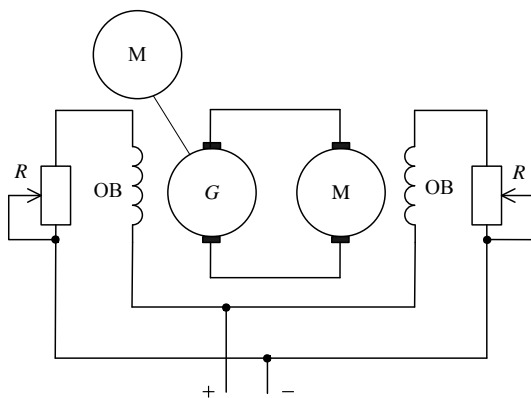


Рисунок 7.101 – Регулирование «генератор–двигатель»

– широтно-импульсный преобразователь (ШИП, рисунок 7.102, а). В этом случае напряжение на якорь подается в виде импульсов (рисунок 7.102, б), и среднее значение напряжения на якоре  $U_{cp}$ , которое определяет частоту вращения двигателя:

$$U_{cp} = U t_n / T,$$

где  $U$  – напряжение одного импульса;

$t_n$  – время импульса;

$T$  – период импульса.

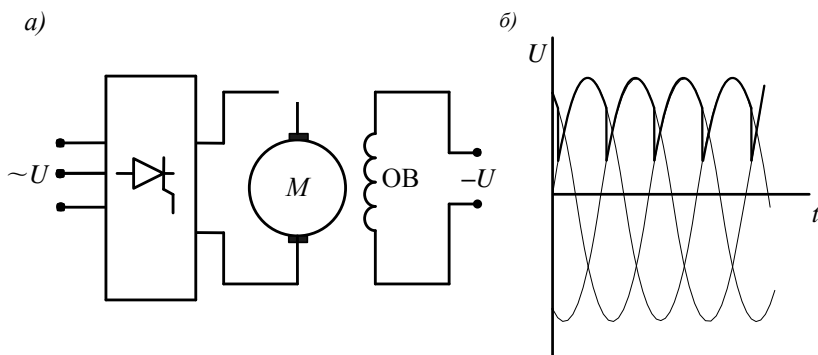


Рисунок 7.102 – Импульсное регулирование частоты вращения:  
 а – схема; б – импульсы напряжения, подаваемого на якорь

При изменении времени импульса изменяется среднее напряжение  $U_{cp}$  и, следовательно, частота вращения.

Из рисунка 7.102 видно, что при использовании тиристорного регулятора и широтно-импульсного преобразователя на якорь подается пульсирующее напряжение, которое вызывает пульсирующий ток якоря. Пульсирующий ток увеличивает потери и нагрев двигателя, а также ухудшает коммутацию, что является недостатком указанных способов регулирования.

На рисунке 7.103 изображены рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения. Они представляют собой зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока  $I_a$ , частоты вращения  $n$ , момента  $M$  и КПД  $\eta$  от отдаваемой мощности  $P_2$  на валу двигателя при  $U = const$  и  $I_B = const$ .

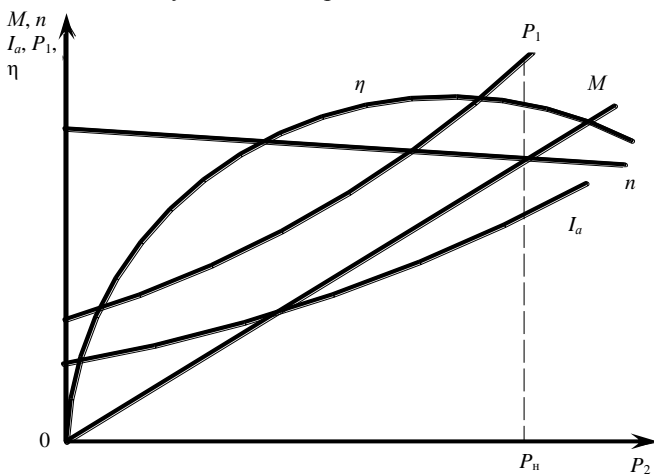


Рисунок 7.103 – Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

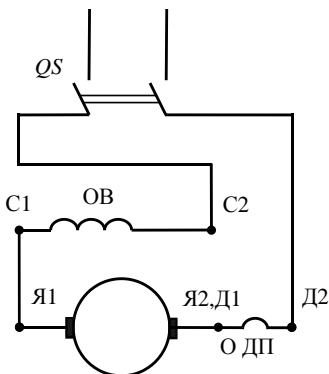


Рисунок 7.104 – Схема ДПТ последовательного возбуждения

что  $\Phi = k_{\Phi}I$ , тогда формула (7.113) примет вид:  $M = c_M k_{\Phi} I^2$ .

Коэффициент пропорциональности  $k_{\Phi}$  при  $I < I_n$  является практически постоянным, и лишь при  $I > 0,8I_n$  вследствие насыщения магнитной цепи начинает несколько уменьшаться.

Скоростная характеристика двигателя, представленная на рисунке 7.105, является мягкой и имеет гиперболический характер. При  $k_{\Phi} = \text{const}$  вид кривой  $n = f(I)$  показан штриховой линией.

При небольшой нагрузке на валу, исходя из естественной механической характеристики двигателя (кривая  $I$  на рисунке 7.106), частота вращения двигателя резко возрастает «разнос», и возникает круговой огонь на коллекторе машины. Поэтому работа двигателей последовательного возбуждения на холостом ходу не допускается, а использование ременной передачи неприемлемо. Обычно минимально допустимая нагрузка  $P_2 \approx 0,2P_n$ , при которой частота может достигнуть значения  $n > n_{\text{пред}}$ , опасна для двигателя.

Поскольку у двигателей параллельного возбуждения  $M \sim I_a$ , а у двигателей последовательного возбуждения  $M \sim I_a^2$ , то двигатели последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного

Характеристика  $n = f(P_2)$ , как следует из рассмотренных выше положений, является линейной, а зависимости  $P_1 = f(P_2)$ ,  $I_a = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  имеют общий для всех электрических машин вид. Зависимость момента на валу двигателя  $M = f(P_2)$  представляет собой почти прямую линию, т. к. момент пропорционален нагрузке на валу:  $M = P_2/\omega$ .

Двигатель последовательного возбуждения (рисунок 7.104). В таких двигателях ток якоря одновременно является и током возбуждения:  $I_a = I_b = I$ . Ток якоря такого двигателя изменяется в широких пределах, а вместе с ним изменяется магнитный поток  $\Phi$ . Можно написать,

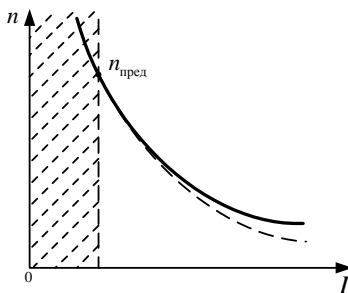


Рисунок 7.105 – Естественная скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения



развивают значительно больший пусковой момент. Для двигателей параллельного возбуждения  $n \approx \text{const}$ , а для двигателей последовательного –  $n \approx U / \sqrt{M}$ . Поэтому для двигателей параллельного возбуждения  $P_2 \sim M$ , а при последовательном возбуждении  $P_2 \sim \sqrt{M}$ . В связи с этим двигатели последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случаях тяжелых условий пуска, т. к. создают большой пусковой момент. Они находят применение для электрической тяги (трамвай, метро, электровозы на железных дорогах).

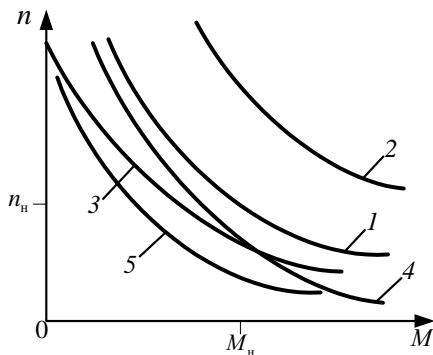


Рисунок 7.106 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования частоты вращения

*Регулирование частоты вращения посредством ослабления поля.* Регулирование  $n$  посредством ослабления поля производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением, либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки возбуждения. В последнем случае должны быть предусмотрены соответствующие выводы из обмотки возбуждения (см. кривую 2 на рисунке 7.106).

*Регулирование частоты вращения путем шунтирования якоря.* При шунтировании якоря ток и поток возбуждения возрастают, а частота уменьшается. Так как падение напряжения  $R_{\text{я}} I$  мало, то сопротивление  $R_{\text{ша}}$  находится практически под полным напряжением сети, его значение должно быть значительным, потери в нем будут велики и КПД сильно уменьшится (см. кривую 3 на рисунке 7.106). Кроме того, шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена.

*Регулирование частоты вращения включением сопротивления в цепь якоря.* Этот способ позволяет регулировать  $n$  вниз от номинального значения (см. кривую 4 на рисунке 7.106). Так как при этом способе значительно снижается КПД, он находит ограниченное применение.

*Регулирование частоты вращения изменением напряжения.* Этим способом можно регулировать  $n$  вниз от номинального значения с сохранением высокого КПД. Рассматриваемый способ регулирования широко применяется в транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель, и регулирование осуществляется путем переключе-

чения двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное (см. кривую 5 на рисунке 7.106).

На рисунке 7.107 приведены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.

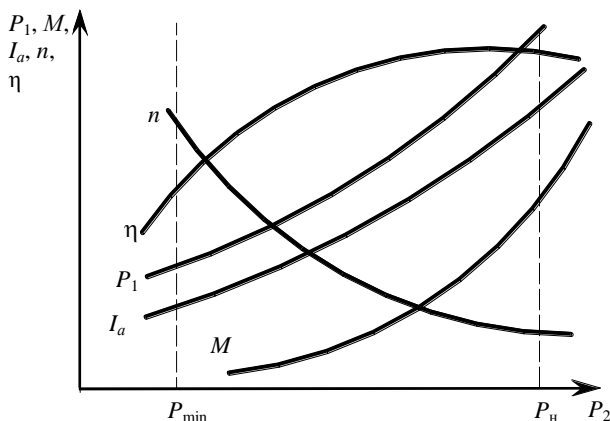


Рисунок 7.107 – Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения. При согласном включении

последовательной обмотки возбуждения (рисунок 7.108) поток  $\Phi$  с увеличением нагрузки возрастает. Поэтому такой двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую механическую характеристику (рисунок 7.109, кривая 3) по сравнению с двигателем параллельного возбуждения (рисунок 7.109, кривая 1), но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения (рисунок 7.109, кривая 2). В зависимости от назначения двигателя доля последовательной обмотки в создании полной намагничивающей силы возбуждения может меняться в широких пределах.

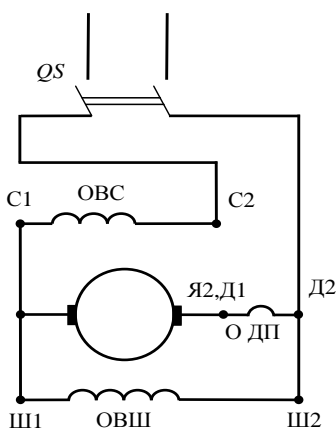


Рисунок 7.108 – Схема ДПТ смешанного возбуждения

Частота вращения двигателей смешанного возбуждения обычно регулируется так же, как и в двигателях

параллельного возбуждения. Двигатели смешанного возбуждения применяются в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения частоты вращения при изменении нагрузки. Эти двигатели используются также в случаях, когда момент нагрузки изменяется в широких пределах, т. к. при этом мощность двигателя снижается, как и у двигателя с последовательным возбуждением. В связи с этим двигатели смешанного возбуждения применяются для привода на постоянном токе троллейбусов, компрессоров, строгальных станков, печатных машин, кранов и т. д.

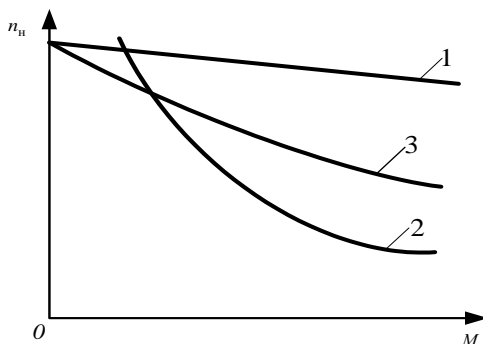


Рисунок 7.109 – Естественные механические характеристики двигателей параллельного (1), последовательного (2) и смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки (3)

При пуске  $n = 0$ , согласно выражениям  $I_a = (U - E)/r_a$  и  $E = c_E n \Phi$  получим  $I_a = U/r_a$ . В МПТ средней и большой мощности  $r_a$  мало, и поэтому при *прямом пуске* ток якоря недопустимо велик:  $I_a = (10 \dots 50)I_n$ . Большой ток:

#### 7.4.6 Пуск, реверсирование и торможение двигателей

- вызывает значительные динамические усилия в двигателе, что может привести к его разрушению;
- ухудшает условия коммутации, возможен круговой огонь по коллектору;
- вызывает значительное падение напряжения в линии, что отрицательно влияет на работу других электропотребителей.

Возможны три способа *пуска двигателя в ход*:

- 1) прямой, когда цепь якоря подключается непосредственно к сети на ее полное напряжение;
- 2) пусковым реостатом, включаемым последовательно в цепь якоря;
- 3) понижением напряжения в цепи якоря.

*Прямой* пуск применяется только для двигателей малой мощности до нескольких сотен ватт, у которых  $r_a$  относительно велико, поэтому при пуске  $I_a \leq (4 \dots 6)I_n$ , а процесс длится не более 1–2 с.

Пуск с помощью *пускового реостата*. При пуске  $n = 0$ , значит ток якоря  $I_a = U / (R_a + R_n)$ , где  $R_n$  – сопротивление пускового реостата. Значение  $R_n$

подбирается так, чтобы в начальный момент пуска ток уменьшился до значения  $I_a = (1,4 \dots 1,7)I_n$  [в машинах малой мощности –  $(2 \dots 2,5)I_n$ ]. Число ступеней пускового реостата (рисунок 7.110) и значения их сопротивлений рассчитываются таким образом, чтобы при надлежащих интервалах времени переключения ступеней максимальные и минимальные значения тока  $I_a$  на всех ступенях получались одинаковыми. По условиям нагрева ступени реостата рассчитываются на *кратковременную* работу под током.

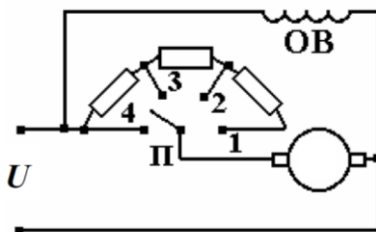


Рисунок 7.110 – Схема реостатного пуска ДПТ

Недостаток реостатного способа – большие потери в пусковом реостате, поэтому в двигателях большой мощности применяют пуск при пониженном напряжении, для которого необходим регулятор напряжения. В качестве регулятора напряжения используются: регулируемые автотрансформаторы с выпрямительным блоком, генераторы постоянного тока, тиристорные регуляторы, широтно-импульсные преобразователи, переключение с последовательного соединения двигателей на параллельное.

Ни в коем случае нельзя допускать разрыва цепи параллельного возбуждения двигателя, работающего без нагрузки. В этом случае поток возбуждения исчезает не сразу, а поддерживается индуктируемыми в ярме вихревыми токами. Однако этот поток будет быстро уменьшаться, и частота  $n$  будет сильно увеличиваться («разнос» двигателя). При этом ток якоря значительно возрастет и возникнет круговой огонь, вследствие чего возможно повреждение машины, и поэтому в цепях возбуждения не ставят предохранителей и выключателей.

*Реверсирование* (изменение направления вращения двигателя) производится путем изменения направления действия вращающего момента. Для этого требуется изменить полярность обмотки возбуждения или якоря. При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним.

*Торможение двигателей постоянного тока.* Для того чтобы замедлить или остановить рабочую машину, наряду с механическими, применяют электрические способы торможения. Их преимущество в том, что торможе-

ние осуществляется электромагнитным полем без износа тормозных колодок.

При *механическом торможении* обычно производится прижатие тормозных колодок на тормозной диск. Недостатком механических тормозов является то, что тормозной момент и время торможения зависят от случайных факторов: попадания масла или влаги на тормозной диск и пр. Поэтому такое торможение применяется при условии неограниченного времени и тормозного пути.

*Электрическое торможение* обеспечивает достаточно точное получение требуемого тормозящего момента, но не может обеспечить фиксацию механизма в заданном месте. Поэтому электрическое торможение при необходимости дополняется механическим, которое входит в действие после окончания электрического.

Различают следующие виды электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

*Рекуперативное* – это такое торможение, при котором машина работает генератором с отдачей энергии в сеть, что соответствует генераторному режиму (рисунок 7.111). При этом ЭДС  $E$  должна быть больше напряжения источника питания  $U$ , и ток будет протекать в направлении ЭДС, являясь током генераторного режима. Запасенная кинетическая энергия будет преобразовываться в электрическую и частично возвращаться в сеть.

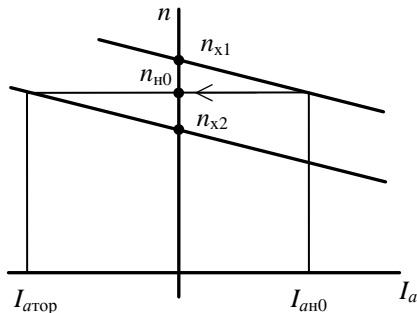


Рисунок 7.111 – Характеристика рекуперативного торможения

Такое торможение наиболее экономично, но не всегда осуществимо в реальных условиях, т. к. частота вращения должна быть выше, чем в режиме холостого хода. Из рисунка 7.111 видно, что при указанном способе рекуперативного торможения частота вращения уменьшится только до  $n_x$ . Чтобы совсем остановить двигатель, требуется постоянное увеличение магнитного потока либо уменьшение напряжения.

*Динамическое* – это генераторное торможение, при котором кинетическая энергия рабочей машины и самого двигателя гасится на специ-

альном сопротивлении. Динамическое торможение выполняется при включении на зажимы вращающегося возбужденного двигателя резистора  $R_{\text{торм}}$ . Запасенная кинетическая энергия преобразуется в электрическую и рассеивается в  $R_{\text{торм}}$  как тепловая. Это наиболее распространенный способ торможения. Схема и скоростная характеристика приведены на рисунке 7.112, б.

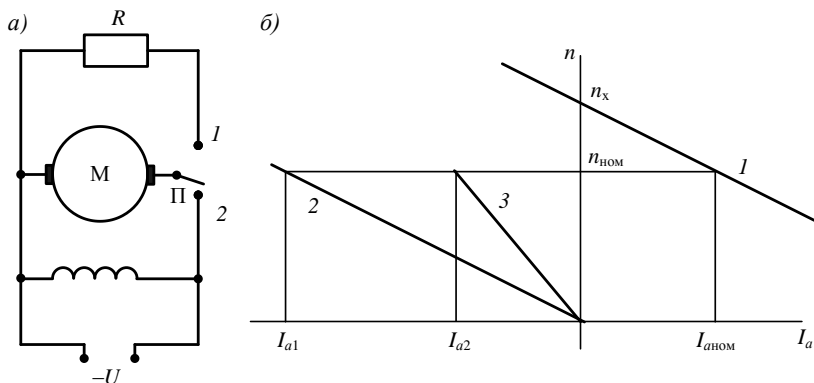


Рисунок 7.112 – Динамическое торможение:

*a* – схема; *б* – скоростные характеристики

(1 – естественная; 2 – тормозная при  $R_{\text{торм}} = 0$ ; 3 – тормозная при  $R_{\text{торм}} > 0$ )

При переключателе П в положении 1 машина работает двигателем с частотой вращения якоря  $n_n$  и током якоря  $I_a$  на естественной характеристике 1. Если необходимо затормозить, переключатель П переводят в положение 2. Якорь двигателя продолжает вращаться, обмотка возбуждения от сети не отключена и наводит магнитный поток, следовательно, машина начинает работать генератором. Если сопротивление  $R$  равно нулю (клеммы якоря замкнуты), ток якоря в первый момент в несколько раз больше номинального, что соответствует тормозной характеристике 2 (характеристики 1 и 2 параллельны). Если сопротивление  $R$  отлично от нуля, наклон скоростной характеристики увеличивается (тормозная характеристика 3) и ток торможения уменьшается.

Торможение *противовключением* выполняется путем изменения направления электромагнитного момента, развиваемого двигателем. Для этого достаточно изменить направление магнитного потока. При таком изменении ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  в якоре суммируются. Для ограничения тока  $I$  следует включать резистор с начальным сопротивлением  $R_p \approx (U + E) / I_{\text{max}}$ , где  $I_{\text{max}}$  – наибольший допустимый ток. Торможение связано с большими потерями энергии.

При переводе переключателя П (рисунок 7.113) из положения 7 в положение 2, ток якоря изменится на противоположный. Согласно правилу ле-

вой руки, момент также изменится на противоположный, т. е. будет тормозящим. По мере торможения тормозной момент будет уменьшаться пропорционально току. Однако при  $n = 0$  он не будет равен нулю, и если двигатель не отключить, то он раскрутит якорь двигателя в обратную сторону.

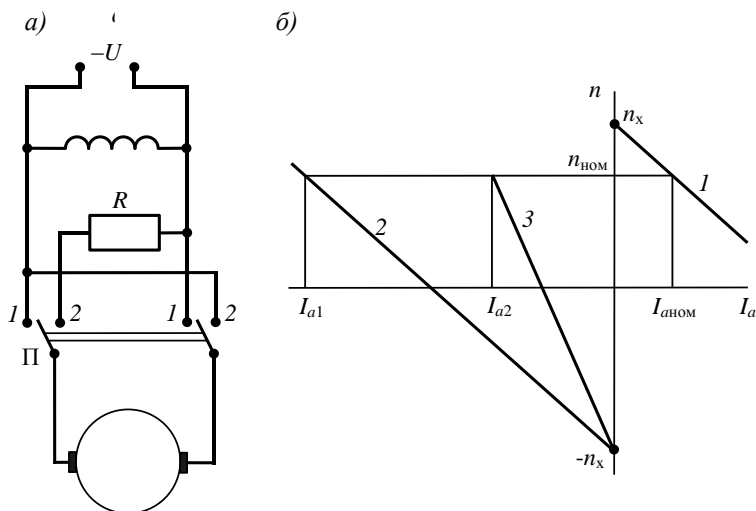


Рисунок 7.113 – Торможение противовключением:  
 а – схема; б – скоростные характеристики  
 (1 – естественная; 2 – тормозная при  $R = 0$ ; 3 – тормозная при  $R > 0$ )

#### 7.4.7 Потери мощности в машинах постоянного тока

В электрических машинах преобразование механической энергии в электрическую и наоборот связано с потерями части энергии, которая переходит в тепло, вследствие чего происходит повышение температуры отдельных частей машины. Допустимые пределы превышения температуры машины над температурой окружающей среды определяются теплостойкостью изолирующих материалов и, в первую очередь, обмоток машины. В тех случаях, когда повышение температуры превосходит установленные пределы для данного класса изоляции, срок службы обмоток резко сокращается.

