

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра энергетики и энергоэффективности
горной промышленности

Ю.В. Шевырёв

Электрические машины

Учебник

Утверждено Методическим советом НИТУ «МИСиС»



Москва 2017

УДК 621.313(075.8)
ШЗ8

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.Я. Беспалов* (НИУ «МЭИ»);
д-р техн. наук, проф. *О.В. Фёдоров* (НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Шевырёв Ю.В.

ШЗ8 Электрические машины : учеб. / Ю.В. Шевырёв. – М. : Изд.
Дом НИТУ «МИСиС», 2017. – 261 с.
ISBN 978-5-906846-50-1

Приведены основные сведения по электрическим машинам. Рассмотрены устройство и принцип действия трансформаторов, электрических машин переменного и постоянного тока. Даны основы теории, рассмотрены характеристики и режимы работы электрических машин. Приведены краткие сведения об их применении на горных предприятиях.

Для студентов специальностей 21.05.04 «Горное дело» (специализации «Электрификация и автоматизация горного производства», «Горные машины и оборудование», «Транспортные системы горного производства»); 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»; по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Управление энергоресурсами предприятий, организаций и учреждений»).

УДК 621.313(075.8)

ISBN 978-5-906846-50-1

© Ю.В. Шевырёв, 2017
© НИТУ «МИСиС», 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Введение	8
1. Трансформаторы.....	12
1.1. Назначение и принцип действия трансформаторов	12
1.2. Конструкция трансформатора	14
1.3. Схемы соединения обмоток трансформатора	21
1.4. Группы соединения обмоток трансформатора	22
1.5. Номинальные величины	26
1.6. Холостой ход трансформатора	27
1.7. Режим нагрузки трансформатора	31
1.8. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной	34
1.9. Векторная диаграмма трансформатора	36
1.10. Схема замещения трансформатора	37
1.11. Опыт холостого хода	39
1.12. Опыт короткого замыкания	41
1.13. Определение параметров схемы замещения	45
1.14. Внешние характеристики трансформатора	45
1.15. Коэффициент полезного действия трансформатора	46
1.16. Регулирование вторичного напряжения трансформатора	48
1.17. Параллельная работа трансформаторов	49
1.18. Многообмоточные трансформаторы	52
1.19. Автотрансформаторы	56
1.20. Трансформаторы, применяемые в горной промышленности	59
Контрольные вопросы.....	60
2. Машины переменного тока (общие вопросы)	62
2.1. Конструкция статора машин переменного тока	62
2.2. Число полюсов обмотки.....	64
2.3. Общая характеристика обмоток машин переменного тока	65
2.4. Принцип образования трёхфазной обмотки.....	68
2.5. Пример построения обмотки машин	69
2.6. Схемы соединения и обозначения выводов обмоток	71
2.7. Магнитодвижущая сила катушки, фазы и трёхфазной обмотки.....	74
2.8. Электродвижущая сила фазы обмотки	79

2.9. Геометрический и электрический градусы	82
Контрольные вопросы.....	82
3. Асинхронные машины	83
3.1. Роль и значение асинхронных машин	83
3.2. Конструкция асинхронных двигателей	83
3.3. Принцип действия асинхронного двигателя.....	87
3.4. Паспортные данные асинхронного двигателя	90
3.5. Переход от вращающегося ротора к эквивалентному неподвижному.....	90
3.6. Основные уравнения асинхронной машины.....	93
3.7. Приведение величин цепи ротора к обмотке статора	95
3.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя.....	96
3.9. Схемы замещения асинхронной машины	97
3.10. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.....	99
3.11. Электромагнитный момент асинхронной машины	101
3.12. Максимальный электромагнитный момент	105
3.13. Практическая формула для построения механической характеристики	106
3.14. Условия устойчивой работы электродвигателя.....	107
3.15. Опыты холостого хода и короткого замыкания	109
3.16. Рабочие характеристики двигателя.....	110
3.17. Пуск трёхфазных асинхронных двигателей.....	111
3.18. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками.....	116
3.19. Регулирование угловой скорости вращения асинхронных двигателей	119
3.20. Стандартизация в области электрических машин	124
3.21. Серии асинхронных электродвигателей. Асинхронные электродвигатели, применяемые в горной промышленности	131
Контрольные вопросы.....	135
4. Синхронные машины	137
4.1. Принцип действия синхронной машины.....	137
4.2. Конструкция синхронных машин	139
4.3. Системы возбуждения синхронных машин	142
4.4. Номинальные данные синхронных машин	144
4.5. Холостой ход синхронных генераторов.....	145
4.6. Работа синхронного генератора под нагрузкой. Реакция якоря.....	148

4.7. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора без учета насыщения	154
4.8. Метод двух реакций. Векторная диаграмма явнополюсного генератора без учета насыщения	156
4.9. Характеристики синхронного генератора	158
4.10. Энергетическая диаграмма синхронного генератора	162
4.11. Параллельная работа синхронных генераторов с сетью	163
4.12. Регулирование активной мощности. Угловые характеристики активной мощности	166
4.13. Регулирование реактивной мощности. U-образные характеристики	174
4.14. Синхронные двигатели	176
4.15. Угловые и U-образные характеристики синхронного двигателя	179
4.16. Рабочие характеристики синхронного двигателя	182
4.17. Пуск синхронного двигателя	183
4.18. Синхронные компенсаторы	187
4.19. Серии синхронных машин. Синхронные машины, применяемые в горной промышленности	188
Контрольные вопросы	190
5. Машины постоянного тока	192
5.1. Роль и значение машин постоянного тока	192
5.2. Принцип работы машин постоянного тока	192
5.3. Конструкция машин постоянного тока	196
5.4. Якорные обмотки машин постоянного тока	199
5.5. ЭДС в обмотке якоря	203
5.6. Электромагнитный момент	205
5.7. Реакция якоря в машинах постоянного тока	207
5.8. Коммутация машин постоянного тока	212
5.9. Генераторы постоянного тока	216
5.10. Уравнения генераторов постоянного тока	219
5.11. Условия самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением	221
5.12. Характеристики генераторов постоянного тока	224
5.13. Двигатели постоянного тока	231
5.14. Уравнения двигателей постоянного тока	232
5.15. Характеристики двигателей постоянного тока	234

