

SCAN

DVD

biblem

elektromonter

*Е. К. Иноземцев*

**РЕМОНТ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
(ЧАСТЬ 1)**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ  
ЭНЕРГЕТИК**

# **Библиотечка электротехника**

— приложение к журналу “Энергетик”

## **План выпусков**

### **Первая половина 2001 г.**

Курбангалиев У. К. **Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.**

Овчинников В. В. **Автоматическое повторное включение.**

Кузнецов А. П., Лукоянов В. Ю. и др. **Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики.**

Шабад М. А. **Защита генераторов малой и средней мощности.**

Иноземцев Е. К. **Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (две части).**

### **Вторая половина 2001 г.**

Шкарин Ю. П. **Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи.**

Безчастнов Г. А., Красильников А. М. и др. **Контроль состояния изоляции электрических машин.**

Овчаренко Н. И. **Аналоговые элементы комплексов релейной защиты и автоматики энергосистем.**

Конюхова Е. А., Киреева Э. А. **Надежность электроснабжения промышленных предприятий.**

Таубес И. Р., Удрис А. П. **Использование реле ДЗТ-21 и ДЗТ-23 для защиты трансформаторов.**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу “ПРЕССА РОССИИ”. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

## **Индексы “Библиотечки электротехника”**

— приложения к журналу “Энергетик”

**88983** — для предприятий и организаций;

**88982** — для индивидуальных подписчиков.

# **Библиотечка электротехника**

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 5(29)

**Е. К. Иноземцев**

## **РЕМОНТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

(часть 1)

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2001

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),  
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,  
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,  
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,  
Ю. В. Усачев, М. А. Шабад

**Иноземцев Е. К.**

И 67    Ремонт высоковольтных электродвигателей электро-  
станций (часть I). — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2001. —  
104 с.: ил. — [Библиотечка электротехника, приложение к  
журналу “Энергетик”; Вып. 5 (29)].

Рассмотрены техническая характеристика и конструктивное испол-  
нение высоковольтных электродвигателей, установленных на тепловых,  
атомных и гидроэлектростанциях России. Представлена классификация  
электродвигателей по степени защиты, климатическому исполнению,  
способу охлаждения и монтажа. Описаны системы вентиляции и охлаж-  
дения электродвигателей.

Описаны характерные повреждения и вопросы эксплуатационной  
надежности высоковольтных электродвигателей и их узлов, прогнози-  
рование срока службы изоляции и планирование перемоток, а также замен  
подшипников в зависимости от их технического состояния.

Для персонала электростанций, энергоремонтных, монтажных и пус-  
ко-наладочных организаций.

## Предисловие

Эксплуатационная надежность электростанций в значительной степени зависит от работы вспомогательных механизмов, приводами которых являются электродвигатели. Высоковольтные электродвигатели привода ответственных механизмов приравняются к основному оборудованию. В этой связи к ним предъявляются требования надежности, обеспечивающей их бесперебойную работу.

Исходя из реальной экономической ситуации в Российской Федерации, в ближайшее время следует ожидать ограниченный ввод новых генерирующих мощностей. В этом случае обеспечение потребителей электрической энергией будет определяться надежностью действующего оборудования электростанций.

В настоящее время оборудование тепловых электростанций суммарной мощностью около 20 млн. кВт выработало свой проектный ресурс. К 2005 г. выработает свой ресурс 55 млн. кВт. На АЭС к 2005 г. отработает свой проектный ресурс оборудование общей мощностью 3,8 млн. кВт. В сложившейся ситуации для надежной работы оборудования тепловых, атомных и гидроэлектростанций первоочередное значение приобретает качество выполнения ремонта.

Отсутствие производственно-технической литературы по ремонту высоковольтных электродвигателей электростанций, а также необходимость дополнительной подготовки квалифицированного персонала послужило поводом для написания этой книги.

**Замечания и пожелания по брошюре  
просим направлять по адресу:  
109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.  
Редакция журнала "Энергетик".**

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# Планирование и организация ремонта

### 1.1. ПЕРИОДИЧНОСТЬ И ОБЪЕМ РЕМОНТА

В соответствии с “Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации” на электростанциях организовано техническое обслуживание, плановые ремонты и модернизация высоковольтных электродвигателей. Объем технического обслуживания и планового ремонта определяется необходимостью поддержания исправного и работоспособного состояния этого оборудования с учетом его фактического технического состояния. На все виды оборудования составляют перспективные (пятилетние), годовые и месячные графики.

Периодичность, продолжительность и объемы всех видов ремонта установлены “Правилами организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей” и нормативно-техническими документами на ремонт данного вида оборудования.

Ремонт высоковольтных электродвигателей подразделяется на капитальный, средний и текущий с выполнением технического контроля и испытаний. В период *капитального ремонта* электродвигатель разбирают независимо от его технического состояния, осматривают, выполняют измерения и испытания, устраняют обнаруженные дефекты, заменяют изношенные детали и узлы, износ или ресурс которых не обеспечивает надежной работы в последующий межремонтный период. Электродвигатель собирают, регулируют и настраивают его элементы.

В период *среднего ремонта* выполняют частичную разборку электродвигателя для контроля состояния отдельных его деталей или узлов, а также частично заменяют быстроизнашиваемые детали. Затем собирают, регулируют и настраивают узлы и системы электродвигателя.

Целями *текущего ремонта* является контроль доступных для осмотра деталей и узлов электродвигателя без разборки, а также выполнение



отдельных работ по устранению незначительных дефектов, выявленных в процессе эксплуатации и осмотра электродвигателя.

Неплановый ремонт выполняют с целью восстановления поврежденного узла в результате неплановой остановки электродвигателя в связи с обнаружением дефекта. В период проведения непланового ремонта кроме качества работ большое значение имеет сокращение времени простоя электродвигателя в ремонте.

Работы по модернизации выполняются в сроки проведения капитальных ремонтов. При необходимости время простоя электродвигателя в ремонте в этом случае может быть увеличено.

Заводской ремонт — это ремонт транспортабельного узла или электродвигателя в сборе на ремонтных предприятиях или ремонтных заводах на основе применения передовой технологии и развитой специализации.

В процессе эксплуатации электродвигателя выполняют техническое обслуживание, в объем которого входят своевременная замена и регулировка щеток, продувка, контроль контактных соединений и др. В период капитальных, средних и текущих ремонтов выполняются типовые регламентированные объемы ремонтных работ. В процессе осмотра, технического контроля, испытаний, дефектации типовой объем работ должен быть дополнен и уточнен. В период ремонта выполняют работы по устранению выявленных при эксплуатации дефектов, выполняют требования директивных документов и мероприятия по улучшению технико-экономических показателей, модернизации отдельных узлов с учетом передового опыта эксплуатации и электромашиностроения, направленные на повышение надежности, улучшения качества ремонта и показателей ремонтнопригодности.

Периодичность капитального ремонта электродвигателей зависит от местных условий. Обычно ремонт электродвигателей производится одновременно с ремонтом вспомогательного оборудования блока (насоса или вентилятора). Совмещение сроков проведения ремонтов электродвигателей и механизмов целесообразно по условиям снижения трудозатрат на работы, связанные с центровкой, пробным пуском после окончания ремонта, подготовкой рабочего места оперативным персоналом и т.п.

Капитальный ремонт вновь введенных в эксплуатацию электродвигателей ответственных механизмов с выводом ротора по решению технического руководителя электростанции может быть выполнен через 8000 ч работы после ввода в эксплуатацию энергоблока. Первые ремонтные работы с выемкой ротора включают переключивку пазов статора, замену ослабленных или оборванных шнуровых бандажей лобовых частей обмотки статора, осмотр и устранение обнаруженных де-



фехтов крепления выводных шин, проверку крепления и плотности запрессовки активной стали статора и др.

Периодичность текущего ремонта электродвигателей определяется в основном сроками замены турбинного масла или консистентной смазки в подшипниках и выполняется согласно графику, утвержденному техническим руководителем электростанции, и устанавливается, как правило, 1 — 2 раза в году.

При планировании сроков ремонтов учитывается техническое состояние электродвигателей, устанавливаемое в процессе эксплуатации (нагрев активных частей, вибрация, состояние подшипников и т.п.).

В объем типовых работ по капитальному ремонту электродвигателей входят: профилактические испытания и проверка воздушных зазоров; проверка зазоров в подшипниках и натягов крышки подшипника на вкладыш (для подшипников скольжения с разъемными вкладышами); проверка осевого разбега ротора с подшипниками скольжения; проверка гидравлического сопротивления (расход дистиллята) системы охлаждения статора и ротора (для электродвигателей с непосредственным водяным охлаждением); замер вибрации подшипников; замер температуры обмотки статора, воздуха в системе вентиляции, дистиллята, охлаждающей воды воздухоохладителя, опорных подшипников и турбинного масла; определение величины слива масла из подшипников; проверка центровки роторов электродвигателя и механизма; полная разборка электродвигателя с выводом ротора; осмотр и чистка всех деталей и узлов; проверка плотности прессовки активной стали; осмотр сварных швов и деталей крепления; проверка крепления обмотки статора в пазовой и лобовых частях; гидравлическая опрессовка системы охлаждения ротора и статора (для электродвигателей с непосредственным водяным охлаждением); чистка и гидравлические испытания воздухоохладителей; проверка крепления соединительных и выводных шин; осмотр внешнего состояния изоляции; испытания активной стали статора на нагрев и потери; осмотр коробки выводов; проверка состояния обмотки ротора; проверка крепления сердечника ротора; осмотр вентиляторов и бандажных колец ротора с дефектоскопией; проверка крепления балансировочных грузов; ремонт подшипниковых узлов; сборка электродвигателя; измерения и испытания после ремонта.

## **1.2. ПЛАНИРОВАНИЕ, ПОДГОТОВКА И ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА**

Плановый ремонт электродвигателей энергоблоков выполняется в сроки, определяемые ремонтом основного оборудования. Ремонт ре-

зервных электродвигателей планируют в периоды между капитальными ремонтами основного оборудования. Ремонт электродвигателей привода общестанционных механизмов, отключение которых не ограничивает рабочую мощность электростанций, планируют на период между ремонтами основного оборудования. Ремонт электродвигателей привода общестанционных механизмов, связанных со снижением рабочей мощности электростанции, планируют одновременно с ремонтом основного оборудования.

До вывода энергоблока в капитальный ремонт, не позднее чем за 2 мес. до начала ремонта, должны быть составлены, согласованы и утверждены ведомости объема работ. Изменения в ведомости объема работ могут быть внесены после проведения измерений и испытаний до ремонта, осмотра и дефектации узлов электродвигателей, окончание которых должно быть выполнено в первой половине плановой продолжительности ремонта. По результатам дефектации составляется акт дефектации установленной формы за подписью председателя комиссии и ее членов. В акте дефектации указывается наименование оборудования, станционный номер, тип, завод-изготовитель, заводской номер, год выпуска, время нахождения в эксплуатации, вид и плановый срок ремонта, наработка с начала эксплуатации и со времени окончания предыдущего ремонта. В акте дефектации перечисляют обнаруженные дефекты, без устранения которых ввод электродвигателя в эксплуатацию невозможен; указывают необходимые работы (не предусмотренные планом), которые надо выполнить для устранения обнаруженных дефектов. Уточняется также технологическая возможность выполнения этих работ при наличии ресурсов. В этом случае график ремонтных работ должен быть скорректирован в соответствии с дополнительным объемом работ. При выполнении ремонтных работ подрядной организацией все изменения и дополнения объема работ должны быть согласованы с исполнителем и утверждены руководством электростанции. В те же сроки, что и для ведомости объема работ (не позднее, чем за 2 мес. до начала ремонта), электростанция совместно с ремонтным предприятием разрабатывает план подготовки к ремонту. В этом плане отражают: конкретизацию номенклатуры и количества необходимых материалов и запчастей в соответствии с ведомостью объема работ; распределение заказов на изготовление и механическую обработку деталей, узлов и приспособлений для ремонта; проверку готовности всех видов помещений для ремонтного персонала; проверку в соответствии с существующими правилами технологической оснастки съемных грузозахватных приспособлений, грузоподъемных средств и др.; разработку новых и доработку типовых руководств и проектов производства работ по ремонту конкретных типов электродвигателей; уточнение сетевых графиков ремонта в соот-

ветствии с планируемым объемом работ, сроком ремонта и численностью персонала; подготовку связи на ремонтной площадке; приведение в исправное состояние постоянных разводок газов, сжатого воздуха, сварочных сетей, сетей низкого напряжения для питания переносных светильников, освещения, воды и др., укомплектования и инструктирования ремонтных бригад.

За 15 дней до начала ремонта электростанция совместно с ремонтной организацией проверяют выполнение подготовительных работ. Не позднее, чем за 10 дней до начала ремонта составляют акт готовности к ремонту электростанцией и ремонтным предприятием.

Ремонт высоковольтных электродвигателей, как правило, выполняют на месте их установки, для чего рядом оборудуют ремонтную площадку, на которой должны быть разводки кислорода, ацетилен, сжатого воздуха давлением 400 — 600 кПа и технической воды давлением 400 кПа, постоянная электрическая разводка для выполнения сварочных работ и переносных электроламп напряжением 12 В, передвижной слесарный верстак, снабженный тисками и заточным станком. Ремонтный персонал до начала работ проверяет наличие и исправность инструмента, оснастки, средств малой механизации, приспособлений, материалов и запасных частей. Номенклатура запасных частей зависит от типа, конструкции электродвигателя и объема работ.

План размещения ремонтируемых узлов и деталей составляется с учетом допустимых нагрузок на перекрытия. Освещенность ремонтных площадок в соответствии с нормами должна составлять не менее 200 лк. Для этого монтируют временное дополнительное освещение. При подготовке к ремонту персонал обеспечивают технической документацией, ремонтными формулярами, отчетными документами предыдущего ремонта, перечнем заводских чертежей и необходимыми директивными материалами.

Капитальные ремонты высоковольтных электродвигателей из-за их сложности осуществляют по графикам сетевого планирования. Сетевой график отражает технологические взаимосвязи между ремонтными операциями, улучшает оперативное руководство ремонтом, способствует успешному проведению ремонта в намеченные сроки с минимальными затратами рабочей силы и других материальных ресурсов. Сетевой график ремонта разрабатывают на основании ведомости работ и технологического процесса с учетом времени выполнения ремонтных операций, численности и квалификации ремонтного персонала.

При планировании ремонтов отдельных электродвигателей целесообразно применять линейные графики.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

# Конструкция и техническая характеристика электродвигателей

### 2.1. ТИПЫ И СЕРИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Рассматриваемые электродвигатели имеют различное исполнение: защищенное, закрытое; с вертикальным и горизонтальным расположением вала; широкий диапазон частот вращения — до 3000 мин<sup>-1</sup>; различные системы охлаждения. Расшифровка буквенных обозначений следующая: А — асинхронный; А (вторая буква) — для атомных электростанций; Т — трехфазный; Д — двигатель; Д (вторая буква) — двухскоростной; Д (третья буква) — с двойной беличьей клеткой; З — закрытого исполнения; О — обдуваемый; М — с охладителем для работы на морской воде; М (вторая буква) — для привода мельницы; Н — наружной установки; С — синхронный; С (вторая буква) — специального исполнения (отличающийся от каталожного); В — вертикальный; В — непосредственное водяное охлаждение; К — компрессорный; К (вторая буква) — консольное исполнение (без вала); К (третья буква) — с контактными кольцами для устройства регулирования угла лопастей насоса; Ф — с валом; Ц — для привода циркуляционного насоса АЭС.

У электродвигателей типа АТД, АТД2, АТД4 и АЗМВ имеются дополнительные буквенные обозначения: Р — с разомкнутым циклом вентиляции; З — с замкнутым циклом вентиляции; П — продуваемое под избыточным давлением или взрывозащищенное; Л — для привода механизмов с легкими условиями пуска; М — для привода механизмов с нормальными условиями пуска и повышенными маховыми массами; Т — для привода механизмов с большими маховыми массами и тяжелыми условиями пуска; В — взрывонепроницаемая оболочка; С — для частоты питающей сети 60 Гц; Р (вторая буква) — ре-



гулируемая частота вращения; Х1 — вид химостойкого покрытия по ГОСТ 24682—81.

Электродвигатели типа 2АДЖ и 2АДР (одно- и двухскоростные) имеют следующую расшифровку буквенных обозначений: АД — асинхронный двигатель; Ж — жидкостное (водяное) охлаждение; Р — разомкнутый цикл вентиляции.

Электродвигатели ВАО2 Э и с фазным ротором типа ВАО КЭ имеют следующую расшифровку: ВАО — взрывобезопасный асинхронный обдуваемый (взаимозаменяемый с электродвигателями серии ВАО2 и ВАОК); Э — изготовитель ОАО “ЭЛСИБ”; К — двигатель с контактными кольцами (фазный ротор).

В условных обозначениях электродвигателей типа ВАО и ВАО2 буквы обозначают: S, M или L — условная длина станины; A и B — условная длина сердечника статора. У электродвигателей А4 и ДА-304 буквы X и Y обозначают условную длину электродвигателя (расстояние между фундаментными болтами по длине двигателя) или длину сердечника статора, см. У электродвигателей 2АЗМВ1 цифра 1 обозначает исполнение с подшипниками скольжения. Электродвигатели серии АДО и 2АДО имеют следующую расшифровку: асинхронный двигатель обдуваемый; С (для 2АДО) — исполнение на подшипниках скольжения.

Расшифровка цифровых обозначений наиболее распространенных типов электродвигателей следующая:

АВЦ-1600-1500У5: 1600 — мощность, кВт; 1500 — частота вращения, мин<sup>-1</sup>; У5 — категория размещения;

СТД-1250-2РУХЛ4: 1250 — мощность, кВт; 2 — число полюсов; УХЛ4 — категория размещения;

СДК2-17-26-16КУХЛ4: 2 — порядковый номер серии; 17 — габарит; 26 — длина активной стали статора, см; 16 — число полюсов; УХЛ4 — категория размещения;

СДВ2-173/46-16УХЛ4: 2 — порядковый номер серии; 173 — наружный диаметр сердечника статора, см; 46 — длина активной стали статора, см; 16 — число полюсов; УХЛ4 — категория размещения;

АДО-3150/1000У1: 3150 — мощность, кВт; 1000 — частота вращения, об/мин; У1 — категория размещения;

2АДО-С1000-6000-8У1: 2 — порядковый номер серии; 1000 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В; 8 — число полюсов; У1 — категория размещения;

АВ-8000/6000У3: 8000 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В; У3 — категория размещения;

СДМЗ-20-49-60: 20 — габарит; 49 — длина активной стали статора, см; 60 — число полюсов;

ВАЗ-215/109-6АМО5: 215 — наружный диаметр сердечника статора, см; 109 — длина активной стали статора, см; 6 — число полюсов; 5 — категория размещения;

ВДА 173/99-6-2АУ4: 173 — наружный диаметр сердечника статора, см; 99 — длина активной стали статора, см; 6 — число полюсов; У4 — категория размещения;

ВАН-143/41-10У3: 143 — наружный диаметр сердечника статора, см; 41 — длина активной стали статора, см; 10 — число полюсов; У3 — категория размещения;

АВ-15-36-8АМ-УХЛ4: 15 — габарит; 36 — длина активной стали статора, см; 8 — число полюсов; УХЛ4 — категория размещения;

АОВ2-14-41-4У3: 14 — габарит; 41 — длина активной стали статора, см; 4 — число полюсов; У3 — категория размещения;

ДВДА-260/99-20-24У4: 260 — наружный диаметр сердечника статора, см; 99 — длина активной стали статора, см; 20 и 24 — число полюсов; У4 — категория размещения;

4АЗМ-800/6000УХЛ4: 4 — порядковый номер серии; 800 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В; УХЛ4 — категория размещения;

АЗ-1600/6000: 1600 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В;

А4-450Х-4У3: 4 — порядковый номер серии; 450 — высота оси вращения, мм; 4 — число полюсов; У3 — категория размещения;

ВАО2-450М-4: 2 — порядковый номер серии; 450 — высота оси вращения, мм; 4 — число полюсов;

ДАЗО 14-69-8/10У1: 14 — габарит; 69 — длина активной стали статора, см; 8 и 10 — число полюсов; У1 — категория размещения;

ДАЗО 1912-12У1: 19 — габарит; 12 — число пакетов стали; 12 — число полюсов; У1 — категория размещения;

ДАЗО 2-17-64-10У1: 2 — порядковый номер серии; 17 — габарит; 64 — длина активной стали статора, см; 10 — число полюсов; У1 — категория размещения двигателя;

ДАЗО 4-450Х-4У1: 4 — порядковый номер серии; 450 — высота оси вращения, мм; 4 — число полюсов; У1 — категория размещения;

5АЗМВ-5000/6000УХЛ4: 5 — порядковый номер серии; 5000 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В; УХЛ4 — категория размещения;

2АДЖ-630-6000-УЗЛ4: 2 — порядковый номер серии; 630 — мощность, кВт; 6000 — напряжение, В; 4 — число полюсов; УХЛ4 — категория размещения.

## 2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ, КЛИМАТИЧЕСКОМУ ИСПОЛНЕНИЮ, СПОСОБУ ОХЛАЖДЕНИЯ И МОНТАЖА

Степень защиты электродвигателей определена в ГОСТ 17494—87\*. Характеристика степеней защиты и их обозначения определены ГОСТ 14254—96. Степень защиты характеризует защищенность узлов, находящихся внутри электродвигателя от попадания посторонних тел и воды, а также защиту персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями.

*Обозначение степеней защиты* состоит из буквенной IP (International Protection) и цифровой частей: первая цифра определяет степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями и от попадания посторонних предметов в двигатель, вторая цифра обозначает степень защиты двигателя от попадания воды внутрь корпуса.

Характеристики первой цифры обозначения степени защиты следующие:

0 — специальная защита отсутствует;

1 — защита от проникновения внутрь корпуса большого участка поверхности человеческого тела, например тыльной стороны руки, и от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм;

2 — защита от проникновения внутрь корпуса пальцев и от проникновения твердых тел размером свыше 12,5 мм;

3 — защита от проникновения внутрь оболочки твердых тел (инструмента, проволоки и т.п.) диаметром или толщиной более 2,5 мм;

4 — защита от проникновения внутрь корпуса проволоки и твердых тел размером более 1,0 мм;

5 — защита от пыли. Проникновение внутрь корпуса пыли не предотвращено полностью, однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы электродвигателя;

6 — пыленепроницаемость. Проникновение пыли предотвращено полностью.

Характеристики второй цифры обозначения степени защиты электродвигателей следующие:

0 — специальная защита отсутствует;

1 — защита от капель воды. Капли воды, вертикально падающие на корпус, не должны оказывать вредного действия на электродвигатель;

2 — защита от капель воды. Капли воды, вертикально падающие на корпус, не должны оказывать вредного действия на электродвига-



тель при наклоне его на любой угол до  $15^\circ$  относительно нормального положения;

3 — защита от капель дождя. Дождь, падающий на корпус под углом  $60^\circ$  от вертикали, не должен оказывать вредного действия на электродвигатель;

4 — защита от брызг. Вода, разбрызгиваемая на корпус в любом направлении, не должна оказывать вредного действия на электродвигатель;

5 — защита от водяных струй. Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на корпус, не должна оказывать вредного действия на электродвигатель;

6 — защита от сильных водяных струй. Сильная струя воды, выбрасываемая в любом направлении на корпус, не должна оказывать вредного действия на электродвигатель.

В асинхронных электродвигателях общего назначения используют следующие степени защиты: IP00, IP01, IP10, IP11, IP12, IP13, IP20, IP21, IP22, IP23, IP43, IP44, IP54, IP55, IP56. Для электродвигателей, установленных на электростанциях, наиболее широкое распространение нашли следующие степени защиты: IP23 (защищенное исполнение), IP44 (закрытое исполнение) и IP55 (для электродвигателей главных циркуляционных насосов АЭС).

В зависимости от климатических условий в соответствии с ГОСТ 15150—69\* электродвигатели выпускаются со следующими климатическими модификациями:

умеренный климат (буквенное обозначение — У, цифровое — 0; температурный интервал воздуха при эксплуатации от  $+40$  до  $-45^\circ\text{C}$ );

умеренный и холодный климат (УХЛ,1; от  $+40$  до  $-60^\circ\text{C}$ );

влажный тропический климат (ТВ,2; от  $+45$  до  $+1^\circ\text{C}$ );

сухой тропический климат (ТС,3; от  $+45$  до  $-10^\circ\text{C}$ );

сухой или влажный тропический климат (Т,4; от  $+45$  до  $-10^\circ\text{C}$ );

общеклиматическое исполнение (на суше) (О,5; от  $+45$  до  $-60^\circ\text{C}$ );

умеренно холодный морской климат (М,6; от  $+40$  до  $-30^\circ\text{C}$ );

тропический морской климат (ТМ,7; от  $+45$  до  $+1^\circ\text{C}$ );

умеренно холодный и тропический морской климат (ОМ,8; от  $+45$  до  $-30^\circ\text{C}$ );

всеклиматическое исполнение (на суше и на море) (В,9; от  $+45$  до  $-60^\circ\text{C}$ ).

В зависимости от места установки электродвигателей предусмотрены следующие категории размещения:

1 — на открытом воздухе;

2 — помещениях, где имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха и колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе;

3 — в закрытых помещениях с естественной циркуляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха, содержание песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе;

4 — в помещениях с искусственно регулируемы́ми климатическими условиями;

5 — в помещениях с повышенной влажностью, в том числе в подвальных помещениях.

Применяемые в рассматриваемых электродвигателях степени защиты IP23, IP44 и IP55 непосредственно связаны с системой вентиляции и способом охлаждения. Степень защиты IP23 предусматривает охлаждение активных частей электродвигателя поступающим из окружающей среды воздухом.

Электродвигатели выполняются с аксиальной и радиальной системами вентиляции в зависимости от направления потока вентилярующего воздуха, у электродвигателей со степенью защиты IP44 и IP55 циркулирующий по замкнутому циклу воздух охлаждается в воздухо-воздушном или воздухо-водяном охладителе. Циркуляция воздуха внутри двигателя осуществляется одним или двумя вентиляторами. Для нагнетания воздуха в трубы наружной части воздухо-воздушного охладителя используют отдельный вентилятор с независимым приводным электродвигателем или вентилятор, установленный на вал со стороны, противоположной приводу. Воздухо-воздушный охладитель может быть сосредоточенной конструкции, смонтированный в верхней части электродвигателя (ДАЗО, ДАЗО4) или распределенный по внешней поверхности статора (ДАЗО2).

Условные обозначения способов охлаждения установлены ГОСТ 20459—87. Они содержат буквенную (IC — International Cooling) и цифровую части, расположенные в указанной ниже последовательности. Хладагент обозначается прописной буквой: А — воздух, W — вода. Если в качестве хладагента использован только воздух, то это буквенное обозначение может быть опущено. Устройство цепи для циркуляции хладагента условно обозначает первая цифра. Вторая цифра определяет способ перемещения хладагента. Если электродвигатель имеет две и более цепи охлаждения, то в обозначении указываются цифровые характеристики всех цепей охлаждения, начиная с характеристики цепи с вторичного хладагента (с более низкой температурой). Для электродвигателей закрытого исполнения обозначение содержит четыре цифры, две из которых определя-

ют характеристики внешней цепи охлаждения и две — внутренней. В рассматриваемых электродвигателях применены в основном следующие способы охлаждения:

IC 01 — защищенный электродвигатель с самовентиляцией (вентилятор расположен на валу электродвигателя) — электродвигатели А4;

IC 0151 — закрытый электродвигатель, имеющий корпус с трубами для прохода воздуха, с наружным и внутренним вентиляторами — электродвигатели ДАЗО2;

ICW 37A81 — закрытый электродвигатель с воздушным охлаждением и присоединенным водяным охладителем (циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или от водопроводной сети) — электродвигатели АТД4;

IC 0161 — закрытый электродвигатель, имеющий охладитель, установленный непосредственно на электродвигателе, с наружным и внутренним вентиляторами.

*Условное обозначение конструктивного исполнения по способу монтажа* состоит из латинских букв (IM — International Mounting) и четырех цифр: первая цифра — конструктивное исполнение; вторая и третья цифры — способ монтажа; последняя цифра — исполнение конца вала.

