

## 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.<sup>4</sup>

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°)**.



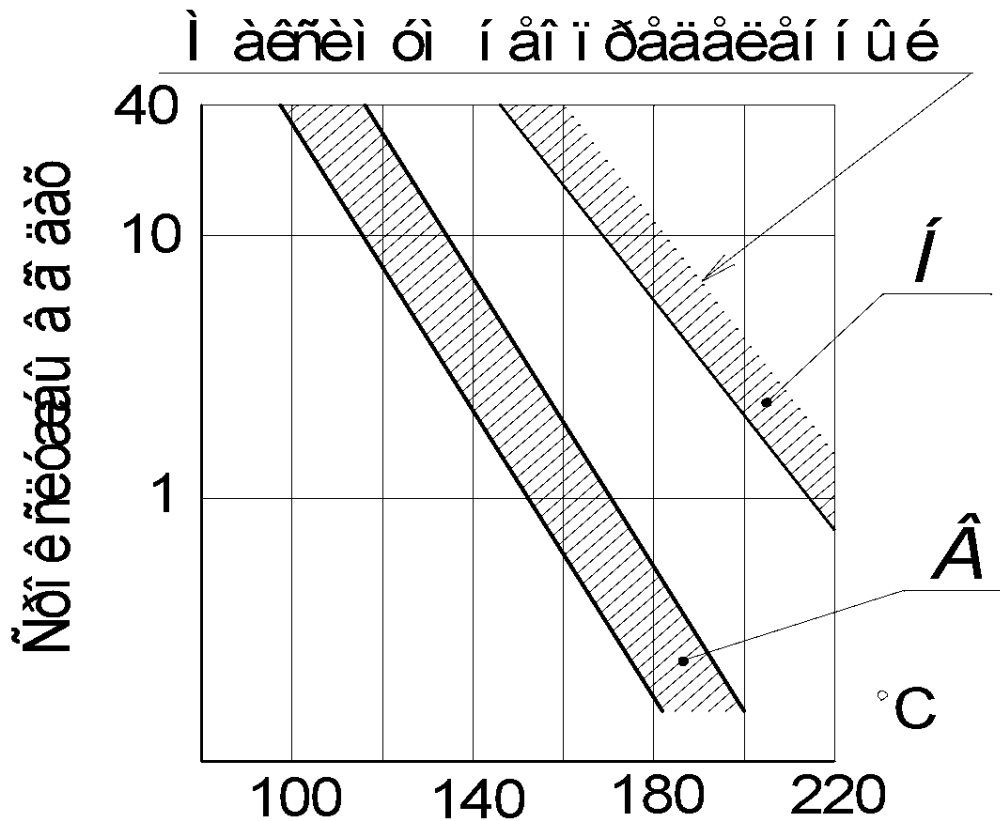
**Материалы класса В** — это композиции материалов органического и неорганического происхождения. Сюда входят неорганические материалы типа слюда, асбест, стекло, которые пропитываются или склеиваются органическими лаками.

**Материалы класса F** — включают материалы класса B, пропитанные и клеенные **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 температур<sup>12</sup>.

# Электрическое воздействие

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

Основными факторами действия на изоляцию генераторов окружающей среды являются:

