

SCAN

DVD

biblem

elektromonter

# **Библиотечка электротехника**

*— приложение к журналу “Энергетик”*

*Основана в июне 1998 г.*

**Выпуск 2 (122)**

***Е. К. Иноземцев***

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**(Часть 2)**

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2009

УДК 621.313.13.004.67

ББК 30.82

И 67

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, В. И. Пуляев, А. И. Таджикибаев,  
Ю. В. Усачев

**Иноземцев Е. К.**

**И 67** Восстановление работоспособности узлов высоковольтных электродвигателей (часть 2). — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2009. — 84 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”; Вып. 2 (122)].

Рассмотрено конструктивное исполнение роторов и щеточно-контактных узлов асинхронных и синхронных высоковольтных электродвигателей всей шкалы мощностей, установленных на тепловых, атомных и гидравлических электростанциях России. Изложена технология восстановления работоспособности узлов с перемоткой обмоток и заменой изоляции. Описаны характерные повреждения обмоток и вопросы надежности изоляции обмоток статоров и роторов, прогнозирования срока службы изоляции и планирования перемоток. Приведены конструкции приспособлений для выполнения изоляционных работ и технические характеристики современных электроизоляционных материалов. Рассмотрена технология ремонта при частичной перемотке обмотки ротора, а также способы выполнения ремонтных работ при неплановых ремонтах. Описаны методы термообработки изоляции обмоток роторов, а также измерения и испытания при замене изоляции.

Для персонала электростанций, энергоремонтных, монтажных и пусконаладочных организаций и энергоремонтных заводов.

## **Предисловие**

Высоковольтные электродвигатели привода ответственных механизмов собственных нужд электростанций являются важнейшим элементом, определяющим надежность работы энергоблоков.

По данным РАО “ЕЭС России” в настоящее время на электростанциях РФ находятся в эксплуатации электродвигатели, отработавшие более 30 лет, которые устарели и не обеспечивают необходимой надежности. В ряде энергосистем доля таких электродвигателей составляет 80 – 90 %. В связи с большим количеством таких электродвигателей необходимо выполнять восстановительные ремонты с заменой изоляции обмоток значительного числа электродвигателей.

Эксплуатация такого парка электродвигателей резко снизила их надежность из-за старения изоляции и увеличения интенсивности износных отказов. Для надежности работы электродвигателей собственных нужд первоочередное значение приобретает качество выполнения восстановительного ремонта с заменой изоляции обмоток с применением современных электроизоляционных материалов и технологий. На смену термопластичной изоляции пришла терморезистивная изоляция, новые электроизоляционные ленты, лаки, компаунды. По этой причине ранее изданная литература не отвечает современным требованиям, устарела и стала библиографической редкостью.

Выполнение работ, связанных с заменой изоляции и применением новых электроизоляционных материалов и технологий, требует от специалистов-ремонтников специфических навыков, в приобретении которых должна быть полезна предлагаемая брошюра.

**Замечания и пожелания по брошюре  
просьба направлять по адресу:  
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.  
Редакция журнала “Энергетик”**

*Автор*

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# Ремонт щеточно-контактного узла

### 3.1. РЕМОНТ УЗЛА КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ

Объем ремонта узла контактных колец определяется в зависимости от его технического состояния. Перед выводом в ремонт должно быть проведено измерение вибрации контактных колец. Вибрация измеряется в вертикальном и горизонтальном направлениях.

При вращении ротора в холодном состоянии измеряют радиальное биение контактных колец индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Радиальное биение рабочей поверхности контактных колец электродвигателей серии СТД не должно превышать 0,03 мм в горячем состоянии и 0,02 мм — в холодном состоянии.

В зависимости от ширины контактных колец измерения выполняют в нескольких точках обоих колец. Проточка и шлифовка контактных колец не выполняются в тех случаях, если допустимые отклонения рабочей поверхности контактных колец не превышают следующих значений\*:

Допуск профиля продольного сечения, мм . . . . .	± 1,0
Допуск цилиндричности по длине колец, мм . . . . .	± 0,05
Допуск округлости, мм . . . . .	± 0,05
Шероховатость рабочей поверхности контактных колец $R_a$ , мкм. . . . .	1,25

Контактные кольца необходимо проточить и прошлифовать при повышенной их вибрации, отклонениях рабочей поверхности контактных колец от указанных выше норм, а также при обнаружении на рабочей поверхности колец глубокой эрозии, участков с матовой поверхностью и подгаров. Степень износа контактных колец измеряют набором щупов и лекальной линейкой, накладываемой на не-

---

\* Если не предусмотрены другие требования заводов-изготовителей.

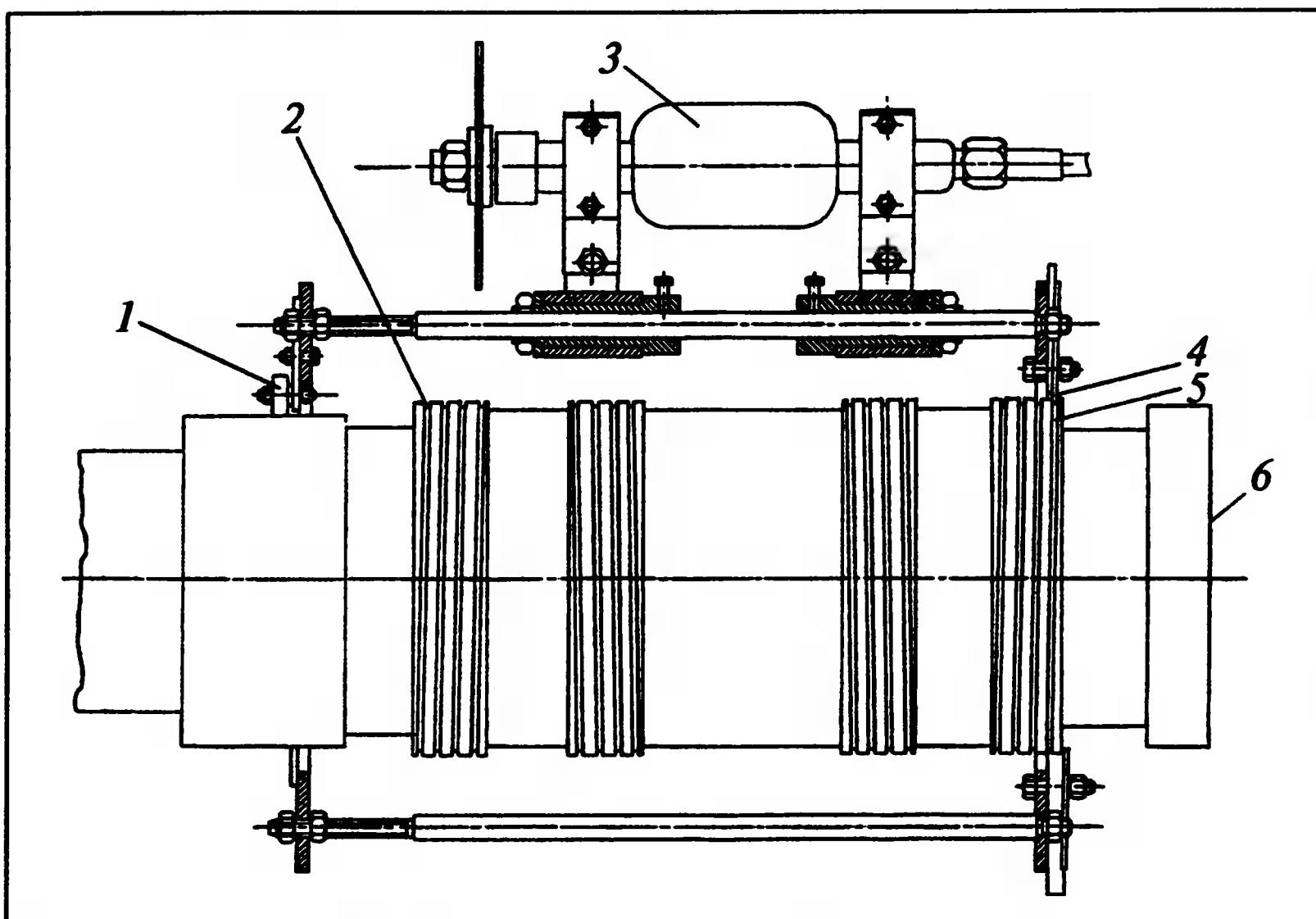
изношенные участки колец в нескольких точках по ширине и в четырех точках, расположенных через  $90^\circ$  по окружности кольца.

При проверке круглости контактных колец, имеющих на рабочей поверхности нарезку (см. рис. 1.18, ч. 1), к измерительному стержню индикатора часового типа вместо штатного наконечника крепят текстолитовую пластину размером  $6 \times 20 \times 6$  мм и измеряют радиальное биение колец при вращении ротора. Перепад высот между контактными поверхностями соседних дорожек кольца может быть измерен при неподвижном роторе в четырех точках по окружности кольца перемещением индикатора, закрепленного в суппорте, параллельно оси ротора. Измерив диаметр контактных колец мерительной скобой, полученные результаты сравнивают с минимально допустимыми диаметрами, установленными заводом-изготовителем. Если износ контактных колец привел к уменьшению диаметра до минимально допустимого, контактные кольца заменяют.

Если контактные кольца не соответствуют указанным выше требованиям, то их шлифуют. Если выработка контактной поверхности равна 1 мм и более, то целесообразно предварительно проточить кольца резцами с пластинами из твердых сплавов типов Т15К6, Т14К8, Т5К10 ГОСТ 19044. После определения глубины проточки рассчитывают остающийся после проточки диаметр колец и сравнивают его с минимально допустимым.

Устанавливают приспособление для проточки или шлифовки контактных колец и обеспечивают допуск параллельности линии продольной подачи суппорта и оси вала 0,5 мм на длине контактных колец. Правильность установки приспособления проверяют на неизношенных участках контактной поверхности колец. При этом надо учитывать разность диаметров в этих местах. Проточку и шлифовку выполняют при вращении ротора, обеспечивающей скорость резания 5 — 7 м/мин (0,083 — 0,117 м/с). Глубина резания принимается равной 0,1 — 0,2 мм, продольная подача 0,1 — 0,15 мм/об. (0,0159 — 0,0238 мм/рад). Проточку заканчивают после удаления на обрабатываемой поверхности всех дефектов и снятия последней стружки чистовым резцом. Затем контактные кольца шлифуют до получения шероховатости поверхности  $R_a$  1,25 мкм.

Для ускорения процесса механической обработки режим шлифования разделяют на предварительное и чистовое. Если проточка колец не производилась, то при предварительном шлифовании устраняется выработка и восстанавливается цилиндрическая поверхность кольца по всей длине. При шлифовании направление вращения круга должно быть встречным к вращению контактных



**Рис. 3.1. Приспособление для восстановления канавок контактных колец:**  
**1** — направляющие ролики; **2** — восстанавливаемые канавки; **3** — шлифовально-отрезная машина; **4** — копир; **5** — контрольные канавки; **6** — ротор

колец, скорость вращения круга 20 — 30 м/с, глубина шлифования 0,01 — 0,02 мм, продольная подача  $S = (0,5 \div 0,6)/B$  мм/об. (0,0796 — 0,0955 мм/рад), где  $B$  — ширина круга, мм.

Для охлаждения подают сухой сжатый воздух давлением 3 — 4 кгс/см<sup>2</sup> (0,3 — 0,4 МПа) в зону контакта шлифовального круга с кольцом.

Глубина чистового шлифования 0,005 — 0,01 мм, продольная подача  $S = (0,15 \div 0,25)/B$  мм/об. (0,0238 — 0,0398 мм/рад). После чистового шлифования проверяют радиальный бой контактных колец и полируют их войлоком с пастой ГОИ.

У контактных колец, имеющих винтовые канавки, восстанавливают глубину последних с применением специального приспособления (рис. 3.1).

При осмотре узла контактных колец проверяют состояние шнуровых бандажей: отсутствие обрывов и ослабления, смещения витков и др. При обнаружении повреждений изоляции контактных колец необходимо ее заменить. Технология замены изоляции с применением миканита или стеклотекстолита изложена в § 3.3.

В процессе осмотра узла контактных колец проверяют состояние изоляционных деталей токоподвода, изоляции токоведущих шин, контактных соединений, состояние резьбы и др. При осмотре контактных поверхностей проверяют состояние серебряного покрытия. Допускается нарушение и износ серебряного покрытия контактных поверхностей пластин на площади не более 10 % при толщине покрытия не менее 9 мкм.

Болты проверяют на отсутствие выкрашивания и срыва витков резьбы. При обнаружении таких дефектов на длине более чем одного витка болты заменяют. Выступы на головках болтов обрабатывают напильником до обеспечения допуска плоскости с последующим серебрением или болт заменяют резервным. В случае изгиба по продольной оси токоведущие болты заменяют. Наличие остаточной деформации болта не допускается. Изоляционные детали (колодки и прокладки), имеющие расслоения, надломы, деформации, следы перегрева, подлежат замене. Деформированные металлические шайбы также заменяют резервными.

В целях обеспечения надежности контактных соединений для заворачивания токоведущих болтов и гаек применяют специализированный инструмент, обеспечивающий необходимые моменты затяжки и исключающий их деформацию. В качестве такого инструмента можно использовать ключи моментные шкальные со световой индикацией типа КД-50 (диапазон измерений 10 — 50 Н · м), КД-100 (20 — 100 Н · м), КД-250 (50 — 250 Н · м). Для герметизации узла и предотвращения попадания пыли и проводящих частиц зазоры между деталями токоподвода заполняют замазкой КЛСЕ-2, приготовленной на основе силиконовых резин.

### **3.2. ЗАМЕНА КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ**

Контактные кольца с вала ротора снимают в тех случаях, когда износ контактной поверхности колец достиг максимально допустимых диаметров, повреждена изоляция втулки или ослаблен натяг контактного кольца на втулку.

Для снятия контактных колец отворачивают болты 10, 15 (см. рис. 1.18, ч. 1). Затем разбирают узел крепления токоподвода, снимают изоляционные детали. Для предохранения изоляции от повреждения при нагреве втулку теплоизолируют. Нагревают наружное контактное кольцо до температуры, определяемой требованиями документации завода-изготовителя, и снимают его с ротора. Нагрев контактного кольца осуществляют пламенем двух ацетиле-



новых горелок, контроль температуры ведут с помощью термощупа или прибора тепловизионного контроля. Изменение звука при простукивании кольца при нагреве свидетельствует об отделении его от места посадки. Аналогично изложенному снимают с ротора внутреннее контактное кольцо.

Изоляцию втулки испытывают согласно требованиям “Объема и норм испытания электрооборудования”. Если изоляция втулки в хорошем состоянии, испытание выдержала и натяги колец на втулку соответствуют нормам, то ее не меняют. При неудовлетворительном состоянии изоляции втулку переизолируют.

С новых контактных колец снимают заводскую консервацию, выполняют осмотр, ревизию и необходимые измерения, в том числе внутреннего (посадочного) диаметра. Определяют натяг контактного кольца на втулку и сравнивают с требованиями чертежа завода-изготовителя. Закрепляют на роторе временные упоры, фиксирующие осевое положение внутреннего кольца при установке. Нагревают внутреннее контактное кольцо до требуемой температуры и устанавливают на втулку с помощью хомута с ручками. Для контроля внутреннего диаметра контактного кольца при нагреве из стального прутка изготавливают контрольный калибр, длина которого должна быть больше наружного диаметра втулки на 0,4 мм.

Используя ограничивающие упоры, аналогично изложенному выше устанавливают второе контактное кольцо.

В процессе установки контактных колец выполняют электрические испытания в соответствии с “Объемом и нормами испытания электрооборудования”.

### **3.3. ЗАМЕНА ИЗОЛЯЦИИ ВТУЛКИ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ И ТОКОПОДВОДОВ**

Втулку контактных колец изолируют миканитом или с применением стеклотекстолита. Рассмотрим технологию изолировки втулки контактных колец миканитом. Измеряют и записывают в формуляр посадочные размеры вала ротора, втулки и контактных колец. Определяют длину заготовки формовочного миканита марки ФМШ толщиной 0,3 – 0,4 мм (рис. 3.2), мм:

$$A = \frac{\delta t}{m},$$

где  $t$  — шаг наложения заготовок, мм;  $\delta$  — толщина изоляционного слоя, мм;  $m$  — толщина заготовок миканита, мм.

Толщина изоляционного слоя,  
мм:

$$\delta = (\Delta + \lambda)\alpha,$$

где  $\Delta$  — толщина изоляции по заводскому чертежу после опрессовки и проточки изоляции, мм;  
 $\lambda = 1,5 \div 2,9$  — припуск на обработку после опрессовки, мм;  
 $\alpha = 1,35$  — коэффициент, учитывающий опрессовку миканита.

Количество заготовок, шт.:

$$n = \frac{\pi(D_1 + 2\delta)}{t},$$

где  $D_1$  — наружный диаметр неизолированной втулки, мм.

Поверхность втулки промывают бензином, покрывают 40 %-ным раствором шеллачного лака и сушат на воздухе при температуре окружающей среды 20 — 30 мин до появления отлипа. Заготовку миканита с одной стороны промазывают тонким слоем шеллачного лака, укладывают на горячую плиту промазанной стороной кверху и разогревают до размягчения. Накладывают размягченную заготовку на втулку промазанной стороной к металлу и приклеивают ее, предварительно подложив триацетатную пленку на ширину, равную  $(A - t)$  мм. Триацетатную пленку подкладывают только под первую заготовку. Вторую заготовку укладывают поверх первой, сместив ее на длину шага. Аналогично укладывают последующие заготовки.

Подойдя к первой наклеенной заготовке миканита, отделяют ее от поверхности втулки и, немного приподняв, продолжают наложение разогретых заготовок миканита до момента, когда между первым и последним слоем заготовок останется смещение, равное шагу наложения. Триацетатную пленку убирают. Смазывают последнюю наложенную заготовку шеллачным лаком и плотно прижимают к ней приподнятые первые заготовки. Наклеенные заготовки стягивают киперной лентой и проглаживают горячим утюгом. Снимают киперную ленту, оборачивают втулку триацетатной пленкой и утягивают стеклолентой впритык по всей длине втулки.

Сверху стеклоленты наматывают два-три слоя асбестовой бумаги и утягивают вразбежку стеклолентой. Для опрессовки и запечки изоляции на втулку надевают хомут, нагревают его двумя ацетиле-

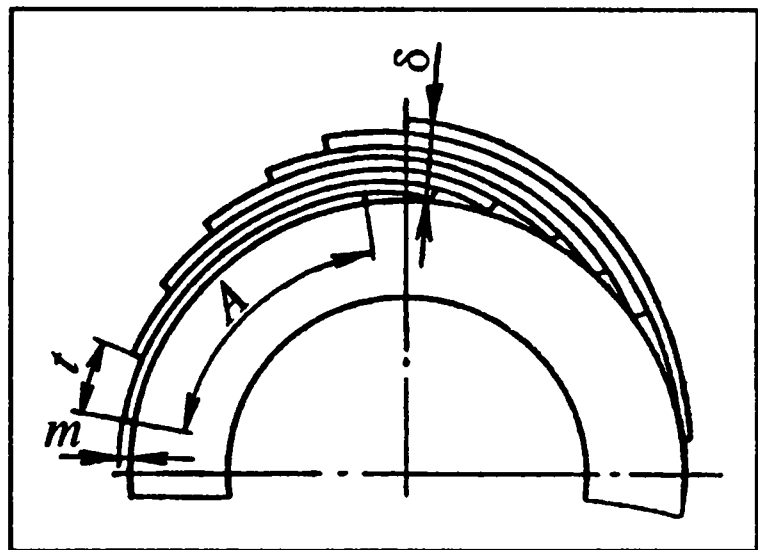


Рис. 3.2. Укладка заготовок миканита на втулку контактных колес

новыми горелками № 6, периодически прекращая нагрев и подтягивая болты. При достижении температуры изоляции 150 — 160 °С окончательно затягивают нажимные болты до полной опрессовки изоляции и выдерживают при этой температуре в течение 2 ч. После остывания разбирают приспособление, проверяют качество опрессовки и запечки изоляции, а также диаметр изолированной втулки.

Протачивают изоляцию втулки на токарном станке. Проточку производят по направлению укладки сегментов. Втулку для проточки выставляют по внутренней поверхности. Допустимые биение  $\pm 0,02$  мм, эллипсность  $\pm 0,02$  мм. Изоляцию втулки протачивают резцом марки Р18 при скорости резания около 200 м/мин. Глубина резания при предварительной обработке должна быть не более 0,5 мм, а при чистовой — не более 0,2 мм. Изоляцию протачивают до размера, обеспечивающего натяг контактных колец в соответствии с требованиями технической документации.