5.16. Условия устойчивой работы двигателей постоянного тока	242
5.17. Пуск двигателей постоянного тока	244
5.18. Изменение направления вращения якоря двигателей постоянного тока	245
5.19. Регулирование скорости вращения	246
5.20. Сравнение двигателей постоянного тока	255
5.21. Серии машин постоянного тока. Машины постоянного тока, применяемые в горной промышленности.....	255
Контрольные вопросы.....	258
Библиографический список	260

ПРЕДИСЛОВИЕ

Имеется большое количество учебников по дисциплине «Электрические машины», отличающихся высоким методическим уровнем и полнотой изложения материала. Однако при существующем объёме числа часов, отводимых на изучение данной дисциплины, студенты просто физически не успевают освоить изложенный в них материал за отведённое время. Поэтому была поставлена цель: написать учебник, позволяющий дать студентам необходимый минимум знаний по данной дисциплине, опираясь на который они смогут в дальнейшем самостоятельно освоить по имеющимся литературным источникам требуемый в их практической деятельности материал.

В учебнике рассмотрены устройство и принцип действия трансформаторов, электрических машин переменного и постоянного тока. Даны основы теории, рассмотрены характеристики и режимы работы электрических машин. Наряду с традиционными вопросами, излагаемыми в курсе «Электрические машины», рассмотрены основные типы электрических машин, применяемых на горных предприятиях.

При написании учебника автор опирался на опыт и характер изложения материала в учебниках и учебных пособиях по электрическим машинам, авторами которых являются Б.Ф. Токарев, В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец, М.М. Кацман и др.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины широко применяются в промышленности, сельском хозяйстве, в энергетике, на транспорте, быту и т.д. Такому распространению электрических машин способствуют их высокие энергетические показатели, удобство обслуживания и простота управления.

Электрическая машина – это электромеханический преобразователь, который может превращать механическую энергию в электрическую или, наоборот, электрическую в механическую. Электрические машины имеют неподвижную часть, называемую статором, и вращающую часть, называемую ротором. Ротор располагается внутри статора.

Электрические машины, в которых происходит преобразование механической энергии в электрическую, называются электрическими генераторами.

Электрические машины, в которых совершается преобразование электрической энергии в механическую, называются электрическими двигателями. Конструктивно двигатель устроен так же, как и генератор.

Электрические генераторы являются в настоящее время основными источниками электрической энергии. Более половины вырабатываемой электроэнергии потребляют электрические двигатели.

Для электрических машин справедлив принцип обратимости, который был установлен русским академиком Э.Х. Ленцем в 1833 г. В электрической машине взаимное преобразование механической и электрической энергии может происходить в любом направлении, т.е. одна и та же машина может работать как двигателем, так и генератором.

Принцип обратимости применим к любой электрической машине. Однако каждая выпускаемая заводом-изготовителем электрическая машина проектируется и предназначается для одного определенного режима работы (двигателем или генератором). При этом оказывается возможным наилучшим образом приспособить машины для заданных условий работы.

По роду тока электрические машины подразделяются на машины постоянного тока и машины переменного тока.

Особенностью машин постоянного тока является наличие у них механического переключающего устройства, которое называется

коллектором. Коллектор осложняет работу машины, однако опыт эксплуатации показал, что правильно спроектированная и изготовленная машина постоянного тока не уступает по надёжности более простым по конструкции машинам переменного тока.

Машины переменного тока подразделяются на два основных вида: асинхронные и синхронные. Принцип действия машин переменного тока основан на использовании вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора. У синхронных машин скорость вращения ротора постоянна при любых нагрузках и равна скорости вращения поля. У асинхронных машин скорость вращения ротора отличается от скорости вращения поля и зависит от момента нагрузки на валу двигателя.

Электрические машины выпускаются на различные мощности: от долей ватта до нескольких десятков и сотен мегаватт.

В курсе электрических машин изучают также трансформаторы. В трансформаторе электрическая энергия одного напряжения преобразуется в электрическую энергию другого напряжения.

Трансформатор не является электрической машиной, так как в нем не происходит превращения одного вида энергии в другой. Однако физические процессы, происходящие в трансформаторе, имеют много общего с процессами, происходящими во вращающихся электрических машинах. Аналогичны и уравнения, описывающие эти процессы. Поэтому теорию трансформаторов рассматривают совместно с теорией электрических машин.

Электрические машины изготавливают, как правило, сериями. Серия электрических машин представляет собой ряд подобных машин с возрастающей по заданной шкале мощностью, имеющих однотипную конструкцию и удовлетворяющих единому комплексу требований. Они создаются как для машин общего назначения, так и для электрических машин специального назначения.

Каждая электрическая машина, входящая в серию, представляет собой типоразмер с определенными параметрами (мощность, частота вращения, масса и т.п.) и установочно-присоединительными размерами.

Для того чтобы серия электрических машин была экономически выгодной, принимают такие размеры статоров и роторов, которые позволяют довести до минимума количество требуемых штампов при минимальных отходах электротехнической стали. Другие меро-

приятия по унификации типоразмеров серии позволяют сократить номенклатуру пресс-форм, моделей для отливок и другой технологической оснастки.

По мере создания новых материалов с улучшенными свойствами, накопления опыта проектирования и эксплуатации электрических машин создаются более совершенные серии электрических машин как по техническим, так и по экономическим показателям.

