

1. Генераторы переменного тока промышленной частоты

1.2.2. Изоляция обмоток **генераторов переменного тока** **промышленной частоты**

Кулаковский В. Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. — М.: Энергоиздат, 1981. — 256 с.

Основные воздействия на изоляцию

Во время эксплуатации изоляция электрических машин подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит старение изоляции, т. е. необратимое ухудшение ее свойств. Для изоляции генераторов при этом характерным является образование местных дефектов.⁴

Согласно "Руководству по оценке и идентификации систем изоляции электрического оборудования" Международной электротехнической комиссии (МЭК, публикация №505, 1975 г.)

должны учитываться следующие воздействия на изоляцию:

- тепловые;
- электрические;
- окружающей среды;
- механические.

Во время работы все перечисленные воздействия изоляция испытывает одновременно.

Тепловые воздействия вызывают постепенное химическое изменение состава органических веществ. **Неорганические компоненты изоляции** — слюда, слюдинит, стеклоткань — при рабочих температурах генератора практически не претерпевают каких-либо химических изменений, т. е. не старятся.

Активные материалы, т. е. медь обмотки и сталь статора, работают во вращающихся машинах при больших удельных нагрузках (плотностях токов, индукциях). Соответственно потери в единице объема этих материалов получаются высокими, что ведет к большому превышению температур рабочих частей над температурой внешней среды.

Используются два способа отвода тепла:

поверхностное охлаждение обмоток (тепло от меди отводится через изоляцию) и **внутреннее** (непосредственное) охлаждение обмоток (принудительная циркуляция газа или жидкости по встроенным в обмотку полым проводникам). Поэтому во вращающихся машинах высокого напряжения используется изоляция, относящаяся по нагревостойкости к классам **B (130°C)**, **F (155°C)** и **H (180°)**.

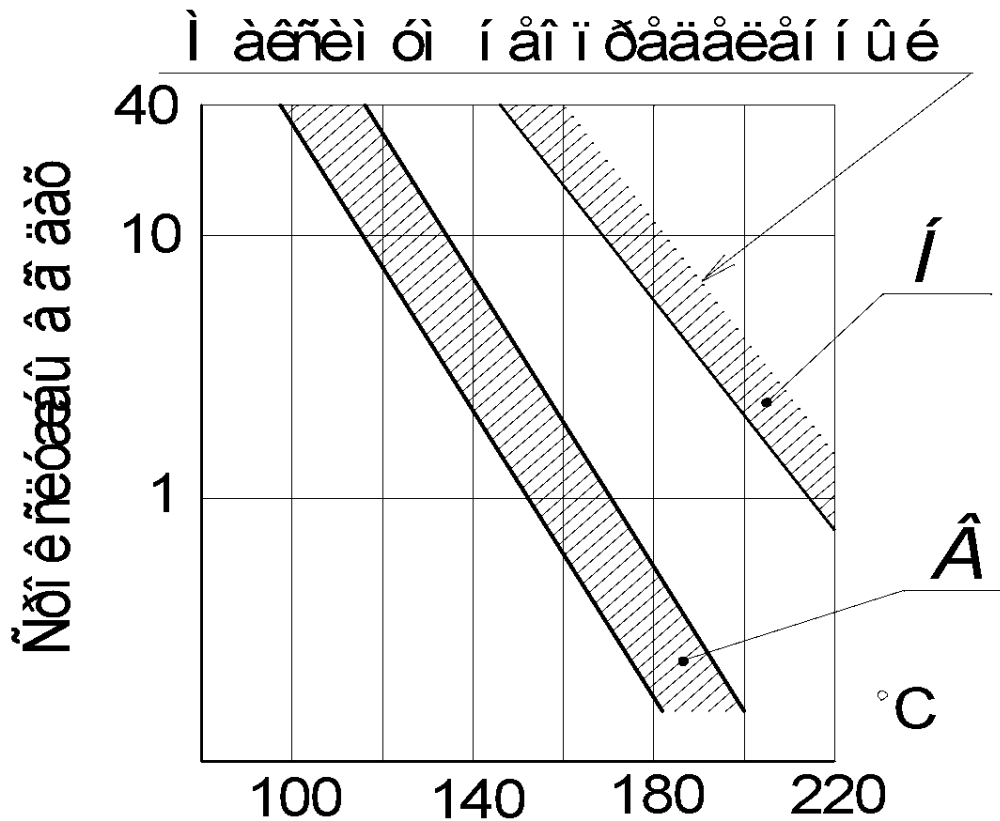
Материалы класса В — это композиции материалов органического и неорганического происхождения. Сюда входят неорганические материалы типа слюда, асбест, стекло, которые пропитываются или склеиваются органическими лаками.