Качество запечки изоляции втулки проверяют простукиванием. Наличие глухих звуков свидетельствует о дефектах в изоляции, которые устраняют вторичной переизолировкой. Поверхность миканита после проточки втулки покрывают тонким слоем шеллачного лака и испытывают изоляцию повышенным напряжением переменного тока в соответствии с “Объемом и нормами испытания электрооборудования”.

Изолировку втулки контактных колец с применением стеклянной изоляции выполняют следующим образом. Сначала подготавливают рулон пропитанной в лаке ЭР1-30 стеклоткани. Ширина рулона должна быть на 10 — 15 мм больше длины втулки. Необходимую длину полотна в рулоне при толщине полотна 0,1 мм определяют по формуле:

$$l = 125 D_n,$$

где  $D_n$  — наружный диаметр втулки, мм.

Втулку контактных колец и барабан со стеклотканью устанавливают на приспособление. Втулку нагревают пламенем ацетиленовой горелки до температуры 85 — 90 °С, промазав ее поверхность лаком ЭР1-30 и приклеив первый слой стеклоткани, наматывают необходимое число слоев с натягом в пределах 30 — 40 кгс (300 — 400 Н) и без морщин. Через каждые три слоя стеклоткани прокладывают электроизоляционную бумагу ЭИП-66Б. В процессе намотки обращают особое внимание на недопустимость образования морщин и сдвигов. Последний слой стеклоткани приклеивают лаком ЭР1-30, накладывают три-четыре слоя триацетатной пленки, утягивая ее

стеклолентой впритык по всей длине втулки. Сверху стеклоленты укладывают два-три слоя асбестовой бумаги и утягивают ее стеклолентой вразбежку. Сняв изолированную втулку с приспособления для намотки, устанавливают на нее приспособление для опрессовки и помещают в печь. Нагревают втулку до температуры 100 °С, выдерживают при этой температуре 20 мин и окончательно затягивают болты приспособления. Нагревают втулку до температуры 140 – 150 °С и выдерживают при этой температуре из расчета 2 ч на 1 мм толщины изоляции. Прекращают нагрев и после остывания разбирают приспособление, удаляют стеклоленту, асбестовую бумагу и триацетатную пленку. Протачивают изоляцию втулки и проверяют качество запечки изоляции. Натяг контактного кольца, мм, на втулку определяют по формуле:

$$\delta = 0,0015D_k,$$

где  $D_k$  — внутренний диаметр контактного кольца, мм.

После замены изоляции проводят электрические испытания повышенным напряжением переменного тока согласно требованиям “Объема и норм испытания электрооборудования”.

Замену изоляции токоподводов, расположенных в центральном отверстии и на поверхности вала ротора, выполняют следующим образом. Для ремонта стержней токоподвода, расположенного в центральном отверстии вала ротора, разбирают узел токоподвода. Стержень токоподвода можно удалить из центрального отверстия с применением специального винтового съемника, шпильки которого вворачивают в резьбовые отверстия торцов полустержней центрального токоподвода, при этом опорная плита упирается в торец вала ротора. Отделив полустержни от изоляционного цилиндра, осматривают его и проверяют отсутствие дефектов. Проверяют состояние резьбовых отверстий.

Если в процессе дефектации изоляционный цилиндр отбраковывают, то новый цилиндр изготавливают из бакелизированной электроизоляционной намоточной бумаги ЭН-70 или из пропитанной лаком ЭР1-30 стеклоткани ЭЗ/1-10011 толщиной 0,1 мм. Пропитку бумаги бакелитовым лаком или пропитку стеклоткани лаком ЭР1-30 и их намотку на оправку с последующей обкаткой выполняют на универсальной пропиточно-лакировально-намоточной машине УПЛНМ-2 либо на изготовленном в условиях ремонтного предприятия или электростанции приспособлении. Подготовленный цилиндр с бумажно-бакелитовой изоляцией запекают в печи при температуре 95 – 100 °С в течение 12 – 16 ч, в случае приме-

ния стеклотекстолитовой изоляции — при температуре 140 — 160 °С в течение 15 ч. После охлаждения цилиндра и оправки до температуры окружающего воздуха выполняют проточку наружного диаметра до диаметра, определенного чертежом, или до диаметра, при котором разность между диаметром центрального отверстия вала ротора и наружным диаметром цилиндра меньше или равна 1 мм.

Для получения качественной проточки необходимо, чтобы она велась по направлению намотки изоляции. Затем цилиндр снимают с оправки.

Ремонт шин токоподводов выполняют следующим образом. После дефектации шин токоподвода снимают старую изоляцию, проверяют прямолинейность шин и при необходимости их рихтуют. Обнаруженные заусенцы опиливают. При обнаружении дефектов серебряное покрытие восстанавливают изложенным ниже методом. При обнаружении трещин и обрывов лепестки пластин паяют встык припоем ПСр-45 с флюсом № 209. Места пайки располагают ступенчато отдельными пластинами, которые состоят из пяти-шести лепестков. Расстояние между соседними стыками должно быть не менее 25 мм. После пайки удаляют наплывы припоя, проверяют ширину, толщину и длину шины и сравнивают с данными чертежа.

Изолировку выполняют в соответствии с чертежом или с применением стеклоткани ЭЗ/1-100П толщиной 0,1 мм, пропитанной лаком ЭР1-30. Количество наносимых слоев должно соответствовать чертежу, или его следует рассчитывать с учетом размеров паза, шины, толщины используемых изоляционных материалов.

Перед изолировкой принимают меры для предотвращения попадания лака на посеребренные поверхности шины, в случае попадания лака его удаляют салфеткой, смоченной смесью толуола и этилового спирта (1 : 1). Перед запечкой целесообразно посеребренные поверхности концов шин защитить путем промазки каждого лепестка слоем кремнийорганической пасты КПД.

После укладки шины токопровода в приспособление ее подпрессовывают в холодном состоянии и помещают в печь. После нагрева шины до температуры 60 — 80 °С изоляцию подпрессовывают до чертежных размеров и запекают в течение 10 ч при температуре 140 — 160 °С. После охлаждения вынимают шину из приспособления, удаляют фторопластовую ленту и осматривают изоляцию. Изоляция не должна иметь морщин, складок, не пропитанных лаком мест, вмятин, вздутий, пустот, острых кромок и др. Салфеткой, смоченной растворителем, с посеребренных концов шин удаляют пасту КПД и испытывают шины повышенным напряжением переменного тока согласно “Объему и нормам испытания электрооборудова-

ния”. Установку шины токоподвода выполняют в последовательно-сти, обратной разборке.

**3.4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Ниже рассматривается технология нанесения и восстановления серебряного покрытия методом электронатирания деталей, который может быть использован в процессе ремонта электродвигателей [5]. Нанесение серебряного покрытия методом электронатирания выполняют с применением кисти или катка. Для этого приготавливают следующие растворы.

*Нецианистый электролит № 1 (из расчета на 100 мл воды)*

Азотнокислое серебро, г . . . . .	1,78
Железистосинеродистый калий, г . . . . .	3,0
Поваренная соль, г . . . . .	0,7
Кальцинированная сода, г . . . . .	2,0
Роданистый калий, г . . . . .	15,0

*Нецианистый электролит № 2 (из расчета на 100 мл воды)*

Азотнокислое серебро, г. . . . .	3,55
Поваренная соль, г . . . . .	0,7
Железистосинеродистый калий, г . . . . .	6,0
Кальцинированная сода, г . . . . .	2,0
Роданистый калий, г . . . . .	15,0

Для приготовления обезжиривающего раствора необходимы следующие реактивы (на 4 л воды):

Тринатрийфосфат, г . . . . .	80 — 100
Жидкое стекло (технический силикат натрия), г . . . . .	10 — 15

Для приготовления 1 л электролита № 1 необходимо растворить 17,8 г азотнокислого серебра в колбе с 0,3 л воды, затем растворить 0,7 г поваренной соли в колбе с 0,1 л воды. Осадив и отфильтровав хлористое серебро, смешивают оба раствора и проверяют полученный фильтрат на полное осаждение хлористого серебра. Эту проверку выполняют следующим образом. К полученному фильтрату добавляют небольшое количество раствора поваренной соли. Прозрачный фильтрат свидетельствует о полном осаждении хлористого серебра. Если фильтрат мутный, то в него добавляют поваренную соль до полного осаждения хлористого серебра. Собирают осадок хлористого серебра и помещают в емкость для приготовления электролита, а фильтрат выбрасывают.

Растворив 30 г железосинеродистого калия в колбе в 0,3 л воды, затем 20 г кальцинированной соды в колбе с 0,2 л воды, полученные растворы сливают вместе. Полученный раствор с осадком хлористого серебра кипятят в течение 1 — 2 ч до полного растворения хлористого серебра, не допуская бурного кипения и выброса раствора наружу.

Охлажденный до температуры 40 — 50 °С раствор фильтруют, полученный осадок трижды промывают в фильтре. Слив фильтрат, удаляют и выбрасывают осадок. Далее, растворяют 150 г роданистого калия в 0,1 л воды и полученный раствор вливают в емкость с фильтратом. Полученного раствора не должно быть более 1 л, при меньшем его объеме необходимо долить требуемое количество воды до 1 л.

Для приготовления 1 л электролита № 2 необходимо взвесить 35,5 г азотнокислого серебра и приготовить растворы, как для электролита № 1. Затем взвесить 60 г железосинеродистого калия и приготовить растворы, как указано выше.

Подготовка деталей к серебрению заключается в их очистке от грязи и обработке их поверхности в обезжиривающем растворе. Детали выдерживают в обезжиривающем растворе в течение 15 — 60 мин в зависимости от степени загрязненности при температуре 80 — 100 °С. После промывки обезжиренных поверхностей сначала в горячей, а затем в холодной воде кистью наносят серебряное покрытие. Специальную кисть изготавливают из стеклянной трубки. В верхний торец трубки устанавливают резиновую пробку, в которую вставляют электрод из серебра Ср 999,9. В нижний торец стеклянной трубки вставляют пробку-кисть, изготовленную из марли, бязи или другого аналогичного материала.

После заполнения стеклянной трубки-кисти электролитом № 1 подключают “плюс” от выпрямителя к кисти, а “минус” — к детали. Подав напряжение, реостатом регулируют ток, обеспечивая плотность тока, равную 0,07 А/см<sup>2</sup> в месте касания кисти (марли или бязи) с поверхностью подлежащего восстановлению серебряного покрытия. В процессе серебрения кисть равномерно водят без отрыва от обрабатываемой поверхности по одному и тому же месту от 10 до 25 раз. По мере расходования электролит доливают в стеклянную трубку. Аналогичные операции выполняют, залив в кисть электролит № 2. После окончания серебрения поверхность сначала полируют смоченной в воде хлопчатобумажной салфеткой, а затем протирают насухо.

В отдельных случаях серебрение контактных поверхностей может быть выполнено с применением катка, наружная поверхность кото-



рого сделана из серебряной полосы. “Плюс” от выпрямителя подается на наружную серебряную поверхность с помощью контактной пластины. Приспособление в виде катка состоит также из корпуса и ручки. Подготовленную к серебрению поверхность смачивают электролитом № 1 и накладывают на нее хлопчатобумажную салфетку черного цвета толщиной 0,35 – 0,5 мм с перекрытием кромок на 5 – 10 мм. Как и в предыдущем случае, “минус” от выпрямителя подключают к детали. Устанавливают ток, обеспечивая его плотность 0,07 А/см<sup>2</sup>. Для нанесения первого слоя серебра необходимо по одному и тому же месту пройти катком 3 – 4 раза, при этом каток должен только слегка касаться поверхности салфетки. После увлажнения салфетки электролитом № 1 проходят катком по площади серебрения еще 3 – 4 раза. Покрытую поверхность протирают сухой бумагой, а салфетку промывают водой и просушивают. Аналогично изложенному выше серебрят поверхность с применением электролита № 2. После окончания серебрения промывают поверхность чистой водой, полируют смоченной в воде хлопчатобумажной салфеткой и протирают насухо.

Качество покрытия контролируют внешним осмотром, обращая внимание на отсутствие подгаров, отслоения, пятнистости, вздутий и других дефектов. Поверхность должна быть гладкой, ровной, светлой, молочно-матовой.

### **3.5. РЕМОНТ И СБОРКА ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА**

В процессе ремонта синхронных электродвигателей выполняют чистку, продувку сухим сжатым воздухом щеточного аппарата.

Проводят осмотр щеточно-контактного узла с выемкой щеток из обойм, их осмотром и дефектацией. Заменяют новыми элементы, имеющие следующие дефекты:

- щетки, у которых обнаружены сколы рабочей поверхности, выработанные боковые поверхности со следами масла, подгары с потемневшими токоведущими проводниками, втулками, накладками и цветами побежалости на них, с неравномерной пропиткой, а также щетки, имеющие выработку до высоты 30 мм и менее;
- щеткодержатели, у которых на внутренней поверхности обоймы обнаружены выработка, оплавления и подгары;
- пружины, которые частично утратили свои первоначальные упругие свойства и имеют цвета побежалости.

С внутренней поверхности щеткодержателей удаляют налет графитовой пыли, следы масла и нагара. Измеренный пластинчатым щупом зазор между обоймой и щеткой должен быть в пределах



0,1 — 0,3 мм. Обоймы, имеющие износ, не обеспечивающий нормированный зазор, заменяют новыми.

Для обеспечения близких физико-механических характеристик новые щетки устанавливают из одной партии. При осмотре щеток обращают внимание на то, чтобы они были однородными по структуре, в них не должно быть раковин, трещин, расслоений и посторонних включений. На рабочей поверхности щетки допускается не больше пяти сколов глубиной, не превышающей 0,5 мм. Щетки целесообразно подбирать с одинаковым переходным электрическим сопротивлением между телом щетки и токоподводами, которое измеряют по падению напряжения при постоянном токе или мостом постоянного тока. Разброс переходного электрического сопротивления комплекта щеток из полюсов не должен превышать 10 % среднего измеренного значения с учетом погрешности измерений.

Переходное сопротивление щетки измеряют между двумя точками, одна из которых должна быть расположена на середине наконечника токопровода, а другая — на теле щетки в 5 мм от заделки токопроводов. Если дефектные щетки составляют более 50 % их общего числа, то целесообразно заменить весь комплект щеток.

После окончания ремонта щеточного аппарата его стропят на крюке крана четырьмя стропами одинаковой длины и устанавливают на место. При выполнении этой технологической операции принимают меры для предотвращения ударов и задиrow рабочих поверхностей контактных колец, которые перед началом работ должны быть защищены.

Регулируют радиальный зазор между щеткодержателями и рабочей поверхностью контактных колец, который должен быть равен 2 — 3 мм. Затем, вставив щетки в щеткодержатели, путем перемещения проверяют подвижность щеток и измеряют зазор между щеткой и обоймой, который должен быть в пределах 0,1 — 0,3 мм. Щетки должны прилегать к контактному кольцу всей рабочей поверхностью. При необходимости протирают щетки, для этого между контактным кольцом и щетками протягивают в направлении вращения ротора электродвигателя полоску мелкой стеклянной бумаги, прижимая концы ее к контактному кольцу.

Щеточно-контактный узел продувают сухим сжатым воздухом, изоляционные детали траверсы и доступные рабочие поверхности контактных колец протирают салфеткой, смоченной в бензине. В электродвигателях должны применяться щетки марок, рекомендованных заводами-изготовителями. К числу таких щеток могут быть отнесены щетки следующих марок: ГЗ, ЭГ4, ЭГ14, 6110М и др.

Регулировку степени нажатия на щетки выполняют путем перестановки нажимной планки. Удельное давление на щетки должно составлять: ГЗ — 20 — 25 кПа, ЭГ4 — 15 — 20 кПа, ЭГ14 — 20 — 40 кПа, 6110М — 12 — 22 кПа.

### **3.6. НАЛАДКА ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА**

Перед пуском электродвигателя расправляют токопроводы щеток так, чтобы они не касались один другого и токоведущих частей траверсы и не ограничивали радиальное перемещение щеток в обоймах щеткодержателей. Перед пуском осматривают щеточный аппарат и контактные кольца на отсутствие загрязнений, течей масла из подшипника.

После окончания балансировочных и других работ выставляют на щетках усилия нажатия в соответствии с вышеуказанными значениями. Проверяют отсутствие вылета из щеточно-контактного узла мелких частиц и искрения щеток после пуска электродвигателя, измеряют вибрацию контактных колец и близлежащего подшипника. После работы электродвигателя в течение 2 сут при номинальном (или близком к номинальному) режиме измеряют токовую нагрузку каждой электрощетки. На наименее нагруженных щетках увеличивают усилие нажатия.

В настоящее время разработаны и внедрены на электростанциях РФ ряд приборов для контроля за работой щеточно-контактного аппарата [6]. К числу этих приборов можно отнести приборы “Искра”, “Кит”, “Прибой”, “Квант” и др. [7].

Прибор “Искра” оценивает степень искрения по амплитуде и уровню пульсаций электромагнитных полей в районе щеточно-контактного узла. Этот прибор имеет две приемные антенны (по одной антенне на каждое кольцо). Информация о состоянии щеточно-контактного узла выведена на основной блок и представлена следующим образом. В случае отсутствия искрения горит зеленый светодиод, а при степени искрения 1,25 — красный. При появлении искрения степени 1,5 включается зуммер. Кроме этого на передней панели основного прибора установлены два прибора (по одному на каждое контактное кольцо). Шкала каждого из приборов разделена на четыре сектора: первый — искрение отсутствует; второй — слабое искрение; третий — сильное искрение; четвертый — недопустимое искрение. Постоянный контроль за степенью искрения дает возможность персоналу сделать вывод о динамике процесса искрения: увеличение, уменьшение или его стабильность.

Важным показателем нормальной работы щеточно-контактного аппарата является равномерность тока распределения по щеткам. Для контроля токораспределения по щеткам можно использовать прибор “Кит”.

При работе на нормальной частоте вращения с применением прибора “Прибой” можно проводить измерение биения контактных колец косвенным методом — по пульсации тока щетки на определенных частотах. Значение биения, мкм, определяется по показаниям стрелочного индикатора.

С помощью прибора “Квант” можно выполнять визуальный осмотр рабочей поверхности контактных колец при вращении ротора с использованием стробоскопического эффекта.

## **ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ**

# **Надежность обмоток статоров, роторов и ее повышение**

### **4.1. ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА И РОТОРА И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ**

Надежная работа электродвигателей на электростанциях определяет надежность работы всего энергоблока. Эксплуатационная надежность электродвигателей зависит от конструкции и качества изготовления, условий эксплуатации, периодичности и качества ремонта и др. Характер повреждений и причины отказов электродвигателей в процессе эксплуатации обуславливают степень надежности основных его узлов: обмоток статора и ротора, подшипников и др. Используя данные об отказах электродвигателей, находят 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 механической 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 пробою 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 сети, так как их изоляция оказывается при этом под линейным напряжением, превосходящим фазное в 1,73 раза.

К пробою 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; на-

рушения 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 увеличивается количество пусков электродвигателей собственных нужд, что отрицательно сказывается на состоянии крепления обмотки в пазовой и лобовой частях. При пуске электродвигателей с короткозамкнутым ротором возникают толчки тока, в 5 — 7 раз превышающие его нормальное значение, которые создают в обмотке большие динамические усилия. Эти усилия (до 50-кратного значения номинального) сказываются преимущественно на лобовых частях обмотки статора, вызывая их деформацию и появление местных дефектов изоляции в виде трещин. Дефекты чаще образуются в местах выхода катушек 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 шиберов, 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 АН-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 статора с использованием старой меди (при замене корпусной и витковой изоляции) необходимо тщательно контролировать и осматривать выводные концы катушек и не допускать пережога меди при пайке.

Некачественный ремонт или технически не обоснованное 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 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 возникающего 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, выполненной по рекомендации завода-изготовителя, повреждений не наблюдается.



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 увеличения 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°, 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 для короткозамкнутых обмоток асинхронных электродвигателей. Кроме того, случаются нарушения контакта между сегментами пусковой клетки из-за некачественного лужения контактных поверхностей сегментов, вызывающего окисление и отслаивание полуды.

Пробои 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 или шпилек крепления полюса к магнитному колесу. При значительном самоотвинчивании болтов (на величину, большую чем односторонний воздушный зазор) полюсный башмак может повредить 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.