Некоторые крупные серии электрических машин помимо машин основного исполнения содержат ряд модификаций. Например, для серий асинхронных двигателей существуют следующие модификации: частотно-регулируемые, с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, с повышенными энергетическими показателями, многоскоростные, встраиваемые.

В горных выработках, где возможно образование взрывоопасной окружающей среды, должно применяться рудничное взрывозащищённое электрооборудование. Поэтому разработаны специальные серии рудничных электрических машин.

Современные серии электрических машин проектируются с учетом международных требований и стандартов, которые увязывают ряд номинальных мощностей электрических машин с их габаритными, установочными и присоединительными размерами. Эти международные требования регламентируются документами различных организаций.

В настоящее время в России принято руководствоваться главным образом рекомендациями Европейского комитета электротехнической стандартизации CENELEC (фр. *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*) – организации, отвечающей за европейские стандарты в области электротехники. Некоторые выпускаемые серии электрических машин имеют две версии: одну для внутреннего рынка, выполненную по стандартам России, а другую для экспорта, выполненную по нормам CENELEC.

Более подробную информацию о выпускаемых сериях электрических машин можно получить на сайтах электромашиностроительных заводов в Интернете, адреса которых приведены в таблице:

Предприятие	Сайт в Интернете
ЗАО «Росэнергомаш»	www.rosenergomash.com
ОАО «Силовые машины»	www.power-m.ru
ОАО «Могилёвский завод «Электродвигатель»	www.mez.by
ОАО «Карпинский электромашиностроительный завод»	www.aokemz.ru
ООО «Производственное объединение «Ленинградский электромашиностроительный завод»	www.lez.ru
ОАО «Сафоновский электромашиностроительный завод»	www.sez.ru
ОАО «Ярославский электромашиностроительный завод»	www.eldin.ru
ПАО «Электромашина»	www.electromashina.com.ua
ОАО «СИБЭЛЕКТРОМОТОР»	www.sibelectromotor.ru
ОАО «ЗВИ» Московский электромеханический завод имени Владимира Ильича	motors.zvi.ru
ООО «Электротяжмаш-Привод»	www.ngs-privod.ru
ОАО «Баранчинский электромеханический завод»	www.bemz.ru
ОАО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса»	www.pemz.com.ua
ОАО «Владимирский электромоторный завод»	www.vemp.ru
ЗАО «КРОСНА-МОТОР»	www.crosna.ru/motor/
НПО «ЭЛСИБ» ОАО	www.elsib.ru/

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. Назначение и принцип действия трансформаторов

Трансформатором называется электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

Под статическим устройством понимается устройство, не имеющее подвижных частей.

Трансформатор чаще всего состоит из двух (а иногда и большего числа) взаимно неподвижных электрически не связанных между собой обмоток, расположенных на ферромагнитном магнитопроводе (рис. 1.1) [1]. Обмотки имеют между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем. Ферромагнитный магнитопровод предназначен для увеличения магнитного потока и усиления магнитной связи между обмотками.

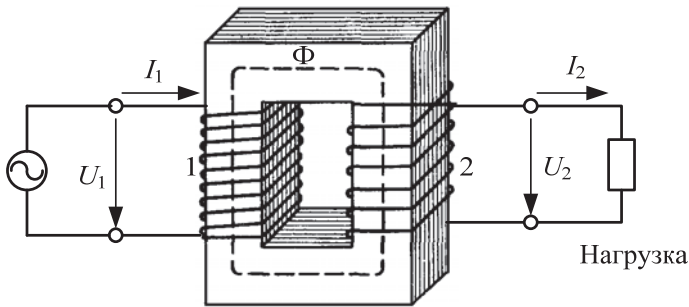


Рис. 1.1. Схема устройства трансформатора

Обмотка трансформатора, потребляющая энергию из сети, называется первичной обмоткой (обмотка 1 на рис. 1.1), а обмотка, отдающая энергию в сеть или нагрузку, – вторичной (обмотка 2 на рис. 1.1).

Обмотки трансформатора подключаются к сетям с разными напряжениями. Обмотка, предназначенная для присоединения к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а подсоединяемая к сети с меньшим напряжением – об-

моткой низшего напряжения (НН). Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется понижающим, а если больше – повышающим.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Если одну из обмоток трансформатора подключить к источнику переменного напряжения (см. рис. 1.1), то по этой обмотке потечет переменный ток, который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ . Этот поток сцеплен как с первичной, так и с вторичной обмоткой и, изменяясь, будет индуцировать в них ЭДС. Так как в общем случае обмотки имеют различное число витков w , то индуцируемые в них ЭДС будут отличаться по величине. В обмотке с большим числом витков индуцируемая ЭДС будет больше, чем в обмотке с меньшим числом витков.

Индуцируемая в первичной обмотке ЭДС примерно равна приложенному напряжению. К вторичной обмотке подключаются различные потребители электроэнергии, которые будут являться нагрузкой для трансформатора. В этой обмотке под действием индуцированной в ней ЭДС возникнет ток I_2 , а на ее выводах установится напряжение U_2 , которые будут отличаться от тока I_1 и напряжения U_1 первичной обмотки. Следовательно, в трансформаторе подводимая к первичной обмотке от сети электрическая энергия с напряжением U_1 и током I_1 посредством магнитного поля передается во вторичную обмотку с напряжением U_2 и током I_2 .

Трансформаторы с двумя обмотками называются двухобмоточными. Трансформаторы, у которых имеется три или более электрически не связанные обмотки, называются трех- или многообмоточными. Многообмоточные трансформаторы имеют несколько вторичных или первичных обмоток. В зависимости от числа фаз трансформаторы подразделяются на однофазные, трехфазные и многофазные.

