

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА

*Кафедра «Механизация животноводства
и электрификация сельского хозяйства»*

Е. И. Меженина, А. С. Аль-Хелю

**Лабораторный практикум
по дисциплине «Электрические машины»**

Нижегород
2019

Рецензенты:

Борис Иванович Горбунов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механизация и электрификация сельского хозяйства» ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА.

Роман Валентинович Кошелев — кандидат технических наук, доцент и. о. заведующего кафедрой «Эксплуатация мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин» ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА.

Меженина Е. И., Аль-Хелю А. С.

Лабораторный практикум по электрическим машинам / Е. И. Меженина, А. С. Аль-Хелю; Нижегородская ГСХА. — Н. Новгород: Нижегородская ГСХА, 2019.—76

В лабораторном практикуме по дисциплине «Электрические машины» даны теоретические сведения об устройстве, конструкции и принципе действия машин постоянного тока, машины переменного тока и трансформаторов, а также порядок проведения лабораторных работ.

Практикум предназначен для проведения практических, индивидуальных и самостоятельных занятий студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия.

© ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА, 2019

© Е. И. Меженина, 2019

© А. С. Аль-Хелю, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Изучение конструкции электрических машин постоянного тока ...	6
Лабораторная работа № 2. Простая петлевая обмотка машины постоянного тока.....	16
Лабораторная работа № 3. Простая волновая обмотка машины постоянного тока	21
Лабораторная работа № 4. Изучение конструкции трехфазных асинхронных электродвигателей.....	26
Лабораторная работа № 5. Изучение конструкции трехфазных синхронных машин.....	33
Лабораторная работа № 6. Однослойные обмотки машин переменного тока.....	43
Лабораторная работа № 7. Двухслойные обмотки машин переменного тока	49
Лабораторная работа № 8. Изучение конструкции магнитопровода и обмоток трансформатора	55
Лабораторная работа № 9. Изучение конструкции трансформаторов.....	65
Литература	75

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сельскохозяйственной техники тесно связано с применением автоматизированного электропривода. В сельскохозяйственных предприятиях наибольшее распространение получили машины переменного тока.

Около 95 % всего парка электрических машин приходится на асинхронные электродвигатели. Они используются практически во всех отраслях сельского хозяйства.

Особенность эксплуатации электрических машин в сельском хозяйстве заключается в том, что они работают в неблагоприятных условиях, что отрицательно влияет на их эксплуатационную надежность.

Для обеспечения бесперебойной работы электрооборудования, уменьшения расходов на эксплуатацию и ремонт необходимо наличие квалифицированного персонала.

Целью изучения дисциплины «Электрические машины» является подготовка электриков, которые обладают необходимыми знаниями по устройству, грамотной эксплуатации и обслуживанию электрооборудования.

Процесс изучения дисциплины «Электрические машины» в соответствии с ФГОС ВО И ОПОП ВО направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1. Способен решать типовые задачи профессиональной деятельности на основе знаний основных законов математических и естественных наук с применением информационно-коммуникационных технологий

ОПК-4. Способен реализовывать современные технологии и обосновывать их применение в профессиональной деятельности. Обосновывает применение современного энергетического оборудования, средств автоматизации и электрификации сельского хозяйства

ОПК-5. Способен участвовать в проведении экспериментальных исследований в профессиональной деятельности

ПКО-1. Способен участвовать в проведении лабораторных работ исследовательского характера по общепринятым методикам, составлять их описание и формулировать выводы.

В результате изучения дисциплины «Электрические машины» студент должен:

Знать:

Современные методы расчета электрических машин с учетом технических требований и энергоэффективного оборудования. Устройство эксплуатируемого и нового электрооборудования.

Уметь:

Выбирать электрооборудование, электрическую аппаратуру и средства обеспечения необходимого уровня надежности и качества электроэнергии. Оценивать техническое состояние и определять перспективы развития электрических машин сельскохозяйственных предприятий.

Владеть:

Приемами проектирования электрических. Навыками выбора электрических машин для технологических процессов сельскохозяйственного производства. Инструментальными средствами измерения и наладки.

Общие требования безопасности труда

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ в учебной лаборатории.

Учебная лаборатория «Электрические машины и электропривод» в отношении опасности поражения электрическим током относится к помещениям с повышенной опасностью из-за существующей возможности повреждения изоляции и замыкания разных полюсов или фаз на пульт и корпус электрооборудования. Поэтому каждый студент должен ясно себе представлять, что несоблюдение правил техники безопасности может привести к поражению электрическим током, вызывающему травмы, а в наиболее тяжелых случаях — и смерть человека.

В целях исключения несчастных случаев при выполнении лабораторных работ в учебной лаборатории каждый студент обязан неукоснительно выполнять нижеизложенные правила техники безопасности:

1. На столе лабораторного устройства не должно находиться посторонних предметов.
2. Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо убедиться в отсутствии напряжения на выходных выводах блока питания.
3. Сборка электрических цепей, изменение их и разборка должны производиться только при отсутствии напряжения на выходных выводах блока питания.
4. Категорически запрещается включать в сеть электрическую цепь после ее сборки или внесение в нее каких-либо изменений без проверки и разрешения преподавателя или лаборанта, ведущих лабораторное занятие.
5. Запрещается прикасаться ко всем оголенным токоведущим частям оборудования.
6. При обнаружении повреждения проводов их следует заменить, обеспечивая при этом выполнение предписаний п. п. 3, 4, 5.
7. При обнаружении повреждения какого-либо оборудования, прибора на лабораторном устройстве, все устройство следует обесточить (выключить) и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.
8. При выполнении лабораторных работ с вращающимися электрическими машинами запрещается работать в свободной (широкой) одежде, расстегнутой куртке или с шарфом со свободными концами.
9. Запрещается тормозить вращающиеся части электрической машины рукой или ногой.

10. В случае возникновения аварии или поражения электрическим током следует быстро обесточить все оборудование, сообщить об этом преподавателю или лаборанту и принять меры по оказанию доврачебной помощи пострадавшему.

После изучения студентами правил техники безопасности, проведения преподавателем соответствующего инструктажа на рабочем месте и проверки знаний каждый студент расписывается в лабораторном журнале по технике безопасности и только после этого допускается к выполнению работы в учебной лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы: изучить конструкцию машин постоянного тока, отдельных узлов машин постоянного тока и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в электрических машинах.

2. Основные понятия.

Электрические машины постоянного тока используют в качестве генераторов и электродвигателей. По сравнению с электрическими машинами переменного тока у них более высокая стоимость, они сложнее в изготовлении и менее надежны в работе из-за наличия в их конструкции щеточно-коллекторного узла. Поэтому генераторы постоянного тока менее распространены и их заменяют синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми преобразователями переменного тока в постоянный. Однако двигатели постоянного тока находят более широкое применение по сравнению с двигателями переменного тока и имеют следующие преимущества: хорошие пусковые свойства, значительную перегрузочную способность, благоприятные механические характеристики, возможность плавного и глубокого регулирования частоты вращения. Двигатели постоянного тока используют в электрокарах, автомобилях и тракторах с бортовой электрической сетью постоянного тока; во всевозможных автоматизированных приводах, например, в установках приготовления гранулированного зеленого корма типа АВМ. Генераторы применяют в сварочных установках, устройствах заряда аккумуляторов.

2.1. Основные законы.

2.1.1. Закон Ампера.

Принцип действия электрической машины основан на физических явлениях открытых Фарадеем и Ампером. Физическое явление, открытое Ампером, состоит в том, что если проводник, по которому течет ток, находится в магнитном поле, на каждый из носителей тока действует сила. От носителя тока действие этой силы передается проводнику, по которому он перемещается. В результате на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила. Соотношение величин было установлено экспериментально Ампером и носит название *закона Ампера*: если проводник длиной L , по которому проходит электрический ток I , поместить в магнитное поле с индукцией B перпендикулярно магнитным силовым линиям, то на проводник будет действовать выталкивающая сила:

$$F = I B L.$$

Направление действия этой силы определяется по правилу левой руки. *Правило левой руки* — правило определения направления механической силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле: если расположить левую руку таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а вытянутые пальцы направить по току, то отогнутый большой палец покажет направление действующей силы. Векторы силовых линий, тока и силы расположены под углом 90° .

2.1.2. Закон Фарадея.

В 1831 г. Фарадеем сформулирован *закон электромагнитной индукции*: если проводник пересекает магнитное поле, то в нем индуцируется ЭДС, величина которой пропорциональна интенсивности магнитного поля B , длине проводника L и скорости его перемещения V в магнитном поле:

$$e = B L V.$$

Направление ЭДС определяют по *правилу правой руки*: если правую руку расположить таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а отогнутый под углом 90° большой палец будет показывать направление перемещения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС. Векторы силовых линий, скорости и ЭДС расположены под углом 90° .

2.2. Рабочий процесс генератора постоянного тока.

Генератор постоянного тока — вращающаяся электрическая машина постоянного тока, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую постоянного тока.

Рабочий процесс ГПТ можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». Обмотка возбуждения, расположенная на полюсах, подключается к источнику постоянного напряжения. Под действием приложенного напряжения по обмотке потечет ток возбуждения, который создает основной магнитный поток. Этот магнитный поток замыкается по магнитной цепи генератора, пронизывая обмотку якоря.

2 — «подведение первичной энергии». Якорь приводится во вращение первичным двигателем.

3 — «преобразование энергии». Вращающиеся проводники якоря пересекают основной магнитный поток. Это индуцирует электродвижущие силы ЭДС в проводниках обмотки якоря. ЭДС проводников через коллектор и щетки выводится на зажимы генератора. Таким образом, в режиме холостого хода напряжение генератора равно ЭДС, а мощность первичного двигателя затрачивается на покрытие потерь холостого хода.

4 — «передача энергии нагрузке». К зажимам генератора подключается электрическая нагрузка. Под действием напряжения по нагрузке и обмотке якоря протекает ток. Ток обмотки создает магнитный поток, называемый магнитным потоком реакции якоря. Взаимодействие потоков возбуждения и реакции якоря создает тормозной электромагнитный момент, преодолевая который первичный двигатель затрачивает механическую энергию, а генератор превращает ее в электрическую.

При вращении с помощью первичного двигателя ротора генератора постоянного тока в магнитном поле, образованном обмоткой возбуждения, в обмотке якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС. Максимальное значение ЭДС будет иметь место при расположении стороны катушки под магнитным полюсом. При пересечении обмоткой якоря оси геометрической нейтрали ЭДС обращается в нуль, при дальнейшем повороте ротора изменяет знак на противоположный. Для выпрямления, возникающего в обмотке якоря переменного напряжения, используется коллектор, благодаря чему со щеток генератора снимается напряжение постоянного тока с незначительным уровнем пульсаций. Значение напряжения на зажимах обмотки якоря определяется частотой вращения и током возбуждения. Выходные характеристики генератора зависят от способа возбуждения (электромагнитное или от постоянных магнитов) и от схемы включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря. На практике используются генераторы постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным электромагнитным возбуждением.

2.3. Рабочий процесс двигателя постоянного тока.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) — машина постоянного тока, предназначенная для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую.

При подключении ДПТ к питающей сети постоянного тока через обмотки якоря и возбуждения протекает постоянный ток, создающий собственные магнитные потоки. В результате взаимодействия потоков образуется вращающий момент.

Рабочий процесс ДПТ можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». На обмотку возбуждения полюсов подключается постоянное напряжение. По обмотке потечет ток якоря, создающий магнитный поток, замыкающийся по магнитной цепи и воздушному зазору;

2 — «подведение первичной энергии». На обмотку якоря подводится постоянное напряжение. По обмотке якоря потечет ток;

3 — «преобразование энергии». По закону Ампера на проводники с током, помещенные в магнитное поле действует электромагнитная выталкивающая сила. Якорь начинает вращаться с частотой n . Также в проводниках якоря, вращающихся в магнитном поле, наводится ЭДС. Эта ЭДС направлена против тока и называется противо-ЭДС;

4 — «подключение нагрузки». К валу двигателя подключают механическую нагрузку, которая создает тормозной момент. Вал двигателя замедляет вращение, что уменьшает противо-ЭДС. Нарушается электрическое равновесие $U=E$. Для его восстановления из сети потребляется больший ток, который увеличивает частоту вращения и противо-ЭДС.

2.4. Конструкция машины постоянного тока.

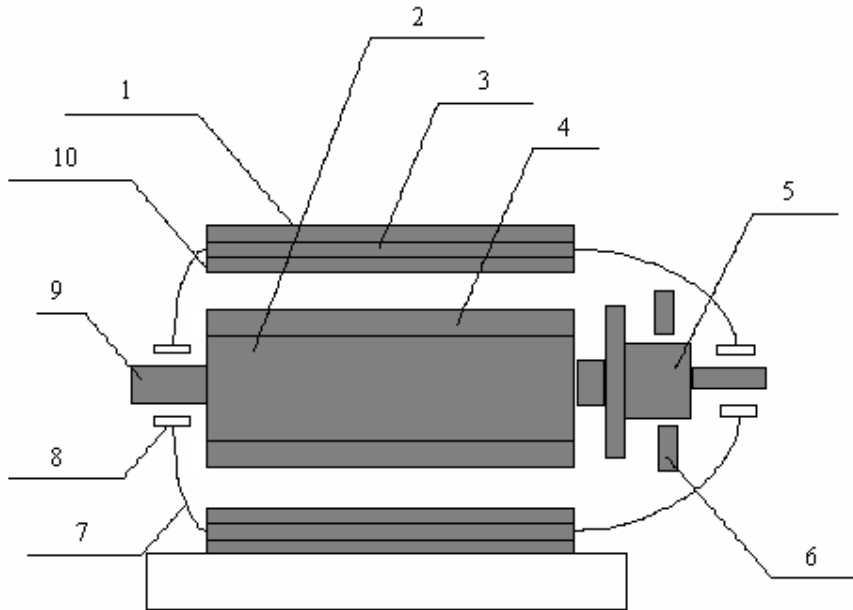


Рис. 1. Конструктивная схема машины постоянного тока:

1 — станина (ядро); 2 — сердечник якоря; 3 — сердечник главных полюсов;
4 — обмотка якоря; 5 — коллектор; 6 — щеточный аппарат; 7 —
подшипниковые щиты; 8 — подшипники; 9 — вал; 10 — обмотка возбуждения.

Станина 1 служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготовляют из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы для крепления машины к фундаментальной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления *сердечников главных полюсов 3*. Обычно станину делают цельной из стальной трубы, либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

Индуктор — узел, назначением которого является создание в машине основного магнитного поля (потока). Это неподвижная часть машины. Индуктор состоит из *обмотки возбуждения* и *сердечников полюсов* (магнитное поле может создаваться постоянными магнитами, но при этом возникает сложность регулировки величины магнитного потока).

Сердечники главных полюсов предназначены для создания основного магнитного потока машины. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1–2 мм или

из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

Кроме главных полюсов в машинах мощностью более 0,5 кВт устанавливаются дополнительные полюса, которые служат для улучшения токосъема (коммутации) с коллектора. Главные и дополнительные полюса крепятся к ярму болтами. Число главных полюсов, создающих основной магнитный поток в машине, всегда четное, причем «северные» и «южные» чередующиеся, что достигается особым соединением катушек возбуждения.

Массивное **ярмо** одновременно является станиной, к которой крепятся неподвижные части машины и с помощью которой машина крепится к основанию.

Обмотки возбуждения предназначены для подведения к ним постоянного тока, создающего основной магнитный поток. Они выполняются из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения марок ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭВЛ и др. В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными — намоткой обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку. В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса.

Т. о. основной поток создается обмоткой возбуждения, по которой проникает постоянный ток, а сердечник полюса и ярмо служат в роли магнитопровода, т. к. имеют высокую магнитную проницаемость.

Якорь — часть электрической машины, в которой преобразуется электрическая энергия. Якорь машины постоянного тока состоит из вала 9, сердечника 2 с обмоткой 4 и коллектора 5.

Сердечник якоря служит для крепления обмотки и является частью магнитопровода машины. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника

якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотка якоря в двигателе служит для получения вращающегося момента, когда к ней подведен ток, и она находится под действием поля возбуждения. В генераторе в обмотке наводится ЭДС, когда она вращается в магнитном поле возбуждения. Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов.

Коллектор служит для подведения напряжения к обмотке якоря (двигатель постоянного тока) и отведения напряжения (генератор постоянного тока). Он также является механическим выпрямителем в генераторе, т. е. преобразовывает переменный ток обмотки якоря в постоянный ток внешней цепи. Коллектор состоит из медных пластин 3–15 мм, изолированных друг от друга. Пакет коллектора скрепляется с помощью напаянных фланцев стяжными болтами и крепится на валу с помощью шпонки. Проводники обмотки якоря соединяются пайкой с коллектором через петушки особым образом.

Вал служит либо для передачи вращающего момента электродвигателя к приводимому механизму, либо для передачи вращающего момента генератору от соединенного с ним первичного двигателя, а также для крепления на нем якоря и коллектора.

Щеточный аппарат служит для отвода тока от вращающегося коллектора или подвода к нему тока. Он состоит из траверсы, щеточных пальцев, щеткодержателей (обойма, нажимная пружина, колодки для крепления к пальцу), щеток, токосбирающих шин. Число щеточных пальцев равно числу главных полюсов. Полярность их чередуется, и все они (одной полярности) соединяются между сборными шинами, которые соединяются с выводными зажимами или с другими обмотками машины. Траверса крепится или к станине, или к втулке подшипникового щита.

Подшипниковые щиты служат для крепления в них вала и для защиты от попадания внутрь машины посторонних предметов. Концы вала крепятся в подшипниках, запрессованных в подшипниковые щиты. Для охлаждения ма-

шины устанавливают крыльчатку (вентилятор). В щитах делаются отверстия для забора и отвода воздуха.

Части машины, несущие механическую нагрузку (ярмо или станина), изготавливаются из конструктивных материалов, применяемых в общем машиностроении. Это сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы. Сердечники дополнительных и главных полюсов набираются из листов магнитопроводящего материала, которым является легированная электротехническая сталь, содержащая от 2 до 5 % кремния. Присадка кремния увеличивает удельное электрическое сопротивление стали, в результате чего уменьшаются потери на вихревые токи, сталь становится устойчивой к окислению и старению. Графитные щетки изготавливают из натурального графита без связующих (мягкие сорта) и с применением связующих (твердые сорта). Угольно-графитовые щетки изготавливают из графита с введением других углеродистых материалов (кокс, сажа) и связующих веществ. Электрографитированные щетки изготавливают из графита и других углеродистых материалов (кокс, сажа) с введением связующих веществ после первой термической обработки щетки подвергают графитизации — отжигу при 2500–2800 °С. Металлографитовые щетки изготавливают из смеси порошков графита и меди. В некоторые из них вводят порошки свинца, олова или серебра. Эти щетки отличаются малым значением удельного сопротивления, допускают большие плотности тока и имеют малые переходные падения напряжения. Подшипниковые щиты изготавливаются из того же материала, что и станина или иных сплавов на основе алюминия.