Различают основные и добавочные *потери мощности*, причем из основных, в свою очередь, выделяют постоянные и переменные. К постоянным потерям относят магнитные, или потери в стали машины, и механические.

*Магнитные потери* складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Первые из них вызываются в основном перемагничиванием стали якоря при вращении его в магнитном поле машины, а вторые – возникновением в магнитной системе вихревых токов.

Магнитные потери зависят от частоты  $f$  перемагничивания стали якоря, т. е. от скорости его вращения, и от величины магнитной индукции  $B$ .

Потери на гистерезис

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \frac{f}{100} B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\Gamma}$  – коэффициент, зависящий от марки стали ( $\sigma_{\Gamma} \approx 2,4 \dots 4,7$ );

$B_m$  – максимальное значение магнитной индукции в стали якоря;

$m$  – масса стали.

Потери на вихревые токи

$$P_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вх}} \left( \frac{f}{100} \right)^2 B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\text{вх}}$  – коэффициент, зависящий от толщины листов стали и ее качества

( $\sigma_{\text{вх}} = 0,6 \dots 5,6$  при толщине листов стали до 0,5 мм; для листов

стали толщиной 1 мм  $\sigma_{\text{вх}}$  возрастает до 22,4).

Суммарные потери в стали

$$P_{\text{ст}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}}.$$

*Механические потери* состоят из потерь в подшипниках на трение щеток о коллектор и вентиляционных, которые включают в себя потери на трение частей машины о воздух. Механические потери зависят только от частоты вращения и не зависят от нагрузки. В машинах постоянного тока мощностью до 100 кВт данные потери составляют соответственно около 2–4 % от номинальной мощности машины.

К *переменным* потерям, которые называют также потерями в меди или электрическими потерями, относят потери на нагрев обмоток якоря и возбуждения и потери в щеточных контактах.

$$P_{\text{эл}} = I_a^2 r_a + I_B^2 r_B,$$

где  $I_a$  – ток якоря;

$r_a$  – сопротивление всей цепи якоря;

$I_B$  – ток возбуждения;

$r_B$  – сопротивление обмотки возбуждения.

К *добавочным* относят потери, вызванные различными вторичными явлениями, зависящими от тока нагрузки. Например, искажение кривой магнитного поля в воздушном зазоре при нагрузке под влиянием поперечной реакции якоря. В результате этого магнитный поток распределяется по зубцам и сечению спинки якоря неравномерно.



КПД машин постоянного тока

$$\eta = P_2/P_1,$$

где  $P_1$  – подводимая к машине мощность [у генератора – это механическая мощность, сообщаемая ему первичным двигателем (при независимом возбуждении  $P_1$  включает в себя также мощность для питания цепи обмотки возбуждения); у двигателя – мощность, потребляемая им от источника постоянного тока];

$P_2$  – полезная мощность (у генератора – это электрическая мощность, отдаваемая приемнику; для двигателя – механическая на валу).

Современные МПТ имеют высокий КПД: для мощностей 10 кВт КПД составляет 83–87 %, мощностью 100 кВт – 88–93 % и для мощности 1000 кВт – 92–96 %. Машинам большей мощности свойственен более высокий КПД.

#### 7.4.8 Универсальные коллекторные двигатели

Если любой двигатель постоянного тока включить на переменное напряжение – он будет работать. В двигателе меняется направление тока в якоре и, почти одновременно с ним, направление магнитного потока. Поэтому, согласно правилу левой руки, направление вращающего момента остается прежним. На этом принципе и основана работа универсального коллекторного двигателя. Универсальный коллекторный двигатель дороже двигателя постоянного тока и имеет худшие рабочие характеристики.

Если сравнить рассматриваемый двигатель с асинхронным, он также выше его по стоимости и менее надежен. При этом универсальный коллекторный двигатель может работать от одной фазы сети переменного тока (коммунально-бытовые потребители), его частота вращения ротора меньше снижается под нагрузкой, чем у АД и лучше возможности регулирования частоты вращения [17]. В связи с вышеперечисленным, область применения универсальных коллекторных двигателей – привод бытовых электроприборов, различного электроинструмента и т. п.

Необходимым условием работы двигателя постоянного тока на переменном является одновременное изменение направления тока якоря и магнитного потока. Наилучшим образом это происходит у двигателей последовательного возбуждения, потому что у них обмотка возбуждения обладает меньшим количеством витков и, следовательно, меньшей индуктивностью. Поэтому время запаздывания его магнитного потока по сравнению с током якоря будет меньше, чем у двигателя с параллельным возбуждением. Это значит, что универсальные коллекторные двигатели имеют последовательное возбуждение и отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюса делаются из пластин электротехнической стали,

чтобы уменьшить потери в магнитопроводе, которые от переменного магнитного потока выше, чем от постоянного. При работе двигателя на переменном токе сопротивление обмотки выше из-за ее индуктивности, и чтобы частота вращения была такая, как при работе на постоянном токе, необходимо увеличить ток якоря, для чего в обмотке делают отпайки и переменное напряжение подают на меньшее количество витков. Мгновенное значение электромагнитного момента равно:

$$M = C_M \Phi i_a,$$

где  $i_a$  – мгновенное значение тока якоря, изменяющегося по синусоидальному закону ( $i_a = I_{a\max} \sin \omega t$ ).

Мгновенное значение магнитного потока:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin(\omega t - \varphi),$$

где  $\varphi$  – угол запаздывания между током якоря и магнитным потоком из-за индуктивности обмотки.

Учитывая формулы для магнитного потока и тока якоря и выполнив тригонометрические преобразования, получим

$$M = 0,5 C_M \Phi_{\max} I_{a\max} \cos \varphi - 0,5 C_M I_{a\max} \Phi_{\max} \cos(2\omega t + \varphi).$$

Первая составляющая момента является постоянной, вторая – переменной (рисунок 7.114, б, линии 1 и 2), т. е. результирующий момент – переменный, а иногда тормозной (см. рисунок 7.114, б, кривая 3). Однако пульсации момента не нарушают работу двигателя из-за наличия момента инерции.

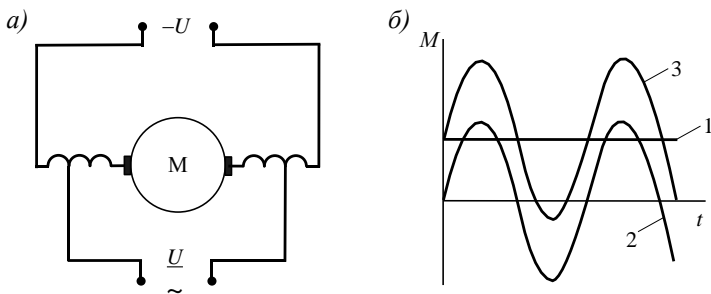


Рисунок 7.114 – Универсальный коллекторный двигатель:  
а – схема; б – моменты (1 – постоянный; 2 – переменный; 3 – суммарный)

Условия коммутации в универсальном коллекторном двигателе значительно хуже, чем в двигателе постоянного тока. Кроме результирующей реактивной ЭДС, в коммутируемой секции наводится еще и ЭДС от переменного магнитного поля, так называемая трансформаторная ЭДС  $E_{\text{тр}}$

$$E_{\text{тр}} = 4,44 f w \Phi_{\max}.$$

Способы улучшения коммутации не полностью ограничивают трансформаторную ЭДС, из-за чего универсальные коллекторные двигатели для средней и большой мощности не применяются.

Ток якоря при работе на переменном токе больше, чем на постоянном из-за наличия реактивной составляющей тока, а также из-за больших потерь в стали. По этим причинам КПД двигателя на переменном токе меньше. При работе на переменном токе частота вращения в большей степени зависит от нагрузки из-за наличия индуктивной составляющей обмоток:

$$n = \frac{U - I_a \sqrt{r_a + x_a}}{c_E \Phi},$$

где  $x_a$  – индуктивное сопротивление цепи якоря.

### Контрольные вопросы

- 1 Чем на практике обусловлена необходимость изменения напряжения?
- 2 Какие функции выполняет сердечник в трансформаторе?
- 3 Принцип работы трансформатора.
- 4 От чего зависит величина ЭДС в обмотке трансформатора?
- 5 От чего зависит величина магнитной индукции в сердечнике трансформатора?
- 6 Коэффициент трансформации трансформатора.
- 7 Приведенные параметры вторичной обмотки трансформатора и их определение.
- 8 Опыт холостого хода трансформатора.
- 9 Опыт короткого замыкания трансформатора.
- 10 Почему увеличение тока во вторичной обмотке вызывает возрастание тока в первичной обмотке?
- 11 Почему рост тока во вторичной обмотке приводит к изменению напряжения на выходе трансформатора?
- 12 Влияние характера нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора.
- 13 Схема замещения трансформатора.
- 14 Постоянные и переменные потери в трансформаторе.
- 15 Почему не рекомендуется работа трансформатора с большой недогрузкой?
- 16 Процентное изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.
- 17 Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки.
- 18 Определение и условие максимума КПД трансформатора.
- 19 Приведите некоторые типы специальных трансформаторов и охарактеризуйте особенности их применения.
- 20 Конструкция и разновидности асинхронных машин.
- 21 Вращающееся магнитное поле и условия его возникновения.
- 22 Принцип действия асинхронного двигателя.
- 23 Факторы, влияющие на частоту вращения магнитного поля статора.
- 24 ЭДС в роторной обмотке при неподвижном и вращающемся роторе.
- 25 Ток в роторной обмотке при вращающемся роторе.
- 26 Вращающий момент асинхронного двигателя.

- 27 Механическая характеристика асинхронного двигателя.
- 28 Какой момент в двигателе называется максимальным (покажите на механической характеристике).
- 29 Факторы, влияющие на величину максимального момента.
- 30 Почему с увеличением тормозного момента частота вращения ротора уменьшается?
- 31 Что влияет на величину критического скольжения?
- 32 Почему при пуске двигателя возникает большой пусковой ток?
- 33 Пути увеличения пускового момента.
- 34 Способы уменьшения пускового тока в двигателе.
- 35 Регулирование частоты вращения ротора асинхронного двигателя.
- 36 Как осуществить реверсирование двигателя?
- 37 Почему не рекомендуется работа асинхронного двигателя с недогрузкой?
- 38 Почему частота вращения ротора асинхронного двигателя не достигает частоты вращения поля статора?
- 39 Как напряжение питания влияет на величину пускового момента?
- 40 Приведите примеры применения машин постоянного тока в генераторном и двигательном режимах.
- 41 Объясните принцип действия ГПТ.
- 42 Объясните принцип действия ДПТ.
- 43 Как устроена машина постоянного тока?
- 44 Что понимают под реакцией якоря МПТ?
- 45 Дайте определение процессу коммутации. Какие существуют способы улучшения коммутации?
- 46 Каково назначение коллектора ГПТ?
- 47 Дайте сравнительную оценку ГПТ различных способов возбуждения с помощью характеристики холостого хода, внешней и регулировочной характеристик.
- 48 Объясните, как происходит процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением, и какие факторы влияют на величину ЭДС  $E$  на зажимах якоря.
- 49 Почему снижается напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении тока нагрузки?
- 50 Дайте сравнительную оценку ДПТ различных способов возбуждения с помощью их характеристик и приведите их области применения.
- 51 Что подразумевается под механическими, магнитными, электрическими потерями в машинах постоянного тока?
- 52 Как можно изменить направление вращения якоря ДПТ?
- 53 Почему во время работы ДПТ нельзя разрывать цепь возбуждения?
- 54 Перечислите способы регулирования частоты вращения ДПТ.
- 55 Как осуществляется пуск ДПТ?
- 56 Укажите области применения синхронных машин.
- 57 Изложите принцип работы синхронного генератора.
- 58 Какое влияние оказывает на внешнюю характеристику реакция якоря при активной, активно-индуктивной, активно-емкостной нагрузке?
- 59 Изложите принцип работы синхронного двигателя. Поясните, как формируются вращающий момент в синхронном двигателе
- 60 Запишите формулу для вращающего момента, приведите угловую характеристику.

61 Как осуществляется пуск в ход синхронного двигателя?

62 Перечислите достоинства и недостатки применения синхронных двигателей.

## 8 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

### 8.1 Основные свойства полупроводников

Полупроводниками называются вещества, которые по своей удельной проводимости являются промежуточными между проводниками и диэлектриками. Отличительная особенность полупроводников – сильная зависимость электропроводности от температуры и концентрации примесей. Электропроводность полупроводника пропорциональна концентрации подвижных носителей заряда и их подвижности.

У проводников большое количество свободных электронов, у диэлектриков валентные электроны удерживаются ковалентными связями, у полупроводников структура как у диэлектриков, но ковалентные связи значительно слабее. Достаточно сравнительно небольшого количества энергии, получаемой из внешней среды (температура, освещенность, сильное электрическое поле), чтобы электроны полупроводника разорвали ковалентные связи и стали свободными. С увеличением температуры возрастает число электронов, переходящих из валентной зоны в зону проводимости, и в отличие от проводников проводимость полупроводников возрастает с ростом температуры. Диапазон энергий, в котором лежит энергия электрона, удерживаемого ковалентной связью, называется зоной валентности или валентной зоной. Диапазон энергий, в котором лежит энергия электрона, разорвавшего ковалентную связь и ставшего свободным, называется зоной проводимости. Графическое изображение этих энергетических зон называется зонной энергетической диаграммой (рисунок 8.1). Для того чтобы электрон смог разорвать ковалентную связь и стал свободным, он должен получить энергию, большую ширины запрещенной зоны  $\Delta W$ .

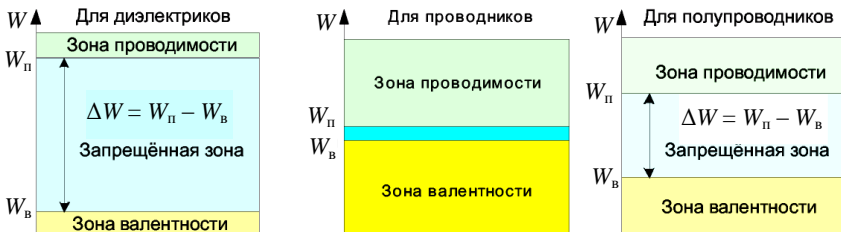


Рисунок 8.1 – Зонная энергетическая диаграмма

*Собственная проводимость полупроводников.* Собственным полупроводником, или же полупроводником  $i$ -типа, называется идеально химически

чистый полупроводник с однородной кристаллической решеткой (рисунок 8.2).

В силовой полупроводниковой технике применяются в основном химические элементы IV группы периодической системы – германий (Ge), кремний (Si) и арсенид галлия (GaAs), имеющие кристаллическую структуру. Кремний широко распространен, его содержание в земной коре составляет 28 %, но техника получения чистого кремния очень сложна, поэтому кремниевые приборы стоят дороже, чем германиевые, хотя германий является редким элементом.

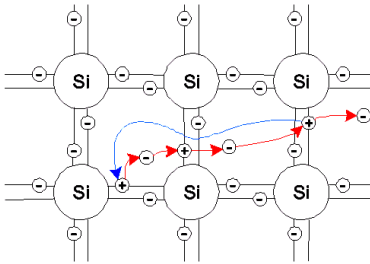


Рисунок 8.2 – Процесс рекомбинации зарядов

Если электрон получил энергию, большую ширины запрещенной зоны, он разрывает ковалентную связь и становится свободным. На его месте образуется вакансия, которая имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона и называется *дыркой*. Дырки в полупроводнике ведут себя как положительно заряженные частицы. Процесс образования пары зарядов электрон-дырка называется *генерацией заряда*. Свободный электрон может занимать место дырки, восстанавливая

ковалентную связь и при этом излучая избыток энергии. Такой процесс называется *рекомбинацией зарядов* (см. рисунок 8.2). Протекание тока в полупроводнике обусловлено не только перемещением свободных электронов, но и перемещением дырок. Это отличает механизм электропроводности полупроводников от проводников. В полупроводниках под действием электрического поля в одном направлении перемещаются свободные электроны, а в другом – дырки.

В полупроводнике *i*-типа концентрация электронов  $n_i$  равна концентрации дырок  $p_i$ , т. е.  $n_i = p_i$ . Дырки и свободные электроны, образующиеся в результате генерации носителей заряда, называются собственными носителями заряда, а проводимость полупроводника за счет собственных носителей заряда называется собственной проводимостью проводника.

*Примесная проводимость проводников.* Число электронов проводимости и дырок, возникающих в свободном от примесей полупроводнике, относительно невелико и существенно зависит от внешних условий. Поэтому в технике применяют примесные полупроводниковые материалы с донорными или акцепторными примесями.

*Донорными* примесями для кремния обычно являются фосфор (P) или сурьма (Sb) – элементы V группы. У этих элементов атомы имеют по пять валентных электронов, четыре из которых образуют ковалентные связи с

четырьмя соседними атомами кристалла полупроводника, а пятые электроны, являясь свободными, добавляются в кристалл. Такой примесный полупроводник называют электронным или полупроводником  $n$ -типа. Основными носителями зарядов в нем являются электроны, а не основными – дырки, имеющиеся в обычных условиях в значительно меньшем количестве.

*Акцепторными* примесями для кремния являются обычно алюминий (Al), бор (B) и галлий (Ga) – элементы III группы периодической системы, атомы которых имеют три валентных электрона. Каждому атому примеси недостает одного электрона для образования ковалентных связей с четырьмя соседними атомами полупроводника. Этот электрон захватывается у одного из атомов, в котором образуется дырка. Такой примесный полупроводник называют *дырочным* или полупроводником  $p$ -типа. Основными носителями зарядов в нем являются дырки как примесные, так и собственные, а не основными – электроны, заполняющие эти дырки.

Рассмотрим температурную зависимость проводимости для полупроводника. При температуре абсолютного нуля в полупроводнике отсутствуют свободные носители заряда. При повышении температуры проводимость будет увеличиваться за счет появления электронов и дырок. Этот рост будет происходить до тех пор, пока не активизируется вся примесь. Температура, при которой это произойдет, называется температурой активации. Температура активации определяется типом примеси и ее концентрацией (обычно  $t_{\text{акт}} = -100$  °С). Температура  $t$ , начиная с которой происходит возрастание проводимости, называется критической. Хотя  $t_{\text{кр}}$  и зависит от концентрации примесных носителей, определяющим параметром для нее является ширина запрещенной зоны (чем шире запрещенная зона, тем больше  $t_{\text{кр}}$ ). Так, если для кремния  $t_{\text{кр}} = 330$  °С, то для германия  $t_{\text{кр}} = 100$  °С. Рабочий температурный диапазон полупроводниковых приборов ограничен снизу  $t_{\text{акт}}$ , а сверху –  $t_{\text{кр}}$ . Абсолютное большинство полупроводниковых устройств электроники используется в этом диапазоне температур (и даже в более узком диапазоне:  $-60...+100$  °С). Таким образом, при реальной эксплуатации проводимость полупроводников уменьшается с ростом температуры.

*Дрейфовый ток* в полупроводнике – это ток, возникающий за счет приложенного электрического поля. При этом электроны движутся навстречу линиям напряженности поля, а дырки – по направлению линий напряженности поля. *Диффузионный ток* – это ток, возникающий из-за неравномерной концентрации носителей заряда ( $n_2 > n_1$ ,  $n_2 - n_1 = \Delta n$ ).

*Электронно-дырочный  $p$ - $n$ -переход.* Ввиду неравномерной концентрации на границе раздела  $p$  и  $n$  полупроводника возникает диффузионный ток, за счет которого электроны из  $n$ -области переходят в  $p$ -область, а на их месте остаются некомпенсированные заряды положительных ионов донорной примеси. Электроны, приходящие в  $p$ -область, рекомбинируют с дыр-



ками, и возникают некомпенсированные заряды отрицательных ионов акцепторной примеси. Ширина  $p$ - $n$ -перехода – десятки доли микрона.

На границе раздела возникает внутреннее электрическое поле  $p$ - $n$ -перехода, которое тормозит основные носители заряда и будет их отбрасывать от границы раздела. Для не основных носителей заряда поле будет ускоряющим и способным переносить их в область, где они будут основными. Максимум напряженности электрического поля – на границе раздела.

Распределение потенциала по ширине полупроводника называется потенциальной диаграммой (рисунок 8.3). Разность потенциалов на  $p$ - $n$ -переходе называется контактной разностью потенциалов или потенциальным барьером. Для того чтобы основной носитель заряда смог преодолеть  $p$ - $n$ -переход, его энергия должна быть достаточной для преодоления потенциального барьера.

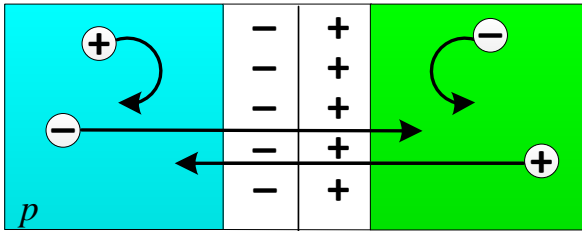


Рисунок 8.3 – Потенциальная диаграмма полупроводника

*Прямое и обратное включение  $p$ - $n$ -перехода.* Приложим внешнее напряжение плюсом к  $p$ -области. Внешнее электрическое поле направлено навстречу внутреннему полю  $p$ - $n$ -перехода, что приводит к уменьшению потенциального барьера. Основные носители зарядов легко смогут преодолеть потенциальный барьер, и поэтому через  $p$ - $n$ -переход будет протекать сравнительно большой ток, вызванный основными носителями заряда. Такое включение  $p$ - $n$ -перехода называется *прямым*, и ток через  $p$ - $n$ -переход, вызванный основными носителями заряда, также называется *прямым током*. Считается, что при прямом включении  $p$ - $n$ -переход открыт.

Если подключить внешнее напряжение минусом к  $p$ -области, а плюсом к  $n$ -области, то возникает внешнее электрическое поле, линии напряжённости которого совпадают с внутренним полем  $p$ - $n$ -перехода. В результате это приведет к увеличению потенциального барьера и ширины  $p$ - $n$ -перехода. Основные носители заряда не смогут преодолеть  $p$ - $n$ -переход, приводя к тому, что он будет закрыт. Такое включение  $p$ - $n$ -перехода называется *обратным*.