Трансформаторы находят самое широкое применение. Существует много разнообразных их типов, различающихся как по назначению, так и по выполнению. Особое значение имеет группа силовых трансформаторов, предназначенных для передачи и распределения электроэнергии, вырабатываемой на электростанциях.

Установленные на электрических станциях генераторы вырабатывают электрическую энергию относительно невысокого напряжения (до 36 кВ). Для передачи ее к потребителям, расположенным на расстоянии в несколько сотен или тысяч километров, для уменьшения сечения проводов линии и потерь в ней целесообразно уменьшить

ток в линии путем соответствующего повышения напряжения. В современных сетях энергия передается при напряжениях 500...750 кВ. Повышение напряжения на электростанциях осуществляется с помощью повышающих трансформаторов. В конце линии передачи устанавливаются трансформаторы, которые понижают напряжение, так как для распределения энергии по промышленным и сельским предприятиям, различным организациям и учреждениям, жилым домам необходимы сравнительно низкие напряжения.

При передаче электрической энергии от места ее производства до места потребления требуется многократная ее трансформация. Поэтому мощность всех трансформаторов, установленных в сети, в 6–8 раз превышает общую мощность генераторов. Мощность силовых трансформаторов колеблется от нескольких киловольт-ампер до сотен мегавольт-ампер.

Наряду с силовыми трансформаторами широкое распространение получили специальные трансформаторы (сварочные, для питания электродуговых печей, измерительные и др.). Трансформаторы применяются также для преобразования числа фаз и частоты.

Трансформаторы небольших мощностей находят широкое применение в устройствах связи, радио, телевидения, системах автоматики и др.

1.2. Конструкция трансформатора

Конструктивной основой трансформатора является магнитопровод. Он служит для проведения основного магнитного потока. Для уменьшения магнитного сопротивления по пути потока, а следовательно, уменьшения тока и магнитодвижущей силы (МДС), необходимых для создания потока, магнитопровод выполняется из специальной электротехнической стали. Так как магнитный поток в трансформаторе изменяется во времени, то для уменьшения потерь от вихревых токов в магнитопроводе он собирается из отдельных электрически изолированных друг от друга листов. Толщина листов выбирается тем меньше, чем выше частота питающего напряжения. При частоте 50 Гц толщина листов стали принимается равной 0,35...0,5 мм. Изоляция листов осуществляется отжигом, а иногда с помощью лаковой пленки, которая наносится с двух сторон листа.

В магнитопроводе различают стержень и ярмо. Стержень – это та часть магнитопровода, на которой располагаются обмотки, а ярмо – часть, не несущая обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи (см. рис. 1.1).

В зависимости от взаимного расположения стержней, ярм и обмоток магнитопроводы разделяются на стержневые и броневые.

В стержневых магнитопроводах ярма прилегают к торцевым поверхностям обмоток, не охватывая их боковых поверхностей. В броневых магнитопроводах ярма охватывают не только торцевые, но и боковые поверхности обмоток.

В трёхфазных цепях могут применяться три однофазных трансформатора, обмотки которых соединяются по трёхфазной схеме (рис. 1.2). Такой трансформатор называют групповым.

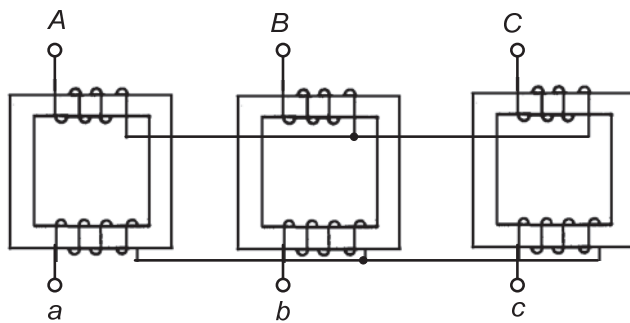


Рис. 1.2. Трёхфазная группа однофазных трансформаторов

Однако чаще применяют трёхфазные трансформаторы с общей магнитной системой для всех фаз. На рис. 1.3 изображён стержневой трёхфазный трансформатор. На каждом стержне трёхфазного стержневого магнитопровода располагаются обе обмотки одной фазы.

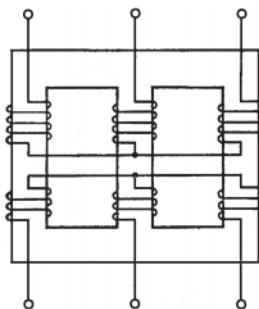


Рис. 1.3. Стержневой трёхфазный трансформатор

По способу соединения стержней с ярами различают трансформаторы со стыковыми (рис. 1.4) и шихтованными впереплёт (рис. 1.5) магнитопроводами.

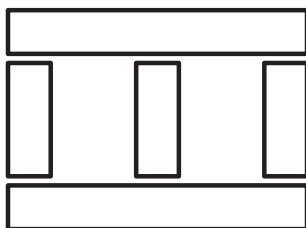


Рис. 1.4. Стыковая конструкция магнитопровода трёхфазного трансформатора

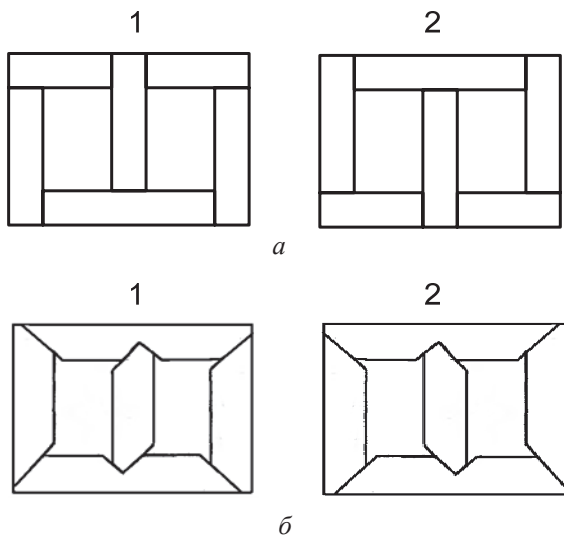


Рис. 1.5. Конструкция магнитопровода трёхфазного трансформатора при укладке листов стали впереплёт с прямыми (*а*) и косыми стыками (*б*)

В первом случае стержни и яра выполняются и скрепляются раздельно. При сборке магнитопровода стержни с обмотками устанавливаются встык с ярами и стягиваются специальными деталями. В местах стыка во избежание замыкания листов и возникновения больших

вихревых токов, вызывающих увеличение потерь и чрезмерное повышение температуры стали, устанавливаются изоляционные прокладки.