Особенностью электрических машин является тесное сочетание металлов и изоляции, т. е. материалов, имеющих различные тепловые характеристики. В настоящее время в электрических машинах применяются изоляционные материалы классов нагревостойкости Е, В, F (ГОСТ 8865-70). Материалы класса Н используются значительно реже; материалы классов нагревостойкости Y и А в современных электрических машинах практически не применяются.

Основной серией машин постоянного тока общего назначения, которую выпускает в настоящее время отечественная промышленность, является серия 2П. Основное исполнение серии 2П охватывает диапазон мощностей от 0,37 до 200 кВт. Машины серии выполняют с высотой от вращения оси 80 до 315 мм. Номинальное напряжение якорной цепи 110, 220, 440, 600 В. Возбуждение независимое, **V 110 или 220 В**. Шкала номинальных частот вращения — 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/мин. Частота вращения двигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и уменьшением тока возбуждения. По степени защиты от воздействия окружающей среды двигатели серии 2П имеют два исполнения: IP 22 и IP44 (по ГОСТ 17494-87). Электродви-

гатели с высотой оси вращения $h < 100$ мм выполняются двухполюсными, а с $h > 112$ мм — четырехполюсными. Режим работы машин серии 2П продолжительный. Средний срок службы 12 лет, средний ресурс 30 000 ч.

2П X XXX X X XXXX

1 2 3 4 5 6,

где 1 — наименование серии; 2 — исполнение по степени защиты и вентиляции (Н, Ф, Б, О); 3 — высота оси вращения; 4 — условная длина (М или L); 5 — наличие встроенного тахометра (при его наличии — индекс Г, при отсутствии Г не ставится); 6 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

В настоящее время практически освоена новая серия машин постоянного тока — серия 4П. По сравнению с серией 2П она имеет улучшенные малогабаритные показатели. У всех машин серии 4П имеется распределенная компенсационная обмотка, а магнитопроводы статора и якоря у них выполняются шихтованными. У ряда машин серии 4П статоры выполнены по типу статоров асинхронных двигателей и не имеют явно выраженных полюсов. Компенсационная обмотка, а иногда и обмотка возбуждения равномерно распределенная по пазам. Такое выполнение статора позволяет при его изготовлении применять хорошо отработанную технологию производства статоров асинхронных двигателей, что снижает трудоемкость изготовления в 2,5 раза и уменьшает материалоемкость на 15–20 %.

3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить физические явления, на которых основан принцип действия машин постоянного тока;
- записать паспортные данные электрической машины постоянного тока, установленной на стенде;
- разобрать электрическую машину;
- изучить состав, устройство и назначение узлов машины постоянного тока;
- определить материалы, из которых изготовлены узлы электрической машины и способ охлаждения машины;
- изучить принцип взаимодействия узлов машины, составить конструктивную схему;
- изучить обозначения выводов обмоток машины постоянного тока;
- собрать электрическую машину;
- в отчете поместить паспортные данные машины, конструктивную схему, наименование, материал и назначение узлов электрической машины.

4. Порядок выполнения работы.

- 4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо:
заготовить бланк отчета;
ознакомиться с электрической машиной, установленной на стенде;
записать паспортные данные электрической машины;
отчитаться преподавателю по вопросам: какова цель работы, порядок ее выполнения.
- 4.2. Произвести внешний осмотр машины, определить назначение (двигатель, генератор) и наметить порядок разборки.
- 4.3. Разобрать машину, при этом запомнить (отметить) расположение узлов, чтобы правильно произвести сборку машины.
- 4.4. Определить наименование и назначение каждого узла машины.
- 4.5. Записать в отчет наименование всех имеющихся узлов машины.
- 4.6. Изучить устройство каждого узла и принцип его работы.
- 4.7. Изучить принцип взаимодействия узлов машины.
- 4.8. Определить ориентировочно, из какого материала изготовлен каждый узел.
- 4.9. Определить способ охлаждения машины.
- 4.10. Собрать машину, сдать рабочее место лаборанту.
- 4.11. Выполнить письменно отчет по прилагаемой форме на листах формата А4 и сдать преподавателю.

5. Контрольные вопросы.

- 5.1. Опишите область применения машин постоянного тока.
- 5.2. Объясните закон Ампера и правило левой руки.
- 5.3. Объясните закон Фарадея и правило правой руки.
- 5.4. Объясните рабочий процесс двигателя постоянного тока.
- 5.5. Объясните рабочий процесс генератора постоянного тока.
- 5.6. Составить конструктивную схему машины постоянного тока.
- 5.7. Объяснить назначение и описать устройство индуктора и его элементов.
- 5.8. Объяснить назначение и описать устройство якоря и его элементов.
- 5.9. Объяснить назначение и описать устройство подшипниковых щитов, вентилятора и щеточного аппарата.
- 5.10. Описать материалы, применяемые в электрических машинах.
- 5.11. Описать марки электрических машин постоянного тока.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

ПРОСТАЯ ПЕТЛЕВАЯ ОБМОТКА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы: получить практические навыки расчета и укладки якорной простой петлевой обмотки машин постоянного тока.

2. Основные понятия.

Обмоткой якоря машины постоянного тока называется система изолированных проводников определенным образом уложенных на поверхности якоря и определенным образом (электрически) соединенных между собой и коллектором. Обмотки возбуждения, расположенные на полюсах, предназначены для создания магнитного поля. Обмотки якорей располагаются на поверхности якорей и служат для создания ЭДС (генератор) и электромагнитного момента (двигатель).

В современных машинах постоянного тока якорная обмотка укладывается в пазах на внешней поверхности якоря. Такие обмотки называются барабанными.

Если в пазу барабанного якоря лежит одна сторона секции, то такая обмотка называется однослойной, если в пазу лежат две стороны двух разных секций, то такая обмотка называется двухслойной.

ЭДС E , индуктированные во всех параллельных ветвях петлевой обмотки, теоретически должны быть равны. Практически из-за технологических допусков в величине воздушного зазора под разными полюсами, дефектов литья в корпусе и других причин магнитные потоки отдельных полюсов несколько различаются между собой, а поэтому в параллельных ветвях действуют неодинаковые ЭДС. Разница между ними составляет 3–5 %, однако, вследствие не большого сопротивления обмотки якоря этого оказывается достаточно для того, чтобы по параллельным ветвям даже при холостом ходе проходили довольно значительные уравнивающие токи, которые загружают щетки и способствуют возникновению искрения на коллекторе. Чтобы уравнивающие токи замыкались помимо щеток, в петлевых обмотках предусматривают уравнивающие соединения, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически равные потенциалы. Обычно для этой цели соединяют между собой коллекторные пластины, к которым подключены равнопотенциальные точки обмотки. Практически достаточно иметь одно-два уравнивающих соединения на каждую группу секций, лежащих в одном пазу якоря, т. е. снабжать уравнивателями $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$ коллекторных пластин. Уравнивающие соединения располагают чаще всего под лобовыми частями обмотки рядом с коллектором. В этом случае они нахо-

дятся вне магнитного поля главных полюсов и в них э. д. с. не индуцируется. Протекающие по уравнивающим соединениям токи, проходя по параллельным ветвям обмотки якоря, создают МДС, которые уменьшают неравенство магнитных потоков отдельных полюсов.

2.1. Элементы обмотки.

Проводник — провод, расположенный в магнитном поле машины.

Виток — два последовательно соединенных проводника.

Секция — часть обмотки якоря, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков и присоединенная к двум коллекторным пластинам, следующим друг за другом по схеме обмотки. Секция должна быть размещена на поверхности якоря так, чтобы наводимая в ней ЭДС (в генераторе) была максимальна. Очевидно, что при 2-х полюсной машине сторона 1-й и 2-й секций должны располагаться на расстоянии, равном или близком к нему.

2.2. Свойства и параметры простой петлевой обмотки.

Характерной особенностью простой петлевой обмотки является то, что число параллельных ветвей этой обмотки равно числу полюсов $2a=2p$. Из этого свойства следует: чем больше число полюсов, тем больше параллельных ветвей имеет обмотка. Следовательно, тем больше щеточных пальцев должно быть в машине. По этой причине простую петлевую обмотку часто называют параллельной.

Основными параметрами простой петлевой обмотки являются:

1. Y_1 — первый частичный шаг — это число элементарных пазов, охватываемых секцией:

$$Y_1 = (z_{эл}/2p) + \varepsilon,$$

где $z_{эл}$ — число элементарных пазов якоря; p — число пар полюсов; ε — число, которое нужно прибавить или отнять, чтобы получить целое значение первого частичного шага.

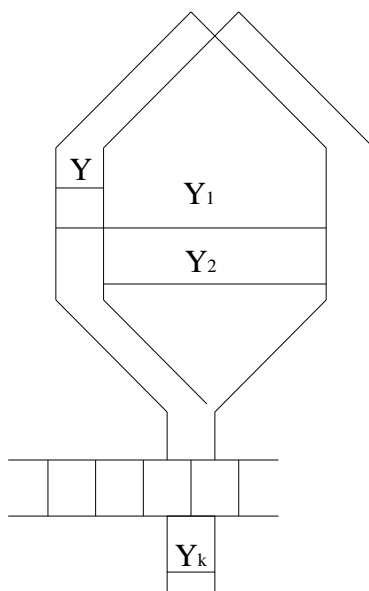


Рис. 2. Параметры простой петлевой обмотки:
 Y_1 — первый частичный шаг; Y_2 — второй частичный шаг;
 Y — результирующий шаг; Y_K — шаг по коллектору.

2. Y_2 — второй частичный шаг — это число элементарных пазов между концом одной секции и началом следующей за ней по схеме обмотки

$$Y_2 = Y - Y_1.$$

3. Y_K — шаг по коллектору — это расстояние между делениями коллектора, к которым присоединена секция, измеренное числом коллекторных пластин.

4. Y — результирующий шаг — это расстояние между соответствующими сторонами (т. е. сторонами, лежащими в верхнем или нижнем слое) двух секций, следующих друг за другом по схеме обмоток:

$$Y = Y_K,$$

Y, Y_1, Y_2 — измеряются в элементарных пазов.

5. α — угол сдвига между ЭДС проводников соседних пазов

$$\alpha = (p \ 360)/z,$$

где p — число пар полюсов, z — число пазов якоря.

2.3. Требования к обмоткам.

Обмотки должны удовлетворять следующим требованиям:

— обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки;

— обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую продолжительный срок службы машины;

— конструкция обмотки должна обеспечивать удовлетворительные условия токосъема с коллектора без искрения;

- расход материала при заданных эксплуатационных показателях должен быть минимальным;
- технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

2.4. Область применения простых петлевых обмоток.

Двухполюсные машины небольшой мощности выполняют с простой петлевой обмоткой, так как при двух полюсах волновая обмотка превращается в петлевую. По мере увеличения мощности обычно переходят к более компактным четырехполюсным машинам, имеющим меньшую массу, чем двухполюсные машины. Четырехполюсные машины небольшой и средней мощности часто имеют волновую обмотку, не требующую применения уравнивающих соединений. При повышенном напряжении на щетках (до 1000В и более) такую обмотку применяют в четырехполюсных машинах мощностью до 200–300 кВт. Если же напряжение на коллекторе невелико (110 или 220 В), то уже при мощности в десятки киловатт применяют четырехполюсные машины с петлевой обмоткой для уменьшения тока i в параллельной ветви. Величина этого тока даже в весьма мощных машинах не должна превышать 250–300 А, так как при выполнении обмотки из проводников очень большого сечения возникают значительные технологические трудности при изготовлении якорных катушек и их укладке. При простой петлевой обмотке ток $i = I/(2a) = I/(2p)$, поэтому с ростом мощности и тока машины для сохранения тока ветви в допустимых пределах увеличивают число полюсов.

3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство простой петлевой обмотки якоря машины постоянного тока;
- изучить расчет параметров и способы построения схем-разверток обмоток;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки якоря машины постоянного тока;
- рассчитать параметры и построить схему-развертку простой петлевой обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку простой петлевой обмотки на якорь.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо отчитаться преподавателю по вопросам п. 2. 5.

4.2. Получить задание

4.2.1. Задание

Вариант 1: $z = s = k = 23, 2p = 2.$

Вариант 2: $z = s = k = 23, 2p = 4.$

Вариант 3: $z = s = k = 23, 2p = 6.$

Вариант 4: $z = s = k = 12, 2p = 4.$

4.3. Рассчитать параметры простой петлевой и простой волновой обмоток по заданным вариантам.

4.4. По полученным данным построить схемы-развертки обмоток.

4.5. Выполнить укладку простой петлевой обмотки в пазы якоря, установленного на стенде. Показать уложенную обмотку преподавателю.

4.6. Разобрать обмотку и сдать рабочее место лаборанту.

5. Контрольные вопросы.

5.1. Объяснить назначение и описать устройство обмотки якоря машины постоянного тока.

5.2. Описать особенности и основные свойства простой петлевой обмотки.

5.3. Объяснить назначение и устройство уравнительных соединений обмотки.

5.4. Описать параметры простой петлевой обмотки и их расчетные формулы.

5.5. Описать требования, предъявляемые к обмоткам.

5.6. Описать область применения простой петлевой обмотки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

ПРОСТАЯ ВОЛНОВАЯ ОБМОТКА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы: получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки простой волновой якорной обмотки машины постоянного тока.

2. Основные понятия.

2.1. Классификация обмоток якоря

— по способу соединения секций: простая петлевая; простая волновая; сложная петлевая; сложная волновая; смешанная.

— по способу укладки на якоре: барабанная; кольцевая.

— по числу слоев в пазу: однослойная; двухслойная.

2.2. Основные свойства и параметры простой волновой обмотки.

Число параллельных ветвей в простой волновой обмотке всегда равно 2 независимо от числа полюсов в машине. По этой причине такую обмотку часто называют последовательной. Уравнительные соединения при простой волновой обмотке не требуется, так как в каждую параллельную ветвь входят секции, стороны которых расположены под всеми полюсами. В результате этого неравенство потоков отдельных полюсов не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях. При волновой обмотке в машине можно устанавливать только два щеточных пальца. Однако это делают лишь в машинах малой мощности; в более мощных машинах для уменьшения плотности тока под щетками и улучшения токосъема обычно ставят полный комплект ($2p$) щеточных пальцев.

Основными параметрами простой волновой обмотки являются:

1. Y_1 — первый частичный шаг — это число элементарных пазов, охватываемых секцией:

$$Y_1 = (z_{эл}/2p) + \varepsilon,$$

где $z_{эл}$ — число элементарных пазов якоря; p — число пар полюсов; ε — число, которое нужно прибавить или отнять, чтобы получить целое значение первого частичного шага.

2. Y_2 — второй частичный шаг — это число элементарных пазов между концом одной секции и началом следующей за ней по схеме обмотки

$$Y_2 = Y - Y_1.$$

3. Y_K — шаг по коллектору — это расстояние между делениями коллектора, к которым присоединена секция, измеренное числом коллекторных пластин.

4. Y — результирующий шаг — это расстояние между соответствующими сторонами (т. е. сторонами, лежащими в верхнем или нижнем слое) двух секций, следующих друг за другом по схеме обмоток:

$$Y = YK = (k \pm 1)/p,$$

где k — число коллекторных пластин,

Y, Y_1, Y_2 — измеряются в элементарных пазах.

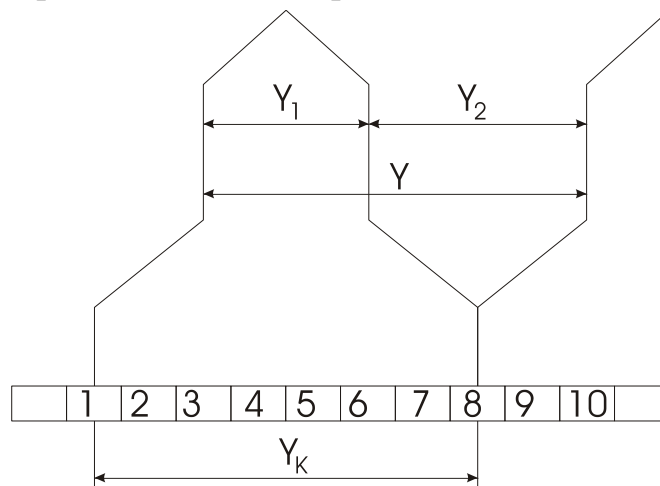


Рис. 3. Параметры простой волновой обмотки:

Y_1 — первый частичный шаг; Y_2 — второй частичный шаг;

Y — результирующий шаг; Y_k — шаг по коллектору.

Так как Y_k должен быть целым числом, то число коллекторных пластин не может быть произвольным. Предпочтительно брать $Y_k = (k \pm 1)/p$ (неперекрещенная обмотка), так как при этом несколько уменьшается расход обмоточного провода. Якорная катушка в рассматриваемой обмотке имеет форму волны, поэтому обмотку и называют волновой. В якоре барабанного типа направление ЭДС сохраняется неизменным во всех сторонах секций, расположенных в пределах одного полюсного деления, т. е. в $S/(2p)$ сторонах секций. В простой волновой обмотке при одном обходе окружности якоря соединяют последовательно $2p$ сторон секций; поэтому количество секций в каждой параллельной ветви $S_s = pS/(2p) = S/2$, а число параллельных ветвей обмотки $2a = S/S_s = 2$. $\boxed{5}$ α — угол сдвига между ЭДС проводников соседних пазов

$$\alpha = (p \ 360)/z.$$

2.3. Методика изготовления и укладки простой петлевой (волновой) обмотки якорей машин постоянного тока.

2.3.1. Производится расчет параметров и построение схемы обмотки.

2.3.2. Секции обмоток изготавливают с помощью специальных шаблонов на намоточных станках. Различают шаблонные обмотки мягкими секциями, намотку которых выполняют из проводов небольшого диаметра, и обмотку с жесткими формированными секциями, намотку которых выполняют одновре-

менно несколькими проводниками или из стержней (шин) большого сечения прямоугольной формы. Мягкие секции укладывают в полузакрытые пазы отдельными проводниками, как бы всыпая в паз, поэтому такие обмотки называют всыпными. Жесткие секции укладывают в открытые пазы в полностью изготовленном виде. К шаблонным обмоткам следует отнести и катушки, наматываемые на шаблонах для полюсов МПТ.