Материалы класса F — включают материалы класса B, пропитанные и склеенные **органическими лаками повышенной нагревостойкости** (глифталевые лаки).

К классу Н относятся чисто неорганические материалы с применением в качестве склеивающих и пропитывающих составов **кремний органических смол** и лаков, а также кремнийорганические резины.

Единственным органическим диэлектриком, который может быть использован в классе нагревостойкости Н является **фторопласт-4**.

Обобщение большого количества опытного материала позволило установить зависимость между сроком службы изоляции и температурой.



Вероятность срока службы вне заштрихованной области может составлять 5%.

Зависимость срока службы изоляции от ее температур¹².

Электрическое воздействие

имеет, как правило, ионизационный характер, т. е. обусловлено **постепенным разрушением изоляции частичными разрядами.**

Основными факторами действия на изоляцию генераторов окружающей среды являются:

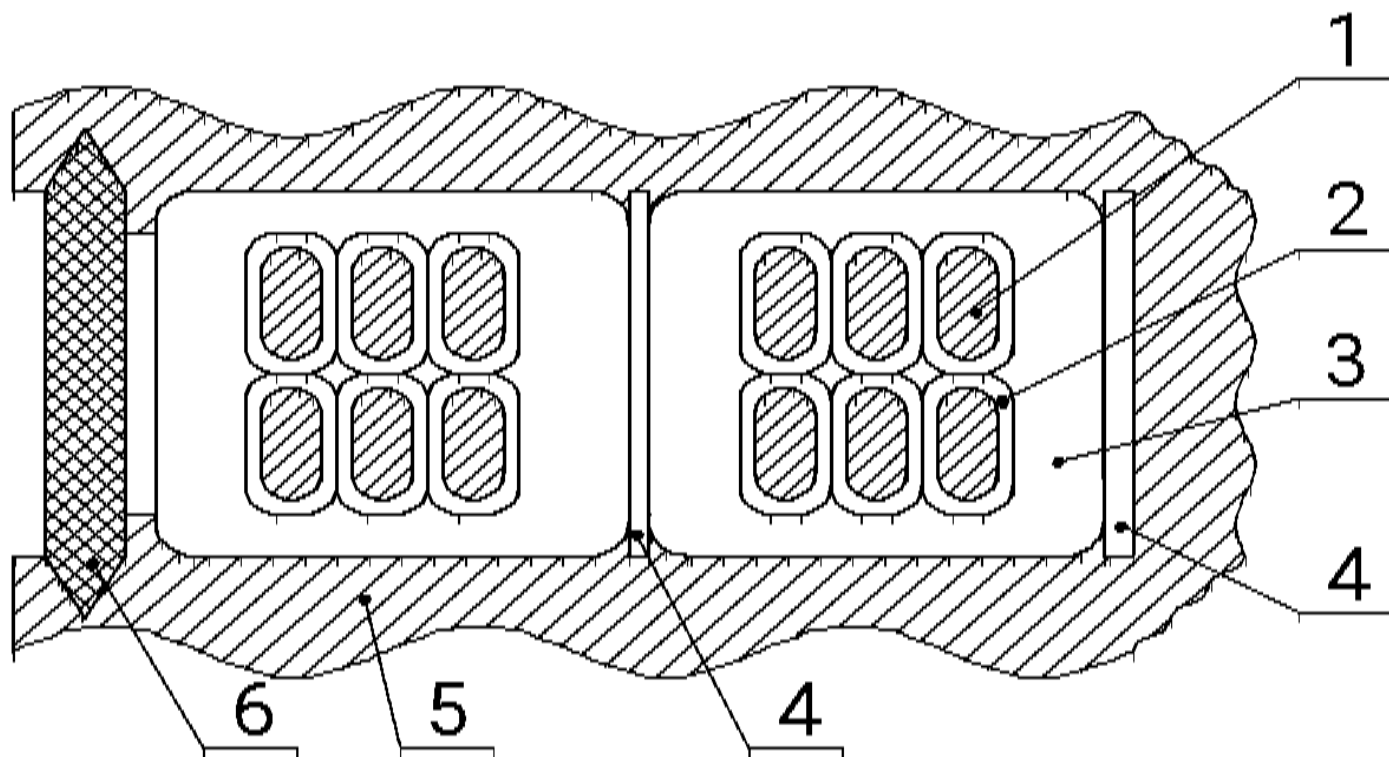
- действие окружающего изоляцию газа (водорода или воздуха); действие влаги;
- действие масла;
- абразивное действие пыли.