Сборка магнитопровода впереплёт ведётся путём чередования слоя листов, разложенных по положению 1 со слоем листов, разложенных по положению 2 (см. рис. 1.5).

Листы, из которых собирается шихтованный магнитопровод, имеют прямоугольную форму, если они штампуются из горячекатаной электротехнической стали (см. рис. 1.5, а).

В настоящее время магнитопроводы трансформаторов изготавливаются из холоднокатаной электротехнической стали, обладающей низкими удельными потерями и повышенной магнитной проницаемостью. Это позволяет уменьшить поперечное сечение стержня и, следовательно, сократить массы металла стали и обмоток трансформатора. Кроме того, уменьшаются потери в стали и намагничивающий ток трансформатора.

Для снижения потерь и падения магнитного напряжения в местах стыка при сборке магнитопровода из холоднокатаной электротехнической стали применяют косые стыки (см. рис. 1.5, б).

Наболее широкое распространение в трансформаторостроении получили шихтованные впереплёт магнитопроводы. Стыковая конструкция применяется значительно реже, так как наличие немагнитных зазоров в местах стыков увеличивает магнитное сопротивление на пути потока, что приводит к возрастанию намагничивающего тока трансформатора и снижению его коэффициента мощности.

Стержни магнитопровода трансформаторов в поперечном сечении имеют форму ступенчатой фигуры, вписанной в окружность с диаметром D_0 (рис. 1.6).

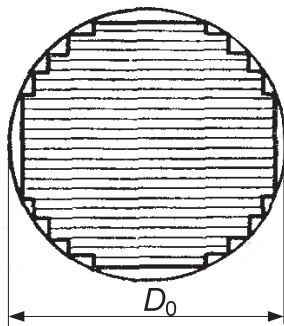


Рис. 1.6. Поперечное сечение стержней трансформатора

Число ступеней фигуры увеличивается с возрастанием мощности трансформатора. Увеличение числа ступеней увеличивает заполнение площади круга площадью ступенчатой фигуры, но одновременно увеличивает число типов пластин, необходимых для сборки стержня. В мощных трансформаторах в сечении магнитопровода предусматриваются каналы для его охлаждения.

При стержнях, имеющих поперечное сечение, приближающееся к кругу, обмотки будут иметь вид полых цилиндров. При такой конструктивной форме обмотки (по сравнению с прямоугольной) сокращается расход материалов на ее изготовление и увеличивается электрическая и механическая прочность.

Магнитопровод вместе со всеми конструкциями и деталями, служащими для крепления его отдельных частей, называется остовом трансформатора.

В электронных устройствах используются трансформаторы с тороидальными сердечниками, изготовленными из ленточной электротехнической стали или специальных магнитных сплавов. Их обмотки выполняются из медного провода, алюминиевой или медной фольги.

По способу расположения на стержне обмотки трансформатора подразделяются на концентрические (рис. 1.7, *а*) и чередующиеся (рис. 1.7, *б*). Концентрические обмотки выполняются каждая в виде цилиндра и располагаются на стержне концентрически относительно друг друга. Высота обеих обмоток, как правило, делается одинаковой.

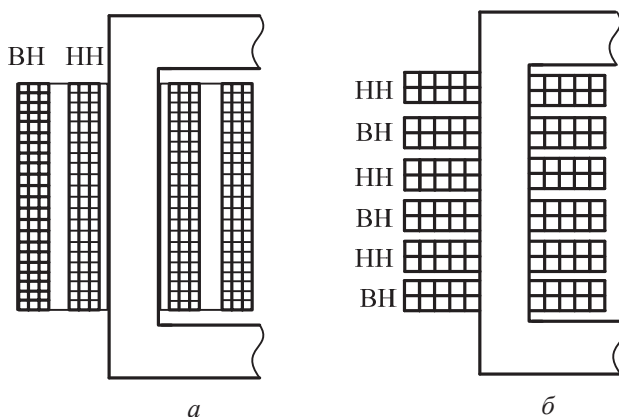


Рис. 1.7. Стержень трансформатора с концентрическими обмотками (*а*) и дисковыми чередующимися обмотками (*б*)

В высоковольтных трансформаторах ближе к стержню располагается обмотка НН, так как при этом уменьшается изоляционное расстояние между стержнем и этой обмоткой. В чередующихся обмотках катушки ВН и НН чередуются вдоль стержня по высоте.

В силовых трансформаторах нашли применение главным образом концентрические обмотки. Для выполнения обмоток трансформатора наряду с медными находят применение алюминиевые провода.

Важным элементом конструкции обмоток является их изоляция. Различают главную и продольную изоляцию. Главной изоляцией называется изоляция данной обмотки от магнитопровода, бака и соседних обмоток. Продольная изоляция является изоляцией между различными точками данной обмотки, т.е. между витками, слоями и катушками. Изоляция между витками обеспечивается собственной изоляцией обмоточного провода.

По способу охлаждения в зависимости от охлаждающей среды трансформаторы подразделяются на сухие (с воздушным охлаждением) и масляные.

