ОАО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ»
ЭНЕРГИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ

Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)

For power system expertise

ТЕНДЕНЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Обзор докладов Исследовательского Комитета А1 «Электрические машины» на 47 сессии СИГРЭ

с 26 по 31 августа 2018 года

Ройтгарц М. Б., действительный член СИГРЭ
Исследовательский комитет А1«Электрические машины»

Санкт-Петербург
2018

47 Сессия СИГРЭ

В исследовательском комитете А1 СИГРЭ представлены эксперты от 98 стран. 25 из них, включая Россию, имеют действительных членов, что подтверждает общепризнанный научно-технический авторитет нашей страны .

Исследовательский Комитет А1 отвечает за «Вращающиеся Электрические Машины» и их применение для генерации электрической энергии. В состав Комитета А1 входят четыре основные направления:

- Турбогенераторы AG/WGs A1.01
- Гидрогенераторы AG/WGs A1.02
- Новые технологии AG/WGs A1.05
- Электрические двигатели AG/WGs A1.06

В новые международные рабочие группы рекомендованы Российские специалисты до 40 лет

•Антонов П.В. WG A1.62 «Подпятники гидрогенераторов»

•Гришин Н.В. WG A1.63 «Выводные соединения турбогенераторов»

•Корнеев К.В. WG A1.64 «Замена электродвигателей со стандартным КПД»

В действующей рабочей группе WG A1.50 «Контроль качества стержней турбогенераторов» участвует Ройтгарц М.Б.

На 47 сессию были представлены 26 докладов по следующим предпочтительным темам, выбранным для сессии 2018 г:

PS1 Структура генерирующих мощностей в будущем

PS2 Управление электрическим машинным оборудованием

PS3 Новые разработки и опыт эксплуатации вращающихся электрических машин

Доклады для рассмотрения

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий (Mitsubishi, Hitachi, Япония)

A1-103 Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах (Siemens, Германия)

A1-104 Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА) (GE, EDF Франция)

A1-205 Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в генераторах с воздушным охлаждением для газовых турбин (QPS PI, Канада)

Публикации обзоров докладов:

1. В.В.Беляков, Ю.Д.Виницкий, М.Б.Ройтгарц. Тенденции развития вращающихся электрических машин (по материалам 47 сессии СИГРЭ). Энергия единой сети. №5 (41) сентябрь-ноябрь 2018.

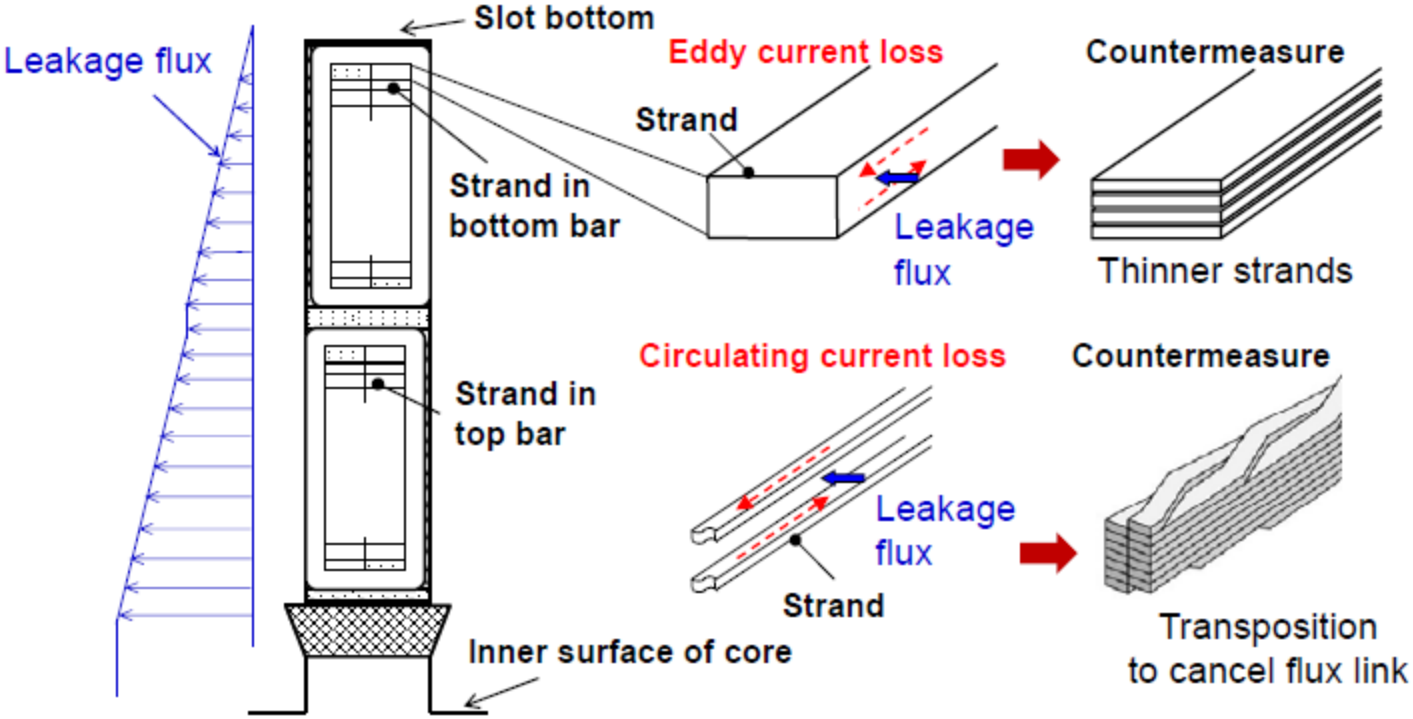
2. В.В.Беляков, Ю.Д.Виницкий, М.Б.Ройтгарц. Обзор докладов 47 сессии СИГРЭ. Энергетика за рубежом. 2019. В печати.

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония

В этой публикации приведено описание опыта применения трех базовых технологий, необходимых для разработки генератора мощностью 900 МВА с косвенной водородной системой охлаждения; приведенные результаты также могут применяться для перемотки или модернизации генераторов с целью повышения выходной мощности и эффективности. К таким технологиям относится

- **применение главной изоляции стенок стержней статора из материала с высокой теплопроводностью (HHT),**
- **оптимизированная транспозиция проводов по принципу Ребеля,**
- **усовершенствование креплений торцевых частей обмоток статора.**

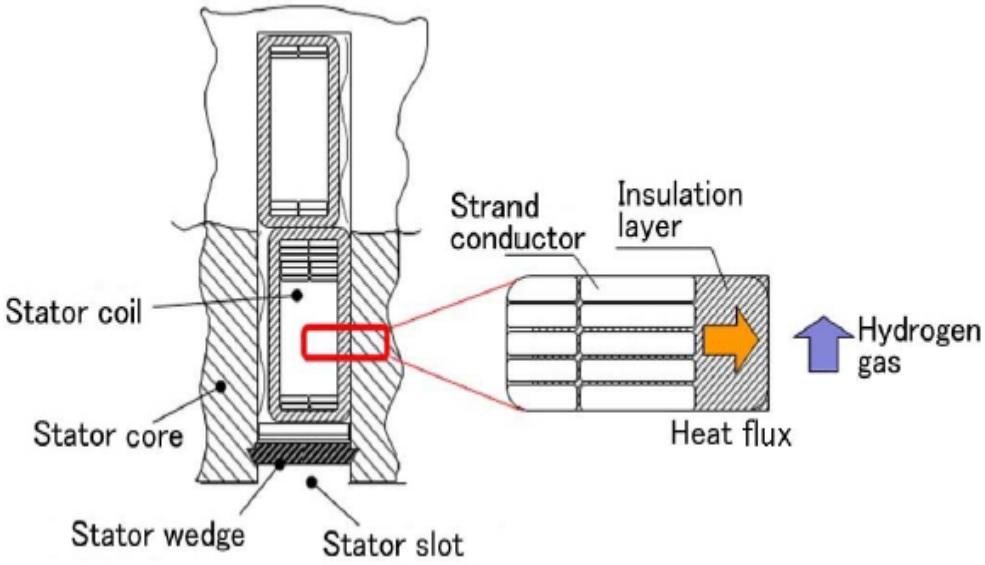


Оптимизация положения элементарных проводников в стержне (транспозиция)