Протяжную обмотку применяют только в якорях с закрытыми пазами (или полузакрытыми) и выполняют вручную протягивая в паз каждого из проводников секции — катушки. Работа достаточно трудоемка, ее выполняют два обмотчика.

Шаблонную обмотку с мелкими секциями применяют преимущественно для машин малой мощности, а также среднем напряжением до 500 В. Шаблонную обмотку с жесткими готовыми секциями применяют для мощных машин. Предварительная заготовка секций позволяет выполнить более надежную изоляцию.

2.3.3. Изолирование секций или стержней (шин обмотки) изоляционными материалами может быть выполнено в виде однослойной или двухслойной изоляции. Количество слоев изоляции определяется расчетом.

2.4. Электрическая изоляция обмотки.

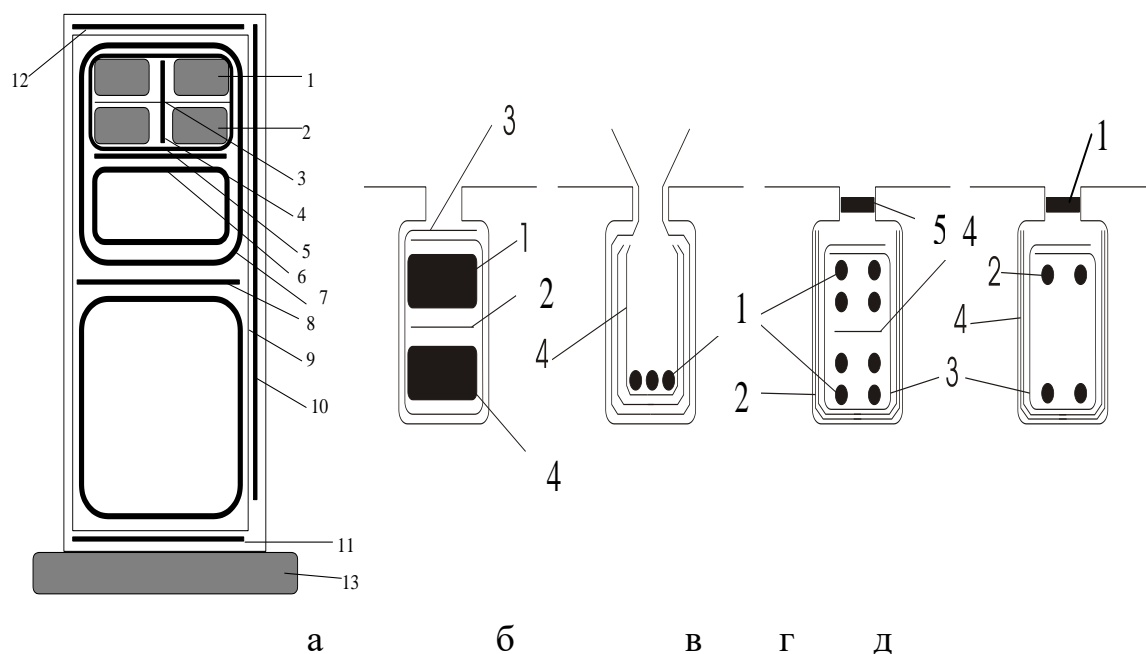


Рис. 4. Электрическая изоляция: а) виды изоляции внутри паза: а) 1 — металл проводника; 2 — изоляция проводника; 3 — прокладка между проводниками; 4 — прокладка между рядами проводников; 5 — изоляция витка; 6 — прокладка между витками; 7 — корпусная изоляция; 8 — прокладка между слоями; 9 — защитная оболочка; 10 — боковая распорка из упругого волокнистого материала; 11 — прокладка под клин; 12 — прокладка на дно паза; 13 —

пазовый клин; б) стержневая обмотка: 1 — медный или алюминиевый стержень; 2 — электрокартон 0,3 мм; 3 — электрокартон 0,2 мм; 4 —; в) сыпная обмотка: 1 — провод изолированный; г) двухслойная обмотка впротяжку: 1 — провод изолированный; 2 — лакоткань 0,2 мм; 3 — электрокартон 0,2 мм; 4 — электрокартон 0,3 мм; 5 — пазовый клин; д) однослойная обмотка впротяжку: 1 — пазовый клин; 2 — провод изолированный; 3 — электрокартон 0,2 мм; 4 — лакоткань 0,2 мм.

Основным назначением электрической изоляции является предотвращение возможности соединения изолируемой токонесущей части с корпусом или с другими токонесущими частями.

В электрических машинах для гибкой межвитковой и пазовой изоляции применяют лакоткани ЛХМ-105 на основе хлопчатобумажной ткани, ЛШМ-105 на основе шелковой ткани, ЛКМ-105 на основе капронового шелка, ЛСМ-105/120 на основе стеклянной ткани.

Существенная часть пазовой изоляции — место выхода ее из паза. Пазовая изоляция должна выступать из стали на величину вылета, длина которого 10–15 мм.

Секции укладываются согласно схеме-развертке. В закрытых пазах укладка секций выполняется впротяжку. В открытых, полуоткрытых и полужакрытых пазах секции укладываются путем всыпания (всыпные). Секции опускаются на дно паза с помощью специальных приспособлений. В двухслойных обмотках начальные стороны первых секций держат на весу до появления в пазу сторон секций нижнего слоя. Эта особенность усложняет выполнение обмотки вручную. Секции осаживаются в паз с помощью деревянной пластины. В случае простой петлевой обмотки в первый паз укладывается начальная сторона секции. Вторая сторона укладывается в паз, находящийся на расстоянии u . Концы секции присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам, лежащим по обе стороны линии, являющимися осью симметрии секции. В случае простой волновой обмотки концы уложенных секций присоединяются к двум коллекторным пластинам, находящимся по обе стороны от линии симметрии секции на расстоянии $Y/2$. Эта операция называется центровкой.

Чтобы предохранить от выпадания уложенные проводники, их заклинивают деревянными клиньями.

Клинья изготавливают из сухого дерева и других изоляционных материалов. Клинья должны быть не тоньше 3 мм и длина паза на 5–8 мм.

Проводники секций, из которых состоит обмотка якоря, присоединяют к коллекторным пластинам. Для присоединения проводников у коллекторных

пластин со стороны, обращенной к якорю, в выступах (петушках) фрезеруют шлицы. В эти шлицы закладывают, а затем запаивают концы секций обмоток.

Лобовые части обмоток на вращающихся частях подвержены действию центробежных сил: при больших окружных скоростях эти силы могут быть настолько значительными, что могут вызвать разрушение обмоток. Для бондажирования применяют стальную проволоку (бондажную) с временным сопротивлением разрыву 160–200 кг мм. При установке бондажей обязательным условием является постоянство натяжения бондажной проволоки.

Чтобы придать волокнистым изоляционным материалам нужные качества их необходимо пропитать соответствующими лаками. Пропитка изоляции обмоток повышает теплостойкость, влагостойкость, химическую стойкость, теплопроводность, электрическую и механическую прочность, а следовательно увеличивает срок службы изоляции. В основном для пропитки обмоток электрических машин используют масляно-бумажные лаки БТ-980, БТ-982, БТ-987, БТ-987М, модифицированный мемалиноформальдегидной смолой с повышенной твердостью и влагостойкостью стенок; полиэфирные П-933, ПЭ-9132; лаки на пентофталиевой смоле ПФЛ-88; кремнеорганические КО-916, КО-964; пропиточные компоненты 225, 225-Р, МБК-1, КП-10 и Д-1, Д-61 на основе эпоксидных смол и отвердителей.

После пропитки якорь сушат в сушильных печах. По окончании сушки поверхность якоря и коллектора очищается от остатков (потеков) лака. При установке выполняется балансировка якоря.

3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство простой волновой обмотки якоря машины постоянного тока;
- изучить расчет параметров и способы построения схем-разверток обмоток;
- изучить устройство и классификацию пазов якоря;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки якоря машины постоянного тока;
- рассчитать параметры и построить схему-развертку простой волновой обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку простой волновой обмотки на якорь.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо отчитаться преподавателю по вопросам п. 3.

4.2. Получить задание.

4.2.1. Задание.

Вариант 1. $Z = s = k = 23, 2p = 2$.

Вариант 2. $Z = s = k = 23, 2p = 4$.

Вариант 3. $Z = s = k = 23, 2p = 6$.

Вариант 4. $Z = s = k = 13, 2p = 4$.

4.3. Рассчитать параметры простой волновой обмотки по заданным вариантам.

4.4. По полученным данным построить схемы-развертки обмоток.

4.5. Выполнить укладку простой волновой обмотки в пазы якоря, установленного на стенде. Показать уложенную обмотку преподавателю.

4.6. Разобрать обмотку и сдать рабочее место лаборанту.

5. Контрольные вопросы.

5.1. Объяснить назначение и описать устройство обмотки якоря машины постоянного тока.

5.2. Классификация обмоток.

5.3. Описать особенности и основные свойства простой волновой обмотки.

5.4. Описать параметры простой волновой обмотки и их расчетные формулы.

5.5. Описать классификацию видов изоляции, применяемых в обмотках якорей.

5.6. Описать методику укладки простой волновой обмотки якоря машины постоянного тока.

5.7. Опишите пропиточные изоляционные материалы обмоток.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1. Цель работы. Изучить конструкции и принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой и с фазным ротором, устройство отдельных узлов машины, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в асинхронных электродвигателях.

2. Основные положения.

Асинхронные машины — это электрические машины переменного тока, у которых магнитное поле (статора) и проводники (обмотки ротора) имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины используют преимущественно в качестве электрических двигателей. Их преимущества — простота, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации. В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями. Например, в крановых механизмах.

Асинхронные двигатели для массового применения выпускают единичными сериями. Единая серия представляет собой ряд асинхронных двигателей возрастающей мощности однотипной конструкции и удовлетворяющих общим техническим требованиям.

Первая единая серия асинхронных двигателей (серия А) была разработана и освоена в производстве в 1951 г. Она охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт.

В последующие годы были разработаны и освоены следующие серии асинхронных двигателей: А2 и АО2 (1959 г.), 4А и 4АМ (1972 г.), АИР (1981 г.), РА (1992 г.), 5А (1996 г.)

Основная единая серия асинхронных двигателей 4А включает в себя двигатели мощностью 0,06–400 кВт и содержит в этом диапазоне 32 номинальных значения мощностей. Двигатели мощностью 0,06–0,37 кВт выполняют на напряжениях 220 и 380 В, мощностью 0,55–11 кВт — 220, 380 и 660 В. Обмотка статора этих двигателей соединена звездой или треугольником и имеет три выходных конца. Двигатели мощностью 15–110 кВт выполняют на напряжения 200/380 В и 380/660 В; мощностью 132–400 кВт — 380/660 В. обмотка статора содержит 6 выводных концов; схема соединения Δ/Y .

Двигатели предназначены для работы от сети с частотой 50 Гц и их изготавливают на синхронные частоты вращения 500–3000 мин⁻¹.

Асинхронные двигатели серии АИР разработаны в рамках Международной организации по экономическому и научно-техническому сотрудничеству в электротехнической промышленности (ИНТЕРЭЛЕКТРО).

Эта серия включает в себя двигатели мощностью 0,025–315 кВт с напряжением питания 220/380 В и 380/660 В и частотой 50 Гц. Синхронные частоты вращения двигателей 500–3000 мин⁻¹. По сравнению с двигателями серии 4А

двигатели АИР имеют более высокий КПД, пониженные шумы и вибрации, меньшую материалоемкость.

Асинхронные двигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы с двигателями серии 4А и АИР.

2.1. Рабочий процесс асинхронных двигателей.

Принцип действия асинхронных машин основан на явлении электромагнитной индукции и возникновения электромагнитных сил. При подключении обмотки статора к сети трехфазного синусоидального тока возникает вращающееся магнитное поле с синхронной частотой вращения n_1 :

$$n_1 = 60f_1 / p, \text{ где}$$

f_1 — частота питающего напряжения, Гц;

p — число пар полюсов магнитного поля.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС E_2 , направление которой по правилу правой руки.

Под действием ЭДС E_2 в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи I_2 . На проводники ротора с током I_2 , находящиеся в магнитном поле статора, по закону Ампера будет действовать электромагнитные силы F , направление которых определяют по правилу левой руки. Образованная от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем.

Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором — вращающаяся электрическая машина переменного тока, принцип работы которой основан на явлении электромагнитной индукции. В асинхронном двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую путем подключения обмотки статора к сети переменного тока. При этом частота вращения ротора меньше частоты вращения электромагнитного поля. Обычно асинхронный двигатель называют также асинхронную машину, преобразующую электрическую энергию переменного тока, поступающего в обмотку статора, в механическую энергию вращающегося ротора.

Рабочий процесс асинхронного двигателя можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение» и 2 — «подведение первичной энергии» проходят одновременно. На трехфазную обмотку статора подается трехфазный переменный ток. Создается вращающееся электромагнитное поле статора. В короткозамкнутой обмотке ротора под действием вращающегося магнитного поля наводится

ЭДС, вызывающая протекание токов в стержнях обмотки ротора двигателя. Эти токи создают собственное магнитное поле.

3 — «преобразование энергии». В результате взаимодействия магнитного поля ротора с магнитным полем статора в соответствии с законом Ленца возникает вращающий момент, стремящийся устранить причину, вызвавшую появление тока в короткозамкнутой обмотке ротора. Работоспособность двигателя поддерживается только в том случае, если частота вращения магнитного поля статора отличается от частоты вращения ротора, поскольку в этом случае обеспечивается взаимное перемещение магнитного поля статора относительно стержней обмотки ротора, а, следовательно, и появление в них тока и вращающего момента. По этой причине рассматриваемые двигатели называются асинхронными.

4 — «передача энергии нагрузке». К валу двигателя подключается нагрузка, которая создает тормозной момент. Для преодоления этого тормозного момента двигатель потребляет из сети больший ток и восстанавливает частоту вращения.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя прямо пропорциональна частоте напряжения питания, обратно пропорциональна числу пар полюсов обмотки статора и определяется из выражения

$$n_2 = (1-s)60f_1/2p,$$

где s — скольжение;

f_1 — частота питающего напряжения, Гц;

p — число пар полюсов.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения n_2 будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента M и тормозного момента, создаваемого силами трения и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора n_2 принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля n_1 . Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выражается в долях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} ; \quad S \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из **станины**, неподвижного **статора** и размещенного внутреннего вращающегося **ротора** (рис. 5). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2–1,5 мм.

Станина предназначена для крепления всех основных узлов машины. Станины машин переменного тока в основном изготавливают чугунами; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозионной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. Наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением.

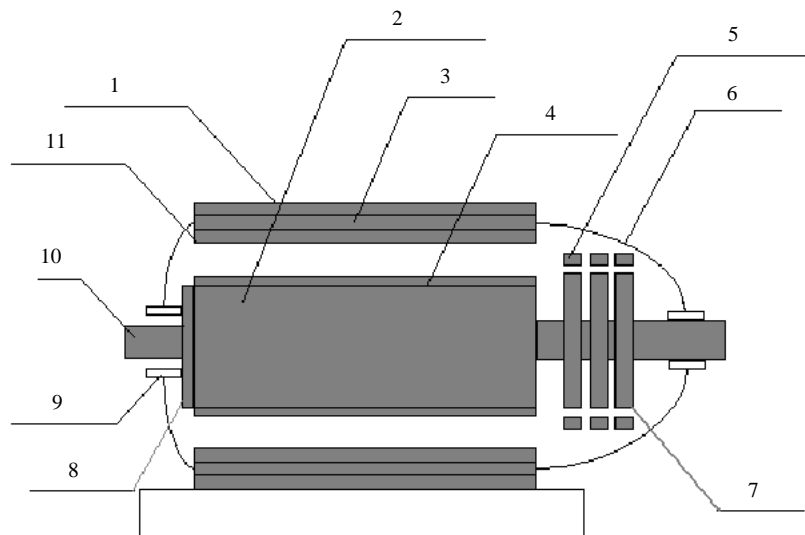


Рис. 5. Конструкция асинхронного двигателя: 1-станина; 2-сердечник ротора; 3 — сердечник статора; 4 — обмотка ротора; 5 — щеточный аппарат; 6 — подшипниковые щиты; 7 — контактные кольца; 8 — крыльчатка вентилятора; 9 — подшипники; 10 — вал; 11 — обмотка статора

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозионных материалов с техническими данными машины.

Статор синхронной машины состоит из **сердечника** и **обмотки** и впрессовывается в станину. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы, в которые затем укладывают обмотку. Магнитопровод асинхронного двигателя набирают из листовой электротехнической стали марки 2214. Таким образом, сердечник статора служит для проведения и усиления магнитного потока.

Обмотка статора предназначена для создания вращающегося магнитного поля и укладывается в пазы сердечника статора. Обмотки статоров с высотой

оси вращения 56–250 мм выполняют из круглого провода; с высотой оси вращения 280–355 мм — из жестких катушечных групп. Марки обмоточного провода ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) — провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М — для механизированной укладки). Для изготовления станины и подшипниковых щитов используют алюминий и его сплавы, сталь, чугун.

Роторы асинхронных двигателей бывают двух видов: с короткозамкнутой и фазной обмотками. В зависимости от этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с короткозамкнутым и фазным ротором.

Сердечник ротора выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштамповываются пазы для обмотки и отверстия для вала. В фазных роторах в пазы укладывают **обмотку**, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на которые накладывают щетки. При таком исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены короткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминия А5 или алюминиевых сплавов АКМ12-4. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

Контактные кольца предназначены для присоединения пускового или регулировочного реостата. Контактные кольца применяют в асинхронных двигателях с фазным ротором. Контактные кольца располагают на валу, обычно за подшипниковым щитом, и заключают их в коробку. Контактные кольца медные или латунные у машин мощностью до 100 кВт и стальные или чугунные в машинах большей мощности. Наружный диаметр контактных колец принимают меньше наружного диаметра подшипника качения для того, чтобы коробка контактных колец и подшипниковый щит машины могли быть при разборке сняты без предварительного съема контактных колец с вала.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Δ/Y , номинальное напряжение 220/380 В.

3. Методика выполнения работы.

3.1. Изучить теоретические положения методического указания к лабораторной работе.

3.2. Составить конструктивную схему изучаемого образца асинхронного электродвигателя и указать позиционные обозначения основных узлов машины.