Механическим воздействиям

изоляция подвергается как во время изготовления и ремонта генератора, так и в процессе его эксплуатации

Конструкция главной изоляции

В современных генераторах применяется **непрерывная** изоляция, которая как в пазовой, так и в лобовой части выполняется из одного и того же материала (чаще всего из микалентной компаундированной изоляции, в которой микалента наматывается на стержень слоями вполнахлеста).



1— проводник медный, 2 — изоляция между элементарными проводниками, 3 — изоляция относительно корпуса (главная), 4 — изоляция между слоями, 5 — сталь статора, 6 — клин.

Конструкция изоляции с водяным охлаждением похожа на изоляцию с воздушным охлаждением, но в определенных витках есть каналы (отверстия), по которым прокачивается вода для охлаждения.

Гильзовая изоляция выполняется в виде жестких или мягких труб (гильз), в которых находятся пазовые участки стержней или катушек. При этом лобовые участки изолируются гибкими лентами.

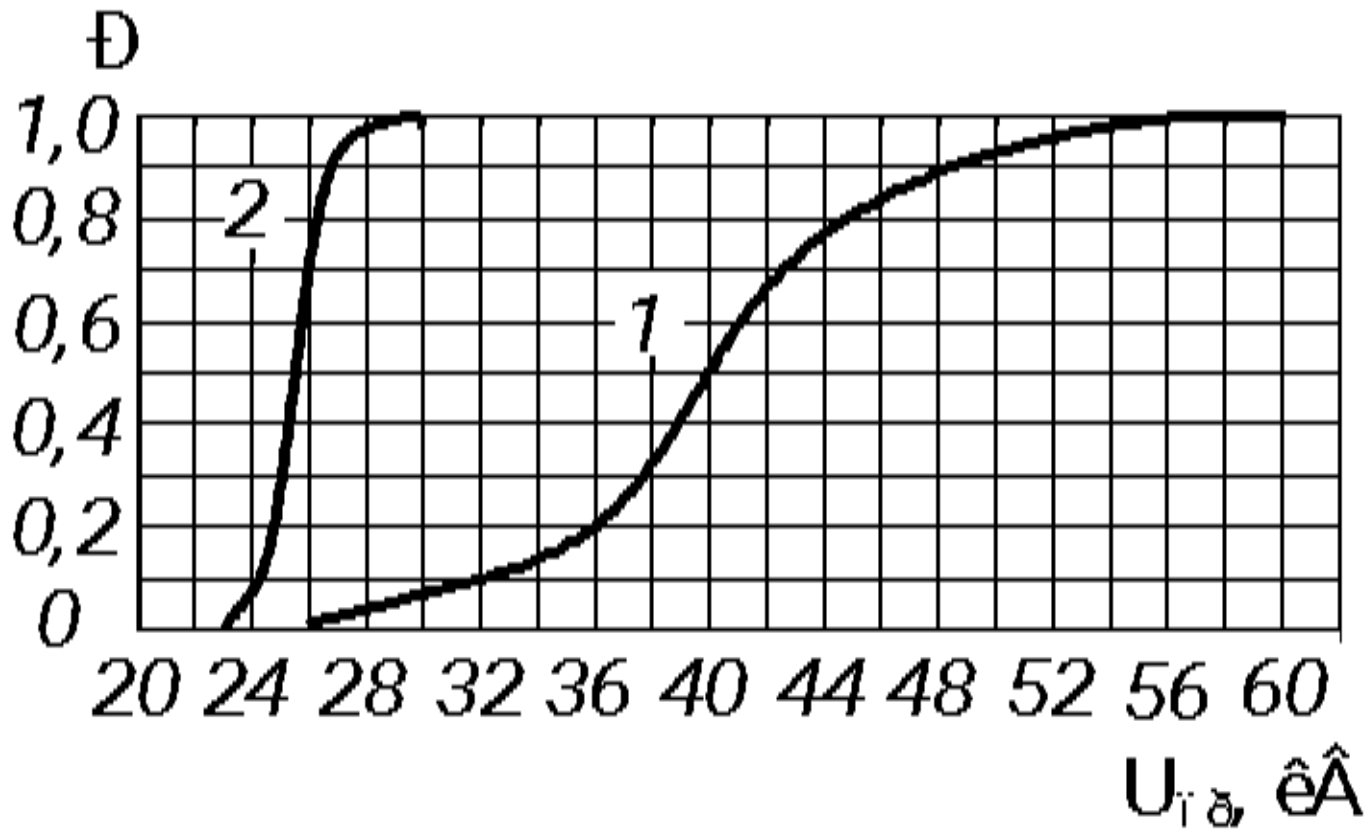
Нанесение изоляции на лобовые участки и уголки, является трудоемким процессом, т. к. она трудно поддается формовке и прессовке, что приводит к появлению повышенного числа газовых включений, расслоений и других дефектов, снижающих ее электрическую прочность. В эксплуатации постепенно происходит разбухание и расслоение изоляции лобовых частей, миграция компаундов.