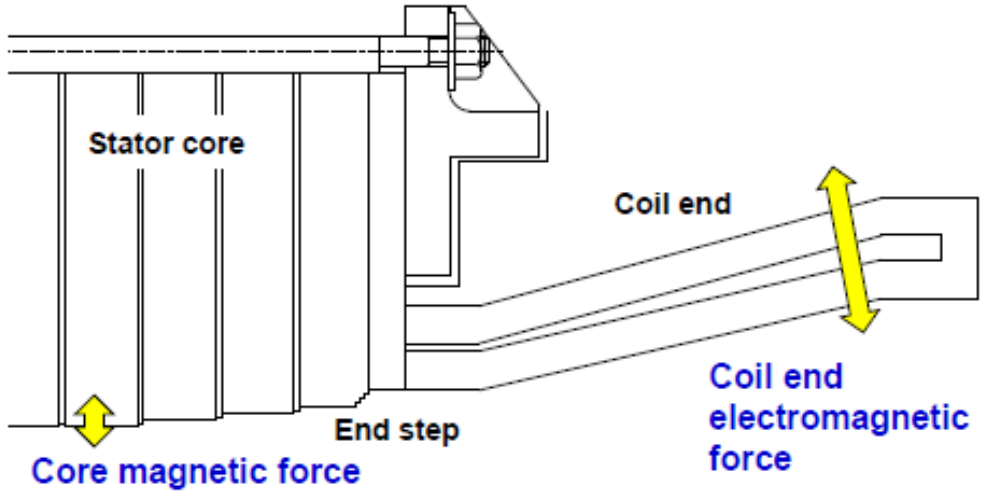
A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония

Применялись изолирующие материалы с высокой теплопроводностью, в 3 раза выше, чем у традиционных материалов. Мероприятия по замене изоляции были проверены в ходе перемотки генераторов как с водородной, так и воздушной системой охлаждения в диапазоне мощностей от 160 до 600 МВА. **Показана возможность уменьшения превышения температуры на стержнях статора до 40 - 50%** в зависимости от размеров генератора и первоначальной конструкции.



Поперечное сечение катушки

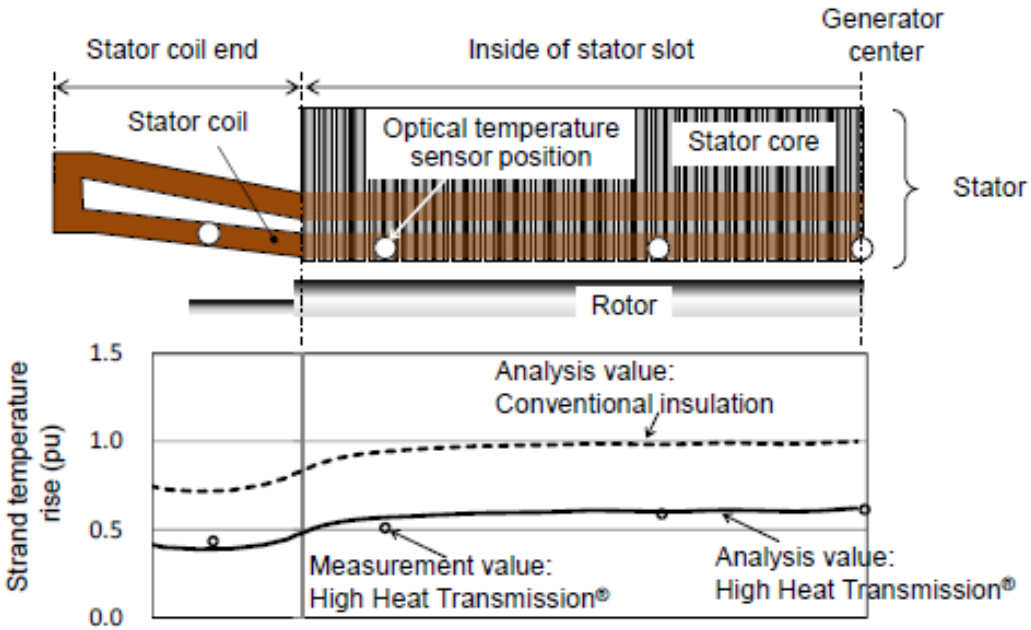


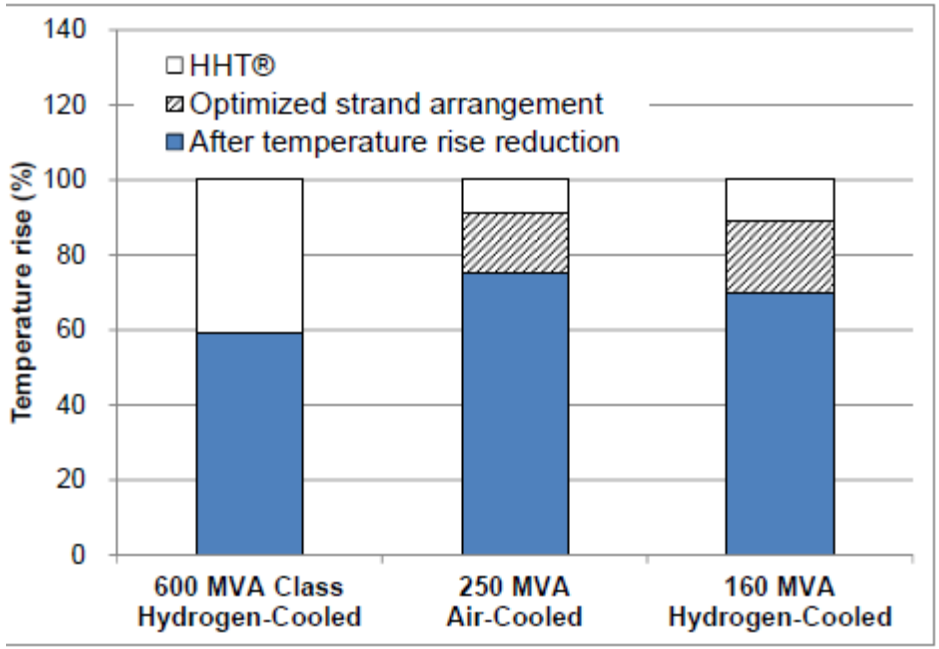
Магнитные силы в сердечнике и на краях обмотки

Вибрация концевых частей обмотки определяется векторным суммированием вибраций, возбуждаемых в сердечнике статора и в лобовых частях обмотки. Необходим компромисс между улучшением охлаждения и более жесткой конструкцией.

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

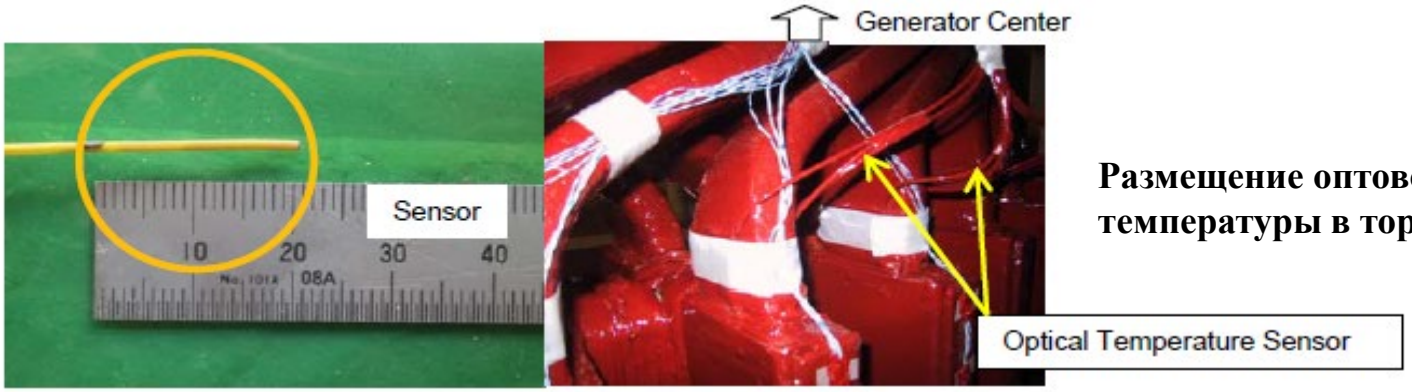
S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония





Результат перемотки с теплопроводной изоляцией – снижение превышения температуры на 40%