Оба поля (внутреннее и внешнее) являются ускоряющими для не основных носителей заряда, поэтому эти носители будут проходить через  $p$ - $n$ -переход, образуя очень маленький ток, который называется *обратным*.

К основным свойствам  $p$ - $n$ -перехода относятся: свойство односторонней проводимости; температурные свойства  $p$ - $n$ -перехода; частотные свойства  $p$ - $n$ -перехода; пробой  $p$ - $n$ -перехода.

Свойство односторонней проводимости  $p$ - $n$ -перехода нетрудно рассмотреть на вольт-амперной характеристике. Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) называется графически выраженная зависимость значения величины протекающего через  $p$ - $n$ -переход тока от значения величины приложенного напряжения  $I = f(U)$  (рисунок 8.4).

Будем считать прямое напряжение положительным, обратное – отрицательным. Ток через  $p$ - $n$ -переход при прямом включении может быть определен следующим образом:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (8.1)$$

где  $I_0$  – ток, вызванный прохождением собственных носителей заряда;

$q$  – заряд электрона;

$U$  – напряжение, приложенное к  $p$ - $n$ -переходу;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура.

Так как значение величины обратного тока во много раз меньше, чем прямого, то обратным током можно пренебречь и считать, что  $p$ - $n$ -переход проводит ток только в одну сторону.

Температурные свойства  $p$ - $n$ -перехода показывают, как изменяется работа  $p$ - $n$ -перехода при изменении температуры. На  $p$ - $n$ -переход в значительной степени влияет нагрев. При увеличении температуры увеличивается термогенерация носителей заряда, что приводит к увеличению как прямого, так и обратного тока.

Частотные свойства  $p$ - $n$ -перехода показывают, как работает  $p$ - $n$ -переход при подаче на него переменного напряжения высокой частоты. Частотные свойства  $p$ - $n$ -перехода определяются двумя видами емкости (рисунок 8.5).

Первый вид емкости – это емкость, обусловленная неподвижными зарядами ионов донорной и акцепторной примеси. Она называется *зарядной*, или *барьерной*  $C_{\text{барьерн}} = \varepsilon \varepsilon_0 S / d$ .

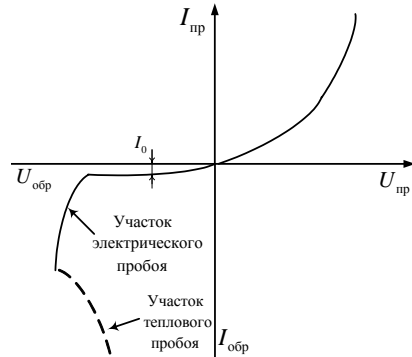


Рисунок 8.4 – Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода

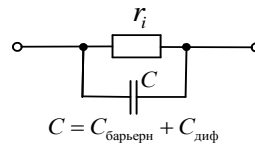


Рисунок 8.5 – Электрическая схема замещения  $p$ - $n$ -перехода

Второй вид – это *диффузионная* емкость, обусловленная диффузией подвижных носителей заряда через *p-n*-переход при прямом включении  $C_{\text{диф}} = q/U_{\text{пр}}$ , где  $q$  – суммарный заряд, протекающий через *p-n*-переход.

Внутреннее сопротивление  $r_i$  *p-n*-перехода (см. рисунок 8.5) очень мало при прямом включении ( $r_i \approx 1 \dots 10$  Ом) и будет велико при обратном включении ( $r_i \approx 0,1 \dots 1$  МОм).

На частотные свойства основное влияние оказывает барьерная емкость, т. к. диффузионная имеет место при прямом включении, когда внутреннее сопротивление *p-n*-перехода мало.

*Пробой p-n-перехода.* При увеличении обратного напряжения энергия электрического поля становится достаточной для генерации носителей заряда. Это приводит к сильному увеличению обратного тока. Явление сильного увеличения обратного тока при определенном обратном напряжении называется электрическим пробоем *p-n*-перехода.

Электрический пробой – это обратимый пробой, т. е. при уменьшении обратного напряжения *p-n*-переход восстанавливает свойство односторонней проводимости. Если обратное напряжение не уменьшить, то полупроводник сильно нагреется за счет теплового действия тока и *p-n*-переход сгорит (см. рисунок 8.4). Такое явление называется *тепловым пробоем p-n-перехода*. Тепловой пробой необратим.

*Переход Шоттки.* Переход Шоттки возникает на границе раздела металла и полупроводника *n*-типа, причем металл должен иметь работу выхода электрона больше, чем полупроводник (рисунок 8.6).

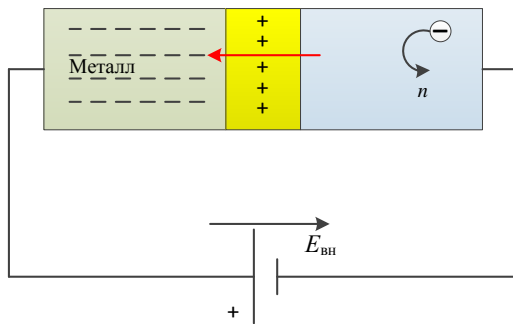


Рисунок 8.6 – Образование перехода Шоттки

При контакте двух материалов электрон проходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, и ни при каких иных условиях.

Электроны из приграничного слоя полупроводника переходят в металл, а на их месте остаются некомпенсированные положительные заряды ионов донорной примеси. В металле большое количество свободных электронов,

следовательно на границе металл–полупроводник возникает электрическое поле и потенциальный барьер. Возникшее поле является тормозящим для электронов полупроводника и будет отбрасывать их от границы раздела.

Достоинства перехода Шоттки: может работать на сверхвысоких частотах; высокое быстродействие при переключении из прямого состояния в обратное и наоборот.

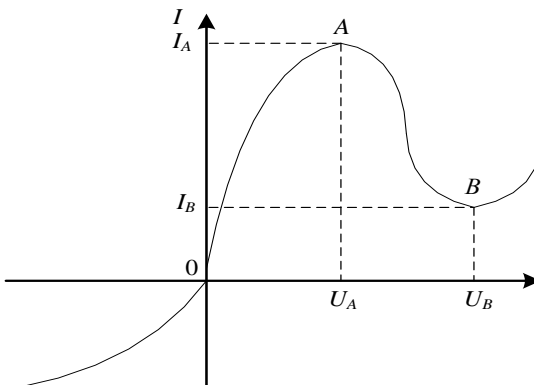
Недостатки: при кратковременном превышении максимального обратного напряжения диод Шоттки необратимо выходит из строя; диоды Шоттки характеризуются повышенными (относительно обычных кремниевых  $p-n$ -диодов) обратными токами.

*Некоторые эффекты полупроводника. Тоннельный эффект* проявляется на  $p-n$ -переходе в вырожденных полупроводниках.

Вырожденный полупроводник – это полупроводник с очень высокой концентрацией донорной или акцепторной примеси (концентрация –  $10^{24}$  атомов примеси на  $1 \text{ см}^3$  полупроводника).

В вырожденных полупроводниках очень тонкий  $p-n$ -переход: его ширина составляет сотые доли микрона, а напряженность внутреннего поля  $p-n$ -перехода  $E_{p-n} \approx 10^8 \text{ В/м}$ , что обеспечивает очень высокий потенциальный барьер. Основные носители заряда не могут преодолеть этот потенциальный барьер, но за счет его малой ширины как бы механически пробивают в нем тоннели, через которые проходят другие носители зарядов.

Вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода при туннельном эффекте будет иметь вид, изображённый на рисунке 8.7. На участке  $AB$  прямой туннельный ток уменьшается за счет снижения потенциального барьера и в точке  $B$  он становится равным нулю, а ток проводимости незначительно возрастает. За счет этого общий ток на участке  $AB$  уменьшается. Особенностью туннельного эффекта является то, что на участке  $AB$  характеристики имеет место отрицательное дифференциальное сопротивление.



Тоннельный эффект применяется в тоннельных диодах, которые используются в схемах генераторов гармонических колебаний и как маломощные бесконтактные переключающие устройства.

*Эффект Гана* проявляется в полупроводниках  $n$ -типа проводимости в сильных электрических полях.

Участок  $OA$  (рисунок 8.8) – линейный участок, на котором соблюдается закон Ома. На участке  $AB$  – при сравнительно больших напряженностях электрического поля – уменьшается подвижность электронов (показывает, как легко электроны проходят сквозь кристаллическую решётку проводника) за счет увеличения амплитуд колебания атомов в узлах кристаллической решётки. И за счёт этого явления рост тока замедляется.

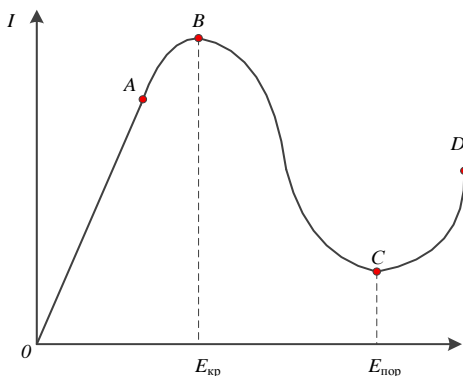


Рисунок 8.8 – Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода при эффекте Гана

Участок  $BC$  – сильное уменьшение подвижности электронов, что приводит к уменьшению тока. На участке  $CD$  – при очень больших напряженностях значительно увеличивается генерация носителей зарядов и, хотя подвижность электронов уменьшается, ток возрастает за счет увеличения количества зарядов.

Сущность эффекта Гана состоит в том, что если в полупроводнике создать напряженность электрического поля большую  $E_{кр}$ , но меньшую  $E_{пор}$ , т. е. на участке  $BC$  характеристики, то в полупроводнике возникнут электрические колебания сверхвысокой частоты (СВЧ). Эффект Гана применяется в диодах Гана, использующихся как маломощные генераторы СВЧ.

*Эффект Холла* проявляется в полупроводниках  $n$ -типа проводимости с протекающими через них токами, помещенными в магнитное поле.

На движущиеся электроны в полупроводнике будет действовать сила Лоренца  $F_L$ , под действием которой электроны будут отклоняться к дальнему краю пластинки (рисунок 8.9), следовательно, там будет сгущение электронов, а около переднего края – их недостаток. Поэтому между этими кра-

ями возникнет ЭДС, которая называется ЭДС Холла. Эффект Холла применяется в магнитометрических датчиках.

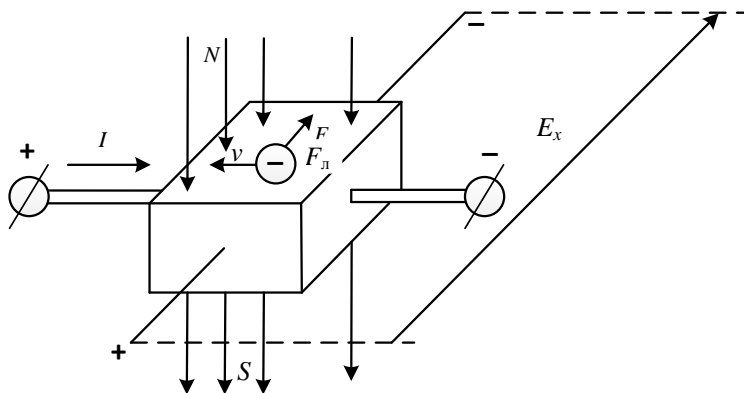


Рисунок 8.9 – Эффект Холла

## 8.2 Полупроводниковые диоды

*Классификация и условные обозначения полупроводниковых диодов.*  
Полупроводниковым *диодом* называется устройство, состоящее из кристалла полупроводника, содержащее обычно один *p-n*-переход и имеющее два вывода.

Классификация диодов производится по следующим признакам:

- 1 По конструкции: плоскостные, точечные, микросплавные.
- 2 По мощности: маломощные, средней мощности, мощные.
- 3 По частоте: низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.
- 4 По функциональному назначению: выпрямительные диоды, импульсные диоды, стабилитроны, варикапы, светодиоды, туннельные диоды и некоторые другие.

Условное обозначение диодов на принципиальных электрических схемах представлено на рисунке 8.10.

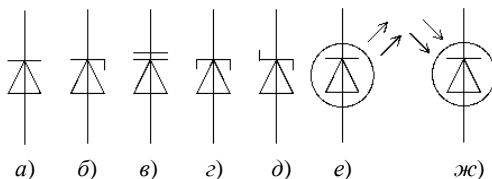


Рисунок 8.10 – Условное графическое обозначение:

- a* – выпрямительные, высокочастотные, сверхвысокочастотные, импульсные и диоды Гана;  
*б* – стабилитроны; *в* – варикапы; *г* – туннельные диоды; *д* – диоды Шоттки; *е* – светодиоды;  
*ж* – фотодиоды

В паспортных данных диодов указывается ряд номинальных величин: максимально допустимое обратное напряжение  $U_{RRM}$ , предельно допустимый прямой ток  $I_{FAVM}$  и амплитудное значение прямого тока  $I_{FMmax}$ .

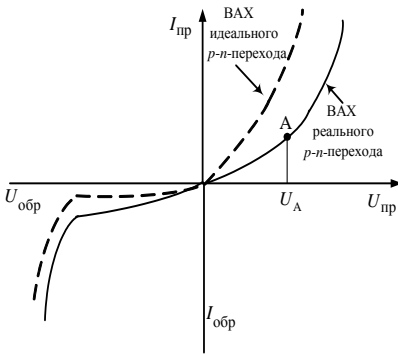


Рисунок 8.11 – Вольт-амперная характеристика диода

Вольт-амперная характеристика реального диода проходит ниже, чем у идеального  $p-n$ -перехода: сказывается влияние сопротивления базы. После точки А (рисунок 8.11) вольт-амперная характеристика будет представлять собой прямую линию, т. к. при напряжении  $U_A$  потенциальный барьер полностью компенсируется внешним полем. Кривая обратного тока ВАХ имеет наклон, т. к. за счет возрастания

обратного напряжения увеличивается генерация собственных носителей заряда.

**Выпрямительные диоды.** Выпрямительным диодом называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный в силовых цепях, т. е. в источниках питания.

Если выпрямленный ток больше максимально допустимого прямого тока диода, то в этом случае допускается параллельное включение диодов (рисунок 8.12).

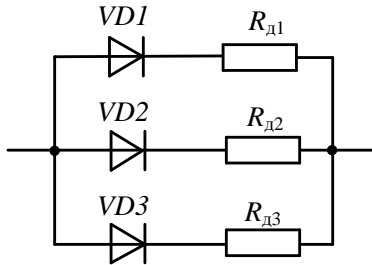


Рисунок 8.12 – Схема параллельного включения диодов

Добавочные сопротивления  $R_d$  имеют значения от единиц до десятков Ом и включаются с целью выравнивания токов в каждой из ветвей.

Если напряжение в цепи превосходит максимально допустимое обратное напряжение диода, то в этом случае допускается последовательное включение диодов (рисунок 8.13).



Рисунок 8.13 – Схема последовательного включения диодов

Шунтирующие сопротивления включают для выравнивания падения напряжения на каждом из диодов.

*Стабилитроном* называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня постоянного напряжения. Принцип действия стабилитрона основан на том, что на его вольт-амперной характеристике имеется участок, на котором напряжение не зависит от значения величины протекающего тока.

Таким участком является участок электрического пробоя, а за счет легирующих добавок в полупроводник ток электрического пробоя может изменяться в широком диапазоне, не переходя в тепловой пробой. Так как участок электрического пробоя – это обратное напряжение, то стабилитрон включается обратным включением (рисунок 8.14).

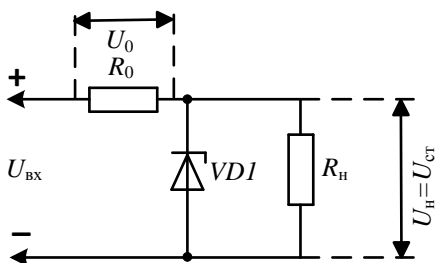


Рисунок 8.14 – Схема включения стабилитрона

Резистор  $R_0$  задает ток через стабилитрон таким образом, чтобы значение его величины было близко к среднему значению между  $I_{ст.мин}$  и  $I_{ст.макс}$ . Такое значение тока называется номинальным током стабилизации.

При уменьшении входного напряжения ток через стабилитрон и падение напряжения на  $R_0$  могут уменьшиться, а напряжение на стабилитроне и на нагрузке останутся постоянными, исходя из вольт-амперной характеристики (рисунок 8.15). При увеличении входного напряжения ток через стабилитрон увеличивается, а напряжение на нагрузке все равно остается постоянным и равным напряжению стабилизации.

Вывод: стабилитрон поддерживает постоянство напряжения при изменении тока через него от  $I_{ст.мин}$  до  $I_{ст.макс}$ .



*Варикапом* называется полупроводниковый диод, у которого в качестве основного параметра используется барьерная емкость, значение величины которой варьируется при изменении обратного напряжения. Следовательно, варикап применяется как конденсатор переменной емкости, управляемый напряжением.

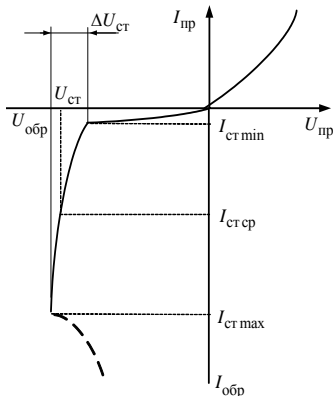


Рисунок 8.15 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

*Фотодиодом* называется фотогальванический приемник излучения, светочувствительный элемент которого представляет собой структуру полупроводникового диода без внутреннего усиления.

При облучении полупроводника световым потоком возрастает фотогенерация собственных носителей зарядов, что приводит к увеличению количества как основных, так и не основных носителей зарядов. Однако фотогенерация в значительной степени будет влиять на обратный ток, т. к. не основных носителей зарядов значительно меньше, чем основных.

*Светодиодом* называется полупроводниковый прибор, в котором происходит непосредственное преобразование электрической энергии в энергию светового излучения. При прямом включении основные носители заряда переходят через *p-n*-переход и там рекомбинируют. Рекомбинация связана с выделением энергии. Для большинства полупроводниковых материалов эта энергия тепловая. Только для некоторых типов на основе арсенида галлия ширина запрещенной зоны достаточно велика, и длина волны лежит в видимой части спектра.

### 8.3 Транзисторы

*Транзистором* называется полупроводниковый преобразовательный прибор, имеющий не менее трех выводов и способный усиливать мощность.

Классификация транзисторов производится по следующим признакам:

- материал полупроводника: германиевые или кремниевые;
- тип проводимости областей (только биполярные транзисторы): с прямой проводимостью (*p-n-p*-структура) или с обратной проводимостью (*n-p-n*-структура);
- принцип действия: биполярные и полевые (униполярные);
- частотные свойства: до 3 МГц; 3–30 МГц; более 30 МГц;
- мощность: маломощные транзисторы (менее 0,3 Вт), средней мощности (0,3–3 Вт), мощные (более 3 Вт).

*Биполярные транзисторы.* Биполярные транзисторы – это активные полупроводниковые приборы с двумя  $p-n$ -переходами и тремя электродами (рисунок 8.16). Главное отличие этой группы транзисторов в том, что для обеспечения их нормальной работы необходимо использовать носители зарядов двух типов: электроны и дырки.

Основой биполярного транзистора является кристалл полупроводника  $p$ - или  $n$ -типа проводимости, который так же, как и вывод от него называется *базой*. Диффузией примеси или сплавлением с двух сторон от базы образуются области с противоположным типом проводимости, нежели база.

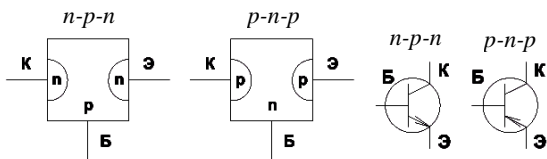


Рисунок 8.16 – Условное графическое обозначение биполярных транзисторов с прямой ( $p-n-p$ -структура) и с обратной проводимостью ( $n-p-n$ -структура)

Область, имеющую большую площадь  $p-n$ -перехода, и вывод от нее называют *коллектором*. Область, имеющую меньшую площадь  $p-n$ -перехода, и вывод от нее называют *эмиттером*.  $p-n$ -переход между коллектором и базой называют коллекторным переходом, а между эмиттером и базой – эмиттерным переходом.

Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока. Основной особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе. В эмиттере концентрация носителей зарядов максимальная, в коллекторе – несколько меньше, чем в эмиттере, а в базе – во много раз меньше, чем в эмиттере и коллекторе биполярного транзистора (рисунок 8.17).

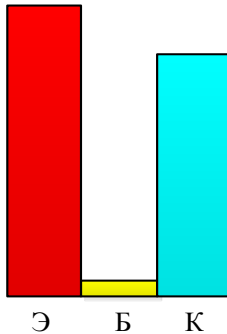


Рисунок 8.17 – Концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе

*Принцип действия биполярных транзисторов.* При работе транзистора в усилительном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный – закрыт. Это достигается соответствующим включением источников питания. Так как эмиттерный переход открыт, то через него будет протекать ток эмиттера, вызванный переходом электронов из эмиттера в базу и переходом дырок из базы в эмиттер (рисунок 8.18). Следовательно, ток эмиттера будет иметь две составляющие – электронную и дырочную.

*Инжекцией* зарядов называется переход носителей зарядов из области, где они были основными, в область, где они становятся не основными. В базе электроны рекомбинируют, а их концентрация пополняется от «+» источника  $E_3$ , за счет чего в цепи базы будет протекать очень малый ток.

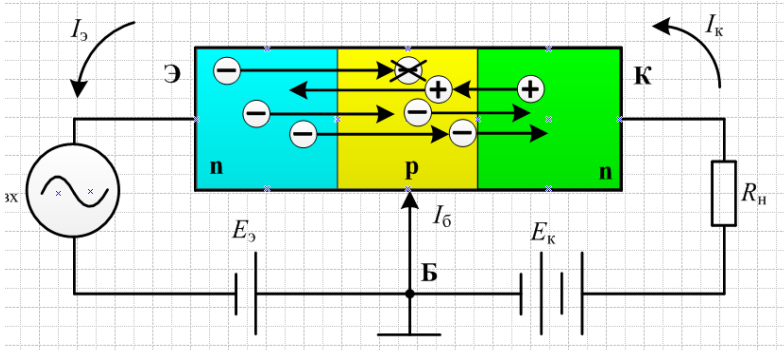


Рисунок 8.18 – Принцип действия биполярных транзисторов

Оставшиеся электроны, не успевшие рекомбинировать в базе, под ускоряющим действием поля закрытого коллекторного перехода как не основные носители будут переходить в коллектор, образуя ток коллектора. Переход носителей зарядов из области, где они были не основными, в область, где они становятся основными, называется *экстракцией* зарядов. Степень рекомбинации носителей зарядов в базе оценивается коэффициентом перехода носителей зарядов:  $\alpha = I_к / I_э$ . Основное соотношение токов в транзисторе:  $I_э = I_к + I_б$ , здесь  $\alpha$  – коэффициент передачи тока транзистора или коэффициент усиления по току.