3.3. Записать паспортные данные образца АД.

3.4. Разобрать электродвигатель.

3.5. Определить количество, применяемые материалы и назначение отдельных узлов машины. Данные внести в таблицу.

3.6. Собрать электродвигатель и сдать рабочее место лаборанту.

3.7. Составить отчет и сдать преподавателю.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Произвести внешний осмотр электродвигателя: определить тип электродвигателя (с короткозамкнутым или фазным ротором) и наметить порядок разборки.

4.2. Открыть клеммную коробку на двигателе и определить схему соединения обмоток статора.

4.3. Составить конструктивную схему машины и расписать соответствующие позиционные обозначения.

4.4. Изучить и записать в рабочую тетрадь паспортные данные электродвигателя.

4.5. Разобрать электродвигатель, осмотреть взаимное расположение основных узлов и определить их назначение и материалы, применяемые при их изготовлении.

4.6. Определить способ охлаждения внутренних и наружных частей электродвигателя.

4.7. Осмотреть подшипниковые щиты, определить, где передний, а где задний щит. Описать их назначение.

4.8. Для двигателей с фазным ротором изучить назначение и применяемые материалы для щеточного аппарата и контактных колец.

4.9. Составить отчет и сдать преподавателю.

4.10. Собрать электродвигатель и сдать инструмент лаборанту.

4.11. Сделать выводы по проделанной работе. В выводе отразить основные конструктивные отличия, преимущества и недостатки двигателей с короткозамкнутым ротором по сравнению с двигателями с фазным ротором.

5. Контрольные вопросы

5.1. Какие машины называются асинхронными?

5.2. Объяснить область применения асинхронных машин.

5.3. Объяснить рабочий процесс асинхронного электродвигателя на основе законов электромагнитной индукции и закона Ампера.

5.4. Объяснить, почему частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля статора.

5.5. Объяснить понятие и привести аналитическое выражение скольжения.

5.6. Объяснить назначение, устройство и применяемые материалы статора асинхронного электродвигателя.

5.7. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с короткозамкнутым ротором.

5.8. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с фазным ротором.

5.9. Объяснить понятие «единая серия» и описать существующие единые серии асинхронных электродвигателей.

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

1. Цель работы: изучить конструкции и принцип действия трехфазных синхронных машин, устройство отдельных узлов и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми при изготовлении синхронных машин.

2. Основные положения.

Бесколлекторную машину переменного тока, у которой частота вращения ротора n_1 равна частоте вращения магнитного поля статора n_2 , называют синхронной машиной.

Синхронная машина может работать в качестве автономного генератора, питающего подключенную к нему нагрузку, а также может подключаться параллельно к сети, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью синхронная машина может отдавать или потреблять энергию, т. е. работать генератором или двигателем. Наибольшее распространение машины получили в качестве генераторов электрической энергии. Практически вся используемая электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, устанавливаемыми на электрических тепло- и гидроэлектростанциях, а также на стационарных и передвижных дизельных электростанциях небольшой мощности, эксплуатируемых в сельском хозяйстве в качестве резервных источников энергии.

Принцип действия синхронной машины основан на явлении электромагнитной индукции и взаимодействии магнитного поля с электрическим током.

2.1. Рабочий процесс синхронного двигателя.

Синхронный двигатель — синхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую.

Рабочий процесс можно разбить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». На обмотку возбуждения ротора подается постоянный ток. Создается магнитный поток ротора.

2 — «подведение первичной энергии». К трехфазной обмотке статора подводится трехфазный переменный ток и создается вращающееся электромагнитное поле. Также ротор-индуктор раскручивается первичным двигателем в сторону вращения трехфазного вращающегося поля.

Синхронный двигатель не может запуститься самостоятельно, поскольку вращающееся трехфазное электромагнитное поле, созданное обмоткой якоря,

не в состоянии увлечь за собой ротор, обладающий значительным моментом инерции. На роторе отсутствуют замкнутые обмотки (как в асинхронном двигателе), токи которых через созданное ими магнитное поле создают вращающий момент. При разгоне индуктора (от постороннего двигателя или раскручивания вручную) двигатель может разогнаться до подсинхронной частоты вращения с последующим втягиванием в синхронизм.

3 — «преобразование энергии». Магнитное поле ротора и трехфазное вращающееся электромагнитное поле сцепляются упругой синхронизирующей связью. Возникает электромагнитный синхронный момент. Ротор вращается синхронно с вращающимся магнитным полем статора.

4 — «передача энергии нагрузке». Нагрузка создает тормозной момент и для его компенсации двигатель из сети потребляет дополнительную мощность. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в механическую.

Частота вращения двигателя прямо пропорциональна частоте f питающего напряжения и обратно пропорциональна числу пар $2p$ полюсов, т. е. $n = f/2p$.

Регулирование частоты вращения СД возможно только путем изменения частоты напряжения переменного тока, поскольку частота вращения двигателя.

2.2. Рабочий процесс синхронного генератора.

Синхронный генератор — синхронная машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую.

Наиболее распространенным вариантом конструктивного исполнения СГ является конструкция с полюсами, установленными на валу ротора. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока с помощью двух контактных колец со щетками. При вращении индуктора в рабочем воздушном зазоре СГ возникает вращающееся электромагнитное поле, которое наводит ЭДС в обмотке якоря (статора). Частота напряжения в обмотке якоря прямо пропорциональна частоте вращения n ротора и числу пар $2p$ полюсов индуктора, т. е. $f = n/2p$.

Рабочий процесс можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». Создание магнитного потока ротора. Обмотка возбуждения ротора подключается к источнику постоянного напряжения. По обмотке потечет ток, который создает магнитный поток ротора. Этот поток замыкается через воздушный зазор и статор.

2 — «подведение первичной энергии». К валу генератора присоединяется первичный двигатель (двигатель внутреннего сгорания, паротурбина). Ротор приводится во вращение с требуемой частотой.

3 — «преобразование энергии». Вращающееся поле ротора пересекает обмотки статора. По закону электромагнитной индукции в проводниках обмотки

статора индуцируется ЭДС. На статоре имеются 3 обмотки, сдвинутые на 120 электрических градусов. Т. е. на выходе генератора получается трехфазная система токов.

4 — «передача энергии нагрузке». К зажимам обмотки статора подключают трехфазную электрическую нагрузку. Под действием напряжения по обмотке статора протекает ток, который создает магнитный поток статора — поток реакции якоря. Этот поток вызывает тормозной электромагнитный момент и стремится снизить частоту вращения ротора. Первичный двигатель для восстановления вращения вынужден отдавать большую мощность генератору. Тем самым механическая энергия преобразуется в электрическую и передается нагрузке.

Регулирование напряжения на обмотке якоря СГ осуществляется путем изменения тока возбуждения, поскольку изменение частоты вращения ротора приведет к одновременному изменению частоты входного напряжения СГ.

Ток нагрузки создает в обмотке якоря СГ дополнительное вращающееся электромагнитное поле, имеющее те же направления и частоту вращения, что и основное поле возбуждения, т. е. оба поля вращаются синхронно. При работе в автономном режиме выходное напряжение СГ зависит от значения и характера (емкостный, индуктивный, активный) нагрузки. При подключении к обмотке якоря СГ нагрузке активного и индуктивного характера увеличение тока нагрузки сопровождается снижением выходного напряжения. Нагрузка емкостного характера приводит к увеличению входного напряжения СГ.

В синхронном генераторе генератор приводится во вращение первичным двигателем с частотой вращения n_2 . При этом магнитный поток полюсов ротора (магнитный поток возбуждения) пересекает фазные обмотки статора и индуцирует в них ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Форма индуцируемой ЭДС определяется формой магнитного потока, поэтому стремятся, чтобы под полюсом магнитный поток имел распределение близкое по форме к синусоиде.

Действующее значение ЭДС определяется:

$$E = 4,44 K_0 W_a \Phi_0 \frac{pn_2}{60} \quad (2)$$

где K_0 — обмоточный коэффициент обмотки якоря (статора), учитывающий распределение обмотки по пазам статора и укорочение шага; W_a — число вит-

ков обмотки якоря; Φ_0 — магнитный поток возбуждения; p — число пар полюсов.

В двухполюсном генераторе за один оборот ротора происходит полный период изменения ЭДС. Поэтому частота f_1 индуктированной в обмотке статора ЭДС:

$$f_1 = n_2 / 60, \quad (3)$$

где n_2 — частота вращения ротора, мин^{-1} .

Если в генераторе p пар полюсов, то за один оборот ротора в фазных обмотках будет индуцироваться p периодов ЭДС. Следовательно, частота ЭДС будет увеличиваться до значения:

$$f_1 = pn_2 / 60. \quad (4)$$

Поскольку фазные обмотки статора размещены в пространстве со сдвигом 120 электрических градусов (в общем случае со сдвигом $120/p$), то ЭДС в фазных обмотках будут сдвинуты во времени одна относительно другой на 120 электрических градусов. Таким образом, в обмотках статора индуцируется трехфазная система ЭДС.

Если к выводам обмотки статора подключить нагрузку, то проходящий по фазным обмоткам трехфазный ток создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого зависит от частоты тока и числа пар полюсов обмотки, т. е.

$$n_1 = 60f_1 / p. \quad (5)$$

С учетом выражения (4) равенство (5) примет вид:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60pn_2}{p60} = n_2. \quad (6)$$

Следовательно, магнитное поле статора вращается с той же частотой, что и ротор.

При работе синхронного генератора под нагрузкой, вращающееся магнитное поле якоря взаимодействует с током I_e обмотки якоря возбуждения, создавая тормозной электромагнитный момент, который преодолевается первичным двигателем. При этом между магнитным потоком возбуждения Φ_0 и магнитным потоком якоря Φ_a возникает угловое рассогласование в виде угла θ . Чем больше активная электрическая мощность, отдаваемая обмоткой якоря нагрузке, тем больше угол θ и тем большую механическую мощность надо затрачивать на вращение ротора.

2.3. Конструкции синхронных машин.

К основным частям синхронной машины относят станину, неподвижный статор, вращающийся ротор.

Станина предназначена для крепления всех основных узлов машины. Станины машин переменного тока в основном изготавливают чугунами; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозионной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. Наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозионных материалов с техническими данными машины.

Статор синхронной машины состоит из **сердечника** и **обмотки** и впрессовывается в станину. **Сердечник статора** предназначен для проведения и усиления магнитного потока. В синхронных машинах нормального исполнения на статоре размещена **обмотка якоря**, где индуктируется ЭДС. Конструктивно статор состоит из корпуса, в который встроен полый цилиндрический сердечник (магнитопровод) набираемый из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. У мощных машин с большими габаритными размерами листы сердечника собирают из различных сегментов. В осевом направлении сердечник может состоять из пакетов стали, разделенных вентиляционными каналами. Для удобства монтажа и транспортировки корпус статора выполняют разборным. В прямоугольных пазах сердечника размещена трехфазная обмотка, выполняемая так же, как и у асинхронных двигателей. В синхронных машинах применяется в основном двухслойная обмотка с укороченным шагом. Обмотку изготавливают из круглого медного провода в виде катушек.

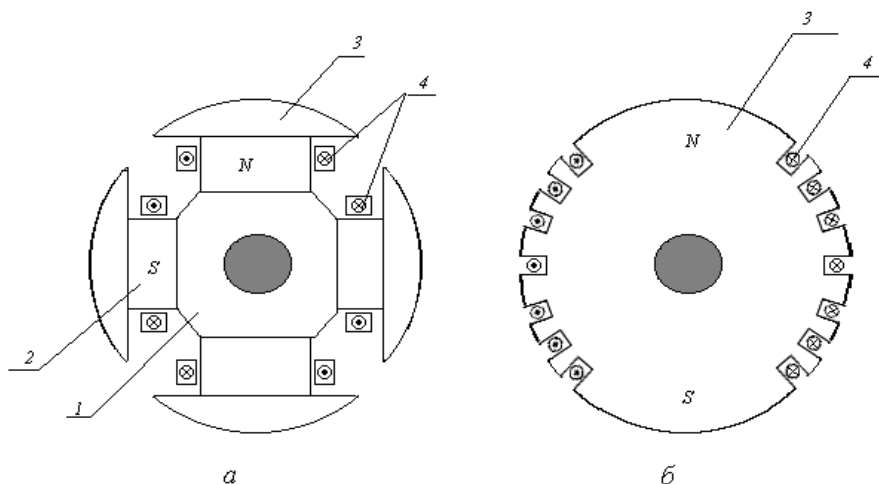


Рис. 6. Схемы роторов а — явно; б — неявнополюсного: 1 — остов (обод); 2 — сердечник; 3 — полюсный наконечник; 4 — обмотка возбуждения.

В зависимости от конструкции ротора различают явно — и неявнополюсные синхронные машины (рис. 6). Конструктивное исполнение ротора обусловлено частотой его вращения, которая определяется типом первичного двигателя. В качестве приводного двигателя применяют гидравлические, паровые и газовые турбины, а так же двигатели внутреннего сгорания. В зависимости от этого синхронные генераторы называют соответственно гидро-, турбо- и дизель-генераторами.

Устройство синхронного генератора показано на рисунке. Явнополюсную конструкцию ротора применяют в тихоходных машинах, к которым относятся гидрогенераторы и дизель — генераторы. При частотах вращения ротора 1000 мин^{-1} и ниже использование явно выраженных полюсов допустимо с точки зрения механической прочности, и в то же время такая конструкция ротора в значительной мере облегчает выполнение обмотки возбуждения.

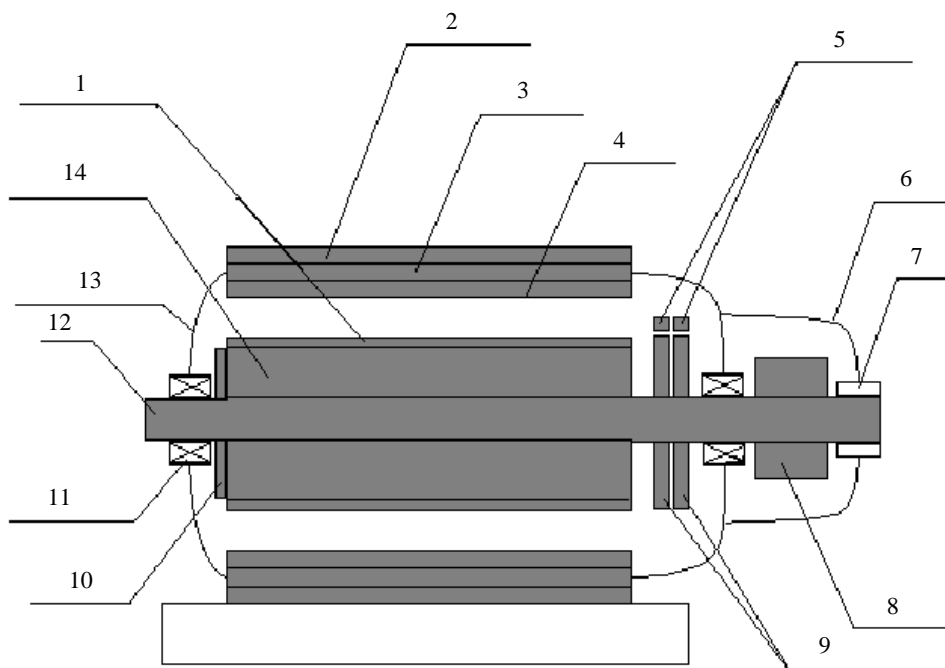


Рис. 7. Конструктивная схема синхронной машины: 1 — обмотка возбуждения ротора; 2 — станина; 3 — сердечник статора; 5 — щеточный аппарат; 6 — кожух; 7 — втулка; 8 — возбудитель; 9 — контактные кольца; 10 — крыльчатка вентилятора; 11 — подшипники; 12 — вал; 13 — подшипниковые щиты; 14 — сердечник ротора — полюса.

Ротор имеет явно выраженные полюсы и состоит из **остова 1, сердечников 2 с полюсными наконечниками 3** и катушек с **обмоткой возбуждения 4**. **Остов** ротора выполняют литым или набирают из листов стали и стягивают осевыми шпильками. **Сердечники полюсов** также собирают из штампованных стальных листов и прикрепляют к остову ротора Т — образными хвостиками или посредством шпилек. На сердечниках размещают катушки **обмотки возбуждения**, которые закрепляют с помощью полюсных наконечников. Обмотка возбуждения ротора состоит из отдельных катушек, намотанных из прямоугольных медиизолированных (в меньших машинах) или неизолированных, гнутых на ребро (в больших машинах) проводах. Выводы обмотки ротора пропускают через полый конец вала и соединяют с контактными кольцами.

Полюсные наконечники изготовлены из листовой стали и снабжены пазами, в которых размещают стержни демпферной (успокоительной) обмотки типа беличья клетка, замкнутые с двух сторон сегментами или пальцами. На оси ротора устанавливают стальные контактные кольца с внешней шлифованной поверхностью, к которым присоединяют выводы обмотки.

Мощность гидрогенераторов достигает 640 МВА, а частота вращения не превышает 500 мин^{-1} , поэтому они имеют на роторе большое число полюсов. Например, гидрогенератор Братской ГЭС мощностью $S_{\text{ном.}} = 225 \text{ МВА}$ имеет ча-

стоту вращения $n_c = 125 \text{ мин}^{-1}$ и, следовательно, число пар полюсов на роторе $p = 60f_1 / n_2 = 60 \times 50 / 125 = 24$.

Гидрогенераторы выполняют с вертикальным и горизонтальным расположением вала ротора. Диаметр ротора значительно больше длины ($D \leq 16 \text{ м}$, $L \leq 1,75 \text{ м}$).

Неявнополюсную конструкцию ротора используют в быстроходных машинах, к которым относят турбогенераторы (с частотой вращения 1500 и 3000 мин^{-1}). Турбогенераторы выполняют с горизонтальным расположением вала ротора, который имеет диаметр 1–5 м при длине не более 7,5—8,5 м. Ротор представляет собой цельную цилиндрическую поковку из высококачественной стали с хорошими магнитными и механическими свойствами, имеет утолщенную часть (бочку) и концы вала. На поверхности бочки фрезеруют пазы, в которых размещают обмотку возбуждения и укрепляют немагнитными клиньями (рис 19.3, б стр. 200). Обмотка занимает 2/3 поверхности ротора. При этом образуются большие зубцы магнитопровода (полюсы). Лобовые соединения обмотки возбуждения стягивают бандажными кольцами из немагнитной стали.