Конструктивное исполнение электродвигателей имеет следующие условные обозначения (1-я цифра):

- 1 — электродвигатель на лапах с подшипниковыми щитами;
- 2 — электродвигатель на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);
- 3 — электродвигатель без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах), с цокольным фланцем;
- 4 — электродвигатель без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 — электродвигатель без подшипниковых щитов;
- 6 — электродвигатель на лапах с подшипниковыми щитами и со стоячковыми подшипниками;
- 7 — электродвигатель на лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 — электродвигатель с вертикальным валом, кроме электродвигателей групп от IM1 до IM4;
- 9 — электродвигатели специального исполнения по способу монтажа.

Условные обозначения способа монтажа электродвигателей (2 и 3-я цифры) указаны в ГОСТ 2479—79, а наиболее употребительные

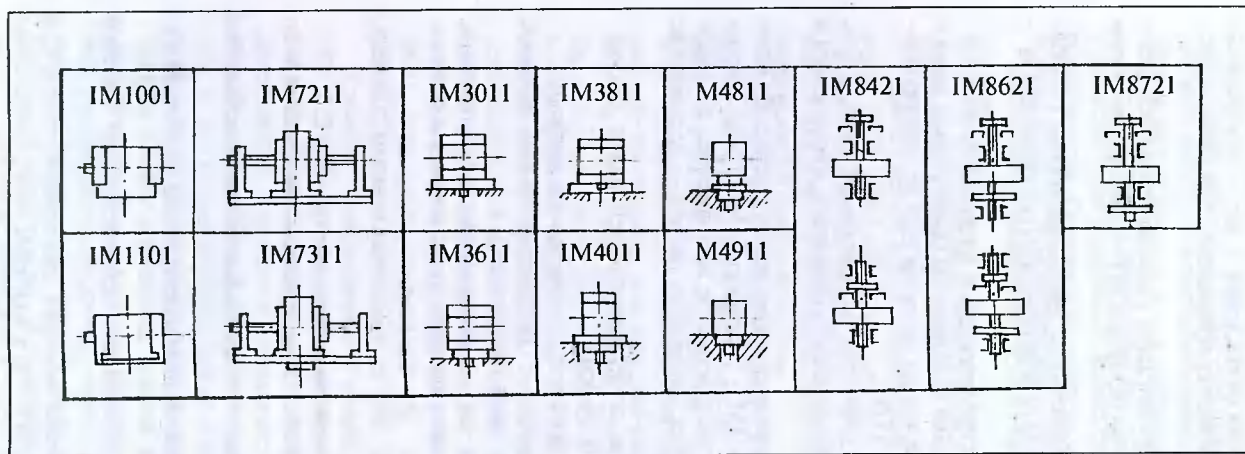


Рис. 1. Некоторые типы конструктивного исполнения электродвигателей по способу монтажа:

*a* — IM1001 — электродвигатель на лапах с двумя подшипниковыми щитами, горизонтального исполнения с одним цилиндрическим концом вала; *б* — IM1101 — то же на приподнятых лапах; *в* — IM7211 — электродвигатель с двумя стояковыми подшипниками на лапах, с фундаментной плитой и одним цилиндрическим концом вала; *г* — IM7311 — то же с приподнятыми лапами; *д* — IM3011 — электродвигатель вертикального исполнения без лап с двумя подшипниковыми щитами, из которых нижний, расположенный на стороне привода, снабжен фланцем, доступным с обратной стороны, с одним цилиндрическим концом вала; *е* — IM3611 — то же с фланцем, не доступным с обратной стороны; *ж* — IM3811 — то же с цокольным фланцем; *з* — IM4011 — электродвигатель вертикального исполнения без лап с двумя подшипниковыми щитами с фланцем на станине, доступным с обратной стороны; опорная плоскость фланца обращена к стороне привода, с одним цилиндрическим концом вала; *и* — IM4811 — то же с центрирующими заточками; *к* — IM4911 — то же с фланцем, не доступным с обратной стороны, с центрирующими заточками; *л* — IM8421 — электродвигатель с вертикальным валом, без маховика, с подпятником, расположенным над ротором, с двумя направляющими подшипниками по обеим сторонам ротора с одним цилиндрическим концом вала; *м, н* — IM8621 и IM8721 — то же с маховиком



способы монтажа электродвигателей высокого напряжения, установленных на электростанциях, показаны на рис. 1.

Условные обозначения исполнений концов вала электродвигателей расшифровываются следующим образом (4-я цифра):

- 0 — без конца вала;
- 1 — с одним цилиндрическим концом вала;
- 2 — с двумя цилиндрическими концами вала;
- 3 — с одним коническим концом вала;
- 4 — с двумя коническими концами вала;
- 5 — с одним фланцевым концом вала;
- 6 — с двумя фланцевыми концами вала;
- 7 — с фланцевым концом вала на стороне приводного механизма и цилиндрическим концом вала на стороне, противоположной приводу;
- 8 — прочие исполнения вала.

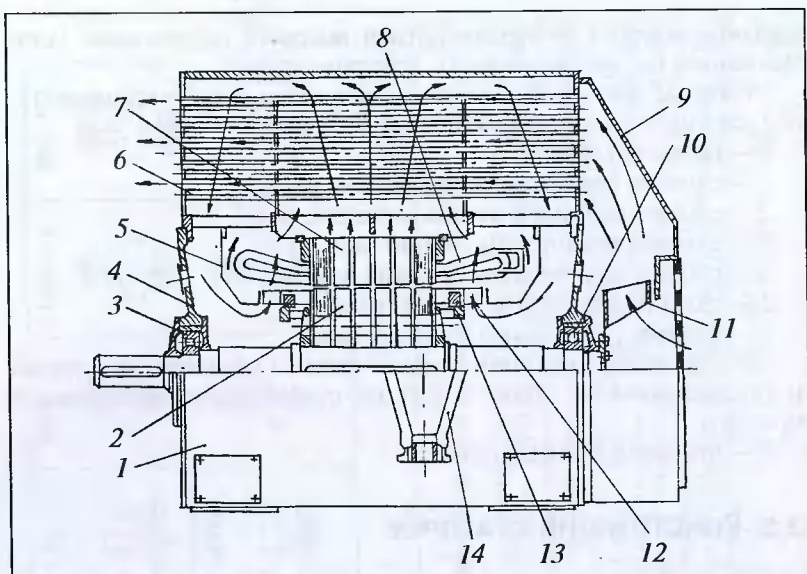
### 2.3. КОНСТРУКЦИЯ СТАТОРОВ

Статор высоковольтного электродвигателя представляет собой усиленный ребрами жесткости сварной корпус (рис. 2), в котором закреплен сердечник, набранный из лакированных листов или сегментов электротехнической стали. Сердечник разделен на пакеты, между которыми уложены листы с вентиляционными распорками, приваренными точечной сваркой.

В процессе сборки на заводе-изготовителе сердечник прессуется. Для передачи усилия прессовки на зубцы сегментов между нажимными кольцами и крайними пакетами установлены листы с нажимными пальцами, приваренными точечной сваркой. Крепление нажимных пальцев к тонким штампованным листам точечной сваркой недостаточно надежно. Поэтому в наиболее нагруженных электродвигателях применяют либо нажимные кольца с приваренными дуговой электросваркой нажимными пальцами, либо сварные нажимные гребенки. В этом случае при прессовке обеспечивается более равномерная опрессовка сердечника.

В отдельных конструкциях одно из нажимных колец выполняется как одно целое с полкой статора, что упрощает сборку сердечника. Корпус статора с обеих сторон закрыт торцевыми щитами.

Корпус статора вертикального электродвигателя имеет, как правило, круглую форму и выполнен сварным из листовой стали. Он состоит из горизонтально расположенных круглых фланцев, промежуточных рам, распорных ребер и цилиндрической обшивки с отверстиями для выхода нагретого воздуха (рис. 3).

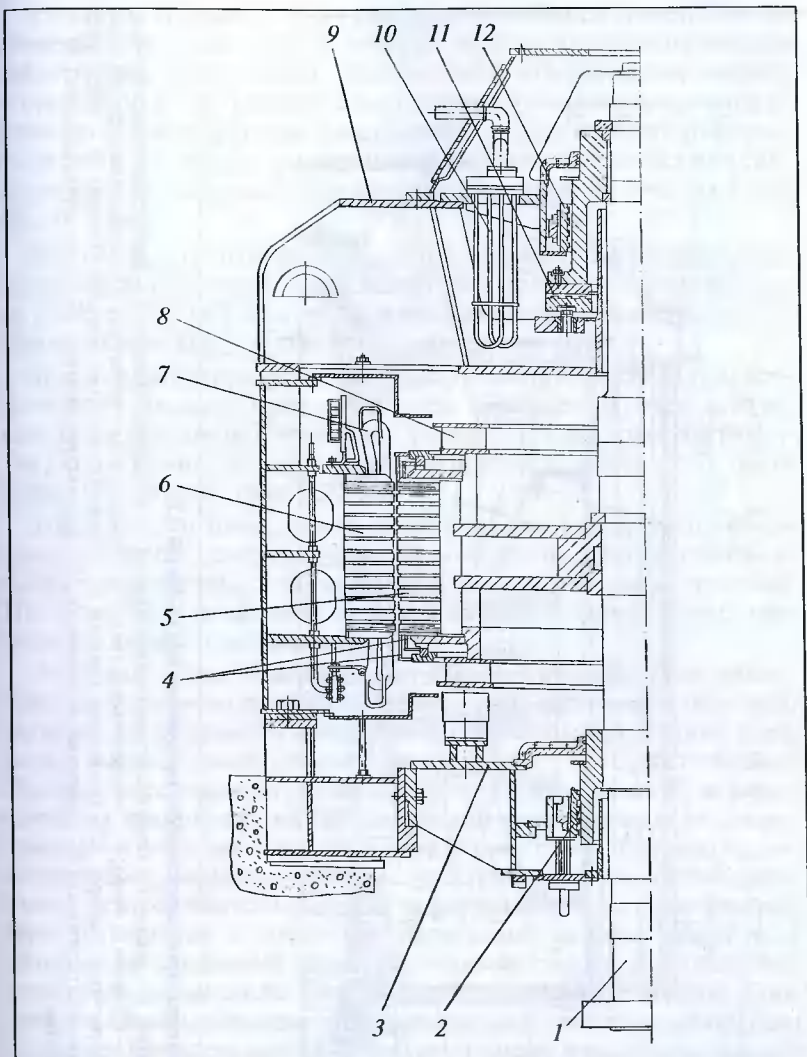


**Рис. 2. Электродвигатель ДАЗО 4-450Х-8У1:**

1 — корпус (станина); 2 — сердечник ротора; 3 — роликоподшипник; 4 — подшипниковый щит; 5 — диффузор; 6 — воздухоохладитель; 7 — сердечник статора; 8 — обмотка статора; 9 — кожух наружного вентилятора; 10 — шарикоподшипник; 11 — вентилятор наружной циркуляции; 12 — вентилятор внутренней циркуляции; 13 — короткозамкнутая обмотка ротора; 14 — коробка выводов

Расположение ребер, промежуточных рам и обшивки обеспечивает получение секционных камер для прохождения нагретого воздуха к охладителям — при замкнутом цикле вентиляции или к отверстиям в обшивке для выхода воздуха в окружающую среду — при разомкнутом цикле. Нижняя торцевая рама является опорной поверхностью, статор которой устанавливается на фундамент. К корпусу статора с обеих сторон прикреплены торцевые щиты. На верхнюю часть корпуса установлена грузонесущая крестовина.

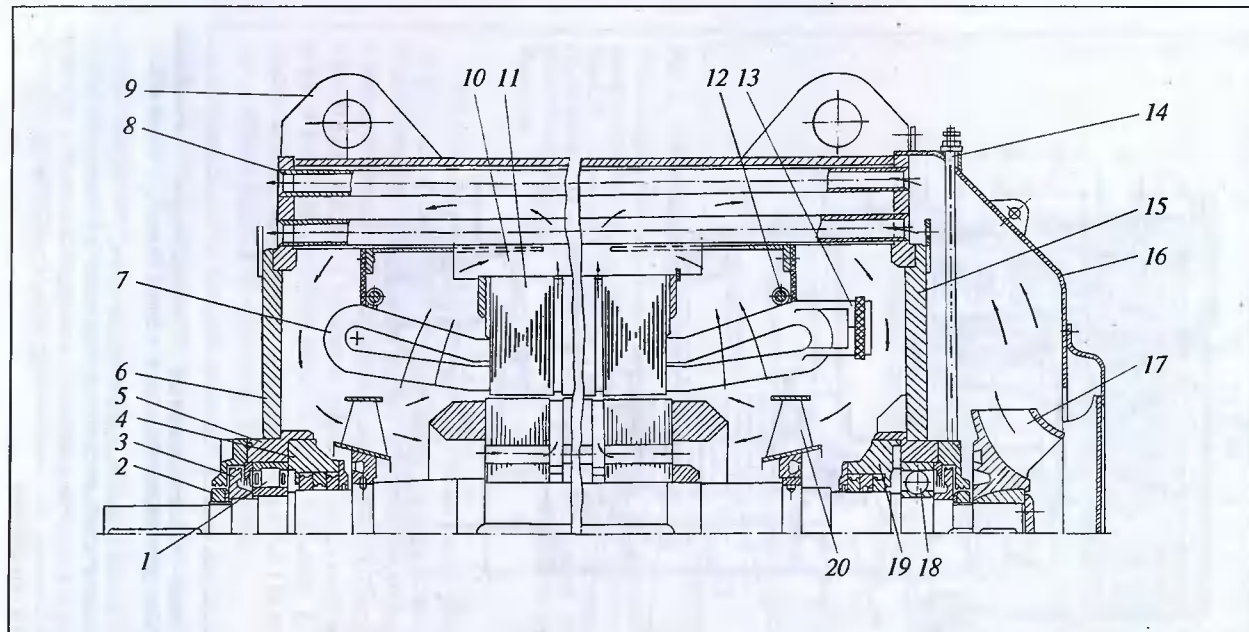
Сердечник статора синхронных и асинхронных электродвигателей состоит из штампованных сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм с выштампованными по внутреннему диаметру открытыми пазами для катушек обмотки, сегментов с вентиляционными распорками и концевых сегментов с нажимными пальцами. Сегменты собраны в пакеты и стянуты посредством нажимных фланцев и шпилек в корпусе статора.



**Рис. 3. Двухскоростной электродвигатель вертикального исполнения ДВДА-260/99-20-24У4 ( $P = 4000/2500$  кВт,  $n = 300/250$  мин<sup>-1</sup>,  $U = 6$  кВ):**

1 — вал ротора; 2 — нижний направляющий подшипник; 3 — нижняя крестовина; 4 — короткозамкнутая обмотка ротора с двойной беличьей клеткой; 5 — сердечник ротора; 6 — сердечник статора; 7 — обмотка статора; 8 — вентилятор; 9 — верхняя крестовина; 10 — маслоохладитель; 11 — подпятник; 12 — верхний направляющий подшипник





**Рис. 4. Электродвигатель взрывозащищенного исполнения BAO2-450LB-2Y:**

1 — роликоподшипник; 2 — гайка; 3 — маслосбрасывающее кольцо; 4 — узел взрывозащиты; 5 — корпус подшипникового узла; 6, 15 — щит; 7 — обмотка статора; 8 — воздухоохладитель; 9 — транспортная проушина; 10 — продольное ребро корпуса статора; 11 — сердечник статора; 12 — бандажное кольцо; 13 — схема соединений обмотки статора; 14 — масленка; 16 — кожух наружного вентилятора; 17 — наружный вентилятор; 18 — шарикоподшипник; 19 — узел взрывозащиты; 20 — внутренний вентилятор

Сегменты покрыты с обеих сторон лаком горячей сушки. Пакеты сердечника разделены между собой сегментами с вентиляционными распорками, образующими радиальные вентиляционные каналы шириной по 10 мм. Сегмент с вентиляционными распорками представляет собой сложенные два штампованных листа электротехнической стали, к которым приварены точечной сваркой полоски из специального нормализованного профиля двутаврового сечения  $4 \times 10$  или  $8 \times 10$  мм.

Концевые сегменты крайних пакетов выполняются с нажимными пальцами. В некоторых типах электродвигателей нажимные пальцы не прикрепляются к сегментам, а привариваются непосредственно к торцевой раме корпуса статора и к нажимному фланцу.

В неразъемном корпусе статора электродвигателя сердечник удерживается с помощью стальных шпилек, пропущенных через полузакрытые пазы в спинке сегментов и через отверстия в торцевой раме и наружном фланце. Нажимной фланец приварен прерывистым швом к верхней торцевой раме корпуса.

В крупных синхронных двигателях сердечник удерживается в корпусе статора посредством приваренных к рамам шихтовочных клиньев и установленных с обеих сторон стальных нажимных гребенок. При помощи стяжных шпилек пакеты активной стали статора спресованы в монолитный сердечник.

Активные части взрывозащищенных электродвигателей выполняются аналогично активным частям электродвигателей обычного исполнения. Взрывозащитная оболочка системы охлаждения и коробки выводов имеет свои особенности (рис. 4). Взрывозащитная оболочка электродвигателя образована станиной, подшипниковыми щитами и крышками с взрывозащитными соединениями. Места подвижных и неподвижных соединений деталей оболочки имеют взрывозащитные элементы, которые обеспечивают взрывозащищенность электродвигателя. Коробка выводов имеет взрывонепроницаемое исполнение и служит для размещения силовых зажимов, к которым присоединены выводы от обмотки статора. В коробке выводов размещены также зажимы цепей управления и защиты. Контактные зажимы проходят через специальные изоляторы из полости двигателя в полость коробки выводов и имеют взрывозащитное сопряжение с корпусом коробки выводов. В коробку выводов через специальное уплотнительное соединение вводится кабель для подключения к питающей сети.

Главной особенностью электродвигателя АВ-8000/6000УЗ является применение охлаждения водой пазовой части обмотки статора и сердечника статора.

Корпус статора электродвигателя АВ-8000/6000УЗ сварной, неразъемный, имеет ряд окон, обеспечивающих доступ к гидравлическим соединениям системы водяного охлаждения и фундаментным болтам. В собранном двигателе эти окна закрыты заглушками.

Сердечник статора состоит из 26 пакетов, между которыми расположены 25 рядов охлаждающих силуминовых сегментов. Пакеты сердечника собраны из отдельных сегментов холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

Активная сталь сердечника статора в запрессованном состоянии удерживается нажимными кольцами из немагнитного чугуна. Для предотвращения распушевки активной стали в зубцовой зоне крайних пакетов между нажимными кольцами и крайними сегментами сердечника установлены нажимные пальцы.

Особенностью статоров отдельных типов и серий электродвигателей является выполнение сердечника статора с обмоткой в виде законченного узла, устанавливаемого в электродвигатели при сборке (серии АТД2 и АТД4), применение для фиксации сердечника статора вместо нажимных колец крайних пакетов, склеенных из листов или сегментов электротехнической стали.

Обмотка статоров высоковольтных электродвигателей выполняется двухслойной и состоит из катушек, намотанных из прямоугольного медного провода марки ПСД или ПЭТВСД, имеющего изоляцию в виде оплетки из стекловолокна или эмалевостекловолокна.

Витковая и корпусная изоляция катушек обмотки статора ранее выполнялась из микаленты марки ЛМЧ-ББ класса нагревостойкости В. В настоящее время для витковой и корпусной изоляции катушек обмотки класса нагревостойкости В и F используются стеклослюдинитовые ленты с термореактивными связующими на основе эпоксидной смолы. Стеклослюдинитовая лента значительно дешевле натуральной шипаной слюды, применяемой для изготовления микаленты. Применение стеклослюдинитовой ленты повышает использование активных материалов за счет уменьшения толщины изоляции, так как термореактивная изоляция обладает большей механической и электрической прочностью. Стеклослюдинитовая изоляция на эпоксидных связующих имеет по сравнению с компаундированной микалентной изоляцией меньшую эластичность, что создает трудность при укладке обмотки в пазы статора вследствие возможности образования трещин.

В отдельных мощных высоковольтных электродвигателях обмотка статора выполняется из стержней, которые после укладки в пазы сердечника статора соединяются в катушечные группы. Стержни обмотки состоят из элементарных прямоугольных проводников, которые имеют транспозицию и в процессе изготовления промазаны це-

ментирующим составом, опрессованы и запечены. В качестве корпусной изоляции используют микаленту или стеклослюдинитовые ленты на термореактивных связующих.

Катушки в пазах сердечника статора удерживаются с помощью гетинаксовых или стеклотекстолитовых клиньев со скошенными краями. Для предотвращения перемещения лобовых частей обмотки вследствие электродинамических усилий, возникающих при пуске или коротком замыкании, они закреплены к одному или к двум изолированным бандажным кольцам, выполненным из стали круглого или квадратного сечения. В некоторых типах и сериях электродвигателей используют неметаллические бандажные кольца (АТД2 и др.). Бандажные кольца устанавливаются на изолированные стальные шпильки или кронштейны, прикрепленные к фланцам статора.

Для создания жесткой монолитной системы в форме кольца в лобовых частях между соседними сторонами катушек устанавливаются гетинаксовые или стеклотекстолитовые распорки и шнуровые бандажи в виде цепной вязки. Крепление межкатушечных соединений обмотки выполняется также с помощью шнура.

От обмотки статора к коробке выводов выводятся четыре или шесть концов гибкого кабеля. В первом случае нулевые выводы обмотки соединяются в звезду внутри корпуса статора и подключаются к четвертому выводу коробки выводов с литым чугуном или сварным стальным корпусом. Выводы обмотки статора с установленными на них наконечниками подсоединяются к шпилькам, установленным в центральные отверстия опорных фарфоровых изоляторов, расположенных в коробке выводов.

Выводы обмотки на шесть концов выполняются в виде кабелей или медных изолированных шин, закрепленных на корпусе статора с помощью изоляционных деталей и стальных шпилек.

Для обеспечения наиболее экономичных режимов работы насосов и вентиляторов некоторые электродвигатели имеют две частоты вращения. Для этой цели у электродвигателей ДВДА и ДАЗО 2 в сердечник статора уложены две отдельные электрически не связанные обмотки. Обе обмотки двухслойные и изготовлены из жестких катушек, уложенных в одном пазу. По конструктивным соображениям размеры катушек и толщина изоляции обеих обмоток одинаковые. Обмотки различаются сечением меди и количеством витков.

Серия вертикальных асинхронных электродвигателей ДВДА 2 имеет полностью переключаемые обмотки статоров (рис. 5). Для электродвигателей ДВДА 2 с определенными соотношениями мощностей и частот вращения оптимальная конструкция и необходимые механические характеристики получают при использовании схем, в которых при одной частоте вращения в схему включены все катушки, а



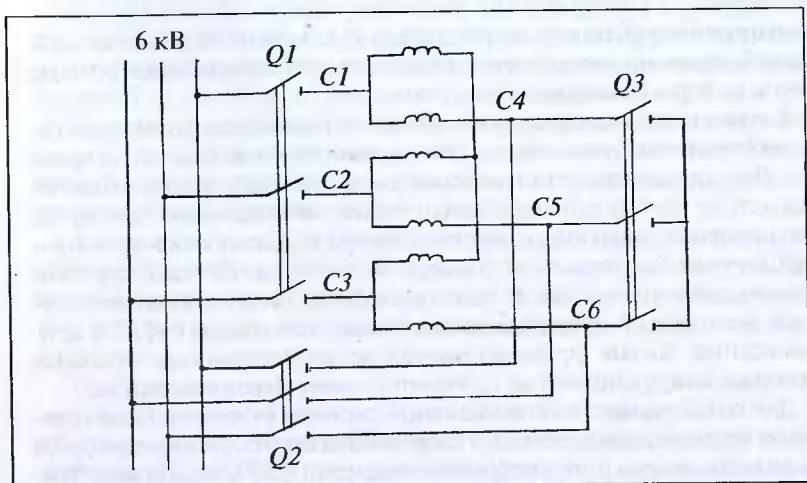


Рис. 5. Схема подключения обмотки статора электродвигателей ДВДА 2 к питающей сети (I режим — выключатели  $Q1$  и  $Q3$  замкнуты,  $Q2$  разомкнут, II режим —  $Q2$  замкнут,  $Q1$ ,  $Q3$  — разомкнуты)

при другой — часть катушек исключается из схемы, при этом оставшиеся катушки распределены по фазам и группам.

В двухскоростных электродвигателях типа 2АДО использована двухслойная петлевая полюснопереключаемая обмотка с фазной модуляцией числа пар полюсов со схемой внешней коммутации  $YYY/YYY$ , которая заменяет существующие отдельные обмотки и содержит три трехфазные звезды, соединенные параллельно. Она технологична, имеет минимальное число выводов, равное шести, что дает возможность использовать только два высоковольтных выключателя. Обмотка симметрична при обоих числах полюсов относительно питающей сети.

## 2.4. КОНСТРУКЦИЯ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ И СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В зависимости от мощности, частоты вращения, конструктивного исполнения (вертикального или горизонтального расположения вала), типа двигателя (асинхронный или синхронный) роторы имеют различное конструктивное исполнение.

Короткозамкнутые обмотки асинхронных электродвигателей выполняются в виде клеток из голых стержней и короткозамыкающих

колец из меди и ее сплавов. Для улучшения пусковых характеристик электродвигателей используют конструкции клеток, представленные на рис. 6. Ротор асинхронного электродвигателя состоит из вала, остова ротора и сердечника, короткозамкнутой обмотки и нажимных шайб. Вал выполнен из стальной поковки. Остов ротора сварной из листовой стали. Сердечник ротора состоит из пакетов листовой электротехнической стали, разделенных между собой вентиляционными распорками. Обмотка ротора состоит из медных стержней, соединенных между собой медными короткозамыкающими кольцами. На короткозамыкающих кольцах могут быть установлены стальные бандажные кольца.

Сердечник ротора электродвигателя АВ-8000/6000УЗ набран из трех пакетов листовой стали марки Ст. 30 толщиной 0,5 мм и удерживается в собранном виде нажимными кольцами, которые, в свою очередь, закреплены шпонкой.

Обмотка ротора выполнена из полых трапецеидальных стержней из латуни с коническими наконечниками, вставными в отверстия медных короткозамыкающих колец припоем марки ПСр-45 (рис. 6, е). Полости короткозамыкающих колец соединены с центральным отверстием вала посредством радиально расположенных трубок, один конец которых закреплен в кольце гайкой, а второй может перемещаться в уплотняющем гнезде вала для снятия напряжений при температурных деформациях. Стержни обмотки ротора с обеих сторон сердечника поджаты к боковым стенкам паза встречными клиньями. Клинья от аксиального перемещения фиксируются кольцами.

На короткозамыкающие кольца насажены бандажные кольца. Для снижения потерь от потоков рассеяния бандажные кольца вы-

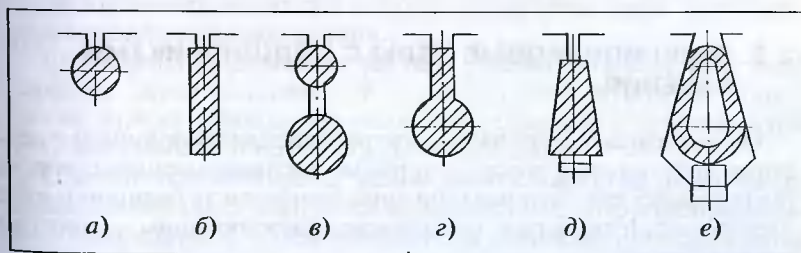


Рис. 6. Типы исполнений короткозамкнутых обмоток асинхронных электродвигателей:

а — одинарная клетка с круглыми стержнями; б — клетка с высокими прямоугольными стержнями; в — двойная клетка с круглыми стержнями; г — клетка со стержнями колбовидного профиля; д — клетка с трапецеидальными стержнями; е — клетка с трапецеидальными полыми стержнями

полнены из немагнитной стали. Короткозамыкающие кольца установлены на центрирующих кольцах, расположенных на валу ротора с обеих сторон сердечника. На вал ротора насажены два вентилятора, обеспечивающие необходимый расход охлаждающего воздуха.

Короткозамкнутая обмотка ротора вертикальных электродвигателей типа ДВДД состоит из двух рядов круглых стержней, каждый ряд которых замкнут по концам медными кольцами. Стержни наружной пусковой обмотки латунные, стержни рабочей обмотки медные (рис. 6, в).

У синхронного электродвигателя СДМЗ 2 магнитное колесо выполнено сварным из листовой стали. Обмотка возбуждения состоит из отдельных катушек, изготовленных из полосовой меди, намотанной на ребро. Витки катушки изолированы между собой одним или двумя слоями асбестовой бумаги, от сердечников — прессованными из асботекстолита уголками и листовым стеклотекстолитом.