Независимо от схемы включения транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:

$$k_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} - \text{по току};$$

$$k_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} - \text{по напряжению};$$

$$k_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = k_I k_U - \text{по мощности}.$$

*Схемы включения транзисторов* получили свое название в зависимости от того, какой из выводов транзисторов будет являться общим для входной и выходной цепи.

Из трех выводов транзистора на один подается входной сигнал, со второго снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи. Таким образом, рассмотренная выше схема получила название *схемы с общей базой* (рисунок 8.19).

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями: коэффициентом усиления по току  $k_I$  и входным сопротивлением  $r_{вхб} = U_{вх}/I_{вх} = U_{бэ}/I_э$ . Входное сопротивление для схемы с общей базой (ОБ) мало и составляет десятки Ом.

Недостатки схемы с общей базой: схема не усиливает ток ( $\alpha < 1$ ), малое входное сопротивление, два разных источника напряжения для питания.

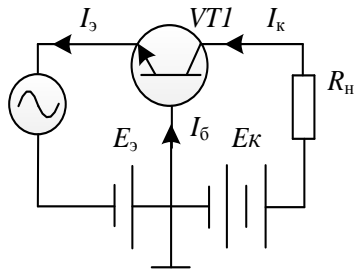


Рисунок 8.19 – Схема включения с общей базой

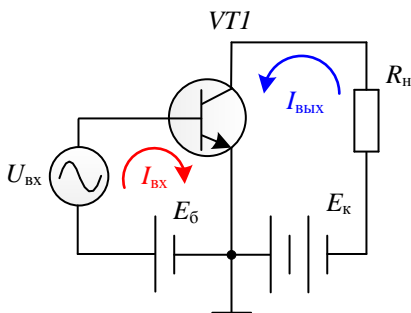


Рисунок 8.20 – Схема включения с общим эмиттером

Достоинства – хорошие температурные и частотные свойства.

Схема включения с общим эмиттером (ОЭ), представленная на рисунке 8.20, является наиболее распространенной, т. к. она дает наибольшее усиление по мощности. Между выходным и входным напряжением при усилении по схеме ОЭ имеется фазовый сдвиг  $180^\circ$ .

Недостатки: худшие, чем у схемы с общей базой, температурные и частотные свойства.

Достоинства схемы с общим эмиттером: большой коэффициент усиления по току; большее, чем у схемы с общей базой, входное сопротивление; для питания схемы требуются два однополярных источника, что позволяет на практике обходиться одним источником питания.

В схеме с ОК (рисунок 8.21) коллектор является общей точкой входа и выхода, поскольку источники питания  $E_б$  и  $E_к$  всегда шунтированы конденсаторами большой емкости и для переменного тока могут считаться короткозамкнутыми. Входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. очень сильна отрицательная обратная связь.

Входное сопротивление каскада по схеме с ОК составляет десятки килоом, что является важным достоинством схемы. Выходное сопротивление схемы с ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим. Эти достоин-

ства схемы с ОК побуждают использовать её для согласования различных устройств по входному сопротивлению.

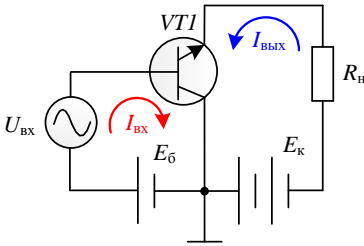


Рисунок 8.21 – Схема включения с общим коллектором

*Полевые транзисторы.* В основе работы полевых транзисторов (рисунок 8.22) используются подвижные носители зарядов лишь одного типа – только электроны или только дырки. Их наиболее характерная черта – высокое входное сопротивление. Поэтому они управляются напряжением, а не током, как биполярные транзисторы. В полевом транзисторе ток создается только основными носителями зарядов под действием продольного электрического поля, а управление этим током осуществляется поперечным электрическим полем, которое создается напряжением, приложенным к управляющему электроду.

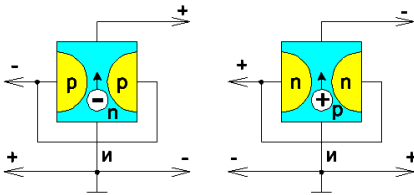


Рисунок 8.22 – Полевые транзисторы *n*- и *p*-типа

Вывод полевого транзистора, от которого истекают основные носители зарядов, называется *истоком* (И) (см. рисунок 8.22). Вывод полевого транзистора, к которому стекают основные носители зарядов, называется *стоком*. Вывод полевого транзистора, к которому прикладывается управляющее напряжение, создающее поперечное электрическое поле, называется *затвором*. Участок полупроводника, по которому движутся основные носители зарядов между *p-n*-переходом, называется *каналом* полевого транзистора.

Принцип действия рассмотрим на примере транзистора с каналом *n*-типа. На затвор всегда подается такое напряжение, чтобы переходы закрывались (рисунок 8.23). Напряжение между стоком и истоком создаёт продольное электрическое поле, за счет которого через канал движутся основные носители зарядов, создавая ток стока. При отсутствии напряжения

Недостатком схемы является то, что она не усиливает напряжение.

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}; I_{\text{вых}} = I_{\text{э}};$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}; U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}};$$

$$k_t = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = I_{\text{э}} / I_{\text{б}} (10 \dots 100);$$

$$r_{\text{вх} \ominus} = U_{\text{бк}} / I_{\text{б}} (10 \dots 100 \text{ Ом}).$$

на затворе  $p$ - $n$ -переходы закрыты собственным внутренним полем, ширина канала и ток стока будут максимальными.

При увеличении запирающего напряжения на затворе ширина  $p$ - $n$ -переходов увеличивается, а ширина канала и ток стока уменьшаются. При достаточно больших напряжениях на затворе ширина  $p$ - $n$ -переходов может увеличиться настолько, что они сольются и ток стока станет равным нулю. Напряжение на затворе, при котором ток стока равен нулю, называется *напряжением отсечки*.

Вывод: полевой транзистор представляет собой управляемый полупроводниковый прибор, т. к., изменяя напряжение на затворе, можно уменьшать ток стока и поэтому принято говорить, что полевые транзисторы с управляющими  $p$ - $n$ -переходами работают только в режиме обеднения канала.

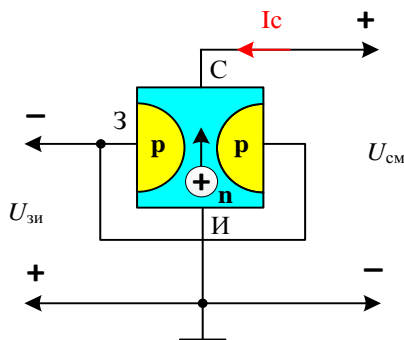


Рисунок 8.23 – Принцип действия полевого транзистора  $n$ -типа

## 8.4 Тиристоры

Тиристором называется четырехслойный полупроводниковый прибор, состоящий из последовательно чередующихся областей  $p$ - и  $n$ -типов проводимости. Выделяют следующие типы тиристоров:

- динисторы – это диодные тиристоры или неуправляемые переключательные диоды;
- тринисторы – это управляемые переключательные диоды;
- симисторы – это симметричные тиристоры, т. е. тиристоры с симметричной ВАХ.

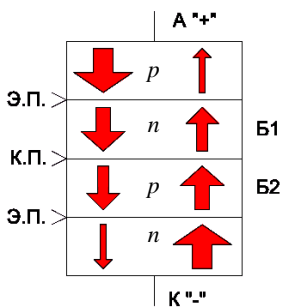


Рисунок 8.24 – Принцип действия динистора

*Устройство и принцип действия динисторов.* Наружная  $p$ -область и вывод от нее называется *анодом* (рисунок 8.24). Наружная  $n$ -область и вывод от нее называется *катодом*. Внутренние  $p$ - и  $n$ -области называются *базами* динистора. Крайние  $p$ - $n$ -переходы называются *эмиттерными*, а средний  $p$ - $n$ -переход называется *коллекторным*. Подадим на анод « $-$ », а на катод « $+$ ». При этом эмиттерные переходы будут закрыты, а коллекторный – открыт. Основные носители зарядов из анода и катода не смогут перейти в базу, поэтому через динистор

будет протекать только маленький обратный ток, вызванный неосновными носителями заряда. Если на анод подать «+», а на катод «-», то эмиттерные переходы открываются, а коллекторный закрывается. Основные носители зарядов переходят из анода в базу 1, а из катода – в базу 2, где они становятся не основными и в базах происходит интенсивная рекомбинация зарядов, в результате которой количество свободных носителей зарядов уменьшается. Эти носители заряда подходят к коллекторному переходу, поле которых для них будет ускоряющим, затем проходят базу и переходят через открытый эмиттерный переход, т. к. в базах они опять становятся основными. Пройдя эмиттерные переходы, электроны переходят в анод, а дырки – в катод, где они вторично становятся не основными и вторично происходит интенсивная рекомбинация. В результате количество зарядов, прошедших через динистор, будет очень мало и прямой ток также будет очень мал. При увеличении напряжения прямой ток незначительно возрастает, т. к. увеличивается скорость движения носителей, а интенсивность рекомбинации уменьшается. При увеличении напряжения до определенного значения происходит электрический пробой коллекторного перехода. Сопротивление динистора резко уменьшается, ток через него сильно увеличивается и падение напряжения на нем значительно уменьшается. Считается, что динистор перешел из выключенного состояния во включенное. Динисторы применяются в виде бесконтактных переключательных устройств, управляемых напряжением.

*Устройство и принцип действия тринисторов.* Тринисторы можно включать при напряжениях, меньших напряжения включения динистора. Для этого достаточно на одну из баз подать дополнительное напряжение таким образом, чтобы создаваемое им поле совпадало по направлению с полем анода на коллекторном переходе. Можно подать ток управления на вторую базу, но для этого на управляющий электрод необходимо подавать напряжение отрицательной полярности относительно анода, и поэтому различают тринисторы с управлением по катоду и с управлением по аноду.

*Устройство и принцип действия симисторов.* Симистор (симметричный триодный тиристор) или триак (от англ. TRIAC – triode for alternating current) – полупроводниковый прибор, являющийся разновидностью тиристоров и используемый для коммутации в цепях переменного тока. В электронике часто рассматривается как управляемый выключатель (ключ). В отличие от тиристора, имеющего катод и анод, основные (силовые) выводы симистора называть катодом или анодом некорректно, т. к. в силу структуры симистора они являются и тем и другим одновременно. Однако, по способу включения относительно управляющего электрода основные выводы симистора различаются, причём имеет место их аналогия с катодом и анодом тиристора. Для управления нагрузкой основные электроды симистора включаются в цепь последовательно с нагрузкой. В закрытом состоя-

нии проводимость симистора отсутствует, нагрузка выключена. При подаче на управляющий электрод отпирающего сигнала между основными электродами симистора возникает проводимость, нагрузка оказывается включенной. Симистор в открытом состоянии проводит ток в обоих направлениях. Другой особенностью симистора, как и других тиристоров, является то, что для его удержания в открытом состоянии нет необходимости постоянно подавать сигнал на управляющий электрод (в отличие от транзистора). Симистор остается открытым, пока протекающий через основные выводы ток превышает некоторую величину, называемую током удержания. Отсюда следует, что выключение нагрузки в цепи переменного тока происходит вблизи моментов времени, когда ток через основные электроды симистора меняет направление (обычно это совпадает по времени со сменой полярности напряжения в сети).

### **8.5 Выпрямители переменного тока**

Выпрямитель – устройство, преобразующее переменный ток в постоянный, точнее, пульсирующий с определенной частотой, имеющей одно направление. Его принцип действия основан на односторонней проводимости некоторых электронных приборов (вентилей). В качестве последних в настоящее время наиболее широко используются полупроводниковые вентили: неуправляемые – диоды и управляемые – тиристоры. В состав выпрямительного агрегата, как правило, входят силовой (вентильный) трансформатор, блок вентилей, сглаживающий фильтр, блоки управления, защиты и сигнализации.

Выпрямители можно классифицировать по числу фаз, мощности и возможности регулирования. В зависимости от числа фаз источника переменного напряжения выпрямители делятся на однофазные и трехфазные. Однофазные бывают одно-, двухполупериодными с нулевой точкой и мостовыми. Наиболее часто в однофазных цепях используются двухполупериодные схемы. Широкое применение находят трехфазные выпрямители. Основными схемами таких агрегатов являются схемы с нулевой точкой и мостовые.

По выходной мощности выпрямительные агрегаты можно условно разделить на установки малой (до единиц киловатт), средней (до десятков киловатт) и большой мощности (сотни и более киловатт).

По возможности регулирования напряжения выпрямители делятся на неуправляемые, в которых вентилями служат диоды, и управляемые, построенные полностью или частично на полупроводниковых управляемых вентилях – тиристорах или ионных управляемых приборах – тиратронах.

Во всех выпрямителях вентили выполняют функции коммутирующих устройств, подключающих нагрузку к обмоткам вентильного трансформатора таким образом, что по ней проходит ток одного направления.



Процесс перехода тока с одного вентиля на другой называется коммутацией, а моменты времени, в которые это происходит, называются моментами коммутации. У идеального выпрямителя коммутация тока происходит мгновенно. В реальных схемах, из-за наличия индуктивности сети, индуктивности обмоток вентильного трансформатора и индуктивности токоведущих шин, коммутация тока с диода на диод происходит в течение некоторого времени, называемого временем коммутации. Это время зависит от эквивалентной индуктивности цепи, по которой протекает коммутируемый ток, от значения величины коммутируемого тока и от рабочего напряжения выпрямителя. В преобразовательной технике принято представлять время коммутации как некоторую долю периода переменного входного напряжения выпрямителя. Тогда время коммутации можно измерять в угловых единицах (градусах), а термин «время коммутации» преобразуется в «угол коммутации».

*Однофазная схема выпрямления с нулевой точкой.* Своё название схема (рисунок 8.25) получила из-за того, что вторичная обмотка вентильного трансформатора разделена на две равные части и из средней точки раздела сделан вывод, к которому подключается нагрузка. В первую половину периода, когда полярность напряжения на вторичной обмотке вентильного трансформатора соответствует обозначениям на рисунке 8.25, в проводящем состоянии находится диод  $VD_1$ , а  $VD_2$  закрыт. Ток протекает в верхнем контуре вторичной цепи по часовой стрелке. Во второй полупериод полярность напряжения на обмотке меняется и в работу вступает диод  $VD_2$ , а  $VD_1$  закрывается. Коммутация тока с одного диода на другой происходит в момент перехода сетевого напряжения через ноль. Независимо от того, какой диод открыт, через нагрузку  $R_H$  ток  $i_H$  проходит в одном направлении.

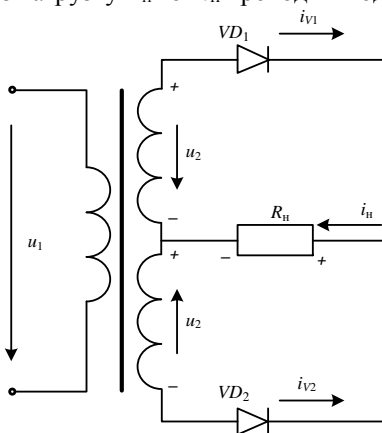


Рисунок 8.25 – Однофазная двухполупериодная схема выпрямления с нулевой точкой

Работа выпрямителя иллюстрируется с помощью временных диаграмм (рисунок 8.26). Из этих диаграмм видно, что частота пульсации выходного напряжения  $u_H$  на нагрузке в два раза выше частоты сети.

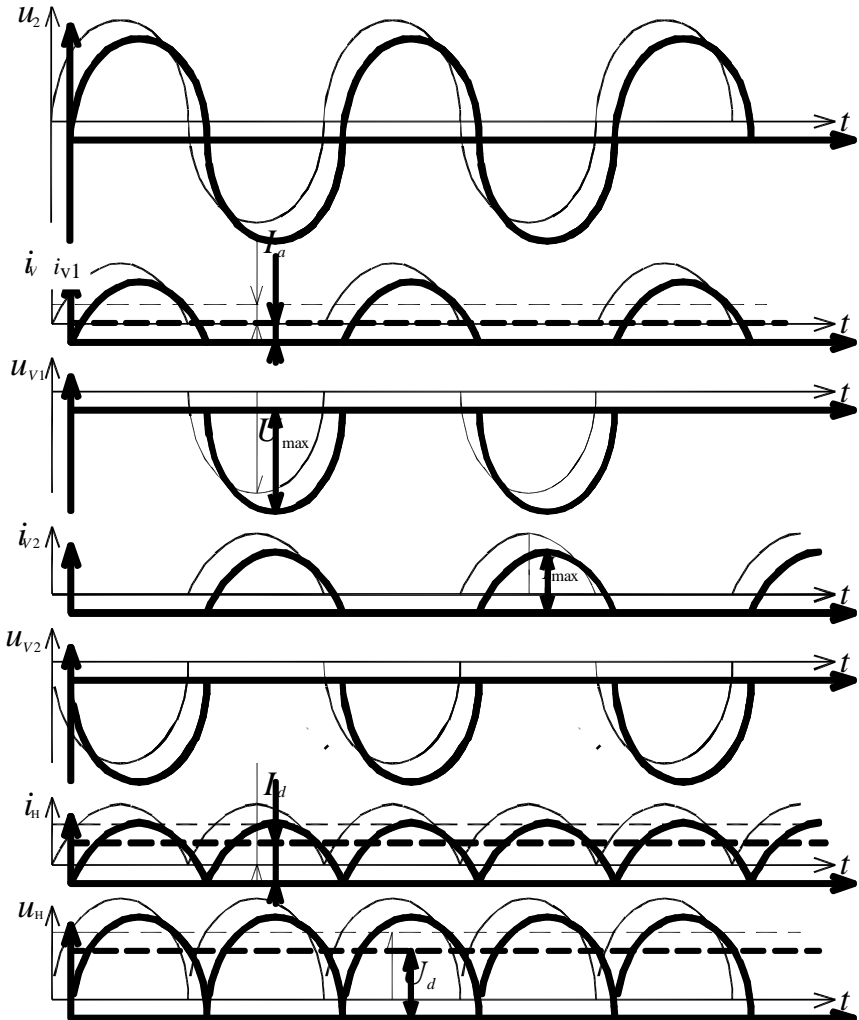


Рисунок 8.26 – Временные диаграммы работы однофазной двухполупериодной схемы с нулевой точкой:

$u_2$  – кривая напряжения на половине вторичной обмотки трансформатора;  
 $i_{v1}, i_{v2}$  – кривые токов диодов  $VD_1$  и  $VD_2$ ;  $u_{v1}, u_{v2}$  – напряжение на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$ ;  
 $i_H$  – кривая тока нагрузки;  $u_H$  – кривая напряжения на нагрузке

Средние значения напряжения, тока нагрузки и мощности (мощность нагрузки) на выходе выпрямителя обозначаются символами  $U_d$ ,  $I_d$  и  $P_d$ .

Напряжение на нагрузке – несинусоидальное пульсирующее, состоит из полусинусоид вторичного напряжения трансформатора, следующих одна за другой. Оно образовано постоянным напряжением некоторой величины и набором переменных синусоидальных напряжений определённой частоты и амплитуды. Эти синусоидальные напряжения называются гармониками. Значение величины каждой составляющей напряжения на нагрузке может быть получено после разложения исходной несинусоидальной кривой в ряд Фурье.

Для рассматриваемой схемы в результате разложения имеем:

$$u_n = U_d \left( 1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Из разложения видно, что напряжение на нагрузке формируется постоянной составляющей величиной  $U_d$ , не зависящей от времени, и гармониками с чётной частотой и убывающей амплитудой.

Для оценки качества напряжения на выходе выпрямителя вводится коэффициент пульсации, под которым подразумевается отношение амплитуды основной гармоники в кривой выпрямленного напряжения к среднему значению этого напряжения. Основной считается гармоника с минимальной частотой.

Амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения рассматриваемой схемы  $U_{m(2)} = \frac{2}{3} U_d$ , следовательно, коэффициент пульсации

$$p = U_{m(2)} / U_d = 2/3 \approx 0,67.$$

К достоинствам схемы однофазной выпрямителя с нулевой точкой можно отнести малое количество диодов и протекание тока в любой момент времени только по одному из них. Последнее свойство очень важно для низковольтных выпрямителей, работающих с большими токами, т. к. позволяет повысить КПД выпрямителя за счёт снижения напряжения на диодах.

В качестве недостатков рассматриваемой схемы можно отметить большое обратное напряжение на диодах по сравнению с выходным и плохое использование вентильного трансформатора по мощности. Кроме того, при ее реализации необходимо иметь вентильный трансформатор с двумя одинаковыми вторичными обмотками для получения средней точки.

Основные характеристики однофазной схемы выпрямления с нулевой точкой при работе на резистивную нагрузку без фильтра приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Основные характеристики схем выпрямителей

Показатель	Тип выпрямителя			
	Однофазный со средней точкой	Однофазный мостовой	Трёхфазный с нулевой точкой	Трёхфазный мостовой
Действующее значение напряжения вторичной обмотки $U_2$	$1,11U_d$	$1,11U_d$	$0,855U_d$	$0,43U_d$
Действующее значение тока вторичной обмотки $I_2$	$0,785I_d$	$0,785I_d$	$0,785I_d$	$0,785I_d$
Действующее значение тока первичной обмотки $I_1$	$1,11I_d / k_T$	$1,11I_d / k_T$	$0,48I_d / k_T$	$0,82I_d / k_T$
Расчетная мощность трансформатора $S_T$	$1,48P_d$	$1,23P_d$	$1,35P_d$	$1,045P_d$
Максимальное обратное напряжение на диоде $U_{\max}$	$3,14U_d$	$1,57U_d$	$2,1U_d$	$1,05U_d$
Среднее значение тока через диод $I_a$	$0,5I_d$	$0,5I_d$	$0,33 I_d$	$0,33I_d$
Максимальное значение тока диода $I_{\max}$	$1,57I_d$	$1,57I_d$	$1,21I_d$	$1,05I_d$
Коэффициент пульсации выходного напряжения $p$	0,67	0,67	0,25	0,057

*Однофазная мостовая схема выпрямления.* В данной схеме (рисунок 8.27) диоды работают парно: в течение одной половины периода сетевого напряжения ток протекает от вторичной обмотки трансформатора по цепи  $VD_1, R_H, VD_2$ , а на втором полупериоде – по цепи  $VD_3, R_H, VD_4$ , причем в каждом полупериоде через нагрузку ток проходит в одном направлении, что и обеспечивает выпрямление. Коммутация диодов происходит в моменты перехода напряжения через ноль.