В мощных гидро- и турбогенераторах применяют охлаждение статора и ротора. В качестве охлаждающей среды используют воздух, водород, минеральное масло и воду.

Системы возбуждения бывают двух типов: независимого возбуждения и самовозбуждения.

При независимом возбуждении обмотка ротора запитывается от генератора постоянного тока, называемого возбудителем, мощность которого составляет 0,3–3 % номинальной мощности синхронной машины. Возбудитель может быть непосредственно соединен с валом ротора синхронной машины или с помощью клиноременной передачи. Возможно, также возбуждение от отдельно установленного генератора постоянного тока, приводимого во вращение асинхронным или синхронным двигателем с питанием от независимого источника напряжения.

В генераторах серии ЕСС5 в пазах статора кроме основной обмотки размещают дополнительную трехфазную обмотку, от которой через встроенный выпрямитель осуществляется питание обмотки возбуждения. Последовательно с трехфазной обмоткой включены реостаты для регулирования тока возбуждения. Начальное возбуждение генератора обеспечивается за счет кратковременного питания обмотки возбуждения от аккумуляторной батареи.

В генераторах большой мощности применяют бесщеточную систему возбуждения. В качестве возбудителя используют синхронный генератор обра-

щенного исполнения, у которого обмотка якоря размещена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре. Выводы трехфазной обмотки якоря возбуждителя через встроенный выпрямитель соединяют непосредственно с обмоткой возбуждения генератора. Обмотка возбуждения возбуждителя питается от подвозбудителя — генератора постоянного тока.

Принципиальная конструкция синхронного двигателя не отличается от синхронного генератора. Они изготавливаются преимущественно, как явно полюсные; в неявнополюсном исполнении они встречаются относительно редко. Изготавливают на все стандартные напряжения и для скоростей вращения от 1000 до 125 об/мин, однако, конструкция двигателей имеет ряд особенностей:

- 1) синхронный двигатель имеет меньший воздушный зазор, чем синхронный генератор, что способствует уменьшению пусковых токов;
- 2) пусковую обмотку выполняют стержнями большего сечения;
- 3) ширину полюсного наконечника принимают равной $0,9\tau$ вместо $0,8\tau$ в генераторах.

2.4. Способы пуска СД.

Пуск СД нельзя осуществить непосредственным включением в сеть в связи с большой инерцией ротора, которую не может преодолеть вращающееся поле статора. Для пуска СД применяются два способа:

- пуск посредством вспомогательного двигателя;
- асинхронный.

В первом случае ротор возбужденного двигателя разгоняют до синхронной частоты вращения, при этом машина работает в режиме генератора. С помощью синхронизирующего устройства добиваются синхронности вращения ротора с полем статора, после чего обмотка статора подключается к сети. При этом магнитные поля ротора и статора сцепляются упругой магнитной связью, и ротор вращается с синхронной частотой вращения. В качестве пускового двигателя обычно используют асинхронный двигатель с фазным ротором с числом полюсов на два меньше, чем число полюсов у синхронного двигателя.

Асинхронный пуск возможен при наличии в полюсных наконечниках ротора пусковой обмотки. Она аналогична успокоительной обмотке синхронного генератора. Обмотку статора подключают к сети, и процесс запуска осуществляется аналогично запуску асинхронного двигателя. После разгона до частоты вращения близкой к синхронной обмотку возбуждения ротора подключают к источнику постоянного тока. Образующийся при этом синхронный момент втягивает ротор двигателя в синхронизм. После пуска пусковая обмотка выполняет функцию успокоительной обмотки, ограничивая качания ротора.

Синхронные двигатели широко применяются для привода мощных насосов, вентиляторов, компрессоров и компенсаторов. Для автоматизации производства, автономных установок электроснабжения, авиационном и автомобильном транспорте и других объектах применяют синхронные машины малой мощности.

3. Методика выполнения работы.

3.1. Определить тип электрической машины, установленной на стенде для выполнения лабораторной работы.

3.2. Изучить общую конструкцию машины. Определить название деталей и их назначение.

3.3. Изучить принцип работы машины, назначение отдельных узлов и деталей в электромагнитном преобразовании энергии.

3.4. Составить общую конструктивную схему машины с обозначением названий узлов и деталей.

3.5. Записать паспортные данные машины.

3.6. Определить материалы, из которых изготовлены основные узлы и детали машины: станина, подшипниковые щиты, вал ротора, сердечник статора, сердечник полюса ротора, обмотка возбуждения, контактные кольца, щетки.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Произвести внешний осмотр машины.

4.2. Составить конструктивную схему, с указанием и расшифровкой позиционных обозначений основных узлов и деталей.

4.4. Произвести запись паспортных данных.

4.5. Разобрать машину, описать взаимное расположение узлов и деталей.

4.6. Данные по работе оформить в виде отчета.

5. Контрольные вопросы.

5.1. Объяснить рабочий процесс синхронного генератора.

5.2. Объяснить рабочий процесс синхронного двигателя.

5.3. Описать область применения синхронных машин.

5.4. Объяснить происхождение названия «гидрогенератор», «турбогенератор».

5.5. Объяснить конструкции роторов гидрогенераторов и турбогенераторов.

5.6. Объяснить, почему явно полюсные генераторы выполняют с большим числом полюсов.

5.7. Объяснить, почему у быстроходных синхронных машин ротор выполняют неявнополюсным.

- 5.8. Объяснить способы возбуждения синхронных машин.
- 5.9. Объяснить способы пуска синхронных двигателей.
- 5.10. Объяснить связь частоты вращения ротора генератора с частотой индуцируемой ЭДС.
- 5.11. Объяснить факторы, влияющие на величину индуцируемой ЭДС.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы: получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки однослойных концентрических обмоток.

2. Основные понятия.

Обмотка является важнейшей частью электрической машины. У асинхронных двигателей имеются 2 обмотки — статора и ротора. В данной работе рассматриваются только обмотки статора.

Достоинством однослойных обмоток является:

- простота изготовления;
- более высокий коэффициент заполнения паза медью (по сравнению с двухслойными);
- меньший расход материала.

Недостатком этих обмоток является то, что кривые магнитодвижущих сил содержат большой спектр высших гармоник, наибольшие по амплитуде из которых пятая и седьмая, что отрицательно сказывается на пусковых характеристиках двигателя. Недостатком концентрических обмоток является необходимость изготовления катушек различным шагом на различных шаблонах.

Обмотка статора предназначена для создания в воздушном зазоре статора вращающегося магнитного потока. Рабочий процесс асинхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного потока статора с ротором.

2.1. Двухфазное вращающееся магнитное поле.

Условия создания вращающегося магнитного поля для двухфазной системы токов:

2.1.1. условия, которым должны отвечать токи (напряжения):

- а) токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;
- б) сдвиг фаз токов во времени должен составлять 90 эл. гр.

2.1.2. условия, которым должны отвечать обмотки:

а) обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;

б) начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 90 эл. гр.

в) геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

2.1.3. элементы обмотки статора.

Обмоткой статора называется система изолированных проводников, в определенном порядке уложенных в пазы статора и определенным образом соединенных между собой в электрическую цепь. Основными элементами обмотки являются:

— проводник — отрезок изолированного провода, расположенный в магнитном поле машины;

— виток — два проводника, соединенных последовательно и расположенных под разноименными полюсами машины;

— секция (катушка) — один или несколько витков, соединенных между собой последовательно. Секция состоит из двух активных сторон и двух лобовых частей. Активные стороны — это те части секций, которые лежат в пазах статора. Лобовые части соединяют между собой активные стороны секций, они выходят за пределы статора;

— катушечная группа — это одна или несколько секций, соединенных последовательно (или параллельно) и занимающая на статоре две фазные зоны;

— фазная зона — участок статора, на котором расположены стороны секций обмотки катушечной группы одной фазы одного полюса;

— фаза обмотки — одна или несколько катушечных групп, соединенных последовательно или параллельно и участвующих в создании магнитного потока одной фазы.

2.3. Классификация обмоток.

2.3.1. По конструктивному исполнению: катушечные и стержневые.

Катушечные обмотки изготавливаются из провода круглого сечения диаметром до 3 мм в виде многовитковых катушек. Катушки получают мягкими, они укладываются в пазы статора путем проталкивания (всыпания) по одному проводнику в паз.

Стержневые обмотки выполняются из медных стержней прямоугольного сечения размера сторон до 30 мм.

2.3.2. По числу слоев в пазу: однослойные и многослойные.

Однослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в пазу располагается одна активная сторона секции.

Многослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в одном пазу статора располагается две и более активных стороны секции.

2.3.3. По технологии укладки: насыпные и впротяжку.

2.3.4. По типу катушек однослойные обмотки делятся:

— концентрические (каждая последующая секция входит внутрь предыдущей);

— шаблонные (секции одинаковых размеров, выполненные в форме трапеции; одна активная сторона секции больше второй);

— цепные.

Концентрические обмотки в свою очередь на:

— двухплоскостные;

— трехплоскостные;

— «вразвалку».

Шаблонные делятся на:

— простые шаблонные;

— цепные шаблонные;

— «вразвалку».

2.4. Общие требования, предъявляемые к обмоткам машин переменного тока.

Обмотка должна обеспечивать заданные значения магнитного потока и ЭДС при минимальном расходе проводникового материала.

Обмотка должна обладать достаточной электрической, механической и термической прочностью, необходимой для обеспечения срока службы электродвигателя не менее 20 лет.

Обмотка должна быть технологична в изготовлении и легко поддаваться ремонту.

Обмотка должна обеспечивать форму индуктируемых ЭДС и НС, близкой к синусоидальной.

2.5. Параметры однослойных обмоток.

Полюсное деление — τ . Это число пазов статора, приходящихся на один полюс

$$\tau = z/2p \text{ [пазов].}$$

Число пазов на полюс и фазу — q $q = z/2pm$, где m — число фаз.

Шаг обмотки — y . Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции.

$$y_N = 2(q + N) - 1,$$

где N — номер секции в катушечной группе.

Так как секции концентрической обмотки имеют различные размеры, то и шагов будет несколько. Количество секций в катушечной группе равно q , следовательно, и число частичных шагов равно q .

Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в электрических градусах — α

$$\alpha = p \cdot 360 / z.$$

2.6. Правила составления схемы однослойной обмотки.

1) Число катушечных групп в каждой фазе n равно числу пар полюсов p : $n = p$.

2) Начала соседних катушечных групп одной фазы смещены на 360 электрических градусов или на 2 полюсных деления.

3) Число секций в каждой катушечной группе s равно числу пазов на полюс и фазу q : $s = q$.

4) Начала обмоток соседних фаз смещены на 120 электрических градусов.

5) Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяются с началом последующей.

2.7. Методика укладки однослойной двухплоскостной обмотки на статоре.

В соответствии с правилами составления схем обмоток число катушечных групп в каждой фазе равно p , соответственно во всей обмотке — $3p$. Причем половина катушечных групп в каждой фазе (а следовательно и во всей обмотке) будет иметь малые размеры, а половина — большие.

В свою очередь, каждая катушечная группа и большого, и малого размера состоит из нескольких секций, концентрически входящих друг в друга.

1. Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп каждого размера.

2. Затем определить начало и конец каждой катушечной группы. При этом нужно строго следить за тем, чтобы направление намотки всех секций было неизменным.

3. Промаркировать пазы статора, выбрав первый паз произвольно.

4. Укладку обмотки следует начинать с укладки всех катушечных групп малого размера.

5. Затем укладываются катушечные группы большого размера. Лобовые части секций отгибаются к спинке статора. Они не должны попадать в расточку статора.

6. Производится соединение катушечных групп одной фазы в соответствии со схемой-таблицей. Начала и концы фаз маркируются бирками.

7. По заданию руководителя, обмотки фаз соединяются по схеме «звезда» или «треугольник».

3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство однослойной двухплоскостной обмотки;
- изучить расчет параметров и способы построения схем-разверток обмоток;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки;
- рассчитать параметры и построить схему-развертку однослойной двухплоскостной обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку однослойной двухплоскостной обмотки на статор.

4. Порядок выполнения работы:

- получить исходные данные для расчета обмотки;
- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы;
- составить схему-развертку трехфазной обмотки;
- на схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- уложить обмотку на статоре;
- оформить отчет и сдать руководителю занятия.

5. Обработка результатов.

Пример выполнения и оформления отчета по лабораторной работе.

Исходные данные:

число пазов $z=12$;

число полюсов $2p=4$;

число фаз $m=3$;

тип обмотки — однослойная концентрическая.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;

- вычертить «звезду» пазовых ЭДС;
- уложить обмотку на статоре.

Расчет параметров обмотки.

1. Полусное деление

$$T = z/2p = 12/4 = 3 \text{ паз.}$$

2. Число пазов на полюс и фазу

$$q = z/2pm = 12/12 = 1 \text{ паз.}$$

3. Шаг обмотки

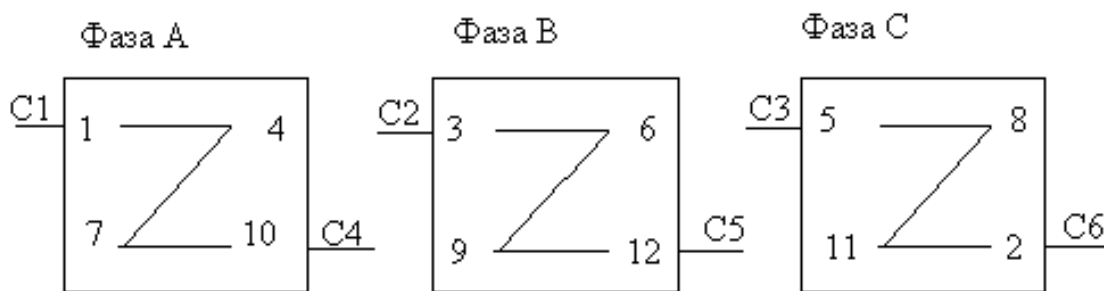
$$y = 2(q + N) - 1 = 2(1 + 1) - 1 = 3 \text{ паз.}$$

4. Угол сдвига пазовых ЭДС

$$a = 360p/z = 360 \times 2/12 = 60 \text{ эл. гр.}$$

Составление схемы-таблицы обмотки.

В соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу:



Вычертить схему-развертку.

В соответствии со схемой — таблицей вычерчиваем развернутую схему обмотки. Указываем на ней направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей — от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образует магнитный полюс. Можно условно принять, что направление тока вверх соответствует северному полюсу, а вниз — южному.

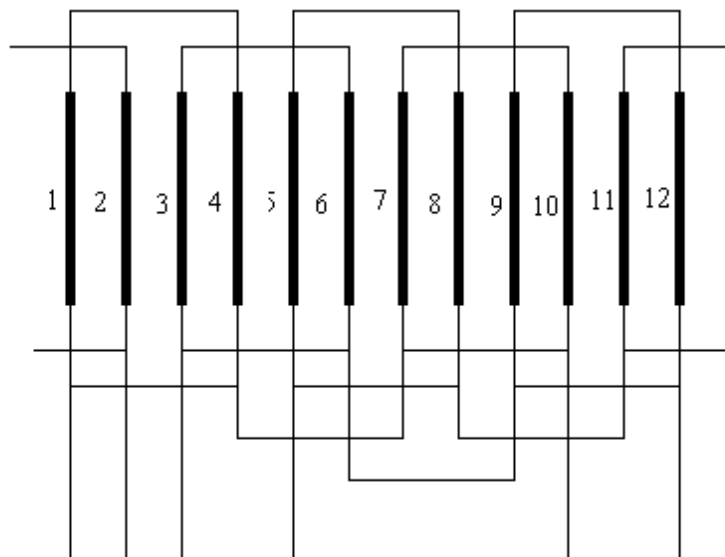


Рис. 8. Схема-развертка однослойной концентрической обмотки.

Сделать выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в двухфазной обмотке.
- 6.2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.
- 6.3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.
- 6.4. Описать преимущества и недостатки однослойных обмоток.
- 6.5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).
- 6.6. Описать параметры однослойной обмотки.
- 6.7. Описать правила построения однослойных концентрических обмоток.
- 6.8. Объяснить методику укладки однослойной двухплоскостной обмотки на статоре.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы: получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки двухслойных концентрических обмоток.

2. Основные понятия.

Обмотки статоров двигателей с высотой оси вращения 56–250 мм выполняются всыпными из круглого провода; с высотой оси вращения 280–355 мм —

из жестких катушечных групп (из провода прямоугольного сечения). Марка обмоточного провода ПЭТ — 155 (табл. 1).

Катушки после укладки в пазы сердечников закрепляют пазовыми клиньями из стеклотекстолита и пропитывают компаундом. Лобовые части катушечных групп бандажируют изоляционным чулком из стекловолокна и покрывают лаком.

Основное внимание при проектировании двигателей серии АИ было уделено повышению их надежности, которая достигнута за счет применения материалов класса нагревостойкости F при допустимом перегреве обмоток, соответствующем классу нагревостойкости B.

Таблица 1

Наименование	Примечание
ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) — провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М — для механизированной укладки)	Обмоточный провод
ПСК (ПСК-М) — пленкосинтокартон	
Аривсан — полиэтилентерефталатная пленка, оклеенная с двух сторон полиарелатной пленкой	Пазовая изоляция
КП-50, КП-34 — смесь полиэфиров, отвержденных пастой перекиси бензолина	То же
ТКСП — трубки изоляционные (кремнийорганическая резина в оплетке из стеклошнур-чулка)	Пропиточные компаунды
ПВКФ — провод выводной с изоляцией из кремний-органической резины во фторсилоксиновой оболочке	Выводные провода и изоляционные трубки
РКГМ — провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины в оплетке из стекловолокна	То же
Сталь 2214 холоднокатаная электротехническая	То же
	Сталь магнитопровода

Класс нагревостойкости изоляционных материалов в соответствии с ГОСТ 8865 определяется максимальной допустимой температурой. Предельно-допустимое превышение температуры обмотки получается путем вычитания из температурного индекса изоляции (табл. 2) номинальной температуры окружающей среды, значение которой для умеренного климата принято 40 °С.

Нагревостойкость изоляционных материалов

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс материала, °С	Максимальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки, °С	Максимально допустимое превышение средней температуры обмотки, измеренное по методу сопротивления, °С
Е	120	80	75
В	130	90	80
F	155	115	100
Н	180	140	125

2.1 Трехфазное вращающееся магнитное поле.

Условия создания вращающегося магнитного поля для трехфазной системы токов

2.1.1. Условия, которым должны отвечать токи (напряжения):

а) токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;

б) сдвиг фаз токов во времени должен составлять 120 эл. гр.