## 4.2. НАДЕЖНОСТЬ КОРПУСНОЙ И ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ

**Надежность корпусной изоляции.** 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.

Накопленные данные должны учитываться при разработке мероприятий конструктивного, технологического и эксплуатационного характера, направленных 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 эксплуатационной и ремонтной документации. План  $[N, R, T]$  наблюдений трактуется следующим образом: наблюдению подвергнуты  $N$  электродвигателей в течение времени  $T$ ;  $R$  — отказавшие элементы, которые заменяют новыми или ремонтируют. При этом плане результаты наблюдений за отремонтированными элементами или сборочными единицами включают 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, при этом близлежащие катушки и другие элементы изоляцион-

ной конструкции могут быть деформированы. Однако, как правило, ремонт выполняется в ограниченном объеме, поэтому представление о независимости отказов является довольно близким приближением к реальности.

Ниже анализируется надежность обмоток статоров 11 типов асинхронных и синхронных электродвигателей напряжением 6 кВ, установленных на механизмах 12 различных типов: 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-года).

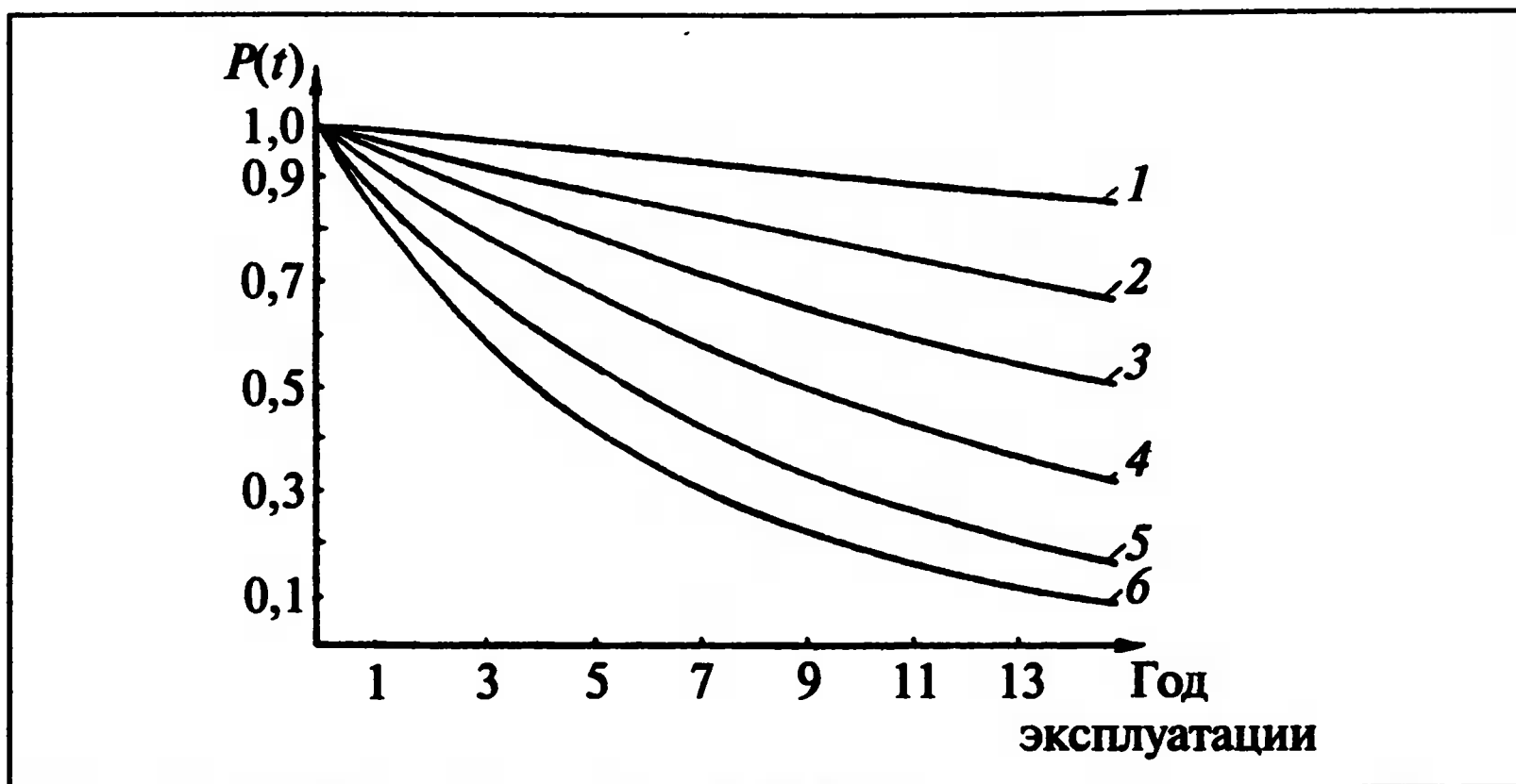
За рассматриваемый период произошло 129 пробоев изоляции обмоток статоров. Классификация пробоев:

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 сказываются 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:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0; \tag{4.1}$$



**Рис. 4.1. 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 (ШМ)**

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

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{NT}, \quad (4.2)$$

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

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

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4.3)$$

На рис. 4.1 построены кривые вероятности безотказной работы до первого отказа обмоток статоров электродвигателей ДАЗО-12-55-8 (ВГД); АР-500 (БПН); АВ-8000/6000УЗ (ПЭН); А-112-М (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 капи-

тальных ремонтов выполнить мероприятия, повышающие их надежность.

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

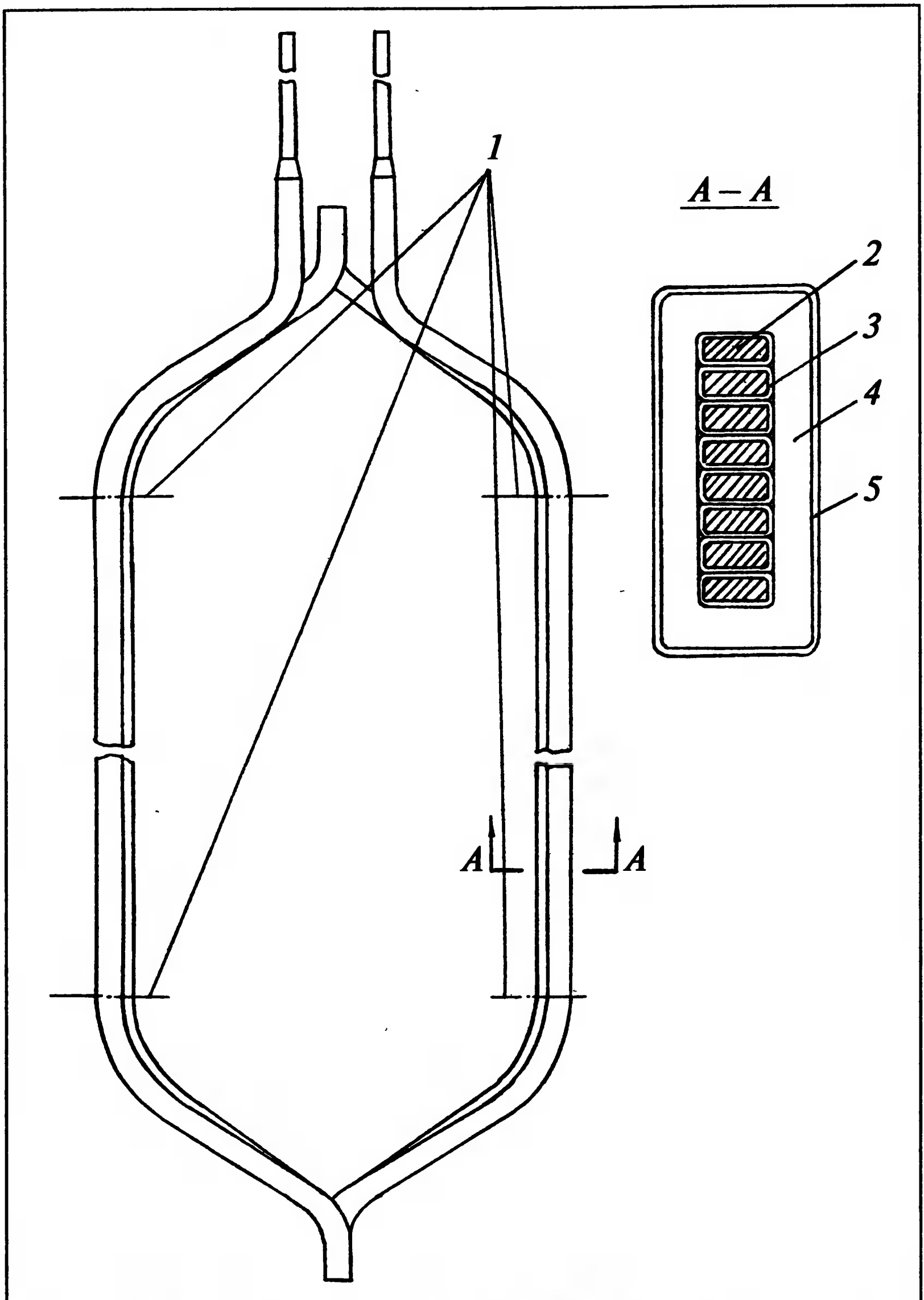
В процессе эксплуатации электродвигателей 6 кВ собственных нужд электростанций на их обмотки воздействует комплекс эксплуатационных факторов: тепловых, механических и электрических. Они вызывают старение изоляции и, следовательно, приводят к снижению пробивного напряжения витковой изоляции.

Согласно изложенным выше данным пробой витковой изоляции при работе электродвигателей 6 кВ собственных нужд энергоблоков 300 МВт составляет 3,88 % общего числа пробоев. Поэтому представляет интерес исследование пробивных напряжений витковой изоляции обмотки в процессе многолетней эксплуатации, т.е. после многолетнего воздействия на нее 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,  $n = 100$  об/мин), применяемого в качестве привода шаровых мельниц энергоблока 300 МВт. Обмотка статора двухслойная и изготовлена из жестких катушек проводом марки ПСД. Изоляция катушки обмотки непрерывная, микалентная, компаундированная. Витковая изоляция выполнена микалентой марки ЛФЧ  $0,13 \times 20$  (рис. 4.2).

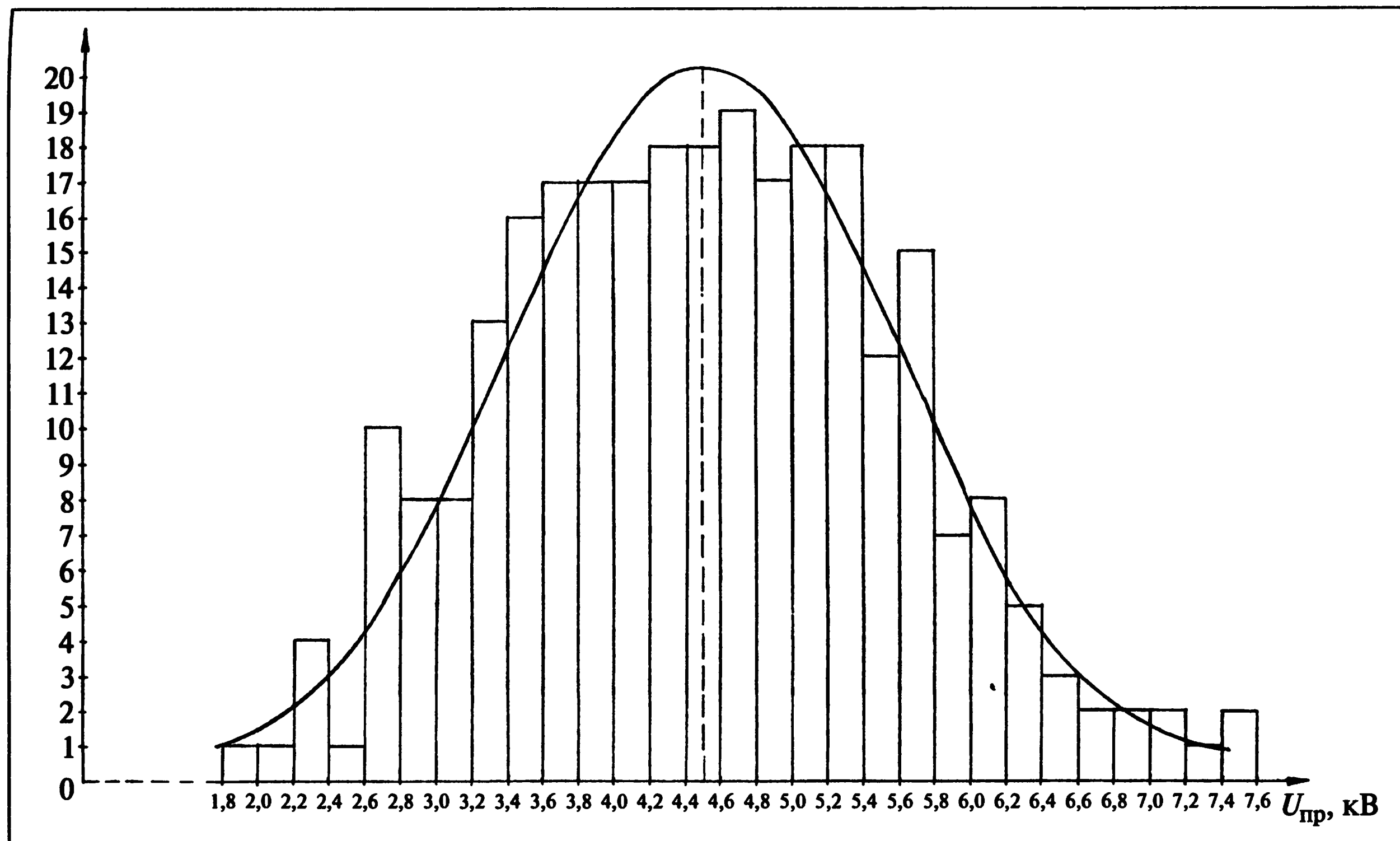
Для осуществления демонтажа катушек межкатушечные и межполюсные соединения были разизолированы и распаяны. Пазы расклинены, и катушки демонтированы. При определении пробивных напряжений отдельно пазовой и лобовой частей последние были отрезаны от прямолинейных участков катушек и концы проводников разведены для обеспечения достаточного изоляционного расстояния. Испытания проводились повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц, приложенным 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 было получено



**Рис. 4.2. 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  $0,25 \times 20$



**Рис. 4.3. Гистограмма, совмещенная с кривой нормальной плотности вероятности пробивных напряжений витковой изоляции обмотки статора электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60**

280 значений пробивных напряжений витковой изоляции. По данным проведенного эксперимента и полученных вариационных рядов была построена гистограмма пробивных напряжений витковой изоляции (рис. 4.3).

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

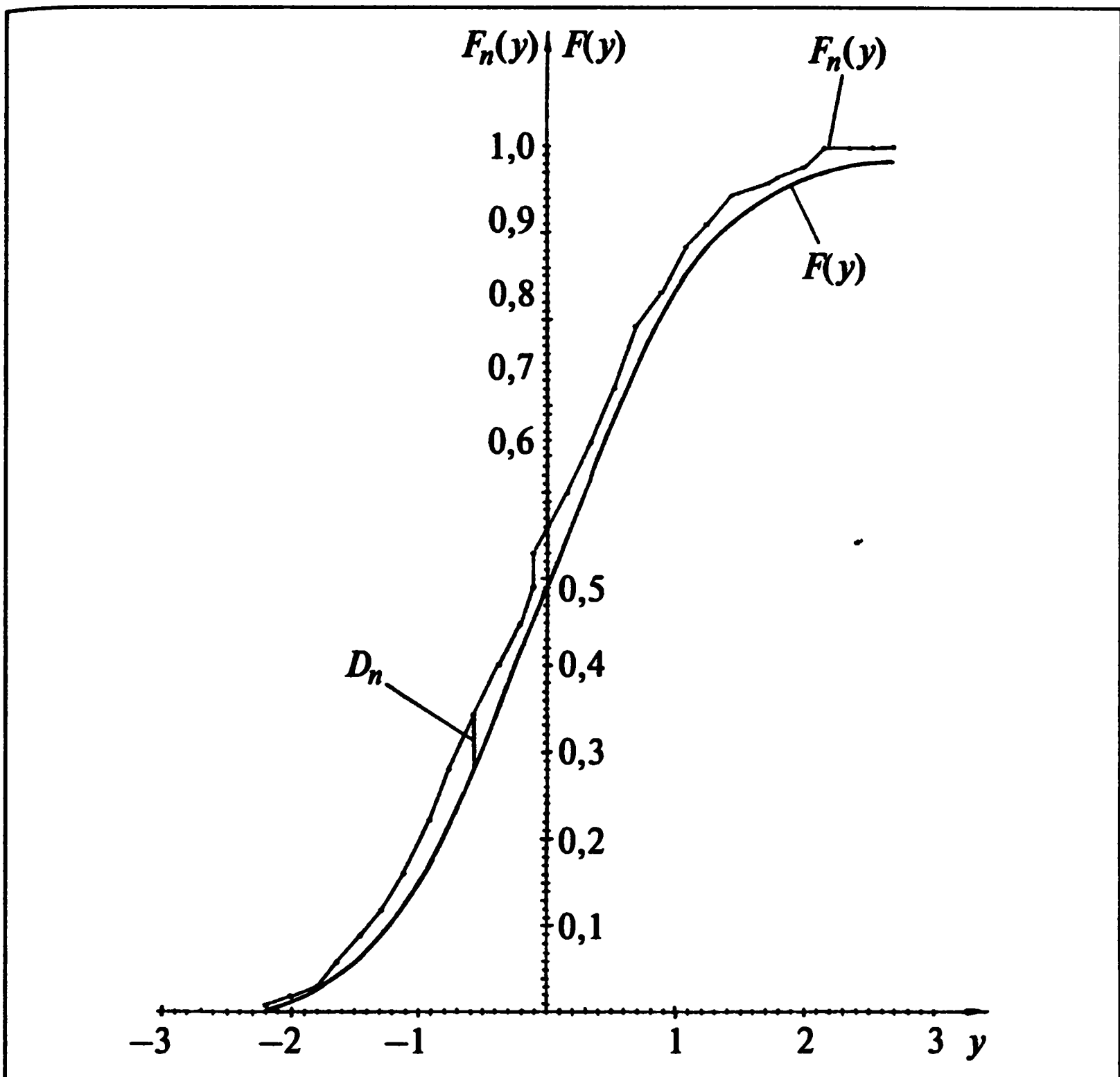
Определяем среднее арифметическое значение пробивного напряжения и среднее квадратическое отклонение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^r m_{j+1} (x_1 + j\Delta); \quad (4.4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^r m_{j+1} (x_1 + j\Delta - \bar{x})^2}, \quad (4.5)$$

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

$$r = (x_n - x_1) / \Delta.$$



**Рис. 4.4. Функция опытного  $F_n(y)$  и теоретического  $F(y)$  распределения пробивных напряжений витковой изоляции обмотки статора электродвигателей типа СДМЗ-20-49-60**

Рассчитываем и записываем величину:

$$y_{j+1} = \frac{x_1 + j\Delta - \bar{x}}{s} \quad (4.6)$$

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. 4.4). Значение функции теоретического распределения вычисляем по формуле:

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \bar{x}}{s}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{x}}{s}\right), \quad (4.7)$$

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:

$$D_n = \max |F_n(y_{j+1}) - F(y_{j+1})| = 0,0594 \quad (4.8)$$

при  $(x_1 + j\Delta) = 3,9$  кВ.

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

Для доверительной вероятности:

$$v = \text{Вер}\{\lambda_n \leq \lambda_n^*\} = 0,8 \quad (4.9)$$

при  $\lambda = 0,8\lambda_n^* = 1,07$ , т.е. неравенство (4.9) выполняется.

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

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2s^2}\right]. \quad (4.10)$$

Формула (4.10) принимает вид:

$$f(x) = \frac{1}{1,1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{4,5107^2}{2 \cdot 1,1^2}\right]. \quad (4.11)$$

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 прямолинейной (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 части, на 6,88 %. Это объясняется технологическими причинами при изготовлении обмоток и разной интенсивностью воздействия факторов эксплуатационного характера. Для придания обмоткам необходимой геометрической формы при их изготовлении лобовые части катушек подвергают значительным механическим воздействиям, а при работе электродвигателя они испытывают еще большие механические деформации 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 “Объемом 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  $U_{\text{исп}} = 1,4$  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;  $P_{ЭД} = 0,4591$ .