Временные диаграммы для мостовой схемы, изображённые на рисунке 8.28, подобны диаграммам выпрямителя с нулевой точкой. Разница, по сравнению с однофазным выпрямителем с нулевой точкой, заключается в том, что у мостовой схемы в каждом полупериоде ток проходит одновременно через два диода.

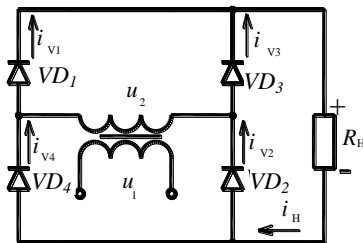


Рисунок 8.27 – Однофазная мостовая схема выпрямления

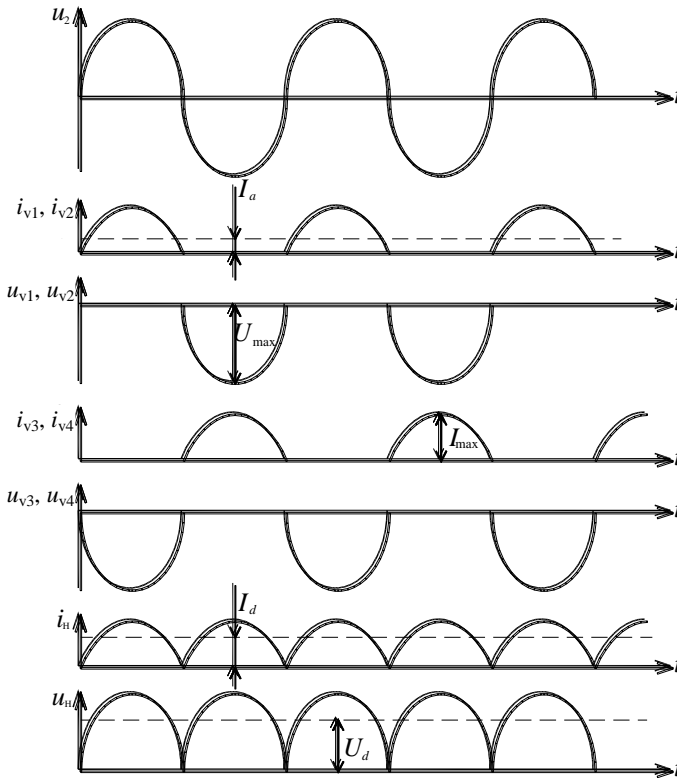


Рисунок 8.28 – Временные диаграммы работы однофазной мостовой схемы выпрямления:

$u_2$  – кривая входного переменного напряжения;  $i_{v1}, i_{v2}$  – кривая тока диодов  $VD_1$  и  $VD_2$ ;  $u_{v1}, u_{v2}$  – напряжение на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$ ;  $i_{v3}, i_{v4}$  – кривая тока диодов  $VD_3$  и  $VD_4$ ;  $u_{v3}, u_{v4}$  – напряжение на диодах  $VD_3$  и  $VD_4$ ;  $i_n$  – кривая тока нагрузки;  $u_n$  – кривая напряжения на нагрузке

Основные характеристики однофазной мостовой схемы выпрямления при работе на резистивную нагрузку без фильтра приведены в таблице 8.1.

Достоинства рассмотренной схемы выпрямителя в том, что обратное напряжение на диодах здесь меньше, чем у схемы с нулевой точкой, использование трансформатора по мощности эффективнее, не требуется наличие трансформатора с двумя одинаковыми вторичными обмотками.

В качестве недостатков однофазной мостовой схемы можно отметить следующие факты: большое количество диодов и протекание тока в каждом полупериоде по двум диодам одновременно; протекание тока в

каждом полупериоде по двум диодам одновременно снижает КПД схемы из-за повышенного падения напряжения на полупроводниковых структурах вентилях, это особенно заметно у низковольтных выпрямителей, работающих с большими токами.

Несмотря на отмеченные недостатки, мостовая схема широко применяется на практике в однофазных выпрямителях различной мощности.

*Трехфазная схема выпрямления с нулевой точкой.* Схема трехфазного выпрямителя с нулевой точкой изображена на рисунке 8.29. Для ее реализации необходимо наличие трёхфазного источника питания с нейтралью. В качестве последнего чаще всего используют вентиляльный трансформатор, у которого вторичная обмотка соединена звездой с выведенной нейтральной (нулевой) точкой. Полярность диодов в схеме можно изменять на противоположную. При этом меняется и полярность напряжения на нагрузке  $R_H$ .

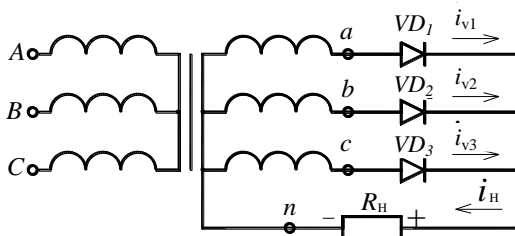


Рисунок 8.29 – Трехфазная схема выпрямления с нулевой точкой

На рисунке 8.30 приведены временные диаграммы, поясняющие работу схемы. Из этих диаграмм видно, что диоды работают в схеме поочередно. Для полярности включения диодов, изображенных на рисунке 8.29, в любой момент времени ток проводит только один диод, анод которого имеет более положительный потенциал по отношению к общим катодам. Длительность проводящего состояния каждого диода (угол проводимости вентилях) составляет треть часть периода сетевого напряжения. Ток нагрузки выпрямителя формируется токами трех вентилях. Частота пульсации этого тока в три раза выше частоты трехфазной сети, поэтому данная схема считается трехпульсовой.

Переход тока с вентиля на вентиль (коммутация) происходит в моменты времени, соответствующие точкам пересечения синусоид фазных напряжений  $u_a, u_b, u_c$ , (точки  $k, l, m, n$  на рисунке 8.30).

Наличие диодов, включенных последовательно с обмотками вентиляльного трансформатора, приводит к созданию однонаправленных МДС, которые вызывают так называемый поток вынужденного намагничивания.

Подобное явление может привести к насыщению магнитопровода и значительному увеличению намагничивающего тока. Для устранения насыщения приходится увеличивать сечение магнитопровода или применять специальное соединение вторичных обмоток трансформатора зигзагом.

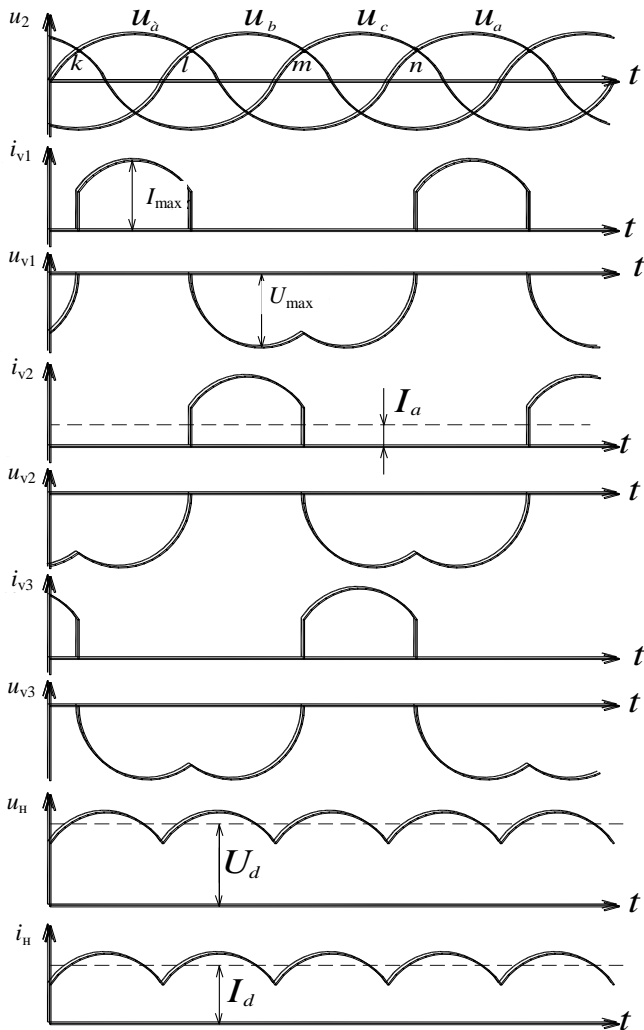


Рисунок 8.30 – Временные диаграммы трехфазной нулевой схемы выпрямления:

$u_{\phi}$  – фазные напряжения на входе выпрямителя;  $i_{v1}, i_{v2}, i_{v3}$  – кривые токов в первом, втором и третьем диодах;  $u_{v1}, u_{v2}, u_{v3}$  – кривые напряжений на первом, втором и третьем диодах;  $u_n, i_n$  – кривые напряжения и тока на нагрузке

Основные характеристики трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой при работе на резистивную нагрузку без фильтра приведены в таблице 8.1.

*Трехфазная мостовая схема выпрямления.* Трехфазная мостовая схема с неуправляемыми диодами приведена на рисунке 8.31. Схема соединения вторичных обмоток трансформатора не оказывает влияния на функционирование устройства. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, изображены на рисунке 8.32.

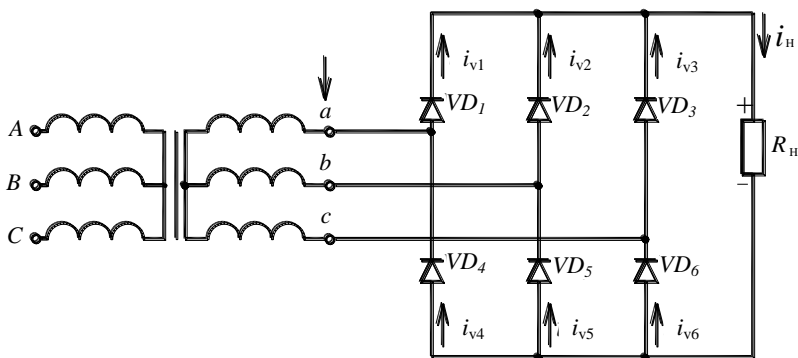


Рисунок 8.31 – Трехфазная мостовая схема выпрямления

Все вентили схемы можно разбить на две группы: катодную ( $VD_1, VD_2, VD_3$ ) и анодную ( $VD_4, VD_5, VD_6$ ). В катодной группе в течение каждой трети периода работает вентиль с наиболее высоким потенциалом анода, а в анодной – вентиль, катод которого наиболее отрицателен.

Открытие вентиля происходит в моменты естественной коммутации (точки  $k, l, m$  для диодов катодной группы и точки  $k', l', m'$  для диодов анодной группы). Чередование работы отдельных диодов можно проследить на временной диаграмме. Так, на интервале между точками  $k$  и  $m$  открыты диоды  $VD_1$  и  $VD_5$ . Между  $m'$  и  $l$  работают  $VD_1$  и  $VD_6$ , а на следующем временном отрезке ток протекает через  $VD_2$  и  $VD_6$ . В любой момент времени в проводящем состоянии находится один вентиль в анодной группе и один в катодной.

Основные характеристики трехфазной мостовой схемы выпрямления при работе на резистивную нагрузку без фильтра приведены в таблице 8.1.



Более высокие показатели мостовой схемы по сравнению с нулевой обусловили ее широкое применение как для мощных, так и для мало-мощных выпрямителей трехфазного тока.

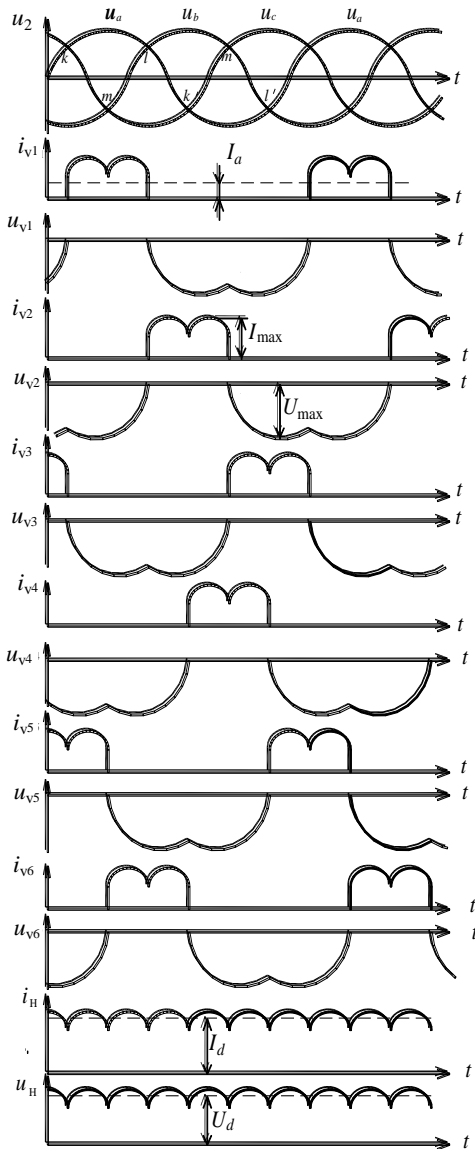


Рисунок 8.32 – Временные диаграммы трехфазной мостовой схемы

выпрямления:  $u_{\phi}$  – фазные напряжения на входе выпрямителя;  
 $i_{v1}, i_{v2}, i_{v3}, i_{v4}, i_{v5}, i_{v6}$  – кривые токов в первом – шестом диодах;  
 $u_{v1}, u_{v2}, u_{v3}, u_{v4}, u_{v5}, u_{v6}$  – кривые напряжений на первом – шестом диодах;  
 $i_n, i_n$  – кривые напряжения и тока на нагрузке

*Фильтрация выпрямленного напряжения.* Напряжение, получаемое от выпрямителей, является не постоянным, а пульсирующим. Оно состоит из постоянной и переменной составляющих. Чем больше переменная составляющая по отношению к постоянной, тем больше пульсация и хуже качество выпрямленного напряжения.

В реальных схемах переход тока с одного диода на другой происходит в течение некоторого конечного промежутка времени, измеряемого долями периода переменного напряжения и называемого углом коммутации. Наличие углов коммутации может существенно увеличивать амплитуду гармоник, в результате чего растут пульсации выпрямленного напряжения.

Переменная составляющая выпрямленного напряжения, состоящая из гармоник низкой и высокой частоты, создает в нагрузке переменный ток, который оказывает мешающее воздействие на другие электронные устройства.

Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения между выходными зажимами выпрямителя и нагрузкой включают сглаживающий фильтр, который значительно ослабляет пульсацию выпрямленного напряжения за счет подавления гармоник.

Основными элементами сглаживающих фильтров являются катушки индуктивности (дроссели) и конденсаторы, а при небольших мощностях и транзисторы.

Работа пассивных фильтров (без транзисторов и других усилителей) основана на зависимости от частоты значения величины сопротивления реактивных элементов (катушки индуктивности и конденсатора). Реактивные сопротивления катушки индуктивности  $x_L$  и конденсатора  $x_C$

$$x_L = 2\pi fL; \quad x_C = 1/(2\pi fC),$$

где  $f$  – частота тока, протекающего через реактивный элемент;

$L$  – индуктивность дросселя;

$C$  – емкость конденсатора.

Из формул для сопротивления реактивных элементов следует, что с увеличением частоты тока сопротивление катушки индуктивности растет, а конденсатора – уменьшается. Для постоянного тока сопротивление конденсатора равно бесконечности, а катушки индуктивности – нулю. Отмеченная особенность позволяет катушке индуктивности беспрепятственно пропускать постоянную составляющую выпрямленного тока и задерживать гармоники. Причем, чем больше номер гармоники (выше ее частота), тем эффективней она задерживается. Конденсатор наоборот полностью задерживает постоянную составляющую тока и пропускает гармоники.

Основным параметром, характеризующим эффективность работы фильтра, является коэффициент сглаживания (фильтрации)

$$q = p_1 / p_2 ,$$

где  $p_1$  – коэффициент пульсации на выходе выпрямителя без фильтра;  
 $p_2$  – коэффициент пульсации на выходе схемы с фильтром.

На практике применяются пассивные Г-образные, П-образные и резонансные фильтры. Наиболее широко используются Г-образные и П-образные, схемы которых приведены на рисунке 8.33.

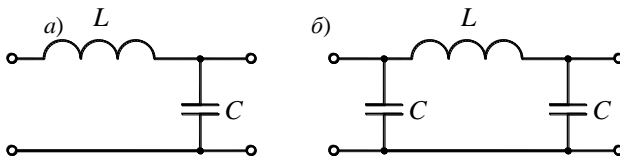


Рисунок 8.33 – Схемы пассивных сглаживающих Г-образного (а) и П-образного (б) фильтров

Расчет параметров фильтра начинают с определения коэффициента сглаживания. Далее, необходимо произвольно выбрать схему фильтра и емкость конденсатора в ней. Емкость конденсатора фильтра выбирают из ряда емкостей: 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000 мкФ.

Индуктивность дросселя в Г-образной схеме фильтра можно определить из приближённого выражения  $L \approx \frac{10q}{m^2 C}$ , для П-образной схемы –  $L \approx \frac{10^5 q}{C^2 m^3}$ .

В приведенных выражениях ёмкость подставляется в микрофарадах, а результат получается в генри.

### Контрольные вопросы

- 1 В чем отличие механизма электропроводности полупроводников от проводников?
- 2 Почему примесная проводимость полупроводников находит большее применение, чем собственная?
- 3 Как с помощью вольт-амперной характеристики объяснить свойство односторонней проводимости  $p$ - $n$ -перехода?
- 4 Приведите условия возникновения электрического и теплового пробоя  $p$ - $n$ -перехода.
- 5 Как можно классифицировать диоды?
- 6 Объясните принцип действия стабилитрона, варикапа, фотодиода и светодиода.
- 7 Для чего используются транзисторы, объясните принцип их действия.
- 8 Схема и свойства однофазного выпрямителя со средней точкой.
- 9 Схема и свойства однофазного мостового выпрямителя.
- 10 Схема и свойства трехфазного выпрямителя со средней точкой.
- 11 Схема и свойства трехфазного мостового выпрямителя.

- 12 Чем оценивается качество выпрямленного напряжения?
- 13 На чем основан принцип действия сглаживающих фильтров?
- 14 Чем оценивается качество работы сглаживающего фильтра?

*ПРИЛОЖЕНИЕ А*  
*(обязательное)*

## **ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ**

### **А.1 Действие тока на организм человека**

Проходя через организм, ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое воздействие [22].

Термическое воздействие тока вызывает ожоги отдельных участков тела, нагрев кровеносных сосудов, нервов, крови и т. п.

Электролитическое воздействие тока выражается в разложении крови и других органических жидкостей организма и вызывает значительные нарушения их физико-химического состава.

Биологическое воздействие тока проявляется как раздражение и возбуждение живых тканей организма, что сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц, легких и сердца. В результате могут возникнуть различные нарушения и даже полное прекращение работы органов кровообращения и дыхания.

Многообразие воздействия электрического тока выражается в получении двух видов поражения – электрической травме и электрическом ударе.

Электрическая травма представляет собой четко выраженное местное повреждение тканей организма в результате воздействия электрического тока или электрической дуги. В большинстве случаев электротравмы излечимы, однако при тяжелых ожогах исход поражения может быть смертельным.

Различают несколько видов электрических травм.

1 Электрический ожог, являющийся самой распространенной электротравмой, может быть токовым (или контактным) и дуговым.

2 Токовый ожог обусловлен прохождением тока через тело человека в результате его контакта с токоведущей частью и является следствием преобразования электрической энергии в тепловую.

Количество теплоты, выделяемой в ткани человека (Дж), определяется законом Джоуля – Ленца

$$Q = I_{\text{ч}}^2 R_{\text{ч}} t,$$

где  $I_{\text{ч}}$  – сила тока, проходящего через тело человека, А;

$R_{\text{ч}}$  – сопротивление тела человека, Ом;

$t$  – время протекания тока, с.

Ожоги подразделяют на четыре степени: I – покраснение кожи; II – образование пузырей; III – омертвление всей толщи кожи; IV – обугливание тканей.

Тяжесть поражения организма обуславливается не степенью ожога, а площадью обожженной поверхности тела. Токовые ожоги возникают при напряжении не выше 1–2 кВ и в большинстве случаев им присваивают I или II степень. Встречаются и тяжелые ожоги.

Дуговой ожог является следствием образования электрической дуги между токоведущей частью и телом человека, которая и причиняет ожог. Дуга имеет температуру выше 3500 °С и обладает весьма значительной энергией. Дуговые ожоги, как правило, тяжелые и имеют III или IV степень тяжести.

*Электрические знаки* – это четко очерченные пятна серого или бледно-желтого цвета, образующиеся на коже человека в результате воздействия тока. Знаки могут быть в виде царапин, ран, порезов или ушибов, бородавок, кровоизлияний и мозолей. Как правило, электрические знаки безболезненны и лечение их заканчивается благополучно.

*Металлизация кожи* – это проникновение в верхние слои кожи мельчайших частичек металла, расплавившегося под действием электрической дуги. Это может произойти при коротком замыкании, отключении рубильника, находящегося под нагрузкой, и т. п. Металлизация сопровождается ожогом кожи, вызываемым нагретым металлом.

*Электроофтальмия* – это поражение глаз, вызванное интенсивным излучением электрической дуги, спектр которой содержит вредные для глаз ультрафиолетовые и инфракрасные лучи. Кроме того, возможно попадание в глаза брызг расплавленного металла. Ношение защитных очков, не пропускающих ультрафиолетовые лучи, обеспечивают защиту глаз от брызг расплавленного металла.

*Механические повреждения* возникают в результате резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через тело человека. В результате могут произойти разрывы кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани, а также вывихи суставов и даже переломы костей. К этому же виду травм следует отнести ушибы и переломы, вызванные падением человека с высоты, ударами о предметы в результате непроизвольных движений или потери сознания при воздействии тока. Механические повреждения являются, как правило, серьезными травмами, требующими длительного лечения.

*Электрический удар* – это возбуждение живых тканей организма проходящим через него электрическим током, сопровождающееся непроизвольными судорожными сокращениями мышц. Электрические удары в зависимости от исхода воздействия тока на организм условно делят на следующие четыре степени:

- I – судорожное сокращение мышц;
- II – судорожное сокращение мышц, потеря сознания;

– III – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (либо того и другого вместе);

– IV – клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Причинами смерти в результате поражения электрическим током могут быть прекращение работы сердца или легких и электрический шок.