Сердечники полюсов набраны из листовой стали толщиной 1,2 мм и крепятся к ободу магнитного колеса шпильками. Крайние листы сердечников выполнены из стали толщиной 10 мм. Сердечник полюса стянут в сплошной пакет заклепками. В пазах, выштампованных в башмаке сердечника, уложена демпферная обмотка, состоящая из медных и латунных стержней, замкнутых медными сегментами. Все сегменты полюсов соединены между собой внахлест, образуя по одному кольцу с каждой стороны ротора.

Щеткодержатели выполнены из силумина и снабжены пружинами, обеспечивающими регулировку давления и надежное прилегание щеток к поверхности контактных колец. Завод-изготовитель рекомендует графитные щетки марки Г-3 размером 20 × 32 × 60 мм. Стальные контактные кольца имеют подвесное исполнение.

## **2.5. ПОДШИПНИКОВЫЕ УЗЛЫ С ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ**

Опоры вращающейся части электродвигателя воспринимают действия сил тяжения ротора; нагрузок, воспринимаемых ротором; инерционных сил, возникающих при неотбалансированном роторе электродвигателя, и сил, вызываемых односторонним магнитным притяжением.

Роль поддерживающих опор в электродвигателях с горизонтальным валом выполняют подшипники, в вертикальных электродвигателях — подпятники. Подшипники и подпятники могут быть скольжения или качения. Подшипники качения применяются обычно в электродвигателях до 15 — 17-го габаритов. В более круп-



ных электродвигателях устанавливаются, как правило, подшипники скольжения.

При одинаковой грузоподъемности подшипники качения имеют по сравнению с подшипниками скольжения преимущество вследствие меньшего трения в момент пуска и при умеренных частотах вращения, меньших осевых габаритов, относительной простоты обслуживания и подачи смазки. При применении подшипников качения в значительно большей степени удовлетворяются требования взаимозаменяемости и унификации элементов узла: при выходе подшипников качения из строя его легко заменить новым, поскольку габариты и допуски на размеры посадочных мест строго стандартизированы, в то время как при износе подшипников скольжения приходится восстанавливать рабочую поверхность вкладыша и шейки вала, менять или вновь перезаливать баббитом вкладыш подшипника, растачивать и пришабривать под требуемые размеры, выдерживая необходимый зазор между поверхностями вала ротора и подшипника.

Недостатки подшипников качения заключаются в относительно больших радиальных размерах и большем сопротивлении вращению при работе на высоких частотах вращения по сравнению с подшипниками скольжения, работающими в условиях жидкостного трения, когда поверхности шейки вала и вкладыша разделены тонким слоем смазывающей жидкости. На скоростные характеристики подшипников качения влияет трение скольжения, существующее между сепаратором, отделяющим тела качения одно от другого, и рабочими элементами подшипника. Поэтому при изготовлении высокоскоростных электродвигателей, как правило, устанавливают подшипники скольжения.

При горизонтальном расположении вала для большинства видов нагрузки электродвигателей наиболее выражены силы, действующие в радиальном направлении.

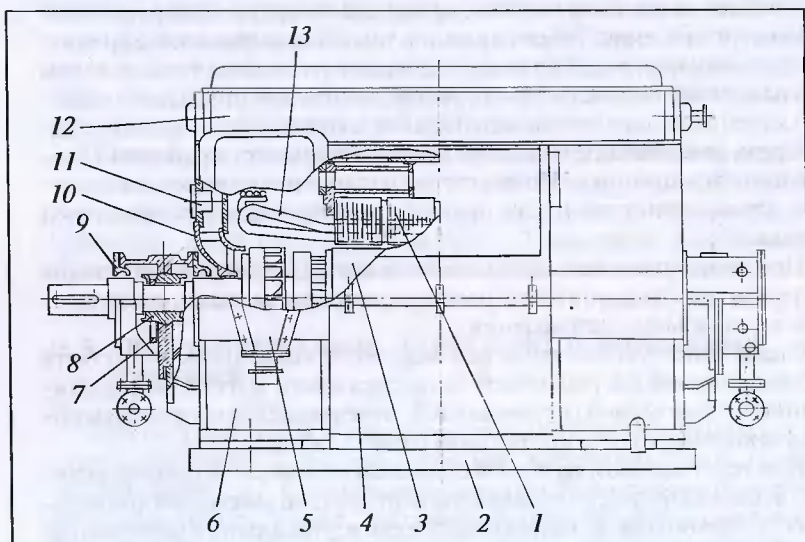
Силы, действующие вдоль оси вала электродвигателя, могут быть вызваны осевой составляющей одностороннего магнитного притяжения, а также осевой составляющей, передающейся через полумуфту (в зависимости от конструкции) от механизма.

При вертикальном расположении вала основной нагрузкой является осевая нагрузка, направленная вертикально вниз и воспринимаемая подпятником. В электродвигателях вертикального исполнения кроме подпятника установлены направляющие подшипники. Таких подшипников обычно бывает два. Направляющие подшипники скольжения не могут воспринимать осевых нагрузок. Радиально-упорные шарикоподшипники могут нести значительную осевую нагрузку, и поэтому в ряде случаев они зачастую используются одновременно в качестве направляющих и упорных.

В электродвигателях с подшипниками качения и горизонтальным валом применяется, в основном, следующая конструктивная схема их крепления: со стороны привода — подвижная опора, со стороны свободного конца вала — фиксирующая опора (см. рис. 2). Существует большое число конструктивных исполнений опор с подшипниками качения. По исполнению они могут быть сведены к двум основным конструктивным вариантам: наружные кольца подшипников монтируются непосредственно в щит или подшипники устанавливаются в капсулу, а капсулу — в щит. Бескапсульное исполнение повышает жесткость конструкции вследствие отсутствия промежуточной детали.

## 2.6. ПОДШИПНИКОВЫЕ УЗЛЫ С ПОДШИПНИКАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

В электродвигателях более 15 — 17-го габаритов применяют, как правило, подшипники скольжения. Подшипники скольжения могут



**Рис. 7. Электродвигатель 4АЗМ-1600/6000УХЛ4 с встроенными подшипниками скольжения:**

1 — сердечник статора; 2 — плита монтажная; 3 — ротор; 4 — кожух; 5 — коробка выводов; 6, 10 — щит; 7 — кольцо смазочное; 8 — вкладыш подшипника; 9 — маслоуловитель наружный; 11 — фильтр; 12 — воздухоохладитель; 13 — обмотка статора

монтироваться либо непосредственно в щитах — щитовые (встроенные) подшипники (рис. 7), либо на фундаментных плитах — выносные (стояковые) подшипники. Подшипники скольжения можно разделить на три основных типа: а) с жесткой посадкой вкладыша; б) с самоустанавливающимся сферическим вкладышем; в) с сегментным вкладышем. К первому типу относится нормализованная серия подшипников ПК (с кольцевой смазкой) и КПК (с комбинированной смазкой: кольцевой и принудительной). Эти подшипники применяются в тихоходных электродвигателях с коротким валом. Подшипники типов ПК и КПК состоят из корпуса, крышки, разъемного вкладыша, внутренняя поверхность которого заливается баббитом Б-16 и Б-83, лабиринтных уплотнений и свободно вращающихся на валу смазочных колец. На подшипниках с принудительной смазкой дополнительно установлен трубопровод для принудительной смазки. Лабиринтные уплотнения предохраняют подшипник от вытекания масла и от попадания в него механических частиц. Они изготавливаются разъемными.

## **2.7. СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Большинство электродвигателей, как правило, имеет косвенное воздушное охлаждение с самовентиляцией или принудительной вентиляцией. Способ вентиляции в значительной степени определяется конструктивным исполнением электродвигателя.

Система вентиляции электродвигателей А4 и ДАЗО 4 (см. рис. 2) — согласная, радиальная. В электродвигателях типа А4 забор воздуха осуществляется через окна в торцах кожуха, а выброс — через боковые окна. Поступающий в электродвигатель воздух разделяется на две струи. Одна часть через аксиальные каналы ротора поступает в радиальные каналы ротора и статора и далее в кожух. Другая часть воздуха нагнетается вентиляционными элементами в зону лобовых частей, охлаждает лобовые части и крайние пакеты сердечников статора и ротора. Выходя из зоны лобовых частей, воздух смешивается с воздухом, выходящим из радиальных каналов статора.

Внутренние системы вентиляции в электродвигателях ДАЗО 4 и А4 аналогичны. Циркуляция осуществляется по замкнутому циклу. Нагретый воздух поступает в воздухоохладитель. Воздух наружного цикла вентиляции забирается из окружающего пространства с помощью наружного вентилятора, проходит по трубам воздухоохладителя и выбрасывается в окружающую среду.

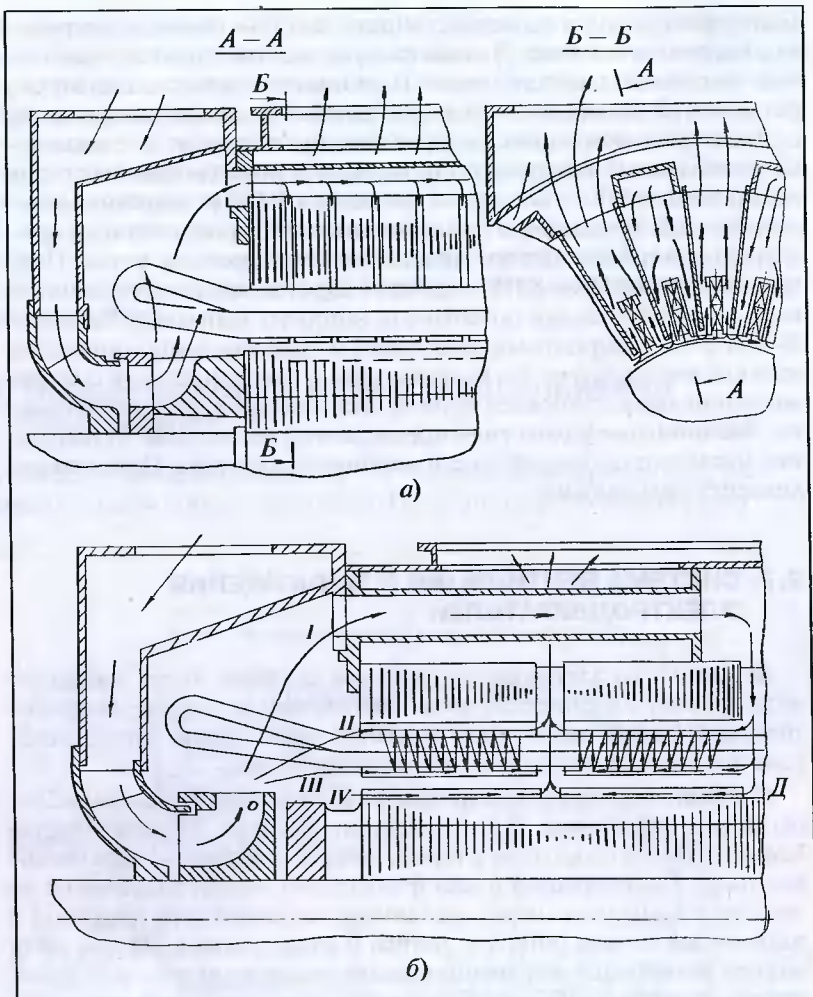


Рис. 8. Система охлаждения электродвигателей серии АТД 4 мощностью 315 – 500 кВт (а) и 630 – 1600 кВт (б)

Система охлаждения электродвигателей серии АТД4 мощностью 315 – 500 кВт радиально-тангенциальная (рис. 8). Охлаждающий воздух из зоны лобовых частей поступает в воздухопроводы, расположенные по наружной поверхности сердечника через одно пазовое деление. Из воздухопроводов воздух проходит через радиальные каналы и



через воздушный зазор между ротором и статором сначала поступает в соседние радиальные каналы, а затем — в направлении к спинке сердечника и в воздухоохладитель или выбрасывается наружу в окружающую среду (для электродвигателей с разомкнутым циклом вентиляции).

Система охлаждения электродвигателей мощностью 630 — 1600 кВт симметричная аксиально-радиальная, нагнетательная. Средним радиальным вентиляционным каналом статор разделен на две симметричные по вентиляции части. Вентиляторы забирают воздух из камеры щитов и нагнетают его в зону лобовых частей обмотки статора. Далее охлаждающий воздух разветвляется на потоки. Первый поток через воздухопроводы направляется в средний радиальный канал сердечника статора, входит в подпазовые каналы сердечника и проходит далее через систему щелевых каналов, отводя тепло от поверхности обмотки статора, затем выходит через радиальный канал на периферию сердечника статора.

Второй поток выходит в подпазовые каналы сердечника, охлаждает часть обмотки, аналогично первому потоку, и через радиальный канал выходит на периферию активной стали статора.

Третья часть входит в зазор между ротором и статором и охлаждает наружную поверхность сердечника ротора и зубцовую зону сердечника статора. Для охлаждения зубцовой зоны сердечника ротора в зубцах выполнены аксиальные каналы, по которым осуществляется движение воздуха со стороны вентилятора и со стороны среднего радиального канала сердечника статора.

Охлаждение воздуха, циркулирующего внутри (для электродвигателей с замкнутой системой вентиляции), осуществляется в воздухоохладителе. В торцах статора установлены фильтры, которые служат для очистки воздуха, поступающего в электродвигатель для компенсации утечек через неплотности в зонах повышенного давления.

Системы охлаждения электродвигателей 2000 — 6300 кВт и 630 — 1600 кВт аналогичны.

Электродвигатели АВ-8000/6000УЗ имеют комбинированную систему охлаждения: непосредственное охлаждение (наиболее интенсивное) обмотки ротора водой и косвенное охлаждение обмотки и сердечника статора и ротора водой, а лобовых частей — воздухом. В качестве основного охлаждающего агента используется турбинный конденсат, поступающий в систему от отдельного электронасоса, который обеспечивает необходимый регулируемый расход конденсата и напор.

К статору вода подается через патрубки подачи и слива, расположенные в нижней части корпуса.

В обмотку ротора вода поступает через водопровод. Непосредственное охлаждение осуществляется прокачиванием воды через параллельно расположенные полые стержни обмотки ротора и короткозамыкающие кольца. В центральном отверстии вала ротора проходит труба, которая с помощью специального уплотнения разделяет камеры холодной и подогретой воды. Охлаждающая вода поступает в эту трубу через неподвижную самоустанавливающуюся втулку с фторопластовым уплотнением.

Косвенное водяное охлаждение сердечника и пазовой части обмотки статора осуществляется силуминовыми сегментами, расположенными между пакетами сердечника. Внутри силуминовых сегментов залиты медные трубки, по которым проходит охлаждающая вода.

Воздушное охлаждение лобовых частей обмотки статора осуществляется при помощи центробежных вентиляторов, расположенных на валу с обеих сторон ротора. Для охлаждения нагретого воздуха, смывающего лобовые части обмотки статора, используется воздухоохладитель, расположенный в камере под фундаментом двигателя. Охлажденный воздух из воздухоохладителя поступает к вентиляторам, затем омывает лобовые части с обеих сторон обмотки статора и по периферии сердечника поступает в воздуховод, по которому возвращается в воздухоохладитель.

Электродвигатели серии СДМЗ 2 имеют замкнутую систему вентиляции, в состав которой входит водо-воздушный охладитель, расположенный в верхней части корпуса статора. Циркуляция охлаждающего воздуха в электродвигателе осуществляется вентилятором, имеющим индивидуальный электропривод. Охлаждение нагретого воздуха осуществляется в односекционном воздухоохладителе. Электродвигатели имеют встречную аксиально-радиальную систему вентиляции, при которой охлажденный в охладителе воздух поступает в электродвигатель двумя потоками (радиальным и аксиальным). Радиальный поток воздуха поступает в камеру корпуса статора, проходит радиальные каналы, попадает в межполюсные окна, где смешивается с аксиальным потоком. Аксиальный поток воздуха входит в камеру схемных соединений со стороны контактных колец, попадает в межполюсные окна, где смешивается с радиальным потоком.

Для обеспечения устойчивой работы схемы вентиляции и улучшения обдува торцов катушек ротора на выходе из межполюсных окон, на стороне контактных колец расположен компенсатор напора ротора. Нагретый воздух из электродвигателя направляется в воздухоохладитель.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# Эксплуатационная надежность электродвигателей, отдельных узлов и систем

### 3.1. ХАРАКТЕРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Надежная работа электродвигателей на электростанциях определяет надежность работы всего энергоблока в целом. Эксплуатационная надежность электродвигателей определяется конструкцией и качеством изготовления, условиями эксплуатации, периодичностью и качеством ремонта и др. Характер повреждений и причины отказов электродвигателей в процессе эксплуатации определяет степень надежности основных его узлов: обмоток статора и ротора, подшипников и др. Используя данные об отказах электродвигателей, определяют наименее надежные элементы конструкции и разрабатывают мероприятия по повышению их надежности и долговечности, увеличению межремонтного периода и т.п., а также планируют сроки технического обслуживания и ремонта, периодичность и объем испытаний (электрических, гидравлических, тепловых, механических), номенклатуру запасных частей, расход электротехнических материалов для ремонта и др.

**Повреждения обмоток статоров.** Срок службы корпусной и витковой изоляции обмоток статоров электродвигателей 6 кВ составляет 20 – 25 лет. Однако в процессе эксплуатации под действием различных факторов (электрической, тепловой и механических нагрузок, трения, вибрации, воздействия влаги, масла и агрессивных примесей) происходит старение изоляции и срок ее службы может значительно сократиться. Влияние этих факторов зависит от места установки, режима работы и конструктивного исполнения электродвигателей.



Отказ обмотки статора происходит при работе электродвигателя или при проведении профилактических испытаний. Эксплуатационные высоковольтные испытания корпусной изоляции обмотки статора позволяют судить о ее состоянии; так как при этом испытания витковой изоляции не производится, то ремонтный персонал не получает данных о ее состоянии. Образовавшееся витковое замыкание приводит к сильному локальному нагреву и как следствие — к тепловому пробое корпусной изоляции.

С повышением температуры обмотки статора происходит интенсивное старение витковой и корпусной изоляции. Она теряет эластичность и становится хрупкой. Местные перегревы могут возникнуть из-за дефектов активной стали и некачественных паяк. При оценке срока службы изоляции принимают, что для изоляции класса В срок ее службы сокращается вдвое с повышением температуры обмотки на 10 °С.

На электродвигателях типа ДАЗО имело место разрушение изоляции выводных проводников, соединяющих обмотку с выводами, вследствие их интенсивного нагрева из-за недостаточного сечения меди. Под действием повышенной температуры изоляция стала хрупкой. Повреждению способствовали также перемещения проводников под действием электродинамических усилий (например, при пусках электродвигателя) из-за недостаточно жесткого их крепления в корпусе статора.

Коммутационные перенапряжения возникают при включениях и отключениях электродвигателей. Вследствие этого на изоляцию катушек, расположенных ближе к выводам, действует большее напряжение, чем при нормальном режиме. Повреждение изоляции обмотки статора может происходить при длительной работе электродвигателя на двух фазах.

Однофазные замыкания на землю в сети 6 кВ собственных нужд также могут явиться причиной пробоя изоляции обмоток статоров нескольких электродвигателей, питающихся от этой сети, так как их изоляция оказывается при этом под линейным напряжением, превосходящим фазное в 1,73 раза.

К пробое изоляции может также привести местное или общее увлажнение изоляции и наличие агрессивных примесей в окружающей среде: паров кислот, щелочей, масла и др. Увлажнение обмотки статора может произойти из-за нарушения герметичности воздухоохладителей типа вода — воздух, появления воды на наружных поверхностях трубок воздухоохладителей, вызванного конденсацией паров при подаче в воздухоохладитель слишком холодной воды; нарушения герметичности системы непосредственного водяного охлаждения; протечек арматуры тепломеханического оборудования и

сальниковых уплотнений насосов; попадания атмосферных осадков в электродвигатель и коробку выводов; попадания воды в систему вентиляции; при гидроуборке помещений.

В связи с маневренностью энергоблоков, работающих в режимах регулирования нагрузки, и с остановами в резерв на выходные дни значительно увеличилось количество пусков электродвигателей собственных нужд, что отрицательно сказалось на состоянии крепления обмотки в пазовой и лобовой частях. При пуске электродвигателей с короткозамкнутым ротором возникают толчки тока, в 5 — 7 раз превышающие его номинальное значение, которые создают в обмотке большие динамические усилия. Эти усилия (до 50-кратного значения номинальных) сказываются преимущественно на лобовых частях обмотки статора, вызывая их деформацию и появление местных дефектов изоляции в виде трещин. Дефекты чаще образуются в местах выхода секций из паза, где возникают наибольшие механические напряжения в изоляции при деформации лобовых частей. Еще большие электродинамические усилия возникают при пусках электродвигателей с приводом, вращающимся в обратном направлении (например, вследствие пропуска шибберов, задвижек и др.).

Недостаточно жесткое крепление отдельных элементов обмотки статора электродвигателей, работающих в режимах частых пусков, приводит к усталостным повреждениям меди проводников катушечных переемычек, выводов и др. Усталостные трещины появляются без заметной пластической деформации. Анализ многочисленных изломов межкатушечных переемычек обмотки статора электродвигателей типов ДАЗО-13-50-4, СДМЗ-20-49-60 и АНЗ-16-44-12 показывает, что профиль излома состоит из двух четко выраженных областей: одной — с грубой шероховатой кристаллической поверхностью, являющейся усталостной зоной, другой — с гладкой бархатистой поверхностью, являющейся зоной мгновенного разрушения. Одна из причин, способствующая этому процессу, — изменение структуры меди вследствие отклонения технологического режима пайки меди медно-фосфористым припоем. Поэтому при перемотках обмоток статоров с использованием старой меди (замена корпусной и витковой изоляции) необходимо тщательно контролировать и осматривать выводные концы катушек и не допускать пережога меди при пайке.

Некачественный ремонт или технически необоснованное увеличение межремонтного периода приводит к резкому ухудшению состояния крепления обмотки. В процессе эксплуатации при работе электродвигателя в аномальном режиме могут возникнуть необратимые деформации обмотки, вызывающие большие повреждения и необходимость ее полной перемотки с заменой изоляции. Амплитуды колебаний и перемещений элементов обмотки при ослаблении ее

крепления увеличиваются, что ведет к дальнейшему ослаблению и обрыву шнуровых бандажей, ослаблению и выпадению подклиновых прокладок и пазовых клиньев, деформации бандажных колец, перетиранию изоляции в местах контакта с активными частями и деталями крепления.

В процессе эксплуатации иногда повреждается корпусная изоляция катушек в пазовой части из-за некачественной шихтовки сердечника статора, если отдельные острые кромки сегментов активной стали выступают в паз при выкрашивании отдельных листов (особенно крайних пакетов). Это происходит из-за того, что лист стали, вибрируя в переменном магнитном поле, перерезает изоляцию до меди. Механические повреждения изоляции обмотки статора происходят также вследствие попадания посторонних предметов в электродвигатель.

**Повреждения активной стали статора.** Распространенный дефект стали — ослабление ее прессовки. Характерным признаком дефектных мест является налет пыли кирпичного цвета (следы контактной коррозии). Из-за повышенной вибрации ослабленных сегментов пакета происходит излом лепестков стали у основания зубца, истирание лаковой пленки и местный нагрев, вызывающий оплавление участка стали.

Перегрев и оплавление активной стали статора может вызвать попадание посторонних металлических предметов в пазовую часть, появление заусенцев, а также механические повреждения расточки статора от задевания ротора. При пробое изоляции катушек обмотки статора в пазовой части образующейся дугой оплавляется активная сталь, увеличивая зону повреждения и, соответственно, объем восстановительного ремонта.

У синхронных электродвигателей типов СДСЗ и СДМЗ иногда обрываются нажимные пальцы активной стали статора и дистанционные распорки пакетов, вследствие их недостаточного крепления. Дефект приводит к местному ослаблению сердечника и повреждению обмотки.

**Повреждения короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей.** В электродвигателях типов АНЗ, ДАЗО, А, АЗ наиболее часто повреждается беличья клетка (трещины в стержнях и их обрыв) из-за ослабления стержней в пазу и нарушения контакта в местах пайки стержня с короткозамыкающими кольцами вследствие роста вибрации и знакопеременных деформаций стержня. Своевременно не обнаруженная трещина, прогрессируя, приводит к надлому стержня, который под действием центробежных сил изгибается и обламывается, повреждая изоляцию лобовых частей обмотки статора.

Вследствие возникшего небаланса увеличивается вибрация электродвигателя. Трещины и некачественные пайки стержней увеличивают активное сопротивление обмотки ротора, ухудшают пусковые характеристики и нарушают нормальную работу электродвигателя.

Алюминиевые короткозамкнутые обмотки электродвигателей типа АНЗ повреждаются из-за недостаточной механической прочности в связи со значительным повышением температуры обмотки. После замены алюминиевых обмоток медными, выполненных по рекомендации завода-изготовителя, повреждений не наблюдалось.

Низкая надежность обмоток роторов электродвигателей типа АЗ-12-52-4 — результат завышенного технологического зазора между стержнями ротора и пазами, а также следствие частых и тяжелых пусков электродвигателя, вызывающих значительные термомеханические напряжения в элементах обмотки. Повреждения короткозамкнутых роторов случаются при включении электродвигателей, вращающихся в момент пуска в обратную сторону.

У электродвигателей типа АТД имеет место ослабление посадки бандажных колец на короткозамыкающие кольца из-за недостаточных натягов (по сравнению с чертежными) при изготовлении или ремонте бандажного узла. Дефект прогрессирует при работе, так как бандажное кольцо разбивает посадочное место короткозамыкающего кольца из-за увеличивающейся вибрации.

На электродвигателях типа ДАЗО-2-18-59-10У1 иногда образуются трещины в местах приварки ребер к валу ротора. Прогрессируя, эти трещины развиваются, занимая по окружности дугу до  $340^\circ$ , вызывая резкое нарастание вибрации. На электродвигателе типа АВ-8000/6000УЗ поломка вала ротора происходит после заклинивания гидромуфты, соединяющей электродвигатель с насосом.

**Повреждение роторов синхронных электродвигателей.** Для пусковых клеток синхронных электродвигателей характерны те же повреждения, что и у короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных электродвигателей. Кроме того, случаются нарушения контакта между сегментами пусковой клетки из-за некачественного лужения контактных поверхностей сегментов, вызывающего окисление и отслаивание полуды.

Пробой изоляции обмотки ротора наступают из-за перетирания корпусной изоляции катушкой полюса при неплотной посадке ее на сердечник. Неплотность посадки происходит из-за недостаточной толщины изоляционной прокладки (шайбы), а также из-за самоотвинчивания болтов крепления полюса к магнитному колесу. При значительном самоотвинчивании болтов (на величину, большую чем односторонний воздушный зазор) полюсной башмак может повре-



дить активную сталь и обмотку статора, нарушить межполюсное соединение, что приведет к разрыву цепи и потере возбуждения. К этому также приводит перегорание межполюсной перемычки вследствие некачественной пайки. Не закрепленная на сердечнике катушка может вызвать витковое замыкание.

**Повреждение подшипников скольжения.** У электродвигателей с кольцевой смазкой повышение температуры выше допустимой и выплавление баббита могут произойти в результате медленного или полного прекращения вращения смазочных колец, неудовлетворительной работы скребков, из-за низкого уровня масла в подшипнике, применения более пугстого масла по сравнению с рекомендуемым заводом-изготовителем. Медленное вращение колец или их полная остановка может произойти из-за нарушения правильной геометрической формы колец (овальности, искривления колец или забоины).

Перегревы подшипников и выплавление баббита в результате осевого давления ротора на подшипники могут произойти в связи с недостаточным осевым разбегом ротора, неправильной установкой электродвигателя и приводного механизма в осевом направлении, а также износа полумуфт. Повышенная вибрация, некачественная центровка валов и неравномерность воздушного зазора также могут быть причиной повышенного нагрева.

Присутствие в масле посторонних примесей (пыли, ржавчины, шлака от сварки), обводнение масла, разъедание шейки вала подшипниковыми токами из-за нарушения изоляции подшипников, плохо подогнанный вкладыш, а также плохо отшлифованная шейка вала могут вызвать увеличение температуры и выплавление баббита. В электродвигателях со смазкой под давлением перегревы и выплавление баббита происходят при недостаточной подаче масла, например из-за засорения маслопроводов, масляного фильтра и при неисправностях маслонасоса.