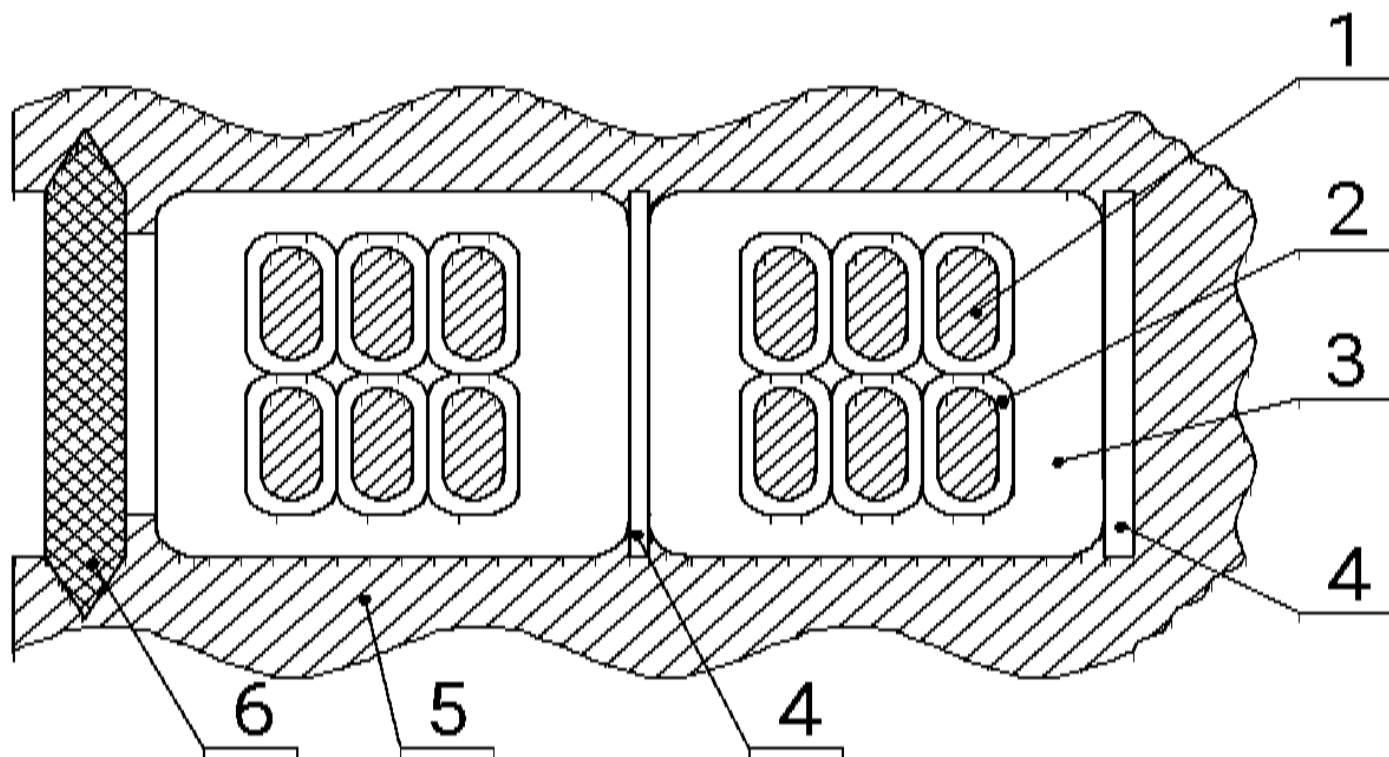
- действие окружающего изоляцию газа (водорода или воздуха); действие влаги;
- действие масла;
- абразивное действие пыли.

