



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

109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817.  
ИНН 7704266666 / КПП 770501001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: [cigre@cigre.ru](mailto:cigre@cigre.ru)

## ОТЧЕТ

об участии в 45-й Сессии CIGRE и работе Исследовательского Комитета  
**A1 «Вращающиеся электрические машины» CIGRE,**  
25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовил:

Винницкий Юрий Данилович,

д.т.н., член CIGRE с 1991 г., постоянный представитель от России в Study Committee CIGRE “Rotating Electrical Machines” в 1992-2000 гг. (SC 11) и с 2010 г. по наст.вр. (SC A1), удостоен звания «Заслуженный член CIGRE» (CIGRE Distinguished Member) в 2002 г., Директор Электроэнергетических Программ (Director, Electrical Engineering Programs) GE EEM (General Electric Energy Engineering Moscow), бизнес-направление «GE Power & Water», Москва



Контактные данные:

E-mail: [yury.vinitzky@ge.com](mailto:yury.vinitzky@ge.com)

Тел. +7 (495) 514-17-44, Факс +7 (495) 514-17-21.

Дата отчета:

27.10.2014

Москва, 2014 год

## Оглавление

1. Вступление.....	3
2. Сессия докладов .....	3
3. Предпочтительная тема 1 «Разработки вращающихся электрических машин».....	4
3.1. Совершенствование конструирования и технологии изготовления.....	4
3.2. Влияние технических требований Заказчика и системных операторов.....	9
4. Предпочтительная тема 2 «Управление сроком службы генераторов» .....	13
4.1. Модернизация, замена и увеличение мощности генераторов.....	13
4.2. Влияние крутильных колебаний на усталость роторов генераторов .....	13
4.3. Анализ и предотвращение повреждений.....	15
5. Предпочтительная тема 3 «Вращающиеся машины для распределенной генерации».....	16
6. Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии .....	17
Заключение.....	18
Приложение.....	19

## 1. Вступление

СИГРЭ является некоммерческой неправительственной организацией, основанной в Париже в 1921 году. В состав СИГРЭ входят 89 стран, в том числе включающих 58 Национальных Комитетов, 1078 компаний, Университетов и исследовательских организаций мира. Всего в структуре СИГРЭ действуют 16 Исследовательских Комитетов (Study Committees, SC).

К предметной области SC A1 «Вращающиеся Электрические Машины» относятся вопросы, связанные с созданием, эксплуатацией, жизненным циклом, ремонтами генераторов и мощных двигателей для различных механизмов на электрических станциях и их применения для генерации электрической энергии.

Деятельность SC A1 ведется по четырем основным направлениям:

- Турбогенераторы;
- Гидрогенераторы;
- Нетрадиционные генераторы (для ветроустановок, дизель-генераторов и т.д.);
- Специальные двигатели.

## 2. Сессия докладов

В работе сессии докладов A1 участвовало 150 делегатов. Для сравнения в сессии в 2012 году приняли участие 126 делегатов.

Всего было представлено 19 докладов, перечень см. в Приложении.

По предпочтительной теме 1 «Разработка электрических машин» представлено 10 докладов, которые были сгруппированы по двум категориям для дискуссии:

- Улучшения и разработки в области конструирования и изготовления – 8 докладов;
- Учет влияния требований Заказчиков и требований со стороны энергосистем – 2 доклада.

В процессе дискуссии сделано 16 дополнительных специально подготовленных сообщений по рассматриваемой теме. Кроме того, сделан ряд сообщений с мест. В сообщениях и выступлениях затронуты темы:

- Использование математических моделей и аналогичных методов – 5 сообщений;
- Улучшение конструкции и совершенствование технологии изготовления – 7 сообщений;
- Влияние требований Заказчика и операторов энергосистем – 4 сообщения.

По предпочтительной теме 2 «Управление сроком службы генераторов» представлено 8 докладов, которые были сгруппированы по трем категориям для дискуссии:

- Модернизация и замена оборудования, увеличение мощности, повышение эффективности – 2 доклада;
- Влияние крутильных колебаний на усталостные свойства роторов генераторов – 1 доклад;
- Анализ повреждаемости – 2 доклада;
- Сбор данных и анализ – 3 доклада.

В процессе дискуссии сделано 13 дополнительных специально подготовленных сообщений по рассматриваемой теме. Кроме того, сделано 10 сообщений с мест. В сообщениях и выступлениях затронуты темы:

- Модернизация и замена – 3 сообщения;
- Влияние торсионных колебаний на усталостную прочность – 2 сообщения;
- Вибрации лобовых частей статоров генераторов – 4 сообщения;
- Сбор и анализ данных – 4 сообщения.

По предпочтительной теме 3 «Вращающиеся машины для дисперсной генерации» представлен только 1 доклад, по которому состоялась заинтересованная дискуссия и полемика с докладчиком.

### **3. Предпочтительная тема 1 «Разработки вращающихся электрических машин»**

#### **3.1. Совершенствование конструирования и технологии изготовления**

##### **3.1.1 Использование математических моделей и других подобных методов**

**Доклад А1-101 (Канада)** описывает новый метод определения КПД отремонтированного асинхронного двигателя без необходимости использования динамометрических испытаний. Метод основан на использовании некоторых измеренных базовых электрических величин как при неподвижном роторе так и при испытаниях в режиме холостого хода и использовании этих измерений совместно с данными на шильдике двигателя. Разработанный алгоритм проверен на небольших АД и позволил создать удобную программу. Эта программа использована в процессе испытаний 192 двигателей и подтвердила свою работоспособность.

**Доклад А1-103 (Аргентина)** посвящен вопросам оптимизации системы охлаждения гидрогенератора на базе использования CFD анализа. Проверка разработанной методики осуществлялась при сопоставлении с результатами лабораторной модели, выполненной в определенном масштабе. Использо-

ние таких «масштабированных» моделей является признанной практикой при анализе систем вентиляции.

**Доклад А1-105 (Бразилия)** описывает результаты разработки математических моделей, позволяющих оценить возможные проблемы с изоляцией обмоток при перенапряжениях в системе. Типичный источник таких воздействий – разряд молнии либо переключения в энергосистеме. Сопоставительный анализ применения предложенной методики для моделирования линий передач дал хорошие результаты.

Отмечено, что в большинстве случаев Потребитель или его консультанты проводят расчет уставок защиты от перенапряжений. Этот документ анализируется затем Оператором энергосистемы и утверждается. В отчете EPRI «Защита от перенапряжений генераторов» представлен анализ мировых решений 80-х годов для американских и канадских энергетических компаний. В настоящее время уставки защит от перенапряжений на электрических машинах нормируются IEEE Std C62.21.