**Неисправность подшипников качения.** Срок службы и надежность подшипников качения электродвигателей в процессе эксплуатации зависят от вибрации ротора, качества центровки и подгонки муфт, запыленности, влажности, наличия агрессивных примесей в окружающей среде, температуры подшипников, типа применяемой смазки и периодичности ее замены, качества технического обслуживания и соблюдения технологии ремонта.

Подшипниковые узлы с подшипниками качения не всегда оснащены аппаратурой для теплового и вибрационного контроля. Поэтому эксплуатационный и ремонтный персонал имеет ограниченную информацию о состоянии подшипникового узла.



Основными неисправностями подшипников качения в процессе эксплуатации являются перегрев подшипника, сильный шум и выброс смазки из подшипника. Перегрев подшипника может произойти из-за загрязнения, избытка или недостатка смазки, при большом натяге внутреннего кольца подшипника на вал или наружного кольца в корпус подшипника, износа или разрушения деталей подшипников. Значительные перекосы, повышенная вибрация и некачественная центровка валов электродвигателя и механизма способствуют возникновению и развитию повреждений. При большом износе тел качения и их дефектах (раковинах, коррозии, трещинах) подшипник работает с перегревом и шумом.

Наличие в консистентной смазке продуктов износа работающего подшипника может стать причиной неравномерного абразивного износа сепаратора, сопровождающегося разбалансированием последнего. Если центровка сепаратора осуществляется по бортам внутреннего кольца подшипника, то при наличии абразивных примесей в смазке происходит быстрый износ, сопровождающийся появлением прогрессирующего дисбаланса.

## 3.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

*Надежность* — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

*Предельное состояние* — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

*Отказ* — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

*Наработка* — продолжительность или объем работы объекта.

*Наработка до отказа* — наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа.

*Технический ресурс (ресурс)* — наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Срок службы* — календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Показатель надежности* — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

К числу широко применяемых количественных характеристик надежности восстанавливаемых объектов относятся: вероятности безотказной работы и отказа, частота отказов, интенсивность отказов, средняя наработка до первого отказа. Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа. Вероятность функция убывающая.

*Вероятность отказа* — это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа — события противоположные и несовместные.

*Частота отказов* — отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий. Частота отказов или плотность вероятности отказов может быть определена как производная по времени вероятности отказов.

*Интенсивность отказов* — условная плотность вероятности возникновения отказа, которая определяется как отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

Интенсивность отказов является также отношением частоты отказов к вероятности безотказной работы. Обычно интенсивность отказов меняется во времени. Только в случае экспоненциального закона распределения отказов интенсивность отказов является постоянной величиной.

Средней наработкой до отказа называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Основными характеристиками восстанавливаемых объектов являются следующие.

*Параметр потока отказов* — отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

*Средняя наработка на отказ* — отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Наличие нескольких показателей надежности не означает, что необходимо оценивать надежность электродвигателей по всем этим показателям. При исследовании надежности электродвигателей наиболее часто используется вероятность безотказной работы.

### 3.3. НАДЕЖНОСТЬ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ С ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ

Одним из наименее надежных узлов электродвигателей является подшипниковый узел. Экспериментальные методы оценки надежности мощных высоковольтных электродвигателей являются важным источником получения достоверных данных об эксплуатационной надежности отдельных узлов и двигателя в целом.

По результатам испытаний и эксплуатационным отказам определяют наименее надежные элементы конструкции. Испытания и опыт эксплуатации являются исходным моментом для разработки рекомендаций по повышению надежности, планирования сроков технического обслуживания и испытаний, номенклатуры и объема запасных частей, электроизоляционных материалов для ремонта и др.

Далее анализируется надежность и долговечность подшипников 216 электродвигателей напряжением 6 кВ, находящихся в эксплуатации от 7 до 14 лет и используемых в качестве привода механизмов собственных нужд электростанций с энергоблоками мощностью 300 МВт.

Рассматриваемые типы электродвигателей имеют различное исполнение и широкий диапазон частот вращения. В зависимости от конструктивного исполнения, частоты вращения и нагрузки в электродвигателях применены подшипники качения следующих типов: радиальные однорядные шарикоподшипники, радиальные роликоподшипники с короткими цилиндрическими роликами, радиальные сферические двухрядные роликоподшипники, радиально-упорные шарикоподшипники.

Подшипники скольжения по конструктивному исполнению в электродвигателях бывают шитовые и выносные (стояковые), с разъемным и неразъемным вкладышами, сферические самоустанавливающиеся и с узкоцилиндрической жесткой посадкой.

Смазка трущихся поверхностей подшипников скольжения выполняется посредством свободно висящих колец на валу ротора за счет циркуляции масла, подаваемого под давлением, или комбинированная (кольца и циркуляция).

В подшипниках качения применяют пластичные (консистентные) смазки; в подшипниках скольжения — жидкие масла.

Обработка результатов эксплуатационных наблюдений методами математической статистики и теории вероятностей дает возможность анализировать и прогнозировать надежность подшипников с учетом всей совокупности изложенных выше факторов. Обработка статистического материала наблюдений естественного эксперимента дает мощный инструмент исследователю и практику в планирова-

ний сроков замен подшипников, корректировки стратегии технического обслуживания и ремонта и т.д.

Для анализа надежности и срока службы подшипников электродвигателей использованы  $[N, R, T]$ -планы. Наблюдению подлежали  $N$  объектов — электродвигателей, отказавшие элементы  $R$  — подшипники — заменялись новыми, наблюдения прекращались по истечении времени  $T$ . Подшипниковый узел с новым подшипником рассматривался как новый, т.е. полностью восстановивший работоспособность.

Весь рассматриваемый период времени эксплуатации каждого подшипника разбит на интервалы продолжительностью один год, причем после замены подшипника начинается новый отсчет времени. При анализе включены все замены подшипников: аварийные и сделанные в период плановых ремонтов. Это сделано по следующим соображениям. Принятая стратегия ремонтов электродвигателей за рассматриваемый период эксплуатации предусматривала замену

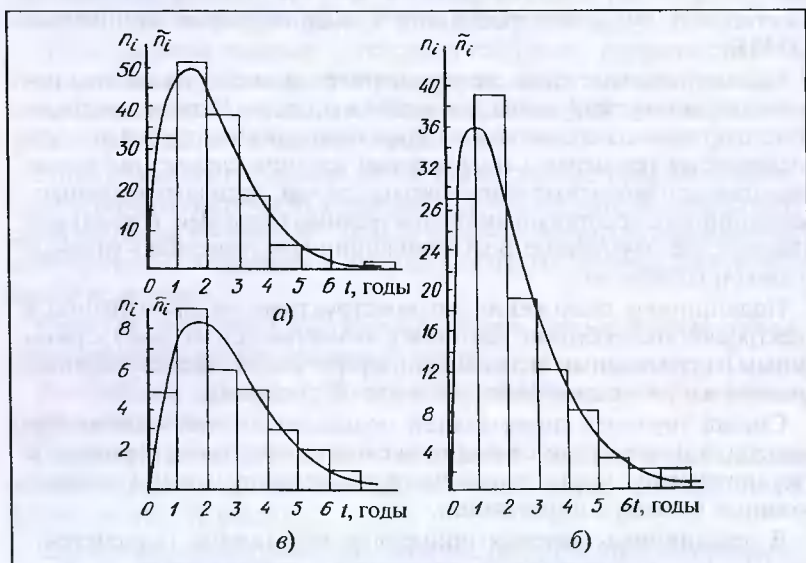


Рис. 9. Гистограммы и теоретические кривые плотности вероятности срока службы подшипников электродвигателей:

$a$  — роликоподшипник № 2326, расположенный со стороны привода электродвигателя ДАЗО-13-50-4;  $б$  — шарикоподшипник № 46330, расположенный со стороны свободного конца вала вертикального электродвигателя ВА-12-41-4;  $в$  — подшипник скольжения со стороны свободного конца вала электродвигателя АР-500;  $n_i$  — эмпирические частоты;  $\tilde{n}_i$  — теоретические частоты



подшипников только при наличии браковочных признаков, которые не обеспечивали бы дальнейшую эксплуатацию подшипников до следующего ремонта, т.е. состояние подшипника, если он был заменен в плановый ремонт, было близкое к предельному. В этой связи можно было объединить наработки до предельного состояния, вызвавшего отказ подшипника, и наработки, предшествовавшие предельному состоянию. На рис. 9 построены гистограммы срока службы подшипников до замены электродвигателей типов ДАЗО-13-50-4, ВА-12-41-4 и АР-500.

По виду гистограмм можно предположить, что срок службы до замены подчиняется распределению Вейбулла. При последующих расчетах сделано предположение, что параметр сдвига в распределении Вейбулла в рассматриваемых совокупностях подшипников равен 0. Это допущение сделано в связи с тем, что во всех рассматриваемых типах подшипников имело место значительное число отказов-замен уже в первом интервале от 0 до 1 года.

Функция плотности вероятности для распределения Вейбулла представляется в виде:

$$f(t) = b\lambda t^{b-1}e^{-\lambda t^b} \text{ при } t \geq 0, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — параметр, определяющий масштаб;  $b$  — параметр асимметрии распределения (параметр формы).

Следовательно, распределение Вейбулла характеризуется в данном случае двумя параметрами  $\lambda$  и  $b$ , которые необходимо определить по данным эксплуатационных наблюдений. Методика определения  $\lambda$  и  $b$  состоит в следующем. Известно, что:

$$a = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\lambda^{1/b}}, \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\lambda^{2/b}}, \quad (3)$$

где  $a$  — среднее арифметическое значение;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение;  $\Gamma$  — гамма-функция;  $\left(1 + \frac{2}{b}\right), \left(1 + \frac{1}{b}\right)$  — аргументы гамма-функции.

Значения  $b$  и  $\lambda$  для рассматриваемых типов подшипников определяем графоаналитическим методом. Для проверки гипотезы о возможности применения распределения Вейбулла для определения ве-



роятности срока службы подшипников электродвигателей используем критерий согласия Колмогорова для подшипников со стороны привода № 2326 электродвигателя ДАЗО-13-50-4.

Согласие эмпирического распределения с распределением Вейбулла для доверительных вероятностей  $v > 0,01$  проверено. В результате этой проверки доказано, что срок службы подшипников до замены подчиняется распределению Вейбулла.

Зная  $b$  и  $\lambda$ , определяем теоретические частоты

$$\tilde{n}_i = n\Delta\lambda b t_i^{b-1} e^{-\lambda t_i^b}, \quad (4)$$

где  $n$  — число отказов-замен подшипников;  $\Delta$  — временной интервал, равный 1 году.

Подставляя ряд значений  $t$ , определяем соответствующие им теоретические частоты и строим кривые плотности вероятности срока службы подшипников (рис. 9).

Для проверки гипотезы о возможности применения распределения Вейбулла с целью определения вероятности срока службы подшипников и вычисления его параметров может быть применен также графоаналитический метод с использованием вероятностных сеток. Этот метод целесообразно применять, если объем выборки не превышает 50. Масштаб вероятностной сетки выбирают так, чтобы график распределения Вейбулла был представлен в виде прямой линии (рис. 10). При построении этой прямой использован метод наименьших квадратов. Из рис. 10 следует, что эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой. Следовательно, опытные данные срока службы подшипников не противоречат распределению Вейбулла.

Вероятность безотказной работы подшипников до первого отказа определяется формулой:

$$P(t) = e^{-\lambda t^b}. \quad (5)$$

Определив экспериментально  $b$  и  $\lambda$ , можем рассчитать вероятность безотказной работы подшипников для различных периодов эксплуатации. На рис. 11 показаны зависимости вероятности безотказной работы обоих подшипников электродвигателей НРТ (насос регулирования турбины) и БПН (бустерный питательный насос).

Вероятность безотказной работы обоих подшипников электродвигателя как системы из последовательно соединенных двух элементов определяется по формуле:

$$P_{\text{п.г}}(t) = P_{\text{п.с}}(t) P_{\text{п.п}}(t), \quad (6)$$

где  $P_{\text{п.с}}(t)$  — вероятность безотказной работы подшипника со стороны свободного конца вала;  $P_{\text{п.п}}(t)$  — вероятность безотказной работы подшипника со стороны привода.

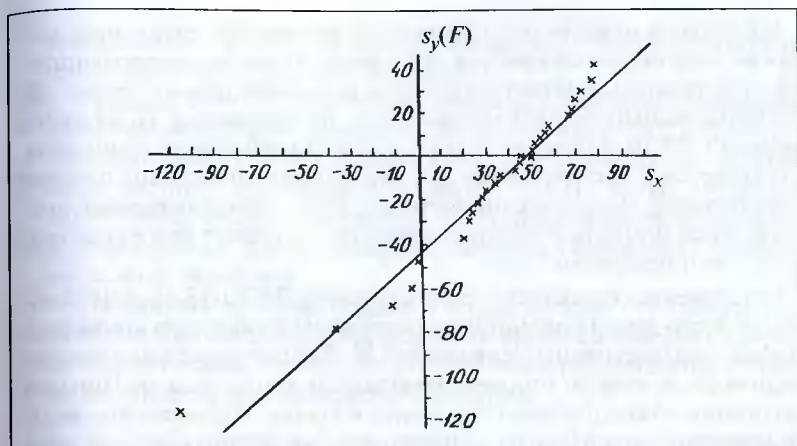


Рис. 10. Графическая проверка согласия эмпирического распределения с теоретическим сроком службы подшипника скольжения со стороны свободного конца вала электродвигателя АР-500

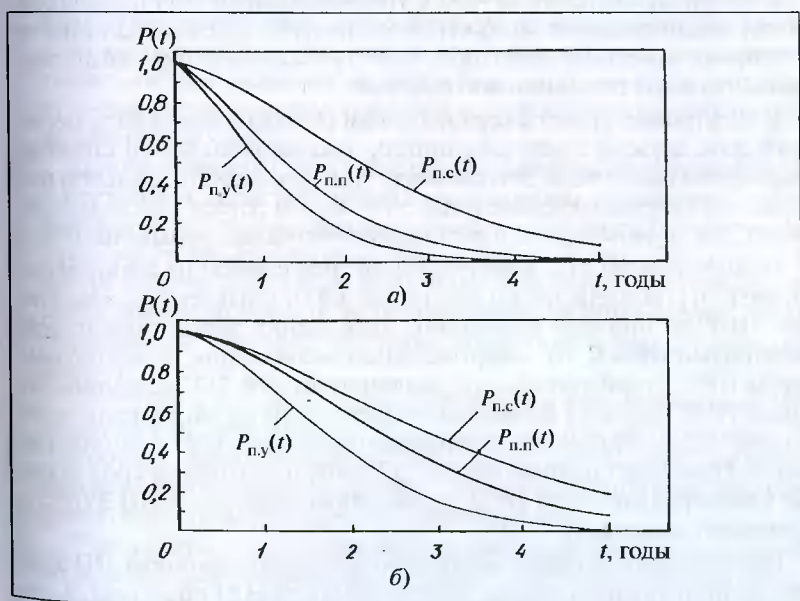


Рис. 11. Кривые вероятности безотказной работы подшипниковых узлов:  
а — электродвигателя типа А-112-4М (НРТ); б — электродвигателя типа АР-500 (БПН)

Из анализа отказов подшипников и расчетов следует, что срок службы подшипников качения со стороны привода электродвигателей с горизонтальным расположением вала значительно меньше. За рассматриваемый период число замен подшипников со стороны привода в 1,6 раза больше, чем со стороны свободного конца вала. Это является следствием того, что подшипник со стороны привода несет большие механические нагрузки, связанные с передачей вращающегося момента и влияния качества центровки валов электродвигателя и механизма.

Исключение составляет электродвигатель ДАЗО-15-69-8/10, у которого число замен подшипника со стороны свободного конца вала больше, чем со стороны привода на 9 %. Это связано с тем, что подшипниковый узел со стороны свободного конца вала изолирован при помощи изоляционных прокладок и втулок. Недостаточно жесткое крепление этого узла из-за наличия изоляционных деталей, имеющих прочность ниже, чем сталь, приводит к его смещению и нарушению установки подшипника, ухудшает условия его работы и ускоряет процесс износа.

У электродвигателей АР-500 с горизонтальным расположением вала и подшипниками скольжения количество замен подшипников со стороны привода больше на 25 %. Это объясняется теми же причинами, что и для подшипников качения.

У электродвигателей с вертикальным расположением вала меньший срок службы имеет подшипник, расположенный со стороны свободного конца вала. Это связано с тем, что кроме радиальной нагрузки он нагружен осевым усилием от массы ротора электродвигателя. Срок службы верхнего подшипника в среднем меньше на 37 %.

Подшипник № 2322 имеет больший срок службы на электродвигателе КЭН (конденсатного электронасоса) по сравнению с двигателем НРТ по причине различного исполнения электродвигателей: электродвигатель КЭН — вертикального исполнения, а электродвигатель НРТ — горизонтального; на подшипник № 2322 в электродвигателе НРТ действует масса ротора электродвигателя, у электродвигателей КЭН подшипник разгружен от действия массы ротора [по этой же причине подшипники № 2322 имеют различный срок службы у электродвигателей НСД (насос слива дренажа) и НПЭ (насос пускового эжектора)].

Большой срок службы подшипников электродвигателя НПЭ по сравнению с подшипниками электродвигателя НРТ объясняется меньшей среднегодовой наработкой этого двигателя.

Наибольший срок службы имеют подшипники электродвигателя ВГД (вентилятора горячего дутья). Это связано с тем, что он имеет

сравнительно небольшую частоту вращения ( $750 \text{ мин}^{-1}$ ) по сравнению с другими электродвигателями.

Средний срок службы подшипников качения электродвигателей с синхронной частотой вращения  $750 \text{ об/мин}$  выше (ВГД, ДВ — дутьевой вентилятор), чем подшипников электродвигателей с синхронной частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  (НРТ, КЭН, НСД, НПЭ, МВ — мельничный вентилятор). Это объясняется тем, что процесс износа дорожек, сепараторов и тел качения ускоряется с увеличением частоты вращения.

Из вышеизложенного следует, что независимо от конструкции и типа подшипника и электродвигателя время до замены подшипников (срок службы, вероятность безотказной работы до первого отказа) подчиняется распределению Вейбулла.

### **3.4. НАДЕЖНОСТЬ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ**

Для повышения надежности мощных высоковольтных электродвигателей электростанций необходимо провести комплекс работ на разных стадиях конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации, который включает выбор требований к показателям надежности, разработку конструктивных и технологических методов повышения надежности.

Для большинства этих работ решающую роль играют данные эксплуатационного эксперимента и исследования надежности электродвигателей в целом и отдельных сборочных единиц в процессе эксплуатации на электростанциях. Такие данные должны использоваться при разработке и изготовлении новых типов и серий электродвигателей с учетом причин и закономерностей возникновения отказов, определения наименее надежных сборочных единиц и отдельных деталей.

С учетом накопленных данных должны разрабатываться мероприятия конструктивного, технологического и эксплуатационного характера, направленные на повышение надежности, увеличение межремонтного периода, улучшение технико-экономических характеристик и повышение ремонтопригодности.

Результаты эксплуатационных наблюдений необходимы для планирования сроков профилактических испытаний и вывода электродвигателей в ремонт, нормирования трудозатрат ремонтного персонала и определения его квалификации и численности.

Сбор информации о надежности обмоток статоров электродвигателей производится по  $[N, R, T]$ -плану по данным эксплуатацион-



ной и ремонтной документации. План  $[N, R, T]$  наблюдений трактуется следующим образом: наблюдению подвергнуты  $N$  электродвигателей в течение времени  $T$ ,  $R$  — отказавшие элементы, которые заменяются новыми или ремонтируются. При этом плане результаты наблюдений за отремонтированными элементами или сборочными единицами включаются в общие данные наблюдений до замены.

При анализе надежности обмотки статора принято следующее допущение. Отказ или пробой обмотки статора и последующий ремонт изменяет состояние обмотки. В процессе повреждения имеют место случаи деформации элементов обмотки, что каким-то образом снижает общий уровень надежности изоляции.

При замене поврежденной катушки выполняют ремонтные работы с деформацией близлежащих катушек и других элементов изоляционной конструкции. Однако, как правило, ремонт выполняется в ограниченном объеме, поэтому представление о независимости отказов является довольно близким приближением к реальности.

Ниже анализируется надежность обмоток статоров одиннадцати типов асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением 6 кВ, установленных на 12 различных типах механизмов — насосах, шаровых мельницах, вентиляторах и дымососах.

Рассматриваемая совокупность состоит из 216 электродвигателей, установленных на энергоблоках 300 МВт с периодом эксплуатации от 7 до 14 лет (всего 2322 машино-лет).

За рассматриваемый период произошло 129 пробоев изоляции обмоток статоров. Классификация пробоев:

корпусной изоляции катушек . . . . .	72 (55,78 %)
в соединениях обмотки . . . . .	24 (18,60 %)
из-за увлажнения корпусной изоляции . . . . .	15 (11,67 %)
витковой изоляции . . . . .	5 (3,88 %)
в коробке выводов . . . . .	3 (2,32 %)
выводов обмотки . . . . .	2 (1,55 %)
из-за повреждения опорных изоляторов . . . . .	2 (1,55 %)
из-за работы на двух фазах . . . . .	2 (1,55 %)
из-за механического повреждения изоляции обмотки	
посторонним предметом . . . . .	2 (1,55 %)
из-за перенапряжения при однополюсных замыканиях . . . . .	2 (1,55 %)

Все обмотки изготовлены из жестких катушек с микалентной компаундированной изоляцией толщиной около 3 мм. Крепление обмотки в пазу осуществляется клиньями из изоляционного материала, в лобовой части — шнуровыми бандажами и бандажными кольцами.

Рассматриваемая совокупность электродвигателей имеет сравнительно небольшой период эксплуатации, т.е. период нормальной эксплуатации, когда износые отказы еще, как правило, не сказыва-



ются на надежности работы обмоток. Поэтому интенсивность отказов за рассматриваемый период является постоянной величиной. В этой связи, а также по данным других источников, сделано допущение, что вероятность безотказной работы обмотки статора за рассматриваемый период времени подчиняется экспоненциальному закону.

Функция плотности вероятности при экспоненциальном распределении задается в виде:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0 \quad (7)$$

точечную оценку  $\hat{\lambda}$  для параметра  $\lambda$  вычисляем по формуле для  $[N, R, T]$ -плана:

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{NT}, \quad (8)$$

где  $d$  — число отказов за время наблюдения  $T$ ;  $N$  — число обмоток, поставленных под наблюдение;  $T$  — установленная продолжительность наблюдений.

Определив  $\lambda$  для каждого типа электродвигателя, рассчитываем вероятность безотказной работы обмотки статора до первого отказа по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

На рис. 12 построены кривые вероятности безотказной работы до первого отказа обмоток статоров электродвигателей ДАЗО-12-55-8

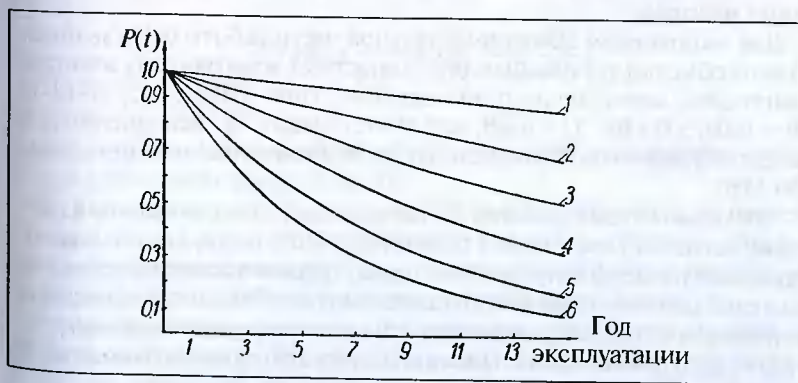


Рис. 12. Кривые вероятности безотказной работы до первого отказа обмоток статоров электродвигателей 6 кВ типа:

1 — ДАЗО-12-55-8 (ВГД); 2 — АР-500 (БПН); 3 — АВ-8000/6000УЗ (ПЭН); 4 — А-112-4М (НПЭ); 5 — ДАЗО-13-50-4 (МВ); 6 — СДМЗ-20-49-60 (ЦМ)

(ВГД); АР-500 (БПН); АВ-8000/6000УЗ (ПЭН); А-112-4М (НПЭ); ДАЗО-13-50-4 (МВ); СДМЗ-20-49-60 (ШМ). Анализируя выполненные расчеты, можно сделать вывод, что наименьшую надежность имеет обмотка статора электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60, а наиболее высокую — обмотка статора электродвигателя ДАЗО-12-55-8. Исходя из этого, следует в период капитальных ремонтов выполнить мероприятия, повышающие их надежность.

Общими мероприятиями конструктивно-технологического направления, повышающими надежность обмоток статоров мощных высоковольтных электродвигателей рассматриваемых типов, могут быть рекомендации, изложенные ниже.

### **3.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ**

Разброс пробивных напряжений изготовленных катушек обмоток статоров высоковольтных электродвигателей переменного тока зависит от их конструктивного исполнения, характеристик использованных электроизоляционных материалов и технологии изготовления обмотки.

Изложенные выше факторы вызывают старение изоляции, уменьшая при этом значения пробивных напряжений. В этой связи представляет интерес исследование распределения пробивных напряжений обмотки в процессе многолетней эксплуатации, т.е. после многолетнего воздействия совокупности факторов эксплуатационного характера.

Для выполнения экспериментальной части работы были использованы обмотки трехфазных двухскоростных асинхронных электродвигателей вертикального исполнения типа ДВДД-215/39-12-16 ( $P = 1000/500$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 500/375$  мин<sup>-1</sup>), используемых в качестве привода циркуляционных насосов энергоблока мощностью 300 МВт.

Обе обмотки электродвигателя двухслойные и изготовлены из жестких катушек, уложенных в одном пазу. По конструктивным соображениям размеры катушек и толщина изоляции обеих обмоток выполнены одинаковыми и отличаются сечением меди и количеством витков. Изоляция катушек обеих обмоток непрерывная, микалентная, компаундированная. Односторонняя толщина изоляции равна 2,75 мм.

В связи с тем, что при демонтаже обмотки могут возникнуть ее деформации, сопровождающиеся нарушением целостности изоляционной конструкции с образованием микротрещин и изломов, испы-

тания были проведены до демонтажа обмотки из пазов. При такой методике была исключена возможность внесения ошибок в результаты эксперимента.

Испытания каждой катушки в отдельности относительно корпуса при остальных заземленных катушках проводились повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц. Перед испытаниями межкатушечные и межполюсные соединения были разизолированы и распаяны. Напряжение на каждую катушку подавалось плавно с 0 до пробивного со скоростью, обеспечивающей осуществление отсчета по измерительным приборам.

Эксперименту были подвергнуты четыре обмотки двух электродвигателей — всего 288 катушек (в каждой обмотке 72 катушки).

К моменту проведения эксперимента электродвигатели № 1 и 2 находились в эксплуатации после монтажа по 12 лет и 5 мес, наработка была равна 73934 и 72960 ч, среднегодовая наработка — 5957 и 5879 ч, а среднегодовая нагрузка — 103,5 и 95,5 % соответственно.

По данным проведенного эксперимента и полученных вариационных рядов построены гистограммы пробивных напряжений обмоток электродвигателей (рис. 13). На оси абсцисс отложены частичные интервалы значений пробивных напряжений, а их высоты равны частотам соответствующих пробивных напряжений.

При рассмотрении форм гистограмм можно предположить, что пробивные напряжения распределяются по нормальному закону, т.е. имеющиеся статистические распределения могут быть выровнены теоретической кривой и функцией:

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - \bar{x})^2}{2s^2} \right], \quad (10)$$

где  $\bar{x}$  — математическое ожидание;  $s$  — среднее квадратичное отклонение нормального распределения.

По данным двух вариационных рядов пробивных напряжений двух электродвигателей необходимо проверить гипотезу о том, что случайные значения пробивных напряжений обмоток статоров электродвигателей 6 кВ подчиняются нормальному закону.