Основным типом силового трансформатора является масляный трансформатор. Сухие трансформаторы применяются в установках производственных помещений, жилых и служебных зданий, где применение масляных трансформаторов вследствие их взрыво- и пожароопасности недопустимо. В сухих трансформаторах охлаждающей средой служит проникающий к обмоткам и магнитопроводу атмосферный воздух.

На рис. 1.8 представлена конструкция масляного трансформатора [2]. Шихтованный магнитопровод *1* вместе с обмотками НН (2) и ВН (3) погружается в бак с маслом. Масло, заполняющее бак, имеет двойное назначение. Так как оно имеет более высокую диэлектрическую прочность, чем воздух, то можно уменьшить изоляционные расстояния между токоведущими и заземленными частями, а также между обмотками. Трансформаторное масло является лучшей охлаждающей средой, чем воздух. Поэтому в трансформаторе, заполненном маслом, можно увеличить электрические и магнитные нагрузки. Следствием этого является уменьшение расхода обмоточных проводов и электротехнической стали на изготовление трансформатора и снижение его габаритов.

Бак трансформатора *4* обычно имеет овальную форму и для удобства транспортировки располагается на тележке с катками.

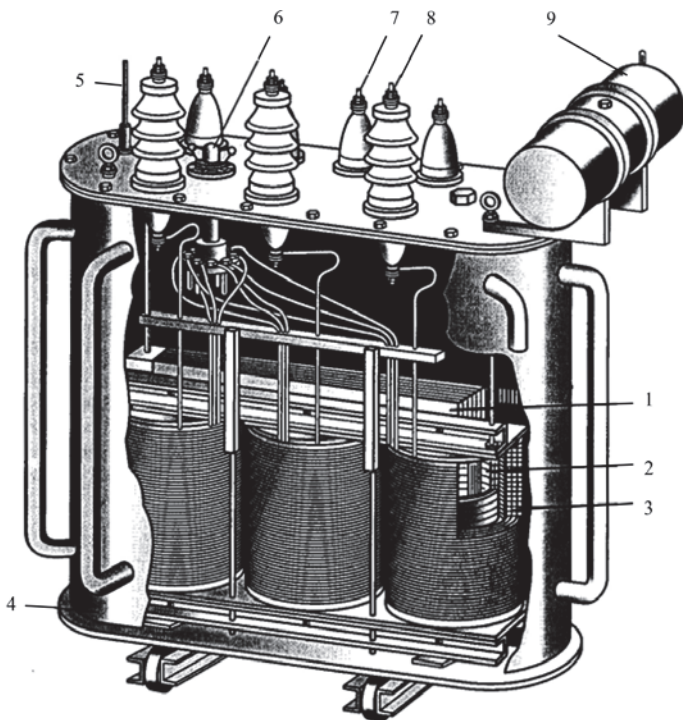


Рис. 1.8. Масляный трансформатор:

- 1 – шихтованный магнитопровод; 2 – обмотка НН; 3 – обмотка ВН;
 4 – трубчатый бак; 5 – термометр; 6 – переключатель регулировочных
 отводов обмотки ВН; 7 – ввод обмотки НН; 8 – ввод обмотки ВН;
 9 – расширитель

У трансформаторов мощностью до 40 кВА применяются баки с гладкими стенками. При больших мощностях для увеличения поверхности охлаждения применяются специальные трубчатые охладители.

При мощностях свыше 10 000 кВА для более интенсивного отвода тепла от охладителей применяется их обдув с помощью вентиляторов. В мощных трансформаторах применяется форсированное охлаждение масла. Масло из бака откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и охлажденное вновь возвращается в бак трансформатора.

Контроль температуры масла в верхней части бака производится различного типа термометрами 5. Наибольшая температура масла – в верхних слоях (допускается равной 95 °С).

Для изменения числа витков обмотки ВН в целях регулирования напряжения предусматривается переключатель 6, размещенный внутри бака. Рукоятка этого переключателя выводится на крышку или стенку бака трансформатора. Вводы 7 и 8 представляют собой изоляторы, внутри которых располагаются токоведущие медные стержни. Внутри бака к стержню подсоединяются концы обмотки трансформатора, а вне бака – токоведущие части сети.

Расширитель 9 представляет собой цилиндрический резервуар, располагаемый выше крышки бака масляного трансформатора и соединяемый с баком трубкой и патрубком на крышке. Внутренний объем расширителя составляет примерно 10 % объема бака трансформатора, так что при всех возможных колебаниях температуры масло полностью заполняет бак. Кроме того, при наличии расширителя открытая поверхность масла, соприкасающаяся с воздухом, сокращается, что уменьшает его окисление и увлажнение. Этим достигается защита масла и изоляции трансформатора. Между расширителем и баком трансформатора устанавливается газовое реле, которое сигнализирует о повреждениях, приводящих к местному нагреву отдельных частей. В результате нагрева происходит разложение масла и изоляции, сопровождаемое выделением газов. Газы, поднимаясь в верхнюю часть бака по пути в расширитель, проходят через газовое реле, вытесняют из него масло и заставляют его сработать.

На крышке и стенках бака устанавливаются разные пробки и краны, предназначенные для заливки, спуска и отбора пробы масла.

1.3. Схемы соединения обмоток трансформатора

Выводы начала обмоток однофазных трансформаторов обозначают буквами A, a , а концы – X, x . Большие буквы (A, X) относятся к обмоткам ВН, а малые (a, x) – обмоткам НН.

Начала и концы обмоток трехфазных трансформаторов соответственно обозначают A, B, C, X, Y, Z для обмоток ВН и a, b, c, x, y, z для обмоток НН. Выводы нулевой точки обозначают O, o .

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме в звезду (рис. 1.9, *а*), в звезду с выведенной нулевой точкой (рис. 1.9, *б*), по схеме в треугольник (рис. 1.9, *в*). Условное обозначение соединения в звезду Y или U . Условное обозначение соединения в треугольник Δ или D .

