



ОАО «Научно-исследовательский институт  
по передаче электроэнергии  
постоянным током высокого напряжения»



Цифро-аналого-физический комплекс —  
уникальный испытательный полигон  
Системного оператора  
Единой энергетической системы



Экспериментально-исследовательский центр  
**«ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»**

Экспериментально-исследовательский центр «Электродинамика» (ЭИЦ) создан на базе отдела электроэнергетических систем ОАО «НИИПТ», являющегося научным центром Системного оператора.

**Основное предназначение ЭИЦ «Электродинамика» — содействие формированию и реализации технической политики ОАО «СО ЕЭС» в части обеспечения надежности и управляемости ЕЭС России.**

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Комплексное исследование управляемости и системной надежности Единой энергетической системы России, организационного и технологического развития системы оперативно-диспетчерского управления ЕЭС России.

2. Выполнение экспериментальных и исследовательских работ с использованием электродинамической модели по применению в ЕЭС России новой техники, в том числе испытаний, аттестации и настройки «под ключ» систем управления, регулирования, автоматики и защиты.

3. Подготовка и повышение квалификации специалистов по планированию и управлению режимами энергосистем, в том числе организация и проведение экспериментально-технологических практикумов на базе электродинамической модели ОАО «НИИПТ».

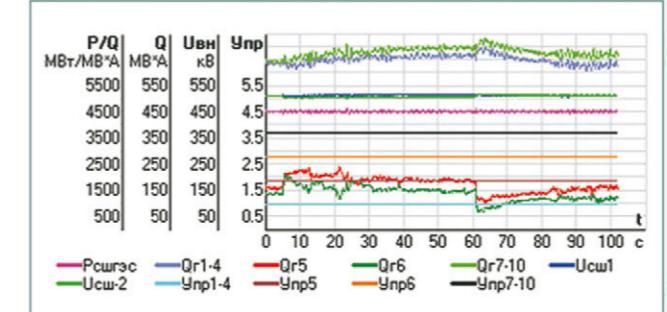
Уровень надежности функционирования Единой энергетической системы России определяется, наряду с другими факторами, надежностью и эксплуатационными характеристиками используемого электроэнергетического оборудования, устройств и систем управления, в том числе характеристиками микропроцессорных устройств автоматического управления, регулирования, защиты и автоматики. Вместе с тем, предлагаемая на электроэнергетическом рынке продукция (особенно головные образцы) не всегда свободна от алгоритмических и программных ошибок, адаптирована к условиям эксплуатации в российских энергосистемах, соответствует стандартам, обеспечивающим надежность Единой энергосистемы.

Все это приводит к увеличению числа технологических нарушений в энергосистемах и снижению надежности параллельной работы электростанций и энергосистем. В частности, из-за потери возбуждения (неправильная работа АРВ) на электростанциях участились случаи отключения генераторов, а некорректное действие подсистемы группового регулирования активной мощности (ГРАМ) микропроцессорного регулятора активной и реактивной мощности (ГРАРМ) Саяно-Шушенской ГЭС привело к возникновению в ЕЭС России беспрецедентного сброса мощности, который лишь по счастливой случайности не привел к серьезной системной аварии.

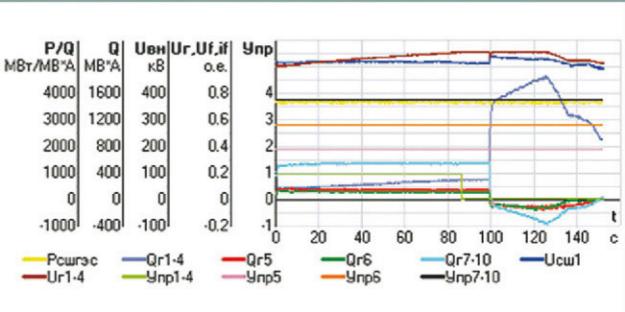
Проведенные на цифро-аналого-физическом комплексе ОАО «НИИПТ» испытания второй подсистемы ГРАРМ — группового регулятора напряжения и реактивной мощности (ГРНРМ) — Саяно-Шушенской ГЭС выявили серьезные недостатки как в части сформулированных к алгоритмам технических требований, так и в части реализации самих технологических алгоритмов, исправление которых заняло у разработчиков более года.