2.1.2. Условия, которым должны отвечать обмотки:

а) обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;

б) начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 120 эл. гр.

в) геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

2.2. Параметры двухслойных обмоток

2.2.1. Полусное деление — τ . Это число пазов статора, приходящихся на один полюс

$$\tau = z/2p \text{ [пазов].}$$

2.2.2. Число пазов на полюс и фазу — q

$$q = z/2 pm,$$

где m — число фаз.

2.2.3. Шаг обмотки — y . Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции

$$y = z/2p.$$

2.2.4. Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в электрических градусах — α

$$\alpha = p 360/z.$$

2.3. Правила составления схемы двухслойной обмотки

1) Число катушечных групп в каждой фазе n равно числу полюсов p : $n = 2p$.

2) Начала соседних катушечных групп одной фазы смещены на 180 электрических градусов или на 1 полюсное деление.

3) Число секций в каждой катушечной группе s равно числу пазов на полюс и фазу q : $s=q$.

4) Начала обмоток соседних фаз смещены на 120 электрических градусов.

5) Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяются с концом последующей, начало предыдущей секции соединяется с началом последующей.

2.3. Методика укладки двухслойной обмотки статора.

Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп, промаркировать концы и начала катушечных групп и проверить направление намотки секций. Оно должно быть одинаковым у всех секций.

Укладку обмотки следует начинать с нижних слоев секций. В нашем примере первой укладывается нижняя активная сторона первой секции с номером 6'. Затем укладываются стороны секций с номерами 7', 8', 9', 10', 11', 12'. Активные стороны секции 1, 2, 3, 4, 5, которые должны лежать в верхнем слое, укладываются в пазы в последнюю очередь после укладки в эти пазы нижнего слоя. Начиная с 6-го паза, можно укладывать и первую, и вторую активные стороны секций, они автоматически будут ложиться на свое место в верхнем и нижнем слоях.

Завершая укладку обмотки, необходимо уложить нижние активные стороны секций 1', 2', 3', 4', 5', а затем на них уложить верхний слой — секции 1, 2, 3, 4, 5.

По окончании укладки соединить катушечные группы одной фазы в соответствии со схемой-таблицей.

По заданию руководителя соединить фазные обмотки по схеме «звезда» или «треугольник».

3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство двухслойной обмотки;
- изучить расчет параметров и способы построения схем—разверток обмоток;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки;
- рассчитать параметры и построить схему—развертку двухслойной обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку двухслойной обмотки на статор.

4. Порядок выполнения работы.

- 4.1. Получить исходные данные для расчета обмотки.
- 4.2. Рассчитать параметры обмотки.
- 4.3. Составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы.
- 4.4. Составить схему-развертку трехфазной обмотки.
- 4.5. На схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса.
- 4.6. Уложить обмотку на статоре.
- 4.7. Оформить отчет и сдать руководителю занятия.

5. Обработка результатов.

Пример выполнения лабораторной работы

Исходные данные:

число пазов $z=12$;

число полюсов $2p=2$;

число фаз $m=3$;

коэффициент укорочения $\beta=0,8$;

тип обмотки — двухслойная с укороченным шагом.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- уложить обмотку на статоре.

Расчет параметров обмотки

1. Полюсное деление

$$\tau = z/2p = 12/2 = 6 \text{ пазов.}$$

2. Число пазов на полюс и фазу

$$q = z/2pm = 12/6 = 2 \text{ паза.}$$

3. Шаг обмотки

$$y = \beta\tau = 0,8 \times 6 = 5 \text{ пазов.}$$

4. Угол сдвига пазовых ЭДС

$$\alpha = 360p/z = 360 \times 1/12 = 30 \text{ эл. гр.}$$

Составление схемы-таблицы обмотки

В соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу. При этом стороны секций, укладываемых в верхний слой,

обозначаем цифрой без индекса, а стороны секций, укладываемых в нижний слой, — цифрой с индексом.

При вычерчивании схемы-развертки следует учитывать следующие рекомендации.

Стороны секций, лежащих в верхнем слое, изображаются сплошной линией, расположенной слева от условного изображения паза, и нумеруются цифрой без индекса. А стороны секций, лежащих в нижнем слое, изображаются штриховой линией справа от линии условного изображения паза и нумеруются цифрой с индексом.

Указываем направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей — от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образуют магнитный полюс.

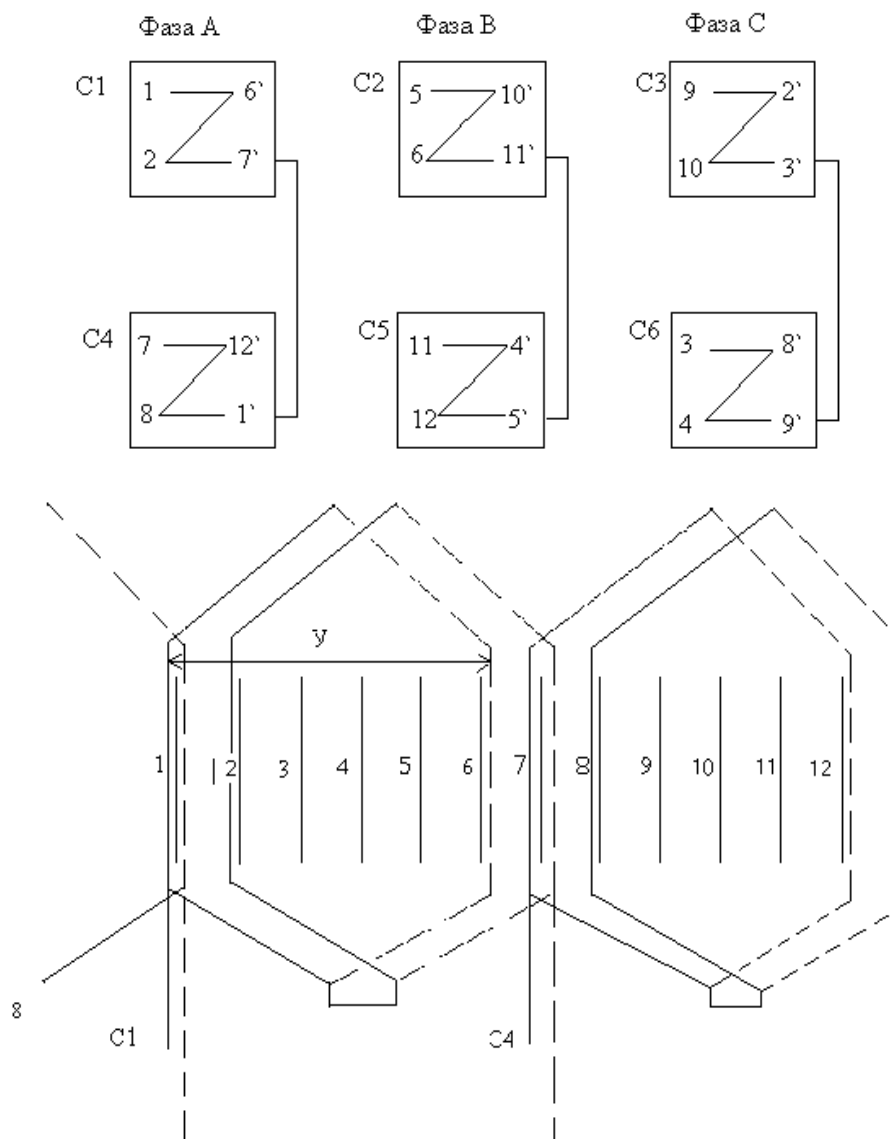


Рис. 9. Схема-таблица и схема-развертка одной фазы двухслойной обмотки

Можно условно принять, что направление тока «вверх» соответствуют северному полюсу, а «вниз» — южному.

Сделать выводы по работе.

6. Контрольные вопросы.

6.1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в трехфазной обмотке.

6.2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.

6.3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.

6.4. Описать преимущества и недостатки двухслойных обмоток.

6.5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).

6.6. Описать параметры двухслойной обмотки.

6.7. Описать правила построения двухслойных обмоток.

6.8. Объяснить методику укладки двухслойной обмотки на статоре.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОПРОВОДА И ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы: ознакомиться с конструкцией, электротехническими материалами магнитопроводов и обмоток трансформаторов.

2. Основные понятия.

Трансформатор состоит из 5 основных систем: магнитная система, электрическая система, механическая система, система охлаждения и система регулирования напряжения.

Магнитная система предназначена для проведения основного потока трансформатора, она состоит из магнитопровода.

Электрическая система предназначена для подведения первичного тока и напряжения к первичным обмоткам и снятия напряжения и тока со вторичных обмоток трансформатора. Она состоит из вводов и обмоток высокого и низкого напряжения продольной и главной изоляции (межслоевой и межобмоточной, изоляции, а также изоляции между магнитопроводом и обмотками).

Механическая система предназначена для крепления всех остальных систем и узлов трансформатора, она состоит из снятых балок, швекаров, крепежных шпилек и болтов и прочих механических элементов.

Система охлаждения предназначена для отведения тепла от магнитопровода и обмоток трансформатора, которое образуется при протекании по нему рабочего тока. Она состоит из бака, заполненного охлаждающей жидкостью и приспособлений для охлаждения этой жидкости.

Система регулирования напряжения предназначена для поддержания напряжения на заданном уровне (стабилизации) напряжения у потребителей при измерении нагрузки питающих и охлаждающих линий.

На рисунке 2 показано общее устройство трехфазного масляного трансформатора.

На стержнях 8 магнитопровода расположены обмотки низшего (9) и высшего (10) напряжения. Выводные изоляторы 2 и 3 (рис. 10) служат для проведения выводов обмоток сквозь крышку бака. Магнитная система с обмотками помещена в бак 12. Бак трансформатора и часть укрепленного на нем расширителя 7 заливают очищенным и высушенным трансформаторным маслом или специальной негорючей жидкостью. Воздух, имеющийся в верхней части расширителя, сообщается с окружающей средой через дренажную трубу. Через эту трубу в расширитель попадает окружающий воздух без капель влаги, если температура трансформатора уменьшается, и уровень масла понижается. При повышении температуры объем масла увеличивается, и часть воздуха из расширителя выходит в атмосферу.

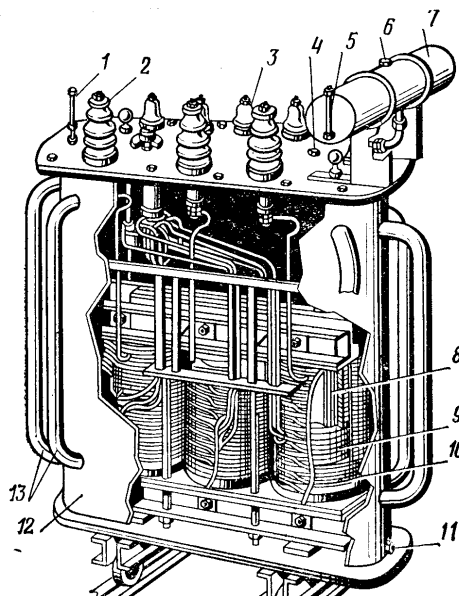


Рис. 10. Устройство трехфазного трансформатора средней мощности:

1 — термометр; 2 — выходы обмотки ВН; 3 — выходы обмотки НН; 4 и 6 — пробки для заливки масла; 5 — указатель уровня масла; 7 — расширитель; 8 — магнитопровод; 9 — обмотка НН; 10 — обмотка ВН; 11 — пробка для спуска масла; 12 — бак; 13 — трубы для охлаждения масла.

Для контроля уровня масла расширитель снабжен масломерным стеклом, против которого на днище расширителя нанесены деления, обозначающие нормальный уровень масла при различных его температурах и номинальной нагрузке трансформатора. Рядом с дренажной трубой имеется отстойник 4 для грязи и влаги.

2.1. Конструкция магнитопроводов трансформатора.

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки крепления обмоток. Магнитопровод набирают из тонких (0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей плёнкой. Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Существуют два основных типа конструкций магнитопроводов: стержневые и броневые (Рис. 11 и 12).

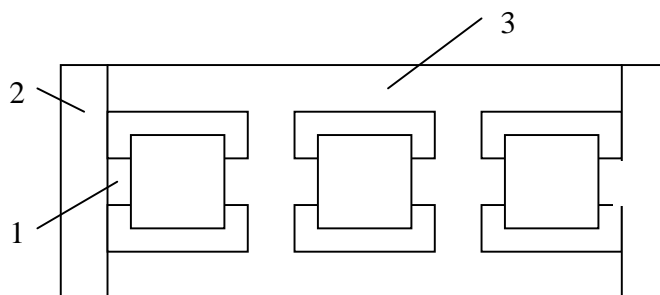


Рис. 11. Броневой магнитопровод трехфазного трансформатора:
1 — стержень; 2 — торцевое ярмо; 3 — боковое ярмо.

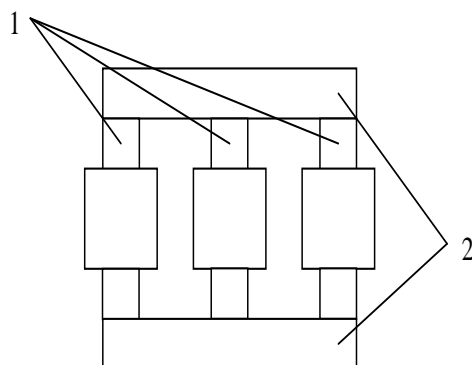


Рис. 12. Стержневой магнитопровод трехфазного трансформатора стержень:
1–2–торцевое (верхнее и нижнее) ярмо.

По способу соединения стержней с ярами магнитопроводы подразделяют на стыковые, шихтованные и навитые (ленточные). В стыковых магнитопрово-

дах стержни ярма собирают из пластин электротехнической стали отдельно, а затем соединяют (стыкуют) по плоскости разъема после насадки обмоток на стержни (рис. 13).

В шихтованных магнитопроводах пластины стержней и ярм собирают в переплет — шихтуют, благодаря этому они не имеют сплошного стыка, что приводит к уменьшению магнитных стыков и тока холостого хода (рис. 14).

В витых магнитопроводах отдельные части навиваются из лент рулонной стали, а затем скрепляются в единую конструкцию. Стержни и ярма шихтованного магнитопровода стягиваются (прессуются) ярмовыми балками, которые стягиваются шпильками.

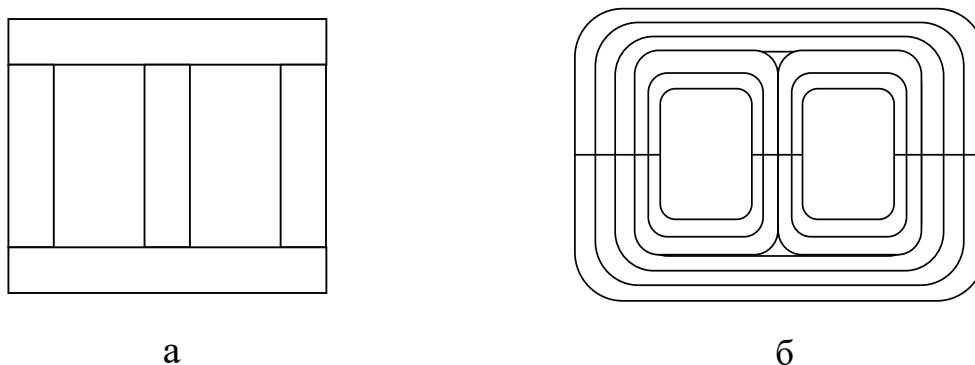


Рис. 13. Стыковые магнитопроводы: а) собранный из плоских пластин; б) навитый из ленты, разрезной.



Рис. 14. Схема шихтовки магнитопровода

Магнитопровод со всеми узлами и деталями, служащими для соединения его отдельных частей в единую конструкцию, называют остовом трансформатора.

Магнитный поток трансформатора проходит по магнитной системе или магнитопроводу, набранному из листовой электротехнической стали. Горячекатаные стали марок 1511, 1512, 1513 называют трансформаторными. За последние годы расширилось применение холоднокатаной текстурованной стали марок 3411, 3412, 3413. При частоте 50–100 Гц используют листы толщиной 0,35–0,5 мм, изолированные один другого лаком, изоляционной бумагой или тонкой

оксидной пленкой. При частотах 400–3000 Гц применяют более тонкие листы холоднокатаной стали толщиной от 0,2 до 0,06 мм.

Части магнитопровода, на которых расположены обмотки, называют стержнями, а части, не несущие обмоток — ярмами. По расположению стержней различают трансформаторы стержневые, у которых обмотки расположены на всех стержнях (рис. 15 а), и броневые, у которых обмотки расположены только на среднем стержне (рис. 15 б, в). У броневого однофазного трансформатора магнитный поток проходит по стержню и разветвляется в два ярма, площадь поперечного сечения которых берется вдвое меньше, чем у стержня.

Для удобства сборки магнитопроводы трехфазных трансформаторов располагаются в одной плоскости (трехстержневой Ш-образный плоский магнитопровод на рисунках 15 д, е, ж) с примерно одинаковым сечением стержней и ярм, размещая на каждом из стержней первичную и вторичную обмотки одной из фаз. Один слой листов магнитопровода из горячекатаной стали показан на рисунке 15 д. Трансформаторы большой мощности для уменьшения общей высоты делают бронестержневыми (рис. 15з), располагая рядом с крайними стержнями боковые ярма, в результате чего упрощается их транспортировка по железным дорогам. Высота ярм при этом уменьшается в $\sqrt{3}$ раз.

Ярмо, соединяющее стержни, выполняют обычно прямоугольного сечения, которое делают на 10–15 % больше, чем сечение стержней. Это уменьшает нагрев стали и потери мощности в ней. В силовых трансформаторах сердечники собирают из прямоугольных листов. Сочленение стержней и ярма обычно производят с взаимным перекрытием их листов «внахлестку». Для этого листы в двух смежных слоях сердечника располагают, как показано на рис. 15 з, в и г, т. е. листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место (рис. 16 д).

Пакеты стягивают стальными шпильками, изолированными относительно стержней трубками из изоляционного материала. Ярмо стягивают деревянными или стальными опорными балками. Сердечник вместе с опорными балками и другими вспомогательными деталями образует остов трансформатора.