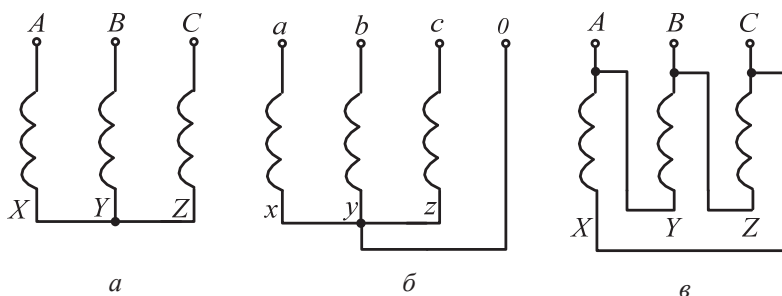


Рис. 1.9. Схемы соединения трёхфазной обмотки в звезду (а), в звезду с выведенной нулевой точкой (б) и в треугольник (в)

Схемы соединения обмоток трансформатора обозначаются в виде дроби Y/Y (Y/Δ) и т.д. Числитель указывает схему соединения обмотки ВН, а знаменатель – обмотки НН.

При соединении обмоток в звезду линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного; $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$, линейный ток равен фазному: $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. При соединении в треугольник: $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ и $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$. Эти соотношения справедливы при симметричном режиме.

1.4. Группы соединения обмоток трансформатора

Для оценки сдвига фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток вводится понятие о группе соединения обмоток. Группа соединения обмоток зависит от маркировки выводов, а у трехфазных трансформаторов – еще и от схемы соединения фаз между собой.

Рассмотрим однофазный трансформатор. Его группа соединения зависит от того, какой из выводов обмоток принят за начало и какой – за конец. На рис. 1.10 изображен стержень с намотанными на нем двумя обмотками [1]. Предположим, что они выполнены с одинаковым направлением намотки и имеют маркировку выводов, показанную на рис. 1.10, а. Обе обмотки сцеплены с одним и тем же потоком, поэтому ЭДС этих обмоток в любой момент времени будут иметь одинаковое направление, т.е. совпадать по фазе. Если тот же трансформатор будет иметь обмотку, например НН, у которой будут переставлены обозначения выводов по сравнению с предыдущим случаем, то тогда ЭДС обмоток для любого момента времени будут

действовать в противоположных направлениях (см. рис. 1.10, б). На векторной диаграмме векторы ЭДС должны быть изображены со сдвигом в 180° , т.е. в противофазе. Тот же результат получится, если на рис. 1.10, а одну из обмоток намотать в противоположную сторону.

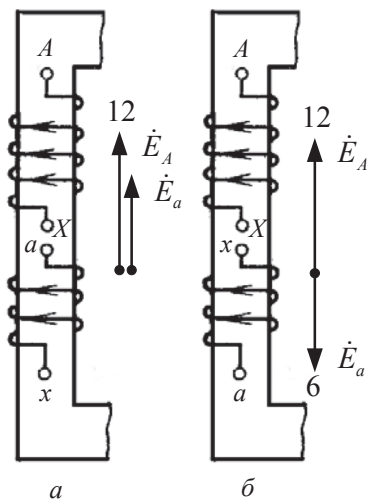


Рис. 1.10. Схема к определению группы соединений однофазного трансформатора

Принято сдвиг фаз между ЭДС характеризовать положением стрелок на циферблате часов, при этом вектор ЭДС обмотки ВН мысленно совмещают с минутной стрелкой часов и постоянно удерживают на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН – с часовой стрелкой. Цифра, на которую будет ориентирована часовая стрелка, показывает группу соединения обмоток. В случае, изображенном на рис. 1.10, а, когда угол сдвига между векторами ЭДС равен 0° и оба они ориентированы на цифру 12, принимается, что часы будут показывать 0ч и трансформатор с такой маркировкой выводов будет иметь нулевую группу соединения. Положение векторов на рис. 1.10, б соответствует 6 ч, и трансформатор будет иметь 6-ю группу соединения обмоток.

Однофазные трансформаторы могут иметь только эти две группы соединения. Они обозначаются I/I–0 и I/I–6.

В трехфазных трансформаторах может быть образовано 12 различных групп со сдвигом фаз между ЭДС от 0 до 330° через 30° , что соответствует 12 цифрам часового циферблата. Группу соединения принято определять по углу сдвига фаз между одноименными линейными ЭДС. Для более удобной взаимной ориентировки векторов ЭДС обмоток ВН и НН точки A и a на векторных диаграммах совмещают.

Определим группу соединения обмоток трансформатора, схема соединений обмоток которого показана на рис. 1.11, *а*. Предположим, что обе обмотки имеют одинаковое направление намотки и одноименные фазы их располагаются на одном и том же стержне. Тогда векторы фазных ЭДС обмоток ВН и НН будут совпадать по фазе, как это показано на векторной диаграмме (см. рис. 1.11, *б*).