**Доклад А1-111 (Испания)** описывает результаты использования модульной конструкции ротора генератора с постоянными магнитами и влияние такой конструкции на характеристики генератора. Генераторы с постоянными магнитами находят все большее применение в прибрежных ветроустановках главным образом за счет повышенной надежности. Однако традиционные генераторы особенно большой мощности создают транспортные проблемы в виду их больших габаритов. Модульная конструкция статора и ротора позволяет решить эту проблему.

В докладе содержится анализ влияния модульной конструкции ротора на электрические характеристики синхронного генератора: ЭДС, номинальное напряжение, номинальная активная мощность, а также на механические характеристики (момент от зубцовых гармонических помех поля). Рассматривается влияние четного и нечетного количества магнитов на полюс, а также влияние увеличения количества магнитов на модуль. Анализ проведен с использованием конечно-элементного анализа Flux 2D.

Основные характеристики генератора представлены на рисунке 1.

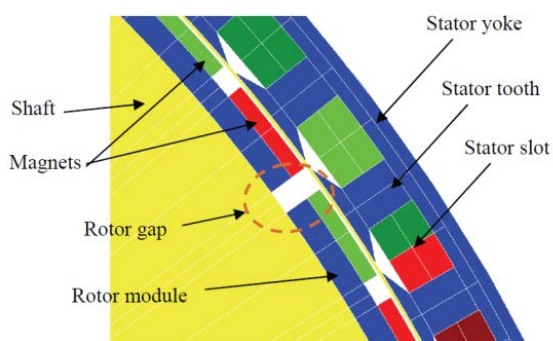


Рисунок 1. Характеристики синхронного генератора с постоянными магнитами и радиальным потоком

Параметр	Величина	Единицы
Номинальная мощность	2400	kW
Номинальная скорость	10	Об/мин
Номинальное напряжение	2.019	kV
Количество пар полюсов	40	

Результаты конечно-элементного анализа зубцовых гармоник момента приведены на рис.2.

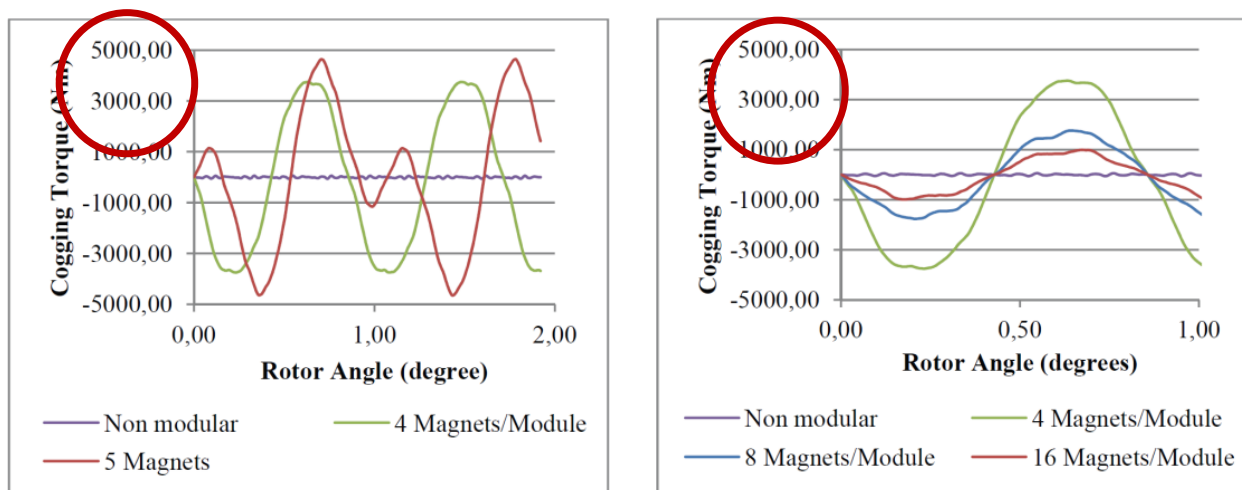


Рисунок 2. Зубцовые пульсации момента в зависимости от модульности ротора

Из анализа приведенной зависимости следует, что при модульной компоновке ротора появляется новая гармоническая компонента, амплитуда и период которой зависят от числа модулей ротора и от соотношения числа пазов и количества модулей ротора. Амплитуда этой компоненты увеличивается с ростом числа модулей и четное соотношение магнитов/модуль создает большую по величине амплитуду по сравнению с нечетным количеством модулей. Практически эти проблемы пока не были выявлены авторами, поскольку рассматриваемая конструкция генератора находится еще на стадии проектирования. Расчеты показывают и возможность возникновения резонансных частот, зависящих от числа пазов, количества магнитов и количества модулей ротора. Разработанные методики дают возможность при анализе произвести оптимизацию конструкции.

### 3.1.2 Другие улучшения конструкции и технологии изготовления

**Доклад A1-102 (Аргентина-Бразилия)** описывает результаты испытаний высокоэффективных электрических двигателей при небалансе или искажении формы напряжения, а также при изменении величины нагрузки двигателя. Разработанный метод используется авторами для анализа двигателей при пониженном импедансе обратной последовательности.

**Доклад A1-109 (Индия)** описывает некоторые потенциальные проблемы регулируемого электропривода при воздействии скачков коммутационных напряжений на изоляцию обмотки двигателя. Даются рекомендации по правильному выбору типа двигателя и электрической прочности изоляции при его использовании в составе регулируемого электропривода.

**Доклад A1-108 (Франция/Швейцария)** описывает проект изготовления сварного ротора крупного четырехполюсного генератора при условии



обеспечения его механической прочности на уровне, соответствующем цельным роторам. Прототип сварного ротора для турбо-генератора 900 МВт атомной электростанции находится в эксплуатации с 2013 года. Несколько интересных рисунков приведены ниже.

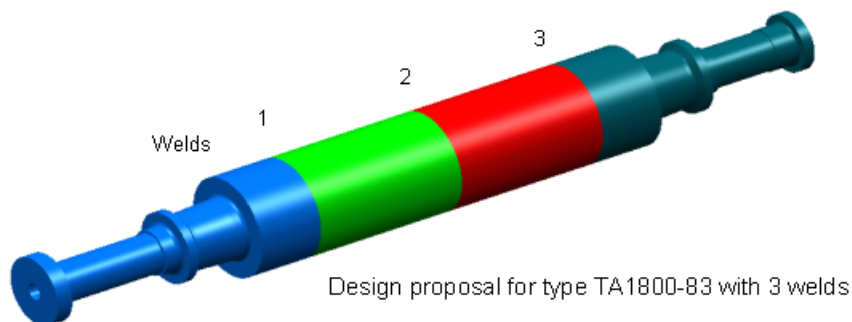


Рис.3.