Электрическая прочность главной изоляции

Функция распределения пробивных напряжений корпусной изоляции стержней машин при 50 Гц удовлетворительно описывается нормальным законом. Этому же закону подчиняются распределения и при других формах напряжения, и только для сильно изношенной (расслоившейся) изоляции при импульсных напряжениях наблюдается существенное²¹ отклонение от этого закона.



Функция распределения пробивных напряжений новой корпусной изоляции 6,6 кВ стержней (кривая 1) и целых машин (кривая 2).

Кривая 1 получена по испытаниям 279 стержней (изоляция 4-х машин), а кривая 2 — путем пересчета по формуле

$$P_S(U) = 1 - [1 - P_1(U)]^S$$

$P_1(U)$ — вероятность пробоа изоляции отдельного стержня;

$P_S(U)$ — вероятность пробоа корпусной изоляции машины;

S — число стержней в машине.

Сравнительные данные новой и бывшей в эксплуатации mica-лентной изоляции (слой пластинок слюды, склеенных лаком и нанесенных на хлопчатобумажную подложку) при разных формах напряжения показывают, что на переменном напряжении промышленной частоты после эксплуатации в течение 26 тыс. часов (примерно 3 года) пробивное напряжение снижается с 44 кВ до 32 кВ (72%), на постоянном напряжении с 87 кВ до 51 кВ (59%), а на импульсном — с 150 кВ до 105 кВ (70%), т. е. электрическая прочность уменьшилась примерно на 30% от первоначальной.

Пробивное напряжение изоляции машины существенно зависит от места пролегания изоляции (паз, угол или лобовая).

Например, для новой микалентной изоляции на переменном напряжении промышленной частоты отношение пробивного напряжения к номинальному напряжению

$$\frac{U_{пр}}{U_{ном}} = 8,5 \quad \text{— для паза}$$

$$\frac{U_{пр}}{U_{ном}} = 3,2 \quad \text{— для уголка}$$

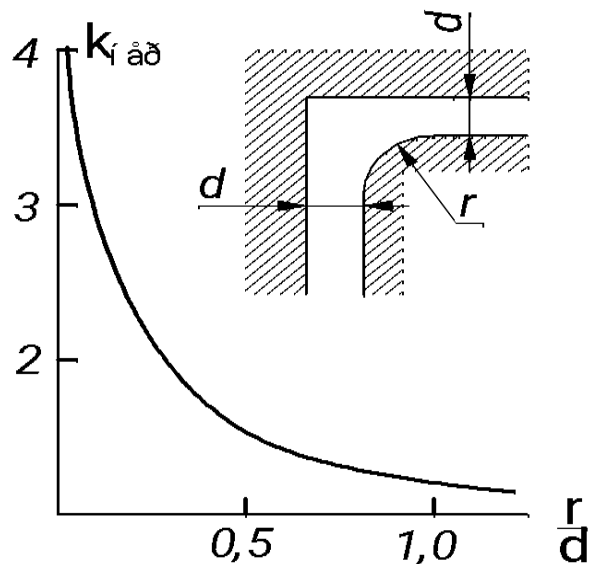
$$\frac{U_{пр}}{U_{ном}} = 4,8 \quad \text{— для лобовой части}$$

В лобовых частях главной изоляции старение происходит неравномерно: наиболее интенсивно в местах выхода катушек (стержней) из паза статора на расстоянии примерно 50 мм от пакетов стали статора вследствие более интенсивной вибрации и больших напряженностей электрического поля.

Старение пазовых участков также происходит неравномерно: электрическому старению более интенсивно подвергается изоляция ближайших к выводам катушек, тепловому старению — центральные участки пазовой изоляции.

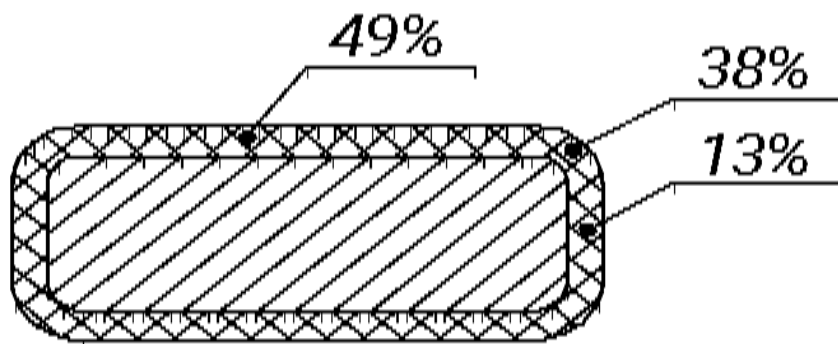
В современных крупных генераторах применяется не компаундированная, а терморреактивная изоляция (слюдотерм, монолит), которая при нагреве не размягчается, поэтому имеет лучшие характеристики, чем компаундированная. В качестве пропитки в терморреактивной изоляции используют эпоксидные и полиэфирные смолы. В связи с тем, что терморреактивная изоляция стала применяться сравнительно недавно, нет данных по ее прочности в процессе длительной эксплуатации.