В связи с тем, что число наблюдений случайных значений пробивных напряжений более 100 и равно 144 для каждого электродвигателя, проверку согласия опытного распределения с теоретическим выполнением по критерию согласия Колмогорова. Используя выполненные расчеты строим графики функции теоретического распределения  $F(y_{j+1})$  (рис. 14). По данным расчетов и графику

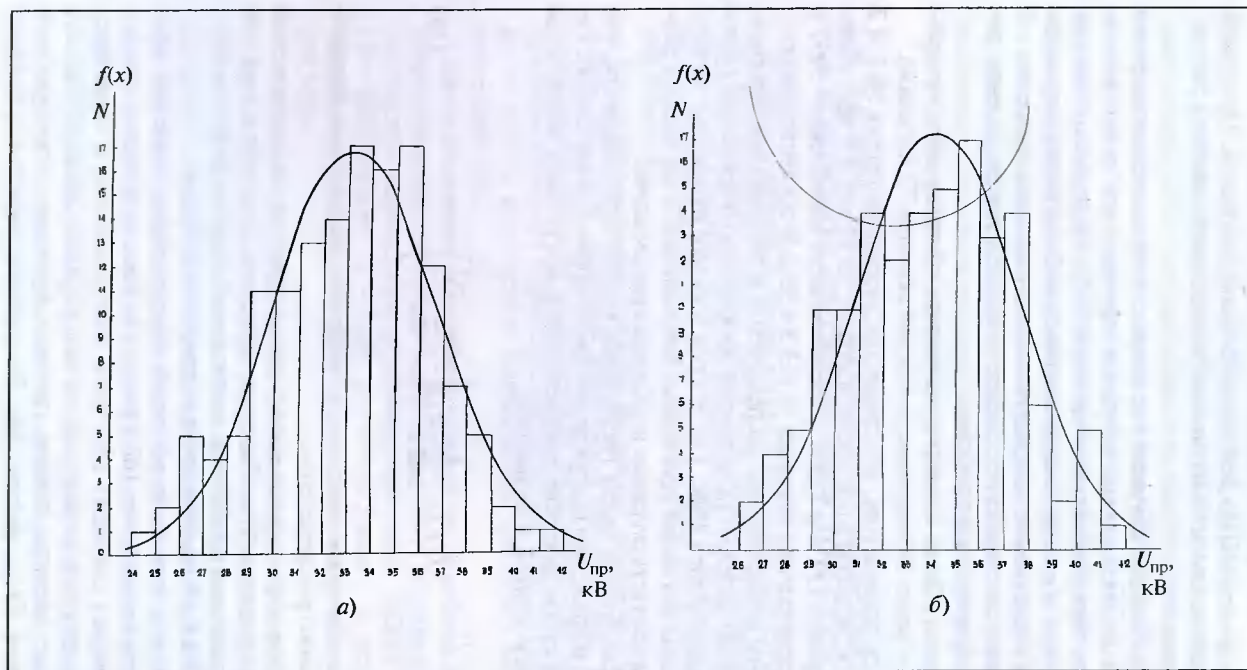


Рис. 13. Гистограмма, совмещенная с кривой нормальной плотности вероятности значений пробивных напряжений изоляции обмотки статора:

а — электродвигатель № 1; б — электродвигатель № 2

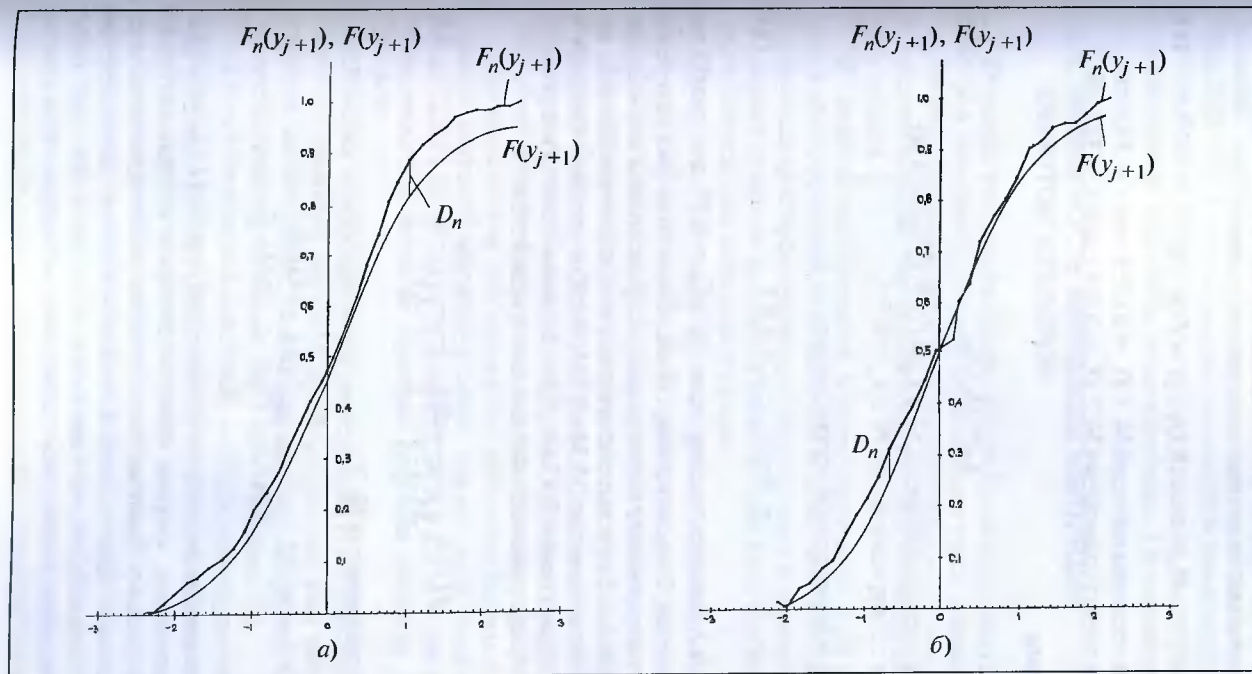


Рис. 14. Функция опытного  $F_n(y)$  и теоретического  $F(y)$  распределения пробивных напряжений изоляции обмотки статора:  
 а — электродвигатель № 1; б — электродвигатель № 2



определяем максимальное расхождение функции опытного распределения и функции теоретического распределения:

$$D_n = \max |F_n(y_{j+1}) - F(y_{j+1})|; \quad (11)$$

для электродвигателя № 1  $D_n = 0,0751$  при  $x = 37,0$  кВ;  
 для электродвигателя № 2  $D_n = 0,0641$  при  $x = 32,0$  кВ.

Определяем

$$\lambda_n = D_n \sqrt{n}; \quad (12)$$

для электродвигателя № 1  $\lambda_n = 0,0751 \sqrt{144} = 0,90$ ;  
 для электродвигателя № 2  $\lambda_n = 0,769$ .

Задаемся доверительной вероятностью

$$v = \text{Вер}\{\lambda_n \leq \lambda_n^*\} = 0,7. \quad (13)$$

При  $v = 0,7$  для электродвигателя № 1  $\lambda_n^* = 0,97$ , т.е. равенство (12) выполняется. Следовательно, согласие опытного распределения пробивных напряжений с нормальным распределением для электродвигателей № 1 и 2 при математическом ожидании пробивного напряжения соответственно 33,34 кВ (34,16 кВ) и среднем квадратичном отклонении, равном 3,45 кВ (3,34 кВ), можно считать хорошим.

Формула (10) принимает вид для электродвигателя № 1:

$$f(x) = \frac{1}{3,45\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - 33,34)^2}{2 \cdot 3,45^2}\right]; \quad (14)$$

для электродвигателя № 2:

$$f(x) = \frac{1}{3,34\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - 34,16)^2}{2 \cdot 3,34^2}\right]. \quad (15)$$

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что пробивные напряжения катушек обмоток статоров электродвигателей 6 кВ, находящихся в процессе эксплуатации, распределены по нормальному закону. Для анализа и прогнозирования распределения пробивных напряжений, определяющих надежность обмоток, могут быть применены вероятностно-статистические методы. При плани-

ровании перемоток обмоток статоров электродвигателей типа ДВ/ДД-215/39-12-16, эксплуатирующихся в аналогичных условиях, целесообразно увеличить продолжительность эксплуатации электродвигателя до перемотки обмотки статора с заменой изоляции.

### **3.6. НАДЕЖНОСТЬ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ**

Витковая изоляция жестких секций вновь изготовленных обмоток статоров электродвигателей переменного тока напряжением 6 кВ имеет многократный запас электрической прочности по отношению к нормированному значению испытательного напряжения для новых секций.

В процессе эксплуатации электродвигателей 6 кВ собственных нужд электростанций на их обмотки воздействует комплекс эксплуатационных факторов: тепловых, механических и электрических. Они вызывают старение изоляции, вызывая при этом снижение пробивного напряжения витковой изоляции.

По изложенным выше данным пробой витковой изоляции при работе электродвигателей 6 кВ собственных нужд энергоблоков 300 МВт составляет 3,88 % общего числа пробоев.

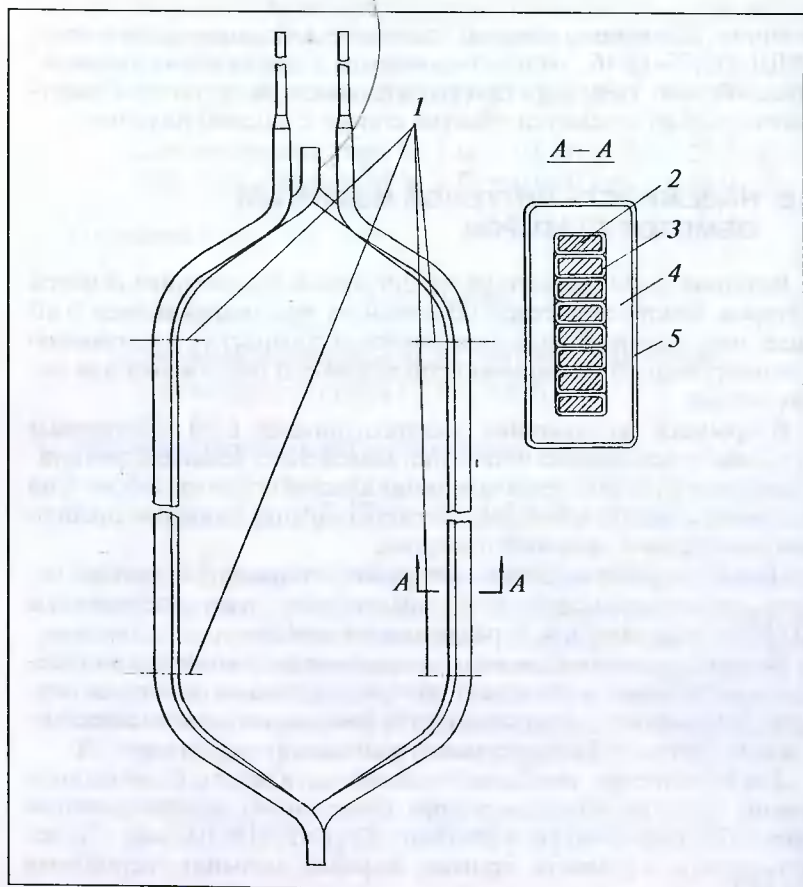
На основании этого представляет интерес исследование распределения пробивных напряжений витковой изоляции обмотки в процессе многолетней эксплуатации, т.е. после многолетнего воздействия совокупности факторов эксплуатационного характера.

Для выполнения экспериментальной части работы были использованы катушки обмотки статора синхронного электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60 ( $P = 2000$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>), используемого в качестве привода шаровых мельниц энергоблока 300 МВт.

Обмотка электродвигателя двухслойная и изготовлена из жестких катушек проводом марки ПСД. Изоляция катушек обмотки непрерывная, микалентная, компаундированная. Витковая изоляция выполнена микалентой марки ЛФЧ 0,13 × 20 (рис. 15).

Для осуществления демонтажа катушек межкатушечные и межполюсные соединения были разизолированы и распаяны. Пазы расклинены и катушки демонтированы.

При определении пробивных напряжений отдельно пазовой и лобовой частей последние были отрезаны от прямолинейных участков катушек и концы проводников разведены для обеспечения достаточного изоляционного расстояния. Испытания проводились повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц, приложен-



**Рис. 15. Катушка обмотки статора электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60:**

*1* — места разрезания катушек; *2* — провод ПСД ( $2,63 \times 7,4$ )/( $2,96 \times 7,73$ ); *3* — витковая изоляция (микалента ЛФЧ  $0,13 \times 20$ ); *4* — корпусная изоляция (микалента ЛМЧ  $0,13 \times 20$ ); *5* — лента тафтяная  $0,25 \times 20$

ного поочередно к каждой паре витков. Напряжение подавалось плавно с 0 до пробивного со скоростью, обеспечивающей осуществление отсчета по измерительным приборам.

К моменту проведения эксперимента электродвигатель находился в эксплуатации 7 лет. В результате эксперимента получено 280 значений пробивных напряжений витковой изоляции.

По данным проведенного эксперимента и полученных вариационных рядов построена гистограмма пробивных напряжений витковой изоляции (рис. 16).

При рассмотрении форм гистограммы можно предположить, что распределение пробивных напряжений происходит по нормальному закону, т.е. имеющееся статистическое распределение может быть выровнено теоретической кривой и функцией (10).

По данным вариационного ряда пробивных напряжений необходимо проверить гипотезу о том, что случайные значения пробивных напряжений витковой изоляции статоров электродвигателей 6 кВ подчиняются нормальному закону.

В связи с тем, что число наблюдений случайных значений пробивных напряжений равно 280, проверку согласия опытного распределения с теоретическим выполняем по критерию согласия Колмогорова. Для этого результаты испытаний пробивных напряжений располагаем в порядке их возрастания

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_r.$$

Далее записываем значения

$$x_1; x_1 + \Delta; x_1 + 2\Delta; \dots; x_r,$$

где  $\Delta = 0,2$  — приращение интервала (цена деления киловольтметра испытательной установки). После этого записываем частоты  $m_1, m_2, \dots, m_r$ , соответствующие пробивным напряжениям.

Определяем среднее арифметическое значение пробивного напряжения и среднее квадратичное отклонение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^r m_{j+1} (x_1 + j\Delta); \quad (16)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^r m_{j+1} (x_1 + j\Delta - \bar{x})^2}, \quad (17)$$

где  $n = m_1 + m_2 + \dots + m_r$ ,  $r$  — количество интервалов, определяемое по формуле:

$$r = \frac{x_n - x_1}{\Delta}.$$

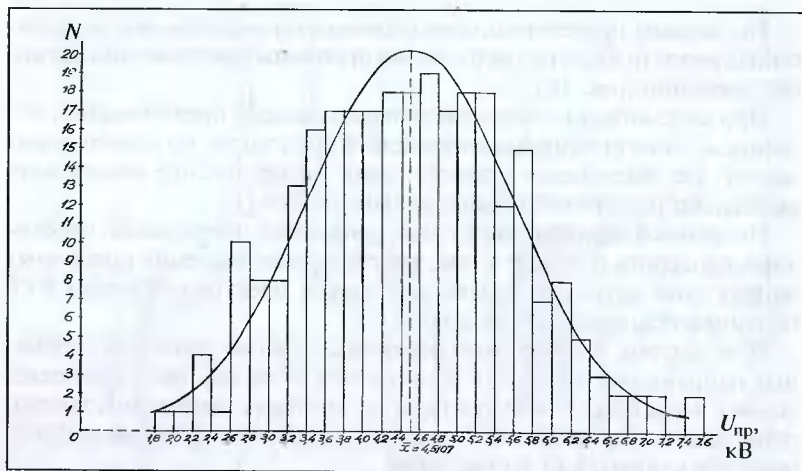


Рис. 16. Гистограмма, совмещенная с кривой нормальной плотности вероятности пробивных напряжений витковой изоляции обмотки статора электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60

Рассчитываем и записываем величину:

$$y_{j+1} = \frac{x_1 + j\Delta - \bar{x}}{s} \quad (18)$$

и функцию опытного распределения:

$$F_n(y_{j+1}) = \frac{n_{j+1}}{n},$$

где  $n_{j+1} = m_1 + m_2 + \dots + m_{j+1}$ .

Далее строим функцию теоретического распределения (рис. 17). Значения функции теоретического распределения вычисляем по формуле:

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \bar{x}}{s}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{x}}{s}\right), \quad (19)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — границы интервала;  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-x^2/2} dx$  — функция Лапласа.



Определяем максимальное расхождение функции опытного распределения и функции теоретического распределения:

$$D_n = \max |F_n(y_{j+1}) - F(y_{j+1})| = 0,0594 \quad (20)$$

при  $(x_1 + j\Delta) = 3,9$  кВ.

Определяем

$$\lambda_n = D_n \sqrt{n} = 0,0594 \sqrt{280} = 0,9939.$$

Для доверительной вероятности:

$$v = \text{Вер}\{\lambda_n \leq \lambda_n^*\} = 0,8, \quad (21)$$

при  $\lambda = 0,8$   $\lambda_n^* = 1,07$ , т.е. неравенство (21) выполняется.

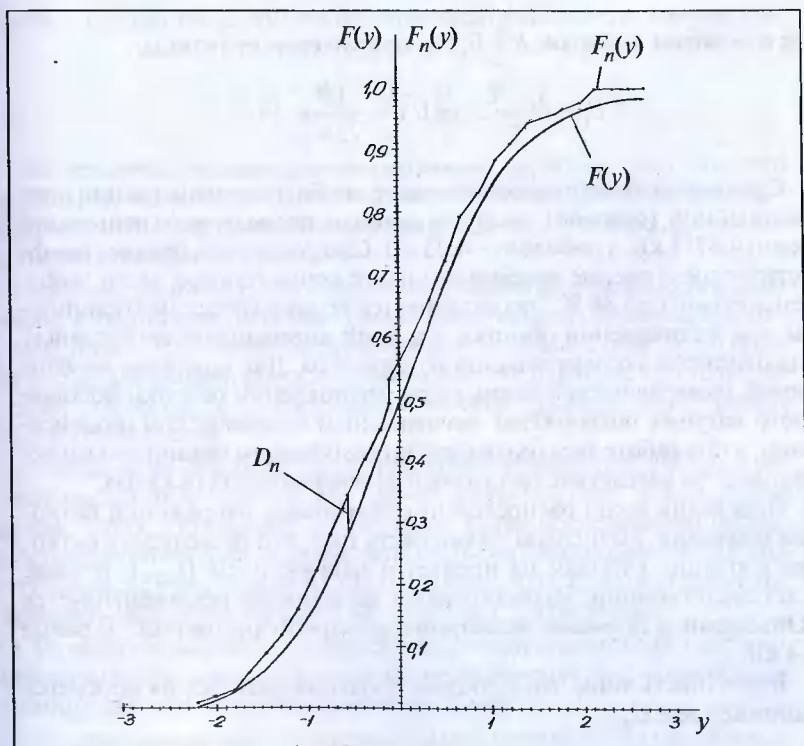


Рис. 17. Функция опытного  $F_n(y)$  и теоретического  $F(y)$  распределения пробивных напряжений витковой изоляции обмотки статора электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60

Следовательно, согласие опытного распределения пробивных напряжений витковой изоляции с нормальным распределением при математическом ожидании пробивного напряжения  $\bar{x} = 4,5107$  и среднем квадратичном отклонении  $s = 1,1000$  можно считать хорошим.

Формула (15) принимает вид:

$$f(x) = \frac{1}{1,1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{4,5107}{2 \cdot 1,1^2}\right]. \quad (22)$$

Далее вычисляем теоретические частоты:

$$n_i = \frac{n\Delta}{n} \varphi(U_i),$$

где  $n$  — объем выборки;  $\Delta = 0,2$  — приращение интервала.

$$U_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}; \quad \varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-U^2/2}.$$

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения прямой (пазовой) части по данным проведенных испытаний равно 4,6714 кВ, а лобовой — 4,35 кВ. Следовательно, среднее арифметическое значение пробивного напряжения пазовой части выше, чем лобовой на 6,88 %. Это объясняется технологическими причинами при изготовлении обмотки и разной интенсивностью воздействия факторов эксплуатационного характера. Для придания необходимой геометрической формы при изготовлении обмотки лобовые части катушек подвержены значительным механическим воздействиям, а при работе электродвигателя еще большим механическим деформациям вследствие вибрации при номинальных режимах.

Определив закон распределения пробивных напряжений витковой изоляции, вычисляем вероятность того, что исследуемая витковая изоляция катушки не пробьется напряжением  $U_{\text{исп}}$  в течение 7 лет эксплуатации. Испытательное напряжение регламентируется "Объемами и нормами испытания электрооборудования" и равно 1,4 кВ.

Вероятность того, что витковая изоляция катушки не пробьется напряжением  $U_{\text{исп}}$ :

$$P_c = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{x} - U_{\text{исп}}}{s}\right),$$

где  $U_{\text{исп}} = 1,4 \text{ кВ}$  — испытательное напряжение;  $\Phi$  — функция Лапласа.

$$P_c = 0,9976.$$

Вероятность того, что витковая изоляция электродвигателя не пробьется испытательным напряжением  $U_{\text{исп}}$ :

$$P_{\text{эд}} = \left[ 0,5 + \Phi \left( \frac{\bar{x} - U_{\text{исп}}}{s} \right) \right]^N,$$

где  $N$  — количество катушек в обмотке электродвигателя, равное 324.

$$P_{\text{эд}} = 0,4591.$$

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что пробивные напряжения витковой изоляции обмоток статоров электродвигателей 6 кВ, находящихся в процессе эксплуатации, распределены по нормальному закону.

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения витковой изоляции пазовой части выше, чем лобовой. У электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60 эта величина составляет 6,88 %, что связано с разной интенсивностью механических нагрузок при изготовлении обмоток и электродинамических усилий при работе электродвигателей.

Надежность витковой изоляции обмоток статоров синхронных электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60 после 7 лет эксплуатации равна 0,4591. По данным изложенных выше исследований надежность корпусной изоляции обмоток статоров электродвигателей этого типа после 7 лет эксплуатации составит 0,3031. Следовательно, надежность витковой изоляции примерно в 1,5 раза выше.

Разработанный метод определения эксплуатационной надежности витковой изоляции по данным эксперимента дает возможность планировать сроки замены изоляции обмоток.

С целью повышения надежности и увеличения срока службы витковой изоляции при ремонте электродвигателей целесообразно выполнять мероприятия по усилению крепления обмотки в лобовой и пазовой частях.

### 3.7. НАДЕЖНОСТЬ ОБМОТОК РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Несмотря на широкое развитие в последние годы методов расчета надежности электрических машин, позволяющих проводить ее оценку на этапе проектирования, наиболее объективной информацией о надежности мощных высоковольтных электродвигателей служат данные, получаемые в результате наблюдений в процессе эксплуатации.

В рассматриваемых типах асинхронных электродвигателей применены короткозамкнутые обмотки в виде одной или двух беличьих клеток. Обмотки роторов электродвигателей типов ДАЗО, АВ, ВА, А — одноклеточные, короткозамкнутые. Они состоят из медных стержней колбовидного профиля с медными короткозамыкающими кольцами.

Обмотка ротора электродвигателя АР-500 — одноклеточная. Стержни обмотки, имеющие трапецидальное сечение, поджимаются к боковым стенкам паза встречными клиньями. На медные короткозамыкающие кольца посажены бандажные кольца из немагнитной стали для защиты от механических перегрузок, связанных с действием центробежных сил.

Короткозамкнутая обмотка ротора электродвигателя типа ДВДД-215/39-12-16 состоит из двух рядов круглых стержней, причем каждый ряд замкнут по концам медными кольцами. Стержни наружной пусковой обмотки — латунные, а рабочей — медные.

Для анализа надежности обмоток роторов рассматриваемых электродвигателей использовались  $N$ ,  $R$ ,  $T$ -планы. В период наблюдений, которому подлежали  $N$  объектов (электродвигателей), отказавшие элементы (роторы) заменялись новыми или ремонтировались. По истечении времени  $T$  наблюдения прекращались. Из анализа отказов следует, что обмотки роторов асинхронных электродвигателей имеют высокую надежность, за исключением электродвигателей типа АЗ-12-52-4.

Для возможности применения математического аппарата теории вероятностей и математической статистики с целью анализа и прогнозирования отказов обмотки ротора целесообразно выровнять полученный по данным эксперимента статистический ряд с помощью теоретической кривой. Приняв во внимание, что отказы обмотки ротора электродвигателя типа АЗ-12-52-4 имеют примерно одинаковую частоту, можно предположить, что имеет место экспоненциальный закон распределения отказов. Для проверки этой гипотезы сопоставим экспериментальные данные и теоретическое распреде-

ление. Графоаналитическим методом построим вероятностные сетки для электродвигателей АЗ-12-52-4.

Элементы выборки нумеруем в порядке возрастания. Эмпирическая функция распределения определяется по формуле:

$$F_3(x_i) = \frac{i}{n+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (23)$$

При экспоненциальном распределении на ось абсцисс наносится номерная шкала, а по оси ординат откладываются значения

$$F(y) = 1 - e^{-y}.$$

Коэффициент масштаба по оси абсцисс:

$$k_x = \frac{L}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (24)$$

где  $L$  — ширина графика;  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  — наибольший и наименьший элементы выборки.

Подставляя в формулу (24) значения приведенных в ней величин, определяем:

$$k_x = \frac{107,499}{5,5833 - 2,000} = 30.$$

Для выбора масштаба по оси ординат задаемся  $F_{\max} = 0,999$  и  $F_{\min} = 0$ , тогда  $y_{\min} = 6,908$ . Значение  $s_y(F)$  определяем по формуле:

$$s_y(F) = \frac{H}{6,908} y,$$

где  $y = -\ln(1 - F)$ .

Если  $H = 300$  мм, то  $s_y(F) = 43,4$ .

Для электродвигателя АЗ-12-52-4 по данным расчетов на рис. 18 нанесены экспериментальные точки. Для графической проверки согласия эмпирического распределения с теоретическим необходимо провести прямую так, чтобы нанесенные точки отклонялись от нее как можно меньше. В качестве объективного способа используем метод наименьших квадратов. Согласно этому методу по данным точкам  $u_i$ ,  $v_i$  строим прямую:

$$v = qu + r, \quad (25)$$



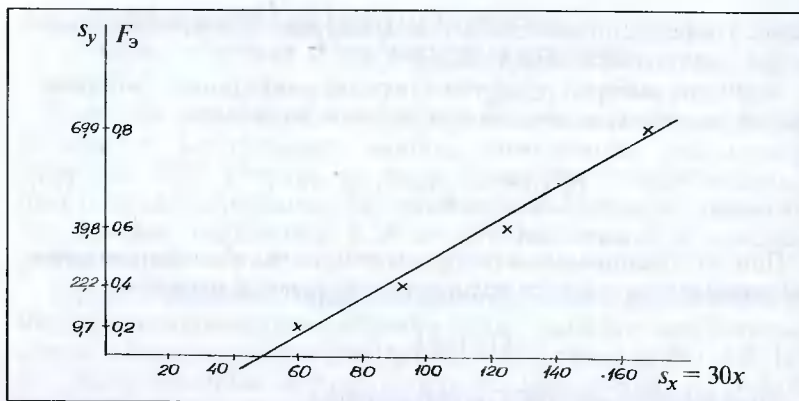


Рис. 18. Графическая проверка соответствия эмпирического распределения с теоретическим отказом короткозамкнутой обмотки ротора электродвигателей АЗ-12-52-4

где

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}; \quad (26)$$

$$r = \bar{v} - q\bar{u}; \quad (27)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i; \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i. \quad (28)$$

Далее по формулам (26) и (27) находим:

$$q = \frac{3565,7331}{6331,2065} = 0,5632;$$

$$r = 35,4 - 0,5632 \cdot 111,250 = -27,256.$$

Поставив полученные значения  $q$  и  $r$  в уравнение (25), получим:

$$v = 0,5632u - 27,256.$$

Для построения прямой определяем значения  $v$  и  $u$  в двух точках. Задаем значения:  $v = -27,256$  при  $u = 0$ ;

$$u = \frac{27,256}{0,5632} = 48,3949 \text{ при } v = 0.$$

Из рис. 18 видно, что нанесенные эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой. Отсюда следует, что опытные данные не противоречат предположению, что отказы обмотки ротора распределены по экспоненциальному закону.

Далее проводим точечную оценку для параметра  $\hat{\lambda}$  по эксплуатационным данным. Интенсивность отказов вычисляется по формуле (8).

Для электродвигателей типа АЗ-12-52-4  $\hat{\lambda} = 0,1315$ , типа ДАЗО-13-50-4  $\hat{\lambda} = 0,0088$ , типа А-112-4  $\hat{\lambda} = 0,0232$ , типа АР-500  $\hat{\lambda} = 0,0039$ .

Из вышеизложенного следует, что короткозамкнутые обмотки роторов рассматриваемых типов электродвигателей (за исключением электродвигателей типов АЗ-12-52-4) имеют высокую надежность. Низкая надежность обмотки ротора электродвигателя типа АЗ-12-52-4 обусловлена образованием при изготовлении электродвигателей завышенного технологического зазора между стержнями ротора и пазами, а также частыми и тяжелыми пусками электродвигателей, в период которых элементы обмотки ротора подвергаются значительным термомеханическим напряжениям, поэтому эти электродвигатели целесообразно заменять электродвигателями других типов.