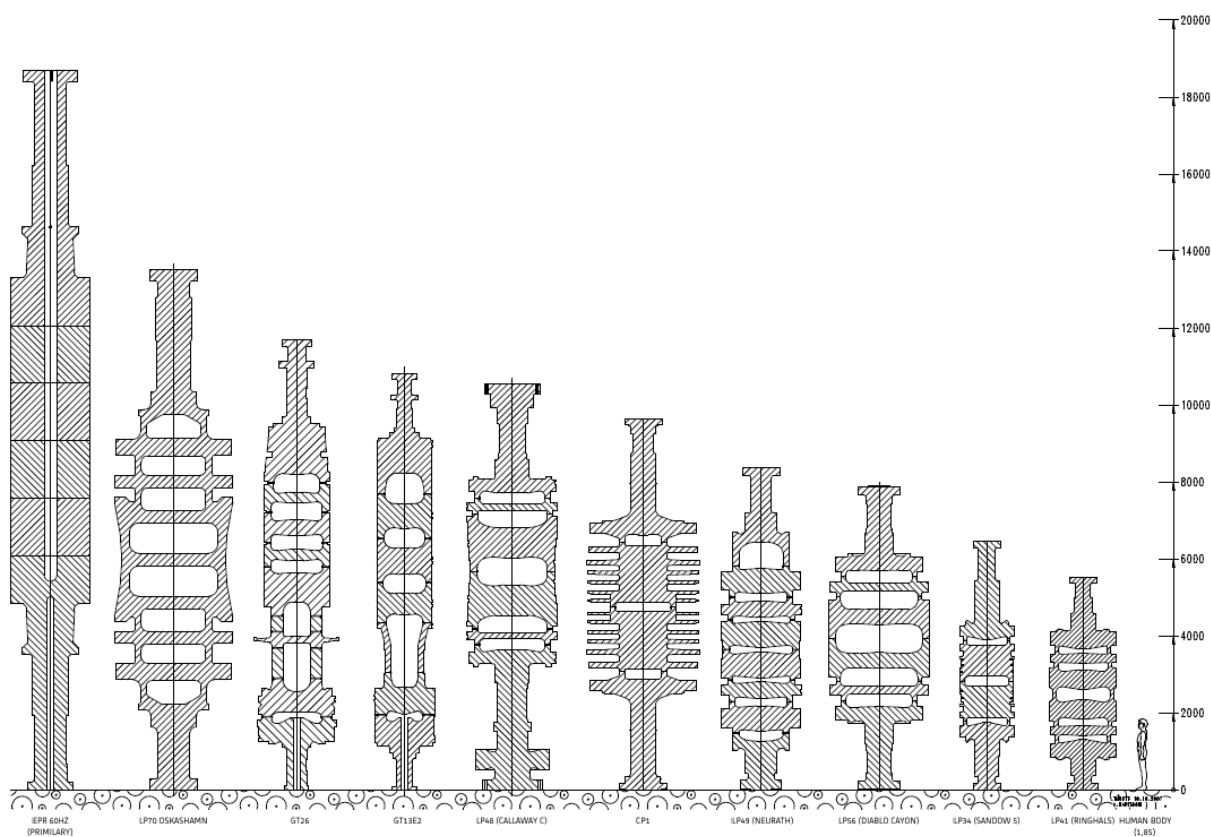


Рис. 4

В процессе обсуждения был сделан ряд комментариев.

Интерес к таким конструкциям возник с 2008 года. В то время казалось, что изготовить цельную поковку ротора весом 280 тонн не представлялось возможным или требовало очень длительного времени (3-4 лет). Таким образом, риск остаться без ротора при планировании ремонтов был выше, чем технический риск от использования сварной конструкции с возможным теоретически снижением сроков его эксплуатации.

Авария на Фукусиме изменила подход к конструкции ротора. Срок задержки поставки запасного ротора стал принципиально важным и поэтому теперь два подхода (моноблочный или сварной) к конструкции ротора имеют право на существование. Выбор определяется экономическими соображениями, связанными в том числе, со сроками поставки запасного ротора той или иной конструкции.

**Доклад A1-113 (Япония)** посвящен преимуществам и причинам использования гидрогенераторов с переменной частотой вращения для гидроаккумулирующих станций на примере агрегата мощностью 467MVA/460 MW.

Самый большой в митре гидроагрегат ГАЭС с переменной скоростью был установлен в Токио Electric Power Company (TEPCO) Kazunogawa Unit.4. Блок был введен в эксплуатацию 09 июня 2014 года и работает нормально.

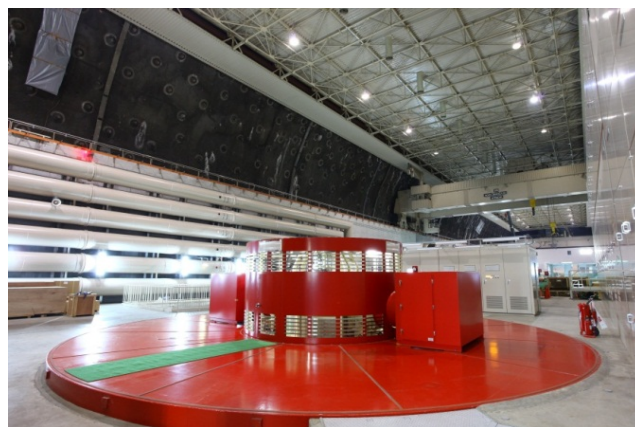
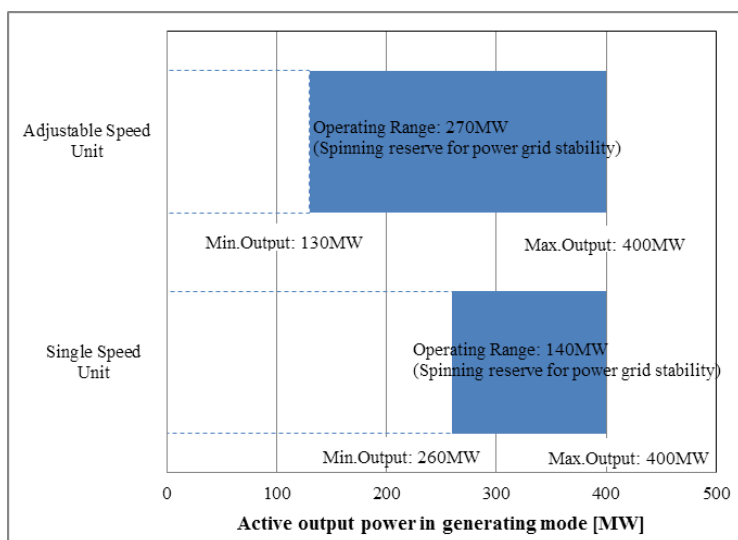


Рисунок 5. Гидроагрегат Kazunogawa unit.4

В настоящее время в Японии после трагедии на Фукусиме все атомные блоки выведены из эксплуатации, и поэтому роль обратимых гидроагрегатов большой мощности чрезвычайно велика, особенно для покрытия максимумов нагрузки (пиковых нагрузок).