Расширенное заседание секции «Электроэнергетические системы»  
(ЭИЦ «Электродинамика») НТС НИИПТ



Разделение и последующее объединение шин Саяно-Шушенской ГЭС.  
ГРНРМ остается в работе.  
**ОШИБКА В АЛГОРИТМЕ !!!**



Выделение группы генераторов (Г1-4)  
на ВЛ-542 с последующим восстановлением схемы.  
**ОШИБКА В АЛГОРИТМЕ !!!**

Кроме того, в отличие от зарубежных энергосистем ЕЭС России представляет собой уникальное по протяженности объединение отдельных энергосистем. При этом межсистемные связи являются, как правило, «слабыми» и сильно загруженными. Это обуславливает возникновение в энергосистеме низкочастотных (0,1–0,5 Гц) продолжительных колебаний транзитных перетоков мощности большой амплитуды.

Так, в ОЭС Северо-Запада при выдаче мощности Кольской АЭС по транзиту 330 кВ Колэнерго–Карелэнерго–Ленэнерго оперативным персоналом фиксировались случаи возникновения незатухающих синхронных колебаний активной мощности, амплитуда которых составляла 100–150 МВт, а частота — около 0,25 Гц.

В этих условиях устойчивая и надежная работа ЕЭС России может быть обеспечена только при выполнении системных требований к силовой части систем возбуждения синхронных генераторов и их оснащении регуляторами возбуждения, способными при соответствующей настройке принятой в России структуры стабилизации по частоте напряжения и ее производной эффективно демпфировать столь низкочастотные межзоныальные колебания.

Эти системные требования, частично сформулированные в российских стандартах, оказываются более жесткими, чем требования стандартов IEEE.

К примеру, опыт натурных испытаний при включении энергоблока Северо-Западной ТЭЦ на параллельную работу с Финляндией показал, что системные стабилизаторы PSS-1A фирмы SIEMENS, установленные на генераторах газовых турбин, принципиально малоэффективны в части демпфирования низкочастотной составляющей движения. Следует отметить, что данные регуляторы, в отличие от российских, действуют по линейной комбинации активной мощности и ее производной, а их экспертиза и адаптация для применения в ЕЭС России не проводилась.

Все это свидетельствует о том, что **для обеспечения системной надежности ЕЭС России при строительстве новых и модернизации действующих энергообъектов устанавливаемые на них микропроцессорные устройства регулирования, управления, защиты и автоматики должны проходить комплексную проверку на функционирование в условиях, максимально приближенных к условиям будущей эксплуатации.**

**Такую проверку позволяет обеспечить цифро-аналого-физический комплекс ОАО «НИИПТ», являющийся уникальным испытательным полигоном, которым на сегодняшний день не располагает ни одна энергокомпания мира.**

Испытания проводятся по программам, согласованным Системным оператором, с участием его представителей и завершаются подписанием протокола о возможности использования тестируемых устройств в ЕЭС России и применения выбранных в процессе испытаний настроек для конкретных энергообъектов.



Северо-Западная ТЭЦ

## ОСОБЕННОСТИ ЦАФК

ЦАФК включает в себя самую крупную в мире электродинамическую модель (ЭДМ) энергосистемы (более 1000 единиц физических моделей генераторов, первичных двигателей, силовых трансформаторов, линий электропередачи, комплексной нагрузки, передач постоянного тока, FACTS и т. д.). Аналоговая часть комплекса состоит из настраиваемых полупроводниковых моделей паровых, гидравлических и газовых турбин и их систем регулирования и управления и моделей автоматических регуляторов возбуждения различных модификаций. Цифровая часть комплекса — система регистрации экспериментов, представляющая собой несколько современных многоканальных цифровых осциллографов и сервисные программы, позволяющие производить последующую обработку экспериментальных данных.