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 исследований, изложенным выше, 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.

В целях повышения надежности и увеличения срока службы витковой изоляции при ремонте электродвигателей целесообразно выполнить мероприятия по усилению крепления обмотки в лобовой и пазовой части и применить обмоточные провода со слюдосодержащей изоляцией.

#### **4.3. НАДЕЖНОСТЬ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК РОТОРОВ, ОБМОТОК РОТОРОВ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

**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 асинхронных электродвигателях рассматриваемых типов применены короткозамкнутые обмотки в виде одной или двух беличьих клеток. Обмотки роторов электродвигателей типов ДАЗО, АВ, ВА, А — одноклеточные, короткозамкнутые. Они состоят из медных стер-

жней колбовидного профиля с медными короткозамыкающими кольцами.

Обмотка ротора электродвигателя АР-500 — одноклеточная. Стержни обмотки, имеющие трапецеидальное сечение, поджимают 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 раз 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  $R$  (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 в целях 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 в данном случае действует экспоненциальный закон распределения отказов. Для проверки этой гипотезы сопоставим экспериментальные данные и теоретическое распределение. Графоаналитическим методом построим вероятностные сетки для электродвигателей типа АЗ-12-52-4.

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

$$F_3(x_i) = \frac{i}{n+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4.12)$$

При экспоненциальном распределении на оси абсцисс наносится равномерная шкала, а по оси ординат откладываются значения  $F(y) = 1 - e^{-y}$ .

Коэффициент масштаба по оси абсцисс:

$$k_x = \frac{L}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (4.13)$$

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

Подставляя в формулу (4.13) 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  $S_y(F) = 43,4$ .

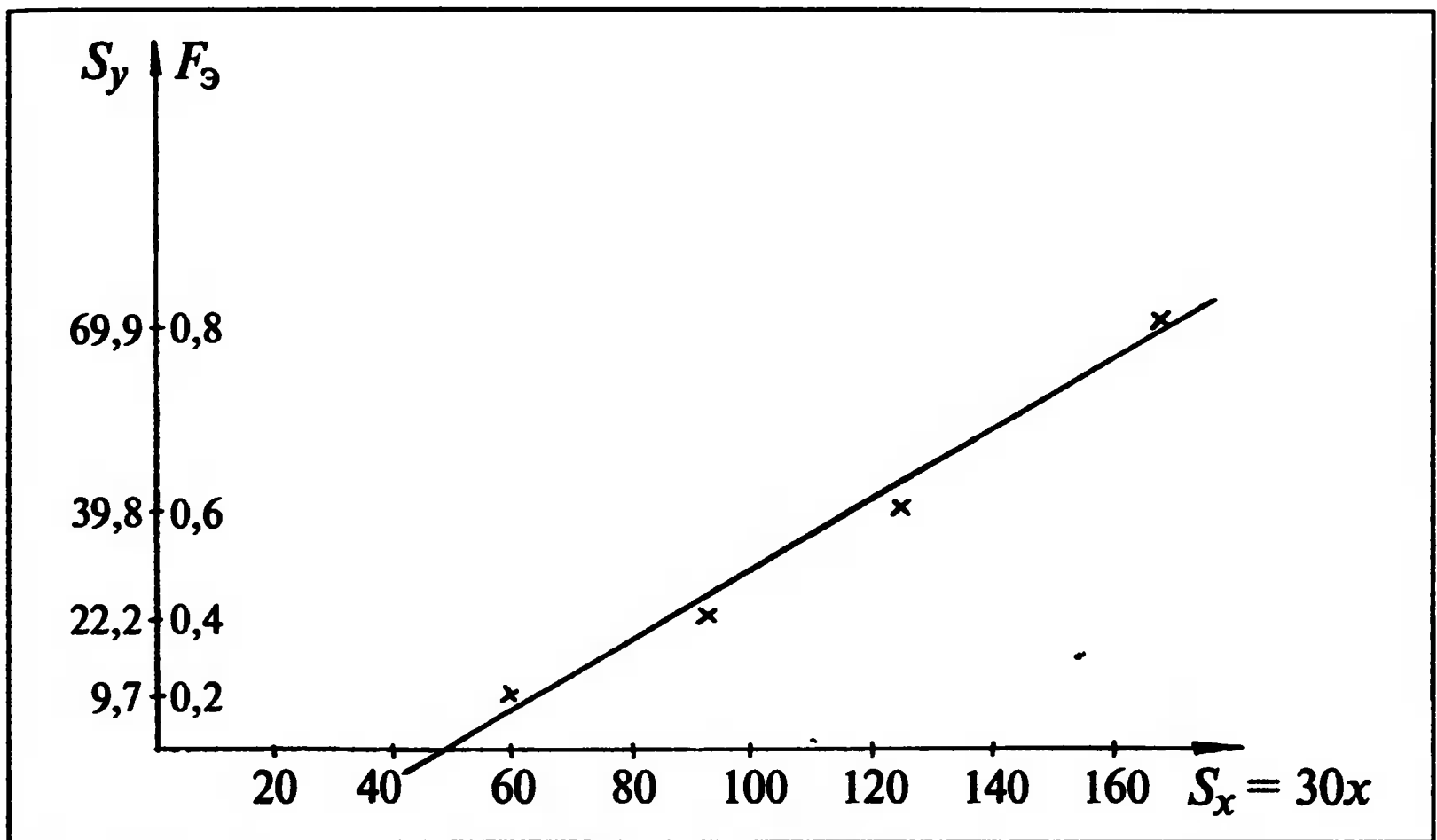
Для электродвигателя типа АЗ-12-52-4 по данным расчетов на рис. 4.5 нанесены экспериментальные точки. Для графической проверки согласия эмпирического распределения с теоретическим необходимо провести прямую так, чтобы нанесенные точки отклонялись от нее как можно меньше. Используем метод наименьших квадратов. Согласно этому методу по данным точкам  $u_i$ ,  $v_i$  строим прямую:

$$v = qu + r, \quad (4.14)$$

где

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}; \quad (4.15)$$

$$r = \bar{v} - q\bar{u}; \quad (4.16)$$



**Рис. 4.5. Графическая проверка соответствия эмпирического распределения с теоретическим отказов короткозамкнутой обмотки ротора электродвигателей АЗ-12-52-4**

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i; \quad \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i. \quad (4.17)$$

Далее по формуле (4.15) и (4.16) находим:

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

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

Подставив полученные значения  $q$  и  $r$  в уравнение (4.14), получим:

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

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

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

Из рис. 4.5 видно, что нанесенные эмпирические точки мало отклоняются от проведенной прямой. Отсюда следует, что опытные данные не противоречат предположению, что отказы обмотки ротора распределяются по экспоненциальному закону.

Далее проводим точечную оценку для параметра  $\hat{\lambda}$  по эксплуатационным данным. Интенсивность отказов вычисляем по формуле (4.2).

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 электродвигателей рассматриваемых типов (за исключением электродвигателей типа 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 заменить 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.

**Надежность обмоток роторов с непосредственным водяным охлаждением.** 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 включает в себя насос с электрическим приводом (ПЭН с электродвигателем АВ-8000/6000УЗ) и турбопитательный насос (ТПН), у которого в качестве привода используется паровая турбина мощностью 12 МВт. Насос с электрическим приводом применяется при пусковых режимах энергоблока, а также в качестве резервного привода при отказах ТПН, который по своей мощности обеспечивает номинальную производительность котельного агрегата; однако по условиям технологической схемы энергоблок не может быть пущен с помощью ТПН. Основным назначением ПЭН являются пуск блока и

его работа при нагрузке ниже номинальной, поэтому мощность ПЭН ниже мощности ТПН и составляет 8 МВт.

В электродвигателях АВ-8000/6000УЗ 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-8000/6000УЗ свидетельствует о том, что эксплуатационная надежность их сравнительно низкая. Значительное повреждение связано с нарушением герметичности системы НВО ротора (СНВО) и КВО статора (СКВО). Далее анализируется повреждаемость систем водяного охлаждения (СВО) 24 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 из-за размораживания заполненных дистиллятом сегментов, находящихся в нижней части сердечника резервного статора, хранящегося при температуре ниже 0 °С.

В СНВО ротора могут быть течи 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 полым короткозамыкающим кольцом.

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

Отказы СВО электродвигателей разделяются на две группы: нарушение герметичности и отсутствие проходимости каналов. Отсутствие проходимости каналов выявляется 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. При этом плане результаты наблюдений за отремонтированными элементами или сборочными единицами включаются в общие данные наблюдений для замены или ремонта. В процессе ремонтов выполняются осмотры и гидравлические испытания в следующем объеме:

	Число осмотренных и испытанных элементов
СНВО ротора:	
радиальные узлы . . . . .	1740
пайки . . . . .	22 040
СКВО статора:	
резьбовые соединения . . . . .	7250
охлаждающие сегменты . . . . .	43 500
пайки . . . . .	87 000
параллельные ветви охлаждающего тракта . . . . .	7250
трубки воздухоохладителя . . . . .	16 240

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

$$T = \frac{\chi^2_{\text{ср}}}{N}, \tag{4.18}$$

где  $N$  — число объектов наблюдения;  $\chi$  — двусторонний критерий.  
 Предполагая, что поток отказов простейший, находим значение  $\chi$ . Для этого задаем относительную ошибку  $\delta$  и одностороннюю доверительную вероятность  $\beta$ .

Принимаем

$$\delta = \left| \frac{P - P^*}{P} \right| = 0,20, \tag{4.19}$$

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

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 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 интервала. 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 года эксплуатации.

Вследствие того что электродвигатели вводились в эксплуатацию не одновременно, а с интервалом 8 — 19 мес, то в каждый временной интервал начиная с седьмого года эксплуатации входила не вся совокупность исследуемых электродвигателей. В связи с этим для точечной оценки повреждаемости принято отношение числа СВО,

имеющих нарушение герметичности или проходимости за время наблюдения  $T$ , ко всему числу наблюдаемых СВО в этом временном интервале, которое определялось по формуле:

$$q_i = \frac{d_i}{N_i \Delta t_i}, \tag{4.20}$$

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:

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n N_i \Delta T_i}, \tag{4.21}$$

где  $n$  — число временных интервалов наблюдения.

Средняя удельная повреждаемость, приведенная к одному году эксплуатации:

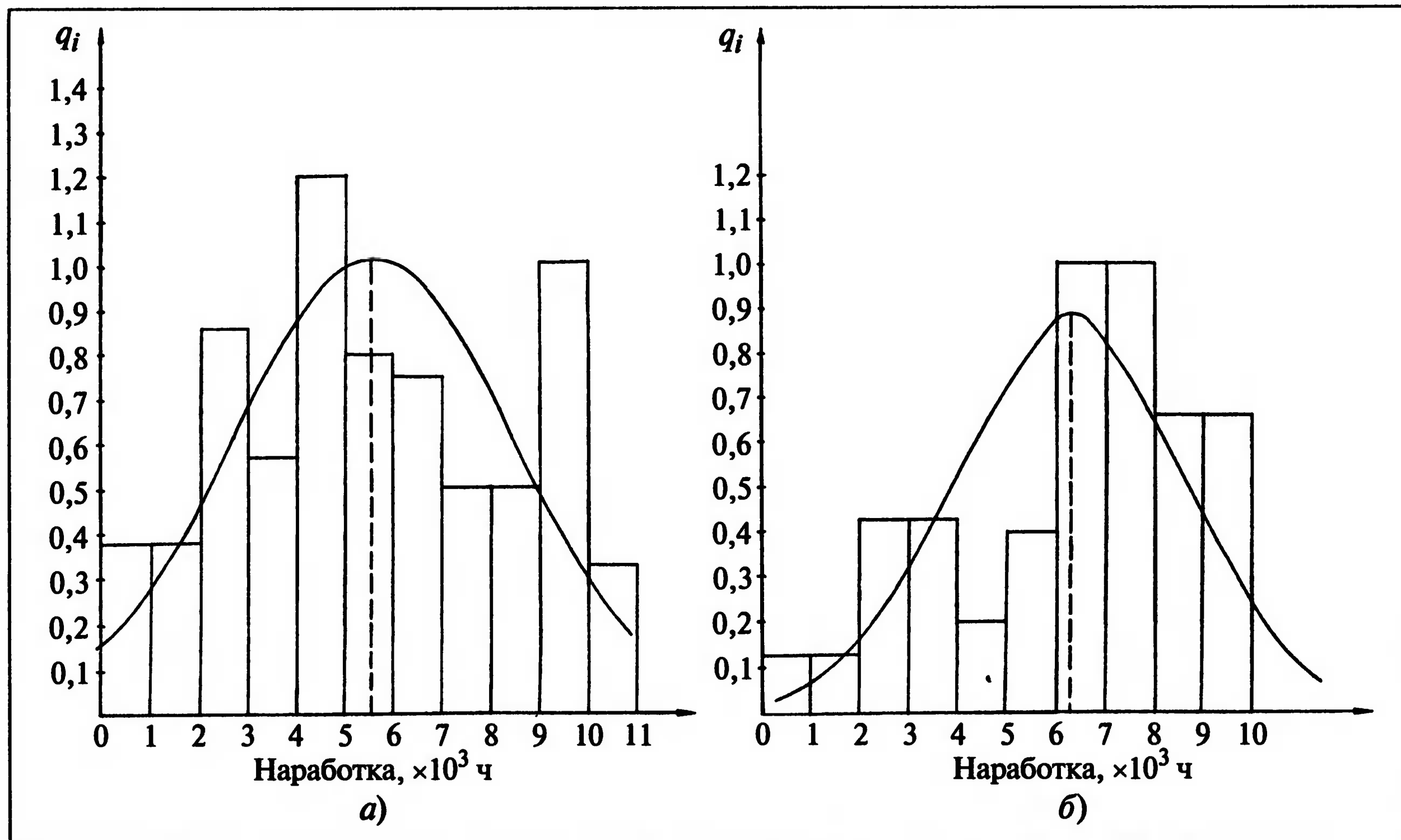
$$q'_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \frac{T_{\text{ср}}}{\Delta T}, \tag{4.22}$$

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

По месту обнаружения отказы распределены следующим образом:

СВО ротора, течь:	
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 %)
перетирание трубки о ребро жесткости . . . . .	1 (4,5 %)

На рис. 4.6 построены гистограммы удельной повреждаемости СНВО ротора и СКВО статора.



**Рис. 4.6. Гистограмма удельной повреждаемости и теоретические кривые плотности нормального распределения отказов СНВО ротора (а) и СКВО статора (б) электродвигателей АВ-8000/6000УЗ**

Для возможности применения математического аппарата теории вероятностей и математической статистики при анализе и прогнозировании отказов в СВО электродвигателей целесообразно выровнять 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 с помощью статистического критерия согласия или графически соответствие выбранного априорного распределения эмпирическому распределению, построенному по данным эксплуатационных наблюдений.

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:

$$D_n = \max |F_n(y_{in}) - F(y_{in})|, \quad (4.23)$$

а также величину  $\lambda_n$  по формуле:

$$\lambda_n = D_n \sqrt{n}. \quad (4.24)$$

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

Задаемся доверительной вероятностью того, что отклонение функции опытного распределения от теоретического будет меньше  $\lambda^*$ , установленной для доверительной вероятности  $\nu$  [см. формулу (4.9)].

Для доверительной вероятности  $\nu$ , принятой равной 0,6,  $\lambda^* = 0,89$ . Условие  $0,78 < 0,89$  выполняется. Для построения доверительной области теоретического распределения вычисляем:

$$D_n^* = \frac{\lambda_n^*}{\sqrt{n}}; \quad D_n^* = 0,148.$$

Наносим на график верхнюю и нижнюю доверительные границы (рис. 4.7):

$$F_u(y) = F(y) + D_n^*; \quad F_L(y) = F(y) - D_n^*. \quad (4.25)$$

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. 4.6). Функция нормального распределения определяется двумя параметрами  $x$  и  $s$ . Следовательно, для исследуемой совокупности электродвигателей распределение отказов в СНВО ротора подчиняется нормальному закону. Из выполненных расчетов  $x = 5,577$ ,  $s = 2,833$ .

Функция плотности вероятности отказов в СНВО ротора имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{2,833\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-5,577)^2}{2 \cdot 2,833^2}\right]. \quad (4.26)$$

Делаем предположение, что имеет место нормальный закон распределения отказов СКВО статора, и выполняем проверку по критерию согласия Колмогорова. Графики функций приведены на рис. 4.6 и 4.7. Следовательно, гипотеза о нормальном распределении отказов в СКВО статора принимается. Параметры распределения равны:  $x = 6,345$ ,  $s = 2,395$ .

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:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \dots \leq x_n. \quad (4.27)$$

Эмпирическую функцию распределения  $F_z(x)$  определяем по формуле (4.12). Вычисляем коэффициент масштаба по формуле (4.13). Для выбора масштаба по оси ординат задаем:  $F_{\min} = 0,001$ ;  $F_{\max} = 0,999$ . Тогда  $y_{\min} = -3,090$ ;  $y_{\max} = 3,090$ .

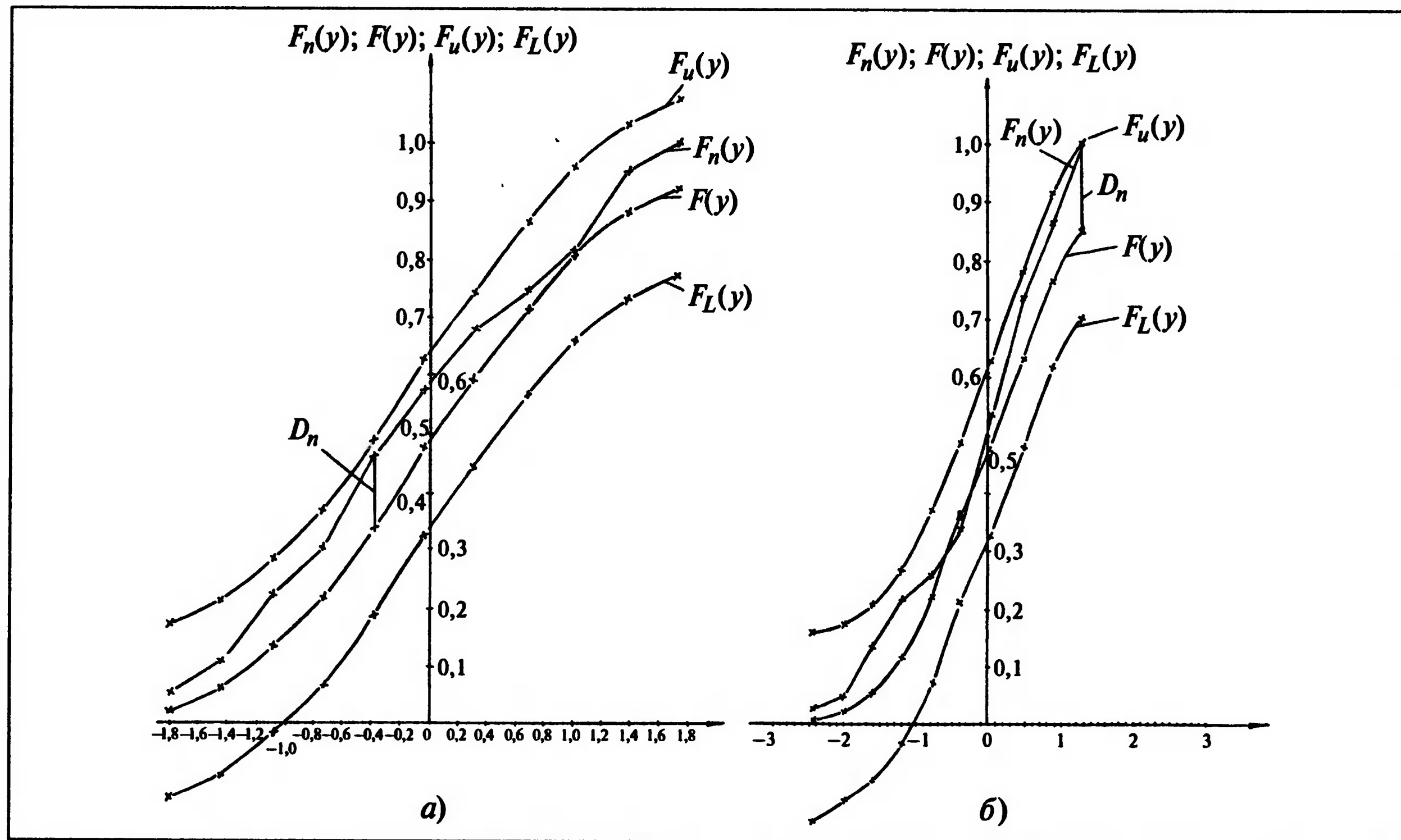


Рис. 4.7. Графики функций опытного и теоретического распределения отказов в СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ:  
 а — СНВО ротора; б — СКВО статора

Величину  $S_y(F)$  вычисляем по формуле:

$$S_y(F) = \frac{H}{6,180} y, \quad (4.28)$$

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 позволяет объективно построить прямую по опытным точкам. Используя этот метод, по формуле (4.14) строим прямую, а по формулам (4.15 и (4.16) определяем коэффициенты  $q$  и  $r$ .

