



## Почему выходят из строя вращающиеся машины

Вращающиеся машины, такие как двигатели и генераторы, являются ключевыми компонентами в производстве электроэнергии и широко используются в промышленности. Следовательно, большое значение уделяется вопросам надежности и оперативной готовности машин. Преждевременный выход из строя может привести к незапланированным простоям и возможному повреждению машины, что чревато значительными экономическими потерями. Чтобы эффективно планировать техобслуживание, важно обладать точной информацией о состоянии деталей машин, касающейся их ремонта или замены.

### Почему выходят из строя вращающиеся машины

Существуют несколько методик и расчетов для оценки критических узлов машин. Наиболее распространенный подход состоит в оценке опыта эксплуатации в различных организациях из различных сегментов. Примером является исследование поломок гидрогенераторов рабочей группой A1.10 CIGRE. Результаты исследования представлены на рис. 1а. Согласно отчетам 16 предприятий, владеющих 1199 гидрогенераторов, расположенных по всему миру, наиболее частой причиной выхода из строя машин является повреждение изоляции. Повреждение изоляции вызывается специфическими основными причинами, которые приведены на рис. 1б. Мы объясним, как эти причины неполадок были определены и измерены в электрических вращающихся машинах.

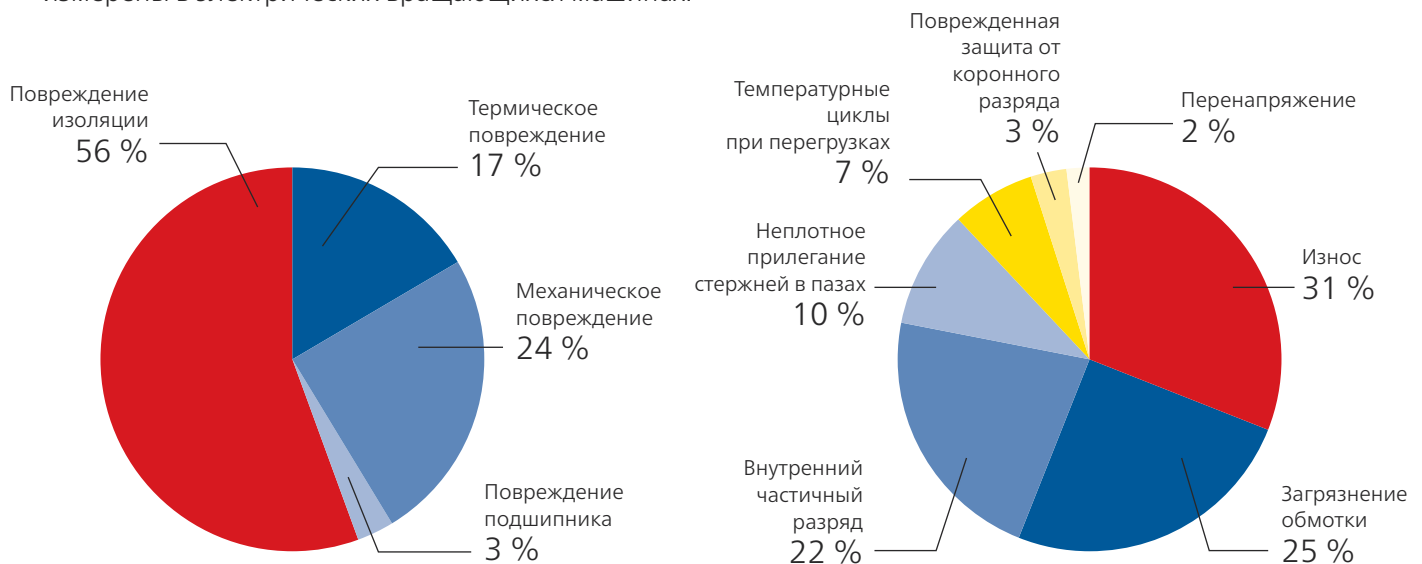


Рис. 1а (слева). Основные причины выхода из строя гидрогенераторов (по результатам исследования)

Рис. 1б (справа). Причины повреждения изоляции

Источник: Brüttsch et al. "Insulation Failure Mechanisms of Power Generators", DEIS July/August 2008

### Суммарная нагрузка на изоляцию

Вращающиеся машины в течение срока службы периодически либо постоянно подвергаются различным воздействиям и нагрузкам — температурным, электрическим, внешним, механическим. Это так называемые TEAM-нагрузки (TEAM — thermal, electrical, ambient, mechanical).