ЦАФК оснащен устройствами, позволяющими моделировать аварийные возмущения в энергосистемах и работу устройств локальной и централизованной противоаварийной автоматики по заданной программе, а также многочисленными датчиками, образующими информационно-измерительную систему.



Зал управления ЦАФК



Панели управления физическими моделями элементов энергетического оборудования

Благодаря большому и разнообразному парку основного и вспомогательного оборудования, а также гибкой системе планирования и регистрации эксперимента, ЦАФК позволяет моделировать электрические режимы и аварийные электромеханические переходные процессы в энергообъединениях практически любой сложности с учетом индивидуальных особенностей реальных энергообъектов.

Высокая эффективность при этом обеспечивается как за счет физических свойств комплекса, позволяющих проводить эксперименты в реальном масштабе времени и в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, так и вследствие соответствия номинальных вторичных напряжений и токов измерительных трансформаторов модели промышленным стандартам, что позволяет интегрировать в ЦАФК натурные устройства управления, регулирования, автоматики и защиты.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦАФК

- Комплексные испытания новых образцов микропроцессорных устройств** — позволяют провести экспертизу этих устройств, устранить скрытые недостатки алгоритмического и программного обеспечения, подготовить по результатам испытаний экспертное заключение об их соответствии системным требованиям и научно-технические рекомендации по применению на объектах ЕЭС России.

Так, испытания регуляторов возбуждения проводятся по утвержденной ОАО РАО «ЕЭС России» и согласованной с головными эксплуатирующей (ОАО «СО ЕЭС») и проектной (ОАО «Институт ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ») организациями типовой «Программе комплексных системных испытаний микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов».



Прием представителей  
ЗАО ПГ «Проминдустирия»  
и компании ALSTOM (Франция)

Учитывая важность адаптации АРВ зарубежных фирм к работе в условиях российских энергосистем, **проведение подобных испытаний для всех зарубежных АРВ рекомендовано ОАО РАО «ЕЭС России» в качестве обязательного в случае их применения на объектах ЕЭС РФ** (Информационное письмо ИП-32-2004 (ТП) «О применении автоматических регуляторов возбуждения для генераторов мощностью 63 – 1200 МВт»).

**Подготовленные по результатам испытаний заключения и рекомендации используются заводами-изготовителями при доработке систем возбуждения генераторов, участии в тендерах на поставку этих систем при строительстве и реконструкции электростанций.**

- Испытания, проверка на функционирование, наладка и настройка «под ключ» устройств управления, регулирования, автоматики и защиты системного, станционного и агрегатного уровня** — обеспечивают повышение системной надежности ЕЭС.

- Настройка АРВ «под ключ»** — обеспечивает повышение надежности функционирования энергообъектов, **позволяет сократить сроки и объем пусконаладочных работ, снизить их стоимость**.

Особенно эффективна такая настройка:

- **для гидростанций**, где как сами гидрогенераторы, так и схемно-режимные особенности их работы в энергосистеме носят сугубо индивидуальный характер;
- **для атомных станций**, где полномасштабная настройка АРВ на объекте существенно ограничена по соображениям безопасности.

- Разработка и испытания опытных образцов микропроцессорных устройств, систем, а также новых законов регулирования и управления.**