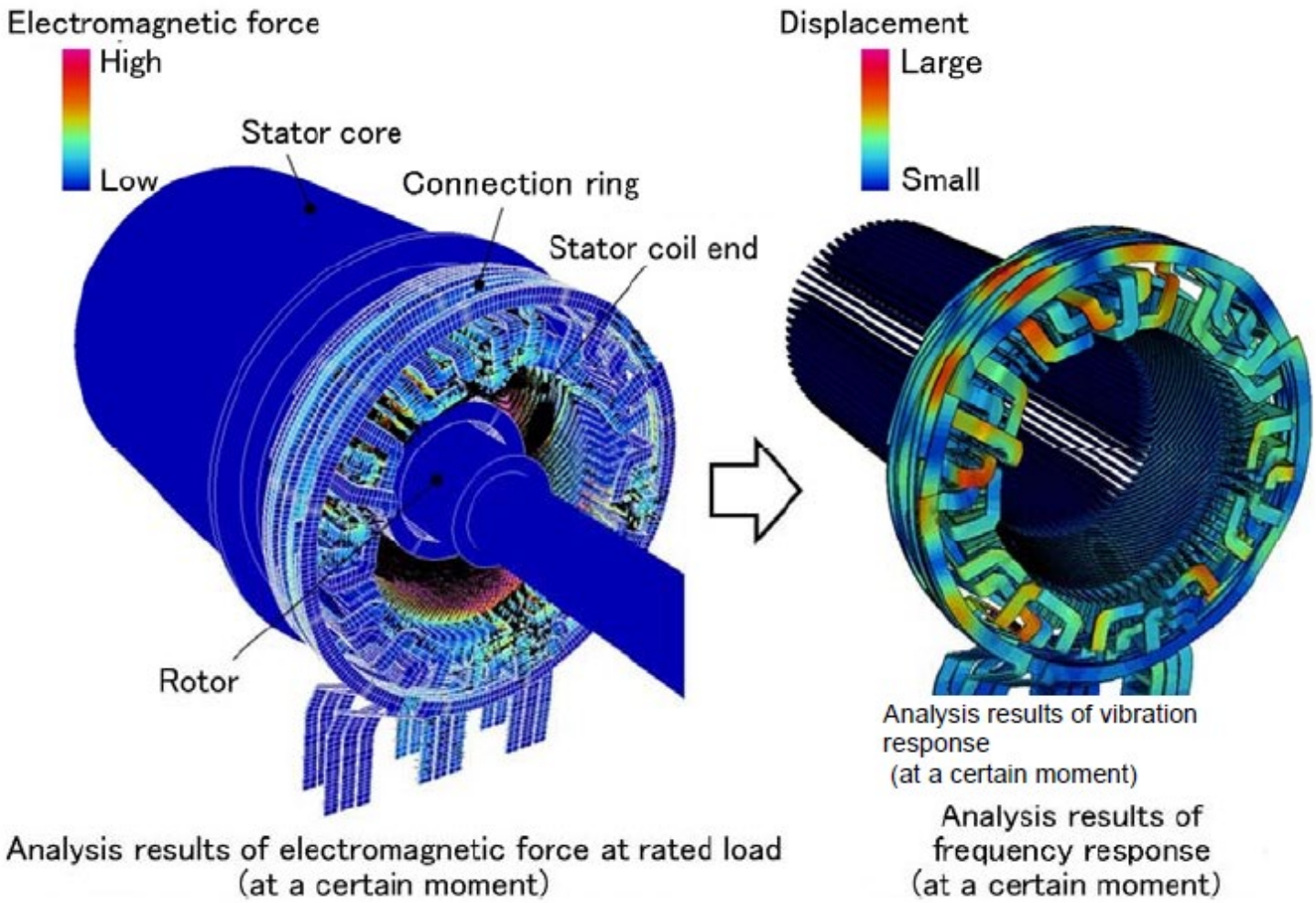
Снижение превышений температуры новыми технологиями



Размещение оптоволоконных датчиков температуры в торцевой части обмотки

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония



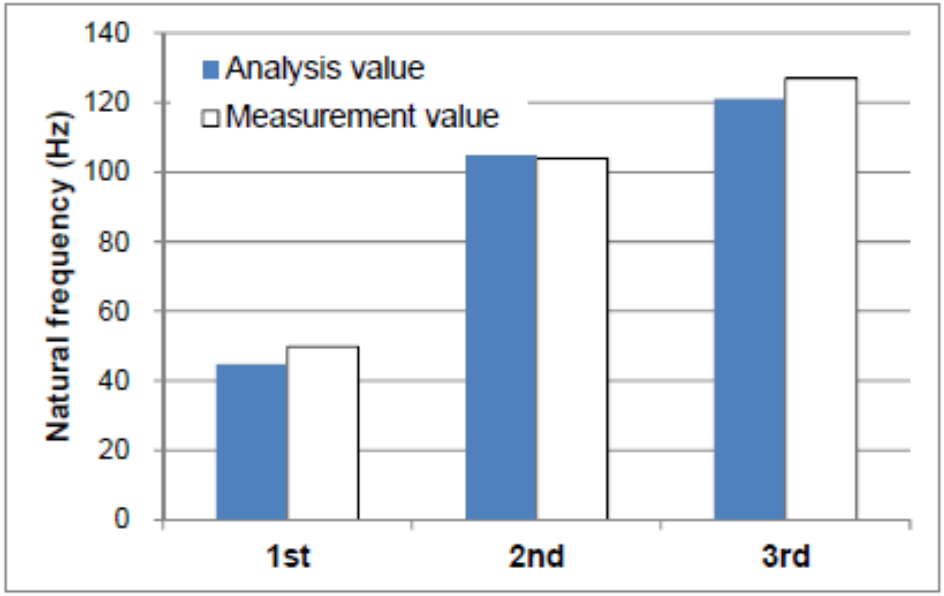
Пример результатов расчета электромагнитных сил (слева) и вибрационного отклика (справа) в концевой части обмотки статора

Температура влияет на жесткость органических материалов, а тепловое расширение влияет на условия закрепления.

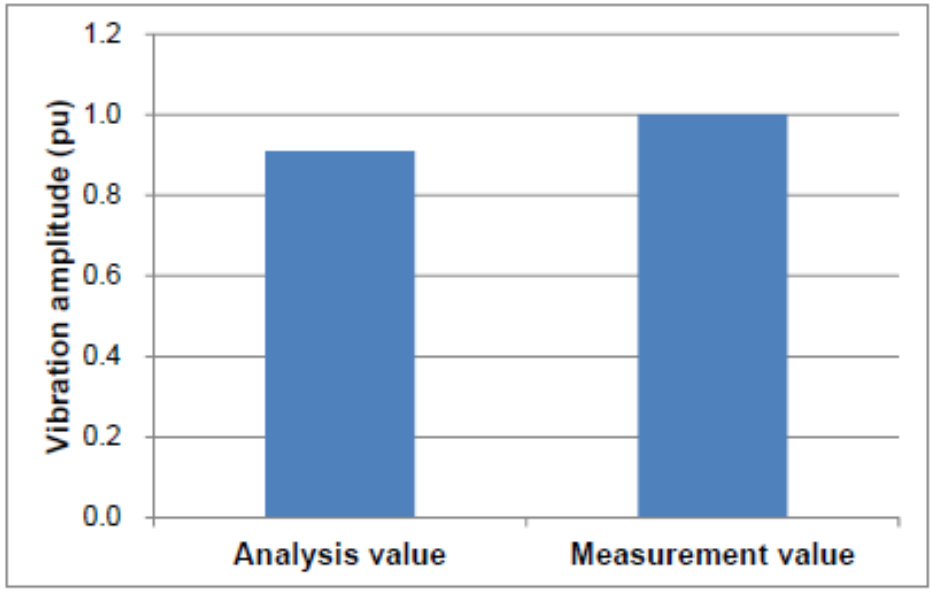
Вибрационное испытание обмотки в статических условиях не может точно оценить вибрацию при эксплуатации.

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония



Расчет и измерение собственных частот торцов обмотки



Расчет и измерение вибрации торцов обмотки

Установка оптоволоконных датчиков вибрации в торцевой части обмотки статора

Вибрация сердечника статора является одним из факторов, определяющих вибрацию торцевой части обмотки статора.

Электромагнитная сила на лобовой части обмотки сдвинута по фазе относительно силы, действующей на сердечник.

A1-309 Разработка турбогенераторов большой мощности с косвенной водородной системой охлаждения и связанных технологий

S.MURAMATSU, K.TAKAHASHI, M.ONODA, K.TANAKA, K.HATTORI Mitsubishi, Hitachi, Япония