В период нормальной эксплуатации отказы обмоток роторов асинхронных электродвигателей АЗ-12-52-4 подчинены экспоненциальному закону, что проверено графоаналитическим методом с помощью вероятностных сеток.

### **3.8. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

При использовании электродвигателей АВ-8000/6000УЗ в качестве привода пускорезервных питательных насосов котельных агрегатов энергетических блоков 300 МВт предъявляются высокие требования к надежности их работы.

Компоновка питательных насосов энергоблока 300 МВт сочетает установку насоса с электрическим приводом (ПЭН с электродвигателем АВ-8000УЗ) и турбопитательного насоса (ТПН), у которого в

качестве привода используется паровая турбина 12 МВт. Насос с электрическим приводом используется при пусковых режимах энергоблока, а также в качестве резервного привода при отказах ТПН, который по своей мощности обеспечивает номинальную паропроизводительность котельного агрегата; однако по условиям технологической схемы энергоблок не может быть пущен при помощи ТПН. Основным назначением ПЭН является пуск блока и его работа при нагрузке ниже номинальной, поэтому мощность ПЭН ниже мощности ТПН и составляет 8 МВт.

В электродвигателях АВ-8000/6000 УЗ применено непосредственное водяное охлаждение (НВО) обмотки ротора и косвенное водяное охлаждение (КВО) пазовой части обмотки и активной стали статора. В качестве охлаждающего агента используется дистиллят.

Водяное охлаждение ротора и статора электродвигателя производится по замкнутому контуру. Схема охлаждения включает следующие элементы: насосы, теплообменники, фильтры и бак дистиллята.

Опыт эксплуатации электродвигателей АВ-8000/6000-УЗ свидетельствует о том, что эксплуатационная надежность их сравнительно низкая. Значительное число повреждений связано с нарушением герметичности системы НВО ротора (СНВО) и КВО статора (СКВО). Далее анализируется повреждаемость систем водяного охлаждения (СВО) 24-х электродвигателей, установленных на четырех электростанциях трех энергосистем.

В СКВО статора имеют место случаи образования течи вследствие повреждения из-за вибрации медных трубок в месте их касания ребра поперечной стенки корпуса статора, течи силуминовых сегментов из-за внутренних повреждений трубок в месте выхода трубок из сегментов или в местах паяк. Повреждения трубок происходят также из-за размораживания заполненных дистиллятом сегментов, находящихся в нижней части сердечника резервного статора, хранящегося при температуре ниже 0 °С.

В СНВО ротора имеют место случаи течей в следующих местах: в полых стержнях обмотки ротора из-за дефектов металла, в месте пайки стержня со штуцером в радиальном водопроводе бандажного узла вследствие усадки резинового уплотнения или самоотвинчивания гаек, в месте пайки штуцера с полным короткозамыкающим кольцом.

Часть течей выявляется в период плановых ремонтов при гидравлических испытаниях. Имели место случаи образования течи в составной паянной латунной радиальной трубке в месте пайки ее со штуцером из-за утоньшения стенки вследствие перегрева металла при пайке.

Отказы СВО электродвигателей разделяются на две группы: нарушение герметичности и отсутствие проходимости каналов. Отсутствие проходимости каналов выявляются при профилактических ремонтах, а нарушение герметичности — в процессе работы электродвигателя или при ремонте.

Сбор информации о надежности СВО электродвигателей производится по  $[N, R, T]$ -плану по данным эксплуатационной и ремонтной документации (см. § 3, 4). При этом плане результаты наблюдений за отремонтированными элементами или сборочными единицами включаются в общие данные наблюдений до замены или ремонта. В процессе ремонтов выполнены осмотры и гидравлические испытания в следующем объеме:

Число осмотренных  
и испытанных элементов

СНВО ротора:	
радиальные узлы . . . . .	1740
пайки . . . . .	22040
СКВО статора:	
резьбовые соединения . . . . .	7250
охлаждающие сегменты . . . . .	43500
пайки . . . . .	87000
параллельные ветви охлаждающего тракта . . . . .	7250
трубки воздухоохладителя . . . . .	16240

Для  $[N, R, T]$ -плана продолжительность наблюдений  $T$  для оценки средних показателей надежности определяем по формуле:

$$T = \frac{\chi t_{\text{ср}}}{N}, \quad (29)$$

где  $N$  — число объектов наблюдения;  $\chi$  — двусторонний критерий.

Предполагая, что поток отказов простейший, определяем величину  $\chi$ . Для этого задаем относительную ошибку  $\delta$  и одностороннюю доверительную вероятность  $\beta$ . Принимаем:

$$\delta = \left| \frac{n - n^*}{n} \right| = 0,20, \quad (30)$$

где  $\Pi$  — оценка показателя надежности;  $\Pi^*$  — односторонняя доверительная граница показателя надежности (наиболее отстоящая от  $\Pi$ ).

Одностороннюю доверительную вероятность  $\beta$  для оценки показателей надежности принимаем равной 0,8. Тогда  $\chi = 29$ . Предполагаем, что среднее значение наработки на отказ СВО электродвигате-

лей АВ-8000/6000УЗ равно  $1,5 \cdot 10^3$  ч, количество электродвигателей  $N = 8$ . Тогда:

$$T = \frac{29 \cdot 1,5 \cdot 10^3}{8} = 5,43 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

Полученные значения округляем до ближайшего нормированного значения, равного  $6,5 \cdot 10^3$  ч. Фактическая средняя продолжительность наблюдений за электродвигателями:

$$T_{\Phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i = 6,875 \cdot 10^3 \text{ ч, т.е. } T_{\Phi} > T.$$

Период эксплуатации исследуемой совокупности электродвигателей разделен на временные интервалы. В качестве последних были выбраны интервалы, равные наработке на отказ  $1 \cdot 10^3$  ч. Это связано с тем, что электродвигатели имеют неодинаковую наработку по годам эксплуатации. Наибольшую наработку имеют электродвигатели в первый год эксплуатации из-за частых пусков и остановов энергоблоков для их наладки, регулирования, устранения дефектов и т.п. По мере эксплуатации оборудования продолжительность работы электродвигателей постепенно уменьшается и, начиная примерно с шестого года, устанавливается в среднем на уровне 404 ч в год. Таким образом, коэффициент технического использования электродвигателей уменьшается по сравнению с первым годом эксплуатации с 16,2 до 4,6 %.

При выборе интервалов принято во внимание следующее обстоятельство. Уменьшение длины интервала (соответственно увеличение числа интервалов) при ограниченной продолжительности наблюдений связано со снижением числа нарушений герметичности внутри интервала и, соответственно, потерей достоверности и точности статистических оценок внутри интервалов. Кроме этого, временной интервал, равный  $1 \cdot 10^3$  ч наработки, примерно соответствует наработке между средними ремонтами энергоблоков 300 МВт, принятой на большинстве электростанций и равной 2 — 2,5 годам эксплуатации.

Вследствие того, что электродвигатели вводились в эксплуатацию не одновременно, а с интервалом 8 — 19 мес, то в каждом временном интервале, начиная с седьмого года эксплуатации, входила не вся совокупность исследуемых двигателей. В связи с этим для точечной оценки повреждаемости принято отношение числа СВО, имеющих нарушение герметичности или проходимости за время наблюде-



ния  $T$ , ко всему числу наблюдаемых СВО в этом временном интервале, которое определялось по формуле:

$$q_i = \frac{d_i}{N_i \Delta T_i}, \quad (31)$$

где  $q_i$  — удельная повреждаемость в интервале  $\Delta T_i$ ;  $d_i$  — число отказавших СВО в интервале  $\Delta T_i$ ;  $N_i$  — число СВО электродвигателей, находящихся под наблюдением в интервале  $\Delta T_i$ .

Средняя удельная повреждаемость определялась по формуле:

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n N_i \Delta T_i}, \quad (32)$$

где  $q_{\text{ср}}$  — средняя удельная повреждаемость;  $n$  — число временных интервалов наблюдения.

Средняя удельная повреждаемость, приведенная к одному году эксплуатации:

$$q'_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \frac{T_{\text{ср}}}{\Delta T}, \quad (33)$$

где  $T_{\text{ср}}$  — среднегодовая наработка электродвигателей за наблюдаемый период эксплуатации, равная 589 ч.

По месту обнаружения отказы распределены следующим образом:

СВО ротора, течь:	Число	%
в радиальных узлах . . . . .	25	69,4
в пайках . . . . .	11	30,6
СКВО статора, течь:		
трубок воздухоохладителя . . . . .	6	27,3
охлаждающих сегментов . . . . .	5	22,7
по резьбовым соединениям . . . . .	4	18,2
по пайкам . . . . .	3	13,6
закупорка охлаждающей ветви . . . . .	3	13,6
ретитрование трубки о ребро жесткости . . . . .	1	4,5

На рис. 19 построены гистограммы удельной повреждаемости СНВО ротора и СКВО статора.

Для возможности применения математического аппарата теории вероятностей и математической статистики при анализе и прогнозировании отказов в СВО электродвигателей целесообразно выровнять

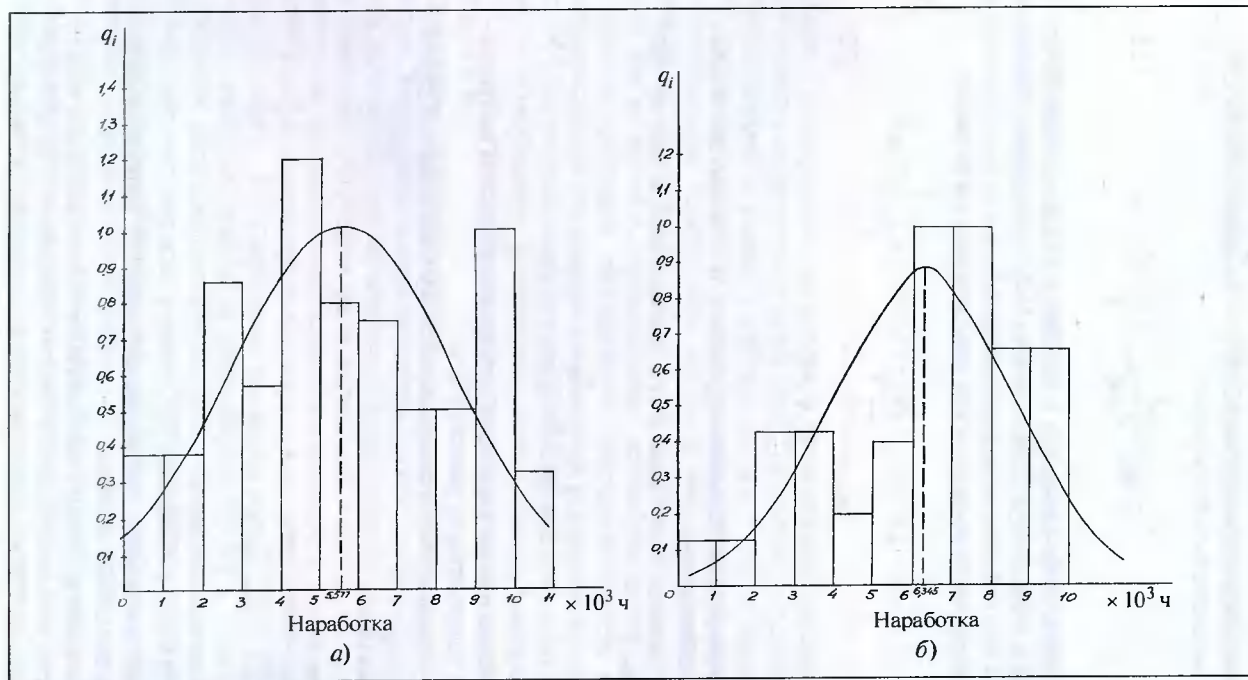


Рис. 19. Гистограмма удельной повреждаемости и теоретические кривые плотности нормального распределения отказов СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ:

а — СНВО ротора; б — СКВО статора

полученный по экспериментальным данным статистический ряд с помощью теоретической кривой.

По виду гистограмм СНВО ротора и СКВО статора можно предположить, что имеет место нормальный закон распределения случайной величины отказов этих сборочных единиц. До решения задач апостериорного анализа надежности необходимо в первую очередь проверить при помощи статистического критерия согласия или графически соответствие выбранного априорного распределения эмпирическому распределению, построенному по данным эксплуатационных испытаний.

Для проверки гипотезы о нормальном распределении вероятности отказов в СНВО ротора и СКВО статора используем критерий согласия Колмогорова, а также графоаналитический метод. По данным расчетов определяем максимальное отклонение функции опытного распределения отказов СНВО ротора от функции теоретического распределения:

$$D_n = \max |F_n(y_{in}) - F(y_{in})|, \quad (34)$$

а также величину  $\lambda_n$  по формуле (12).

В нашем случае  $D_n = 0,13$  при  $x$  в интервале 4 – 5; фактическое число отказов  $n = 36$ .

Задаемся доверительной вероятностью того, что отклонение функции опытного распределения от теоретического будет меньше  $\lambda^*$ , установленной для доверительной вероятности  $v$  [см. формулу (13)].

Принимаем  $v = 0,6$ , тогда для доверительной вероятности  $v = 0,6$   $\lambda^* = 0,89$ .

Условие  $0,78 < 0,89$  выполняется. Для построения доверительной области теоретического распределения вычисляем:

$$D_n^* = \frac{\lambda_n^*}{\sqrt{n}}, \quad (35)$$

$D_n^* = 0,148$ . Наносим на график верхнюю и нижнюю доверительные границы (рис. 20):

$$F_u(y) = F(y) + D_n^*; \quad F_L(y) = F(y) - D_n^*. \quad (36)$$

Построенная на графике функция опытного распределения не выходит за доверительные границы и условие  $\lambda_n \leq \lambda_n^*$  выполняется. Следовательно, гипотеза о нормальном распределении времени отказов СНВО ротора принимается. Вычисляем значения функции теоретического распределения и наносим на гистограмму (см. рис. 19). Функция нормального распределения определяется двумя парамет-

рами  $\bar{x}$  и  $s$ . Следовательно, для исследуемой совокупности электродвигателей распределение отказов в СНВО ротора подчиняется нормальному закону. Из выполненных расчетов  $\bar{x} = 5,577$ ,  $s = 2,833$ . Функция плотности вероятности отказов в СНВО ротора имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{2,833\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - 5,577)^2}{2 \cdot 2,833^2} \right]. \quad (37)$$

Аналогично изложенному делаем предположение, что имеет место нормальный закон распределения отказов СКВО статора, и выполняем проверку по критерию согласия Колмогорова. Графики функций приведены на рис. 19, б и 20, б. Следовательно, гипотеза о нормальном распределении отказов в СКВО статора принимается. Параметры распределения равны:  $\bar{x} = 6,345$ ,  $s = 2,395$ .

Для анализа надежности СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ могут быть использованы также вероятностные сетки. Вероятностная сетка для нормального распределения вероятностей представляет собой прямоугольную сетку, на которой масштаб выбран так, что график функции этого распределения является прямой линией. Для применения вероятностных сеток элементы выборки нумеруют в порядке возрастания:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \dots \leq x_n. \quad (38)$$

Эмпирическую функцию распределения  $F_3(x)$  определяем по формуле (23). Вычисляем коэффициент масштаба по формуле (24).

Для выбора масштаба по оси ординат задаются:  $F_{min} = 0,001$ ;  $F_{max} = 0,999$ .

Тогда  $y_{min} = -3,090$ ;  $y_{max} = 3,090$ . Величину  $s_y(F)$  вычисляем по формуле:

$$s_y(F) = \frac{H}{6,180} y, \quad (39)$$

где  $H$  — длина шкалы по оси ординат, мм;  $y = u(F)$  — квантиль нормального распределения, отвечающий значению  $F$ .

По этим значениям предполагаемой нормально распределенной случайной величины  $x$  на вероятностной сетке для нормального распределения строим прямую, изображающую график распределения, используя метод наименьших квадратов. В отличие от визуального построения метод наименьших квадратов дает способ объективного построения прямой по опытным точкам. Используя этот метод по формуле (25), строим прямую, а по формулам (26) и (27) определяем коэффициенты  $q$  и  $r$ .

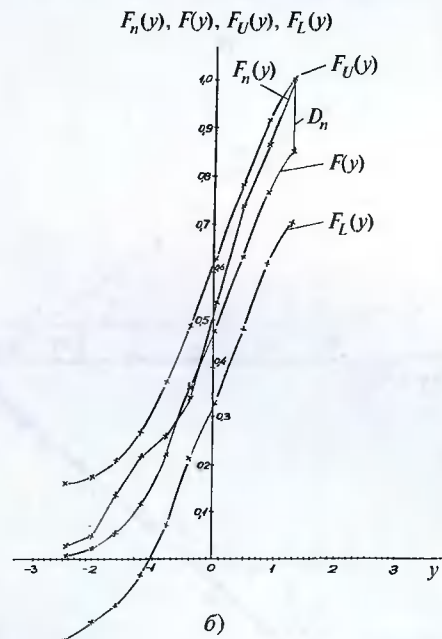
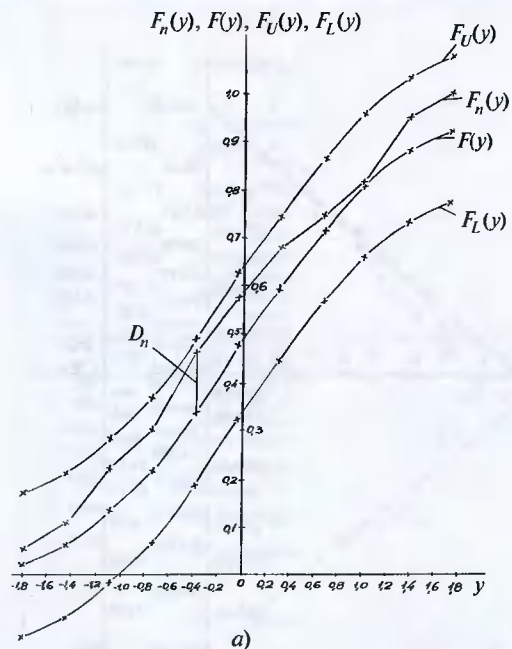
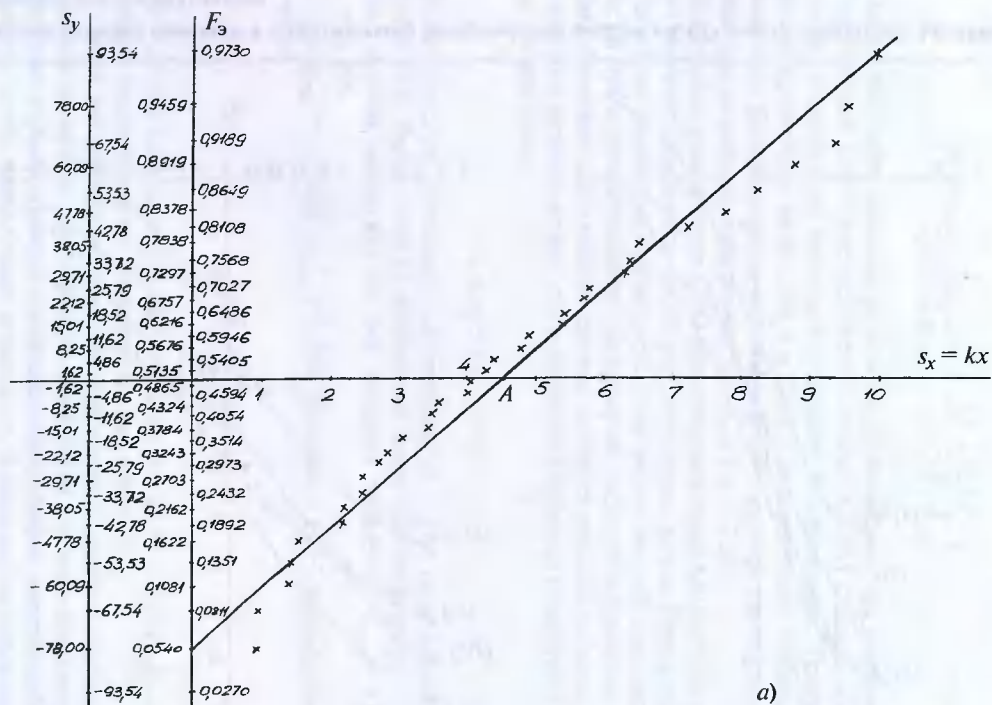


Рис. 20. Графики функций опытного и теоретического распределения отказов в СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ:  
а — СНВО ротора; б — СКВО статора





a)

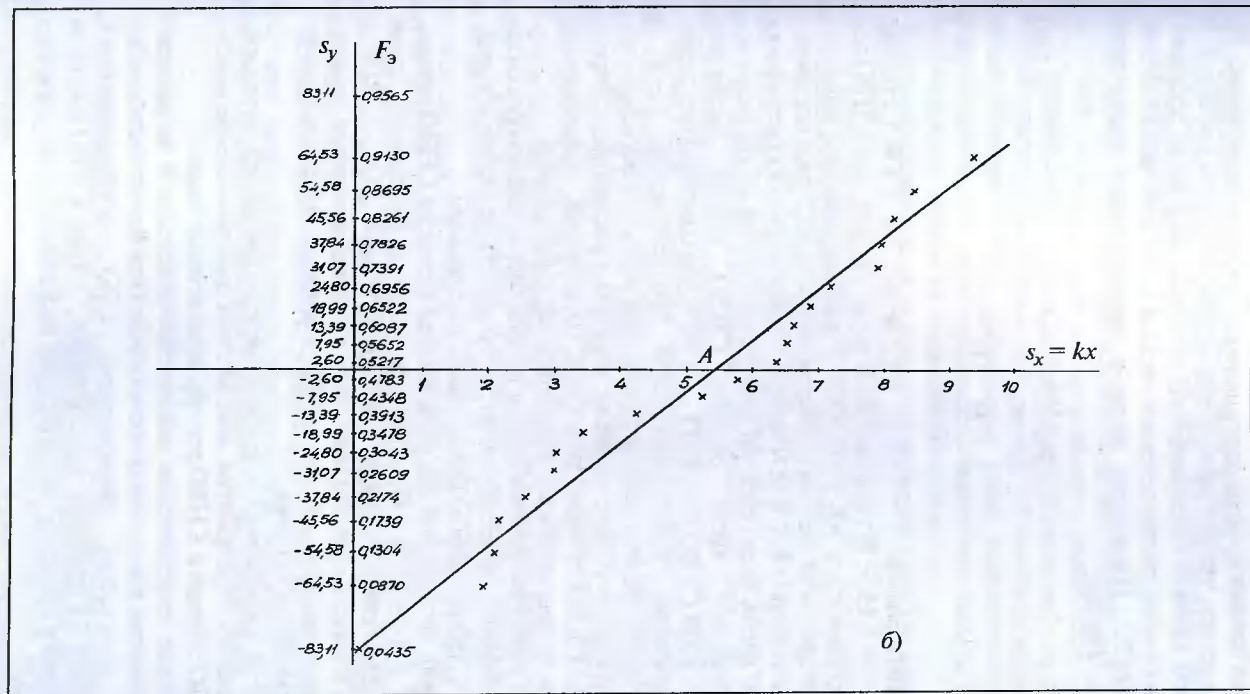


Рис. 21. Графическая проверка согласия эмпирического распределения отказов в СВО электродвигателей АВ-8000/6000У3 с теоретическим и определение их параметров при помощи вероятностных сеток:

а — СНВО ротора; б — СКВО статора

Расчетная прямая и эмпирические точки представлены на рис. 21. Из рис. 21 следует, что эти эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой. Следовательно, опытные данные не противоречат нормальному распределению отказов СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ. Параметры законов распределения определяем следующим образом:

$$\bar{x} = \frac{OA}{k_x}; \quad (40)$$

$$s = \frac{H}{6,180k_x} \frac{1}{q}. \quad (41)$$

Для СНВО ротора:  $\bar{x} = 4,5765$ ,  $s = 2,8626$ . Для СКВО статора:  $\bar{x} = 5,4145$ ,  $s = 3,1563$ . Из изложенного выше следует, что СНВО ротора электродвигателя АВ-8000/6000УЗ рассматриваемой совокупности имеет среднюю удельную повреждаемость в 1,5 раза превышающую аналогичную для СКВО статора. Из рассмотрения гистограмм следует, что время эксплуатации электродвигателей до возникновения наибольшего числа отказов СНВО ротора составляет  $(4 - 5)10^3$  ч, а для СКВО статора  $(5 - 7)10^3$  ч, что соответствует периоду эксплуатации электродвигателей соответственно 6 – 8 и 8 – 12 лет. В этот период целесообразно при ремонтах обратить особое внимание на состояние наименее надежных элементов и сборочных единиц СКВО статора: резьбовых соединений, охлаждающих сегментов и их гидравлических соединений, коллекторов.

В связи с резко увеличивающейся повреждаемостью воздухоохладителей и достижения предельного состояния после наработки, равной  $6 \cdot 10^3$  ч, их целесообразно заменять резервными.

Вследствие постоянной высокой повреждаемости СНВО ротора, вызванной в основном образованием течей в радиальных узлах (69,4 %), целесообразно после наработки, равной  $(0,4 - 0,5)10^3$  ч, выполнять контрольную подтяжку гаек с гидравлическими испытаниями, а после наработки  $(0,8 - 1,0)10^3$  ч заменять резиновые уплотняющие прокладки новыми.

В процессе капитального ремонта электродвигателей целесообразно выполнять мероприятия, обеспечивающие повышение надежности СКВО статора и СНВО ротора, изложенные ниже.

Полученные теоретические законы распределения и их эмпирические параметры дают возможность определить вероятность максимального количества повреждений СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ в процессе эксплуатации. Отказы СНВО ротора и СКВО статора в процессе эксплуатации распределены по нормальному закону.

### 3.9. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, КАК СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Под наблюдением находились  $N$  электродвигателей (216 электродвигателей, установленных на энергоблоках мощностью 300 МВт ТЭС в период эксплуатации от 7 до 14 лет). При этом было принято, что отказ электродвигателя — это аварийный или вынужденный его останов, а также ремонт, проводимый ранее планируемого срока. Предполагалось, что электродвигатели эксплуатировались в непрерывном режиме работы на предельных параметрах.

При анализе надежности электродвигателей приняты следующие допущения. Потoki событий (отказов) для исследуемых электродвигателей приняты ординарными, без последствий, простейшими (пуассоновскими), стационарными. Стационарность потока характеризуется тем, что на любом временном интервале вероятность появления отказа зависит только от длительности интервала (промежутка). Свойство ординарности означает, что появление двух и более событий за малый промежуток времени практически невозможен.

Поток отказов называется потоком без последствий, если для произвольно выбранных несовпадающих интервалов времени число отказов в одном из них не зависит от числа отказов, появляющихся в других интервалах. Пуассоновский поток обладает стационарностью, ординарностью и отсутствием последствий.

Физический анализ процесса различных видов отказов свидетельствует о том, что с большой достоверностью можно сделать предположение о их независимости. Каждый электродвигатель рассчитывается как система, состоящая из  $n$  элементов (узлов): обмотки статора, подшипников, ротора, системы охлаждения и вентиляции и др.

При этом отказ одного из элементов (узлов) может привести к отключению системы электродвигателя. Расчетная схема надежности приведена на рис. 22.

Вследствие того, что электродвигатель сохраняет работоспособность при исправности только всех его узлов, вероятность безотказной работы электродвигателя определяется по выражению:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (42)$$

где  $P_i$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го узла электродвигателя.

Для проверки гипотезы о возможности применения экспоненциального распределения при определении вероятности отказа рассматриваемых электродвигателей и вычислении его параметров при-

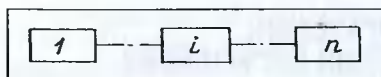


Рис. 22. Структурная схема надежности электродвигателей

меняется графоаналитический метод с использованием вероятностных сеток и критерий согласия Бартлетта.

Вероятностная сетка для экспоненциального распределения имеет прямоугольную форму. Масштаб сетки выбирается таким образом, чтобы график функции этого распределения был прямолинейным. Для этого на ось абсцисс наносится равномерная шкала, а по оси ординат откладывается функция  $F(y) = 1 - e^{-y}$ .

Коэффициент масштаба  $k_x$  для оси абсцисс определяется по формуле (24).