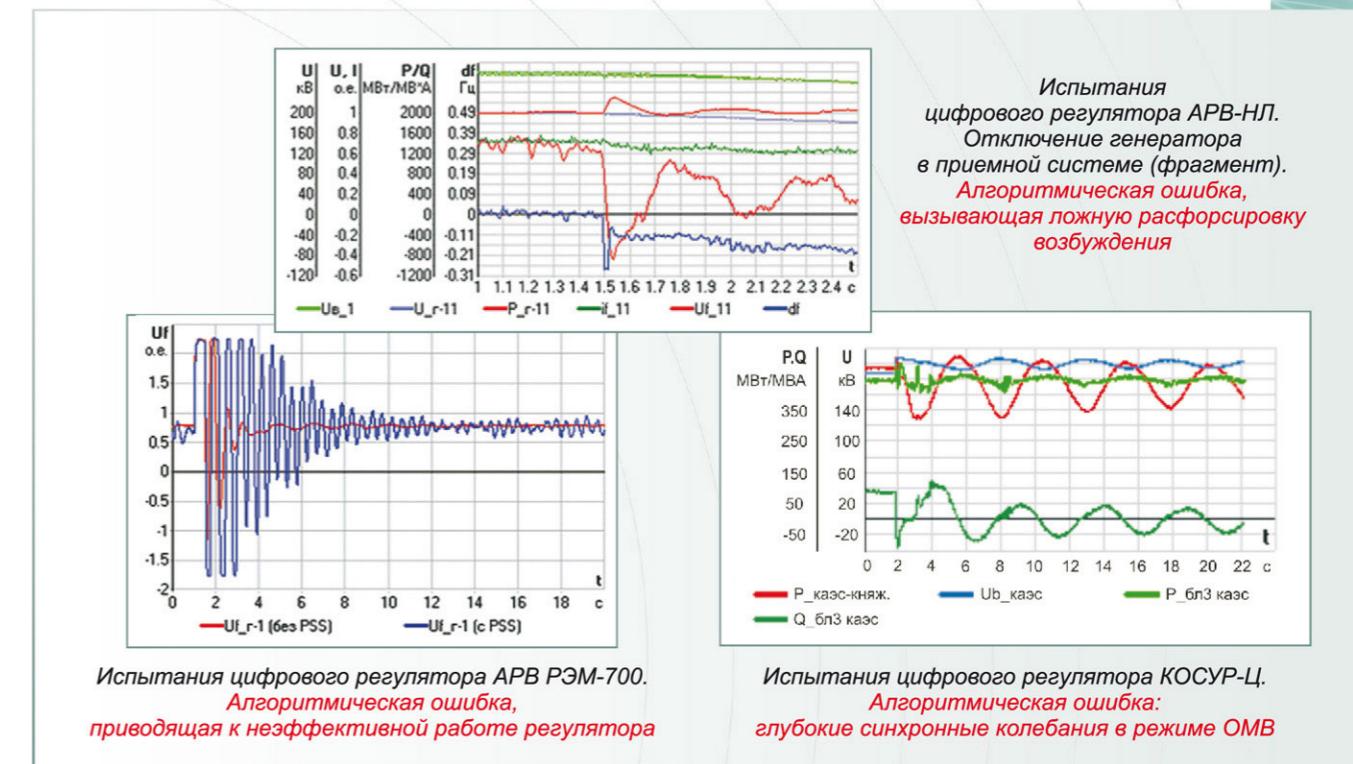
- Комплексные исследования эффективности применения в ЕЭС России новых образцов электроэнергетического оборудования.**

- Комплексные исследования режимов, устойчивости, надежности и живучести энергосистем всех уровней.**

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ НА ЦАФК

Эффективность испытаний на ЦАФК подтверждается тем, что:

- **в процессе тестирования всех новых образцов АРВ отечественных производителей были выявлены и устранены алгоритмические и программные ошибки;**



— цифровые регуляторы возбуждения зарубежных компаний: ABB (Швейцария), Basler Electric (США) — были адаптированы к условиям работы в российских энергосистемах и по результатам испытаний получили рекомендации к применению в ЕЭС России. В частности, адаптация регулятора DECS-400 была проведена путем ввода в закон управления аналога релейной форсировки возбуждения, что позволило повысить пределы динамической устойчивости при нормативных возмущениях примерно на 10%.