Перемотка генератора 160 MBA

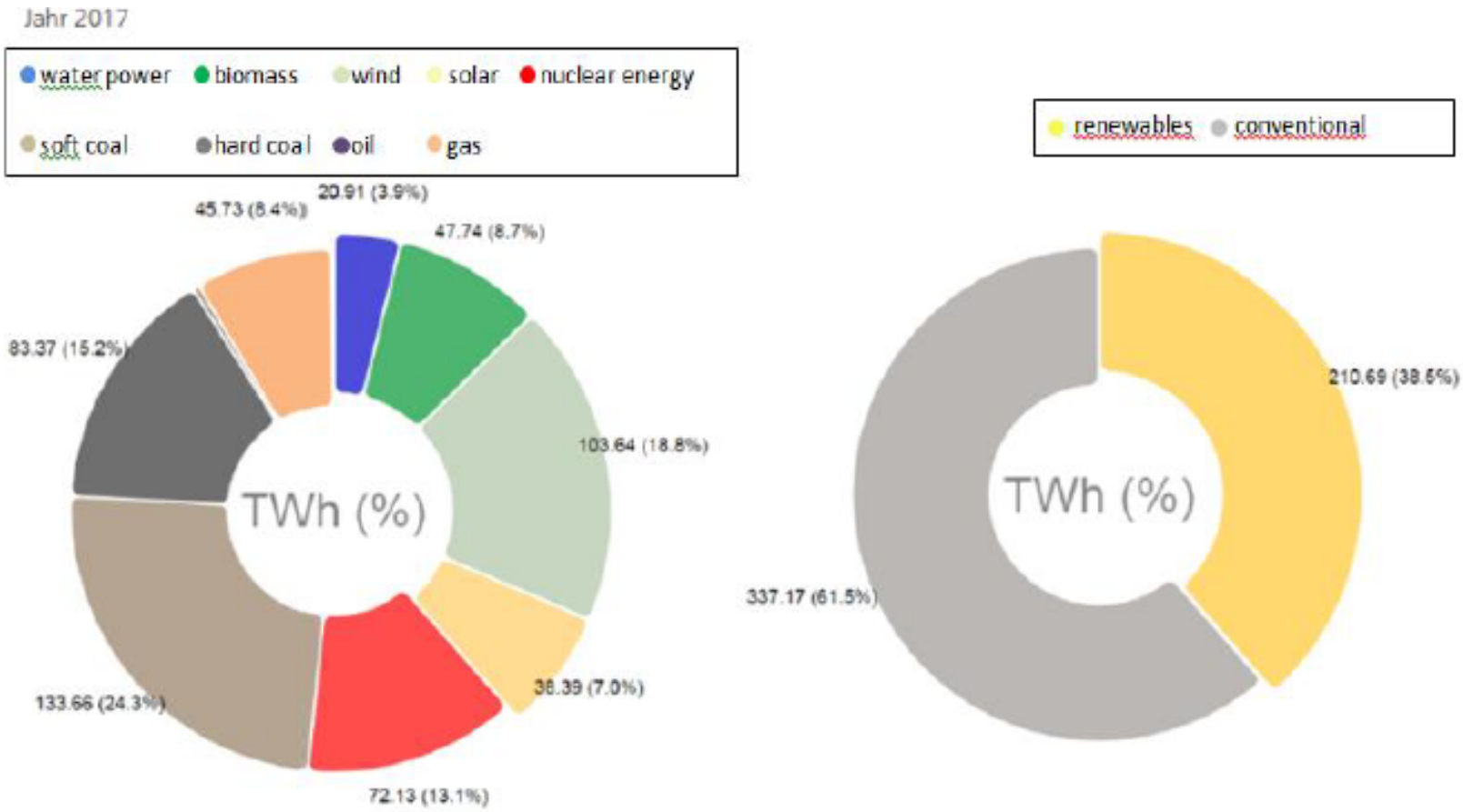
Генератор 600 MBA на испытательном стенде

Применение высоко теплопроводной изоляции более эффективно для турбогенераторов с водородным охлаждением, чем для с воздушным охлаждением.

Это связано главным образом с тем, что повышение температуры газа в генераторе с воздушным охлаждением может быть значительным.

Другая причина заключается в том, что **даже небольшое количество воздуха в узком пространстве между изоляцией и сердечником статора значительно снижает эффективность охлаждения.**

A1-103 Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах. JAN-HENRIK BRAAM, Siemens, Германия



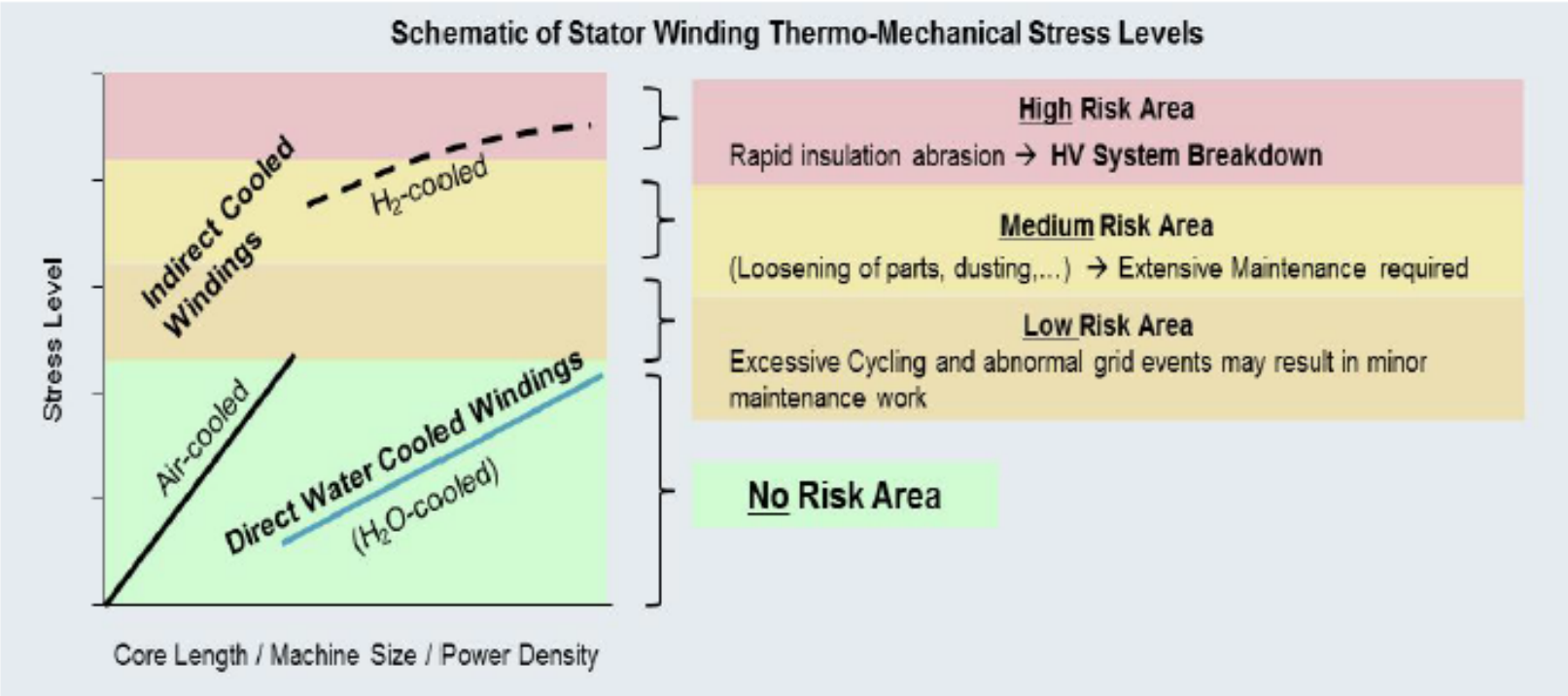
Электрогенерация в Германии в 2017 году

Доля возобновляемых источников энергии выросла до 38,5%

Современные условия эксплуатации генераторов, требования сетевых операторов приводят к **росту термомеханических напряжений в изоляции и креплениях обмотки и сердечника статора**, что увеличивает вероятность неожиданных сбоев и ускоряет старение генераторов. **Необходимо улучшить систему охлаждения**, ограничить разницу температур компонентов генераторов и **оперативно реагировать на изменение режима нагрузки**.

A1-103 Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах. JAN-HENRIK BRAAM, Siemens, Германия

Приведено описание новой линейки генераторов, статорные обмотки которых выполнены с водяным охлаждением, тогда как ротора и сердечники статоров имеют воздушное охлаждение. Такая конфигурация оборудования была выбрана с целью **минимизации механического износа и температурного старения обмоток** генераторов вследствие повышенного уровня циклической нагрузки в традиционном электрогенерирующем оборудовании, вызванного совместной работой с возобновляемыми источниками энергии с характерными периодическими изменениями нагрузки.