Расчетная прямая и эмпирические точки представлены на рис. 4.8, из которого 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:

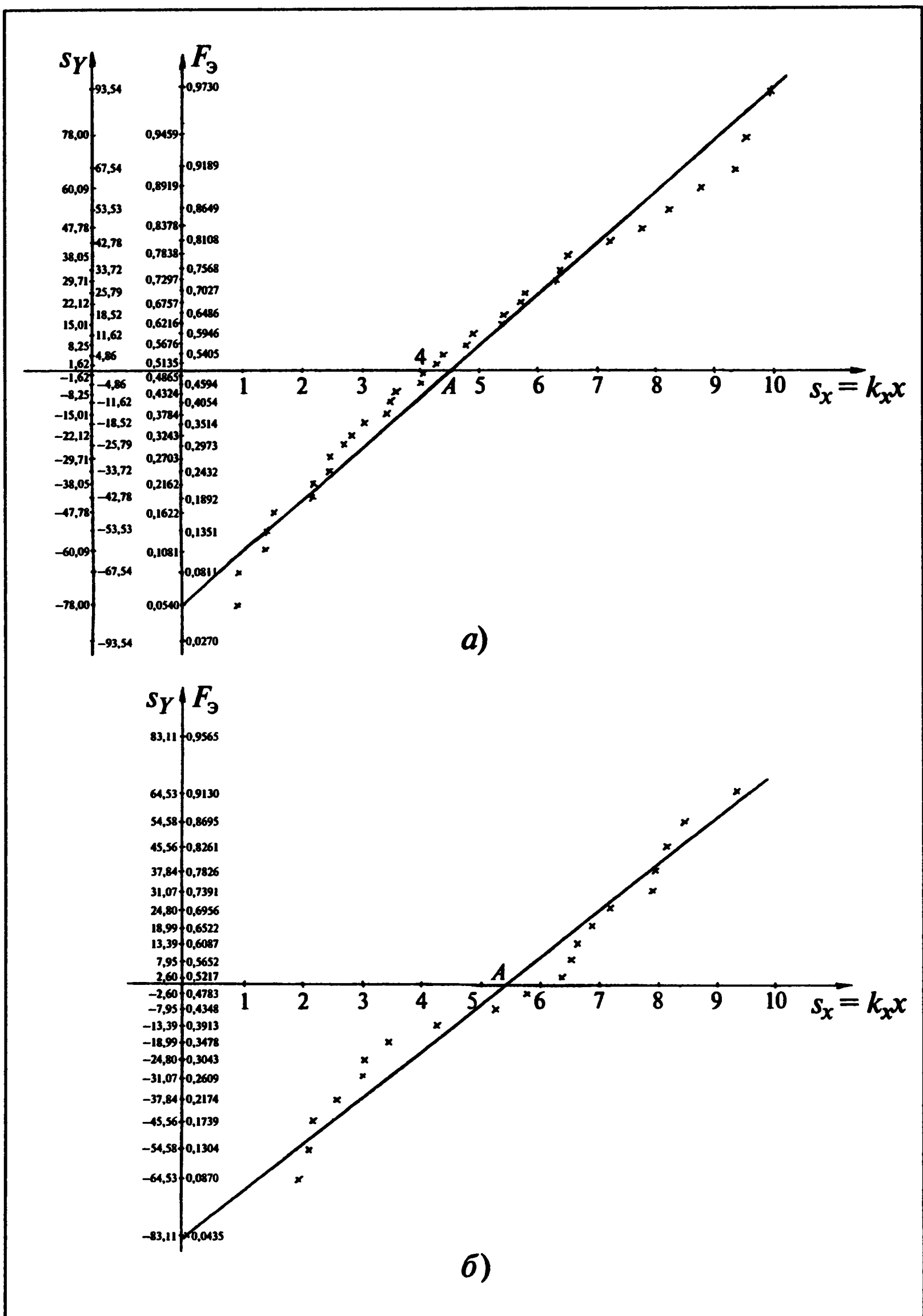
$$x = \frac{OA}{k_x}; \quad (4.29)$$

$$s = \frac{H}{6,180 k_x} \frac{1}{q}. \quad (4.30)$$

Для СНВО ротора:  $x = 4,5765$ ,  $s = 2,8626$ . Для СКВО статора:  $x = 5,4145$ ,  $s = 3,1563$ .

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 видно, что время эксплуатации электродвигателей до возникновения наибольшего числа отказов СНВО ротора составляет  $(4 \div 5)10^3$  ч, а для СКВО статора  $(5 \div 7)10^3$  ч, что соответствует периоду эксплуатации электродвигателей 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





**Рис. 4.8. Графическая проверка согласия эмпирического распределения отказов в СВО электродвигателей АВ-8000/6000УЗ с теоретическим и определение их параметров с помощью вероятностных сеток:**  
**а** — СНВО ротора; **б** — СКВО статора

соединений, охлаждающих сегментов и их гидравлических соединений, коллекторов.

В связи с резко увеличивающейся повреждаемостью воздухоохладителей и достижением 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  $(0,4 \div 0,5)10^3$  ч, выполнять контрольную подтяжку гаек с гидравлическими испытаниями, а после наработки  $(0,8 \div 1,0)10^3$  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.

#### **4.4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРА И ПЛАНИРОВАНИЕ ИХ ПЕРЕМОТОК**

Прогнозирование срока службы корпусной изоляции обмоток статоров является важным вопросом для эксплуатации. Большой интерес представляет 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 напряжению. Снижение электрической прочности изоляции в процессе эксплуатации происходит вследствие нагрева и температурных деформаций, динамических воздействий и вибрационного старения изоляции.

Электрическую прочность корпусной изоляции под воздействием указанных выше эксплуатационных факторов можно определить по уравнению:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{о.пр}} e^{-bt}, \tag{4.31}$$

где  $U_{\text{пр}}$  — напряжение пробоя после воздействия эксплуатационных факторов, вызванных тепловыми и механическими нагрузками;  $U_{\text{о.пр}}$  — 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. Для этого 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>), которые используются в качестве привода циркуляционных насосов энергоблока мощностью 300 МВт.

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

Коэффициент  $b$  в формуле (4.31) определен по результатам выполненных высоковольтных испытаний по следующей методике. К моменту проведения эксперимента каждый из электродвигателей № 1 и 2 находился 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 квадратическое отклонение пробивного напряжения, кВ.....	3,45	3,34
Наработка суммарная, ч.....	73 934	72 960
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).....	126 215 (21,2)	130 688 (22,23)

Среднее пробивное напряжение резервных катушек после изготовления и укладки  $U_{o.пр.ср} = 67,5$  кВ [8], для электродвигателя № 1 после 12,41 года эксплуатации и 73 934 ч наработки  $U_{пр.ср} = 33,34$  кВ.

Подставляя полученные значения в формулу (4.31), 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 (4.31) для электродвигателя № 1 имеет вид:

$$U_{пр.ср} = U_{o.пр.ср} e^{-0,95 \cdot 10^{-5} t}. \quad (4.32)$$

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 (4.31) для электродвигателя № 2 имеет вид:

$$U_{\text{пр.ср}} = U_{\text{о.пр.ср}} e^{-0,93 \cdot 10^{-5} t}. \quad (4.33)$$

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

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \sqrt{2\pi} \exp \left[ -\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4.34)$$

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

Для электродвигателя № 1:

$$f(x) = \frac{1}{3,45\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x-33,34)^2}{2 \cdot 3,45^2} \right]. \quad (4.35)$$

Для электродвигателя № 2:

$$f(x) = \frac{1}{3,34\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x-34,16)^2}{2 \cdot 3,34^2} \right]. \quad (4.36)$$

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

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta-d}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha-d}{\sigma}\right), \quad (4.37)$$

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 квадратическое отклонение, равна 0,0027. Следовательно, в этом случае вероятность того, что отклонение по абсолютному значению будет меньше утроенного среднего квадратического отклонения, равна 0,9973. Исходя из принципа невозможности маловероятных событий, считаем, что пробой в этом случае практически невозможен.

Предполагаем, что в процессе эксплуатации среднее квадратическое отклонение пробивных напряжений обмотки статора остается постоянным  $\sigma = \text{const}$ . Значение  $\alpha$  принимаем равным испытательному напряжению переменного тока для электродвигателей напряжением 6 кВ. В соответствии с “Объемом и нормами испытания электрооборудования”  $U_{\text{исп}} = \alpha = 10$  кВ. Тогда

$$d = \alpha + 3\sigma; \quad (4.38)$$

$$\beta = d + 3\sigma. \quad (4.39)$$

Для электродвигателя № 1:

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

Для электродвигателя № 2:

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

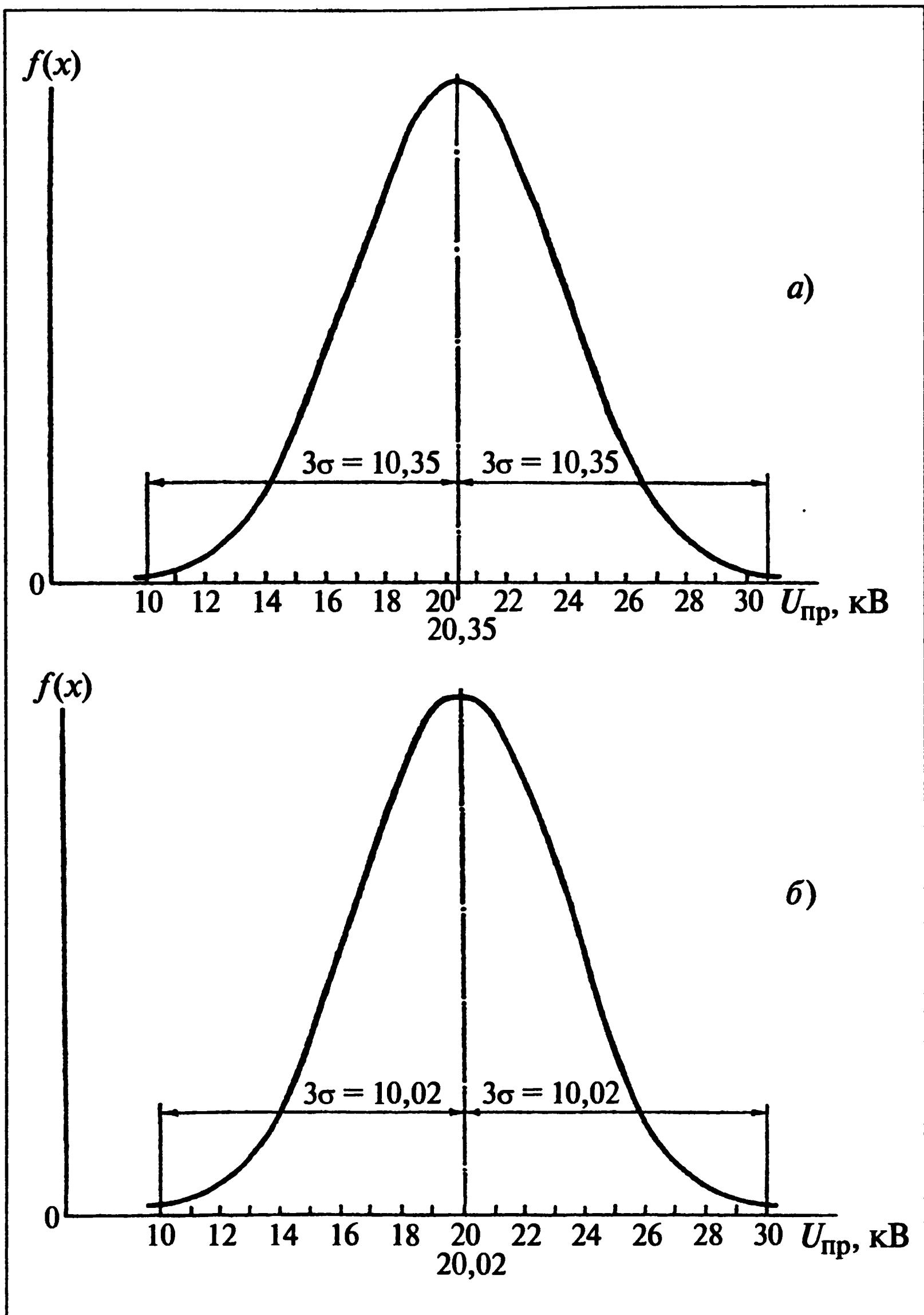
Следовательно, при вероятности, равной 0,9973, ни у одного элемента обмотки электродвигателя пробивные напряжения не будут ниже 10 кВ при  $U_{\text{пр.ср}} = 20,35$  кВ для электродвигателя № 1 и  $U_{\text{пр.ср}} = 20,02$  кВ для электродвигателя № 2. Результаты расчетов приведены на рис. 4.9, а, 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  $t$ :

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



**Рис. 4.9. Нормальные кривые (кривые Гаусса) плотности распределения пробивных напряжений обмоток статоров электродвигателей типа ДВДД-215/39-12-16:**  
***a*** — электродвигатель № 1 после наработки 126 215 ч; ***б*** — электродвигатель № 2 после наработки 130 688 ч

Наработка до замены изоляции:

$$t = \frac{1,199046}{0,95 \cdot 10^{-5}} = 126\,215,36 \text{ ч.}$$

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

$$\begin{aligned} \text{Для электродвигателя № 2: } 20,02 &= 67,5e^{-0,93 \cdot 10^{-5}t}; \quad e^{-0,93 \cdot 10^{-5}t} = \\ &= 0,2965925; \quad -0,93 \cdot 10^{-5}t = \ln 0,2965925; \quad t = -\frac{1,215397}{0,93 \cdot 10^{-5}} = \\ &= 130\,688,84 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Время до замены изоляции  $130\,688/5879 = 22,23$  года.

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

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. С использованием разработанной методики можно планировать сроки перемоток обмоток статоров с заменой корпусной изоляции.

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

В целях увеличения ресурса обмотки до замены изоляции следует снизить уровень эксплуатационных нагрузок на изоляцию обмотки путем уменьшения воздействия термомеханических факторов.

**Планирование сроков замены обмоток статоров электродвигателей с учетом износных 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 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. 4.10). Из рис. 4.10 видно, что начальные точки лежат близко к пологой прямой, а последующие — 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 износных отказов обмотки статора. Следовательно, для определения времени замены изоляции обмотки необходимо построить две прямые. 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 (4.14) строим прямую.

Значения  $q$  и  $r$  вычисляем по формулам (4.15) и (4.16). Для периода нормальной эксплуатации:

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

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

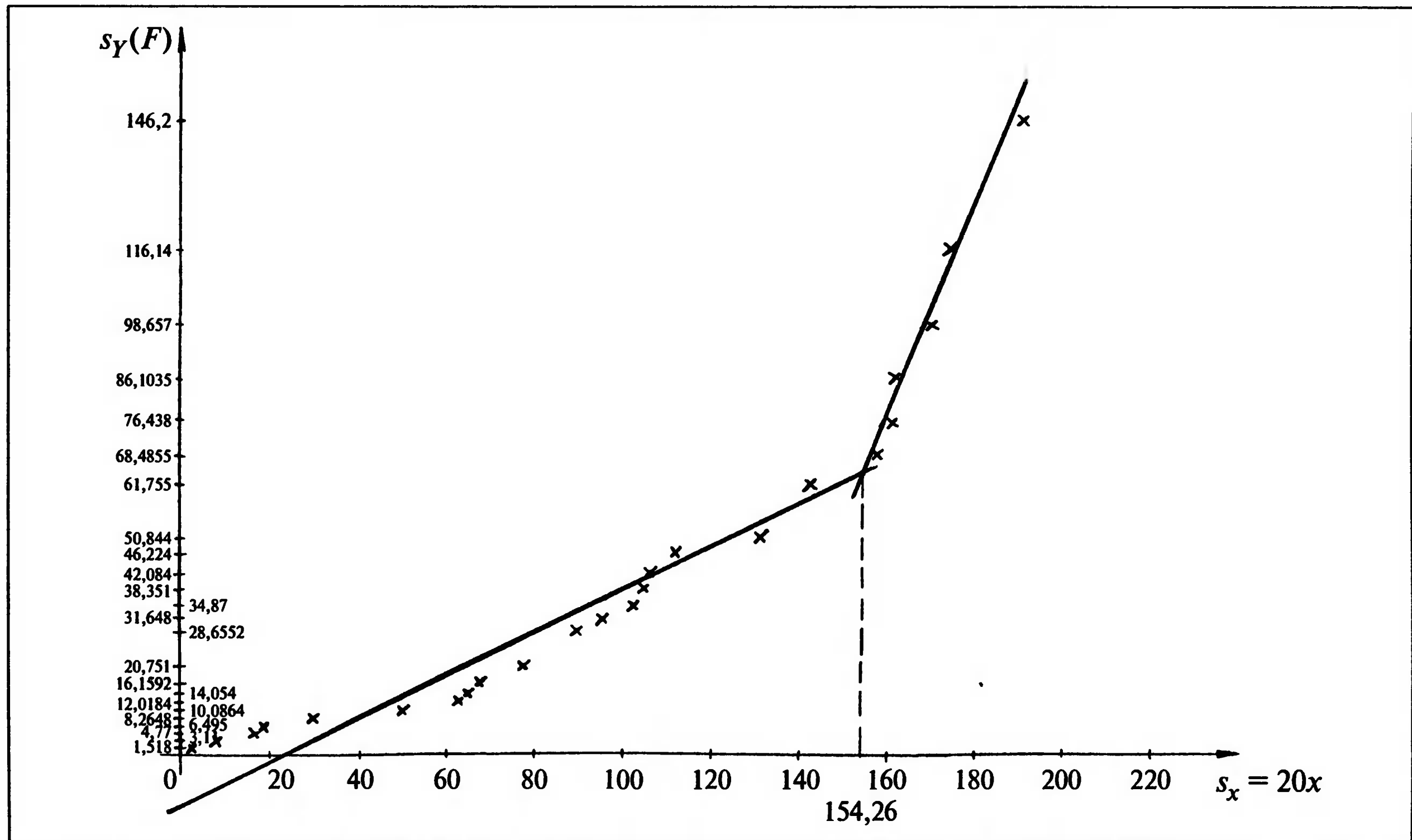


Рис. 4.10. Определение времени перехода от периода нормальной эксплуатации к периоду износных отказов обмотки статора электродвигателя СДМЗ-20-49-60

При этом

$$\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 = 49\,447,677;$$

$$\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(u_i - \bar{u}) = 24\,063,041.$$

Таким образом, для данного периода:

$$q = \frac{24\,063,041}{49\,447,677} = 0,4866;$$

$$r = 27,8244 - 0,4866 \cdot 80,5074 = -11,3505.$$

Уравнение прямой для периода нормальной эксплуатации имеет вид:

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

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

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

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

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 износных отказов:

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

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

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

$$v = 2,2695u + 1,7475. \quad (4.40)$$

Переносим уравнение (4.40) в старую систему координат, где оно принимает вид:

$$v = 2,2695u - 286,3725. \quad (4.41)$$

Для построения прямых по уравнениям (4.40) и (4.41) определяем значения  $v$  и  $u$  в двух точках. Находим графически и аналитически точку пересечения этих прямых. Для аналитического решения составляем систему уравнений:

$$v = 0,4866u - 11,3505; \quad (4.42)$$

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

Приравниваем правые части уравнений (4.41) и (4.42):

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

Отсюда

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

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

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

Из рис. 4.10 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 износных 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. В целях обеспечения эксплуатационной надежности работы электродвигателей СДМЗ-20-49-60 целесообразно через 8 лет эксплуатации выполнять 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.

**Планирование сроков замены обмоток статоров электродвигателей, работавших в аномальных режимах.** В процессе эксплуатации мощные высоковольтные электродвигатели могут работать 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.

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.