Для выбора масштаба по оси ординат задаются значения  $F_{max} = 0,999$  и  $F_{min} = 0$ . Тогда  $y_{min} = 0$ ,  $y_{max} = 6,908$ , а величина  $s_y(F)$  вычисляется по формуле:

$$s_y(F) = \frac{H}{6,908} y, \quad (43)$$

где  $H$  — длина шкалы по оси ординат, мм;  $e = \ln(1 - F)$ ;  $F$  — эмпирическая функция распределения.

Затем строят прямолинейную зависимость методом наименьших квадратов. Экспериментальные и расчетные данные для проверки согласия эмпирического распределения отказов электродвигателя типа ДВДА-215/39-12-6 с теоретическим экспоненциальным распределением приведены на рис. 23. Так как нанесенные эмпирические точки незначительно отклоняются от проведенной прямой, то экспериментальные данные по отказам электродвигателей ДВДА 215/39-12-16 не противоречат экспоненциальному распределению. Для аналитической проверки соответствия экспериментальных данных экспоненциальному распределению используется наиболее мощный по сравнению с другими, критерий Бартлетта. Для этого необходимо вычислить статистику:

$$B_r = \frac{2r \left[ \ln \left( \frac{t_r}{r} \right) + \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^r \ln x_i \right) \right]}{1 + (r+1)/6r}, \quad (44)$$

где  $x_i$  — случайное значение, обозначающее наработку на отказ;  $r$  — число отказов;  $t_r = \sum_{i=1}^r x_i$ .



При допущении экспоненциального распределения статистика  $B_r$  имеет распределение  $\chi^2$  с  $(r - 1)$  степенями свободы. Кроме того, имеет место двусторонний критерий  $\chi^2$ . В связи с тем, что критерий Бартлетта обладает мощностью, необходимой для статистического разграничения при выборке, содержащей не менее 20 отказов, использовались данные по отказам электродвигателя типа АВ-8000/6000УЗ с числом отказов до 25. По формуле (44) вычисляется статистика для электродвигателя АВ-8000/6000УЗ:  $B_{25} = 17,387$ .

Далее приводятся критические значения для двустороннего критерия:  $\chi^2_{0,95; 24} = 13,848$ ;  $\chi^2_{0,05; 24} = 36,415$ .

Отсюда следует, что критерий Бартлетта не противоречит предположению о том, что наработка на отказ подчиняется экспоненциальному распределению. Таким образом, распределение времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону.

Точечные оценки показателей надежности по эксплуатационным данным определяют следующим образом:

функция плотности вероятности — по формуле (7); точечная оценка для параметра  $\lambda$  — по формуле (8).

Параметр потока отказов электродвигателей определяется по формуле:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (45)$$

где  $\lambda_i$  — параметр потока отказов  $i$ -го узла.

Рис. 23. Графическая проверка согласия эмпирического распределения отказов электродвигателей ДВДА-215/39-12-16 с теоретическим экспоненциальным распределением

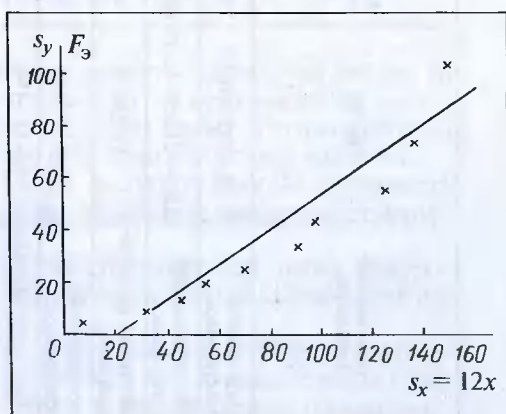


Таблица 1

Наименование механизма	Тип ЭД	Мощность, кВт	Параметр потока отказов							Средняя наработка до первого отказа	Вероятность безотказной работы до первого отказа в первый год
			пробой обмотки статора	увлажнение обмотки статора	повреждение ротора	повреждение подшипника	повреждение системы охлаждения и вентиляции	повреждение остальных узлов	повреждение ЭД в целом		
Питательный электронасос	AB-8000/6000УЗ	8000	0,04651	0,02326	—	0,03488	0,2326	—	0,33725	2,9652	0,7137
Циркуляционный электронасос	ДВДА-215/39-12-16	1000/500	0,01744	—	—	0,03488	—	0,0058	0,05812	17,2058	0,9435
Бустерный питательный насос	AP-500	500	0,02713	—	0,00387	0,16667	—	0,003876	0,20155	4,9615	0,8175
Конденсатный электронасос	BA-12-41-4	500	0,04264	0,003876	—	0,29070	—	—	0,33722	2,9656	0,7138
Насос слива дренажа	AB-113-4М	250	0,02907	—	—	0,2674	—	—	0,29647	3,3727	0,7434
Насос регулирования турбины	A-112-4	200	0,06122	0,0068	—	0,5238	—	—	0,59182	1,6898	0,5533
Насос пускового эжектора	A-112-4	200	0,07792	—	0,0129	0,2987	—	—	0,38961	2,5667	0,6773
Шаровая мельница	СДМЗ-20-49-60	2000	0,1705	0,0116	0,0348	0,03101	0,01938	0,04651	0,31388	3,18593	0,7306
Мельничный вентилятор	ДАЗО-13-50-4	550	0,12403	—	0,0038	0,32946	0,01163	0,0155	0,4845	2,0640	0,6160
Вентилятор горячего дутья	ДАЗО-12-55-8	250	0,01163	—	—	0,1395	—	—	0,15113	6,6168	0,8597
Дымосос	ДАЗО-19-10-12	1700	0,01744	—	—	0,08140	—	0,01163	0,11047	9,0530	0,8954
Дутьевой вентилятор	ДАЗО-15-69-8/10	800/400	0,01744	0,0058	—	0,320	—	—	0,34324	2,9134	0,7095

Далее рассчитываются следующие показатели:  
вероятность безотказной работы до первого отказа по формуле (9);  
средняя наработка до первого отказа:

$$T_{\Phi} = \frac{1}{\lambda}. \quad (46)$$

Определив экспериментально по формуле (8) параметр  $\lambda$ , можно рассчитать вероятность безотказной работы до первого отказа, среднюю наработку до первого отказа и т.п.

Для проверки достаточности рассматриваемого объема наблюдений над исследуемыми электродвигателями выполняются дополнительные расчеты. Продолжительность наблюдений  $T$  для оценки средних показателей надежности  $t_{cp}$  вычисляют по формуле (29).

Так же как и ранее (в § 3.8) предполагаем, что поток отказов простейший, и определяем значение  $T$  при относительной ошибке  $\delta$  и односторонней доверительной вероятности  $\beta$ . Принимаем:

$$\delta = \frac{n - n^*}{n} = 0,20.$$

Односторонняя доверительная вероятность  $\beta$  для оценки показателей надежности принимается равной 0,80, тогда  $\chi = 29$ . Из данных электродвигателя ДАЗО-13-50-4 продолжительность  $T = 2,494$  года. Полученное значение округляется до целого числа, равного 3.

Тогда фактическая средняя продолжительность наблюдений за электродвигателями определяется по выражению:

$$T'_{\Phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i = 10,75 \text{ лет, т.е. } T'_{\Phi} > T.$$

Из изложенного следует, что вероятность безотказной работы до первого отказа мощных высоковольтных электродвигателей электростанций подчинена экспоненциальному закону, что проверено по критерию согласия Бартлетта и с помощью вероятностных сеток.

Анализ показывает (табл. 1), что эксплуатационная надежность отдельных типов электродвигателей низкая и не обеспечивает устойчивой работы энергоблоков.

С целью повышения надежности существующего парка электродвигателей необходимо внедрить ряд мероприятий, в том числе изложенных ниже.

При проектировании и изготовлении новых электродвигателей целесообразно обеспечить преимущество конструкции с учетом внедрения современных конструктивных и прогрессивных технологических решений в те узлы, которые имеют наименьшую надежность.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

# **Прогнозирование срока службы и планирование замены узлов электродвигателей и изоляции обмоток**

### **4.1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Прогнозирование срока службы корпусной изоляции обмоток статоров является важным вопросом для эксплуатации. В этой связи представляет большой интерес прогнозирование снижения уровня пробивных напряжений в процессе эксплуатации для планирования перемоток обмоток с заменой корпусной изоляции. Для этого необходимо определить период, в конце которого уровень пробивных напряжений наиболее “слабых” элементов обмотки приблизится к испытательному напряжению.

Если перемотка будет выполнена позже этого срока, то возможны пробой отдельных элементов обмотки в процессе эксплуатации. Планирование перемоток с периодом меньшим, чем фактический ресурс корпусной изоляции обмотки, значительно ухудшает стоимостные характеристики ремонтпригодности существующего парка электродвигателей. Стоимость полной перемотки обмотки статора с заменой корпусной изоляции соизмерима со стоимостью нового статора электродвигателя, а в отдельных случаях и превышает ее.

Вновь изготовленные обмотки статоров высоковольтных электродвигателей имеют значительный запас электрической прочности изоляции по отношению к испытательному и номинальному напряжению. Снижение электрической прочности изоляции в процессе эксплуатации происходит вследствие нагрева и температурных деформаций, динамических воздействий и вибрационного старения изоляции.

Электрическая прочность корпусной изоляции под воздействием изложенных выше эксплуатационных факторов может быть определена уравнением [7]:

$$U_{\text{пр}} = U_{0\text{пр}} e^{-bt}, \quad (47)$$

где  $U_{\text{пр}}$  — напряжение пробоя после воздействия эксплуатационных факторов, вызванных тепловыми и механическими нагрузками;  $U_{0\text{пр}}$  — напряжение пробоя после укладки обмотки в статор;  $b$  — коэффициент, характеризующий скорость уменьшения пробивного напряжения и определяющий интенсивность эксплуатационных воздействий на корпусную изоляцию;  $t$  — время эксплуатации.

Предлагаемая методика оптимизации планирования сроков замены изоляции базируется на использовании вероятностно-статистических методов. С этой целью проведены экспериментальные исследования на четырех обмотках двух трехфазных двухскоростных асинхронных электродвигателей вертикального исполнения типа ДВДД-215/39-12-16, [ $P = 1000/500$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 500/375$  мин<sup>-1</sup> (см. § 3.5)], которые используются в качестве привода циркуляционных насосов энергоблока мощностью 300 МВт.

При отсутствии данных по пробивным напряжениям вновь изготовленной и уложенной в статор обмотки использованы результаты испытаний катушек заводского изготовления по данным [8]. Это возможно в связи с идентичностью конструкции и технологии изготовления обмотки, одинаковой толщины изоляции, режимов компаундирования и методики проведения испытаний.

Коэффициент  $b$  в формуле (54) определен по результатам выполненных высоковольтных испытаний по следующей методике. К моменту проведения эксперимента каждый из электродвигателей № 1 и 2 находились в эксплуатации после монтажа 12 лет и 5 мес. Результаты испытаний приведены ниже:

	Электродвигатель	
	№ 1	№ 2
Пробивное напряжение (среднее), кВ . . . . .	33,34	34,16
Среднее квадратичное отклонение пробивного напряжения, кВ . . . . .	3,45	3,34
Наработка суммарная, ч . . . . .	73934	72960
Наработка среднегодовая, ч . . . . .	5957	5879
Нагрузка среднегодовая, % . . . . .	103,5	95,5
Коэффициент $b$ . . . . .	$0,95 \cdot 10^{-5}$	$0,93 \cdot 10^{-5}$
Прогнозируемый срок службы корпусной изоляции, ч (лет) . . . . .	126215 (21,2)	130688 (22,23)

Среднее пробивное напряжение резервных катушек после изготовления и укладки  $U_{0\text{пр.рп}} = 67,5$  кВ [8], для электродвигателя № 1



после 12,41 года эксплуатации и 73934 ч наработки  $U_{\text{пр.ср}} = 33,34$  кВ (см. § 3.5).

Подставляя полученные значения в формулу (47), определяем коэффициент  $b$  для электродвигателя № 1:  $33,34 = 67,5e^{-b \cdot 73934}$ , откуда

$$e^{-b \cdot 73934} = 0,4939259.$$

Логарифмируем обе части равенства

$$-b \cdot 73934 = \ln 0,4939259;$$

$$b = \frac{0,705369}{73934} = 0,95 \cdot 10^{-5}.$$

Следовательно, уравнение (47) для электродвигателя № 1 имеет вид:

$$U_{\text{пр.ср}} = U_{0\text{пр.ср}} e^{-0,95 \cdot 10^5 t}. \quad (48)$$

Для электродвигателя № 2:

$$34,16 = 67,5e^{-b \cdot 72960},$$

откуда

$$e^{-b \cdot 72960} = 0,506074.$$

Логарифмируем обе части равенства:

$$-b \cdot 72960 = \ln 0,506074;$$

$$b = \frac{0,681072}{72960} = 0,93 \cdot 10^{-5}.$$

Уравнение (47) для электродвигателя № 2 имеет вид:

$$U_{\text{пр.ср}} = U_{0\text{пр.ср}} e^{-0,93 \cdot 10^5 t}. \quad (49)$$

Распределение пробивных напряжений корпусной изоляции обмоток статоров высоковольтных электродвигателей в процессе эксплуатации подчинено нормальному закону. Плотность нормального распределения в общем виде:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \sqrt{2\pi} \exp \left[ -\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (50)$$

где  $d$  — математическое ожидание;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение.

Для электродвигателя № 1

$$f(x) = \frac{1}{3,45\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-33,34)^2}{2 \cdot 3,45^2}\right]. \quad (51)$$

Для электродвигателя № 2

$$f(x) = \frac{1}{3,34\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-34,16)^2}{2 \cdot 3,34^2}\right]. \quad (52)$$

Необходимо определить время, в течение которого практически невозможен пробой ни одного элемента обмотки. Из [6] для нормального распределения вероятности того, что  $x$  имеет значение, принадлежащее интервалу  $[\alpha, \beta]$ :

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta-\alpha}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha-d}{\sigma}\right), \quad (53)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int e^{-x^2/2} dx$  — функция Лапласа.

Далее используем правило трех сигм, которое состоит в том, что если случайная величина распределена по нормальному закону, то вероятность того, что абсолютное значение ее отклонения от математического ожидания превысит среднее квадратичное отклонение, равна 0,0027. Следовательно, в этом случае вероятность того, что отклонение по абсолютной величине будет меньше утроенного среднего квадратичного отклонения равна 0,9973. Исходя из принципа невозможности маловероятных событий считаем, что пробой в этом случае практически невозможен.

Предполагаем, что в процессе эксплуатации среднее квадратичное отклонение пробивных напряжений обмотки статора остается постоянным  $\sigma = \text{const}$ . Величину  $\alpha$  принимаем равной испытательному напряжению переменного тока для электродвигателей напряжением 6 кВ. В соответствии с [3]  $U_{\text{исп}} = \alpha = 10$  кВ.

Тогда

$$d = \alpha + 3\sigma; \quad (54)$$

$$\beta = d + 3\sigma. \quad (55)$$

Для электродвигателя № 1:  $d = 10 + 10,35 = 20,35$ ;

$$\beta = 20,35 + 10,35 = 30,70.$$

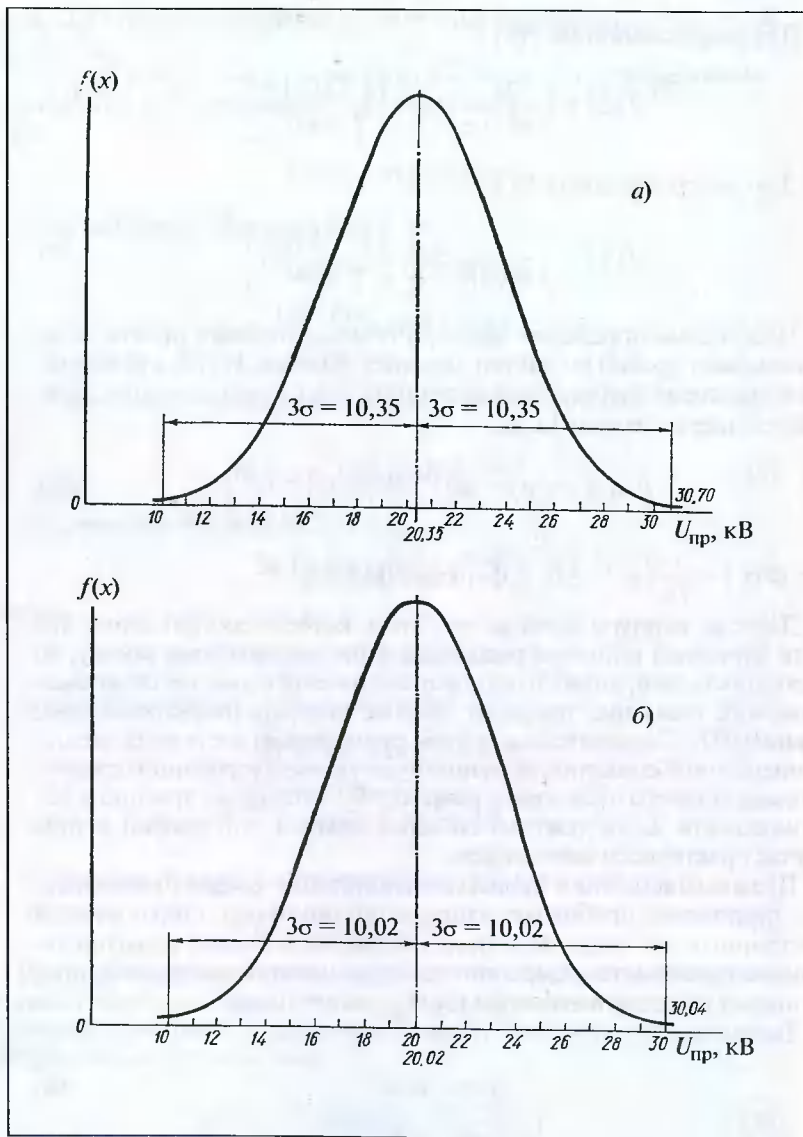


Рис. 24. Нормальные кривые (кривые Гаусса) плотности распределения пробивных напряжений обмоток статоров электродвигателей типа ДВДД-215/39-12-16: а — электродвигатель № 1 после наработки 126215 ч; б — электродвигатель № 2 после наработки 130688 ч

Для электродвигателя № 2:  $d = 10 + 10,02 = 20,02$ ;

$$\beta = 20,02 + 10,02 = 30,04.$$

Следовательно, при вероятности, равной 0,9973, ни у одного элемента обмотки электродвигателя пробивные напряжения не будут ниже 10 кВ при  $U_{пр.ср} = 20,35$  кВ для электродвигателя № 1 и  $U_{пр.ср} = 20,02$  кВ для электродвигателя № 2. Результаты расчетов приведены на рис. 24, а, б.

Определим время  $t$ , при котором среднее пробивное напряжение снизится до 20,35 кВ:

для электродвигателя № 1:

$$20,35 = 67,5e^{-0,95 \cdot 10^{-5}t}; \quad e^{-0,95 \cdot 10^{-5}t} = 0,3014814.$$

Прологарифмируем обе части полученного уравнения и определим время  $t$ :

$$\ln 0,3014814 = -0,95 \cdot 10^{-5}t.$$

Наработка до замены изоляции:

$$t = \frac{1,199046}{0,95 \cdot 10^{-5}} = 126215,36 \text{ ч.}$$

Зная, что среднегодовая наработка электродвигателя № 1 равна 5957 ч определяем время эксплуатации до замены изоляции, равное 21,2 года;

для электродвигателя № 2:

$$20,02 = 67,5e^{-0,93 \cdot 10^{-5}t}; \quad e^{-0,93 \cdot 10^{-5}t} = 0,2965925;$$

$$-0,93 \cdot 10^{-5}t = \ln 0,2965925;$$

$$t = \frac{1,215397}{0,93 \cdot 10^{-5}} = 130688,84 \text{ ч.}$$

Время до замены изоляции  $130688/5879 = 22,23$  года.

Расчеты, выполненные по предлагаемой методике, согласуются с практикой эксплуатации электродвигателей рассматриваемых типов.

Исходя из вышеизложенного, следует, что применение вероятностно-статистических методов дает возможность прогнозировать заданный уровень надежности корпусной изоляции мощных высоковольтных электродвигателей привода ответственных механизмов энергоблоков.

Предложенный метод прогнозирования срока службы корпусной изоляции обмоток статоров высоковольтных электродвигателей электростанций с использованием целевого эксперимента значительно повышает надежность эксплуатации и улучшает стоимостные характеристики ремонтпригодности электродвигателей. Планирование сроков перемоток обмоток статоров с заменой корпусной изоляции можно выполнять с использованием разработанной методики.

Для возможности прогнозирования срока службы корпусной изоляции электродвигателей других типов привода ответственных механизмов мощных энергетических блоков необходимо путем проведения эксперимента определить коэффициент  $b$ .

С целью увеличения ресурса обмотки до замены изоляции необходимо снизить уровень эксплуатационных нагрузок на изоляцию обмотки путем уменьшения воздействия на нее термомеханических факторов.

#### **4.2. ПЛАНИРОВАНИЕ СРОКОВ ЗАМЕНЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ИЗНОСОВЫХ ОТКАЗОВ**

Для оценки сроков замены изоляции обмотки статора необходимо определить срок ее службы, т.е. календарную продолжительность эксплуатации до наступления предельного состояния. Под предельным будем понимать такое техническое состояние изоляции, при котором ее дальнейшая эксплуатация экономически нецелесообразна.

Критерием экономической нецелесообразности дальнейшей эксплуатации электродвигателей ответственных механизмов является резкое увеличение интенсивности эксплуатационных отказов обмотки статора вследствие старения ее изоляции. Если в рассматриваемый период эксплуатации однотипных электродвигателей интенсивность отказов остается постоянной, то из этого следует, что старение изоляции еще не сказывается, т.е. в указанный период происходит нормальная эксплуатация электродвигателей. Постоянство интенсивности отказов в определенный промежуток времени свидетельствует о том, что отказы обмотки статора подчинены экспоненциальному закону. С началом роста интенсивности отказов заканчивается период случайных отказов обмотки статора и начинается период износных отказов. При переходе к этому периоду необходимо заменять изоляцию обмотки.

Для анализа надежности обмоток статоров взяты данные об эксплуатационных отказах 24 синхронных электродвигателей типа



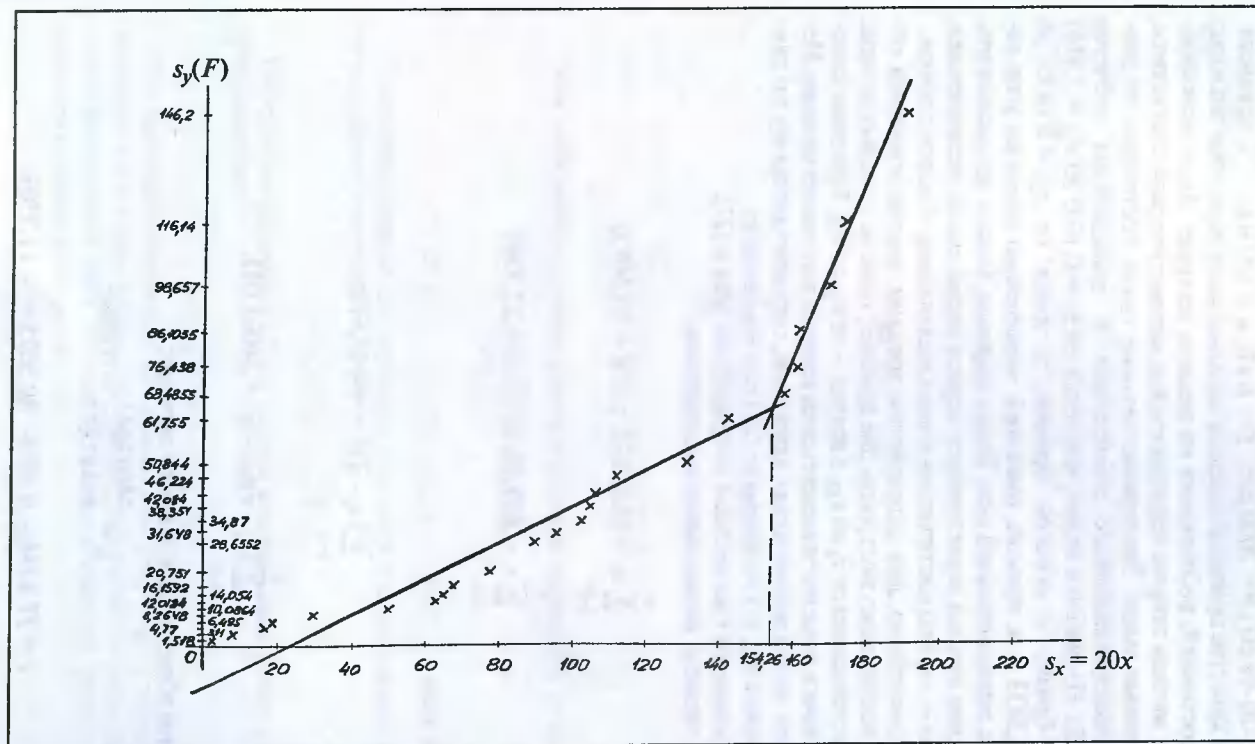


Рис. 25. Определение времени перехода от периода нормальной эксплуатации к периоду износовых отказов обмотки статора электродвигателя СДМЗ-20-49-60

СДМЗ-20-49-60 ( $P = 2000$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>), применяемых в качестве привода шаровых мельниц котлоагрегатов тепловых электростанций, работающих на твердом топливе. Далее использовались методы теории вероятностей и математической статистики, изложенные выше. Экспериментальные точки построены по данным эксплуатационных наблюдений и проведенных расчетов (рис. 25). Из рисунка видно, что точки от  $x_1 = 0,1667$  до  $x_{23} = 7,9167$  лежат близко к пологой прямой, а точки от  $x_{24} = 8,0833$  до  $x_{28} = 9,5833$  — к прямой, имеющей значительно больший угол наклона к горизонтальной оси. Таким образом, можно предположить, что первая прямая характеризует период нормальной эксплуатации, а вторая — период наступления износовых отказов обмотки статора.

Следовательно, для определения времени замены изоляции обмотки необходимо построить две прямые, одна из которых должна быть расположена от  $x_1$  до  $x_{23}$ , а другая — от  $x_{24}$  до  $x_{28}$ . При этом наносимые точки должны отклоняться от прямых как можно меньше. Используем метод наименьших квадратов, согласно которому по данным точкам ( $n_i, v_i$ ) по формуле (25) строим прямую.

Значения  $q$  и  $r$  вычисляем по формулам (26) и (27).

Для периода нормальной эксплуатации:

$$\sum_{i=1}^n u_i = 1851,672, \text{ т.е. } \bar{u} = 80,5075;$$

$$\sum_{i=1}^n v_i = 639,9619, \text{ т.е. } \bar{v} = 27,8244$$

При этом

$$\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 = 49447,677;$$

$$\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(u_i - \bar{u}) = 24063,041.$$

Таким образом, для данного периода:

$$q = \frac{24063,041}{49447,677} = 0,4866;$$

$$r = 27,8244 - 0,4866 \cdot 80,5075 = -11,3505.$$

Уравнение прямой для периода нормальной эксплуатации имеет вид:

$$v = 0,4866u - 11,3505.$$

Для удобства вычислений величин  $q$  и  $r$  соответствующих периоду износовых отказов, принимаем новую систему координат с нулевой точкой по оси  $v = +75$  и по оси  $u = +160$ . Для данного периода:

$$\sum_{i=1}^n u_i = 61,6, \text{ т.е. } \bar{u} = 12,32;$$

$$\sum_{i=1}^n v_i = 148,5385, \text{ т.е. } \bar{v} = 29,7077.$$

При этом

$$\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 = 578,5387;$$

$$\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(u_i - \bar{u}) = 1313,0104.$$

Таким образом, значения  $q$  и  $r$  для периода износовых отказов:

$$q = \frac{1313,0104}{578,5387} = 2,2695;$$

$$r = 29,7077 - 2,2695 \cdot 12,32 = 1,7475.$$

Уравнение прямой для периода износовых отказов в новой системе координат имеет вид:

$$v = 2,2695u + 1,7475. \quad (56)$$

Переносим уравнение (56) в старую систему координат, где оно принимает вид:

$$v = 2,2695u - 286,3725. \quad (57)$$

Для построения прямых по уравнениям (56) и (57) определяем значения  $v$  и  $u$  в двух точках. Находим графически и аналитически точку пересечения этих прямых. Для аналитического решения составляем систему уравнений:

$$v = 0,4866u - 11,3505;$$

$$v = 2,2695u - 286,3725.$$

Приравниваем правые части уравнений (56) и (57):

$$0,4866u - 11,3505 = 2,2695u - 286,3725.$$

$$\text{Отсюда } u = \frac{275,0220}{1,7829} = 154,2554.$$

Определяем время перехода от периода нормальной эксплуатации к периоду износовых отказов:

$$x = \frac{154,2554}{20} = 7,71 \text{ года.}$$

Из рисунка видно, что нанесенные эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой для периода нормальной эксплуатации. Таким образом, опытные данные не противоречат предположению, что отказы обмотки статора в период нормальной эксплуатации распределены по экспоненциальному закону.