Прекращение работы сердца, как следствие воздействия тока на мышцу сердца, наиболее опасно. Это воздействие может быть прямым, когда ток протекает через область сердца, и рефлекторным, когда ток проходит через центральную нервную систему. В обоих случаях может произойти остановка сердца или наступить его фибриляция (беспорядочное сокращение мышечных волокон сердца – фибрилл), что приводит к остановке кровообращения.

Прекращение дыхания может быть вызвано воздействием тока на мышцы грудной клетки, участвующие в процессе дыхания.

При длительном воздействии тока наступает так называемая асфиксия (удушие) – болезненное состояние, являющееся результатом недостатка кислорода и избытка диоксида углерода в организме. При асфиксии последовательно утрачиваются сознание, чувствительность, рефлексы, затем прекращается дыхание и, наконец, останавливается сердце – наступает клиническая смерть.

*Электрический шок* – своеобразная тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма на сильное раздражение электрическим током, сопровождающаяся серьезными нарушениями кровообращения, дыхания, обмена веществ и т. п. Шоковое состояние длится от нескольких десятков минут до суток. После этого может наступить либо полное выздоровление, как результат своевременного лечебного вмешательства, или гибель организма из-за полного угасания жизненно важных функций.

## **A.2 Факторы, определяющие опасность поражения током**

Характер и последствия воздействия тока на человека определяются электрическим сопротивлением тела человека, напряжением и продолжительностью воздействия тока. Они также зависят от пути прохождения тока через тело человека, рода и частоты электрического тока, а также от условий внешней среды и индивидуальных особенностей человека [22].

*Электрическое сопротивление тела человека.* Тело человека является неоднородным по электрическому сопротивлению проводником тока. Наибольшее сопротивление току оказывает кожа, поэтому общее сопротивление тела человека определяется главным образом величиной сопротивления кожи. Кожа состоит из двух основных слоев: наружного – эпидермиса и внутреннего – дермы. Наружный слой, в свою очередь, состоит из нескольких слоев, верхний из которых называется роговым.

Роговой слой в сухом незагрязненном состоянии можно рассматривать как диэлектрик. Его удельное объемное сопротивление достигает

105–106 Ом·м, в тысячи раз превышая сопротивление других слоев кожи (дермы) и внутренних тканей организма.

Сопротивление тела человека при сухой чистой и неповрежденной коже (измеренное при напряжении 15–20 В) колеблется в пределах от 3 до 100 кОм и более, а сопротивление внутренних слоев тела составляет всего 300–500 Ом. Для проведения расчетов по технике безопасности величину сопротивления тела человека принимают, исходя из наиболее тяжелых условий, равной 1000 Ом.

В действительности сопротивление тела человека не является постоянным. Оно зависит от состояния кожи, окружающей среды, параметров электрической цепи и т. д. Повреждения рогового слоя (порезы, царапины, ссадины) снижают сопротивление тела до 500–700 Ом, что увеличивает опасность поражения человека током. Такое же влияние оказывает увлажнение кожи водой или потом. Загрязнение кожи вредными веществами, хорошо проводящими ток (пыль, окалина), тоже приводит к снижению ее сопротивления.

Имеют значение площадь контакта и место касания, поскольку сопротивление кожи неодинаково на разных участках тела. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, ладоней и рук, особенно на стороне, обращенной к туловищу (подмышечных впадинах и др.). Кожа тыльной стороны кисти и подошв имеет сопротивление, во много раз превышающее сопротивление кожи других участков тела.

При увеличении тока и времени его прохождения сопротивление тела человека падает, потому что вследствие местного нагрева кожи расширяются сосуды, усиливается кровоснабжение этого участка и потовыделение.

Сопротивление тела человека уменьшается при повышении частоты тока и при 10–20 кГц наружный слой кожи практически утрачивает устойчивость к току.

*Сила тока и напряжение.* Основным фактором, определяющим исход поражения человека током, является сила тока, проходящего через его тело (таблица А.1).

*Таблица А.1 – Пороговые значения различных видов тока*

Вид тока, протекающего через организм человека *	Сила тока, мА	
	переменный	постоянный
Ощутимый – вызывает ощутимые раздражения	0,6–1,5	5–7
Неотпускающий – вызывает непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник	10–15	50–60
Фибрилляционный – вызывает фибрилляцию сердца	100	300
* Мгновенная остановка сердца наступает при силе тока, равной 5 А.		



Напряжение, приложенное к телу человека, также влияет на исход поражения, поскольку оно определяет значение силы тока, проходящего через человека. Рост напряжения приводит к пробоем рогового слоя кожи, поэтому сопротивление кожи уменьшается в десятки раз, приближаясь к сопротивлению внутренних тканей (300–500 Ом), соответственно увеличивается сила тока.

*Род и частота тока.* Постоянный ток примерно в 4–5 раз безопаснее переменного, но это справедливо лишь до напряжений 250–300 В. При более высоких значениях напряжения постоянный ток становится более опасным, чем переменный (с частотой 50 Гц).

Наибольшую опасность представляет ток с частотой от 50 до 1000 Гц. При дальнейшем повышении частоты опасность поражения уменьшается и полностью исчезает при частоте 45–50 кГц. Эти токи опасны лишь с точки зрения ожогов. Снижение опасности поражения током с ростом частоты становится практически заметным при 1–2 кГц.

*Продолжительность воздействия тока.* Длительное воздействие тока приводит к тяжелым, а иногда смертельным поражениям тела человека.

Безопасным считается длительное воздействие тока силой 1 мА, при продолжительности действия до 30 с безопасен ток 6 мА.

*Путь прохождения тока через тело человека.* Этот фактор играет также существенную роль в исходе поражения, т. к. ток может пройти через жизненно важные органы – сердце, легкие, головной мозг и т. д.

Возможных путей прохождения тока через тело человека, которые называются также петлями тока, достаточно много. Наиболее опасны петли тока, которые затрагивают область сердца, т. е. голова–руки и голова–ноги, однако, они возникают относительно редко.

*Индивидуальные свойства человека.* Установлено, что физически здоровые и крепкие люди легче переносят электрические удары. Повышенной восприимчивостью к току отличаются лица, страдающие болезнями кожи, имеющие заболевания сердечно-сосудистой системы, органов внутренней секреции и легких, нервные болезни и др.

Правилами безопасности при эксплуатации электроустановок предусматривается отбор персонала для обслуживания действующих электроустановок, исходя из состояния здоровья людей. С этой целью проводят медицинское освидетельствование лиц при поступлении их на работу, которое проводится один раз в два года с учетом перечня болезней и расстройств, являющихся противопоказанием к обслуживанию электроустановок.

*Условия внешней среды.* Состояние воздушной среды, а также окружающая обстановка могут существенным образом влиять на опасность поражения током.

Сырость, токопроводящая пыль, наличие едких паров и газов, разрушающе действующих на изоляцию электроустановок, а также высокая температура окружающего воздуха, снижают электрическое сопротивление тела человека, что еще больше увеличивает опасность поражения током.

Воздействие тока на человека усугубляют также токопроводящие полы и близко расположенные к электрооборудованию металлические конструкции, имеющие связь с землей, т. к. при одновременном касании этого предмета и корпуса электрооборудования, случайно оказавшегося под напряжением, через человека пройдет ток большой силы.

В зависимости от перечисленных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, согласно [23] все помещения по опасности поражения людей током делят пять классов.

1 *Помещения без повышенной опасности*: помещения, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность поражения людей электрическим током.

2 *Помещения непроводящие (изолирующие)*: помещения, зоны, площадки, в которых (на которых) защита при косвенном прикосновении обеспечивается высоким сопротивлением пола и стен и в которых отсутствуют заземленные проводящие части.

3 *Помещения, опасные с точки зрения поражения людей электрическим током*: помещения с повышенной опасностью, особо опасные помещения, территория открытых электроустановок, которая приравнивается к особо опасным помещениям.

4 *Помещения особо опасные*: помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность поражения людей электрическим током:

- особо сырые;
- с химически активной или органической средой;
- одновременно два или более условий повышенной опасности.

5 *Помещения с повышенной опасностью*: помещения, характеризующиеся наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность поражения людей электрическим током:

- высокая температура;
- сырость или токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т. п.);
- возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, имеющим соединение с землей, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования (открытым проводящим частям) – с другой.

### А.3 Условия и основные причины поражения током

При изучении причин электротравматизма необходимо различать прямой контакт человека с токоведущими частями электроустановок и косвенный. Первый, как правило, возникает при грубейших нарушениях правил эксплуатации электроустановок, второй – в результате аварийных ситуаций, например при пробое изоляции [22].

Поражение человека током возможно лишь при его непосредственном контакте с точками электроустановки, между которыми существует разность потенциалов, или с точкой, потенциал которой отличается от потенциала земли. Опасность такого прикосновения оценивается величиной тока, проходящего через тело человека, или напряжением прикосновения. Напряжение прикосновения – это напряжение между точками цепи тока, которых одновременно касается человек [24]. Необходимо иметь в виду, что электрическая цепь – это совокупность устройств и объектов, образующих путь для тока, электромагнитные процессы в котором могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

В свою очередь, напряжение прикосновения и токи, проходящие через тело человека, зависят от схемы включения человека в электросеть, напряжения, схемы самой сети, режима ее нейтрали, степени изоляции токоведущих частей, их емкостной составляющей относительно земли и многих других факторов. Выбор схемы сети и, соответственно, режима нейтрали источника тока определяется как технологическими требованиями (величина рабочего напряжения, протяженность сети, количество потребителей и т. п.), так и условиями безопасности.

Схемы включения человека в электросеть могут быть различными. Однако наиболее распространенными применительно к сетям переменного тока являются две: когда человек одновременно касается двух проводов (двухфазное включение) или когда он касается лишь одного провода или корпуса электрооборудования, находящегося под напряжением (однофазное включение). Во втором случае предполагается наличие электрической связи между сетью и землей.

Двухфазное включение человека в электрическую сеть с изолированной нейтралью является наиболее опасным, поскольку в данном случае человек находится под наибольшим в данной сети линейным напряжением.

При двухфазном включении, независимо от вида сетей, человек попадает под полное линейное напряжение сети и величина силы тока, проходящего через тело человека, определяется по формуле

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{л}} / R_{\text{ч}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} / R_{\text{ч}}.$$

При двухфазном включении ток, проходящий через тело человека, не зависит от режима нейтрали сети.

Таким образом, опасность поражения человека при двухфазном прикосновении не уменьшится даже в том случае, если он будет надежно изолирован от земли с помощью диэлектрических галош, бот, ковриков, пола.

Однофазное включение человека в электрическую сеть менее опасно, т. к. напряжение, под действием которого оказывается человек, не превышает фазного, т. е. меньше линейного в 1,73 раза. Однако в данном случае исход поражения будет определяться режимом нейтрали.

При однофазном включении в электрическую сеть с глухозаземленной нейтралью ток, проходящий через тело человека, определяется по формуле

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_{\text{з}}),$$

где  $R_{\text{об}}$ ,  $R_{\text{п}}$  и  $R_{\text{з}}$  – соответственно сопротивления обуви, пола и заземления нейтрали источника тока, Ом.

В наиболее неблагоприятных случаях, когда человек стоит на сырой земле или на металлическом полу и в сырой обуви, т. е. когда сопротивление обуви и пола приближается к нулю, а сопротивление заземления по условиям ПУЭ не должно превышать 10 Ом, сила тока, проходящего через тело человека, будет являться для него смертельной и равна:

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / R_{\text{ч}} = 220 / 1000 = 0,22 \text{ А.}$$

С другой стороны, если человек обут в нетокопроводящую обувь (резиновые галоши с сопротивлением 45 кОм) и стоит на изолирующем коврике или сухом деревянном полу  $R_{\text{п}} = 100$  кОм, то сила тока, проходящего через тело человека, будет составлять

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / R_{\text{ч}} = 220 / (1000 + 45000 + 10000 + 10) = 0,0015 \text{ А.}$$

Полученное значение силы тока 1,5 мА не опасна для человека, что доказывает важную роль нетокопроводящей обуви и изолирующих полов.

В производственных условиях изоляция фазных проводов, изготовленных из диэлектрических материалов, в процессе старения, увлажнения, воздействия агрессивных сред, истирания, повреждения и т. п. изменяется неодинаково. Поэтому расчет безопасных условий эксплуатации электроустановок осложняется вследствие необходимости учета реальных значений сопротивления изоляции каждой из фаз сети.

Использование трехфазной сети с изолированной нейтралью более безопасно только при нормальных режимах работы, а в аварийных режимах она становится опаснее сети с глухозаземленной нейтралью. Отсюда вытекает необходимость постоянного контроля сопротивления изоляции проводов.

Электроустановки с рабочим напряжением выше 1000 В представляют значительную опасность при прикосновении к фазе независимо от режима нейтрали. Поэтому для предотвращения поражения током необходимо исключать возможность не только касания, но и приближения человека на

опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением, поскольку может возникнуть искровой разряд, переходящий в электрическую дугу.

В объеме земли, где протекает ток, возникает так называемая «зона растекания тока замыкания на землю» – зона земли, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания на землю, может быть условно принят равным нулю [24]. В соответствии с этим ток замыкания на землю – это ток, проходящий через место замыкания на землю.

Теоретически зона растекания простирается до бесконечности, однако в реальных условиях уже на расстоянии 20 м от заземлителя плотность тока растекания и потенциал практически равны нулю.

Характер потенциальной кривой растекания существенным образом зависит от формы заземлителя. Так, для одиночного полусферического заземлителя потенциал на поверхности земли будет изменяться по уравнению гиперболы (рисунок А.1).

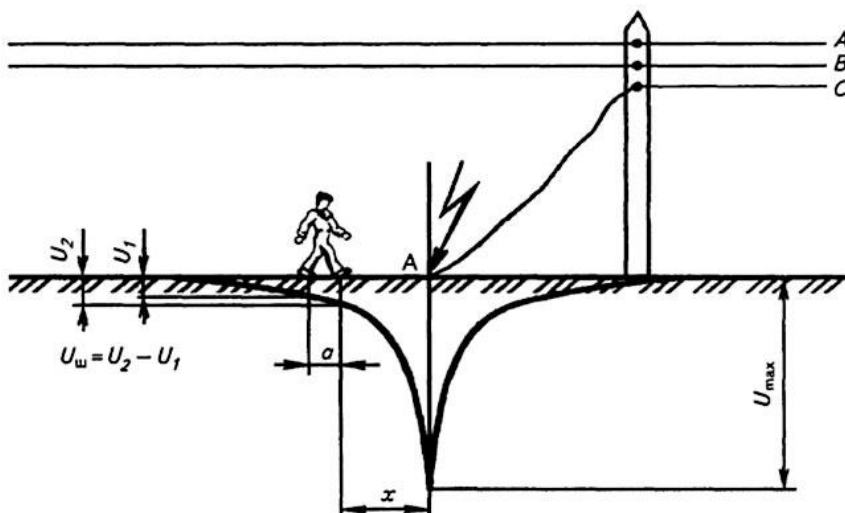


Рисунок А.1 – Образование шагового напряжения

Растекание тока замыкания в грунте определяет характер распределения потенциалов на поверхности земли, что, в свою очередь, приводит к возникновению нового вида поражения человека, а именно попадание его под напряжение прикосновения или напряжение шага.

Напряжение прикосновения может возникнуть в том случае, если человек будет находиться на земле или на токопроводящем полу и касаться при этом корпуса заземленного электрооборудования, случайно оказавшегося под напряжением.

Человек также может оказаться под напряжением, попав в зону растекания тока в земле при обрыве провода, наличии заземляющего устройства, при ударе молнии и стекании электрического разряда в землю, повреждении изоляции проводов и т. д. Это напряжение называют напряжением шага, т. е. напряжением между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии длины шага, на которой стоит человек [24].

Напряжение шага определяется как разность потенциалов отдельных точек земли, которые оказываются под ногами человека в зоне растекания тока

$$U_{\text{ш}} = I_3 \rho a / 2\pi x(x + a),$$

где  $I_3$  – ток замыкания на землю, А;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$a$  – длина шага человека (0,8 м);

$x$  – расстояние от заземлителя до одной ноги, м.

Очевидно, чем шире шаг, тем шаговое напряжение будет выше и может достигнуть опасной величины. Поражение при шаговом напряжении усугубляется тем, что из-за судорожных сокращений мышц ног человек может упасть, тем самым увеличивая величину шагового напряжения за счет своего роста и замыкания цепи тока на теле через жизненно важные органы. Поэтому выходить из зоны растекания тока необходимо короткими шагами. Напряжение шага считается допустимым, если оно не превышает 40 В. А в случае падения провода на землю не допускается приближение к нему в радиусе 6–8 м от места замыкания на землю.

Для того, чтобы не оказаться жертвой напряжения шага неподалеку от оборванного провода линии электрических передач, следует в обязательном порядке соблюдать следующие правила:

- покинуть зону опасности, удалившись на расстояние более 8 м;
- при передвижении использовать «гусиный шаг» без отрыва ног друг от друга (рисунок А.2). Прикасаться к предметам и людям в зоне растекания токов категорически запрещается.

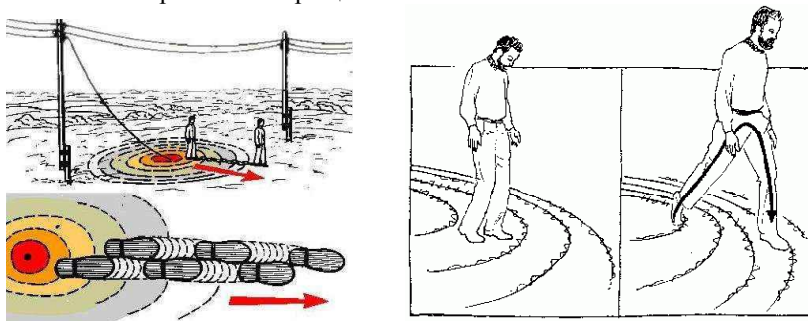


Рисунок А.2 – Правила выхода из опасной зоны

#### А.4 Оказание первой доврачебной помощи при поражении током

Первую доврачебную помощь пораженному током человеку должен уметь оказать каждый работающий с электроустановками. Первая помощь в случае поражения человека электрическим током состоит из двух этапов: освобождение пострадавшего от действия тока и оказание ему доврачебной медицинской помощи [22].

*Освобождение пострадавшего от действия тока.* Необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от действия тока, т. к. от продолжительности зависит исход электротравмы (рисунок А.3).

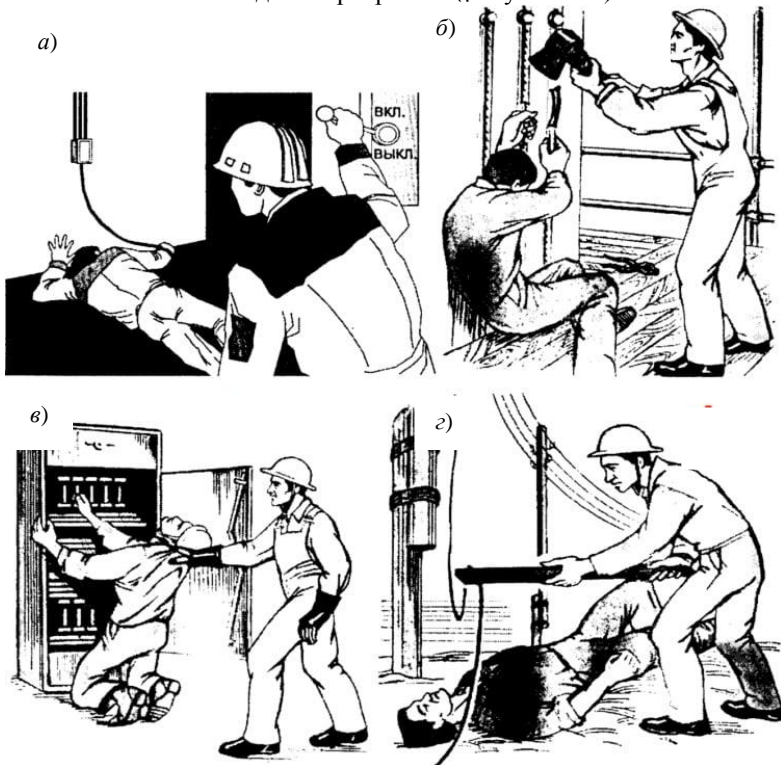


Рисунок А.3 – Освобождение пострадавшего от воздействия тока

Прикосновение к токоведущим частям вызывает в большинстве случаев непроизвольное судорожное сокращение мышц и общее возбуждение, которое может привести к нарушению и даже полному прекращению деятельности органов дыхания и кровообращения. Если пострадавший удерживает провод руками, его пальцы так сильно сжимаются, что высвободить провод из его рук становится невозможным, поэтому первое действие оказываю-

щего помощь должно состоять в немедленном отключении электроустановки. Отключение производится с помощью выключателей, рубильника или другого отключающего аппарата, а также путем удаления предохранителей (пробок), разъема штепсельного соединения (см. рисунок А.3, а и б).

Если пострадавший находится на высоте, то отключение установки и освобождение от тока может вызывать его падение. В этом случае необходимо принять меры, предупреждающие падение пострадавшего или обеспечивающие его безопасность.

Если отключить установку достаточно быстро нельзя, необходимо принять иные меры к освобождению пострадавшего от действия тока. Во всех случаях оказывающий помощь не должен прикасаться к пострадавшему без надлежащих мер предосторожности, т. к. это опасно для жизни. Он должен следить и за тем, чтобы самому не оказаться в контакте с токоведущей частью и под напряжением шага.

Для отделения пострадавшего от токоведущих частей или провода напряжением до 1000 В следует воспользоваться канатом, палкой, доской или каким-либо другим сухим предметом, не проводящим электрический ток. Можно также оттянуть его за одежду (если она сухая и отстает от тела), например за полы пиджака или пальто, за воротник, избегая при этом прикосновения к окружающим металлическим предметам и частям тела пострадавшего, не прикрытым одеждой (см. рисунок А.3, в и г).

Для изоляции рук оказывающий помощь, особенно если ему необходимо коснуться к части тела пострадавшего, не прикрытой одеждой, должен надеть диэлектрические перчатки или обмотать руку шарфом, надеть на нее суконную фуражку, натянуть на руку рукав пиджака или пальто, накинуть на пострадавшего резиновый коврик, прорезиненную материю (плащ) или просто сухую материю. Можно также изолировать себя, встав на резиновый коврик, сухую доску или какую-либо не проводящую электрический ток подстилку, сверток одежды и т. п.