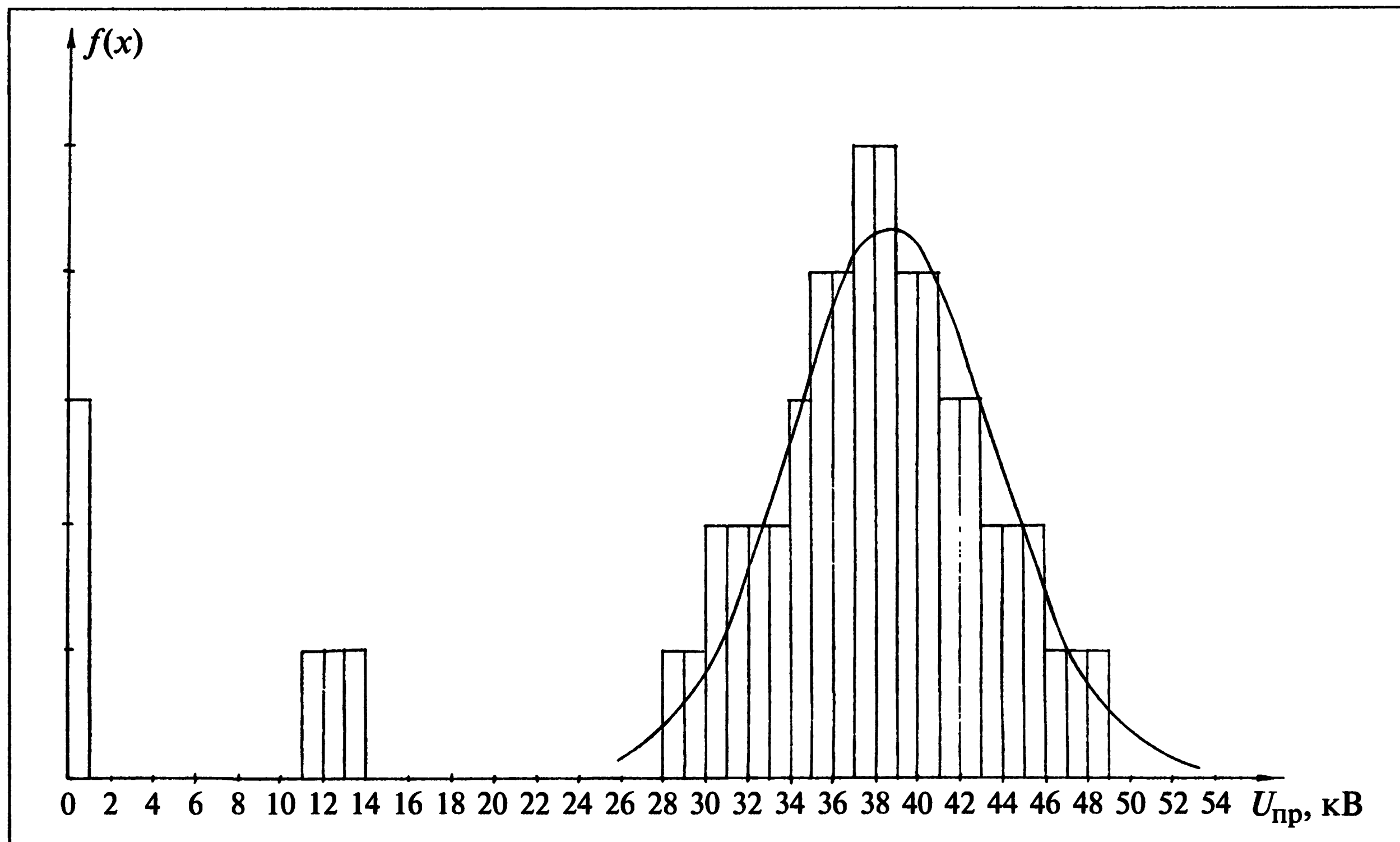
Поскольку при демонтаже обмотка может деформироваться, нарушая целостность изоляционной конструкции с образованием микротрещин, изломов и других дефектов, испытания проводились до ее демонтажа. При такой методике ошибки в результате эксперимента исключаются.

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 измеренным 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. 4.11. По оси абсцисс отложены частичные интервалы значений пробивных напряжений, а их высоты равны частотам соответствующих пробивных напряжений.

Три катушки имели пробивные напряжения 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



**Рис. 4.11. Гистограмма, совмещенная с кривой нормальной плотности вероятности пробивных напряжений корпусной изоляции обмотки статора электродвигателя АВ-113-4М**

останутся еще три, которые в дальнейшем приведут к аварийному пробоем 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 элементы (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 (4.10). 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, способствовавшие резкому (скачкообразному) снижению пробивных напряжений этих катушек.

Автором проверено, что 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 (катушки) со значительными деформациями и изменением первоначальной геометрической фор-



мы 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).

В целях 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.

В случае применения в качестве приводов механизмов с различной степенью надежности одностипных электродвигателей, имеющих деформацию лобовых частей, их можно переставлять 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 ужесточить крепление обмотки статора в целях повышения динамической устойчивости обмоток.

#### **4.5. 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 обмо-

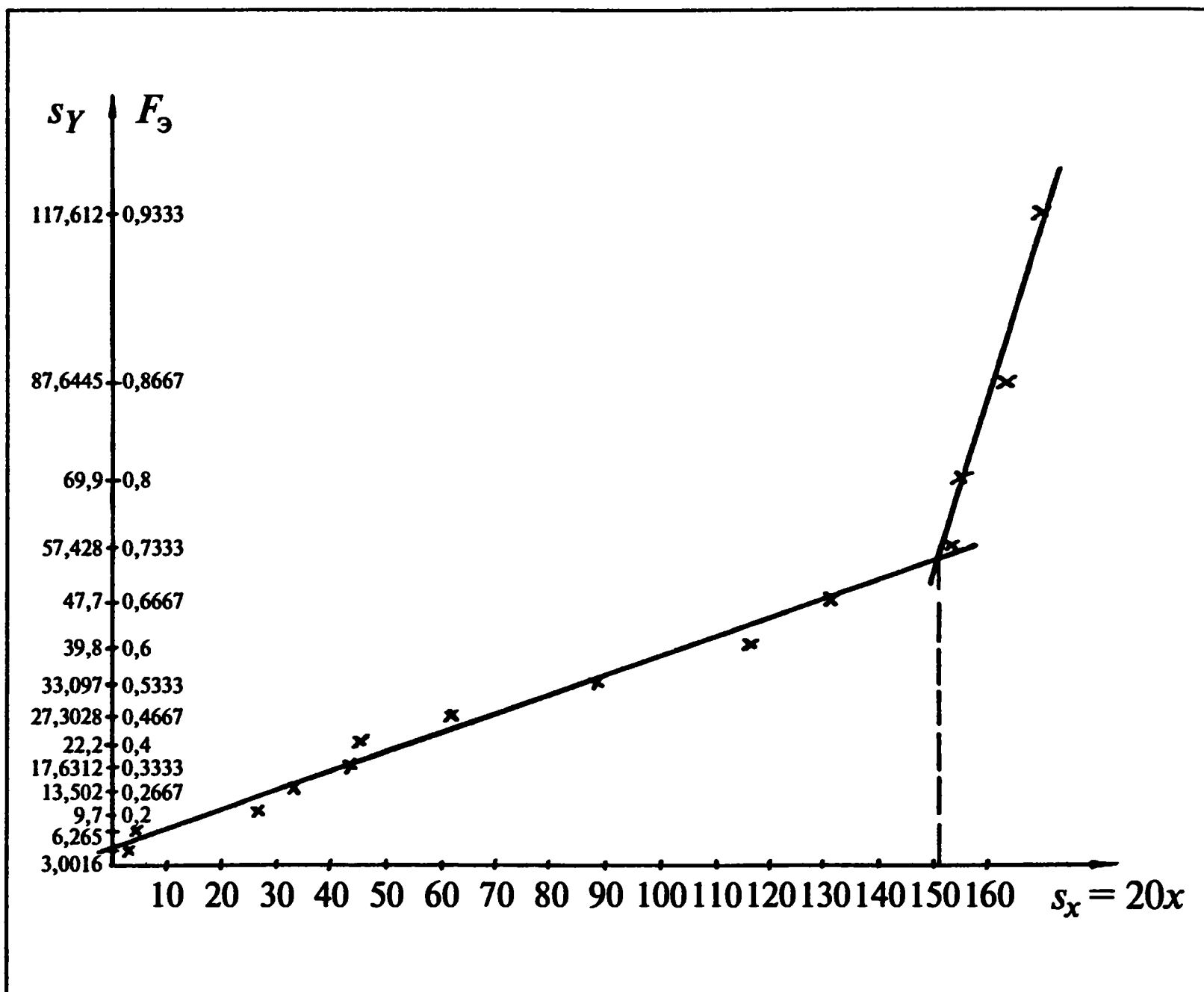
ток роторов, происшедшие до выполнения замены изоляции. Это сделано по следующим причинам.

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 новых 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. 4.12, из которого видно, что первые 11 точек лежат в области, близкой к прямой, а последующие — также к 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. 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. 4.12 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, сказывается 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 прове-



**Рис. 4.12. Графическая проверка согласия эмпирического распределения с теоретическим отказов обмотки ротора синхронного электродвигателя типа СДМЗ-20-49-60**

рено графоаналитическим методом с помощью вероятностных сеток.

В период нормальной эксплуатации, равный 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  $\hat{\lambda} = 0,0196$ . В целях повышения надежности эксплуатации с более высокими показателями надежности целесообразно после периода, равного 7,55 года, выполнить замену изоляции на стеклотекстолитовую, а также провести реконструкцию межполюсных соединений (перемычек) и заменить гетинаксовые прокладки (шайбы) стеклотекстолитовыми.

## **4.6. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБМОТОК СТАТОРОВ И ОБМОТОК РОТОРОВ**

Для повышения надежности и улучшения технико-экономических показателей, увеличения межремонтного периода и других целей электродвигатели модернизируют, причем обновляют те узлы электродвигателя, надежность которых в процессе эксплуатации является низкой (по отношению к другим). В процессе ремонтов реконструируют отдельные узлы, используя новые современные электроизоляционные материалы и передовую технологию. Модернизация электродвигателей должна быть экономически эффективной.

Для повышения надежности и жесткости крепления обмоток статоров выполняют конструктивно-технологические мероприятия:

- применяют препрег для заполнения зазоров между катушками и стержнями обмотки в местах установки дистанционных колодок, между обмоткой и бандажными кольцами, а также в качестве прокладок, уложенных в пазовую часть обмотки; в последнем случае прокладки препрега должны быть предварительно покрыты фторопластовой пленкой во избежание их прилипания;
- заменяют бандажи из льнопенькового шнура бандажами из лавсанового шнура, пропитанного эпоксидным составом, или термоусадочной ленты с применением цепной вязки;
- устанавливают дополнительные распорки на выходе из паза катушек или стержней обмотки;
- заменяют детали крепления обмотки, изготовленные из дерева, на стеклотекстолитовые;
- применяют в качестве подклиновых прокладки из гофрированного стеклотекстолита;
- устанавливают дополнительные кронштейны к бандажным кольцам;
- меняют существующие кронштейны на кронштейны более жесткой конструкции;
- усиливают крепления кронштейнов к нажимным фланцам крепежными болтами с увеличенным диаметром или приваркой;
- применяют крепление бандажных колец стеклотекстолитовыми гребенками, выполненными с изменением конструкции кронштейнов;
- выполняют установку межслоевых кольцевых прокладок между катушками;
- устанавливают дополнительные бандажи крепления верхних сторон катушек к бандажным кольцам;

- устанавливают стеклобандажные пояса или бандажные кольца у электродвигателей, не имеющих бандажных колец, из-за малого вылета лобовых частей обмотки;
- усиливают крепление межкатушечных соединений дополнительными распорками;
- используют магнитные клинья, уменьшающие динамические усилия на лобовые и пазовые части обмотки и снижающие температуру активных частей электродвигателя.

**Усиление крепления лобовых частей обмотки статора.** Расчеты и исследования показали, что лобовые части обмотки статора мощных электродвигателей могут противостоять электродинамическим силам при жесткой и монолитной системе их крепления. Рассматриваемые мероприятия выполняют в период полной перемотки обмотки статора. Смысл реконструкции заключается в заполнении формирующимся материалом типа препрег возможных зазоров между стержнями и катушками обмотки в местах установки дистанционных распорок, между обмоткой и бандажными кольцами и между верхним и нижним рядами стержней (межслоевые прокладки) в местах их прилегания. Шнуровые бандажи из льнопенькового шнура заменяют бандажами из пропитанного лавсанового шнура. Формирующийся материал и эпоксидный состав для пропитки лавсанового шнура имеют в своем составе связующие горячего отверждения. В результате последующей запечки лобовым частям обмотки придаются монолитность и высокие вибрационные характеристики. Кроме того, разработан и внедрен препрег холодного отверждения, который не требует запечки. Время его отверждения регулируется в зависимости от требований технологического процесса.

Для получения бандажа, плотно облегающего сопрягаемые детали, необходим эластичный шнур, усаживающийся при нагреве. Этим условиям удовлетворяет лавсановый шнур, усадка которого увеличивается с ростом температуры и достигает 6 % при 120 °С. Эластичный лавсановый шнур позволяет более плотно накладывать шнуровой бандаж. Пропитка лавсанового шнура эпоксидными составами горячего отверждения перед их установкой и последующая термообработка при температуре 100 °С повышают механическую прочность бандажа на 50 – 60 %. Усадка лавсанового шнура после 2 ч выдержки при температуре 80 °С составляет 1,5 %; при 100 °С — 3; при 120 °С — 6; при 160 °С — 13 %.

Способность препрега формироваться по месту установки при температуре окружающего воздуха и низких давлениях позволяет избежать при укладке обмотки зазоров между катушками (стержнями) и деталями крепления. После запечки прокладки прочно соеди-

няются с сопрягаемыми поверхностями, способствуя созданию монолитной жесткой системы в лобовой части обмотки статора. Механическая прочность препрега ниже, чем стеклотекстолита марки СТЭФ, но достаточна для применения в конструкции крепления лобовых частей мощных электродвигателей.

Для усиления крепления бандажных колец у электродвигателей АВ-8000-6000-УЗ дополнительно с каждой стороны статора устанавливают по пять кронштейнов из стеклотекстолита толщиной 25 мм.

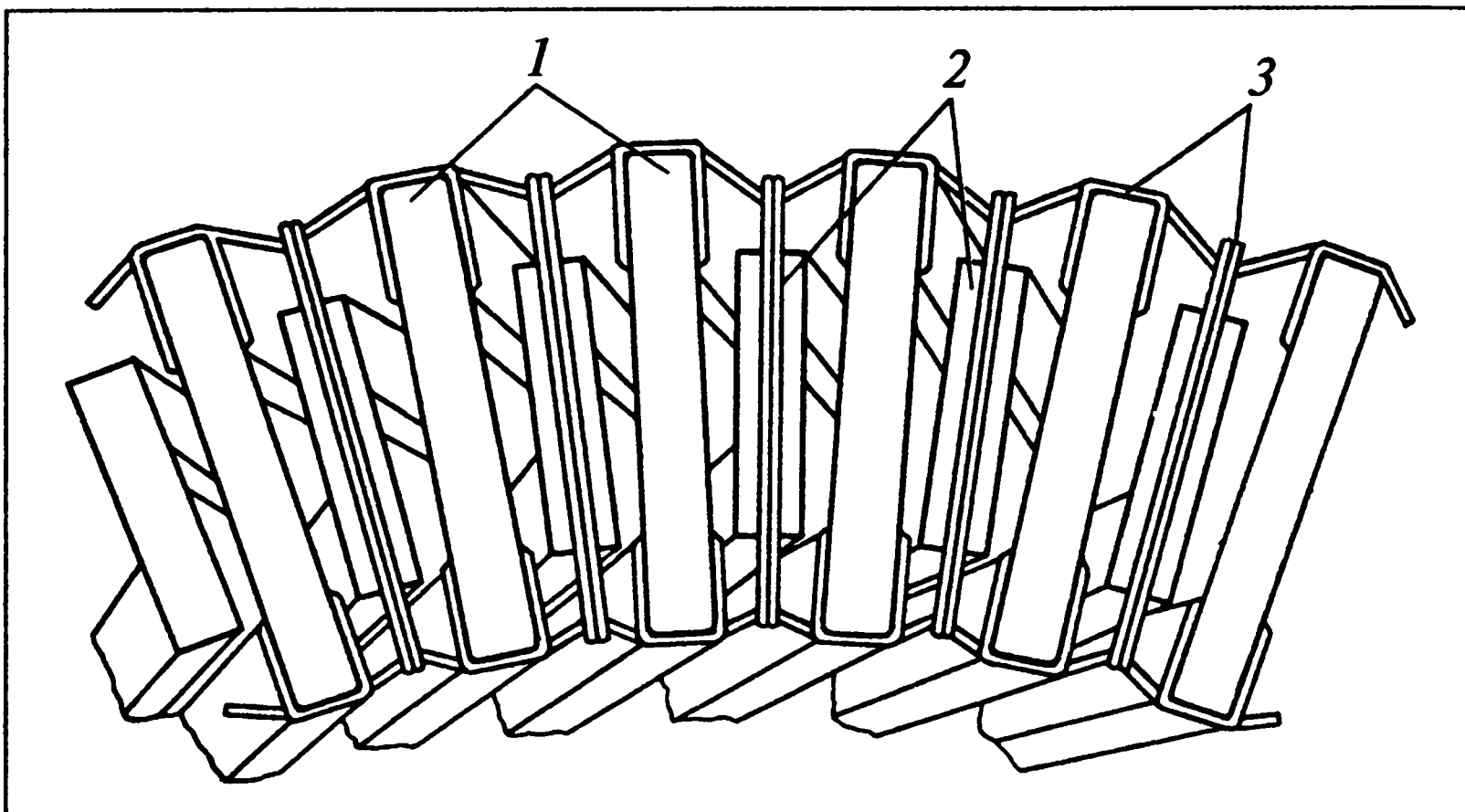
У электродвигателей типа ДВДД-215/39-12-16 шпильки крепления бандажных колец заменяют кронштейнами, изготовленными из двух взаимно перпендикулярно сваренных между собой и приваренных к нажимной плите отрезков листовой стали толщиной 10 мм. По сравнению с заводским количеством шпилек число кронштейнов увеличено в 2 раза. В результате замены шпилек кронштейнами жесткость бандажных колец увеличивается в 7 раз.

Распорки, выполненные из дерева, заменяют стеклотекстолитовыми, не имеющими усадки. На кронштейны укладывают полосы препрега. Такие же полосы препрега укладывают на места сопряжения плоскости кронштейнов с бандажными кольцами. На бандажные кольца (внутреннее и наружное) накладывают сверху (по внутренней стороне) один слой препрега толщиной 3 мм, завернутого в стеклоткань, пропитанную лаком ЭР1-30. Эту полоску бандажируют к кольцам стеклолентой вразбежку.

При укладке обмотки дистанционные распорки в лобовых частях перед установкой изолируют препрегом и пропитанной лаком ЭР1-30 стеклотканью. Каждая дистанционная распорка подбирается по толщине таким образом, чтобы она, обернутая слоем препрега и стеклоткани, плотно входила в зазор между стержнями.

Бандаж накладывают шнуром, сложенным в две нити. Используемый для бандажей лавсановый шнур предварительно пропитывают эпоксидным составом. Шнур сушат после пропитки на воздухе не менее 24 ч.

Сначала накладывают поперечные нити бандажа, а затем продольные. Количество поперечных нитей определяется шириной распорки, а продольных — зазором между соседними стержнями. Усилия утяжки должны быть максимально возможными. После укладки нижнего слоя стержней обмотки (электродвигатель АВ-8000/6000УЗ) устанавливают клинья на выходе из паза, предварительно обернув их препрегом, и бандажируют их стеклолентой. Взамен набора заводских дуговых прокладок из электрокартона чередуются слои пре-



**Рис. 4.13. Установка дополнительного бандажного пояса на головки обмотки статора электродвигателя АВ-8000/6000У3:**

**1 — наружные (большие) головки; 2 — внутренние (малые) головки; 3 — бандажный пояс**

прега и стеклотекстолита. Аналогично нижним укладывают верхние стержни.

Для обеспечения большей динамической стойкости и механической прочности обмотки статора устанавливают дополнительный бандажный пояс (рис. 4.13).

После окончания работ, связанных с применением препрега и лавсанового шнура, обмотку запекают с помощью электрокалориферной установки.