## ГЕОГРАФИЯ РАБОТ ЭИЦ «ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»



## НАИБОЛЕЕ КРУПНЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦАФК

- Проверка на функционирование и разработка научно-технических рекомендаций по применению в ЕЭС России:

— микропроцессорных регуляторов возбуждения отечественного и зарубежного производства: APB-M, 2M, 3M, MA (ОАО «Силовые машины», филиал «Электросила»), AVR-2 (ЗАО «Энергокомплект»), UNITROL-5000 (ABB, Швейцария), DECS-400 (Basler Electric, США), APB-HL НПО «Элсиб» ОАО (ООО «Элсиб-АСЭ»), КОСУР-Ц (ОАО «НИИЭлектромаш»), APB РЭМ и APB РЭМ-700 (ЗАО «НПП “РУСЭЛЛПРОМ-ЭЛЕКТРОМАШ”»);



- микропроцессорной автоматики ликвидации асинхронных режимов (АЛАР-Ц (ОАО «НИИПТ»), АЛАР-М (ОАО «Энергосетьпроект»)).

- Испытания, наладка и настройка:

- микропроцессорных регуляторов возбуждения генераторов (Саяно-Шушенская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС, Вилюйская ГЭС-3, Загорская ГАЭС, ТЭЦ-22 Мосэнерго, Ленинградская АЭС-2, Кольская АЭС);

- цифровых систем группового регулирования активной мощности и группового регулирования напряжения и реактивной мощности (Саяно-Шушенская ГЭС, Нижегородская ГЭС, Зейская ГЭС, Новосибирская ГЭС).

- Разработка и испытания опытных образцов микропроцессорных устройств управления и защиты:

- устройства Siemens для полуавтоматического переключения энергоблока Северо-Западной ТЭЦ из энергосистемы Финляндии NORDEL в ЕЭС России и обратно;

- блока микропроцессорной релейной защиты синхронных двигателей (БМРЗ);

- современных преобразователей на полностью управляемых вентилях для создания гибких связей и устройств компенсации реактивной мощности (СТАТКОМ).



АЛАР-Ц (ОАО «НИИПТ»)



Испытания APB-3M  
(ОАО «Силовые машины») для ЛАЭС-2.  
Разработчик регулятора Фадеев А. В.



Проверка эффективности  
МП-ГРНРМ (ЗАО «ИАЭС»)  
для Новосибирской ГЭС



Регуляторы APB-2M  
(ОАО «Силовые машины»)  
и ГУП ВЭИ для Загорской ГАЭС

- Испытания новых законов управления возбуждением асинхронизированных синхронных генераторов (АСМ) и электромеханических преобразователей частоты на базе АСМ (АС ЭМПЧ):

- испытания натурного образца регулятора возбуждения APB-MA для АСТГ ТЗФА-110 ТЭЦ-22 Мосэнерго;

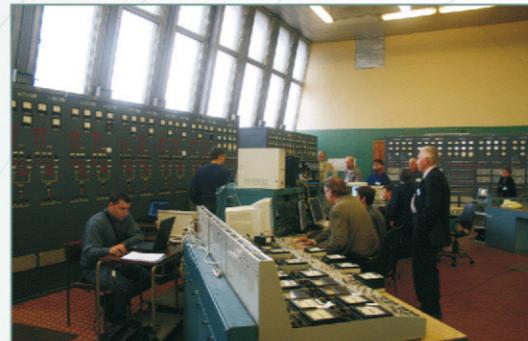
- испытания и отработка закона управления АС ЭМПЧ на макете цифрового регулятора для варианта несинхронного объединения ОЭС Сибири и Востока.

- Исследования вариантов Забайкальского преобразовательного комплекса на подстанции Могоча (передача постоянного тока (ППТ), ППТ на полностью управляемых вентилях, АС ЭМПЧ).

- Научно-техническое сопровождение внедрения системы мониторинга переходных режимов (СМПР) в ЕЭС России.