Как показано на Рис. 6, блок 4, работающий в режиме с переменной частотой вращения, имеет весьма широкий диапазон регулирования мощности 130 МВт – 400 МВт в режиме генерирования, тогда как блоки с постоянной частотой вращения могут обеспечить режим 260 МВт – 400 МВт.

Такая операционная гибкость высоко оценивается генерирующими компаниями и системными операторами.



### 3.2. Влияние технических требований Заказчика и системных операторов

Доклад A1-104 (Колумбия) рассматривает возможность создания практической процедуры для построения реальной кривой реактивной мощности для генераторов энергосистемы Колумбии. Уточнение подходов к построению этой кривой – только один из шагов, направленных на более полное удовлетворение требований системного оператора.

Наиболее интересным был комментарий представителя компании Siemens, который обратил внимание на имеющуюся тенденцию перевода старых турбоагрегатов из базового в маневренный режим и связанные с этим проблемы продления их ресурса. Эта тенденция показана на Рис.7, построенном на основании обследования 32 электрических станций в Западной Европе.

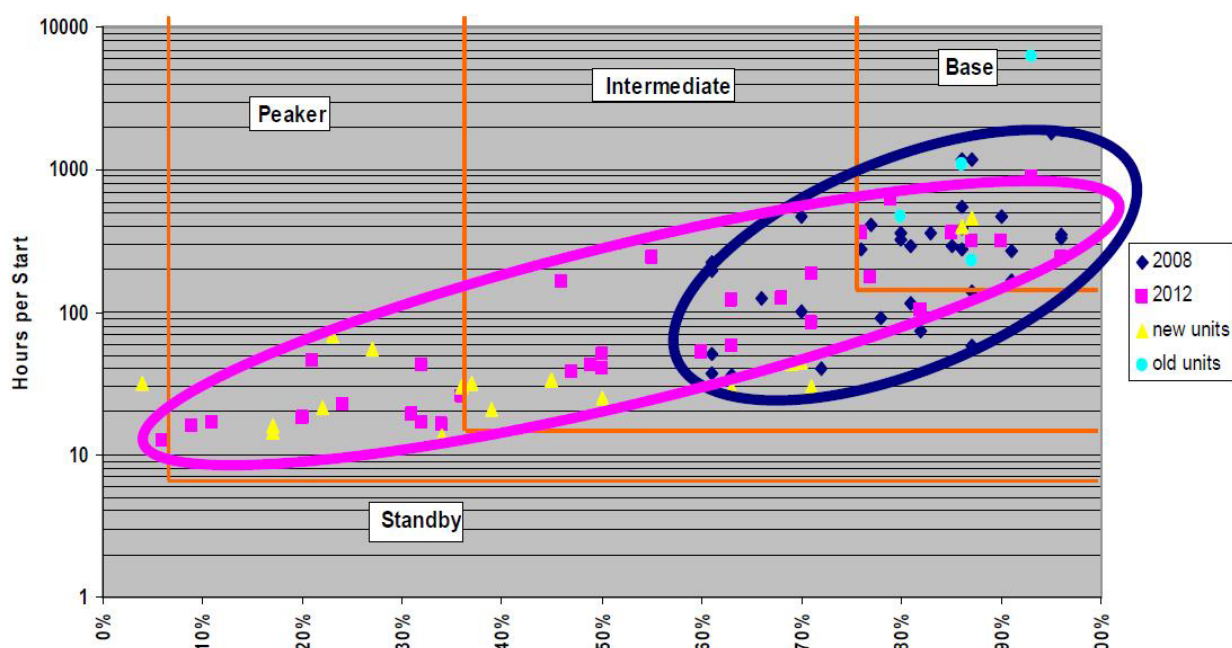


Рисунок 7. Изменение режима работы 32 электрических станций в Западной Европе в период 2008-2012 гг.

Переход от базового режима к режиму переменной нагрузки приводит к повышенным механическим напряжениям почти всех компонентов генератора (в частности, статорных обмоток) и соответственно к ускорению старения и износа генератора. Это требует повышенного внимания к операционному обслуживанию таких генераторов.



Кроме того, такие изменения режимов влекут за собой и появление дополнительных требований со стороны системного оператора.

Режимам переменной нагрузки характерны (по сравнению с базовыми режимами):

- 1) повышенный диапазон изменения частоты сети (47.5 – 51.5 Hz) и более высокие отклонения напряжения (85 % - 115 % номинального напряжения);

- 2) риск магнитного насыщения сердечника статора (появление «горячих пятен»);
- 3) увеличенный ток ротора – перегрев обмотки;
- 4) частые пуски-остановы турбо-агрегатов:
  - нагрев и охлаждение компонентов;
  - термоциклирование обмоток и сердечника, приводящее к ускоренному старению;
- 5) быстрое изменение нагрузки при высоких градиентах изменения токов статора и ротора до 24 % от номинальной нагрузки:
  - быстрое расширение и сжатие медных обмоток;
  - термо-механические напряжения.
- 6) более длительное время восстановления после коротких замыканий вплоть до 250 миллисекунд:
  - существенно большие крутильные колебания на валах турбо-агрегатов;
  - риск появления трещин на роторных фланцах.

Управление сроком службы старых генераторов при переводе их из режима базовой нагрузки в маневренный режим требует выполнения следующих шагов:

**Life time extension management for old generators when shifting from former base load into new peak load operation**

- 1 Prepare residual life time and technical risk assessment study  
→ Utility together with OEM
- 2 Plan optimized maintenance activities based on financial risks (forced outage and amount of damage) → Predictive maintenance
- 3 Make long term refurbishment (identified components) or replacement decision based on financial asset management
- 4 Install online monitoring tools and a supervising remote diagnostic system for early warning of incipient damage → Sudden outage risk mitigation
- 5 Plan risk based predictive maintenance strategy depending on operational stress factor – peak / medium / base load operation

1. Провести оценку остаточного срока службы и оценку риска – выполняет Пользователь совместно с изготовителем генератора.

2. Разработать план оптимизации обслуживания блока, основанный на оценке финансовых рисков (аварийные ремонты, количество повреждений) – Контроль по состоянию.