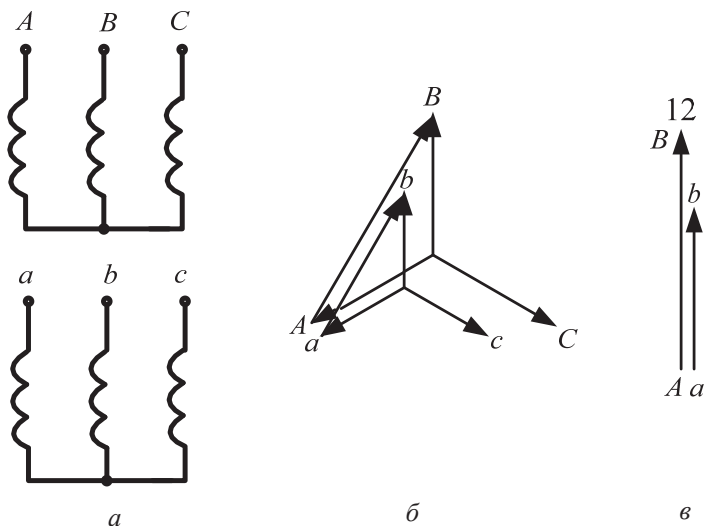


Рис. 1.11. Схема нулевой группы соединения трёхфазного трансформатора

Угол между линейными ЭДС AB и ab будет равен 0° (см. рис. 1.11, *в*), следовательно, рассматриваемая схема соединения обмоток принадлежит к группе 0 . Полное обозначение схемы и группы $Y/Y-0$.

Если у трансформатора, имеющего группу 0 , произвести перемаркировку фаз обмотки НН, как показано на рис. 1.12, то получим

трансформатор с 4-й группой соединения обмоток. В этом случае вектор ЭДС фазы a обмотки НН будет иметь направление, совпадающее с направлением вектора ЭДС фазы B обмотки ВН, так как обмотки этих фаз располагаются на одном и том же стержне. Соответственно будут совпадать по направлению векторы ЭДС фаз b и C и c и A . Сдвиг по фазе между линейными ЭДС AB и ab равен 120° , что на циферблате часов соответствует 4 ч.

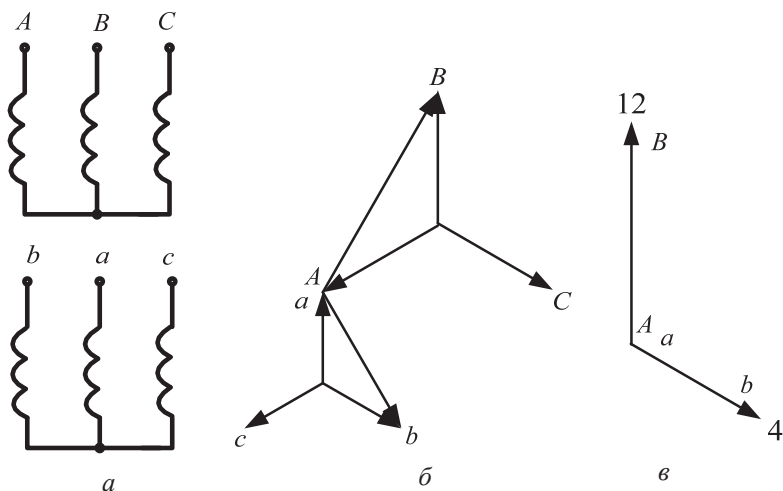


Рис. 1.12. Схема 4-й группы соединения трёхфазного трансформатора

У трансформаторов при схеме соединения обмоток «звезда–звезда» или «треугольник–треугольник» можно получить только четные группы.

Нечетные группы получаются у трансформатора, одна обмотка которого соединена в звезду, а другая – в треугольник. На рис. 1.13 изображена схема трансформатора, обмотка ВН которого соединена в звезду, а обмотка НН – в треугольник.

Ориентация векторов ЭДС на диаграмме производится согласно схеме соединения фаз между собой. Как следует из рис. 1.13, рассматриваемый трансформатор имеет 11-ю группу соединения обмоток.

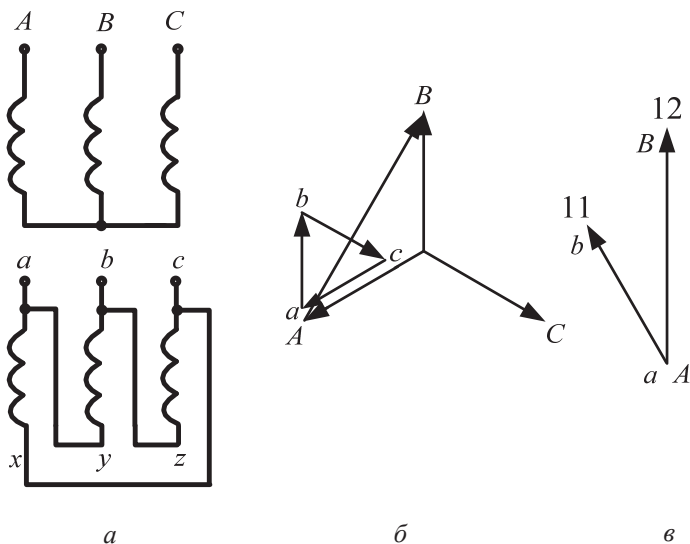


Рис. 1.13. Схема 11-й группы соединения трёхфазного трансформатора

1.5. Номинальные величины

Номинальные величины – это величины, которые соответствуют определенному заводом-изготовителем режиму работы трансформатора. Они указываются в каталогах и на табличке, прикрепленной к трансформатору.

Под номинальными напряжениями понимают линейные напряжения каждой из обмоток. При номинальном линейном напряжении первичной обмотки $U_{1л.ном} = \text{const}$ напряжение вторичной обмотки при номинальной мощности будет зависеть от характера нагрузки. Поэтому за номинальное вторичное напряжение $U_{2л.ном}$ принимается напряжение при холостом ходе, когда ток в этой обмотке равен нулю.

Номинальными токами трансформатора называются первичный линейный $I_{1л.ном}$ и вторичный линейный $I_{2л.ном}$ токи, вычисленные по номинальным значениям мощности и напряжения.

Номинальной мощностью трансформатора является полная мощность $S_{ном}$. Для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}$, для трехфазного $S_{ном} = \sqrt{3} \cdot U_{1л.ном} I_{1л.ном}$. Принимается, что номинальные мощности первичной и вторичной обмоток равны $S_{1ном} = S_{2ном} = S_{ном}$.