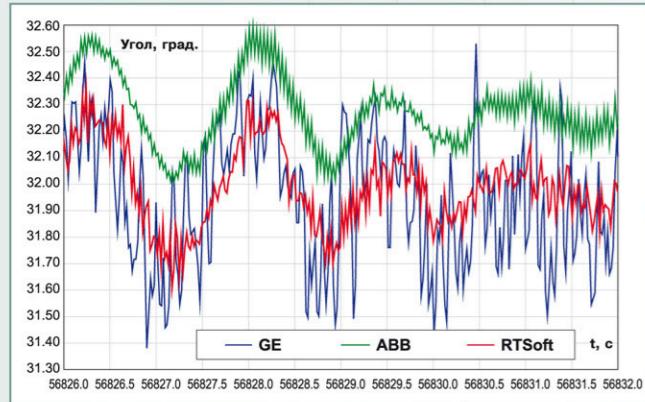
- Сравнительные испытания цифровых регистраторов СМАРТ-WAMS (RTSoft), RES-521 (ABB), терминалов N60 (GE Multilin), Arbiter 1133A (Arbiter Systems);

*Сравнительные испытания цифровых регистраторов СМПР различных типов*

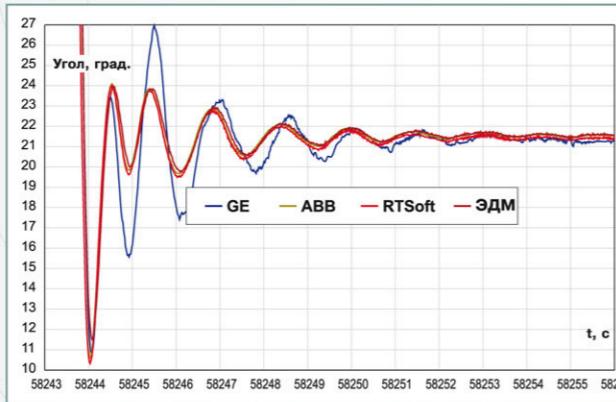


*Главный инженер General Electric Multilin Infante Otamendi Francisco*

*Итоги испытаний подводят научный руководитель ОАО «НИИПТ» Кощеев Л. А.*



*Показания цифровых регистраторов при значительных искажениях кривой напряжения*



*Замыкание цепочечной схемы*

#### • Комплексные исследования режимов, устойчивости, надежности и живучести энергосистем:

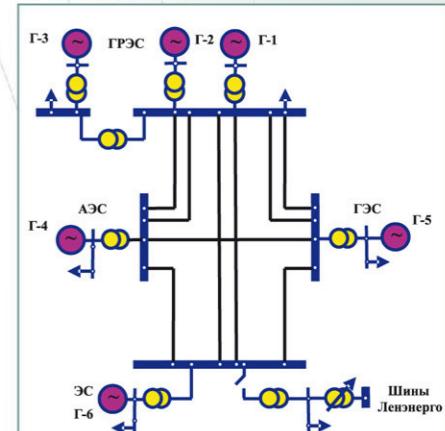
- энергосистема «Три ущелья», Китайская Народная Республика;
- перспективные схемы объединения ЕЭС России – УСТЕ.

## ПРОВЕРКА ГОЛОВНЫХ ОБРАЗЦОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АРВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО СИСТЕМНОЙ НАДЕЖНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТАНЦИИ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