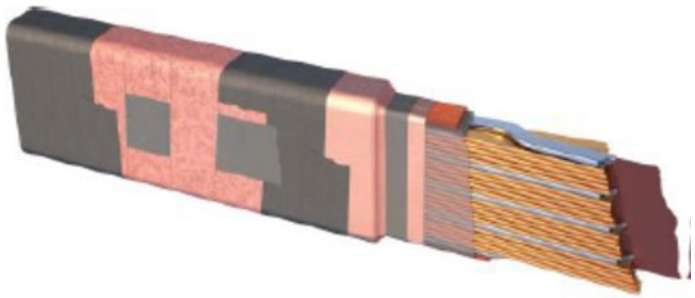


Термомеханические напряжения статорных обмоток с различным охлаждением

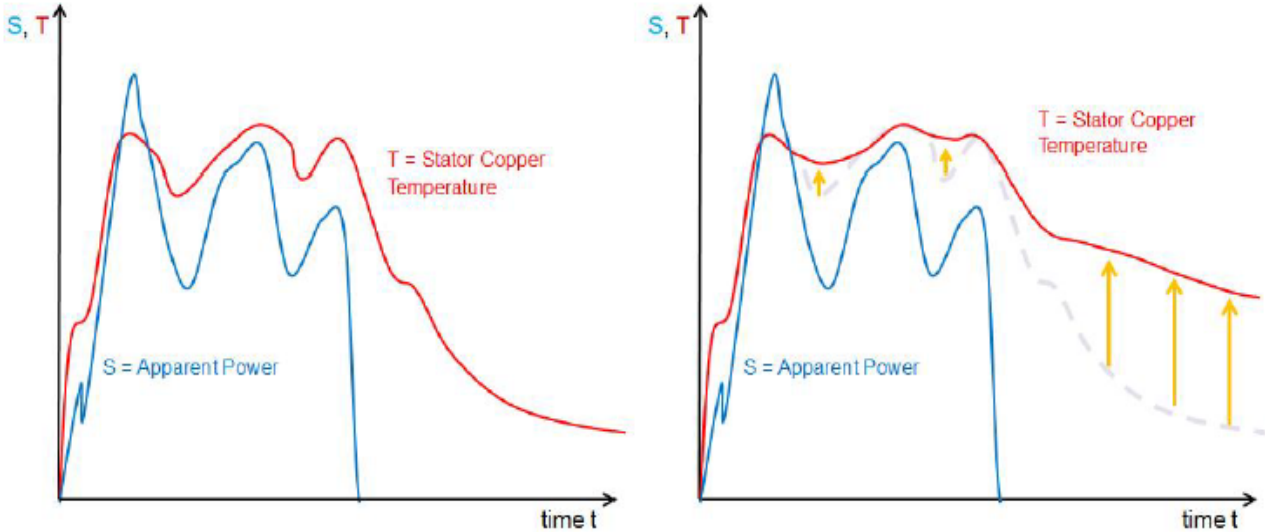
A1-103 Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах. JAN-HENRIK BRAAM, Siemens, Германия

С целью уменьшения циклических температурных изменений в обмотке статора была выбрана **система водяного охлаждения. Регулирование температуры холодной воды** необходимо ввиду малой тепловой постоянной времени.

Для оптимизации температурных режимов и эффективности, водяная система водяного охлаждения была спроектирована таким образом, чтобы предусмотреть возможность изменения эффективности охлаждения в зависимости от тока статора, в то время как **воздушная система находится под повышенным давлением** в соответствии с величинами тока ротора и коэффициента мощности.



Стержень с водяным охлаждением



Снижение изменения температуры обмотки во время быстрых изменений нагрузки защищает от термомеханических напряжений в изоляции и **более выгодно, чем абсолютная низкая общая средняя температура**

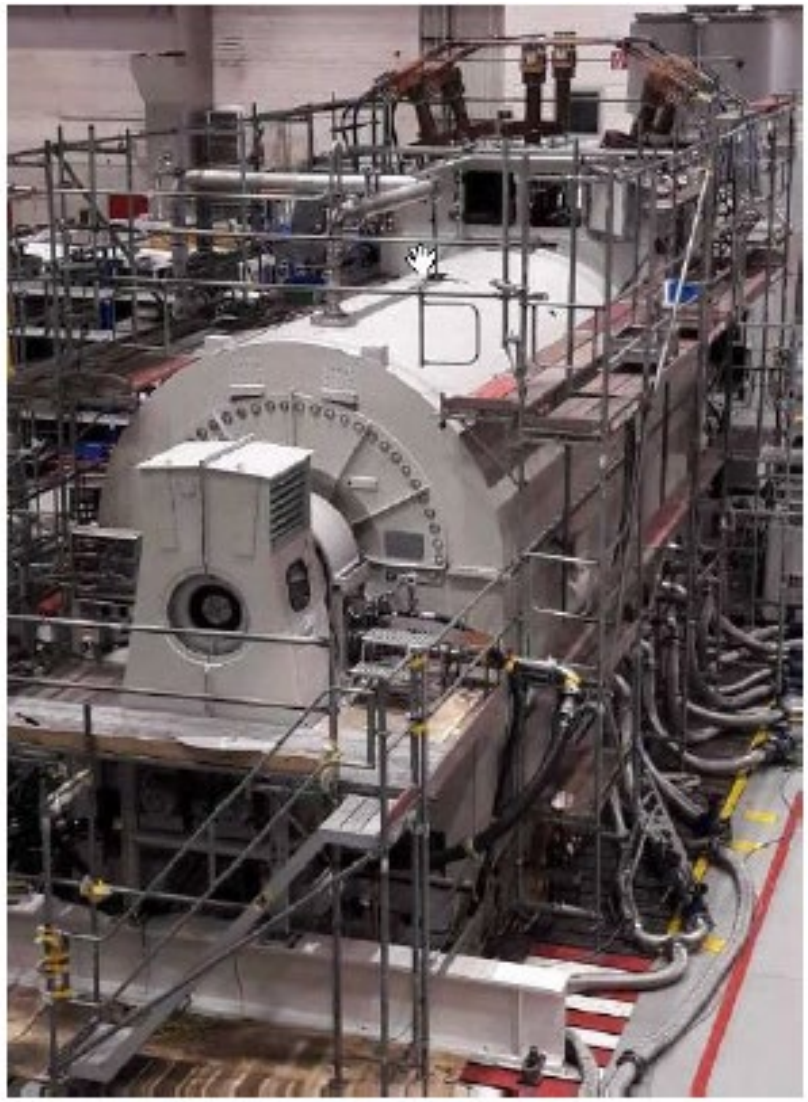
Снижение термических циклов регулированием температуры воды на входе в обмотку

A1-103 Разработка, тестирование и проверка новой линейки генерирующего оборудования для работы в существующих и перспективных эксплуатационных режимах. JAN-HENRIK BRAAM, Siemens, Германия

Для охлаждения сердечника и ротора подается воздух под давлением, что позволяет исключить использование водорода и соответствующих систем уплотнения вала, исходя из условий обеспечения безопасности, а также для уменьшения требований к техническому обслуживанию. Повышенная плотность повысит теплоемкость воздуха и теплопередачу и, следовательно, значительно уменьшит температуры компонентов генератора. Однако потери на газовое трение также возрастут и немного уменьшат КПД машины.

Согласно приведенным данным, первая установка была тестирована на заводе и продемонстрировала функциональные показатели в соответствии с ожиданиями и стандартами проектирования.

Предполагается выпустить линейку генераторов в диапазоне мощностей, которые в настоящее время в основном используются в конструкциях с полным косвенным воздушным и водородным охлаждением.



Новый генератор на стенде

A1-104 Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА)

P.CHAY,M.BUQUET,B.WANDAME,V.FERNAGUT,S.MAGOIS, GE, EDF Франция

Рассмотрены требования сетевых кодов:

1. Вариация напряжения и частоты

2. Изменение реактивной мощности

3. Коэффициент форсировки

4. Отношение короткого замыкания

Приведена оценка эксплуатационных проблем и воздействий, связанных с требованиями сетевого стандарта ENTSO-E к синхронным генераторам большой мощности (>800 МВА) для АЭС.

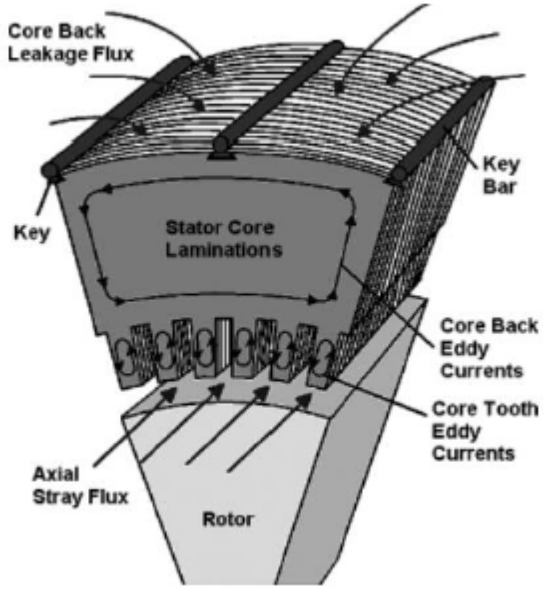
Исследованы:

- общие требования для электрогенерирующих модулей типа D (диапазоны напряжения и частоты),

- способность к поддержанию генераторного режима в случае возникновения отказов (FRT),

- более быстрая реакция системы возбуждения, стойкость к изменениям частоты в соответствии с заданной скоростью изменения частоты (ROCOF)

- способность поддержания генераторного режима при провале напряжения сети (LVRT).



Влияние магнитных потоков рассеяния на концевую зону сердечника статора

A1-104 Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА)

P.CHAY,M.BUQUET,B.WANDAME,V.FERNAGUT,S.MAGOIS, GE, EDF Франция

Изменение напряжения

Исследования показали диапазон изменения +7% -10%. Для пониженного напряжения допустимая нагрузка ограничивается системой охлаждения. Для повышенного напряжения ограничение по температуре обмотки возбуждения и по насыщению сердечника.