Токоведущая часть стержней выполняется из шин прямоугольного сечения, вследствие чего главная изоляция в пазах имеет **резко неоднородное** поле. Для уменьшения максимальной напряженности поля углы меди выполняются с определенными радиусами закругления или внутри изоляции применяются прокладки из фольги.



Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля в пазу статора от отношения радиуса закругления меди к толщине изоляции.

Анализ пробоев по периметру сечения стержней для новой микалентной изоляции показывает, что пробой на углах составляет 38%, пробой на узких гранях — 13%, пробой на широких гранях — 49%.



Относительно малый процент пробоя на углах свидетельствует о том, что принятые в современных изоляционных конструкциях радиусы закруглений близки к оптимальным.

При конструировании изоляции машин большое внимание уделяется ослаблению влияния

частичных и скользящих разрядов.

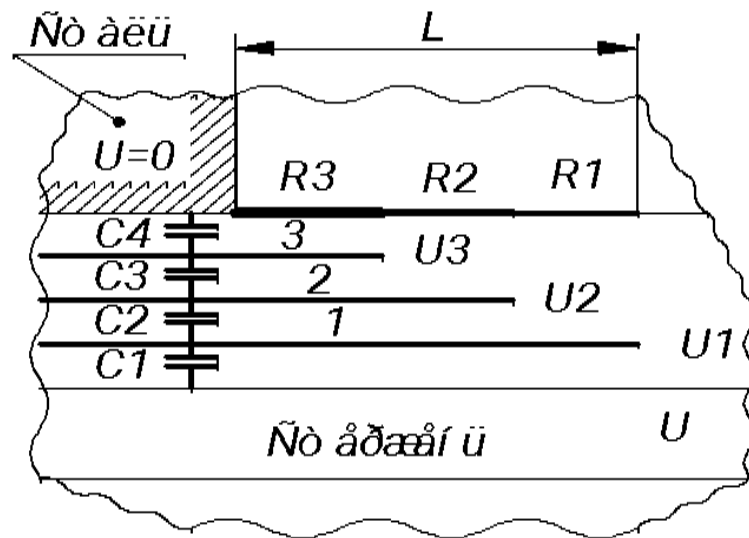
Основные приемы, которые здесь используются, это **полупроводящие покрытия и регулирование электрического поля.**

В пазовых частях изоляция покрывается **проводящими и полупроводящими покрытиями**, шунтирующими газовые включения и воздушные зазоры между изоляцией и стенками пазов, что ослабляет ³¹частичные разряды и корону в этих включениях.

В лобовой части обмоток применяются два способа выравнивания электрического поля на выходе обмотки из пазов:

1 - емкостное регулирование (встраивание проводящих и полупроводящих экранов — конденсаторных обкладок) и

2 - покрытие изоляции полупроводящими лаками.



Недостатками первого способа является технологическая сложность изготовления. Кроме того, при наличии дефектов и ослаблений в слоях изоляции между экранами происходит шунтирование бездефектных участков.

Недостатком второго способа является нестабильность покровных лаков в эксплуатации. В последнее время нашли применение ленты из медьсодержащего стекла, проводимость которых в эксплуатации стабильна.

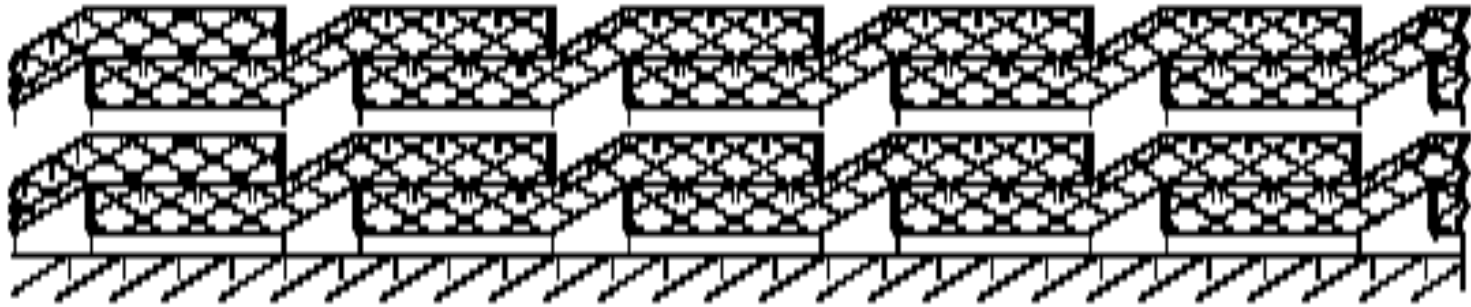
Более перспективным способом регулирования электрического поля в данном случае является комбинированный, сочетающий оба описанных метода.