3. Реализовать долгосрочную модернизацию (определить необходимые запасные части) или разработать решения по замене, основанные на экономическом анализе.

4. Установить on-line мониторинг и удаленную диагностическую систему для раннего предупреждения возможных повреждений – Устранение риска возможных аварий.

5. Планировать превентивное обслуживание на базе оценки рисков зависящее от режима работы агрегата – пиковый, умеренный, базовый.

**Доклад A1-112 (Италия)** поясняет, почему Итальянский Системный Оператор выбрал синхронные компенсаторы для HVDC подстанции в Сардинии вместо статических компенсаторов реактивной мощности.

Местная система энергоснабжения содержит большое количество возобновляемых источников электроэнергии, покрывающих почти 110 % пиковой нагрузки (ветряные и солнечные установки). Системный оператор считает, что это может создать проблемы для безопасного регулирования напряжения и устойчивости и именно поэтому были проведены соответствующие исследования.

В некоторых странах в настоящее время имеет место ренессанс использования вращающихся машин для компенсации реактивной мощности. Так Voith Hydro Inc. участвует в разработке двух крупных проектов в Канаде в качестве потенциального поставщика синхронных компенсаторов.

Newfoundland и Labrador, Canada:

- Nalcor планирует построить вставку постоянного тока длиной 1100 км;
- Voith Hydro планирует поставить для этой вставки три синхронных компенсатора 175 МВА каждый с высоким моментом инерции и в комплекте со всем необходимым вспомогательным оборудованием.

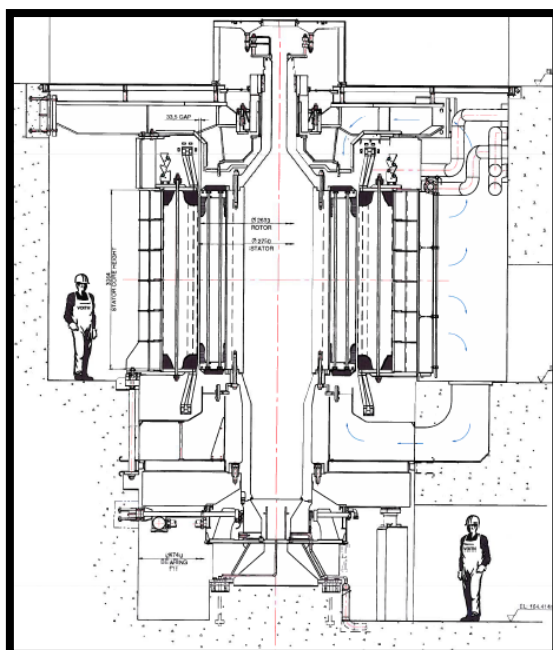
Manitoba, Canada:

- Manitoba Hydro в настоящее время создает Bipole III высоконадежную межсистемную связь, которая включает в себя дополнительно новую линию постоянного тока 500 кВ;
- Voith Hydro приглашена для подготовки технико-коммерческого предложения в качестве потенциального поставщика четырех новых синхронных компенсаторов по 250 МВАр с полным комплектом вспомогательного оборудования.

**Технические решения по синхронным компенсаторам.**

А: Конструкция Voith SC для Nalcor.

Требования к постоянной инерции равной 7,92 сек обусловило создание компенсатора вертикального исполнения с воздушным охлаждением с числом полюсов, равным 8, и аналогичным типовой конструкции гидрорегенератора.

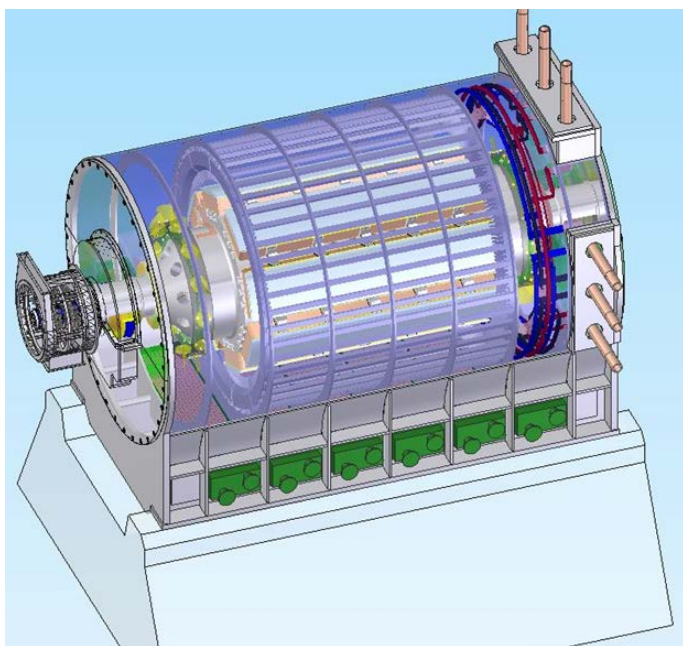


Layout overview		
Rated Output	175	MVA <sub>r</sub>
Rated Voltage	15	kV
Rated current	6736	A
Frequency	60	Hz
Power Factor	0.00	
Rated Speed	900	RPM
Over-speed	1080	RPM
Stator ID	2750	mm
Inertia (H)	7.92	s
Stator weight	160	t
Rotor weight	130	t

Рисунок 8. Конструкция Voith SC для Nalcor

#### В: Конструкция Voith SC для Manitoba Hydro.

По результатам оценки критериев, предъявляемых Manitoba Hydro в части потерь и использования водородного охлаждения, фирма предложила четыре высокоскоростных синхронных компенсатора с явно выраженными полюсами, с водородным охлаждением и горизонтальным исполнением.



Layout overview		
Rated Output	250	MVA <sub>r</sub>
Rated Voltage	16	kV
Rated current	9021	A
Frequency	60	Hz
Power Factor	0.00	
Rated Speed	1200	RPM
Overs-peed	1440	RPM
Stator ID	2450	mm
Inertia (H)	2.5	s
Stator weight	250	t
Rotor weight	160	t

Рисунок 9. Конструкция Voith SC для Manitoba Hydro

Преимущества синхронных компенсаторов с явно выраженными полюсами:

- обеспечение поддержания заданного уровня напряжения;
- обеспечение устойчивости энергосистемы (инерционность);
- легкость обслуживания;
- высокая готовность;
- гибкость технических решений, которые легко применить под различные технические требования.