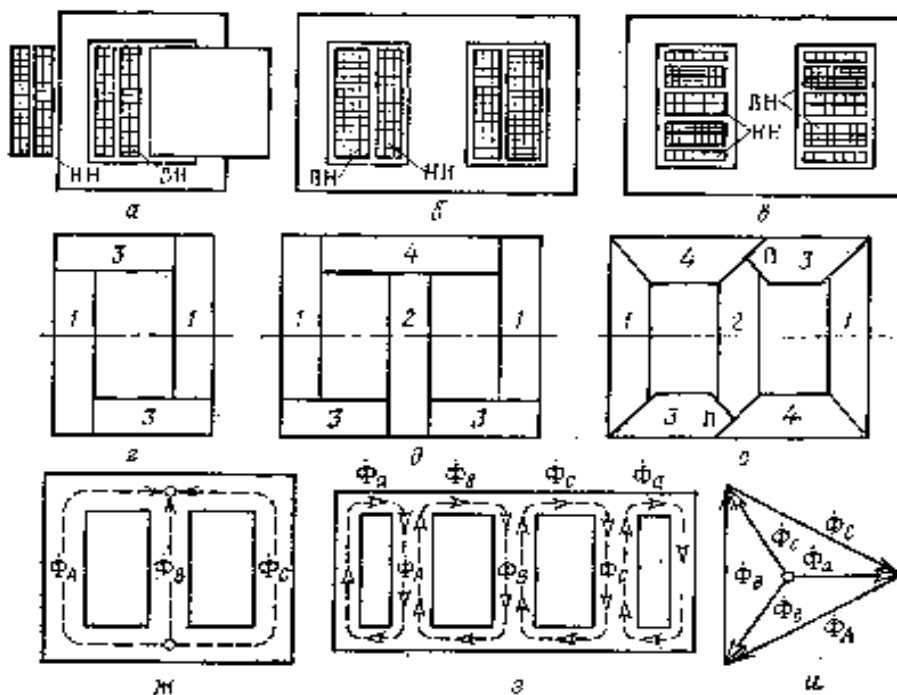


Рис. 15. Типы магнитопроводов трансформатора.

При работе силовых трансформаторов магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они могут приобрести электрический заряд. Чтобы этого избежать, магнитопровод и балки, стягивающие ярмо, заземляют с помощью медных лент.

Магнитопроводы собирают встык или переплет. В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают отдельно, а затем устанавливают встык и соединяют при помощи стяжных балок и шпилек. Масса балок и шпилек при этом получается большая. В местах стыка во избежание замыкания пластин сердечника с пластинами ярма прокладывают изоляцию, которая попутно создает воздушные промежутки и увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода.

При сборке магнитопровода впереплет (внахлестку) стержни и ярма собирают так, чтобы пластины каждого последующего слоя перекрывали стыки между пластинами предыдущего слоя. На рисунках 15 г, д, е изображены нечетные слои пластин однофазного и трехфазных трансформаторов с плоскими магнитопроводами. Четные слои укладывают из таких же элементов, повернутых на 180° относительно штрих пунктирной осевой линии.

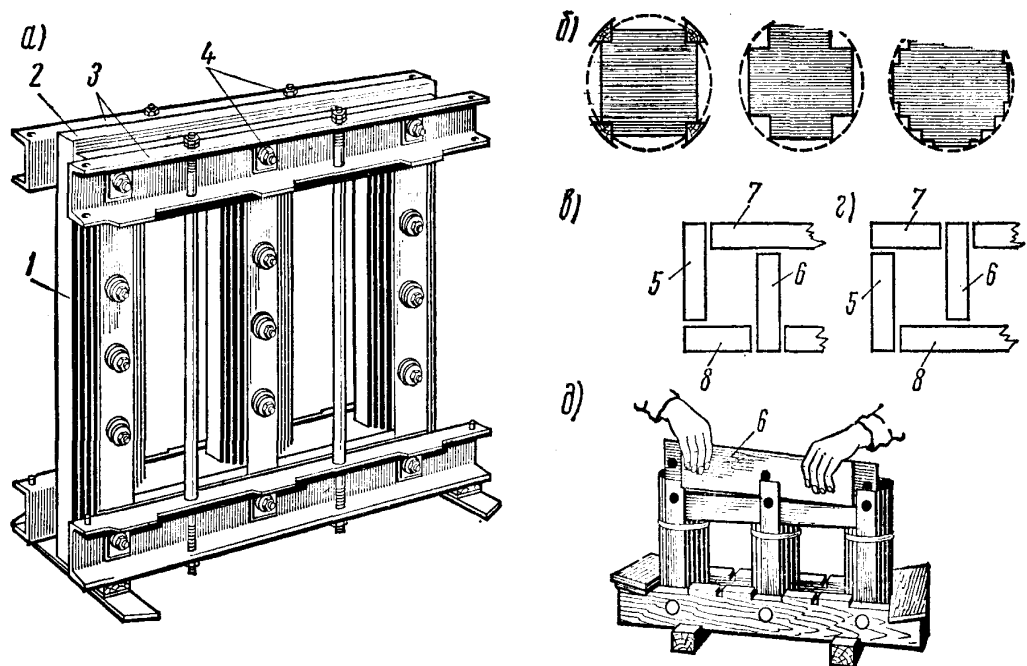


Рис. 16. Магнитопровод силового трехфазного трансформатора:
 а — общий вид; б — формы поперечного сечения стержней; в и г —
 расположение листов в двух смежных слоях сердечника; д — сборка
 сердечника; 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — опорная балка; 4 — стяжные
 шпильки; 5 и 6 — листы крайнего и среднего стержней; 7 и 8 — листы
 верхнего и нижнего ярем

При выполнении магнитопровода из листов текстурованной холоднокатаной стали, имеющей лучшие магнитные свойства в направлении прокатки, листы вырезают вдоль этого направления. В местах поворота магнитного потока листы обрезают под углами, близкими к 45° (рис. 15 е). Число листов можно уменьшить, объединив листы: 3 и 4 и ликвидировав показанную на этом рисунке просечку п.

Ярма делают прямоугольного или ступенчатого сечения, а при круглых стержнях — эллипсоидного.

Собранный магнитопровод спрессовывают и стягивают рамами и шпильками. После сборки шпильки, скреплявшие верхнее ярмо, вынимают и ярмо разбирают. На стержни надевают обмотки с изоляцией, вновь вкладывают на свои места пластины верхнего ярем и магнитопровод стягивают. Совокупность магнитной системы и всех крепящих ее деталей называют остовом трансформатора.

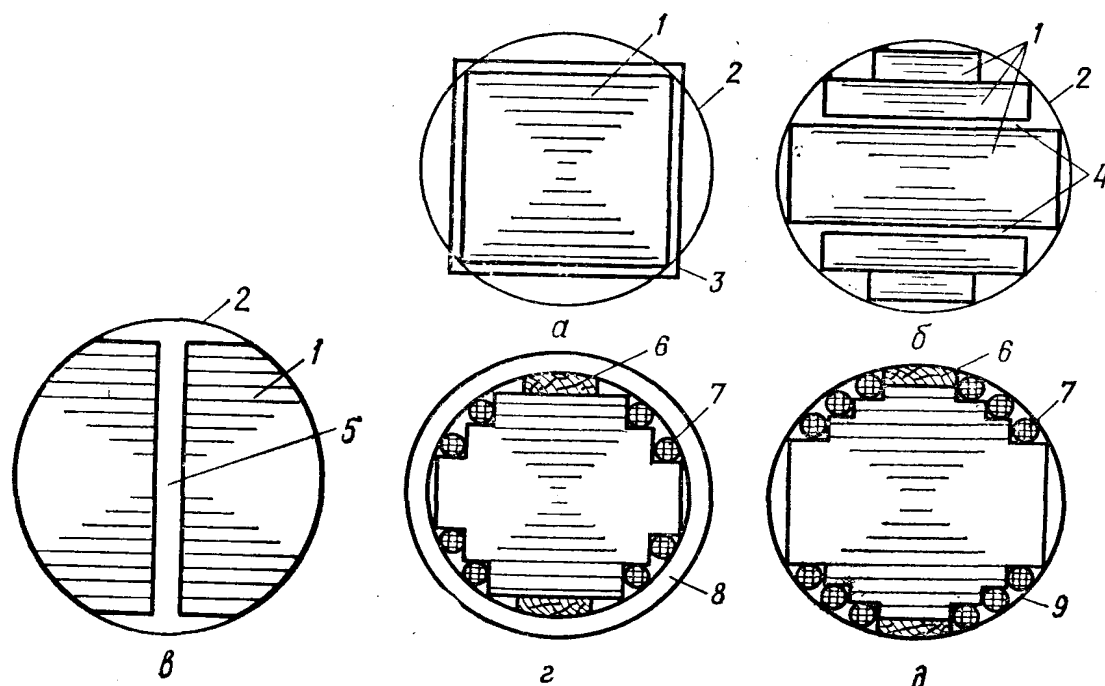


Рис. 17. Форма сечения стержней трансформаторов (а — прямоугольная; б — ступенчатая; в — круглая) и способы опрессовки (г — в изоляционном цилиндре; д — бандажами из стеклоленты): 1 — пакеты листов; 2 — описанная окружность; 3 — изоляционный каркас; 4 — продольные каналы; 5 — поперечный канал; 6 — деревянный клин; 7 — деревянный стержень; 8 — изоляционный цилиндр; 9 — бандаж из стеклоленты.

2.2. Конструкция обмоток трансформатора.

Обмотки трансформатора служат для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется передача электрической энергии, а также обеспечивают наведение ЭДС, требуемых по условиям эксплуатации трансформатора.

Обмотки выполняются из медных или алюминиевых изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения. Для изготовления проводов используется красная электротехническая медь марок ПММ и ПМТ. Марки проводов обмоток: ПБ, ПБУ, АПБ, АПБУ, ПБД и др.

По расположению на стержне обмотки подразделяют на концентрические и чередующиеся (Рис. 18 а и 18 б).

Обмотки выполняют в виде концентрических или чередующихся дисковых катушек. Ближе к стержню располагают обмотки низшего напряжения НН, дальше от него — обмотки высшего напряжения ВН. +

вольтных маломощных трансформаторов или ставят изоляционные цилиндры и втулки у высоковольтных. От магнитной системы обмотки отделяют изоляционными каркасами у низковольтных трансформаторов или изоляционными цилиндрами, прокладками и втулками у высоковольтных.

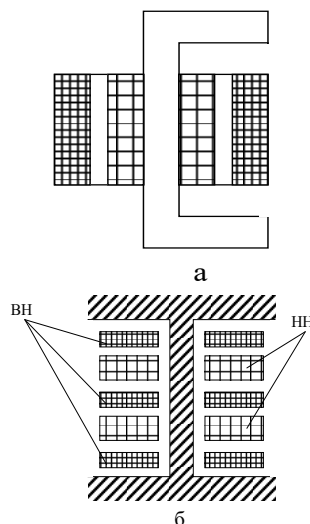


Рис. 18. Конструкция обмоток: а) концентрические; б) чередующиеся.

При концентрическом расположении катушек получается повышенное индуктивное сопротивление рассеяния. Для его уменьшения применяют чередующиеся обмотки, катушки которых выполняют в форме дисков (шайб) небольшой высоты и собирают группами в следующем порядке: одна шайба низшего напряжения, затем две шайбы высшего напряжения и вновь шайба низшего напряжения. Группы катушек соединяют последовательно или параллельно.

Начала обмоток обозначают первыми буквами латинского алфавита А, В, С для высшего напряжения и а, б, с для низшего напряжения а концы — последними буквами (Х, Y, Z — для высшего напряжения и х, у, z — для низшего напряжения). Нулевой (нейтральный) вывод обозначают цифрой 0.

Винтовые обмотки применяют в качестве обмоток НН при токе более 300 А. Винтовые обмотки подразделяются на одно- и многоходовые.

Основным элементом каждой обмотки является виток, который состоит из одного или нескольких параллельных проводников. Совокупность витков соединенных последовательно, образует катушку. Обмотка может состоять из одной или нескольких катушек. Витки, вплотную намотанные на цилиндрической поверхности, образуют слой.

По конструктивно-технологическим признакам цилиндрические обмотки подразделяют на одно- и многослойные обмотки.

Кроме этих существуют непрерывные катушечные обмотки, состоящие из последовательно соединенных дисковых катушек. В последние года в трансформаторах используются обмотки, изготовленные из алюминиевой фольги.

Цилиндрические обмотки применяются в трансформаторах классов напряжения 10–35 кВ в качестве обмоток ВН, иногда НН.

3. Содержание и методика выполнения работы.

3.1. Ознакомиться с назначением, конструкцией и классификацией магнитопроводов.

3.2. Ознакомиться с назначением, конструкцией и классификацией обмоток трансформатора.

3.3. Определить материалы, из которых изготовлены узлы.

3.4. Сделать контрольный отчет на формате А4.

4. Порядок выполнения.

4.1. Получить допуск к работе.

4.2. Провести внешний осмотр трансформатора.

4.3. Изучить основные типы магнитопроводов, их конструкцию, порядок шихтовки крепления и изоляции магнитопровода и применяемые материалы. Выполнить эскиз магнитопровода изучаемого трансформатора с указанием размеров и особенностей крепления и конструкции.

4.4. Изучить основные типы обмоток ВН и НН. Выполнить их эскизы и указать области применения. Показать на эскизе способы крепления обмоток на стержнях магнитопровода и способы усиления главной изоляции обмоток ВН.

4.5. Определить тип магнитопровода и обмоток трансформатора.

4.6. Записать в отчет классификации магнитопровода и обмоток трансформатора.

4.7. Изучить устройство магнитопровода и принцип его работы.

4.8. Изучить устройство обмоток трансформатора и принцип их работы.

4.9. Определить ориентировочно, из какого материала изготовлены узлы.

4.10. Выполнить письменно отчет на листах формата А4.

5. Контрольные вопросы.

5.1. Опишите системы, из которых состоит трансформатор.

5.2. Опишите основные узлы трансформатора.

5.3. Опишите конструкции магнитных систем трансформаторов (типы магнитопроводов способы их крепления, применяемые материалы, изоляция магнитопроводов)

5.4. Опишите классификацию обмоток трансформатора.

5.5. Опишите конструкцию обмоток трансформатора.

5.6. Опишите электрическую систему трансформатора (конструкции обмоток, вводов изоляторов, назначение трансформаторного масла).

5.7. Опишите материалы, используемые для изготовления обмоток и магнитопроводов трансформатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1. Цель работы: изучить конструкцию трансформаторов, отдельных узлов трансформаторов и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в трансформаторах.

2. Основные понятия.

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. *Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки предназначенные для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи распределения электроэнергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

2.1. Классификация трансформаторов.

Трансформаторы классифицируют в первую очередь по выполняемым ими функциям. В энергетических установках различают следующие типы трансформаторов.

1) Силовые трансформаторы, служащие для передачи и распределения электрической энергии.

2) Силовые трансформаторы специального назначения, предназначенные для питания электрических печей (электропечные трансформаторы), трансформаторы для выпрямительных установок, сварочные трансформаторы и т. д.

3) Индукционные регуляторы (вариаторы), служащие для регулирования напряжения.

4) Автотрансформаторы, используемые для преобразования напряжения в небольших пределах, для пуска в ход двигателей переменного тока и т. д.

5) Измерительные трансформаторы, включаемые в схемы измерительных приборов и устройств релейной защиты.

6) Испытательные трансформаторы, используемые при испытании изоляции и высоковольтной аппаратуры высоким напряжением.

По числу фаз различают однофазные и трехфазные трансформаторы, по числу обмоток — двух-, трех- и многообмоточные.

Силовыми считают трехфазные и однофазные трансформаторы, начиная от мощностей соответственно 6,3 и 5 кВ•А. Трансформаторы мощностью менее 5 кВ•А называют трансформаторами малой мощности.

2.2. Принцип действия трансформаторов

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции, в соответствии с которым значение электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в контуре пропорционально скорости изменения потока Φ , пронизывающего этот контур. При этом направление ЭДС определяется законом Ленца, по которому ток, вызванный этой ЭДС, стремится воспрепятствовать изменению потока Φ , пронизывающего контур:

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} .$$

Работа трансформатора основывается на принципе электромагнитного взаимодействия двух или в общем случае любого числа контуров неподвижных относительно друг друга. Если к зажимам $A-X$ одной из обмоток (Рис. 1) подвести напряжение U_1 , от сети переменного тока, то под действием связывающего обе обмотки магнитного потока Φ во вторичной обмотке возникает переменная ЭДС и по вторичному контуру будет протекать ток I_2 , питающий подключенные к зажимам приемники электроэнергии Z .

Таким путем осуществляется передача энергии переменного тока из первичного контура — (первичной сети) во вторичный контур (вторичную сеть).

Рабочий процесс трансформатора можно условно разделить на 4 стадии:

1 — возбуждение — создание потока. Первичная обмотка трансформатора подключается к сети с синусоидальным напряжением U_1 , которое вызывает ток I_1 . Этот ток создает синусоидально изменяющийся магнитный поток Φ , замыкающийся по сердечнику.

2 — создание ЭДС. Под действием потока Φ , индуцируются ЭДС: в первичной обмотке будет наводиться ЭДС самоиндукции E_1 , во вторичной — ЭДС взаимной индукции E_2 ; значения E_1 и E_2 определяются числами витков соответствующих обмоток.

Таким образом, согласно второму закону Кирхгофа, для первичной обмотки: $U_1 = -E_1 + I_0 z_1$, т. е. ЭДС E_1 , наведенная в первичной обмотке, совместно с падением напряжения на ее сопротивлении $I_0 z_1$ уравнивает подводимое к этой обмотке напряжение сети U_1 .

Аналогично для вторичной обмотки: $U_2 = E_2$.

3 — подключение нагрузки. Ко вторичной обмотке подключается электрическая нагрузка; под действием напряжения по ней и по вторичной обмотке потечет ток I_2 .

4 — электропреобразование. Намагничивающая сила вторичной обмотки, обусловленная током I_2 , направлена встречно намагничивающей силе первичной обмотки и, следовательно, стремится уменьшить созданный этой намагничивающей силой поток Φ . Однако в действительности заметного изменения магнитного потока не происходит, так как для поддержания электрического равновесия между U_1 и E_1 одновременно с появлением тока во вторичной обмотке в первичной обмотке возникает дополнительный ток, который компенсирует размагничивающее действие тока I_2 и поддерживает магнитный поток постоянным, чем обеспечивается равновесие между ЭДС E_1 , наведенной в первичной обмотке, и напряжением сети U_1 .

Потребность в трансформации электрической энергии встречается в самых разнообразных областях промышленности и техники. В соответствии с этим существует большое разнообразие трансформаторов как по назначению, так и по мощности и напряжению. Однако все они имеют общую конструктивную схему, которая включает в себя (рис. 2) замкнутую магнитную систему — магнитопрод. Из листовой электротехнической стали; электрическую систему — две или несколько обмоток, охватывающих стержни магнитопровода и изолированных относительно их; охлаждающую систему — воздушную, масляную, водяную или комбинированную; механическую.