Витковая изоляция

Витковая изоляция применяется в машинах малой и средней мощности с катушечной обмоткой. Витковая изоляция в нормальном рабочем режиме несет весьма незначительную электрическую нагрузку.

Основную опасность для витковой изоляции представляют грозовые импульсы перенапряжений. Поэтому витковая изоляция в основном рассчитана на импульсные воздействия при этих перенапряжениях.

Обычно в машинах на номинальное напряжение до 10,5 кВ витковая изоляция выполняется из одного-двух слоев микаленты, наложенных вполнахлеста.



Испытания изоляции вращающихся машин

Для выявления дефектов изоляции разработано много методов испытаний и измерений.

Существует понятие нормированные (обязательные) испытания. К ним относятся:

- измерение сопротивления изоляции мегаомметром;
- испытание повышенным напряжением частотой 50 Гц;
- испытание повышенным выпрямленным напряжением с измерением токов утечки.

Ненормированные (не регламентируемые стандартами) это:

- измерение интенсивности разрядов с помощью электромагнитных датчиков;
- обнаружение местных перегревов изоляции по контролю примесей в охлаждающем газе;
- испытание переменным напряжением весьма низкой частоты;
- определение характера повреждения изоляции с помощью микроструктурного анализа.

На заводах-изготовителях изоляция статорных обмоток испытывается приложением повышенного напряжения и проверяется путем измерения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции. Испытаниям повышенным напряжением подвергаются вначале отдельные стержни или катушки перед укладкой в пазы, а затем — вся обмотка после сборки (пофазно). Значения испытательных напряжений промышленной частоты устанавливаются по следующим правилам: номинальные напряжения до 3 кВ — $U_{исп} = 2U_{ном} + 1,0 \text{ кВ}$
, от 3 до 6 кВ — $U_{исп} = 2,5U_{ном}$
, свыше 6 кВ — $U_{исп} = (1,5 \div 1,7)U_{ном}$
Время приложения испытательного напряжения 1 мин.³⁹

При приемо-сдаточных испытаниях испытательное напряжение принимается равным 75% заводского. При профилактических испытаниях

$$U_{исп} = (1,5 \dots 1,7) U_{ном}$$

Сопротивление изоляции в МОм при температуре 75°С должно быть не ниже определяемого по формуле:

$$R = \frac{U_{ном}}{1000 + P_{ном}/100}$$

$U_{ном}$ номинальное напряжение в В

$P_{ном}$ номинальная мощность в кВА.

Если измерения проводятся при иной температуре, то производится пересчет в предположении, что сопротивление изоляции повышается в 2 раза на каждые 18°С.
Коэффициент абсорбции должен быть в пределах 1,3-2,0 .

Для проверки качества изоляции в условиях эксплуатации широко используются испытания постоянным повышенным напряжением .
Преимущества этого вида испытательного напряжения состоит в том, что оно, во-первых, распространяется и на лобовые части обмотки и, во-вторых, позволяет измерять токи утечки и абсорбции и выявлять увлажнение изоляции.

Увлажнение изоляции машины отражается также на емкости обмотки. Поэтому часто измеряют емкостные характеристики изоляции: зависимости $\text{tg } \delta$ и изменения $\text{tg } \delta$ изоляции при изменении напряжения от до . Эти характеристики дают представление о степени старения изоляции, о наличии частичных разрядов и об увлажнении.

В последнее время на крупных генераторах проводятся измерения характеристик частичных разрядов для выявления стержней с расслоившейся изоляцией. Однако надежная методика таких измерений и нормы пока еще не разработаны.

Выявление дефектов изоляции путем осмотров

Осмотр доступных частей обмоток является не менее эффективным средством выявления дефектов изоляции, чем испытания и измерения. Ряд дефектов, вызванных, в частности, ослаблением креплений лобовых и пазовых частей обмотки, может быть обнаружен только путем осмотра, причем в начальной стадии развития, до того как произойдет значительное повреждение изоляции.