При отделении пострадавшего от токоведущих частей рекомендуется действовать одной рукой, держа вторую в кармане или за спиной.

Можно также перерубить провод топором с сухой деревянной рукояткой или перекусить его инструментом с изолированными рукоятками (кусачками, пассатижами и т. п.). Перерубать или перекусывать провода необходимо пофазно, т. е. каждый провод в отдельности, при этом рекомендуется, по возможности, стоять на сухих досках, деревянной лестнице и т. п. Можно воспользоваться и неизолированным инструментом, обернув его рукоятку сухой материей.

Для отделения пострадавшего от токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В, следует надевать диэлектрические перчатки и боты и действовать штангой или изолирующими клещами, рассчитанными на соответствующее напряжение. При этом надо помнить об опасности



напряжения шага, если токоведущая часть (провод и т. п.) лежит на земле. На линиях электропередачи, когда нельзя быстро отключить их от пунктов питания, для освобождения пострадавшего, если он касается проводов, следует произвести замыкание проводов накоротко, набросив на них гибкий неизолированный провод. Провод должен иметь достаточное сечение, чтобы он не перегорел при прохождении через него тока короткого замыкания.

Перед тем как произвести наброс, один конец провода надо заземлить (присоединить его к телу металлической опоры, заземлению и др.). Для удобства наброса на свободный конец проводника желательно прикрепить груз. Набрасывать проводник надо так, чтобы он не коснулся людей, в том числе оказывающего помощь и пострадавшего. Если пострадавший касается одного провода, то часто достаточно заземлить только этот провод.

*Способы оказания первой помощи.* После освобождения от действия тока пострадавшего необходимо вынести из опасной зоны и оценить его состояние. Признаки, по которым можно быстро определить состояние пострадавшего, следующие:

- сознание: ясное, отсутствует, нарушено (пострадавший заторможен), человек возбужден;

- цвет кожных покровов и видимых слизистых (губ, глаз): розовые, синюшные, бледные;

- дыхание: нормальное, отсутствует, нарушено (неправильное, поверхностное, хрипящее);

- пульс на сонных артериях: хорошо определяется (ритм правильный или неправильный), плохо определяется, отсутствует;

- зрачки: узкие, широкие.

Цвет кожных покровов и наличие дыхания (по подъему и опусканию грудной клетки) оценивают визуально. Нельзя тратить время на прикладывание ко рту и носу зеркала, блестящих металлических предметов.

Утрату сознания можно оценить визуально, а для убедительности обратиться к пострадавшему, спросив о его самочувствии.

Пульс на сонной артерии прощупывают подушечками второго, третьего и четвертого пальцев руки, располагая их вдоль шеи между кадыком (адамово яблоко) и кивательной мышцей и слегка прижимая к позвоночнику. Приемы определения пульса на сонной артерии очень легко отработать на себе или своих близких.

Ширину зрачков при закрытых глазах определяют следующим образом: подушечки указательных пальцев кладут на верхние веки обоих глаз и, слегка придавливая их к глазному яблоку, поднимают вверх. При этом глазная щель открывается и на белом фоне видна округлая радужка, а в центре ее округлой формы – черные зрачки, состояние которых (узкие или широкие) оценивают по тому, какую площадь радужки они занимают.

Как правило, степень нарушения сознания, цвет кожных покровов и состояние дыхания можно оценивать одновременно с прощупыванием пульса, что занимает не более минуты. Осмотр зрачков удается провести за несколько секунд.

Если у пострадавшего *отсутствуют сознание, дыхание, пульс*, кожный покров синюшный, а зрачки широкие (0,5 см в диаметре), можно считать, что он находится в состоянии клинической смерти. В этом случае следует *немедленно* приступить к оживлению организма (реанимации) с помощью искусственного дыхания по способу «изо рта в рот» или «изо рта в нос» и наружного массажа сердца. Не следует раздевать пострадавшего, теряя драгоценные секунды. Приступив к оживлению, нужно позаботиться о вызове врача или скорой медицинской помощи. *Это должен сделать не оказывающий помощь, а кто-то другой.*

Искусственное дыхание также необходимо проводить, если пострадавший дышит очень редко, судорожно и у него прощупывается пульс. Не обязательно, чтобы при проведении искусственного дыхания пострадавший находился в горизонтальном положении.

Для проведения искусственного дыхания желательно пострадавшего уложить на спину, расстегнуть стесняющую дыхание одежду. Необходимо обеспечить проходимость верхних дыхательных путей, которые в положении на спине при бессознательном состоянии всегда закрыты запавшим языком. Кроме того, в полости рта может находиться инородное содержимое (рвотные массы, песок, ил, трава, если человек тонул, и т. п.), которое необходимо удалить пальцем, обернутым платком (тканью) или бинтом. После этого оказывающий помощь располагается сбоку от головы пострадавшего, одну руку подсовывает под его шею, а ладонью другой руки надавливает на лоб пострадавшему, максимально запрокидывая голову. Корень языка пострадавшего поднимается и освобождает вход в гортань, а рот открывается. Оказывающий помощь наклоняется к лицу пострадавшего, делает глубокий вдох открытым ртом, полностью плотно охватывает губами открытый рот пострадавшего и делает энергичный выдох, с некоторым усилием вдувая воздух в его рот; одновременно он закрывает нос пострадавшего щекой или пальцами руки.

Необходимо обязательно наблюдать за грудной клеткой пострадавшего. Как только грудная клетка поднялась, нагнетание воздуха приостанавливают, оказывающий помощь поворачивает лицо в сторону, происходит пассивный выдох у пострадавшего. Если у пострадавшего хорошо определяется пульс и необходимо только искусственное дыхание, то интервал между искусственными вдохами должен составлять 5 с (12 дыхательных циклов в минуту). Кроме расширения грудной клетки хорошим показателем эффективности искусственного дыхания может служить порозовение кожных по-

кровов и слизистых, а также выход больного из бессознательного состояния и появление у него самостоятельного дыхания.

Прекращают искусственное дыхание после восстановления у пострадавшего достаточно глубокого и ритмичного самостоятельного дыхания. При остановке сердца, не теряя ни секунды, пострадавшего необходимо уложить на ровное жесткое основание (скамью, пол, в крайнем случае положить под спину доску).

Если помощь оказывает один человек, то он располагается сбоку от пострадавшего и, наклонившись, делает два быстрых энергичных вдувания способом «изо рта в рот» или «изо рта в нос», затем поднимается, оставаясь на этой же стороне от пострадавшего, ладонь одной руки кладет на нижнюю половину грудины, отступив на два пальца от ее нижнего края, а пальцы приподнимает. Ладонь второй руки он кладет поверх первой поперек или вдоль и надавливает, помогая наклоном своего корпуса. Руки при надавливании должны быть выпрямлены в локтевых суставах. Надавливание следует производить быстрыми толчками, так, чтобы смещать грудину на 4–5 см, продолжительность надавливания должна быть не более 0,5 с, а интервал между отдельными надавливаниями – 0,5 с. В паузах руки с грудины не снимают, пальцы остаются прямыми, руки полностью выпрямлены в локтевых суставах. Если оживление проводит один человек, то на каждые два выдыхания он проводит 15 надавливаний на грудину (рисунок А.4).

При участии в реанимации двух человек соотношение «дыхание–массаж» составляет 1:5. Во время искусственного вдоха пострадавшего выполняющий массаж сердца надавливание не производит, т. к. усилия, развиваемые при надавливании, значительно больше, чем при вдувании воздуха. После того как восстановится сердечная деятельность, и будет хорошо определяться пульс, массаж сердца немедленно прекращают, продолжая искусственное дыхание при слабом дыхании пострадавшего и стараясь, чтобы естественный и искусственный вдохи совпали.

Если пострадавший в сознании, но до этого был в обмороке или находился в бессознательном состоянии с сохранившимся устойчивым дыханием и пульсом, его следует уложить на подстилку (например, из одежды); расстегнуть одежду, стесняющую дыхание; согреть тело, если холодно; обеспечить прохладу, если жарко; создать полный покой, непрерывно наблюдая за пульсом и дыханием; удалить из помещения лишних людей.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, необходимо наблюдать за его дыханием. В случае нарушения дыхания из-за западания языка, необходимо выдвинуть нижнюю челюсть вперед, взявшись пальцами за ее углы, и поддерживать ее в таком положении, пока не прекратится западание языка.

При возникновении у пострадавшего рвоты, необходимо повернуть его голову и плечи налево – для удаления рвотных масс.

**ПРОВЕРЬ РЕАКЦИЮ ПОСТРАДАВШЕГО:**

1. Осторожно встряхнуть.
2. Прямо окликнуть. «С Вами все в порядке!»



**СЕРДЕЧНО-ЛЕГочНАЯ РЕАНИМАЦИЯ (СЛР)  
в соотношении 30:2 (на 30 компрессий 2 вдоха)**

**Правила проведения закрытого (непрямого) массажа сердца**

1. Определите место расположения мечевидного отростка, как показано на рисунке.
2. Определите точку компрессии на два поперечных пальца выше мечевидного отростка, строго по центру вертикальной оси.
3. Положите основание ладони на точку компрессии.
4. Компрессии проводите ладонью. Глубина прогибания грудной клетки должна быть не менее 5-6 см, частота 100-120 надавливаний в 1 минуту.
5. — детям грудного возраста массаж проводят ладонями поперек ладони и третьего пальца;
6. — подросткам — ладонью одной руки;

— у взрослых твоя ладонь на основание ладони, большой палец выпирает на сторону (на сторону пострадавшего). Ладонь прогибается и не касаются грудной клетки.

Компрессорный пульт на сонной артерии, реакция зрачков на свет

**Последовательность проведения искусственной вентиляции легких**

1. Обеспечьте проходимость верхних дыхательных путей. С помощью языка (пальца) удерживайте нижнюю челюсть на полности рта слегка, крича, избегая сдавливания шеи.
2. Запрокиньте голову пострадавшего. (Применяйте подбородок, удерживая шею одной рукой (позвоночника). Не выдыхайте при погружении на вертелом шейного отдела позвоночника!
3. Зажмите нос пострадавшего, проведите выдох ему в рот. (Для детей три секунды на каждый выдох пострадавшего. Компрессор, применяемый в груди пострадавшего при входе и отсасывается на три выдоха.

Зажать нос пострадавшего большим и указательными пальцами. Носовую перегородку для искусственной вентиляции легких приоткрыть-открыть, герметизировать.

Зажать нос пострадавшего, проведите выдох ему в рот. (Для детей три секунды на каждый выдох пострадавшего. Компрессор, применяемый в груди пострадавшего при входе и отсасывается на три выдоха.

ЕСЛИ В ХОДЕ РЕАНИМАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ДЫХАНИЕ, СЕРДЕЦНИЦЕ НЕ ВОССТАНАВЛИВАЮТСЯ, А ЗРАЧКИ ОСТАЮТСЯ ШИРОКО ЗАМЫКАЮТСЯ В ТЕМНОМ — ЭТО МЕРТВЕЦ. НЕ ПОМОЖЕТ И ПОМОЩЬ НЕТ, СЛЕДУЕТ СЧИТАТЬ, ЧТО НАСТУПИЛА ВНЕОЖИДАННАЯ СМЕРТЬ ПОСТРАДАВШЕГО

Рисунок А.4 — Пример плаката по правилам оказания реанимации

Ни в коем случае нельзя позволять пострадавшему двигаться, а тем более продолжать работу, т. к. отсутствие видимых тяжелых повреждений от электрического тока или других причин (падения и т. п.) еще не исключает возможности последующего ухудшения его состояния. Только врач может сделать заключение о состоянии здоровья пострадавшего.

Переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно (например, на опоре).

В случае невозможности вызова врача на место происшествия, надо обеспечить транспортировку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение. Перевозить пострадавшего можно только при удовлетворительном дыхании и устойчивом пульсе. Если состояние пострадавшего не позволяет его транспортировать, необходимо продолжать оказывать помощь.

*Первая помощь при ожогах.* При тяжелых ожогах, вызванных дугой, электрическим током, паром или горячей мастикой, надо осторожно снять с пострадавшего одежду и обувь (лучше разрезать их). Нельзя касаться руками обожженного участка кожи или смазывать его какими-либо мазями, маслами, вазелином или раствором, т. к. ожоговая рана при загрязнении может загноиться и долго не заживать. Обожженную поверхность следует перевязать без обработки, покрыть стерильным материалом, сверху положить слой ваты и закрепить бинтом. После этого пострадавшего направляют в лечебное учреждение.

Не следует вскрывать пузыри, удалять приставшие к обожженному месту обуглившиеся вещества, оттирать обгоревшие куски одежды, т. к., удаляя их, вы можете повредить кожу и создать условия для нагноения.

При ожогах глаз следует сделать пострадавшему холодные примочки из раствора борной кислоты и немедленно отправить его к врачу.

При поражении молнией оказывается та же помощь, что и при поражении электрическим током.

Выполнение вышеперечисленных действий поможет сохранить жизнь пострадавшему до прибытия медицинского персонала!

#### **А.5 Безопасность эксплуатации электроустановок**

Эксплуатация электроустановок должна осуществляться в строгом соответствии с действующими [23], [25] и другими нормативными документами.

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Согласно [24] электробезопасность должна обеспечиваться:

- конструкцией электроустановок;
- техническими способами и средствами защиты;

– организационными и техническими мероприятиями.

Конструкция электроустановок должна соответствовать условиям их эксплуатации, обеспечивать защиту персонала от опасных и вредных воздействий электрического тока и электромагнитных полей, соприкосновения с токоведущими и движущимися частями. Ограждение токоведущих частей является обязательной частью конструкции электрооборудования.

Конструкции электрооборудования по способу защиты человека от поражения током подразделяются на пять классов защиты: 0; 01; I; II и III.

*Класс 0* – электрооборудование, которое имеет рабочую изоляцию, но не имеет элементов для заземления, если это оборудование не отнесено к классам II и III.

*Класс 01* – электрооборудование, имеющее рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения этого оборудования к источнику питания.

*Класс I* – электрооборудование, которое в отличие от электрооборудования класса 01 в проводе для присоединения к источнику питания имеет заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом.

*Класс II* – электротехническое оборудование, имеющее двойную или усиленную изоляцию, но не имеющее элементов для заземления.

*Класс III* – электрооборудование, которое не имеет ни внешних, ни внутренних электрических цепей напряжением выше 42 В.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением, используют следующие способы:

- защитное заземление;
- защитное зануление;
- защитное отключение;
- выравнивание потенциала;
- электрическое разделение сети;
- система защитных проводов;
- изоляция токоведущих частей;
- безопасные (малые) напряжения;
- контроль изоляции;
- компенсация токов замыкания на землю;
- средства индивидуальной защиты и др.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям кроме того используют защитные оболочки, защитные ограждения (временные или стационарные), безопасное расположение токоведущих частей, изоляцию токоведущих частей (рабочая, дополнительная, усиленная, двойная), изоляцию рабочего места, предупредительную сигнализацию, блокировку, знаки безопасности.

Все вышеперечисленные способы и средства защиты могут использоваться как отдельно, так и в сочетании друг с другом.

### А.6 Защитное заземление. Зануление

Самыми эффективными средствами защиты от поражения электрическим током являются защитное заземление и зануление электроустановок. В соответствии с ГОСТ 12.1.009–76:

*защитное заземление* – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением;

*зануление* – это преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

В вопросах применения и практического выполнения защитного заземления и зануления следует руководствоваться требованиями не только ПУЭ, но и ГОСТ Р 50571, в котором приводится классификация систем заземления электрических сетей: IT, TT, TN–C, TN–C–S, TN–S (рисунок А.5).

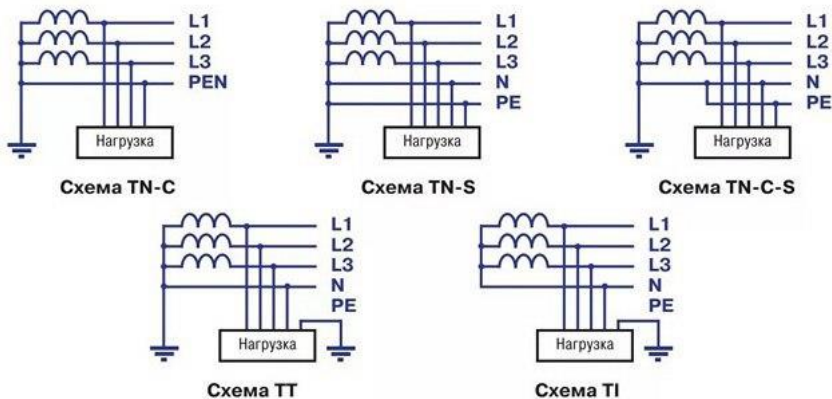


Рисунок А.5 – Разновидности систем заземления

Применительно к сетям переменного тока напряжением до 1 кВ обозначения имеют следующий смысл.

*Первая буква* – характер заземления источника питания (режим нейтрали вторичной обмотки трансформатора):

- I – изолированная нейтраль;
- T – глухозаземленная нейтраль.

*Вторая буква* – характер заземления открытых проводящих частей (металлических корпусов) электроустановки:

T – непосредственная связь открытых проводящих частей (ОПЧ) с землей (защитное заземление);

N – непосредственная связь ОПЧ с заземленной нейтралью источника питания (зануление).

Последующие буквы (если они имеются) – устройство нулевого рабочего и нулевого защитного проводников:


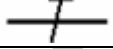

S – нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники объединены по всей сети;

S–S – проводники N и PE объединены в части сети;

S – проводники N и PE работают раздельно во всей сети.

Проводники, используемые в различных типах сетей, должны иметь определенные обозначения и расцветку (таблица А.2).

Таблица А.2 – Обозначения проводников

Проводник		Обозначение		Расцветка
		буквенное	графическое	
Нулевой рабочий		<i>N</i>		Голубой
Нулевой защитный (защитный)		<i>PE</i>		Желто-зеленый
Совмещенный нулевой рабочий и защитный		<i>PEN</i>		Желто-зеленый с голубыми на концах метками
Фазный	трехфазная сеть	$L_1, L_2, L_3$		Все цвета, кроме вышеперечисленных
	однофазная сеть	<i>L</i>		

Область применения этих способов защиты определяется режимом нейтрали и классом напряжения электроустановки.

Защитное заземление состоит из заземлителя 3 (металлических проводников, находящихся в земле) и заземляющего проводника 2, соединяющего металлический корпус электроустановки 1 с заземлителем (рисунок А.6).

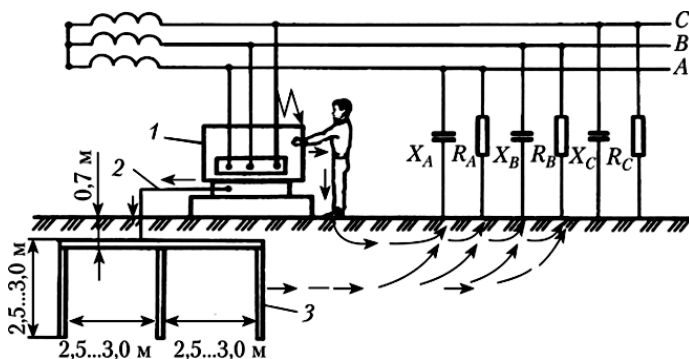


Рисунок А.6 – Схема защитного заземления:

1 – электроустановка; 2 – заземляющий проводник; 3 – заземлитель



Совокупность заземлителя и заземляющих проводов называют *заземляющим устройством*. Защитное заземление применяют в трехфазных трехпроводных и однофазных двухпроводных сетях переменного тока напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью, а также в сетях напряжением выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали.

Защитное действие заземляющего устройства основано на снижении до безопасной величины тока, проходящего через человека в момент касания им поврежденной электроустановки.

При попадании напряжения на корпус электроустановки человек, коснувшись ее и имея хороший контакт с землей, замыкает собой электрическую цепь: фаза  $C$  – корпус электроустановки  $I$  – человек – земля – емкостные и активные сопротивления связи проводов с землей, фазы  $A$  и  $B$ . По человеку пойдет ток. Несмотря на то, что электрические провода сети установлены на изолированных опорах, между ними и землей существует электрическая связь. Она происходит за счет несовершенства изоляции проводов, опор и т. п. и наличия емкости между проводами и землей. При большом протяжении проводов эта связь становится значительной, а ее активное  $R$  и емкостное  $X$  сопротивления снижаются и становятся соизмеримыми с сопротивлением тела человека. Поэтому человек, находящийся под напряжением и имеющий контакт с землей, замыкает собой электрическую цепь между различными фазами сети.

При наличии заземляющего устройства образуется дополнительная цепь. В результате этого ток замыкания распределяется между заземляющим устройством и человеком. Так как сопротивление заземлителя (оно должно быть не более 10 Ом) во много раз меньше *сопротивления человека* ( $\geq 1000$  Ом), то через тело человека будет проходить малый ток, не вызывающий его поражения. Большая часть тока пойдет через заземлитель.

*Заземлители* могут быть естественными и искусственными. В качестве *естественных* заземлителей используют металлические конструкции и арматуру зданий и сооружений, имеющие хорошее соединение с землей, расположенные в земле водопроводные, канализационные и другие трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, взрывоопасных газов и трубопроводов, покрытых изоляцией для защиты от коррозии).

В качестве *искусственных* заземлителей применяют одиночные или соединенные в группы металлические электроды, забитые вертикально или уложенные горизонтально в землю. Электроды изготавливают из отрезков металлических труб диаметром не менее 32 мм и толщиной стенок не менее 3,5 мм, угловой стали с толщиной полок не менее 4 мм, полосы сечением не менее 100 мм<sup>2</sup>, а также из отрезков швеллеров, пружинной стали диаметром не менее 10 мм. Электроды, выполненные из более тонких профилей, вследствие коррозии быстро выходят из строя. Кроме того, тонкие профили име-

ют малый контакт с землей, поэтому их применение нежелательно. Длину электродов и расстояние между ними принимают не менее 2,5–3,0 м.

Между собой вертикальные электроды в групповом заземлителе соединяют с помощью сварки перемычкой, выполненной из аналогичных материалов и тех же сечений, что и сами электроды. Заземляющее устройство должно иметь вывод наружу (на поверхность земли), выполненный на сварке из таких же материалов. Он служит для соединения с заземляющим проводником.

Для осуществления заземляющих функций сопротивление заземляющего устройства в электроустановках напряжением до 1000 В в сети с изолированной нейтралью должно быть не более 4 Ом.

Необходимое сопротивление достигают установкой соответствующего количества электродов в заземлителе, определяемых расчетом.

Сопротивление заземляющего устройства – это отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю. Различают выносное и контурное заземляющие устройства.