## **4. Предпочтительная тема 2 «Управление сроком службы генераторов»**

### **4.1. Модернизация, замена и увеличение мощности генераторов**

**Доклад А1-110 (Индия)** посвящен опыту работы энергетической компании в Индии со статическими и бесщеточными системами возбуждения. Рассмотрены критерии сравнения этих систем. Рассмотрены проблемы аварийности обеих систем, причины аварийности, вопросы замены диодов в бесщеточных системах возбуждения, рассмотрен необходимый состав запчастей по системам возбуждения. Приведена сопоставительная таблица, сравнивающая плюсы и минусы обеих систем. Сделан выбор относительно предпочтительности использования статических систем возбуждения по крайней мере для генераторов средней и большой мощности.

**Доклад А1-207 (Украина)** посвящен анализу проблем осевой вибрации сердечников статоров в процессе работы, возникающих в результате электромагнитных эффектов, приводящих к снижению электрической и механической целостности. 60-летний опыт эксплуатации генераторов в диапазоне мощностей 100 МВт в 50-х до 200-300 и даже 1000 МВт в недавние годы подтверждает наличие этой проблемы. В докладе приводится объяснение данного явления и рекомендовано усилить жесткость сердечника для противодействия осевым вибрациям.

### **4.2. Влияние крутильных колебаний на усталость роторов генераторов**

**Доклад А1-107 (Китай)** описывает механизм подсинхронного резонанса на валопроводе турбо-агрегата, вызываемого при быстром регулировании режимов в энергосистеме с помощью использования быстродействующих электронных регуляторов. Наиболее существенно это явление при использовании управляемой последовательной компенсации для длинных линий передач и вставок постоянного тока, а также высоковольтных преобразователей для мощных электроприводов. Наряду с оптимизацией параметров системы регулирования авторы проанализировали возможность применения дополнительных функциональных блоков для подавления уровня возмущения создаваемого крутильными колебаниями. Предложены специальные демпферные устройства для систем возбуждения генераторов, либо даже на зажимах ста-



торов генераторов, основанные на непосредственном измерении скорости валопровода в качестве параметра регулирования.

Измерение скорости позволяет оценить подсинхронные моменты валопровода и тем самым помочь уменьшить сокращение сроков службы оборудования. Исследования показывают, что валопровод генератора имеет множество частот колебаний, выявление которых позволяет грамотно настроить полосовые фильтры для демпфирования этих колебаний. Пример показан на рисунках 10 и 11.

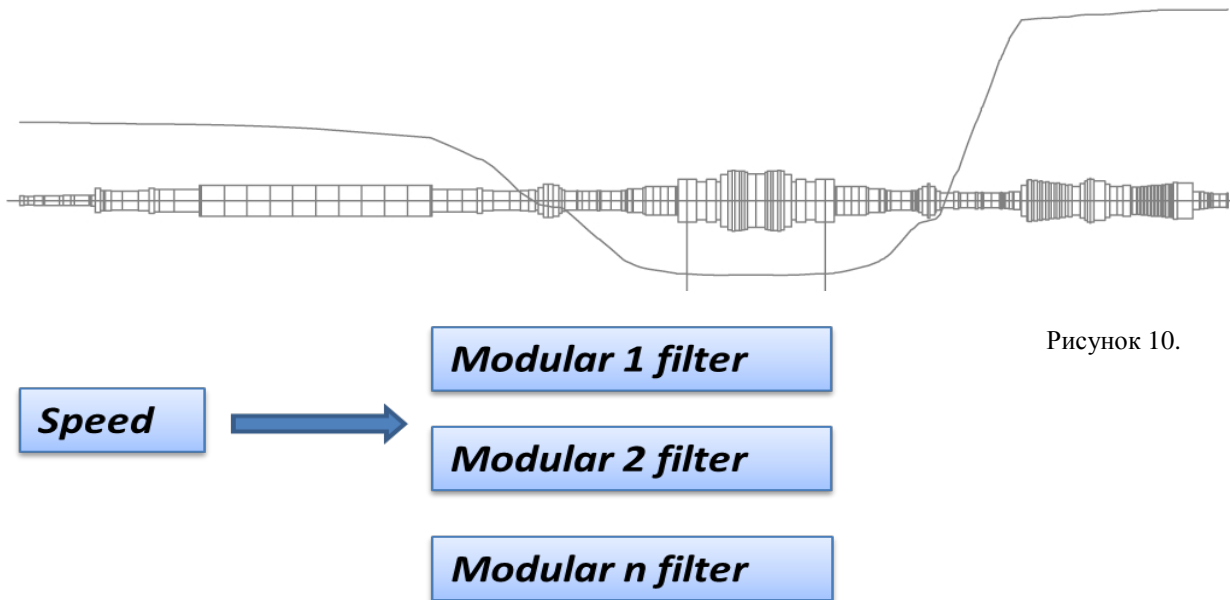


Рисунок 10.

Имея частоту колебаний и режим колебаний можно вычислить моменты выносливости валопровода.

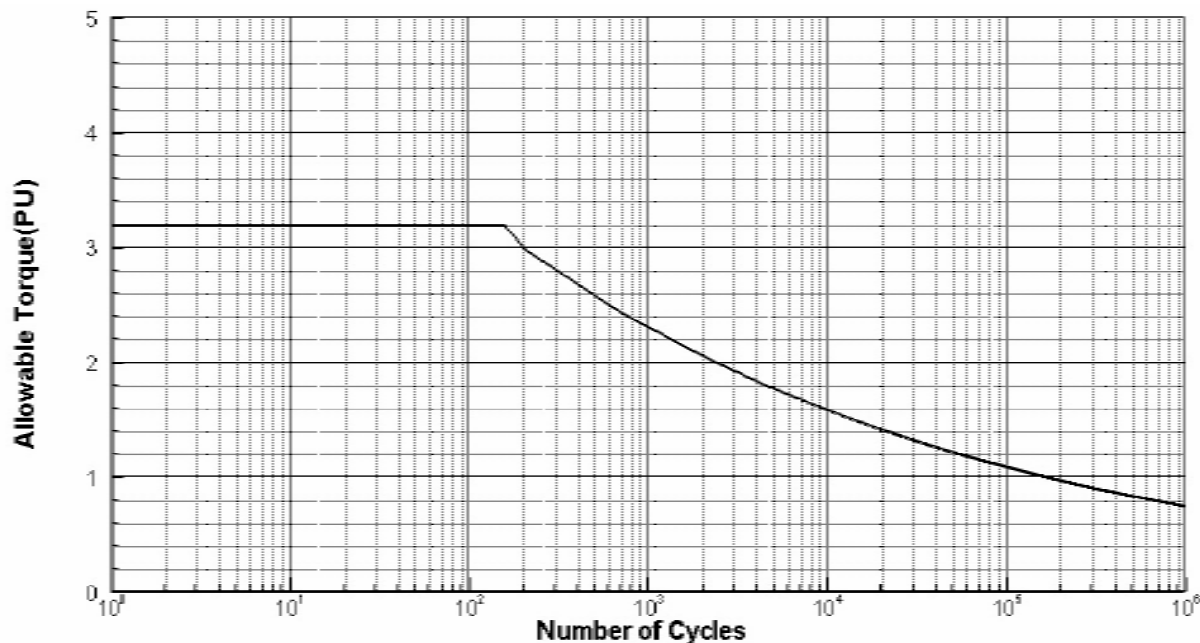


Рисунок 12. Кривая предела выносливости валопровода

С помощью данной кривой можно определять снижение предела выносливости на количественном уровне.