- > **Температурная нагрузка.** Частые перепады температуры приводят к преждевременному старению изоляции.
- > **Электрическая нагрузка.** Нагрузка напряжением и возникающие частичные разряды (ЧР) постоянно влияют на изоляцию.
- > **Внешние воздействия.** К ним относятся влажность, химические реагенты и вещества, вызывающие коррозию (газы, кислоты), а также посторонние частицы (металлическая стружка, зола, сажа, смазка).
- > **Механическая нагрузка.** Электродинамические силы, возникающие в пазах и лобовых частях обмотки, а также различные уровни теплового расширения.

### Формирование изоляции

Изоляция электрических вращающихся машин высокого и среднего напряжения должна выдерживать напряженность электрического поля для обеспечения механической устойчивости и одновременно отводить тепло от медного провода обмоток к системе охлаждения машины. Чтобы решить обе задачи, производители часто используют комбинированную изоляцию, которая представлена на рис. 2. Основная или корпусная изоляция состоит из слюды в сочетании с эпоксидной смолой. Эта область подвержена наибольшим электрическим напряжениям. К тому же изоляционная система содержит некоторые проводящие или полупроводящие слои для обеспечения заданных потенциалов на поверхностях раздела между разными материалами. Примером является внешняя защита от коронного разряда, обеспечивающая плавное распределение потенциала на поверхности изоляции. Машины большего размера также оснащены системой выравнивания потенциала на торцах и, часто, внутренней защитой от коронного разряда.