**Предотвращение увлажнения лобовых частей обмотки статора.** При перемотке обмотки статора электродвигателей с водяным охлаждением АВ-8000/6000У3, а также электродвигателей, служащих приводом насосов, перекачивающих воду, для предохранения увлажнения лобовых частей можно использовать гидроизоляцию на основе кремнийорганического каучука холодной вулканизации типа КЛСЕ.

Лобовые части обмотки, соединения в головках, кронштейны, бандажные кольца, соединительные и выводные шины покрывают компаундом КЛСЕ, который, обладая высокими диэлектрическими свойствами, одновременно является надежной гидроизоляцией.

После переизоляции обмотки, до покрытия лобовых частей защитным слоем стеклотенты, кистью наносят слой компаунда КЛСЕ. Компаунд КЛСЕ разводят толуолом до вязкости, обеспечивающей



нанесение его на поверхность стержня (катушки); в полученную смесь добавляют катализатор К-1 в соотношении 25 : 1. Нанеся тонкий слой смеси на лобовую часть стержня, ее покрывают стеклолен-той толщиной 0,1 мм вполнахлеста и после вторичного покрытия смесью стержень (катушку) сушат в течение 3 — 4 ч при температуре окружающего воздуха. Толщина гидроизоляционного покрытия равна 0,85 — 0,9 мм. Для механической защиты гидроизоляционно-го слоя его покрывают одним слоем стеклоленты встык и эмалью ГФ-29хс.

Гидроизоляция остальных элементов и деталей крепления обмотки осуществляется по такой же технологии.

**Повышение надежности крепления обмотки статора в пазовой части.** Частые пуски и возникающие при этом большие значения электродинамических усилий ослабляют крепление обмотки статора электродвигателей. Увеличение частоты пусков особенно сказывается на электродвигателях блоков, работающих в режиме регулирования графика нагрузки. Поэтому возникает необходимость проведения внеплановых ремонтов с переклиновкой пазов обмотки статора.

Существующая конструкция крепления стержней в пазу с помощью клиньев и плоского стеклотекстолитового подклинового бандажа не всегда обеспечивает требуемую надежность, поэтому особое внимание при перемотке необходимо уделить закреплению обмотки в пазу. Обмотка должна плотно прилегать ко дну паза по всей длине пазовой части, обеспечивая постоянное давление на паз в радиальном направлении.

Плотная установка обмотки в пазу достигается за счет применения препрега, который прокладывают между нижним стержнем (катушкой) и дном паза, между верхним и нижним стержнем (катушкой) и между верхним стержнем (катушкой) и пазовым клином.

Для предотвращения смещения препрега под клин укладывают прокладку из стеклотекстолита. Для предотвращения прилипания прокладки препрега, укладываемые в пазы, покрывают фторопластовой пленкой. По окончании работ по укладке препрега выполняют его термообработку согласно режиму, описанному выше.

Применение формующего материала в пазу позволяет уложить обмотку на дно паза и к пазовому клину без зазоров. Такая укладка обеспечивает минимальную вибрацию, так как обмотка плотно без зазоров прилегает всей плоскостью ко дну паза.

Надежно закрепить обмотку в пазу можно также с помощью гофрированного или волнистого стеклотекстолита. Перспективна сис-



тема радиального крепления обмотки с применением подклиновых прокладок из волнистого стеклотекстолита.

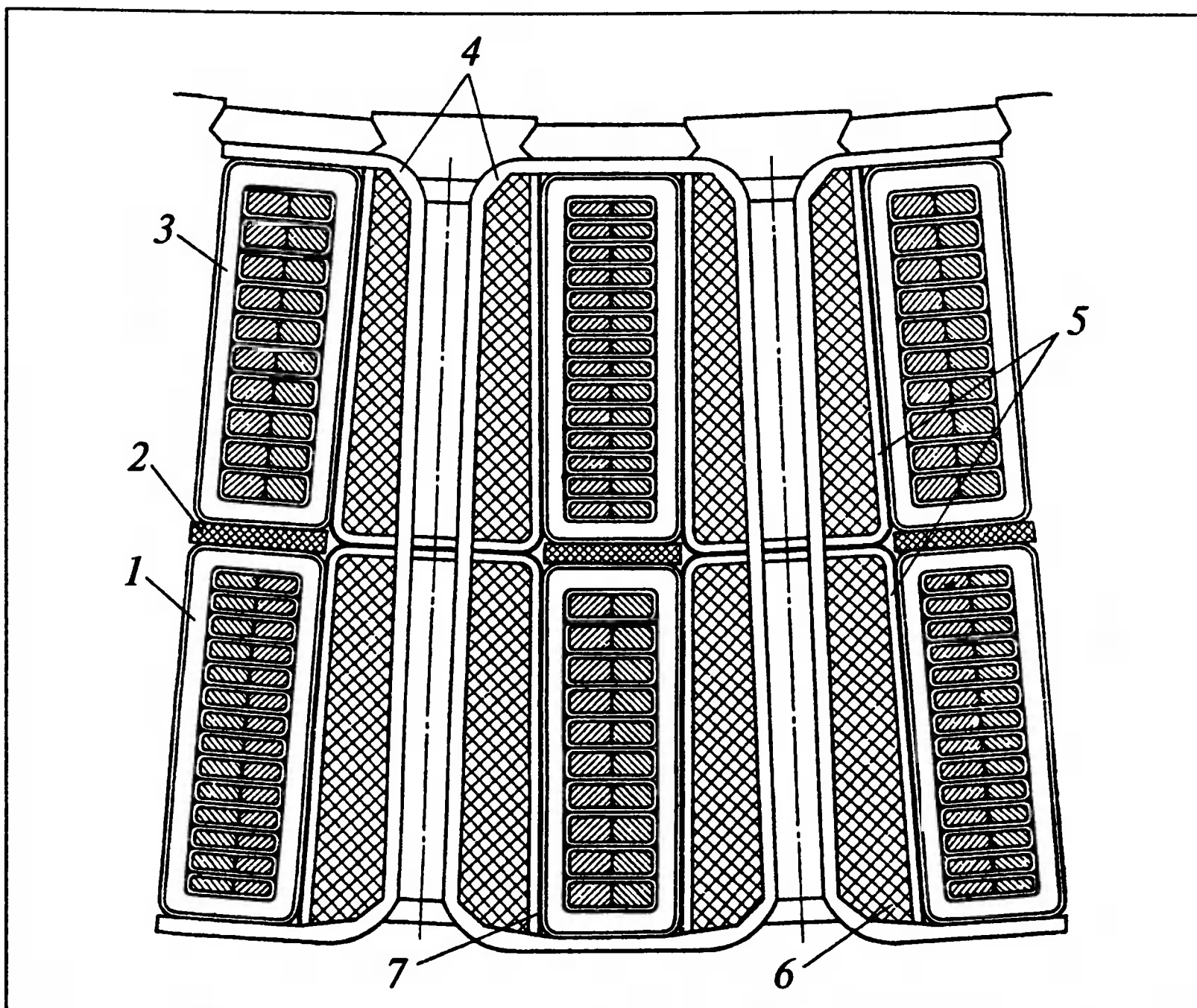
Система радиального уплотнения по сравнению с тангенциальной обеспечивает лучшее заполнение паза, повышенную ремонтпригодность и теплопередачу от обмотки к стали статора.

Исследования, проведенные на пазовой модели статора гидрогенератора типа СВ-1500/175-84, показали, что для электрических машин, в которых электродинамические усилия не превышают 1 кгс/см (10 Н/см), низкий уровень вибрации (менее 5 мкм) может быть достигнут при применении радиального уплотнения с установкой под клин волнистого стеклотекстолита толщиной 0,8 мм. Основываясь на этих исследованиях при заклиновке пазов статора в качестве подклиновых прокладок, некоторые ремонтные предприятия применяют волнистый стеклотекстолит в комбинации с плоским.

Прокладки изготавливают из листа волнистого стеклотекстолита поперек направления волны максимальной длины; они должны быть плоскими, что обеспечивает необходимую плотность заклиновки по длине клина. Заклиновку ведут одновременно с обеих сторон паза от середины сердечника статора в сторону торцов. Клинья, выступающие в расточку статора, дообрабатывают и повторно устанавливают в пазы. Прокладки, выступающие за пределы паза, обрезают заподлицо с концевыми клиньями. Плоскости прилегания концевых клиньев к прокладкам и скосам пазов промазывают клеем марки № 88-Н.

**Усовершенствование крепления обмотки статора электродвигателей типа ДВДД-215/39-12-16.** В целях усиления крепления обмотки и динамической устойчивости при пусках и переходных режимах при перемотке обмотки статора целесообразно установить дополнительные распорки на выходе из паза (рис. 4.14).

Наименее надежными частями обмотки статора электродвигателя являются пазовая часть катушки и лобовая часть в месте соприкосновения с бандажными кольцами. Поэтому при полной перемотке обмотки статора изоляцию этих мест можно усилить, если в пазовую часть перед укладкой катушки установить гильзы из гибкого листового электроизоляционного материала (Изофлекс 191, Имидофлекс 292 и др.) класса изоляции по нагревостойкости, соответствующего примененной изоляции. В этом случае увеличивается диэлектрический барьер изоляции, предотвращается попадание турбинного масла из опорного и направляющего подшипников на пазовую часть катушек и уменьшается зазор между катушкой и боковой стенкой паза, что значительно повышает виброустойчивость обмотки.



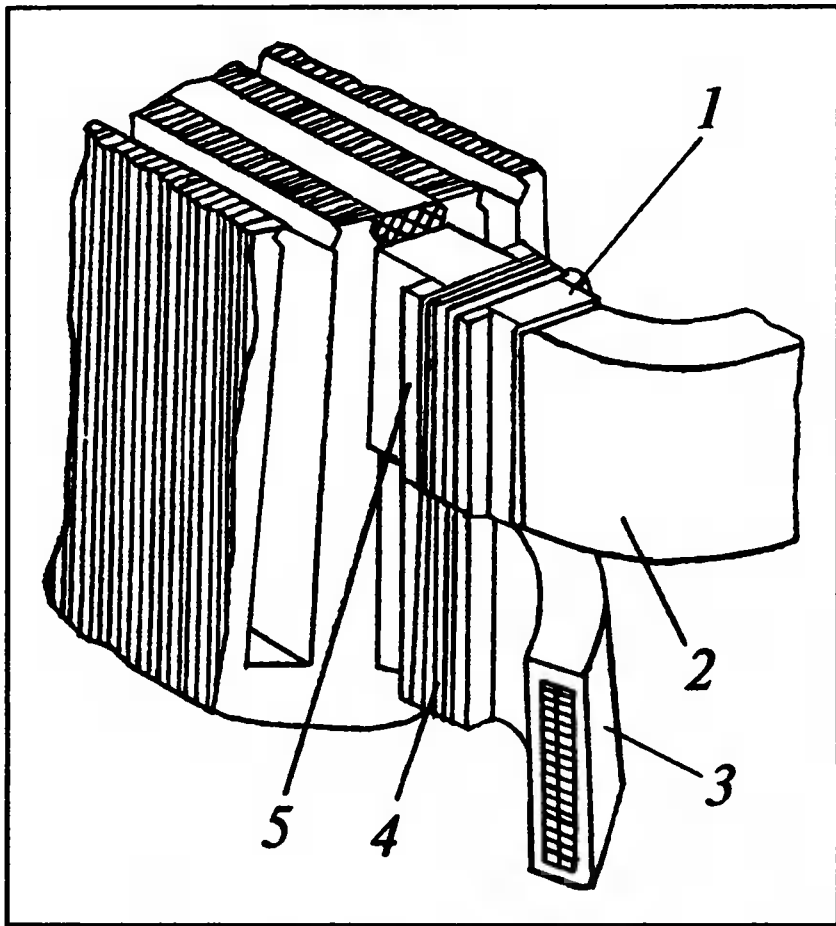
**Рис. 4.14. Установка дополнительных распорок на выходе из паза обмотки статора электродвигателя ДВДД 215/39-12-16:**

**1** — катушки обмотки статора 2р-16; **2** — стеклотекстолитовая прокладка; **3** — катушка обмотки статора 2р-12; **4** — шнуровой бандаж; **5** — препрег; **6** — распорка; **7** — лавсановая пленка

В целях увеличения электрической прочности на бандажные кольца необходимо наложить дополнительно три слоя изоляции. Крепление бандажных колец усиливают (см. выше).

**Предотвращение повреждения изоляции стержней обмотки статора электродвигателей с непосредственным водяным охлаждением обмотки ротора типа АВ-8000/6000УЗ.** Повреждение изоляции стержней обмотки статора на выходе из паза в результате течи в стержне ротора можно предупредить, установив на всех верхних стержнях после их замены защитные П-образные стеклотекстолитовые манжеты в местах выхода из паза (рис. 4.15). Толщина стенки манжеты 2 мм обеспечивает сохранность изоляции в случае образования течи в роторе.

Изоляционные манжеты изготавливают по следующей технологии. Подготавливают заготовки толщиной 0,1 мм из стеклоткани,



**Рис. 4.15. Установка П-образной манжеты на выходе из паза верхнего стержня обмотки статора электродвигателя АВ-8000/6000УЗ:**

1 — манжета; 2 — верхний стержень; 3 — нижний стержень; 4 — шнуровой бандаж; 5 — колодка

пропитанной лаком ЭР1-30, пропиточной бумаги, триацетатной пленки и кабельной бумаги. Количество заготовок из стеклоткани — 16 шт., из пропиточной бумаги — 3 шт., из триацетатной пленки — 2 шт., из кабельной бумаги — 4 шт. Пропиточную бумагу погружают в лак ЭР1-30, дают ему стечь и подсушивают до прекращения отлипа. Заготовки собирают в пакет. Через четыре слоя стеклоткани прокладывают слои пропиточной бумаги. С обеих сторон пакета прокладывают по одной прокладке из триацетатной пленки и по две прокладки из кабельной бумаги. В собранный пакет устанавливают пресс-планку, расправляют складки и устанавливают на пресс-форму. Длина манжеты дол-

жна быть равна длине пресс-формы. Затем проверяют правильность установки пресс-планки и набора заготовок в пресс-форме и с незначительным усилием затягивают струбцины. На пресс-форму подают напряжение или пар (в зависимости от конструкции применяемого подогревателя) и затягивают сначала струбцины, создающие вертикальное усилие, а затем — боковые.

При достижении температуры 90 — 100 °С болты затягивают окончательно, а затем температуру в пресс-форме поднимают до 160 °С. Для получения монолитности изоляции удельное давление должно быть равно 20 кгс/см<sup>2</sup> (2 МПа). Изоляцию запекают при температуре 160 °С в течение 4 ч.

После запечки пресс-форму охлаждают и вынимают манжету (гильзу). Изоляция должна быть монолитной, одноцветной, без вмятин, вздутий, расслоений и волнистости поверхности. Хорошо запрессованная изоляция при простукивании издает звонкий звук.

Гильзу разрезают на 96 манжет длиной 65 мм каждая. Плоскости прилегания дистанционных распорок на выходе из паза к боковым

поверхностям стержней обмотки статора профрезеруют на величину, равную толщине изготовленных манжет.

Если эта работа выполняется в период капитального ремонта электродвигателя, то вязку манжет и колодок на выходе из паза выполняют без демонтажа верхних стержней, пропуская лавсановый шнур в зазор между верхним и нижним стержнями, образовавшийся за счет установки межслойной прокладки в пазу статора и равный ее толщине. Если эта работа выполняется в период перемотки обмотки статора, то для облегчения целесообразно устанавливать манжету и распорки, а также бандажировать их до укладки верхних стержней. В аксиальном направлении с помощью шаблона необходимо отметить на стержне мелом границы активной стали.

Шнуровой бандаж должен быть выполнен лавсановым шнуром диаметром 3 мм, пропитанным эпоксидным составом. Количество витков бандажа определяется шириной распорки с учетом укладки нитей бандажа впритык без нахлеста.

**Применение магнитных клиньев пазов статора.** При использовании магнитных клиньев в электродвигателях улучшается кривая магнитного поля в воздушном зазоре между ротором и статором, где находятся пазы. Кроме того, уменьшаются магнитное сопротивление воздушного зазора и потери, снижается температура обмотки и активной стали статора, повышается КПД и улучшаются виброакустические характеристики. Однако в зависимости от магнитной проницаемости материала пазового клина уменьшается пусковой ток и, соответственно, пусковой момент электродвигателя. Для сохранения необходимого пускового момента и улучшения остальных энергетических характеристик оптимальная магнитная проницаемость должна быть от 4 до 10. Эффект использования магнитных клиньев заключается в уменьшении ширины закрытия паза, а также в одновременном снижении пульсации поля в зазоре, вызванных зубчатым строением магнитопровода.

Эти клинья должны не только обладать магнитными свойствами, но и при установке в паз не замыкать пакет активной стали во избежание предотвращения местных перегревов.

Некоторые конструкции магнитных клиньев показаны на рис. 4.16, *а — и*. Стекломагнитодиэлектрик СМД-1 (рис. 4.16, *а*) получают прессованием магнитодиэлектрической массы, состоящей из эпоксидной смолы, отвердителя и наполнителя — железного порошка ПЖ2М2. Для улучшения механических свойств выполнена армировка четырьмя слоями стеклоткани. Магнитную проницаемость листового стекломагнитодиэлектрика при изготовлении мож-

но регулировать, изменяя массовое отношение железного порошка и остальных компонентов.

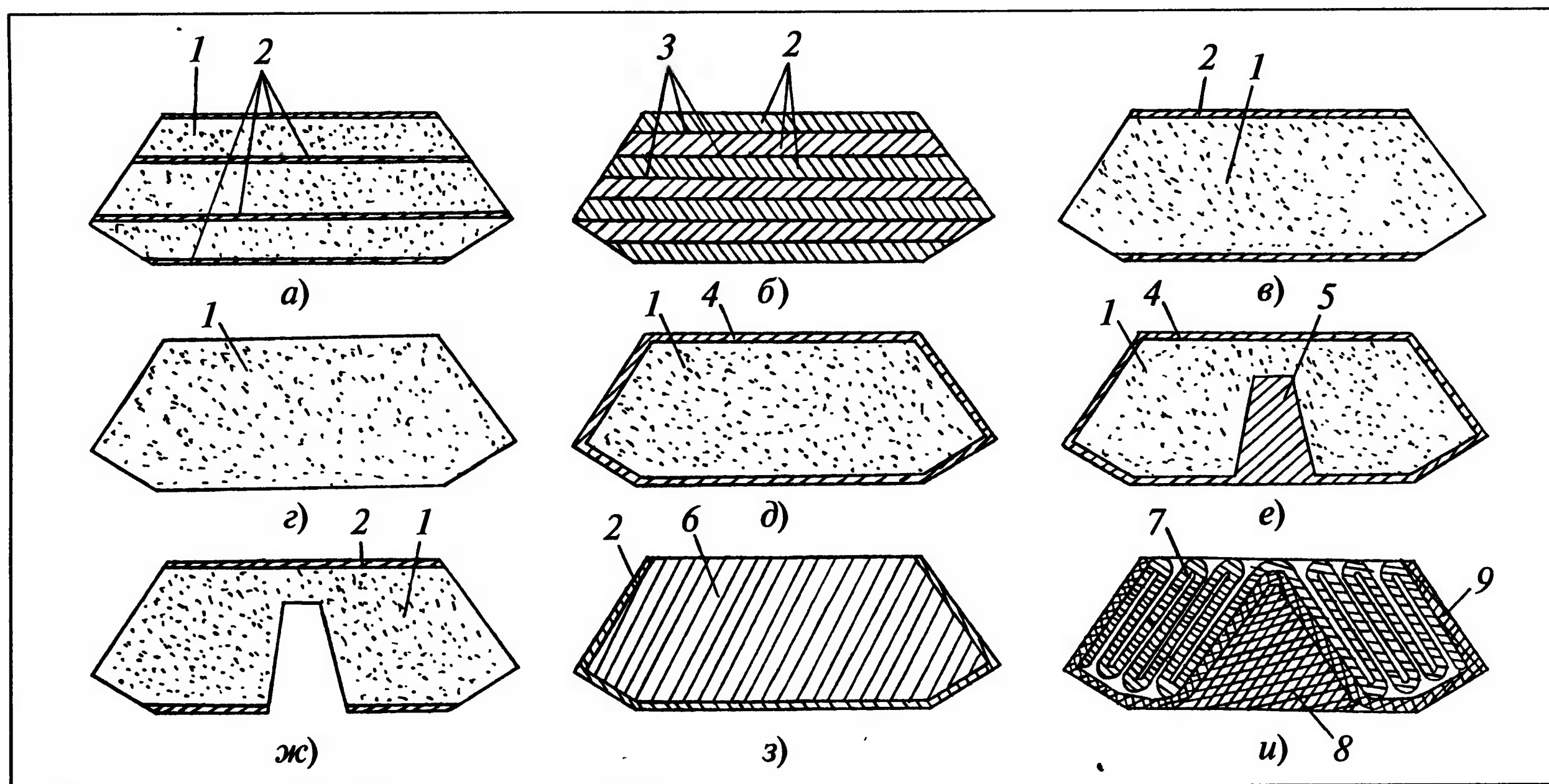
Клинья СМД-1, СТК-ЭП/МС, МД-Т и армапласт (рис. 4.16, б, в, г) получают механической обработкой из листовых материалов. Клинья СПП-ЭМ (рис. 4.16, д, е) представляют собой профильный магнитодиэлектрический стеклопластик, получаемый методом протяжки через нагретую фильеру предварительно пропитанного стеклоровинга и магнитодиэлектрической смеси железного порошка и терморезактивного связующего. Этот стеклопластик не требует дополнительной механической обработки. В качестве связующего используют эпоксидную диановую смолу и метатетрагидрофталевый ангидрид. Поскольку при использовании магнитных клиньев несколько уменьшается пусковой момент, целесообразно предусмотреть в конструкции немагнитную сепарационную вставку, ограничивающую пазовое рассеяние. Наличие вставки дополнительно повышает механическую прочность клиньев.