Одновременное изменение напряжения и частоты

- Индукция в сердечнике. Низкие частоты 47-475 Гц в комбинация с высоким напряжением приводит к существенному увеличению магнитного потока в ярме статора, повышению напряжении между сегментами и чрезмерному нагреванию ротора из-за большого тока и уменьшения скорости вращения ротора.

- Индукция и температура в концевой части обмотки статора и ротора. В концевой части сердечника кроме главного магнитного потока через воздушный зазор есть концевые эффекты сердечника и поток концевых частей обмотки. От дополнительного потока из-за перенапряжения и изменения частоты происходит дополнительное нагревание торцевой зоны. Необходимо снизить мощность или увеличить размеры генератора.

- Изоляция и срок жизни генератора. Повышение температуры изоляции на 10 градусов снижает срок службы изоляции приблизительно в два раза.

- Перенасыщение происходит при превышении допустимого отношения напряжения к частоте. Необходимо увеличить габариты генератора, что может привести к увеличению стоимости генератора и превышению транспортных габаритов, особенно для машин 2000 MVA и более.

A1-104 Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА)

P.CHAY,M.BUQUET,B.WANDAME,V.FERNAGUT,S.MAGOIS, GE, EDF Франция

Изменение реактивной мощности.

Растущая тенденция проектировать даже мощные ядерные генераторы для коэффициента мощности 0.85 и 0.8 вместо 0.9. Кроме увеличения габаритов повышаются требования к охлаждению – понижение температуры хладагента и давления водорода Изменения реактивной мощности ввиду термоциклирования ускоряют износ. Это подтверждено опытом эксплуатации EDF. Необходим дополнительный ремонт и обслуживание. Эти мероприятия увеличивают стоимость генератора и снижают КПД.

Длительная эксплуатация с увеличенным осевым магнитным потоком при недовозбуждении может значительно сократить срок службы сердечника статора. С учетом требований сетевых стандартов по реактивной нагрузке размеры сердечника должны быть увеличены.

Форсировка возбуждения.

Становятся стандартными требования коэффициента форсировки 2. Необходимы более крупные возбудители. Требуется достигнуть за 100 мс 95% разницу напряжения форсировки и номинального возбуждения, что влияет на трансформатор возбуждения в случае статических систем возбуждения.

Отношение короткого замыкания.

По ГОСТ IEC 60034-3 ОКЗ не менее 0.5, по С50.13 ОКЗ не менее 0.35. Высокий ОКЗ требует увеличения возбуждения, нагревают ротор и ограничивают номинальный коэффициент мощности генератора. На практике принимается достаточным ОКЗ не менее 0.4.

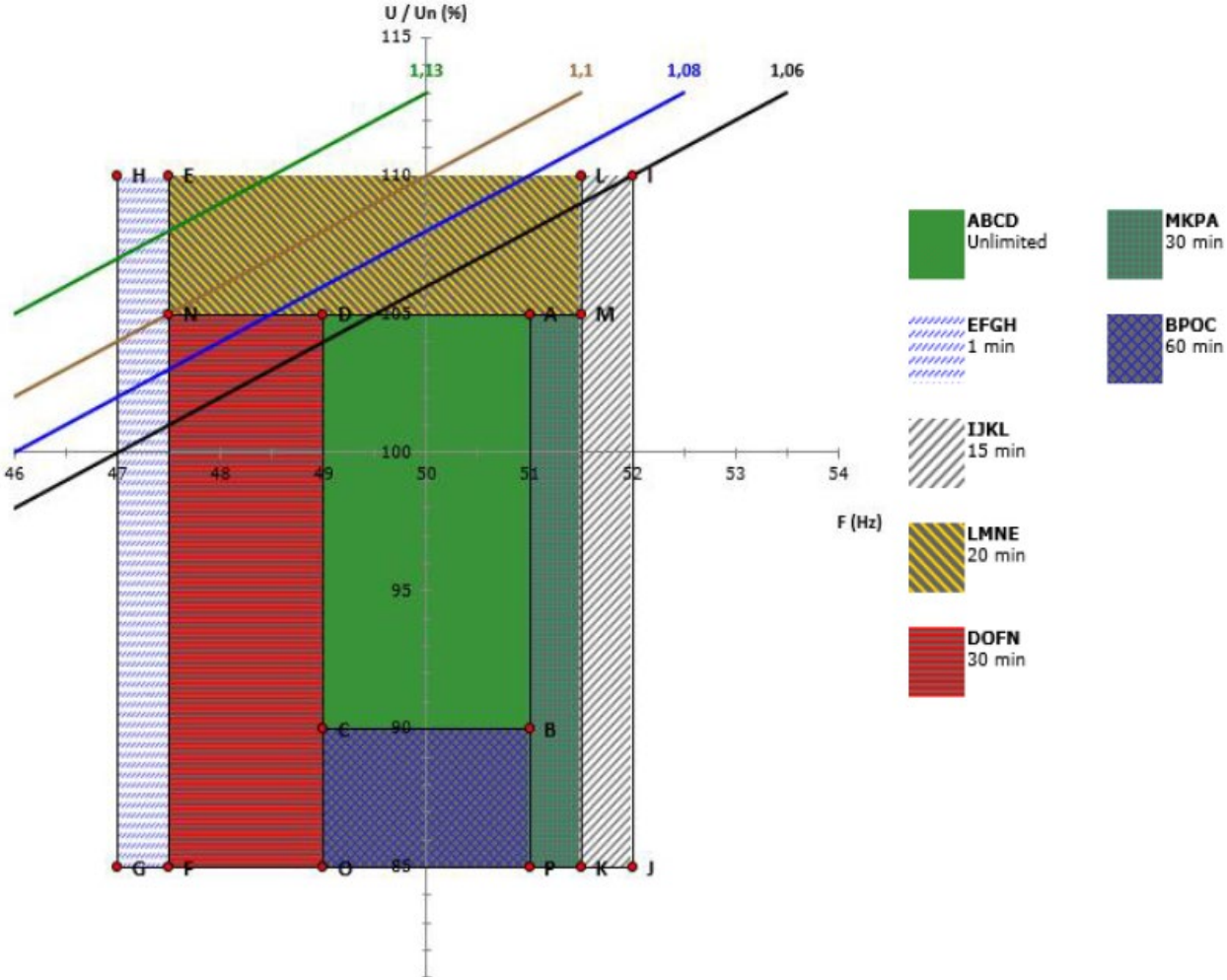
Чтобы обеспечить эти требования необходимо увеличить габариты генератора, что вызывает проблемы, например, с транспортировкой, изготовлением поковки ротора.

A1-104 Влияние развития сетевых стандартов на конструкцию генераторов для атомных электростанций (половинная скорость, мощность свыше 800 МВА)

P.CHAY,M.BUQUET,B.WANDAME,V.FERNAGUT,S.MAGOIS, GE, EDF Франция

По мере того, как рабочая точка перемещается от номинальных значений напряжения и частоты, может наблюдаться значительное повышение температуры сердечника статора генератора и обмотки возбуждения, что может привести к повреждению сердечника статора генератора и изоляции обмоток, оказывая тем самым негативное влияние на срок службы генерирующего оборудования.

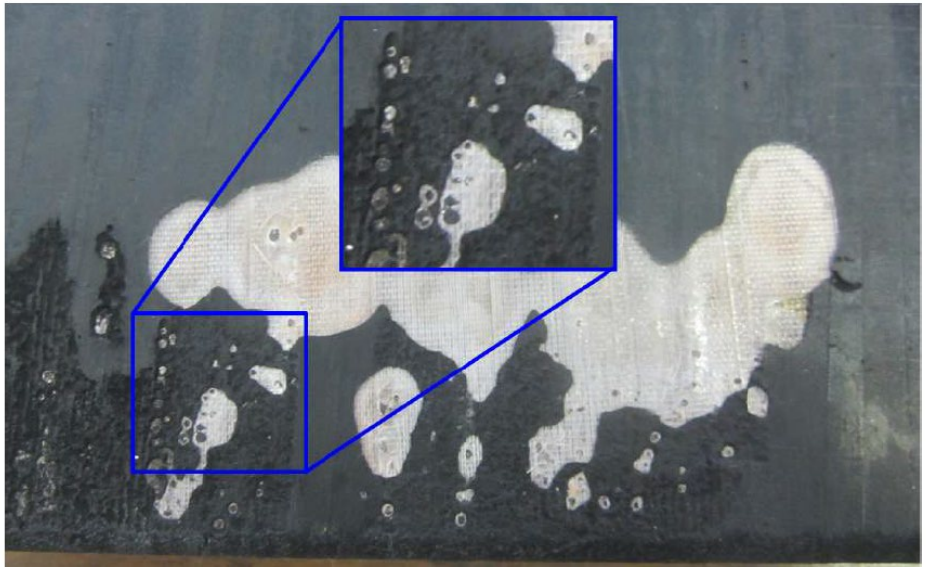
Таким образом, как правило, рекомендуется ограничить степень, длительность и частоту возникновения таких эксплуатационных условий.