## 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.

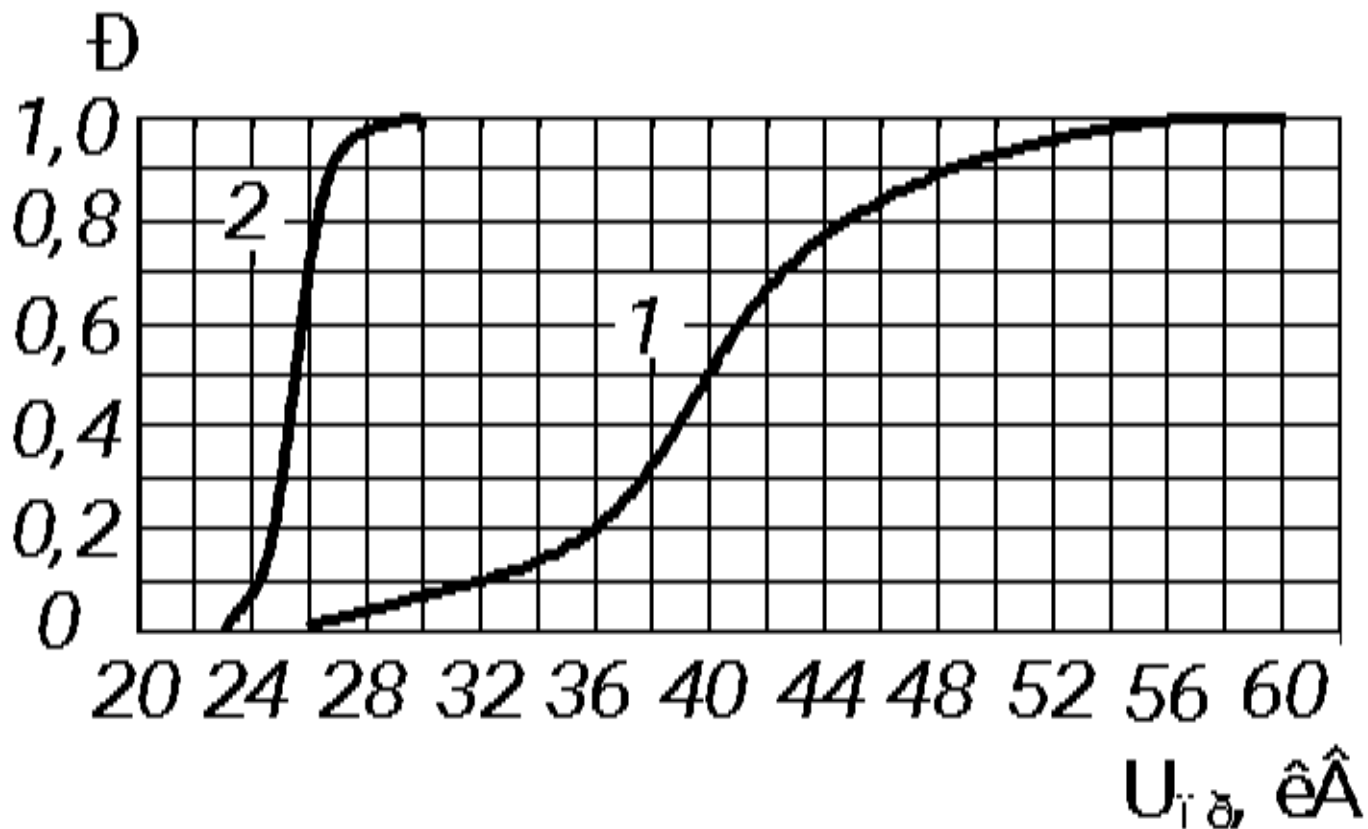
Нанесение изоляции на лобовые участки и уголки, является трудоемким процессом, т. к. она трудно поддается формовке и прессовке, что приводит к появлению повышенного числа газовых включений, расслоений и других дефектов, снижающих ее электрическую прочность. В эксплуатации постепенно происходит разбухание 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 существенное<sup>21</sup> 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 пробоя изоляции отдельного стержня;

$P_S(U)$  — вероятность пробоя 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

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

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

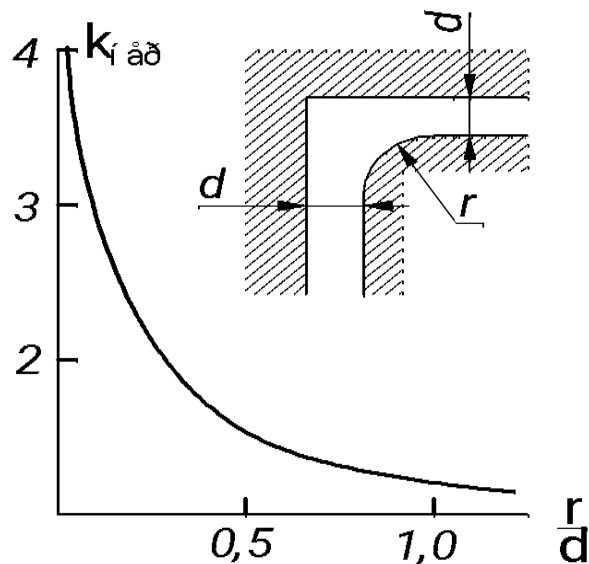
$$\frac{U_{пр}}{U_{ном}} = 4,8 \quad \text{— для лобовой части}$$

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.