Применение магнитных клиньев, проводимое при участии автора, в электродвигателях ДАЗО-13-55-4 мощностью 550 кВт, СДСЗ-2000-100 мощностью 2000 кВт, ВА-12-41-4 мощностью 500 кВт и АР-500 мощностью 500 кВт привода механизмов энергоблоков ТЭС повысило КПД в 1,4 раза, коэффициент мощности на 0,02, снизило средние температуры обмотки статора на 3,2 – 7,4 °С, а его активной стали на 6,4 °С. Срок службы изоляции обмоток статоров электродвигателей увеличился в 1,5 раза.

**Повышение надежности роторов с непосредственным водяным охлаждением.** В условиях длительной эксплуатации надежность устройств подвода охлаждающего дистиллята определяется стабильностью физико-механических свойств применяемой резины. Вследствие высоких термомеханических нагрузок ресурсные характеристики применяемой для уплотнения резины (упругость в сочетании с малой усадкой, устойчивость к тепловым воздействиям и механическим деформациям статического и динамического характера) не обеспечивают высокой надежности эксплуатации электродвигателей.

Нарушение герметичности системы непосредственного водяного охлаждения (СНВО) ротора в районе радиальных водоподводов приводит к аварийным или неплановым остановам электродвигателя с большими объемами повреждений обмотки статора из-за увлажнения и, как следствие, связанных с этим коротких замыканий в лобовых частях и головках.

Учитывая необходимость повышения надежности и увеличения межремонтного периода для замены уплотняющих колец, целесооб-



**Рис. 4.16. Магнитные клинья:**

*а* — стекломанитодиэлектрик СМД-1; *б* — стеклотекстолит СТК-ЭП/МС; *в* — МД-Т; *г* — армапласт; *д* — СПП-ЭМ; *е* — СПП-ЭМ с немагнитной вставкой; *ж* — МД-Т с немагнитной вставкой (полученный механической обработкой); *з* — из ферромагнитных пластин; *и* — из гофрированной пластины; *1* — магнитодиэлектрическая смесь железного порошка и полимерного связующего; *2* — стеклоткань; *3* — металлическая тканевая сетка; *4* — однонаправленный стекловолокно; *5* — немагнитная вставка (однонаправленный стекловолокно); *6* — пакет ферромагнитных пластин; *7* — гофрированная пластина; *8* — немагнитная оболочка; *9* — немагнитный сердечник



разно выполнять реконструкцию радиальных водоподводов на электродвигателях типа АВ-8000/6000У3 путем установки тарельчатых пружин (рис. 4.17) и металлических шайб независимо от их усадки, что обеспечит постоянное давление на резиновые уплотняющие кольца. Тарельчатые пружины при относительно малых габаритах позволяют создать постоянно действующее значительное осевое усилие.

При проработке проекта реконструкции были рассмотрены четыре варианта тарельчатых пружин по ГОСТ 3057 двух типов: 11-1-2-40 × 20 × 2 × 1 и 11-1-2-40-25 × 2,5 × 0,8, изготовленных из рессорно-пружинной стали марки 60С2А (пружины класса 11, типа 1, второй группы точности, с наружным диаметром пружины 40 мм, внутренним диаметром 20 и 25 мм, при толщине металла 2 и 2,5 мм и высоте внутреннего конуса 1 и 0,8 мм соответственно).

При окончательном выборе наилучшего варианта учитывалась необходимость получения максимально возможного значения осевого перемещения пружин при сжатии для компенсации усадки резины с одновременным большим осевым усилием.

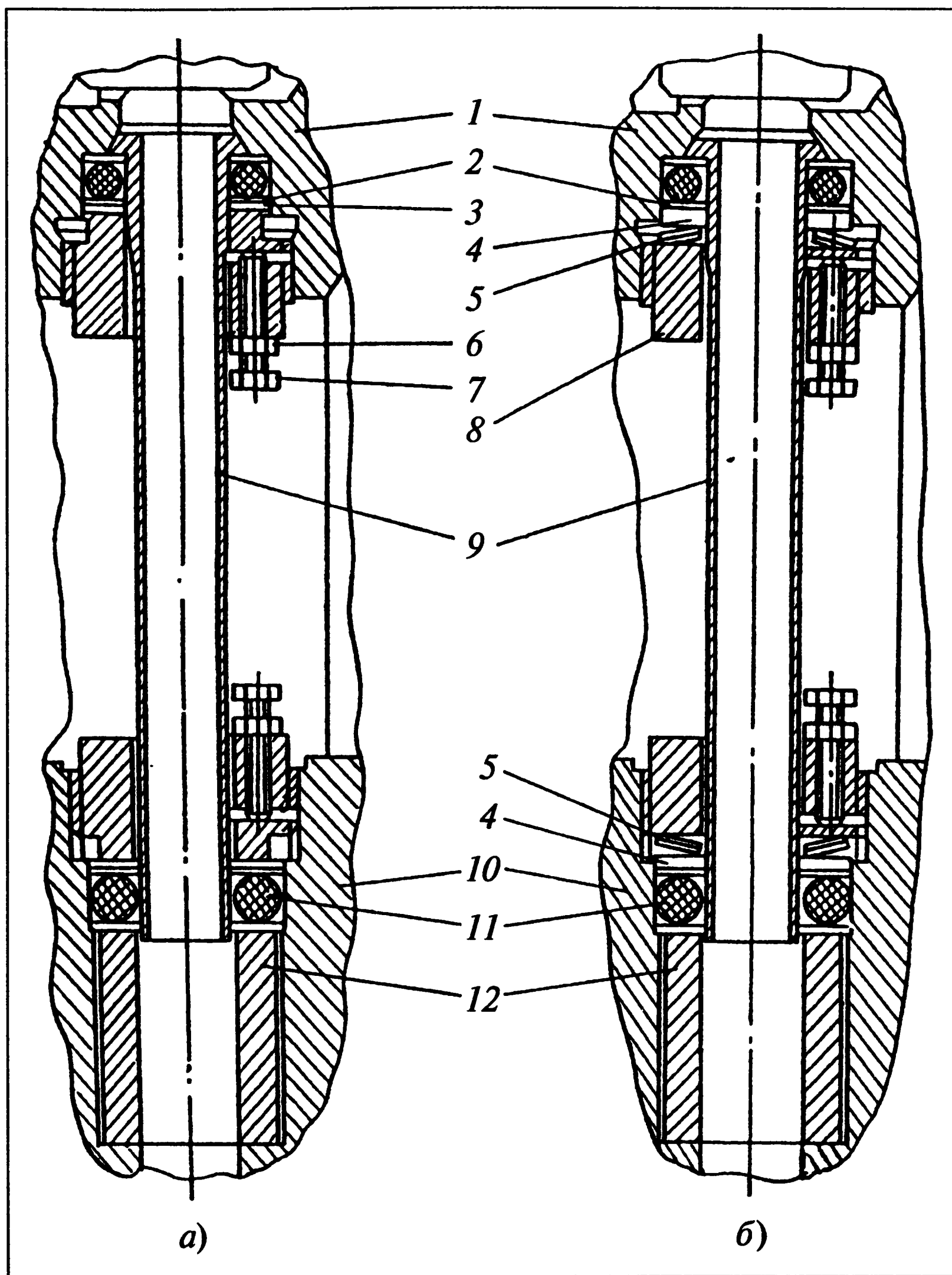
На рис. 4.18 показаны результаты испытаний четырех вариантов пружин. Усредненные значения сжатия пружин в зависимости от приложенного осевого усилия получены путем измерения при сжатии и растяжении пружин. Наилучшие результаты дает вариант II.

До установки в ротор каждая пружина подвергалась заневоливанию (статическому испытанию в сжатом состоянии до полного соприкосновения поверхностей в течение 12 ч). После снятия нагрузки пружины не имели трещин, надрывов и следов остаточной деформации. Пружины должны иметь антикоррозионное покрытие.

Реконструкцию выполняют в период капитального ремонта электродвигателя с выводом ротора в следующей технологической последовательности.

Отвернув контргайки и вывернув гайки, демонтируют латунные и фторопластовые шайбы и уплотняющие кольца. Демонтируют вкладыши из гнезд вала ротора и трубки.

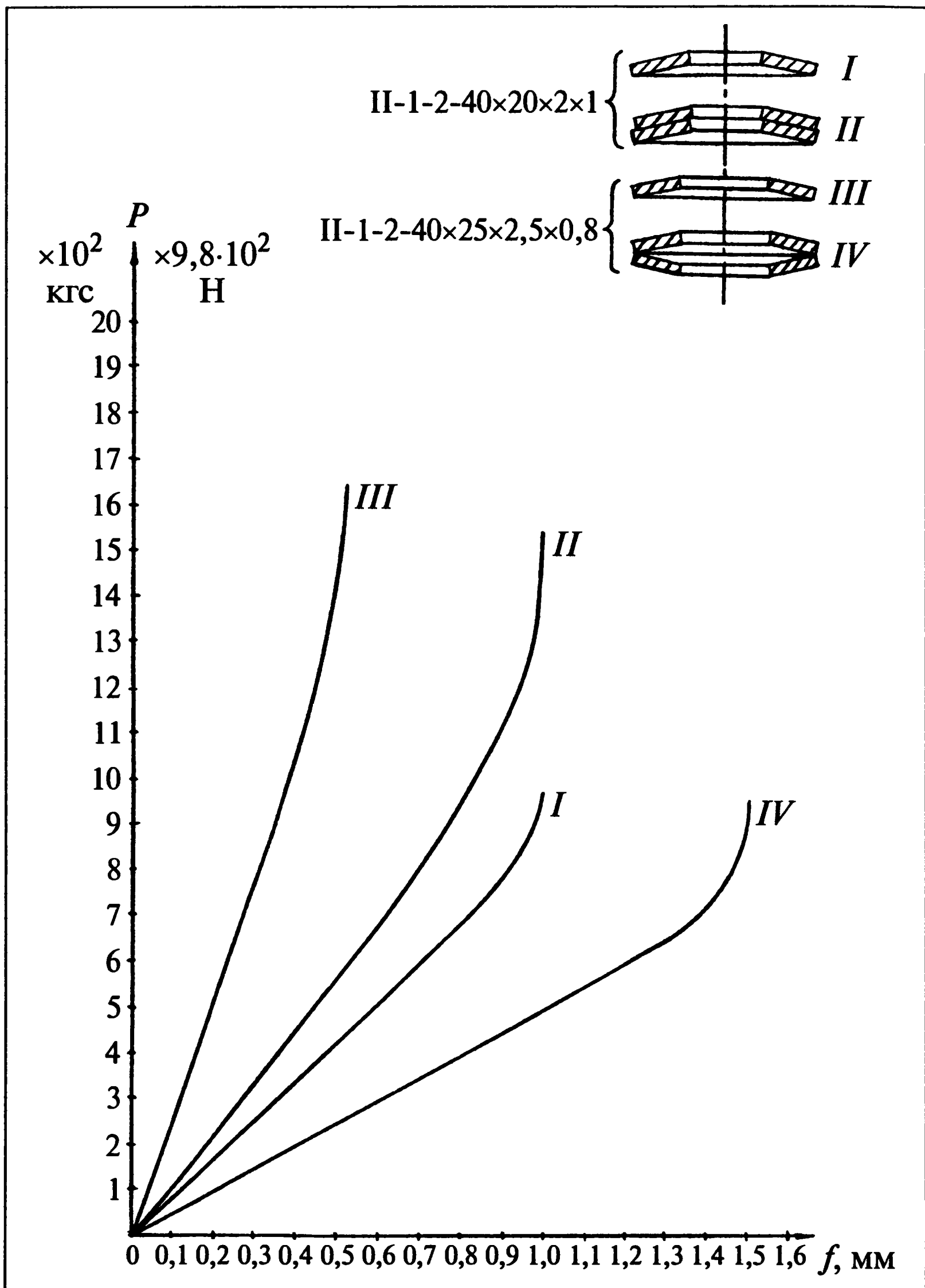
Все детали при разборке маркируют по месту. Уплотняющие кольца заменяют новыми, выполняют ревизию деталей радиальных водоподводов и устраняют обнаруженные дефекты. Изготавливают шайбы из немагнитной нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. В процессе реконструкции выполняют механическую доработку деталей узла радиальных водоподводов [9]. Устанавливают на трубки набор пружин, шайбы и уплотняющие кольца со стороны короткозамыкающего кольца и вала ротора. Заводят трубки в гнезда вала ротора и устанавливают вкладыши. Затягивают гайки (момент затяжки равен



**Рис. 4.17. Радиальный узел водоподвода ротора электродвигателя типа АВ-8000/6000У3:**

*а* — существующая конструкция; *б* — реконструированный по предложению автора; 1 — короткозамыкающее кольцо; 2 — фторопластовые шайбы; 3 — латунные шайбы; 4 — шайбы из немагнитной нержавеющей стали 1Х18Н9Т; 5 — тарельчатые пружины 11-1-2-40 × 20 × 2 × 1; 6 — гайка М6; 7 — болт М6; 8 — гайка М48 × 2; 9 — трубка; 10 — вал; 11 — уплотняющее кольцо; 12 — вкладыш





**Рис. 4.18. Экспериментальные зависимости осевой деформации от приложенной силы  $P$  для четырех вариантов установки тарельчатых пружин ( $I - IV$ ):**

$I$  — установка одной пружины типа II-1-2-40 × 20 × 2 × 1;  $II$  — установка двух пружин того же типа;  $III$  — установка одной пружины типа II-1-2-40 × 25 × 2,5 × 0,8;  $IV$  — установка двух пружин того же типа

200 — 230 Н · м). Для тарированной затяжки гаек целесообразно использовать динамометрический ключ типа ДК-25. Стопорят гайки болтами в целях предотвращения их самоотвинчивания. Затем болты стопорят контргайками.

Для контроля гидравлической плотности и прочности ротор опрессовывают давлением воды 70 кгс/см<sup>2</sup> (7 МПа) в течение 30 мин.

Установка тарельчатых пружин предотвращает образование течей из-за усадки резиновых колец и тем самым повышает надежность работы электродвигателя, снижает затраты труда при плановых ремонтах за счет увеличения межремонтного периода.

## Список литературы

1. **Новые** электроизоляционные материалы для систем изоляции вращающихся электрических машин / А. В. Папков, А. П. Мельниченко, В. М. Пак, И. Е. Куимов // Электротехника. 2007. № 3. С. 45 – 51.
2. **Новые** электроизоляционные материалы для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и тяговых двигателей / А. В. Папков, А. П. Мельниченко, В. М. Пак, И. Е. Куимов // Электротехника. 2005. № 3. С. 34 – 41.
3. **Совершенствование** электрической изоляции электрических машин высокого напряжения / А. Ш. Азизов, А. М. Андреев, А. М. Костельов, Ю. А. Полонский // Электротехника. 2007. № 3. С. 4 – 7.
4. **Силина Е. П.** Бандажные кольца роторов турбогенераторов. СПб.: Электосила, 2003.
5. **Типовая** инструкция по эксплуатации и ремонту узла контактных колец и щеточного аппарата турбогенераторов мощностью 63 МВт и выше. РД 153-34.0-45.510-98. М.: ОРГРЭС, 2000.
6. **Приборы** контроля за работой щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов / Ю. А. Родионов, А. М. Марков, С. В. Дуплинский и др. // Электрические станции. 2002. № 7. С. 35 – 38.
7. **Турченко В. И., Федоров И. В.** Модернизация щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ТЭЦ-21 Мосэнерго // Энергетик. 2007. № 4. С. 9 – 10.
8. **Козырев Н. А.** Изоляция электрических машин и методы ее испытания. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
9. **А.с. 799081 СССР.** Устройство для подвода и отвода охлаждающей жидкости / Е. К. Иноземцев // Открытия. Изобретения. 1981. № 3.

# Содержание

## Часть 1

Предисловие . . . . .	3
<b>ГЛАВА ПЕРВАЯ. Конструкция роторов электродвигателей . . . . .</b>	<b>4</b>
1.1. Конструкция вала, полумуфты и вентиляторов . . . . .	4
1.2. Конструкция сердечника и обмотки ротора . . . . .	9
1.3. Конструкция бандажных узлов . . . . .	21
1.4. Конструкция узла контактных колец и щеточного аппарата . . . . .	24
<b>ГЛАВА ВТОРАЯ. Ремонт и перемотка обмотки ротора . . . . .</b>	<b>28</b>
2.1. Снятие и установка полумуфты и вентиляторов . . . . .	28
2.2. Ремонт короткозамкнутой обмотки ротора . . . . .	33
2.3. Перемычка обмотки ротора явнополусных синхронных электродвигателей . . . . .	42
2.4. Перемотка обмотки ротора неявнополусных синхронных электродвигателей . . . . .	46
2.5. Ремонт, замена и изготовление изоляционных деталей обмотки ротора . . . . .	57
2.6. Ремонт бандажных узлов роторов . . . . .	60
2.7. Балансировка роторов . . . . .	70
2.8. Испытания и измерения при ремонте обмоток роторов . . . . .	76
Список литературы . . . . .	78

## Часть 2

Предисловие. . . . .	83
<b>ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Ремонт щеточно-контактного узла . . . . .</b>	<b>84</b>
3.1. Ремонт узла контактных колец . . . . .	84
3.2. Замена контактных колец . . . . .	87
3.3. Замена изоляции втулки контактных колец и токоподводов . . . . .	88
3.4. Восстановление покрытий контактных поверхностей . . . . .	93
3.5. Ремонт и сборка щеточного аппарата . . . . .	95
3.6. Наладка щеточного аппарата . . . . .	97
<b>ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Надежность обмоток статоров,     роторов и ее повышение . . . . .</b>	<b>99</b>
4.1. Повреждение обмотки статора и ротора и причины их возникновения . . . . .	99
4.2. Надежность корпусной и витковой изоляции обмоток статоров . . . . .	104
4.3. Надежность короткозамкнутых обмоток роторов, обмоток роторов с непосредственным водяным охлаждением . . . . .	114
4.4. Прогнозирование срока службы изоляции обмоток статоров и планирование их перемоток . . . . .	129
4.5. Планирование срока замены изоляции обмоток роторов синхронных электродвигателей . . . . .	144
4.6. Повышение надежности обмоток статоров и обмоток роторов . . . . .	147
Список литературы . . . . .	162

## **Библиотечка электротехника**

*Приложение к производственно-массовому журналу “Энергетик”*

## **ИНОЗЕМЦЕВ ЕВГЕНИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ**

**Восстановление работоспособности узлов высоковольтных  
электродвигателей (часть 2)**

### **АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (495) 675-19-06, тел./факс: 234-74-21

---

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

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

**Корректор Е. П. Севостьянова**

---

**Сдано в набор 12.01.09. Подписано в печать 20.02.09.**

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

**Печ. л. 5,25. Заказ БЭТ/02(122)-2009**

**Макет выполнен издательством “Фолиум”: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.**

**Отпечатано типографией издательства “Фолиум”: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.**