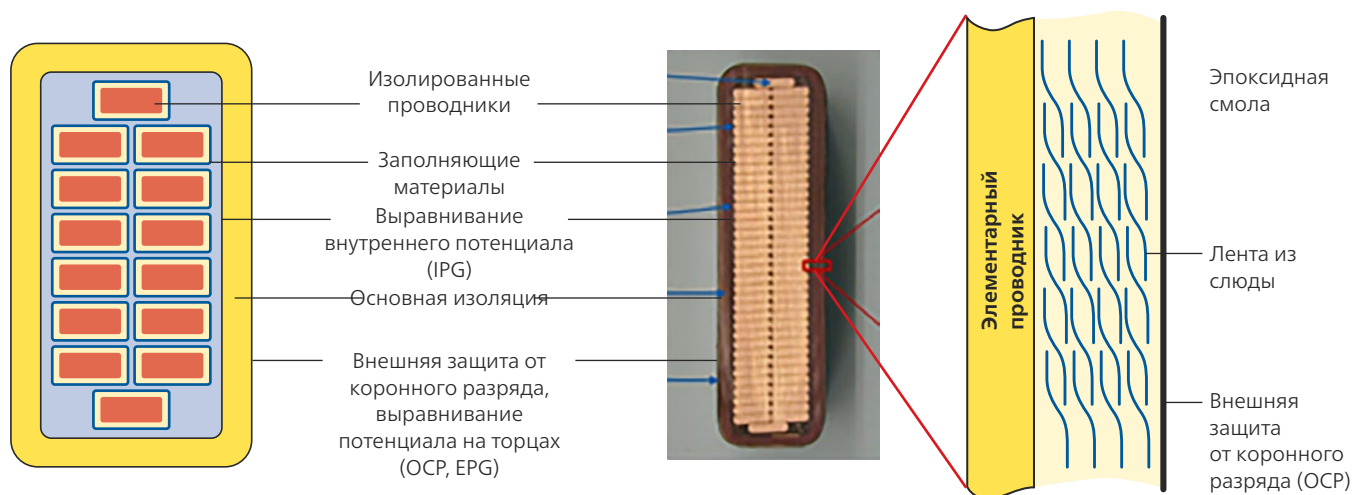


Рис. 2. Система изоляции высоковольтных машин

### Наиболее распространенные дефекты в корпусной изоляции обмоток статора

#### Полости

Наличие некоторого количества полостей или пор в изоляции из эпоксидной смолы/слюды является результатом технологического процесса и представляет собой нормальное явление. Так как каждый производитель использует свои технологические процессы, количество мелких дефектов в новых машинах может быть разным. Вышеупомянутые TEAM-нагрузки со временем вызывают появление в изоляции дополнительных пор.

Для надлежащим образом произведенных изоляционных систем наличие мелких пор — не проблема. Тем не менее, мелкие пустоты являются источниками ЧР, которые могут привести к возникновению в изоляции дефектов большего размера. Развитие таких дефектов часто происходит медленно, поэтому с течением времени состояние таких частичных разрядов следует контролировать.

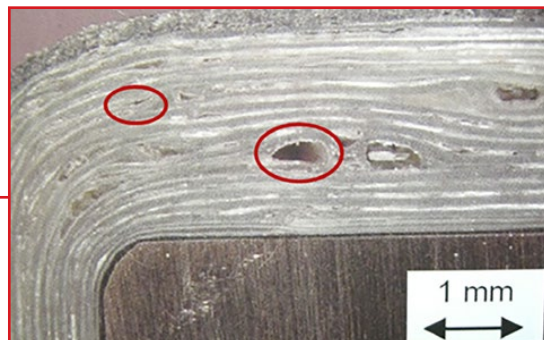
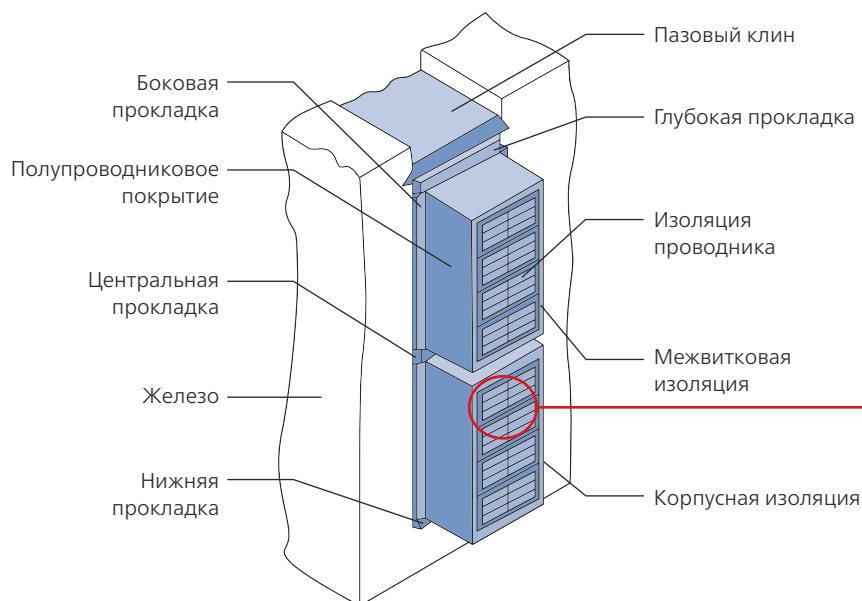


Рис. 3. Система изоляции и вид больших полостей в корпусной изоляции под микроскопом  
 Источник: Vogelsang et al. "Performance testing of high voltage generator and motor insulation", Dec 2005