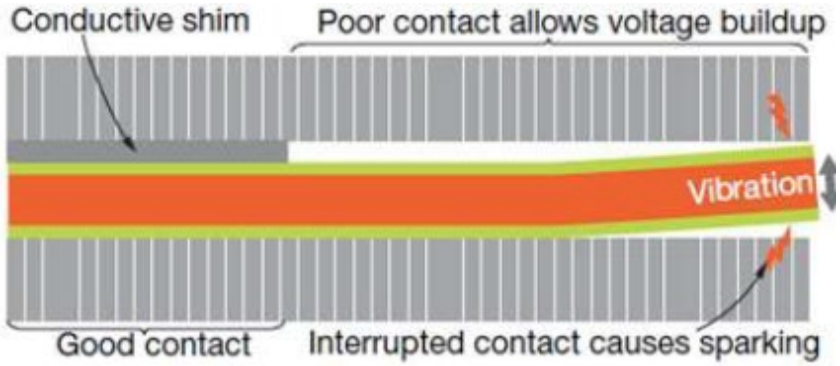
Отклонения напряжения и частоты генератора, подключенного к сети 400 кВ, в соответствии с европейскими нормами

A1-205 Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в генераторах с воздушным охлаждением для газовых турбин

P.KUNG, R.IDSINGA, G.DAILEY, O.SEZERMAN, L.ZOU, C.SPENCER, QPS Photronics, Oz Optics, Канада



Пятна повреждений изоляции на обмотке.
Выделены поры, образованные в проводящем покрытии



Концепция вибрационного искрения

Причины повреждений.

На поверхности изоляции статора появляются горячие точки, образованные контурами вихревых токов. Горячие точки снижают свойства изоляции, нарастают ЧР, разрушающие полупроводящее покрытие. Кроме того, основная изоляция также страдает от дефекта. Однако ЧР не обладают достаточной энергией, чтобы проколоть слюду корпусной изоляции.

При работе действует другой механизм: **вибрационное искрение**. Такой процесс обусловлен чрезмерной вибрацией в пазу, так что полупроводящее покрытие, создающее заземляющий контакт на статор, разрушается, высокое напряжение прикладывается к повреждениям на поверхности изоляции и **воздух пробивается с образованием плазмы**. С другой, вибрационной стороны, плазма теряет контакт со своим источником тока

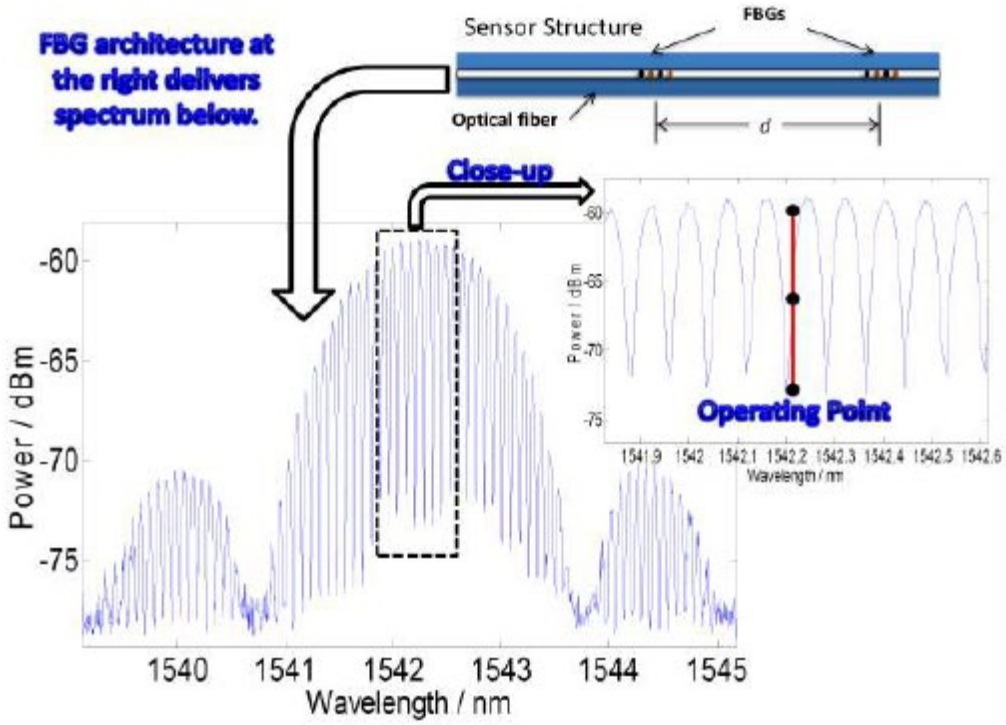
A1-205 Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в генераторах с воздушным охлаждением для газовых турбин

P.KUNG, R.IDSINGA, G.F.DAILEY, O.SEZERMAN, L.ZOU, C.SPENCER, QPS Photronics, Канада

Вибрационное искрение - это мощный источник электрического травления, в промышленном процессе используется для травления твердых материалов типа керамики.

Если этот процесс продолжается необнаруженным, корпусная изоляция вскоре будет разрушена по всей толщине, что приведет к незапланированному останову генератора.

Пример разрушения изоляции вибрационным искрением



Для одновременного контроля вибрации и температуры применяются оптоволоконные датчики, основанные на явлении интерференции.

На рисунке показана корреляция между оптоволоконной структурой и результирующим спектром.

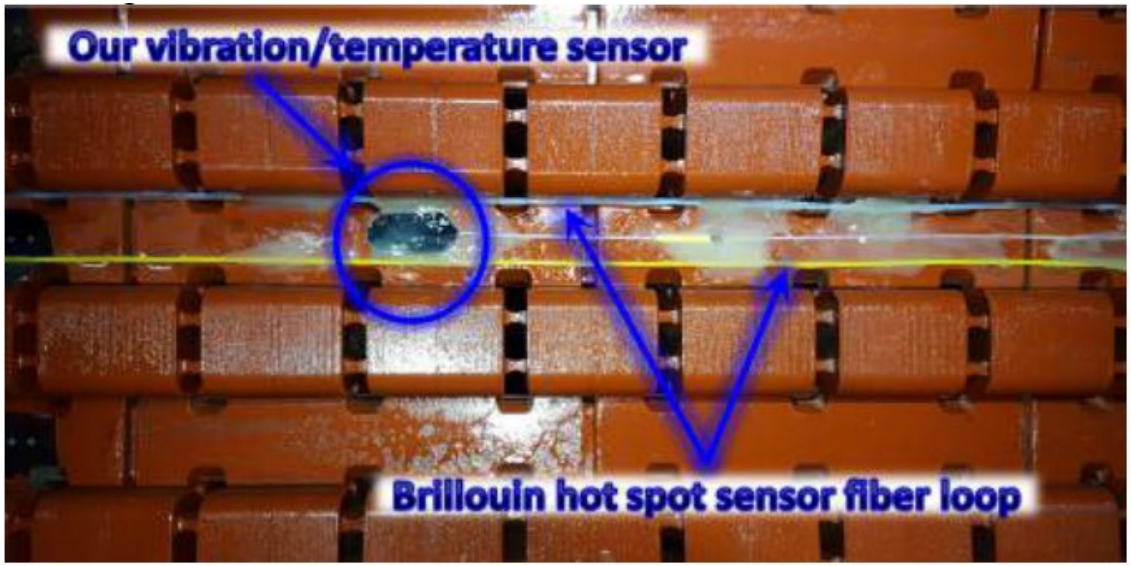
Проверена применимость оптоволоконного датчика для измерения деформаций и температуры в статических и динамических режимах.

A1-205 Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в генераторах с воздушным охлаждением для газовых турбин

P.KUNG, R.IDSINGA, G.F.DAILEY, O.SEZERMAN, L.ZOU, C.SPENCER, QPS Photronics, Канада

Load	Cold Air	Hot Air	Embedded	Av. Trough*	Av. Peak*
170 MVA	30.6˚C	64.4˚C	78.1˚C	63.9˚C	67.0˚C
119 MVA	28.6˚C	57.8˚C	64.1˚C	58.3˚C	61.3˚C
26 MVA	21.6˚C	45.6˚C	45.3˚C	49.9˚C	52.7˚C

Корреляция максимальных значений температуры по показаниям оптоволоконных датчиков и штатного теплоконтроля



Два оптоволоконных датчика установлены в различных точках стержня

Представлены результаты измерения вибрации и температуры, полученные с использованием оптоволоконных датчиков, установленных в генераторах с воздушным охлаждением для газовой турбины.