Статистика дает такие данные на 100
зарегистрированных повреждений турбогенераторов:

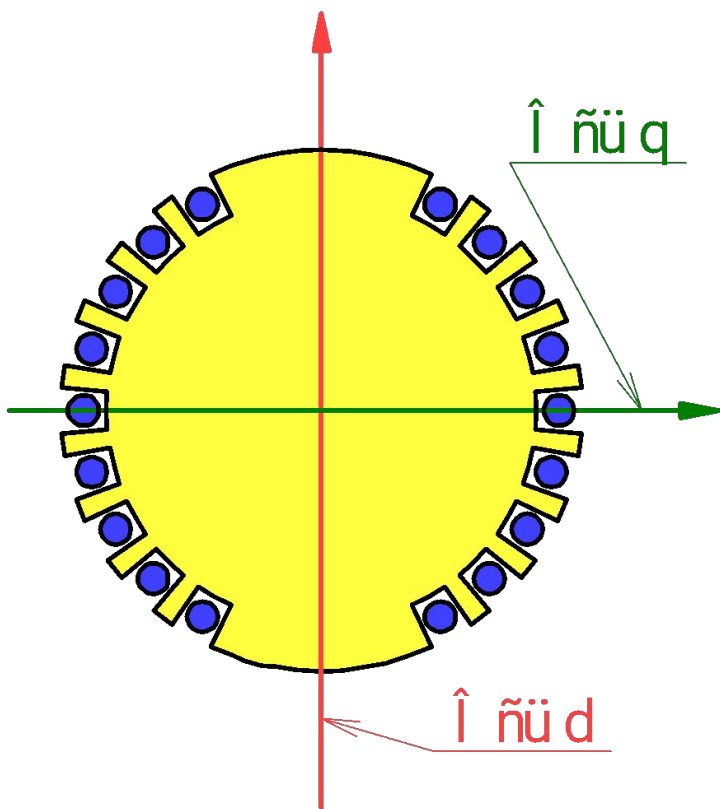
происхождение аварии	12
эксплуатацией во время работы генератора	7
в результате профилактических испытаний	23
осмотр при капитальных ремонтах	58

Таким образом, осмотром было выявлено в 2,5 раза больше дефектов, чем профилактическими испытаниями.

Турбогенераторы

На тепловых электростанциях РФ, турбогенераторы изготавливаются с частотой вращения 3000 об/мин, на атомных станциях – 3000 и 1500 об/мин. Роторы мощных турбогенераторов выполняются неявнополюсными.

Обмотки располагаются так, что ротор оказывается симметричным относительно двух взаимно перпендикулярных осей d и q : d — продольная ось машины; q — поперечная ось машины



Генератор может работать в нескольких принципиально различных режимах, таких как режим х. х., режим к. з. и режим с некоторыми видами нагрузок

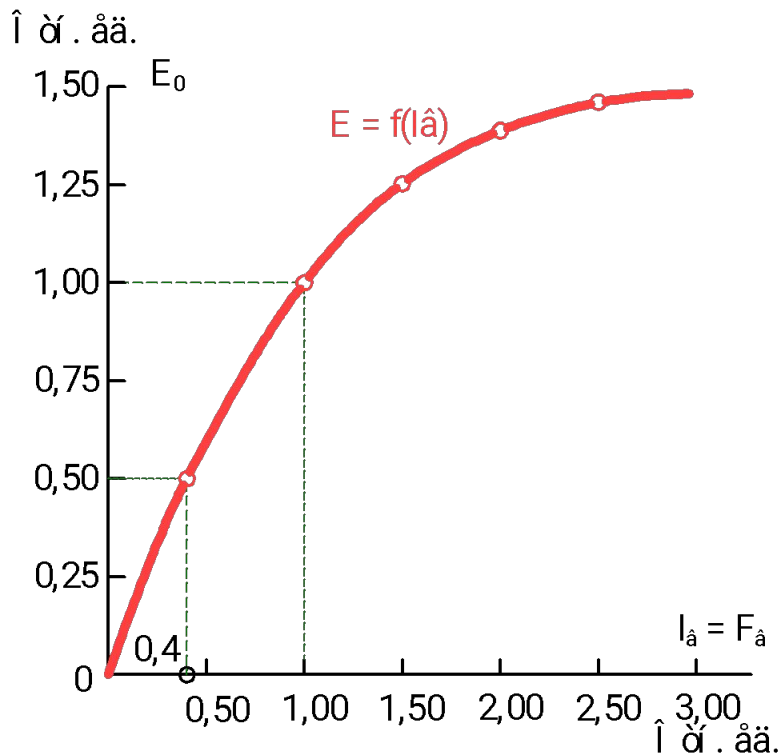
Режим х.х.