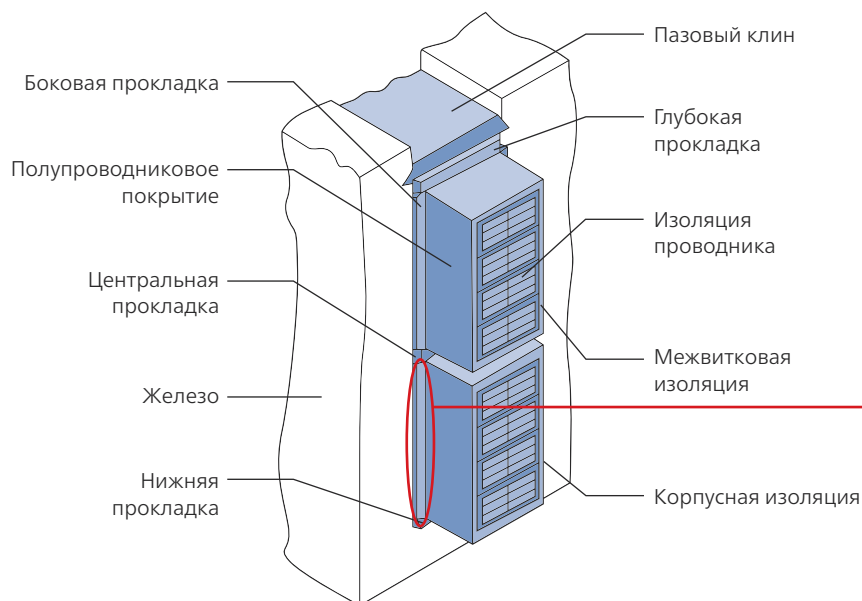
### Расслоение

Расслоение, также известное как нарушение адгезии, внутри изоляции приводит к появлению больших пор между ее слоями. Кроме того, расслоение может произойти между медным проводом и основной изоляционной оболочкой.

Расслоение приводит к более сильным ЧР по сравнению с ЧР, вызванными наличием микропор. Основными причинами этого являются механические напряжения, вызванные использованием разных материалов, и/или температурные циклы в течение нормальной работы.

### Слабо смотанные катушки или неплотно прилегающие стержни

На обмотку постоянно воздействуют электромеханические силы. Если в системе фиксации обмотки со временем возникают дефекты либо она была изначально неправильно установлена, обмотка начинает отставать. Это приводит к тому, что внешняя защита от коронного разряда подвергается воздействию и разрушается. Если дефект остается незамеченным, вибрация начинает разрушать основную изоляцию, что приводит к выходу машины из строя. Такой дефект сопровождается специфическими частичными разрядами, поэтому его можно обнаружить методом измерения активности ЧР.



Механическое истирание защиты ОСП из-за вибрации

Рис. 4. Система изоляции и типичные признаки вибрации стержней

### Загрязнения и недостаточные расстояния между компонентами в лобовой части катушек

Конструкционные недостатки, такие как неоптимальные расстояния (в фазорасщепителе) или загрязнение обмоток, приводят к возникновению ЧР в торцевой области обмоток. Среди других распространенных проблем в этой части обмотки отмечают слабое соединение между двумя участками выравнивания потенциалов, внешней защитой от коронного разряда и участком выравнивания потенциалов на лобовой обмотке. Пример загрязнения обмоток и возникновения ЧР представлен ниже (рис. 5).