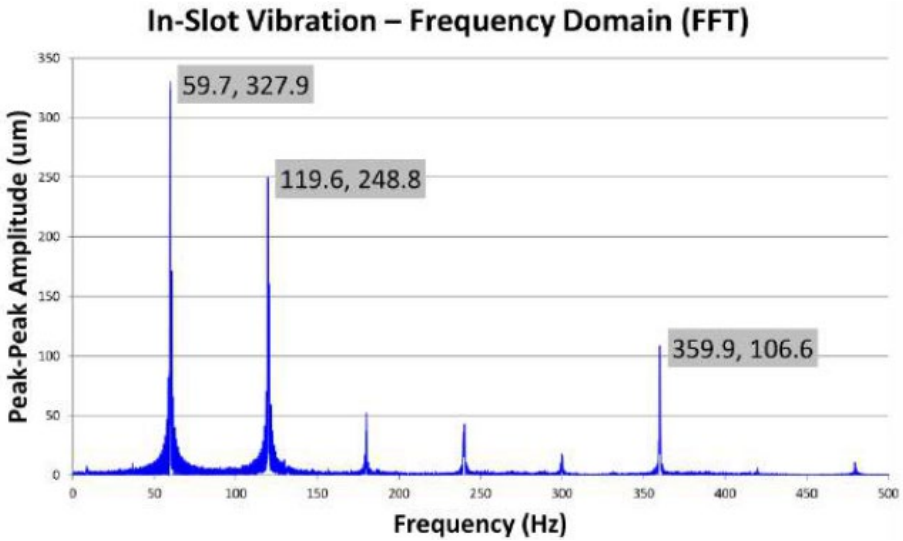
Получены данные измерений температуры в пазах и в концевых обмотках, а также параметры вибрации в изолирующих прокладках, выводах концевых обмоток и нейтральной выводной шине.

Наблюдалась хорошая корреляция измеренных температур между новым оптоволоконным датчиком, предназначенным для распределенного измерения температуры, и традиционными резистивными датчиками температуры, устанавливаемыми в пазах.

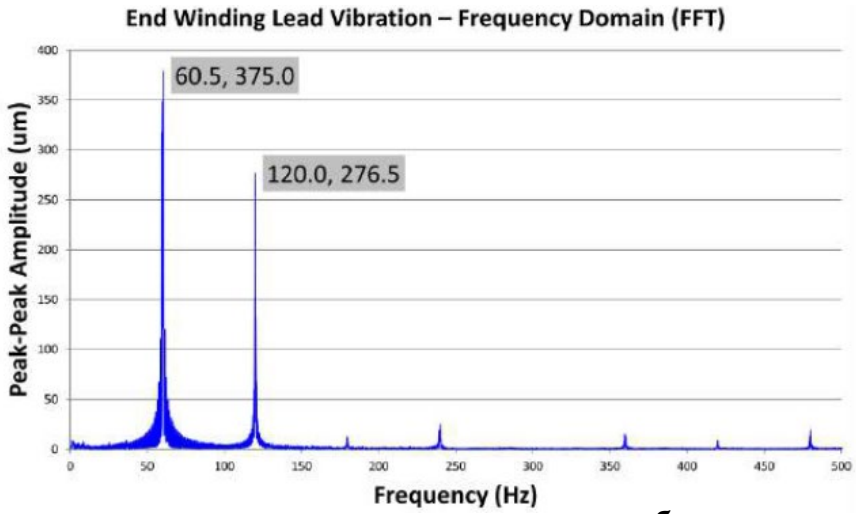
После успешного испытания на этом генераторе с воздушным охлаждением планируется дальнейшее тестирование на машине с водородной системой охлаждения.

A1-205 Использование современной оптоволоконной технологии для мониторинга вибрации в пазах и обнаружения мест локального перегрева в генераторах с воздушным охлаждением для газовых турбин

P.KUNG, R.IDSINGA, G.F.DAILEY, O.SEZERMAN, L.ZOU, C.SPENCER, QPS Photronics, Канада

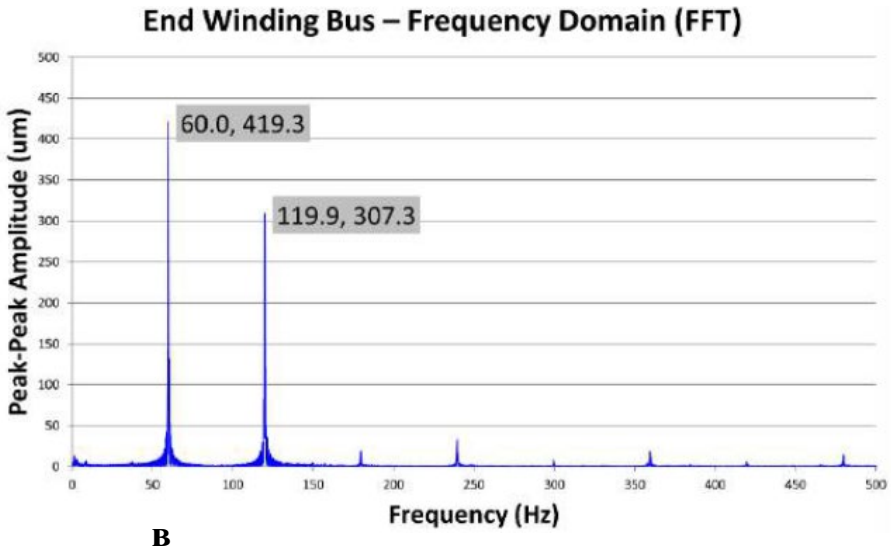


а



б

б



в

Частотные характеристики вибрации в пазу статора (а) в лобовой части ввода (б) и в соединительной шине (в)
Частоты от5 Гц до 2 кГц

Некоторые выводы и тенденции развития электромашиностроения

1. Фирмой Mitsubishi-Hitachi разработаны изолирующие материалы с высокой теплопроводностью, в 3 раза выше, чем у традиционных материалов. С их помощью в генераторах с косвенным водородным охлаждением до 900 МВА превышение температуры стержней статора снижено на 40-50%.

2. Показано, что применение высоко теплопроводной изоляции более эффективно для турбогенераторов с водородным охлаждением, чем для с воздушным охлаждением. Даже небольшое количество воздуха в узком пространстве между изоляцией и сердечником статора значительно снижает эффективность охлаждения.

3. Фирма Siemens при современных требованиях сетевых операторов из-за роста термомеханических напряжений в изоляции и креплениях обмотки и сердечника статора переходит к непосредственному водяному охлаждению обмотки статора в турбогенераторах, заполненных воздухом под давлением. В динамических режимах снижение изменения температуры обмотки более выгодно, чем абсолютная низкая общая температура.

4. По данным фирмы GE современные требования сетевых операторов приводят к увеличению габаритов сверхмощных четырехполюсных турбогенераторов, что вызывает проблемы, например, с изготовлением поковки ротора, железнодорожной транспортировкой турбогенератора.

5. Ввиду широко распространенной для турбогенераторов с воздушным охлаждением проблемы разрушения изоляции из-за вибрационного искрения фирма QPS Photronics предлагает устанавливать на обмотку одновременно оптоволоконные датчики вибрации и температуры.

6. В целом современные условия эксплуатации характеризуются ужесточением требований к разработке, эксплуатации, диагностике и контролю мощного генераторного оборудования.

Перспективы международного сотрудничества

Коллоквиум 2019 в Индии

Исследовательский комитет CIGRE SC-A1 - «Вращающиеся электрические машины» и Индийский национальный комитет CIGRE приглашают принять участие в Коллоквиуме CIGRE SC-A1 на тему «Вращающиеся электрические машины для производства электроэнергии», который состоится 22-28 сентября 2019 года в Нью-Дели, Индия. http://www.cigreindia.org/SCA1/

/ Регистрационный взнос 300 $ для участников плюс 150 $ за технический визит /

Предлагаемые темы для коллоквиума 2019

1 Сети с возобновляемыми источниками энергии

2 Опыт эксплуатации и новые разработки

От России представлены на экспертизу 2 доклада.

48 Сессия СИГРЭ 2020

Подготовлены и представлены доклады по комитету А1 на экспертизу.

Коллоквиум 2023 в России

«От имени Российского национального комитета CIGRE сообщаем, что будем рады принять коллоквиум SC A1 в России (Москва) в 2023 году. Уверены, что при взаимном сотрудничестве и поддержке коллег основных партнеров РНК СИГРЭ - Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, ИНТЕР РАО, Системного оператора и др. мы организуем Коллоквиум SC A1 на высоком уровне … с привлечением ведущих российских и международных экспертов.»

Уважаемые коллеги,

Спасибо за внимание