Систему, обеспечивающую механическую прочность всей конструкции трансформатора; вспомогательное оборудование.

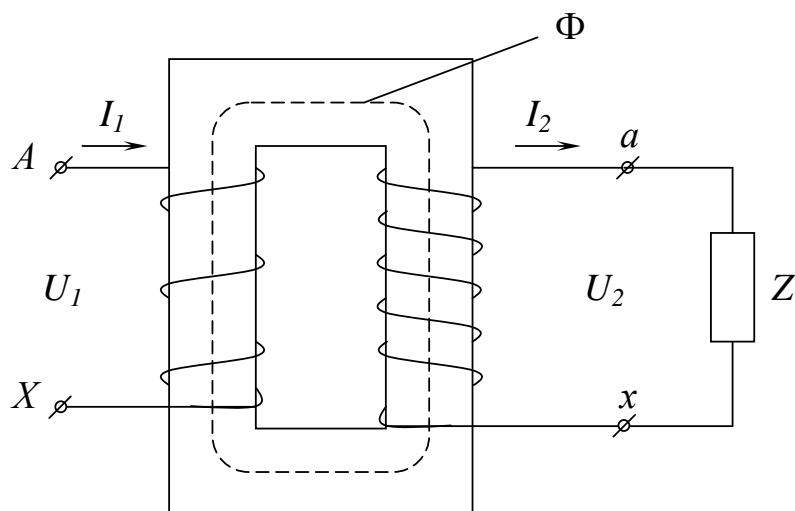


Рис. 19. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Работа трансформатора характеризуется многими параметрами. Для силовых трансформаторов очень важен высокий к.п.д., так как энергия, генерируемая на электростанции, многократно трансформируется, прежде чем достигает приемника. По этой же причине форма кривой напряжения не должна искажаться при трансформировании.

Падения напряжения в обмотках трансформаторов не должны быть слишком большими, чтобы изменение напряжения при сбросе нагрузки не сказывалось на работе приемников электрической энергии. Вместе с тем они не должны быть слишком малыми, чтобы ограничить токи коротких замыканий.

Регулируемым трансформатором называют трансформатор, в который встроено специальное устройство для регулирования напряжения.

Трансформаторы, подключаемые к воздушным линиям передачи, должны быть грозоупорными: напряжения на витках обмоток должны распределяться более или менее равномерно при переходных процессах. С этой целью в трансформаторы встраивают заземленный экран, увеличивающий емкость средней части обмотки относительно корпуса и магнитной системы. Такая емкостная защита применяется во всех отечественных трансформаторах напряжением 110 кВ и выше.

На заводском щитке указывают тип трансформатора и его номинальные величины, например частоту, мощность, напряжение, ток, обеспечивающие работу в условиях, определенных нормативными документами. Номинальной мощностью является полная мощность, гарантированная исполнителем при номинальной частоте и номинальном напряжении. У двухобмоточного трансформатора это мощность каждой из его обмоток. Номинальное напряжение обмотки есть напряжение при холостом ходе между зажимами трансформатора, связанными с обмоткой. Номинальный ток обмотки определяется по ее номинальной мощности, номинальному напряжению и множителю, учитывающему число фаз.

Многочисленные требования к свойствам трансформаторов обуславливают разнообразные конструктивные типы и исполнения трансформаторов. Однако основные процессы, определяющие работу трансформаторов и приемы их изучения, по существу, одинаковы для всех типов трансформаторов.

2.3. Конструкция трансформатора.

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, бака и др. Магнитопровод с насаженным на его стержни обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями.

Конструктивная схема однофазного трансформатора с масляным охлаждением приведена на рис. 20.

Магнитопровод трансформатора является конструктивной, механической основой и служит для локализации в ней основного магнитного потока трансформатора. Для приготовления магнитопроводов применяются специальные тонколистовые электротехнические стали.

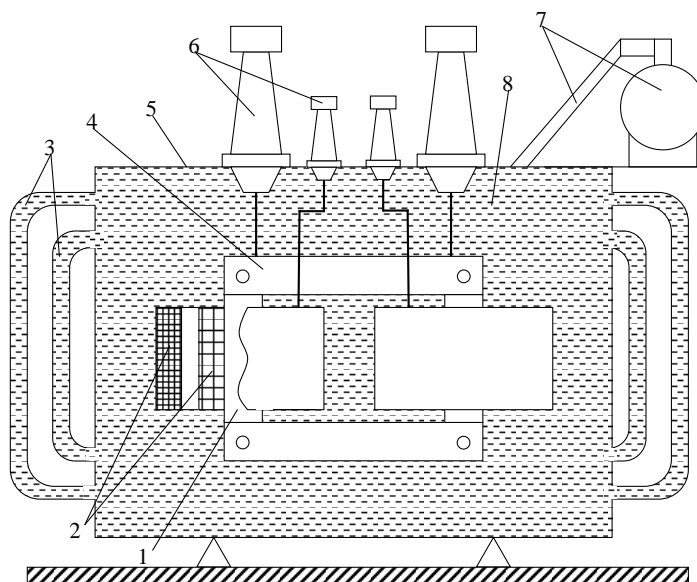


Рис. 20. Конструктивная схема однофазного трансформатора с масляным охлаждением: 1 — магнитопровод; 2 — обмотки высшего и низшего напряжения; 3 — трубы для циркуляции масла и его охлаждения; 4 — ярмовая балка; 5 — масляный бак; 6 — выводы низшего и высшего напряжения; 7 — вспомогательное оборудование системы охлаждения; 8 — масло.

Обмотки трансформатора служат для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется передача электрической энергии, а также обеспечивают наведение ЭДС, требуемых по условиям эксплуатации трансформатора.

2.4. Вспомогательное оборудование.

Баки силовых трансформаторов бывают: гладкие, ребристые, трубчатые, радиаторные. Для герметизации трансформатора бак закрывается крышкой.

Баки трансформаторов, устанавливаемых во взрывоопасных помещениях, заливают негорючей синтетической жидкостью совтолом. При нагреве совтола выделяется газообразный хлористый водород. В жилых и общественных помещениях устанавливают сухие трансформаторы.

Для механической защиты изоляции и тонких проводов обмоток мало-мощные трансформаторы заливают озокеритом или битумом. Трансформаторы,

предназначенные для работы при температурах от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ или в помещениях с агрессивной средой, заливают эпоксидными смолами.

Вспомогательное оборудование служит для контроля за состоянием масла, защиты от воздействия окружающего воздуха и защиты от разрушения бака при внутренних повреждениях трансформатора и включает в себя ряд устройств.

Расширитель устанавливается на крышке бака и служит для компенсации колебаний уровня масла в баке трансформатора при всех возможных колебаниях температуры и предохраняет масло в баке от непосредственного соприкосновения с окружающим воздухом. На торцевой части расширителя или на стенке бака устанавливается маслоуказатель, который служит для контроля за уровнем масла.

Газовое реле устанавливаемое между расширителем и баком служит для защиты трансформатора от внутренних повреждений (витковом замыкании, пробое изоляции и т. п.) сопровождающихся выделением газа.

Для предохранения от разрушения бака трансформатора при повреждениях, сопровождающихся выделением большого количества газа и резким повышением давления внутри бака, устанавливается выхлопная (предохранительная) труба.

Трансформаторы мощностью $1000\text{ кВ}\cdot\text{А}$ и более снабжают газовым реле 7 (рис. 21), представляющим собой небольшой котел, в котором находятся два поплавка с расположенными около них контактами. Котел устанавливают на трубе, идущей от бака к расширителю. Во время работы трансформатора часть изоляции от нагрева разлагается. Газообразные продукты поднимаются вверх и заполняют верхнюю часть закрытого котла. Верхний поплавок при этом опускается и замыкает контакты, сигнализирующие о загрязнении масла. В верхней части газового реле находится кран для отбора проб газа. При аварийных режимах, когда газовыделение и расширение масла протекают наиболее интенсивно, масло движется в расширитель с большой скоростью и отклоняет нижний поплавок, который замыкает контакты в цепи защиты трансформатора.

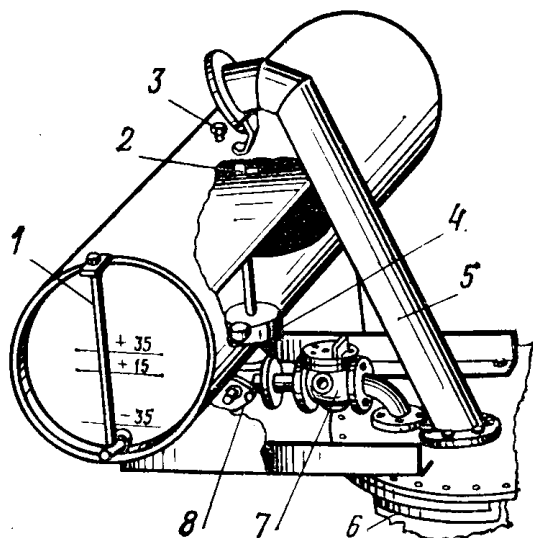


Рис. 21. Вспомогательное оборудование: 1 — указатель уровня масла; 2 — труба для свободного обмена воздуха; 3 — пробка для заливки масла; 4 — грязеотстойник; 5 — выхлопная труба; 6 — бак трансформатора; 7 — газовое реле 8 — кран для отъединения расширителя.

Трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и более снабжают выхлопными трубами 5, закрытыми тонкими стеклянными мембранами или предохранительными клапанами. При аварии, когда давление в баке трансформатора превысит $0,5 \cdot 10^6$ Па, мембрана продавливается, и масло выливается через выхлопную трубу, не повреждая бак.

Трансформаторы мощностью более 1000 кВ·А комплектуются воздухоосушителем для очистки от влаги и загрязнения воздуха, поступающего в трансформатор, и термосифонным фильтром для непрерывной автоматической регенерации масла.

Арматура бака (вентили, задвижки, краны, пробки) служит для отбора, пробы и спуска масла.

Для контроля температуры трансформаторы снабжают термометрами 1, устанавливаемыми на крышке бака (рис. 21), а при мощности 1000 кВА и более — также и в средней части бака. Для заливки и слива масла баки снабжают пробками 4, 6, 11 и кранами.

Для перемещения трансформаторы устанавливают на катки. Остов трансформатора для заземления электрически соединен с баком. Контур заземления не должен образовывать короткозамкнутых витков вокруг любой части магнитопровода.

В зависимости от типа системы охлаждения существуют: сухие трансформаторы; масляные трансформаторы и трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком.

В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется за счет естественной или принудительной циркуляции воздуха.

В масляных трансформаторах осуществляется принудительная или естественная циркуляция масла в баке, где размещается активная часть трансформатора.

2.5. Системы охлаждения трансформаторов.

При работе трансформатора происходит нагрев обмоток и магнитопровода за счет потерь энергии в них. Предельный нагрев частей трансформатора ограничивается изоляцией, срок службы которой зависит от температуры нагрева. Чем больше мощность трансформатора, тем интенсивней должна быть система охлаждения. Ниже приводится описание систем охлаждения трансформаторов.

Естественное воздушное охлаждение трансформаторов осуществляется путем естественной конвекции воздуха и частично лучеиспускания в воздухе. Такие трансформаторы получили название сухих. Условно принято обозначать естественное воздушное охлаждение при открытом исполнении — С; при защищенном исполнении — СЗ, при герметизированном исполнении — СГ.

Допустимое превышение температуры обмотки сухого трансформатора над температурой охлаждающей среды зависит от класса нагревостойкости изоляции и согласно ГОСТ 11677–85 должно быть не больше 60 °С (класс А); 75 °С (класс Е); 80 °С (класс В); 100 °С (класс С); 125 °С (класс Н).

Данная система охлаждения малоэффективна, поэтому применяется для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А при напряжении до 15 кВ.

Естественное масляное охлаждение (М) выполняется для трансформаторов мощностью до 16000 кВА включительно. В таких трансформаторах тепло, выделенное в обмотках и магнитопроводе, передается окружающему маслу, которое, циркулируя по баку и радиаторным трубам, передает его окружающему воздуху. При номинальной нагрузке трансформатора температура масла в верхних, наиболее нагретых слоях не должна превышать +95 °С.

Масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла (Д) применяется для более мощных трансформаторов. В навесных охладителях из радиаторных труб помещаются вентиляторы. Термосифонный фильтр, заполненный силикагелем, служит для поглощения продуктов окисления масла. При циркуляции масла через фильтр происходит непрерывная регенерация его. Вентилятор засасывает воздух снизу и обдувает нагретую верхнюю часть труб. Пуск и остановка вентиляторов могут осуществляться автоматически в зависимости от нагрузки и температуры нагрева масла. Трансформаторы с таким охлаждением могут работать при полностью отключенном дутье, если нагрузка не превышает 100 % номинальной, а температура верхних слоев масла не более

+55 °С, а также при минусовых температурах окружающего воздуха при температуре масла не выше +45 °С, независимо от нагрузки. Максимально допустимая температура масла в верхних слоях при работе с нормальной нагрузкой +95 °С.

Форсированный обдув радиаторных труб улучшает условия охлаждения масла, а, следовательно, обмоток и магнитопровода трансформатора, что позволяет изготавливать такие трансформаторы до 100000 кВ-А.

Масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла (ДЦ) применяется для трансформаторов мощностью 63000 кВ-А и более.

Охладители 3 состоят из системы тонких ребристых трубок, обдуваемых снаружи вентиляторами 4. Электронасосы 2, встроенные в маслопроводы, создают непрерывную принудительную циркуляцию масла через охладители (рис. 8.) Адсорбный фильтр 5 служит для регенерации масла. Благодаря большой скорости циркуляции масла, развитой поверхности охлаждения и интенсивному дутью охладители обладают большой теплоотдачей и компактностью. Переход к такой системе охлаждения значительно уменьшает габариты трансформаторов. Охладители могут устанавливаться вместе с трансформатором на одном фундаменте или на отдельных фундаментах рядом с баком трансформатора. В трансформаторах с системой охлаждения ДЦ максимально допустимая температура масла +75 °С.

Масляно-водяное охлаждение с принудительной циркуляцией масла (Ц) принципиально устроено так же, как и система ДЦ, но в отличие от последнего охладители состоят из трубок, по которым циркулирует вода, а между трубками движется масло. Температура масла на входе в маслоохладитель не должна превышать +70 °С.

Чтобы предотвратить попадание воды в масляную систему трансформатора, давление масла в маслоохладителях должно превышать давление циркулирующей в них воды не менее чем на 0,02 МПа. Эта система охлаждения эффективна, но имеет сложное конструктивное выполнение и применяется на мощных трансформаторах (630 МВ×А и более).

На трансформаторах с системами охлаждения ДЦ и Ц устройства принудительной циркуляции масла должны автоматически включаться одновременно с включением трансформатора и работать непрерывно независимо от его нагрузки. Число включаемых в работу охладителей определяется нагрузкой трансформатора. Трансформаторы должны иметь сигнализацию о прекращении циркуляции масла, охлаждающей воды или об остановке вентилятора.

В настоящее время ведутся разработки новых конструкций трансформаторов с обмотками, охлаждаемыми до очень низких температур. Металл при низ-

ких температурах обладает сверхпроводимостью, что позволяет резко уменьшить сечение обмоток. Трансформаторы с использованием принципа сверхпроводимости будут иметь малую транспортную массу при мощности 1000 МВ-А и выше.

3. Содержание и методика выполнения работы.

3.1. Для выполнения работы необходимо изучить физические явления, на которых основан принцип действия трансформаторов

3.2. Провести внешний осмотр, определить назначение трансформатора.

3.3. Записать паспортные данные трансформатора;

3.4. Изучить состав, устройство и назначение узлов трансформатора;

3.5. Определить материалы, из которых изготовлены узлы, и определить тип системы охлаждения трансформатора;

3.6. Изучить принцип взаимодействия узлов машины, составить конструктивную схему трансформатора;

3.7. Выполнить письменно отчет по прилагаемой форме на листах формата А4.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо: заготовить бланк отчета; ознакомиться с трансформатором, установленном на стенде; записать паспортные данные; отчитаться преподавателю о цели и порядке выполнения работы.

4.2. Изучить общую конструкцию трансформатора и назначение его основных систем и узлов. Выполнить эскиз трансформатора в сборе, на котором выделить основные системы и узлы.

4.3. Изучить основные типы изоляторов высокого и низкого напряжения и способы их крепления на крышке бака.

4.4. Изучить назначение механической системы трансформаторов, способы крепления выемной части внутри бака и к крышке трансформаторов.

4.5. Изучить назначение систем охлаждения, классификацию и области применения различных систем охлаждения трансформаторов.

5. Контрольные вопросы

5.1. Опишите физические явления и законы, на которых основан принцип действия трансформатора.

5.2. Опишите состав узлов трансформатора и объясните их назначение.

5.3. Составьте конструктивную схему трансформатора.

- 5.4. Объясните рабочий процесс трансформатора на холостом ходу.
- 5.5. Объясните рабочий процесс трансформатора под нагрузкой.
- 5.6. Опишите конструкционные, активные и изоляционные материалы, применяемые в трансформаторах.
- 5.7. Опишите системы охлаждения трансформаторов.
- 5.8. Объясните назначение и опишите вспомогательное оборудование трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев, В. А. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования / В. А. Воробьева — Великий Новгород: ЮРАЙТ, 2017 — 340 с.
2. Гольдберг, О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов – М.: Высшая школа, 2001. — 431
3. Епифанов А. П., Епифанов Г. А. – Электрические машины – изд. Лань, 2017 — 300 с.
4. Кацман, М. М. — Электрические машины — М., 2017 — 475 с.
5. Проектирование электрических машин / под редакцией И. П. Копылова — М; изд. ЮРАЙТ, 2017 — 768 с.
6. Справочник по электрическим машинам в 2 т./ под общей ред. И. П.Копылова и Б. К. Клокова — М; Энергоатомиздат, 1998 — 456 с.

Елена Ивановна Меженина

Александра Спиро Аль-Хелю

**Лабораторный практикум
по дисциплине «Электрические машины»**

Корректор: К. А. Быкова
Вёрстка, дизайн Е. В. Филилеева

Подписано в печать 21.11.2019 г. Формат 60×84/16.

Уч.-авт. 3. Усл.-печ. л. 5. Печать цифровая.

Тираж экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»
603107, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 97

Отпечатано: Типография НГСХА
603107, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 97, тел. 466-07-23