Ток статора при этом равен нулю

В режиме холостого хода по обмотке возбуждения генератора протекает ток I_B , соответствующий номинальному напряжению U_1 на выводах обмотки статора, ток статора при этом равен нулю.

Зависимость $E_0 = U_1 = f(I_B)$

при $n = n_{НОМ} = const$ представляет собой характеристику х. х. генератора



Нелинейность характеристики объясняется явлением насыщения магнитной цепи машины при росте I_B , что особенно проявляется в области выше $U_{НОМ}$

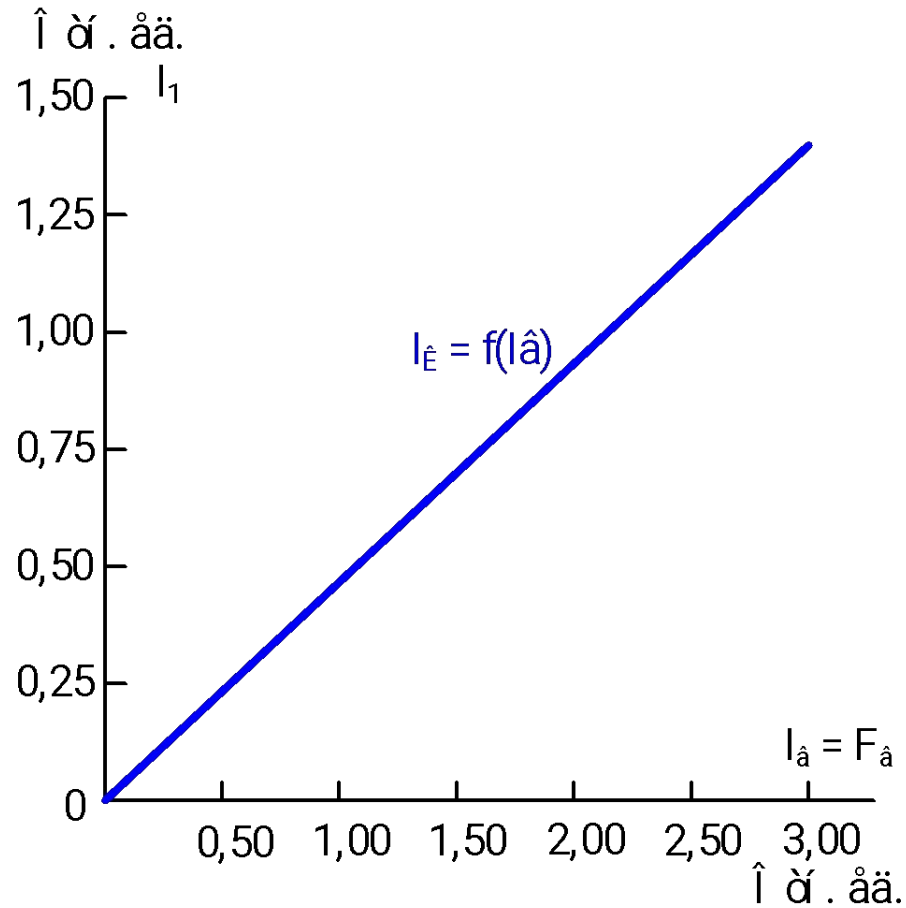
51

Нормальная характеристика х. х.
 $E_0 = f(I_B)$

Если реально снятая характеристика $x. x.$ машины отличается от нормальной характеристики более, чем на **5%**, то это значит, что есть неполадки в магнитной цепи.

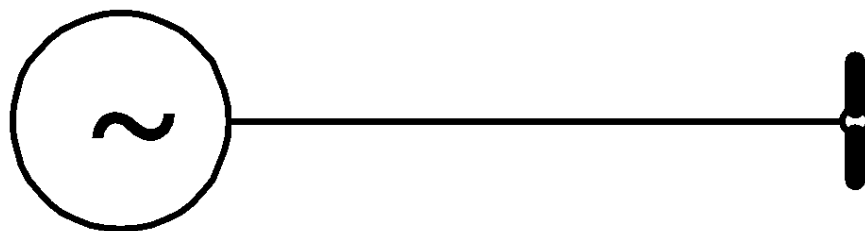
Таким образом, характеристика $x. x.$ определяется **состоянием магнитной системы генератора** и позволяет судить об исправности его магнитной цепи.

Режим к. з.



Характеристика генератора при к. з. обмотки статора

Электрическая
схема замещения
генератора при
работе на шины с
напряжением U_1



$$R_{CT} \approx 0$$



E_δ — э. д. с. от **результатирующего**
поля в зазоре машины

$$U_1 = E_\delta - jx_p I_1$$

x_p — реактивность Потье

Технические и физические ограничения мощности генератора