Для электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60 рассматриваемой совокупности период износовых отказов обмотки статора наступает через 7,71 года после начала эксплуатации. В этот период интенсивность отказов обмотки статора по эксплуатационным данным увеличивается в 4,66 раза. С целью обеспечения эксплуатационной надежности работы электродвигателей СДМЗ-20-49-60 целесообразно через 8 лет эксплуатации выполнить полную перемотку обмотки статора с заменой изоляции.

Таким образом можно сделать следующие выводы. Отказы обмотки статора электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60 в период нормальной эксплуатации подчинены экспоненциальному закону.

Применение предлагаемого метода планирования сроков перемотки обмоток статоров с заменой изоляции повышает надежность работы высоковольтных электродвигателей привода ответственных механизмов. Использование вероятностно-статистических методов дает возможность прогнозировать заданный уровень надежности изоляции высоковольтных электродвигателей.

Следует также отметить, что для увеличения ресурса обмотки до замены необходимо снижать уровень эксплуатационных нагрузок на изоляцию путем уменьшения воздействия на нее термомеханических факторов. Снизить температуру обмотки статора можно применением магнитных пазовых клиньев статора, а повысить динамическую устойчивость — более жестким креплением.

### **4.3. ПЛАНИРОВАНИЕ СРОКОВ ЗАМЕНЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАВШИХ В АНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ**

В процессе эксплуатации мощных высоковольтных электродвигателей наблюдается их работа в аномальных режимах: однофазного и двухфазного КЗ, несимметричного включения электродвигателей и др.

Аномальные режимы работы кратковременны, так как электродвигатель, как правило, отключается действием релейной защиты. Однако в этот период в обмотке статора протекают токи, значительно превышающие не только номинальные, но и пусковые значения. Эти токи сопровождаются существенными электродинамическими усилиями, которые больше всего сказываются на лобовых частях обмотки статора.

В зависимости от принятой конструкции крепления обмотки электродинамические усилия вызывают деформацию, смещение витков, образование трещин и местных дефектов изоляции. Несмотря на кратковременность действия, такие явления приводят к необратимым процессам в изоляционной конструкции, снижающим пробивные напряжения отдельных ее элементов.

Снижение пробивного напряжения отдельных элементов и обмотки в целом зависит от ее технического состояния: температуры обмотки, наличия связующего вещества в изоляции (для микалентной компаундированной изоляции), наложения шнуровых бандажей и др.

Вследствие термомеханических и химических процессов количество связующего в изоляции уменьшается. Она становится сухой и хрупкой, тогда работа электродвигателя в аномальных режимах может привести к резкому снижению электрической прочности элементов обмотки. Если это снижение будет ниже рабочего напряжения, то произойдет пробой изоляции при работе электродвигателя.

Изоляция с большим содержанием связующего более эластична и лучше выдерживает электродинамические усилия. На пластичность изоляции влияет также температура обмотки, так как с повышением температуры связующего битум размягчается.

Автором исследованы значения пробивных напряжений обмоток статоров электродвигателей напряжением 6 кВ в процессе длительной эксплуатации. За этот период электродвигатели не работали в аномальных режимах. В результате исследований установлено, что значения пробивных напряжений в катушках распределены по нормальному закону.



Для диагностики технического состояния и прогнозирования надежности электродвигателей после работы в аномальных режимах представляет интерес анализ распределения значений их пробивных напряжений.

Экспериментальная часть работы была выполнена на обмотке трехфазного асинхронного электродвигателя вертикального исполнения типа АВ-113-4М ( $P = 250$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 1480$  мин<sup>-1</sup>), используемого в качестве привода насоса слива дренажа энергоблока мощностью 300 МВт. Обмотка статора двухслойная и изготовлена из жестких катушек. Изоляция катушек непрерывная, микалентная, компаундированная.

Поскольку при демонтаже обмотка может деформироваться, нарушая целостность изоляционной конструкции с образованием микротрещин, изломов и других дефектов, испытания проводились до ее демонтажа. При такой методике ошибки в результате эксперимента исключаются.

На каждую катушку в отдельности подавалось повышенное напряжение переменного тока частотой 50 Гц относительно корпуса при остальных заземленных. Перед испытаниями межкатушечные и межполюсные соединения были разизолированы и распаяны. Напряжение на каждую катушку подавалось плавно от нулевого значения до пробивного со скоростью, обеспечивающей возможность отсчета по измерительным приборам.

Эксперимент проводился на 60 катушках обмотки статора электродвигателя, который находился в эксплуатации 12 лет, после двухфазного КЗ в обмотке статора и при работе под нагрузкой.

По данным эксперимента построена гистограмма пробивных напряжений обмотки статора электродвигателя, представленная на рис. 26. На оси абсцисс отложены частичные интервалы значений пробивных напряжений, а их высоты равны частотам соответствующих пробивных напряжений.

Три катушки имели пробивное напряжение менее 1 кВ, еще три катушки — от 11 до 14 кВ, остальные — выше 28 кВ. Если в данном случае выполнить ремонт с заменой пробитых катушек, то в обмотке останутся еще три, которые в дальнейшем приведут к аварийному пробое обмотки статора.

Таким образом, в электродвигателях привода ответственных механизмов, имеющих остаточные деформации лобовых частей катушек или стержней обмотки статора, после работы в аномальных режимах целесообразно выполнять полную перемотку обмотки с заменой изоляции. Кроме того, ее необходимо выполнять даже, если обмотка выдержала высоковольтные испытания, так как отдельные ее эле-

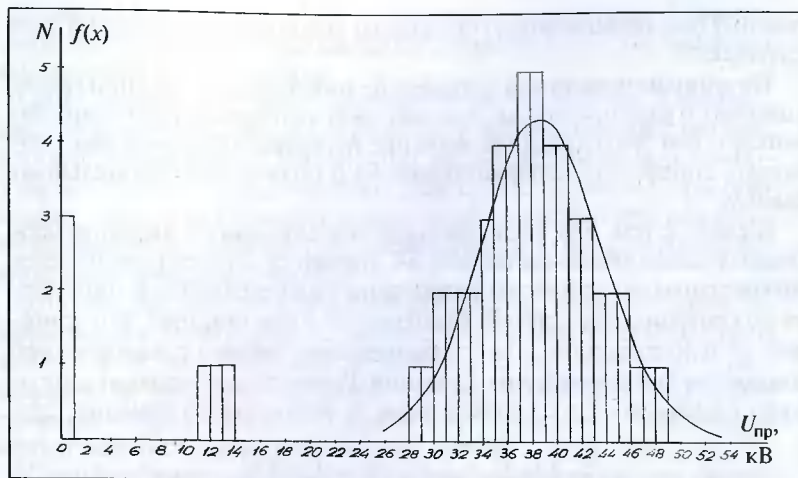


Рис. 26. Гистограмма, совмещенная с кривой нормальной плотности вероятности пробивных напряжений корпусной изоляции обмотки статора электродвигателя АВ-113-4М

менты (катушки или стержни) будут иметь значительно более низкое пробивное напряжение.

При дальнейшей эксплуатации такого электродвигателя вследствие снижения электрической прочности под действием совокупности факторов эксплуатационного характера произойдет пробой изоляции и аварийный останов ответственного механизма. Частичную перемотку обмотки статора целесообразно выполнять только в том случае, если уровень изоляции оставшейся части довольно высокий.

По форме гистограммы можно предположить, что основное число пробоев (90 %) распределено по нормальному закону, т.е. имеющееся статистическое распределение может быть выровнено теоретической кривой и функцией, плотность которой описывается уравнением (10).

Из рисунка следует, что шесть значений пробивного напряжения (10 % общего числа) не являются элементами генеральной совокупности (массива), распределенной по нормальному закону.

В результате визуального осмотра катушек, пробивные напряжения которых не входят в массив, выявлены их значительная деформация в лобовой части обмотки и место пробоя на выходе из паза. В результате остаточной деформации обмотки статора в лобовых частях в изоляции произошли необратимые процессы, способствующие

резкому (скачкообразному) снижению пробивных напряжений этих катушек.

По данным испытаний катушек, не имеющих деформаций (вариационного ряда пробивных напряжений), необходимо проверить гипотезу о том, что случайное значение пробивного напряжения в обмотках статоров электродвигателей 6 кВ подчиняется нормальному закону.

В связи с тем, что число наблюдений случайного значения пробивных напряжений составляет 54, проверка согласия распределения опытных значений с теоретическим распределением выполняется по критерию согласия  $\omega^2$ . Критерий  $\omega^2$  более мощный, чем критерий  $\chi^2$  и Колмогорова, но его применение связано с выполнением множества вычислительных операций. Расчет по критерию  $\omega^2$  выполняются в следующей последовательности. Вычисляется значение  $\Omega_n^2$ :

$$\Omega_n^2 = -n - 2 \sum_{j=1}^n \frac{2j-1}{2n} \ln F(x_j) + \left(1 - \frac{2j-1}{2n}\right) \ln [1 - F(x_j)], \quad (58)$$

где  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) — результат наблюдений, имеющий  $j$ -й номер в вариационном ряду  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ;  $F(x_j)$  — значение функции теоретического распределения при значении аргумента, равном  $x_j$ .

Оценка параметров нормального распределения, выполненная по данным эксперимента, равна соответственно:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n m_{j+1}(x_1 + j\Delta) = 38,7778,$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^n m_{j+1}(x_1 + j\Delta - \bar{x})^2} = 4,9437.$$

По экспериментальным данным выполняются необходимые расчеты и определяется  $\Omega_n^2$ :

$$\Omega_n^2 = -52 - 2 - (-27,127075) = 0,25415 \approx 0,25.$$

Находим значение функции  $\alpha$ , соответствующее вычисленному значению  $\Omega_n^2$ , которая представляет собой функцию распределения величины  $\Omega_n^2$ ,  $\alpha = 0,025$ . Задаем уровень значимости  $\alpha = 0,2$ . Если  $\alpha < (1 - \alpha)$ , то гипотеза принимается.

В данном случае  $0,025 < 0,8$ . Следовательно, гипотеза о согласии опытного распределения пробивных напряжений с нормальным распределением принимается.

Таким образом, в электродвигателях 6 кВ, работавших в аномальных режимах, пробивные напряжения катушек обмоток статоров, не имеющих остаточных деформаций, распределены по нормальному закону. Из физического анализа следует, что нормальное распределение значений пробивных напряжений возможно при одинаковой интенсивности воздействия эксплуатационных факторов на все однотипные элементы обмотки.

Однотипные элементы обмотки катушек со значительными деформациями и изменением первоначальной геометрической формы имеют значительно более низкие пробивные напряжения и не распределены по нормальному закону. Среднее пробивное напряжение деформированных катушек (9,25 кВ) в 4,19 раза ниже, чем пробивное напряжение недеформированных катушек (38,78 кВ).

С целью повышения эксплуатационной надежности электродвигателей ответственных механизмов мощных энергоблоков, для которых характерны остаточные деформации лобовых частей катушек обмотки статора после работы в аномальных режимах, целесообразно выполнять полную перемотку обмотки статора с заменой изоляции без проведения высоковольтных испытаний.

Эксплуатация, например, электродвигателя привода ответственного механизма с деформированными лобовыми частями значительно снижает надежность энергоблока, так как при повреждении электродвигателя будет остановлен один корпус котла, мощность блока снизится вдвое. Сроки замены электродвигателя могут корректироваться в зависимости от места его установки, времени эксплуатации, наличия или отсутствия резерва.

В случае применения в качестве приводов механизмов с различной степенью надежности однотипных электродвигателей, имеющих деформацию лобовых частей, они могут переставляться с ответственного механизма на неответственные. При этом должны быть проведены высоковольтные испытания. Электродвигатели привода неответственных механизмов с деформированными лобовыми частями при положительных результатах высоковольтных испытаний могут быть оставлены в эксплуатации.

Окончательный выбор при различных вариантах должен быть сделан на основе технико-экономического анализа с учетом стоимости перемотки и оценки ущерба в случае аварийного останова. Во время капитальных ремонтов и перемоток обмоток статоров целесообразно ужесточать крепления обмотки статора с целью повышения динамической устойчивости обмоток.

#### 4.4. ПЛАНИРОВАНИЕ СРОКА ЗАМЕНЫ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Для получения показателей надежности обмоток роторов синхронных электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60 использованы  $[N, R, T]$ -планы. Приняв во внимание, что отказы обмотки ротора имеют примерно одинаковую частоту, можно применить экспоненциальный закон распределения отказов. В связи с тем, что в рассматриваемый период эксплуатации на всех электродвигателях выполнены работы, связанные с полной заменой полюсов и реконструкцией межполюсных соединений ротора, в анализ включены отказы обмоток роторов, произошедшие до выполнения замены изоляции. Это сделано по следующим обстоятельствам.

Полная замена изоляции полюсов и реконструкция межполюсных соединений не только полностью восстанавливает работоспособность обмотки, но и является качественно новым этапом в процессе эксплуатации этих электродвигателей, так как применение но-

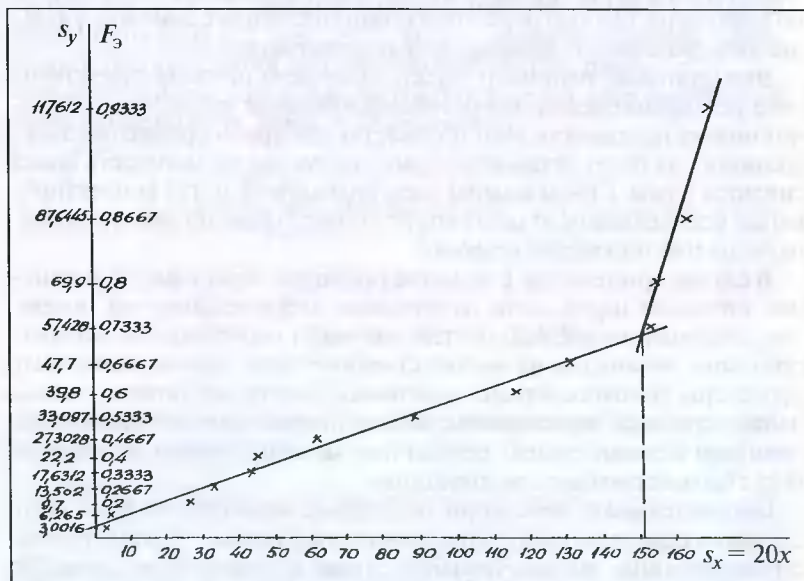


Рис. 27. Графическая проверка согласия эмпирического распределения с теоретическим отказом обмотки ротора синхронного электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60



вых электроизоляционных материалов и современной технологии значительно улучшает и повышает надежность эксплуатации обмоток, т.е. обмотка имеет другие, более совершенные и высокие показатели надежности. Проверка согласия эмпирического распределения с теоретическим выполнена аналогично изложенному выше.

Экспериментальные точки построены на рис. 27. Из рисунка видно, что первые 11 точек лежат в области, близкой к прямой, а последующие точки — так же прямой, но имеющей значительно больший угол наклона к горизонтальной оси. Из этого можно предположить, что первая прямая характеризует период нормальной эксплуатации, а вторая — период наступления износных отказов обмотки ротора. Следовательно, необходимо построить две прямые, одна из которых расположена от  $x_1 = 0,1667$  до  $x_{11} = 7,6667$ , а другая — от  $x_{12} = 7,75$  и больше. Эти прямые необходимо провести так, чтобы нанесенные точки отклонялись от них как можно меньше. В качестве объективного способа используем метод наименьших квадратов, изложенный выше.

На основании выполненных расчетов строим прямые и определяем время перехода от нормального периода эксплуатации к периоду износных отказов. Из рис. 27 следует, что нанесенные эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой для нормального периода эксплуатации. Опытные данные не противоречат тому, что отказы обмотки ротора в период нормальной эксплуатации распределены по экспоненциальному закону. Начиная со времени, равного 7,55 года, начинается сказываться износ изоляции, наступает период износных отказов. Определяем точечную оценку для параметра  $\lambda$  (интенсивность отказов) по экспериментальным данным для экспоненциального распределения:  $\hat{\lambda} = 0,0602$ ,  $\hat{\lambda} = 0,1235$ ,  $\hat{\lambda} = 0,0196$  — соответственно для периода нормальной эксплуатации, износа и реконструированных обмоток роторов.

Из вышеизложенного следует, что в период нормальной эксплуатации отказы обмотки ротора синхронного электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60 подчинены экспоненциальному закону, что проверено графоаналитическим методом с помощью вероятностных сеток.

В период нормальной эксплуатации, равной для обмоток роторов рассматриваемых типов электродвигателей 7,55 года, интенсивность отказов  $\hat{\lambda} = 0,0602$ . В период эксплуатации, в котором сказывается износ изоляции, приводящий к резкому увеличению отказов  $\hat{\lambda} = 0,1235$ .

Для реконструированных роторов  $\hat{\lambda} = 0,0196$ . С целью повышения надежности эксплуатации с более высокими показателями на-

дежности целесообразно после периода, равного 7,55 года, выполнить замену изоляции на стеклотекстолитовую, а также выполнить реконструкцию межполюсных перемычек и заменить гетинаксовые прокладки (шайбы) стеклотекстолитовыми.

#### 4.5. ПЛАНИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЕНЫ СМАЗКИ И ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Срок службы и надежность подшипников электродвигателей зависит от многих факторов, изложенных выше. На рис. 28 построены гистограммы и теоретические кривые плотности вероятности срока службы подшипников № 322 (а) и № 2322 (б) электродвигателя А-112-4М привода насоса регулирования турбины.

С учетом анализа преобладающих воздействий на срок службы подшипников разрабатываются мероприятия, повышающие эксплуатационную надежность конкретного типа электродвигателя и подшипника. Предпосылкой повышения надежности подшипников качения мощных электродвигателей является создание стабильного гидродинамического режима смазки между телами и дорожками качения в течение всего срока эксплуатации. При этом уменьшается износ рабочих поверхностей подшипника из-за отсутствия взаимодействия микронеровностей.

В процессе эксплуатации в смазке происходят кристаллизация и агрегация частиц дисперсной фазы, химическое взаимодействие компонентов смазки или смазки и внешней среды, процесс испарения и др.

Работоспособность смазки в зависимости от температуры определяется уравнением:

$$\lg \tau = A + \frac{B}{T}, \quad (59)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные коэффициенты;  $T$  — абсолютная температура узла трения, К;  $\tau$  — ресурс смазки, ч.

Отсюда следует, что для увеличения ресурса смазки целесообразно снижать рабочую температуру подшипникового узла. Частой причиной значительного повышения температуры и перегрева подшипника является избыток смазки в узле, что может привести к ее вытеканию на обмотку.

Замена смазки в некоторой степени восстанавливает работоспособность подшипникового узла и, следовательно, периодичность замены влияет на эксплуатационную надежность узла. Если принять, что подшипниковый узел восстанавливает свою работоспособность

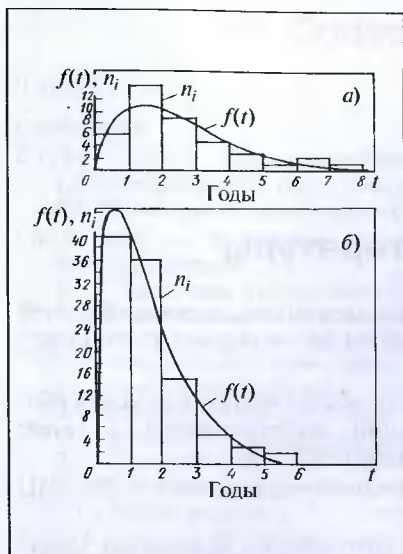


Рис. 28. Гистограмма и теоретические кривые плотности вероятности срока службы подшипников № 322 (а) и № 2322 (б) электродвигателя А-112-4М

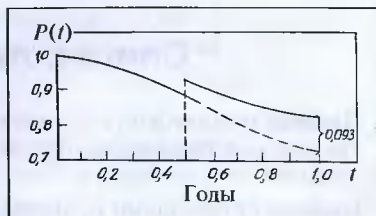


Рис. 29. Кривые вероятности безотказной работы радиально-упорного подшипника № 46330 со стороны свободного конца вала электродвигателя типа ВА-12-41-4 при периодичности замены смазки 2 раза и 1 раз в год

при замене смазки на 5 %, то можно определить надежность подшипникового узла при различной периодичности замены смазки.

На рис. 29 построены кривые вероятности безотказной работы радиально-упорного подшипника № 46330 со стороны свободного вала электродвигателя типа ВА-12-41-4 ( $P = 500$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>) привода конденсатного насоса при периодичности замены смазки 2 раза и 1 раз в год. В зависимости от периодичности смазки вероятность безотказной работы подшипника изменяется на 0,093 (9,3 %). Следовательно, изменив график технического обслуживания подшипников в зависимости от назначения и степени ответственности механизма, можно повысить надежность эксплуатации электродвигателей.

При планировании замен подшипников качения можно руководствоваться данными, изложенными в § 3.3. В связи с этим замена подшипников должна производиться с учетом обеспечения оптимального уровня надежности работы электродвигателя. Для электродвигателей, останов которых приведет к остановке корпуса котла, т.е. к снижению нагрузки энергоблока вдвое (до 150 МВт), замена может выполняться ежегодно в период текущего ремонта. Замена подшипников остальных электродвигателей должна производиться с учетом обеспечения необходимого уровня безотказной работы и наличия резервирования соответствующих механизмов.

## Список литературы

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РД 34.20.501-95. — М.: СПО ОРГРЭС, 1996.
2. **Правила** организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. РДПр 34-38-030-92. — М.: СПО ОРГРЭС, 1994.
3. **Объем и нормы** испытаний электрооборудования. — М.: НЦ ЭНАС, 1998.
4. **Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л.** Испытания и надежность электрических машин. — М.: Высшая школа, 1988.
5. **Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.** Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965.
6. **Гмурман В. Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. — М.: Высшая школа, 1979.
7. **Стародубцев В. В.** Об оценке старения электрической изоляции. — В кн.: Вопросы надежности, автоматического контроля и защиты мощных синхронных генераторов. — Л.: 1978.
8. **Козырев Н. А.** Изоляция электрических машин и методы ее испытания. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
9. **Белова Л. А., Мамиконянц Л. Г., Тутубалин В. Н.** Типовые кривые вероятности аварийных пробоев изоляции обмоток статоров генераторов // Электричество. 1979. № 5. С. 54 — 58.

# Содержание

## Часть I

<b>Предисловие</b> . . . . .	3
<b>Глава первая. Планирование и организация ремонта</b> . . . . .	4
1.1. Периодичность и объем ремонта . . . . .	4
1.2. Планирование, подготовка и организация ремонта . . . . .	6
<b>Глава вторая. Конструкция и техническая характеристика электродвигателей</b> . . . . .	9
2.1. Типы и серии электродвигателей, установленных на электростанциях . . . . .	9
2.2. Классификация электродвигателей по степени защиты, климатическому исполнению, способу охлаждения и монтажа . . . . .	12
2.3. Конструкция статоров . . . . .	17
2.4. Конструкция роторов асинхронных и синхронных электродвигателей . . . . .	24
2.5. Подшипниковые узлы с подшипниками качения . . . . .	26
2.6. Подшипниковые узлы с подшипниками скольжения . . . . .	28
2.7. Система вентиляции и охлаждения электродвигателей . . . . .	29
<b>Глава третья. Эксплуатационная надежность электродвигателей, отдельных узлов и систем</b> . . . . .	33
3.1. Характерные повреждения электродвигателей и причины их возникновения . . . . .	33
3.2. Показатели надежности . . . . .	39
3.3. Надежность подшипниковых узлов с подшипниками качения и скольжения . . . . .	41
3.4. Надежность корпусной изоляции обмоток статоров . . . . .	47
3.5. Распределение пробивных напряжений корпусной изоляции обмоток статоров . . . . .	50
3.6. Надежность витковой изоляции обмоток статоров . . . . .	55
3.7. Надежность обмоток роторов асинхронных электродвигателей . . . . .	62
3.8. Надежность системы непосредственного водяного охлаждения электродвигателей . . . . .	65
3.9. Надежность электродвигателей, как системы, состоящей из нескольких элементов . . . . .	77
<b>Глава четвертая. Прогнозирование срока службы и планирование замены узлов электродвигателей и изоляции обмоток</b> . . . . .	82
4.1. Прогнозирование срока службы изоляции обмоток статоров электродвигателей . . . . .	82
4.2. Планирование сроков замены обмоток статоров электродвигателей с учетом износных отказов . . . . .	88
4.3. Планирование сроков замены обмоток статоров электродвигателей, работавших в аномальных режимах . . . . .	93
4.4. Планирование срока замены изоляции обмоток роторов синхронных электродвигателей . . . . .	98
4.5. Планирование периодичности замены смазки и подшипников качения . . . . .	100
<b>Список литературы</b> . . . . .	102



## **Библиотечка электротехника**

*Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"*

### **ИНОЗЕМЦЕВ ЕВГЕНИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ**

**Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций  
(часть 1)**

#### **АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

---

**Научный редактор В. В. Овчинников**

**Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская**

**Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева**

**Корректор З. Б. Драиовская**

---

Сдано в набор 20.04.2001 г. Подписано в печать 21.05.2001 г.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.

Печ. л. 6,5. Тираж 1084 экз. Заказ БЭТ/05(29)-2001

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

## Вниманию специалистов

В редакции журнала “Энергетик” можно приобрести следующие вышедшие в свет выпуски

### **“Библиотечки электротехника”:**

Пуляев В. И., Усачев Ю. В. **Цифровая регистрация аварийных событий в энергосистемах (часть 1).**

Шабад М. А. **Выбор характеристик и уставок цифровых токовых защит серии SPACOM.**

Ишкин В. Х. **Волоконно-оптические системы связи.**

Овчаренко Н. И. **Микропроцессорные комплексы защиты и автоматики распределительных электросетей.**

Алексеев Б. А., Борозинец Б. В. **Определение местных перегревов в турбогенераторах по продуктам пиролиза в охлаждающем газе.**

Бажанов С. А. **Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств.**

Удрис А. П. **Панель релейной защиты типа ЭПЗ-1636 для ВЛ 110 – 220 кВ (часть 1 — устройство защиты, часть 2 — обслуживание защиты).**

Яковлев Л. В. **Вибрация на ВЛ и методы защиты проводов и грозозащитных тросов.**

Торопцев Н. Д. **Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.**

Киреева Э. А. **Рациональное использование электроэнергии в системах промышленного электроснабжения.**

Антонов В. И., Лазарева Н. М., Пуляев В. И. **Методы обработки цифровых сигналов электроэнергетических систем.**

Конюхова Е. А. **Режимы напряжений и компенсации реактивной мощности в цеховых электрических сетях.**

Курбангалиев У. К. **Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.**

Овчинников В. В. **Автоматическое повторное включение.**

Кузнецов А. П., Лукоянов В. Ю. и др. **Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики.**

Шабад М. А. **Защита генераторов малой и средней мощности.**

Адрес редакции  
журнала “Энергетик”:

109280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06

E-mail: [pni@mail.magelan.ru](mailto:pni@mail.magelan.ru)

48-3

## Об авторе



### **Евгений Константинович Иноземцев —**

*инженер, специалист  
по ремонту турбогенераторов  
и других электрических машин,  
а также в области надежности  
высоковольтных мощных  
электродвигателей электростанций.  
Руководил производственными  
ремонтными участками на ряде  
отечественных и зарубежных ТЭС.*

Е. К. Иноземцев — автор нескольких книг и внедренных изобретений, соавтор “Справочника по ремонту крупных электродвигателей” (1985 г.), автор многих статей, посвященных вопросам ремонта, надежности и модернизации турбогенераторов и других электрических машин. В настоящее время работает начальником участка по ремонту турбогенераторов и электрооборудования в ПРП Ростовэнерго.

Высокое качество ремонта  
высоковольтных электродвигателей —  
основа надежной эксплуатации  
энергетических блоков электростанций