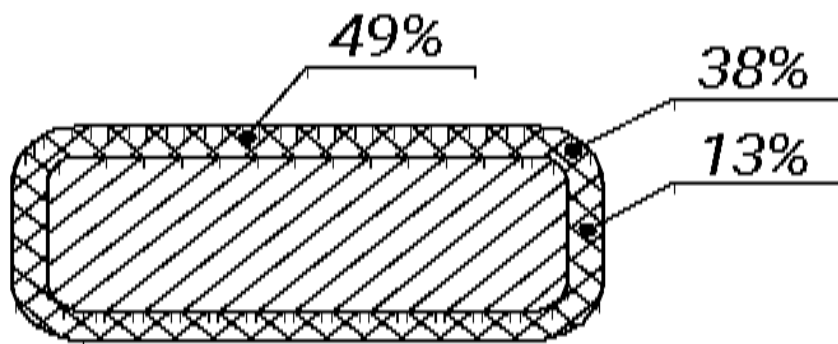
В современных крупных генераторах применяется не компаундированная, а терморреактивная изоляция (слюдотерм, монолит), которая при нагреве не размягчается, поэтому имеет лучшие характеристики, чем компаундированная. В качестве пропитки в терморреактивной изоляции используют эпоксидные и полиэфирные смолы. 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.**

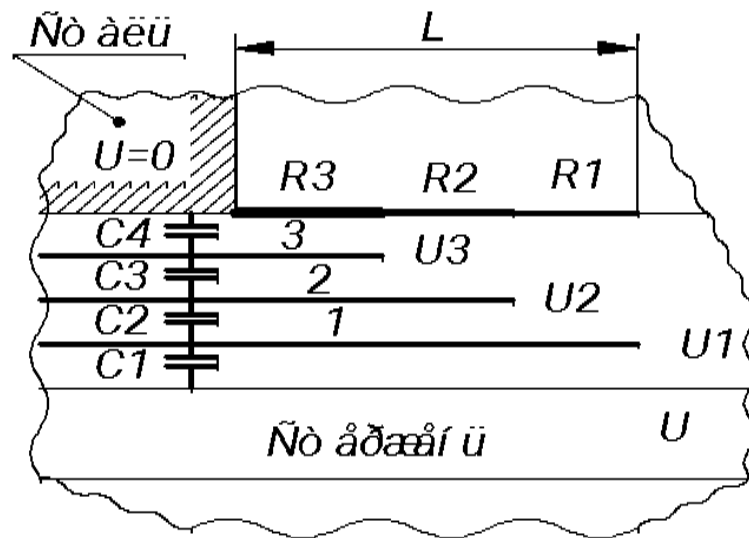
В пазовых частях изоляция покрывается **проводящими и полупроводящими покрытиями**, шунтирующими газовые включения и воздушные зазоры между изоляцией и стенками пазов, что ослабляет <sup>31</sup>частичные разряды и корону в этих включениях.

**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.

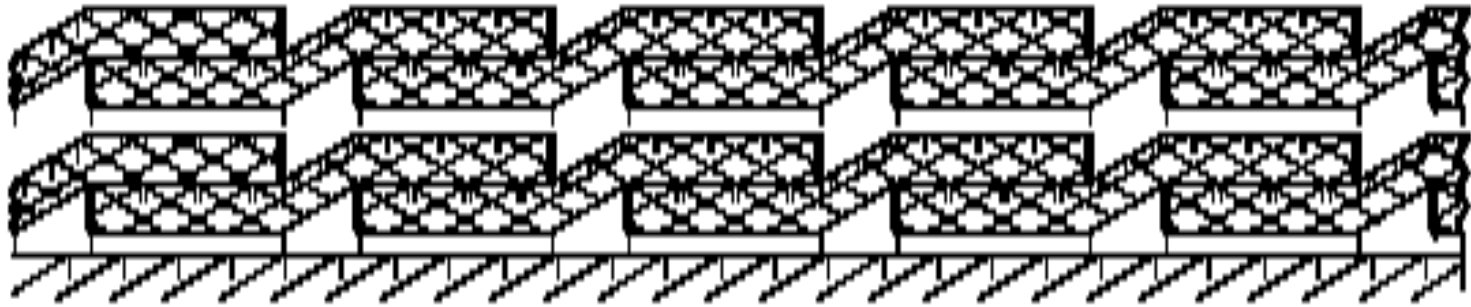
Более перспективным способом регулирования электрического поля в данном случае является комбинированный, сочетающий оба описанных метода.