*Выносное устройство* располагают за пределами площадки с заземляемым оборудованием. Его достоинство состоит в возможности выбора грунта с наименьшим удельным сопротивлением.

*Контурное заземление* выполняют забивкой электродов по контуру заземляемого оборудования и между ним. Такая установка электродов создает дополнительный защитный эффект за счет повышения и выравнивания (более равномерного распределения) потенциалов земли в зоне нахождения человека.

*Зануление* – это преднамеренное электрическое соединение металлических нетокопроводящих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением, с глухозаземленной нейтралью источника тока (генератора или трансформатора).

В четырехпроводных сетях с нулевым проводом и глухозаземленной нейтралью источника тока напряжением до 1000 В зануление – основное средство защиты.

Соединение корпусов электроустановок к нейтрали источника тока осуществляют с помощью *нулевого защитного* проводника (*PE* – проводника). Его нельзя путать с *нулевым рабочим* проводом (*N* – проводником), который также соединен с нейтралью источника, но служит для питания однофазных электроустановок.

Защитное действие зануления основано на снижении до безопасной величины тока, проходящего через человека в момент касания им поврежденной электроустановки, и последующем отключении этой установки от сети.

Работает зануление следующим образом: при попадании напряжения на корпус зануленной электроустановки  $I$  большая часть тока с него пойдет в сеть через нулевой защитный провод  $b$ . По электрической цепи: корпус

электроустановки 8 – человек – земля – заземляющее устройство 9 – нулевой рабочий провод 5 – пойдет незначительный ток, не вызывающий поражения (ввиду более высокого сопротивления этой цепи по сравнению с сопротивлением цепи через нулевой защитный провод 6). Одновременно с этим замыкание на корпус фазного провода при такой схеме защиты автоматически превращается в однофазное короткое замыкание между фазным и нулевым рабочим проводом 5 сети, в результате чего через 0,2–7 с срабатывает токовая защита (перегорает предохранитель 7 или срабатывает автоматический выключатель), и электроустановка, а вместе с ней и человек, полностью обесточиваются (рисунок А.7).

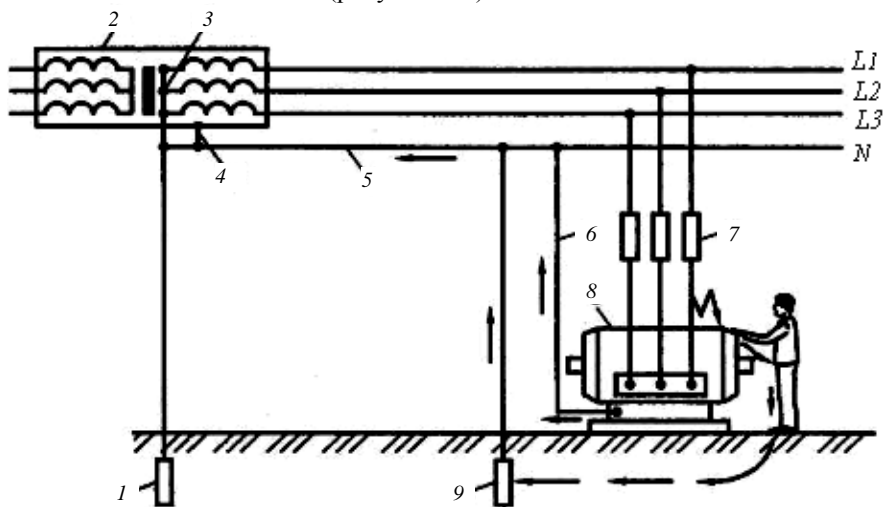


Рисунок А.7 – Схема зануления:

1 – заземлитель нейтрали трансформатора; 2 – источник тока (трансформатор); 3 – нейтраль источника тока; 4 – зануление корпуса трансформатора; 5 – нулевой рабочий (он же и нулевой защитный) провод сети; 6 – нулевой защитный провод электроустановки; 7 – предохранитель; 8 – электроустановка; 9 – повторное заземление нулевого защитного провода сети

Таким образом, в начальный момент зануление работает аналогично защитному заземлению, а в последующем оно полностью прекращает действие тока на человека. Только при этом ток, проходящий через тело человека до срабатывания защиты, будет в несколько раз меньше, т. к. сопротивление зануляющего проводника обычно не превышает 0,3 Ом, а сопротивление заземлителя допускается до 4 Ом.

В зануленных электроустановках до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью, с целью надежного обеспечения автоматического отключения аварийного участка, проводимость фазных и нулевых защитных проводников и их соединений должна обеспечить ток короткого замыкания, превышающий не

менее чем в 3 раза номинальный ток плавкого элемента ближайшего предохранителя или автоматического выключателя, имеющего расцепитель с обратнoзависимой от тока характеристикой (тепловой расцепитель), в 1,4 раза – для автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями с силой номинального тока до 100 А.

Нулевой защитный провод 5 сети (см. рисунок А.7) должен обеспечить надежное соединение корпусов электроустановок с нейтралью источника, поэтому все соединения выполняют сварными. В нем запрещается установка предохранителей и выключателей.

Нулевой защитный провод 5 сети заземляют: у источника тока с помощью заземлителя  $I$ ; на концах воздушных линий (или ответвлений от них) длиной более 200 м; на вводах воздушной линии к электроустановкам. Повторные заземления 9 необходимы для уменьшения опасности поражения электрическим током при обрыве нулевого провода и замыкании фазы на корпус электроустановки за местом обрыва, а также для снижения напряжения на корпусе в момент срабатывания токовой защиты.

Согласно ПУЭ [25] сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль источника тока, с учетом естественных и повторных заземлителей нулевого провода должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях источника трехфазного тока 660, 380 и 220 В.

Зануление (заземление) металлических корпусов переносных электроустановок осуществляют третьей жилой для однофазных или четвертой жилой для трехфазных электроприемников, находящихся в одной оболочке с фазными проводами.

Жилы этих проводов должны быть гибкими, медными, их сечение должно быть равно сечению фазных проводников и быть не менее  $1,5 \text{ мм}^2$ .

Вилки и розетки должны быть выполнены так, чтобы соединение заземляющих и нулевых защитных проводников происходило до соединения фазных проводников, а рассоединение происходило в обратной последовательности. Обычно это достигают применением у вилки более длинного штыря для защитного проводника, чем для фазных проводов. Во всех случаях вилку подсоединяют к электроприемнику, розетку – к сети.

### **А.7 Средства защиты от поражения током**

*Средства индивидуальной защиты от поражения током* – электрозащитные средства (ЭЗС), которые делятся на основные и дополнительные (рисунок А.8).

*Основные ЭЗС* – это средства защиты, изоляция которых длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановок, что позволяет с их помощью прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением.



Рисунок А.8 – Электрозащитные средства:

1 – изолирующая штанга; 2 – изолирующие клещи; 3 – диэлектрические перчатки; 4 – диэлектрические боты; 5 – диэлектрические галоши; 6 – резиновые коврики и дорожки; 7 – изолирующая подставка; 8 – инструмент с изолированными ручками; 9 – токоизмерительные клещи

Для работы на электроустановках до 1000 В к ним относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками, указатели напряжения.

При напряжении электроустановки свыше 1000 В основные средства включают изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения.

*Дополнительные ЭЗС* – это средства защиты, изоляция которых не может длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановок. Они применяются для защиты от напряжения прикосновения и шага, а при работе под напряжением используют исключительно основные ЭЗС.

К ним относятся:

- при напряжении до 1000 В – диэлектрические галоши, коврики, изолирующие подставки;
- при напряжении свыше 1000 В – диэлектрические перчатки, боты, коврики, изолирующие подставки.

ЭЗС должны иметь маркировку с указанием напряжения, на которое они рассчитаны, их изолирующие свойства подлежат периодической проверке в установленные нормативами сроки.

Сроки испытаний защитных средств от поражения электрическим током представлены в таблице А.3.

*Таблица А.3 – Сроки испытаний защитных средств*

Защитное средство	Напряжение электроустановки, В	Срок периодических испытаний, мес.	Срок периодических осмотров, мес.
Изолирующие клещи	До 1000	24	12
Указатели напряжения	До 500	12	Перед употреблением
Инструмент с изолирующими рукоятками	До 1000	12	
Перчатки резиновые диэлектрические		6	
Галоши резиновые диэлектрические		12	6
Коврики резиновые диэлектрические		24	12

*Устройства защитного отключения (УЗО)* или, иными словами, устройства дифференциальной защиты предназначены для защиты людей от поражения электрическим током при неисправностях электрооборудования или при контакте с находящимися под напряжением частями электроустановки, а также для предотвращения возгораний и пожаров, вызванных токами утечки и замыкания на землю. Эти функции не свойственны обычным автоматическим выключателям, реагирующим лишь на перегрузку или короткое замыкание.

Своевременное реагирование автоматики на ток менее 500 мА защищает объект от возгорания, а на ток менее 10 мА – защищает человека от последствий случайного прикосновения к токоведущим частям. Проблема состоит в том, что такой небольшой ток в течение короткого времени обычные защитные устройства зафиксировать и отключить как правило не могут. Поэтому появилось такое техническое решение, как ферромагнитный сердеч-

ник с тремя обмотками: токоподводящей; токоотводящей; управляющей. Ток, соответствующий подаваемому на нагрузку фазному напряжению, и ток, отходящий от нагрузки в нейтральный проводник, наводят в сердечнике магнитные потоки противоположных знаков. Если никаких утечек в нагрузке и защищаемом участке проводки нет, суммарный поток будет нулевым. В противном же случае (касание, повреждение изоляции и пр.) сумма двух потоков становится отличной от нуля. Возникающий в сердечнике магнитный поток наводит ЭДС в обмотке управления. К обмотке управления через прецизионное устройство фильтрации всевозможных помех подключено реле. Под воздействием возникающей в обмотке управления ЭДС реле разрывает цепи фазы и нуля.

### А.8 Устройство защитного отключения

*Основная задача устройства защитного отключения – защита человека от поражения электрическим током и от возникновения пожара, вызванного утечкой тока через изношенную изоляцию проводов и некачественные соединения.*

Устройство защитного отключения (рисунок А.9), управляемое дифференциальным (остаточным) током (УЗО), – механический коммутационный аппарат или совокупность элементов, которые при достижении (превышении) дифференциальным током заданного значения при определённых условиях эксплуатации должны вызвать размыкание контактов. Может состоять из различных отдельных элементов, предназначенных для обнаружения, измерения (сравнения с заданной величиной) дифференциального тока и замыкания и размыкания электрической цепи (разъединителя) [26].



Рисунок А.9 – Пример маркировки УЗО

УЗО предназначены:

– для защиты человека от поражения электрическим током при косвенном прикосновении (прикосновение человека к открытым проводящим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением в случае повреждения изоляции), а также при непосредственном прикосновении (прикосновение человека к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением). Обычно ток отсечки не более 30 мА.

– предотвращения возгораний при возникновении токов утечки на корпус или на землю.

Классификация УЗО.

*По способу действия:*

– УЗО без вспомогательного источника питания;

– УЗО-Д со вспомогательным источником питания:

1 выполняющие автоматическое отключение при отказе вспомогательного источника с выдержкой времени и без нее;

2 производящие автоматическое повторное включение при восстановлении работы вспомогательного источника;

3 не производящие автоматическое повторное включение при восстановлении работы вспомогательного источника;

4 не производящие автоматическое отключение при отказе вспомогательного источника.

*По способу установки:*

– стационарные с монтажом стационарной электропроводкой;

– переносные с монтажом гибкими проводами с удлинителями.

*По числу полюсов.*

*По виду защиты от сверхтоков и перегрузок по току:*

– без встроенной защиты от сверхтоков;

– со встроенной защитой от сверхтоков;

– со встроенной защитой от перегрузки.

Ниже перечислены некоторые общие для всех УЗО-Д характеристики.

Номинальный ток  $I_n$  – указанное изготовителем значение тока, которое УЗО-Д может пропускать в продолжительном режиме работы.

Номинальный отключающий дифференциальный ток  $I_{\Delta n}$  – указанное изготовителем значение дифференциального тока, которое вызывает отключение УЗО-Д при заданных условиях эксплуатации.

Номинальное напряжение вспомогательного источника (если он имеется)  $U_{sn}$  – напряжение вспомогательного источника, на которое рассчитано УЗО-Д и при котором обеспечивается его работоспособность при заданных условиях эксплуатации.

Номинальная включающая и отключающая способность  $I_m$  – действующее значение ожидаемого тока, который УЗО-Д способно включить, про-



пускать в течение своего времени и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности.

Номинальная способность включения и отключения дифференциального тока  $I_{\Delta m}$  – действующее значение ожидаемого дифференциального тока, который УЗО-Д способно включить, пропускать в течение своего времени отключения и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности.

УЗО изготавливают в разнообразных корпусах для стационарного крепления в электропроводку и переносные УЗО (пример маркировки показан на рисунке А.9).

Приборы с креплением на DIN-рейку устанавливают в электрические щитки, расположенные в подъезде или квартире.

Встроенная в стену УЗО-розетка обеспечивает безопасность человека при пользовании им любого подключенного к ней электроприбора.

УЗО-вилка, соединенная проводом с одним проблемным прибором, защищает при эксплуатации в местах с различными условиями окружающей среды.

*Принцип действия УЗО.* Магнитный сердечник охватывает все токоведущие проводники электрической цепи (рисунок А.10). Магнитный поток, генерируемый в сердечнике, зависит от арифметической суммы токов, проходящих в любой момент по первичным обмоткам. Токи, проходящие в одном направлении, считаются условно положительными ( $I_1$ ), а в противоположном направлении – отрицательными ( $I_2$ ).

В неповрежденной цепи, где  $I_1 + I_2 = 0$ , отсутствует поток в магнитном сердечнике и ЭДС в его вторичной обмотке равна нулю. Ток замыкания на землю проходит через одну из первичных обмоток до точки повреждения и возвращается к источнику через землю или через защитные проводники. Поэтому баланс токов в первичных обмотках нарушается, и разность токов приводит к возникновению магнитного потока в сердечнике.

Разность токов известна как дифференциальный ток, а принцип называется принципом дифференциального тока или тока нулевой последовательности.

Получаемый переменный поток в сердечнике индуцирует ЭДС во вторичной обмотке дифференциального трансформатора. При этом ток  $I_3$  поступает на рабочую катушку электромагнитной защелки. Если дифференциальный ток (ток утечки на землю) превышает значение, требуемое для срабатывания защелки, то непосредственно или через электронное реле срабатывает соответствующий выключатель.

УЗО может значительно улучшить безопасность электроустановок, но оно не может полностью исключить риск поражения электрическим током или пожара. УЗО не реагирует на аварийные ситуации, если они не сопровождаются утечкой из защищаемой цепи. В частности, УЗО не реагирует на

короткие замыкания между фазами и нейтралью. УЗО также не сработает, если человек оказался под напряжением, но утечки при этом не возникло, например, при прикосновении одновременно и к фазному, и к нулевому проводникам защищаемой цепи.

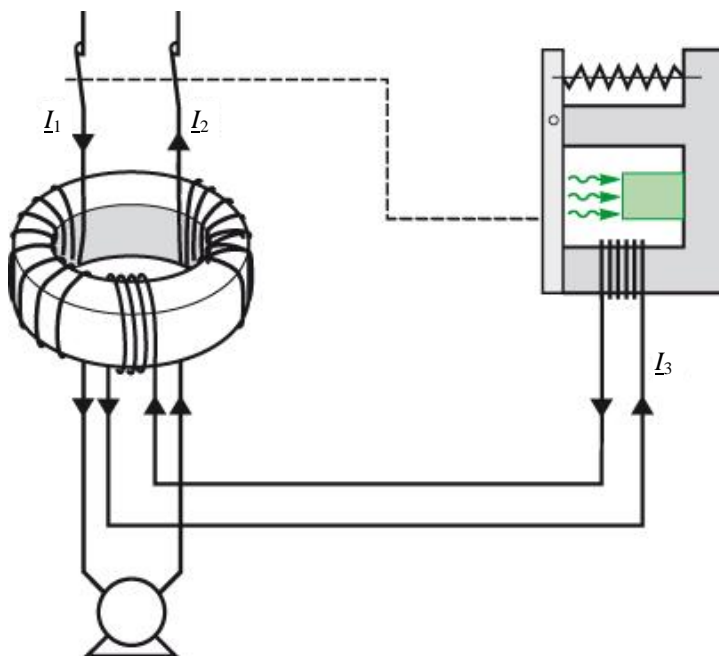


Рисунок А.10 – Принцип действия УЗО

Рекомендуется ежемесячно проверять работоспособность УЗО с помощью кнопки «*тест*», которая обычно расположена на корпусе УЗО (как правило, на кнопке «тест» нанесено изображение большой буквы «Т»). Тест кнопкой может производиться пользователем, т. е. квалифицированный персонал для этого не требуется. Если УЗО исправно и подключено к электрической сети, то оно при нажатии кнопки «тест» должно сразу же сработать (то есть отключить нагрузку). Если после нажатия кнопки нагрузка осталась под напряжением, то УЗО неисправно и должно быть заменено.

Нажатием кнопки проверяется само УЗО, но не правильность его подключения. Поэтому более надежной проверкой является имитация утечки непосредственно в цепи, которая является нагрузкой УЗО. Такой тест желательно проделать хотя бы один раз для каждого УЗО после его установки. В отличие от нажатия кнопки, пробная утечка должна проводиться *только квалифицированным персоналом*.

## А.9 Памятка по выполнению лабораторных работ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ, следует предварительно ознакомиться с описанием работы, во время ее выполнения быть внимательным и строго соблюдать правила по технике безопасности.

Монтаж установки в большинстве случаев производится самостоятельно по принципиальной или монтажной схемам. Необходимо помнить следующие моменты.

1 Вся электрическая схема монтируется с помощью соединительных проводов. Провода должны быть изолированы, а их концы зачищены.

2 Контакты повсюду должны быть плотными.

3 Переплетение проводов не допускается.

4 Цепь ведется от источника напряжения, но подключается источник в последнюю очередь. При разборке схемы прежде всего отключается источник напряжения.

5 Все реостаты, включаемые в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.

6 Напряжение ЛАТРа в начальном положении должно быть на нуле, подавать напряжение следует плавно.

7 Все ключи и коммутаторы при сборке цепи должны быть разомкнуты.

8 *Замыкать ток без проверки схемы преподавателем или лаборантом категорически запрещается.*

9 Ток замыкается только на время отсчетов.

Для соблюдения техники безопасности при работе следует:

1) не включать рубильники и вилки без разрешения преподавателя или лаборанта;

2) не включать схему без предварительной проверки ее преподавателем или лаборантом;

3) не производить переключение и не вносить изменения в схемы, находящиеся под напряжением;

4) не прикасаться к неизолированным частям схемы;

5) не оставлять без присмотра схему, находящуюся под напряжением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Блажкин, А. Т.** Общая электротехника : учеб. / А. Т. Блажкин ; под ред. А. Т. Блажкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1986. – 592 с.
- 2 **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 536 с. – Т. 1.
- 3 **Вольнский, Б. А.** Электротехника : учеб. / Б. А. Вольнский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. – М. : Высш. шк., 1986. – 528 с.
- 4 **Касаткин, А. С.** Электротехника : учеб. / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2000. – 542 с.
- 5 Электрические измерения : учеб. / Байда Л. И. [и др.] ; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 392 с.
- 6 **Брускин, Д. Е.** Электрические машины : учеб. / Д. Е. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высш. шк., Ч. 1. – 1987. – 288 с; Ч. 2. – 1987. – 304 с.
- 7 **Копылов, И. П.** Электрические машины : учеб. / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2000. – 606 с.
- 8 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
- 9 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
- 10 **Пантюшин, В. С.** Сборник задач по общей электротехнике : учеб. пособие / В. С. Пантюшин; под ред. В. С. Пантюшина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1973. – 280 с.
- 11 **Герасимов, В. Г.** Основы промышленной электроники : учеб. / В. Г. Герасимов ; под ред. В. В. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1986. – 572 с.
- 12 **Герасимов, В. Г.** Сборник задач по электротехнике и основам электроники / В. Г. Герасимов ; под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1987. – 288 с.
- 13 **Долин, П. А.** Основы техники безопасности в электроустановках : учеб. пособие / П. А. Долин. – М. : Энергия, 1979. – 408 с.
- 14 **Пацкевич, В. А.** Электротехника и основы электроники : учеб.-метод. пособие / В. А. Пацкевич, В. Г. Черномашенцев. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 146 с.
- 15 Трансформатор. Внешний вид конструкций магнитопроводов [Электронный ресурс]. – Гомель, 2019. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. – Дата доступа: 15.12.2019.
- 16 Трансформатор с масляным охлаждением. Упрощенная модель трансформатора [Электронный ресурс]. – Гомель, 2018. – Режим доступа: <https://www.google.by/search?rlz>. – Дата доступа: 7.04.2018.
- 17 **Шевчик, Н. Е.** Электрические машины : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. / Н. Е. Шевчик. – Минск : БГАТУ, 2011. – 188 с. – Ч. 1.
- 18 **Кацман, М. М.** Электрические машины : учеб. / М. М. Кацман. – М. : Высш. шк., 1990. – 463 с.
- 19 Синхронные машины. Принцип действия синхронного генератора [Электронный ресурс]. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.feklistovstudio.narod.ru/1principdsinhr.html>. – Дата доступа: 23.12.2012.

20 Электромонтер. Инфосправочник [Электронный ресурс]. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.electromonter.info/handbook/09/DC>. – Дата доступа: 23.12.2012.

21 Принцип действия генератора постоянного тока. Упрощенная модель генератора постоянного тока [Электронный ресурс]. – Гомель, 2015. – Режим доступа: <http://el-mashin.narod.ru/text/125.html>. – Дата доступа: 7.03.2015.

22 Онлайн-учебник по охране труда : учеб. по охране труда [Электронный ресурс]. – Гомель, 2020. – Режим доступа: <http://xn----7sbaabre8arzfe0ad3ar1a.xn--90ais/%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA>. – Дата доступа: 17.01.2020.

24 ГОСТ 12.1.009–2017 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения. – Введ. 2019–01–01. – М. : Стандартинформ, 2019.

23 ТКП 339–2011 (02230) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы прямо-сдаточных испытаний. – Введ. 2011–12–01. – Минск : Минэнерго, 2011.

25 ТКП 181–2009 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Введ. 2009–09–01. – Минск : Минэнерго, 2009.

26 ГОСТ Р 50807–95 Устройства защитные, управляемые дифференциальным (остаточным) током. Общие требования и методы испытаний. – Введ. 1995–01–01. – М. : Госстандарт России, 1995.