### 4.3. Анализ и предотвращение повреждений

#### 4.3.1. Вибрации лобовых частей статора генератора.

Доклад А1-201 (Канада) посвящен рассмотрению проблемы вибраций лобовых частей статоров турбо-генераторов в частности для генераторов с воздушным охлаждением – проблемы, которая в течение последних 10 лет является достаточно важной для обеспечения надежности этих генераторов, особенно в составе газотурбинных и парогазовых установок. В докладе рассмотрены причины возникновения вибраций и некоторые способы снижения уровня вибраций. Даны рекомендации по избежанию попадания частоты колебаний в резонансный диапазон.

Авторы задаются вопросом, почему эта проблема столь обострилась в последние 10 лет, и полагают, что причина в серьезном коммерческом давлении рынка, требующим сокращения сроков изготовления и снижения себестоимости генераторов.

Отмечено, что необходимы некоторые официальные документы на государственном уровне, нормирующие величину вибраций и определяющие методологию их измерения. Эта работа проводится как в рамках Рабочей группы CIGRE, так и в рамках работы Технического Комитета МЭК TC2WG32. В настоящее время сложилось понимание того, что в разрабатываемом документе должны быть отражены основные характеристики измерительного оборудования (для измерения вибраций), последовательность измерений, рекомендованные методы анализа полученных результатов измерения и некоторые руководящие рекомендации для реальных условий эксплуатации уже установленного оборудования на объектах применения.

К сожалению, собрать воедино все имеющиеся мнения и рекомендации затруднительно, и в настоящее время дискуссия идет о том, чтобы определить необходимые лимитные величины только для больших генераторов мощностью от 200 МВА. Основным аргументом при этом заключается в том, что для генераторов меньшей мощности проблема вибраций лобовых частей не является столь актуальной. Тем не менее, предполагается, что рекомендуемые методики вполне могут быть применены и при обследовании генераторов меньшей мощности.

К сожалению, в IEEE до сих пор не разработано детальное Руководство по on-line мониторингу уровня вибраций, а также по методологии проведения обследования. Некоторая информация и руководящие материалы содержатся в IEEE Standard 1665-2009, из них следует, что запретная зона натуральных частот при проведении ударных испытаний должна быть в диапазоне 100 - 120 Гц с минимальным расширением +/- 10 Гц, а желаемым для повышения надежности +/- 20 Гц. Разумеется, при этом должна учитываться собственно конструкция крепления лобовых частей.

Недавно стандарт IEEE 1129-2014 определил как контролировать в работе уровень вибраций лобовых частей. Стандарт предполагает, что нефильтованное радиальное смещение должно быть менее 125 микрон. Аварийные

величины смещения на уровне 200-250 микрон требуют немедленного отключения генератора.

В настоящее время еще по-прежнему не завершен стандарт МЭК 60034-32 по данному вопросу, который планируется завершить к 2016 году.

В 2011 году EPRI (Electric power Research Institute) опубликовало пособие по определению рабочих и аварийных уровней вибрации. В этом пособии рекомендуемые уровни аварийных величин начинаются от 200 микрон (двойная амплитуда) и до 250 микрон. Предполагается, что основные двойные рабочие частоты генераторов составляют 100 или 120 Гц. Канадская фирма VibroSystM на базе 15-летнего опыта работы в этой области установила более жесткие требования к уровням контролируемых вибраций.

Стандарт IEEE 1665, пожалуй, является единственным на сегодняшний день, выражающим консенсус по проведению и оценке ударных испытаний, дающим цифровые значения допустимых и аварийных уровней вибрации.

**Доклад А1-203 (Канада)** посвящен той же проблеме, что и доклад А1-201, но с учетом использования волоконной оптики для on-line мониторинга вибраций лобовых частей гидрогенераторов. Для правильной оценки результатов необходима грамотная установка датчиков по периферии «корзины» и эта задача была успешно решена авторами.

#### **4.3.2. Сбор и анализ данных.**

**Доклад А1-202 (Канада)** содержит описание прогностической модели для идентификации нестандартных проблем в гидрогенераторах и рассматривает некоторые алгоритмы применения разработанной модели.

**Доклад А1-204 (Китай)** содержит описание математического метода анализа определенного набора измеряемых величин для правильного определения причин повреждения. В основе метода лежит применение искусственного интеллекта с прогнозированием дальнейшего развития ситуации. Дан пример использования метода при анализе уровня вибраций гидрогенератора для датчиков, расположенных в определенном порядке и на определенных местах. Всего для этих целей использовались 110 датчиков.

**Доклад А1-205 (Хорватия)** рассматривает «черный ящик», в который заводятся основные параметры машины (ток, напряжение и т.д.) и с помощью разработанных алгоритмов определяется возможное нарушение работы. Это позволяет упростить работу оператора, поскольку он получает уже определенным образом обобщенную информацию о состоянии машины.

## **5. Предпочтительная тема 3 «Вращающиеся машины для распределенной генерации»**

Доклад А1-301 (Великобритания) описывает вызовы моделирования режимов работы оборудования ветряных электростанций, направленные на снижение себестоимости получаемой энергии. Рассматриваются три основных аспекта: моделирование погоды, моделирование состояния океана и сто-

имость мониторинга работы оборудования. Разработаны средства моделирования для оптимизации режимов и анализа операционных затрат путем использования мониторинга по состоянию оборудования и ряда диагностических устройств для on-line диагностики, Рассматриваются также вопросы специального приема на работу специалистов, доставку плавучих кранов и специальных барж с оборудованием.

## **6. Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии**

Как обычно, в процессе работы Сессии рассматривались документы, подготавливаемые многочисленными рабочими группами Комитета А1.