# 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.<sup>39</sup>

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  $\tan \delta$  и изменения  $\tan \delta$  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

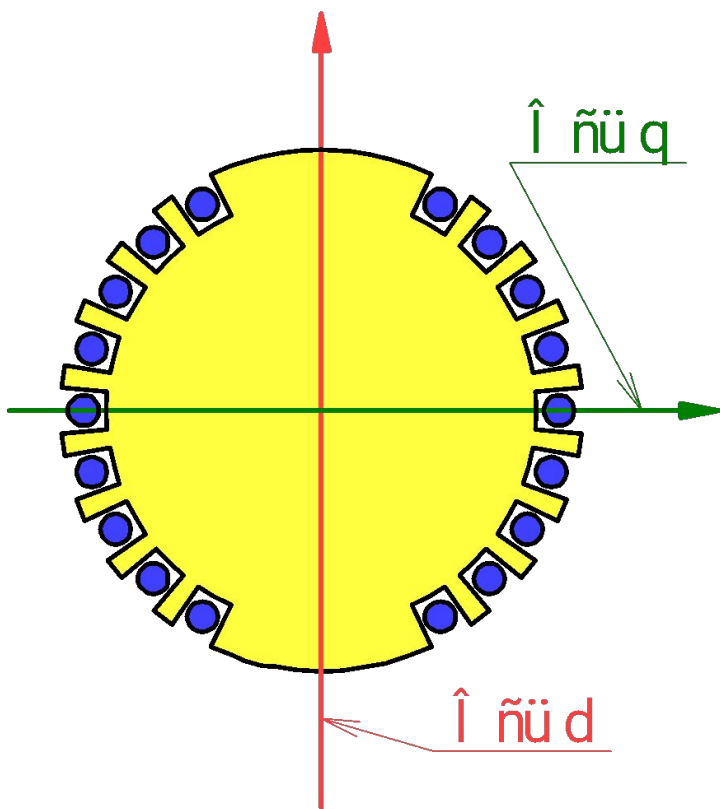
Таким образом, осмотром было выявлено в 2,5 раза больше дефектов, чем профилактическими испытаниями.

# 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

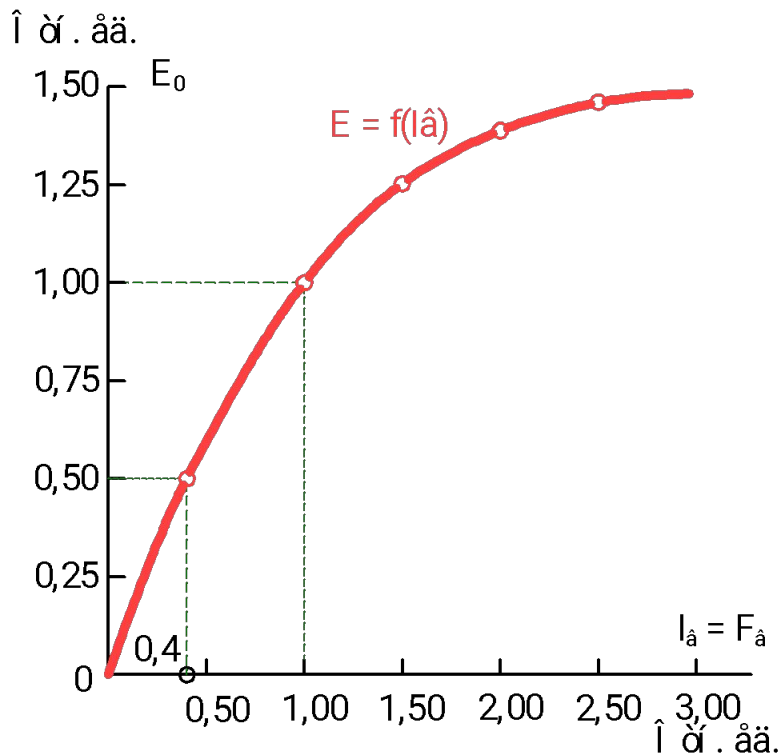
# Режим х.х.