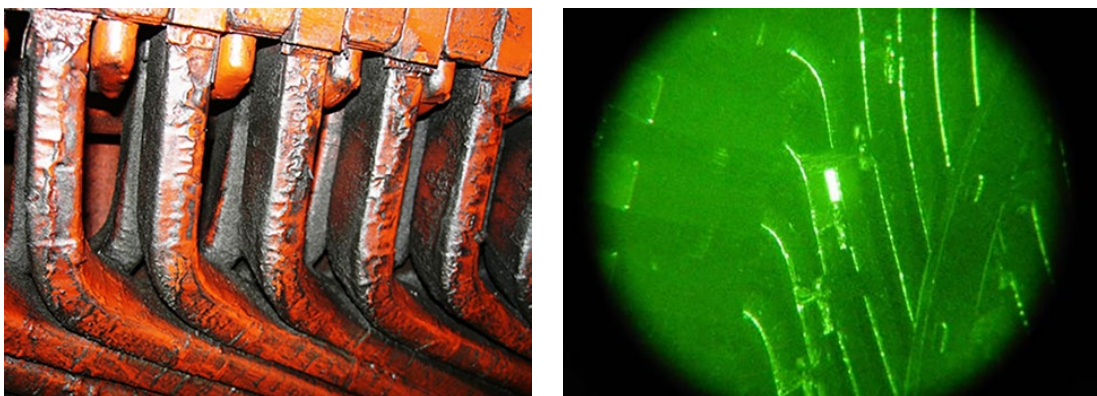


Рис. 5. Примеры загрязнения и возникновения ЧР в торцевой части обмотки

Проблемы, обсуждаемые выше, относятся к основной изоляции. Проблемы могут возникнуть и в других компонентах вращающихся машин. Например:

- > Межвитковые замыкания
- > Проблемы соединения (контакты)
- > Разомкнутые параллельные проводники
- > Плохо пропаянные контакты

### Продление ожидаемого срока службы

Вращающиеся машины, как и другое электрооборудование, рассчитаны на определенный срок службы. Как упоминалось ранее, негативное воздействие термических, внешних, механических и электрических нагрузок ведет к его сокращению.

Чтобы не допустить выхода из строя и простоев в работе вращающихся машин, крайне важно проводить регулярное или периодическое техобслуживание. Разные диагностические измерения позволят вам оценить риски и надлежащим образом распланировать проведение техобслуживания, исходя из технического состояния машин.

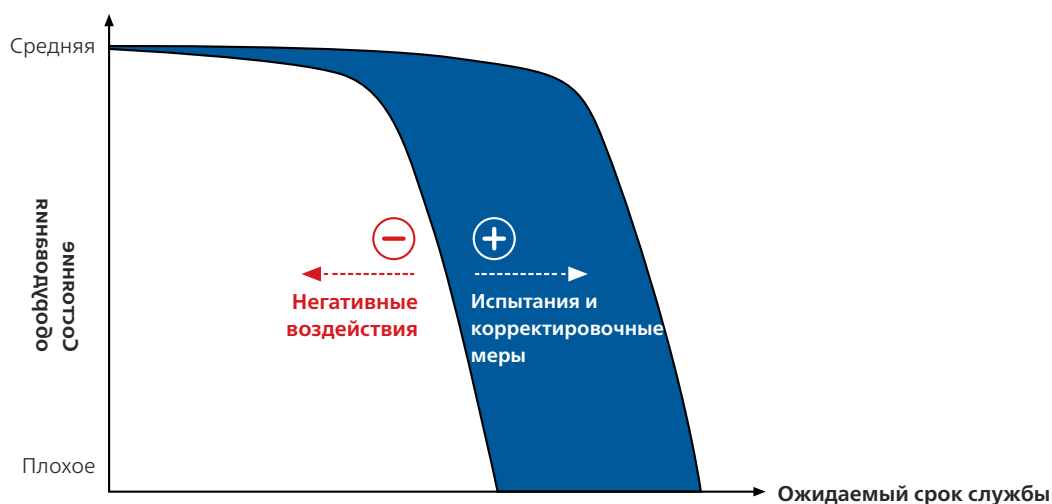


Рис. 6. Идеальная концепция продления срока службы благодаря техобслуживанию с учетом состояния оборудования

### Обзор испытаний

В следующей таблице представлен обзор наиболее распространенных неполадок и методов электрических испытаний для их выявления.

Испытуемые компоненты машины		Что необходимо проверить	Рекомендуемые испытания электротехнического оборудования																	
Обмотка статора	Частичные разряды (ЧР)		■	■	■															
	Загрязнение		■	■	■				■											■
	Деградация изоляции		■	■	■				■											■
	Электрическая прочность изоляции								■											
	Целостность изоляции								■	■										■
	Проблемы с подключением																			■
	Внутривитковые повреждения																			■
Обмотка ротора	Внутривитковые повреждения																		■	■
	Повышенное сопротивление контактов																		■	
Сердечник статора	Недостатки сердечника																			■

Таблица 1 Распространенные неполадки электрических вращающихся машин и соответствующие методы испытаний для их выявления.