Рассматривались следующие документы по турбогенераторам, представленные руководителями рабочих групп:

- А1.05 Экономическая оценка модернизации или замены;
- А1.29 Руководство по оценке взаимного влияния генератор-энергосистема;
- А1.33 Руководство по обеспечению чистоты и соответствующего режима хранения генераторов;
- А1.37 Опыт конструирования систем крепления лобовых частей обмоток статоров генераторов;
- А1.38 Вопросы недовозбуждения и перевозбуждения генераторов;
- А1.39 Определение тангенса угла потерь на новых катушках и стержнях статора;
- А1.41 Руководство по управлению сроком службы основных компонентов генератора;
- А1.44 Руководство по испытаниям мощных турбогенераторов.

Некоторые из этих групп должны завершить подготовку соответствующих документов в 2015 году и представить на очередном заседании SC A1 в Мадриде для окончательного обсуждения.

## Заключение

Сессия в очередной раз продемонстрировала постоянно растущий уровень разработки технических решений в области создания и модернизации вращающихся машин. Появление новых материалов, новых более совершенных методов расчета позволяет повысить качество конструирования и снизить себестоимость изготовления оборудования.

1. Важно отметить тенденцию к изменению режимов работы оборудования – переход от базового режима в режим переменной нагрузки, что особенно характерно для Западной Европы. Это предъявляет дополнительные требования к конструкции генераторов, а также к проблемам регулирования в энергосистеме. Увеличивается необходимый диапазон изменения частоты, диапазон изменения напряжения.

2. В практику создания мощных турбогенераторов начинает входить использования сварных роторов, что подтверждено опытом фирмы АЛСТОМ для турбогенератора 900 МВт атомного энергоблока

3. Широкое распространение источников возобновляемой энергии и в частности ветро-установок вызвало проектирование мощных ветрогенераторов с постоянными магнитами и безредукторным исполнением. Новые конструкции требуют новых подходов (в том числе модульных) к их построению.

4. Значительное внимание уделяется оптимизации конструкции крепления лобовых частей обмотки статора, определение критериев их качества по уровню вибраций, разработке методологии оценки уровня вибраций и введению официальных норм (отклонений). Рекомендации, приведенные различными докладчиками, хорошо коррелируются с требованиями, предъявляемыми к своему оборудованию ведущими отечественными электромашиностроительными предприятиями.

5. Отмечается ренессанс в создании мощных синхронных компенсаторов 175-250 МВА с воздушным и водородным охлаждением горизонтального и вертикального исполнения. Такие компенсаторы предполагается использовать для передач и вставок постоянного тока в связи с их более высокой надежностью и более простым обслуживанием.



## Приложение

Перечень докладов, отобранных для 45 Сессии СИГРЭ в Париже по направлению SC A1 «Вращающиеся Электрические машины»

### PS1: Разработка вращающихся электрических машин

- A1-101: Новая методология оценки эффективности восстановленных асинхронных двигателей.  
M. AL-BADRI, P. PILLAY (Canada)
- A1-102: Характеристики высоко-эффективных асинхронных двигателей с учетом проблем качества электрической энергии  
P. DONOLO, C. PEZZANI, A. BONELLI, A. AOKI, R. NEHLS, G. BOSSIO, G. GARCIA (Argentina/Brazil)
- A1-103: Оптимизация системы вентиляции гидрогенератора посредством лабораторных измерений и CFD моделирования.  
G. MAS, J. COSTANZA (Argentina)
- A1-104: Экспериментальное определение кривой реактивной мощности генераторов на примере энергосистемы Колумбии.  
H.M. SÁNCHEZ, N.J. CASTRILLON, J.I. VELÁSQUEZ, O.J. PINILLA (Colombia)
- A1-105: Модели синхронных генераторов с учетом воздействия скачкообразных перенапряжений.  
Á.V. CANÇADO (Brazil)
- A1-107: Влияние гармонических токов при быстром регулировании на поведение мощных генераторов.  
Q. LIU, F. CHANG, S. JIAO, Y. WANG, T. ZHANG, W. ZHENG, X. LIANG, X. SUN (China)
- A1-108: Сварной ротор турбогенератора.  
H. COLOMBIE, M. THIERRY, R. ROTZINGER, C. PELISSOU, C. TABACCO, V. FERNAGUT (France)
- A1-109: Улучшенные решения для регулируемых электроприводов с IGBT преобразователями.  
A.K. GUPTA, D.K. CHATURVEDI (India)
- A1-110: Тенденция построения статических систем возбуждения в мощных турбогенераторах с точки зрения потребителя.  
D. DEVATE, K. CHATURVEDI, K. NAGESH (India)
- A1-111: Влияние модульности конструкции генератора с постоянными магнитами на его характеристики.  
T. ARLABÁNA, M.P. COMECHB, M.T. VILLÉNБ, M.A. COVAB, M.GARCÍA-GRACIAB (Spain)

- A1-112: Улучшение характеристик энергосистемы при применении синхронных компенсаторов в HVDC системах с промежуточными отборами.  
A. DI GIULIO, G.M. GIANNUZZI, V. IULIANI, F. PALONE, M. REBOLINI, R. ZAOTTINI, S. ZUNINO (Italy)
- A1-113: Конструкция и результаты изготовления самого мощного гидроагрегата ГАЭС в мире 475MVA/460MW с регулируемой частотой вращения.  
T. KUBO, I. OHNO, O. OSADA, H. TOJO, T. SHIOZAKI, T. SUZUMURA, T. WATANABE (Japan)

### **PS2: Управление сроком службы генераторов**

- A1-201: Недавние проблемы вибрации лобовых частей в турбогенераторах с воздушным охлаждением.  
J. KAPLER, J. LETAL, M. SASIC, G.C. STONE (Canada)
- A1-202: Разработка системы прогнозирования состояния гидрогенератора.  
N. AMYOT, C. HUDON, M. LÉVESQUE, M. BÉLEC, F. BRABANT, C. ST-LOUIS (Canada)
- A1-203: Мониторинг вибраций лобовых частей гидрогенераторов  
S. GIROUX, D. BUSSIÈRES, A. TÉTREAULT (Canada)
- A1-204: Усовершенствование методов диагностики повреждений гидрогенераторов.  
B. PENG, J. CHENG, J. SHUAI, Y.P. LI, G.Q. CHEN (China)
- A1-205: «Черный ящик» для электрических машин.  
A. ELEZ, J. POLAK, I. POLJAK, J. STUDIR, M. DUJMOVIC (Croatia)
- A1-207: Инновационные решения при реабилитации статоров турбогенераторов на электростанциях.  
A.L. LIVSHITS, K.A. KOBZAR, V.S. SHPATENKO, V.V. KUZMIN (Ukraine)

### **PS3: Вращающиеся машины для распределенной генерации**

- A1-301: Оценка требований возникающих при использовании ветроэнергетических установок.  
D. MCMILLAN, I. DINWOODIE, G. WILSON, A. MAY, G. HAWKER (United Kingdom)