## 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  $U_{НОМ}$

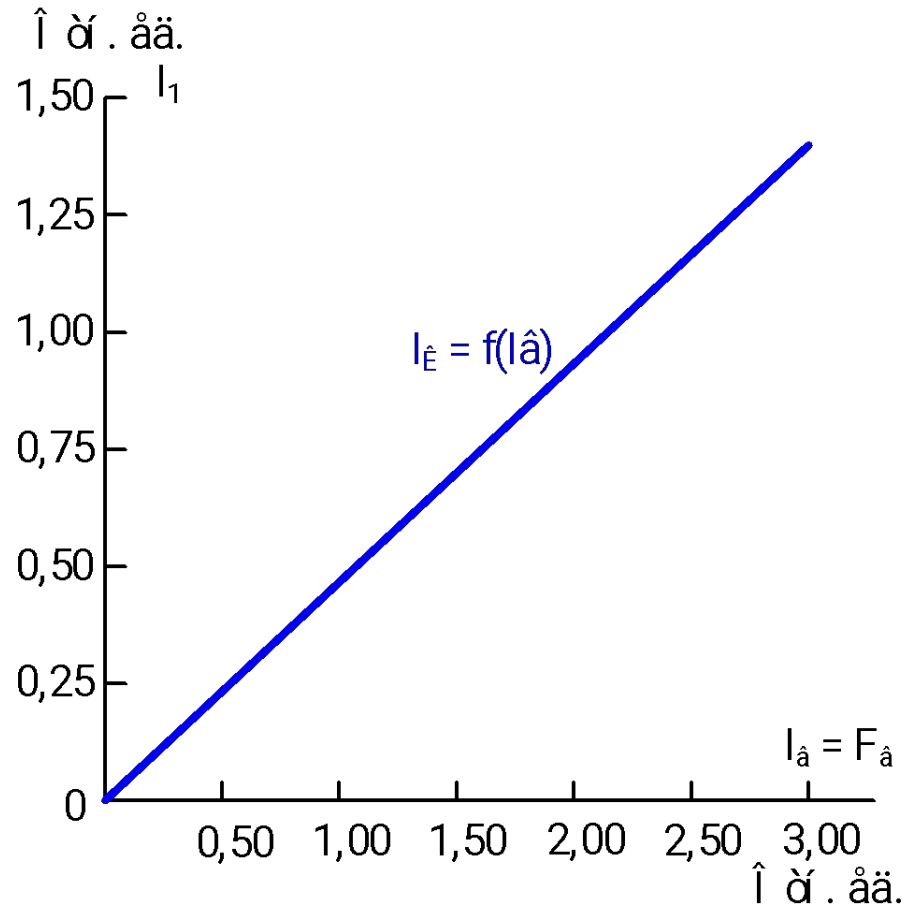
51

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.

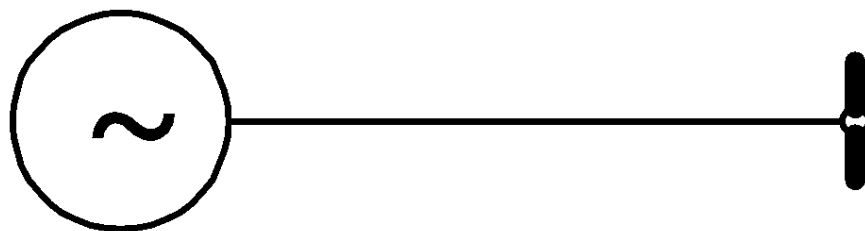
Таким образом, характеристика  $x. x.$  определяется **состоянием магнитной системы генератора** и позволяет судить об исправности его магнитной цепи.

# Режим к. з.



Характеристика генератора при к. з. обмотки статора

Электрическая  
схема замещения  
генератора при  
работе на шины с  
напряжением  $U_1$



$$R_{CT} \approx 0$$



$E_\delta$  — 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