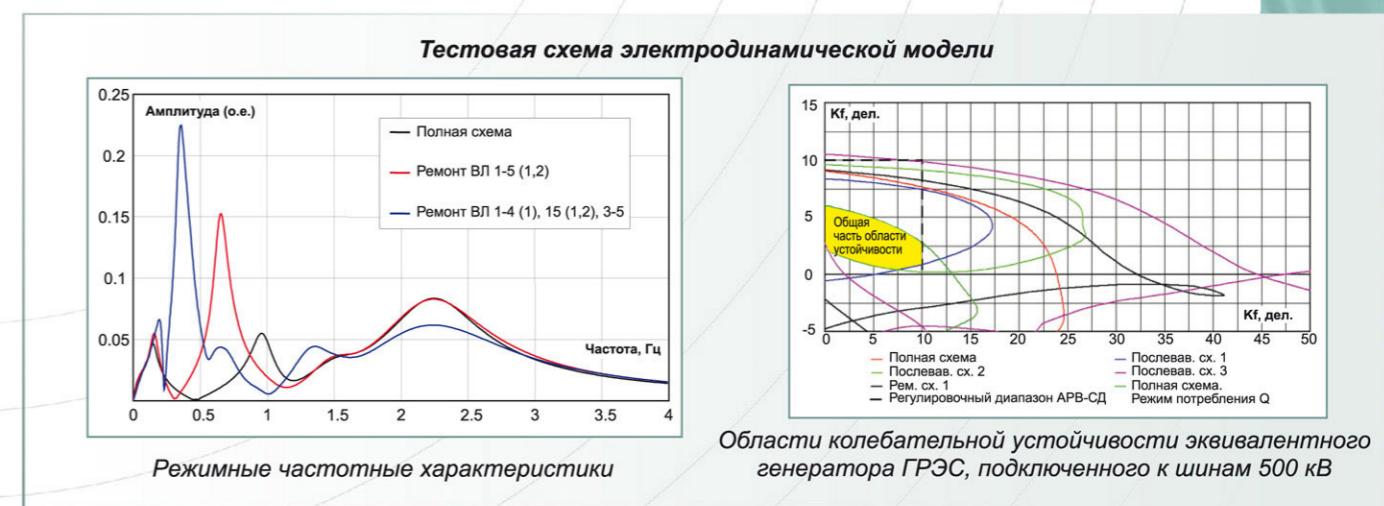
Проверка АРВ отечественных и зарубежных фирм на функционирование осуществляется с использованием разработанной в ОАО «НИИПТ» и включенной в состав ЦАФК на постоянной основе тестовой схемы сложного энергообъединения, адекватно отражающей многочастотное движение в различных схемно-режимных и аварийных условиях.

Схема включает 6 генераторов со своими блочными трансформаторами, 5 узлов комплексной нагрузки, автотрансформатор связи и 9 линий электропередачи. Генераторы 1–3 представляют собой модель тепловой электрической станции (ГРЭС), оснащенной тремя одинаковыми блоками, работающими на две системы шин разного напряжения. Два генератора станции подключено к шинам 500 кВ, один — к шинам 220 кВ. Генераторы 4 и 5 представляют собой модели АЭС и ГЭС, а генератор 6 — эквивалент концентрированной энергосистемы. Для проверки регуляторов при работе в схеме укрупненного блока предусмотрена трансформация схемы.

Испытуемые АРВ устанавливаются на генераторах 1 и 2. При изменении состава сети (отключении линий) схема энергосистемы претерпевает всевозможные трансформации от полного многоугольника до различных вариантов схем цепочечной структуры, что обеспечивает изменение пропускной способности сети в широких пределах. Это позволяет выполнять проверку регуляторов при расчетных и предельных динамических возмущениях, в том числе и с учетом действия систем противоаварийной автоматики, когда для обеспечения динамической устойчивости при отключении поврежденных линий требуется ввод управляющих воздействий (отключение генераторов и нагрузки).



*Тестовая схема энергосистемы*



*Области колебательной устойчивости эквивалентного генератора ГРЭС, подключенного к шинам 500 кВ*

Это позволяет выполнять проверку регуляторов при расчетных и предельных динамических возмущениях, в том числе и с учетом действия систем противоаварийной автоматики, когда для обеспечения динамической устойчивости при отключении поврежденных линий требуется ввод управляющих воздействий (отключение генераторов и нагрузки).



Комплексные системные испытания  
APB РЭМ и APB РЭМ-700.

Справа – научный сотрудник Сорокин Д. В.  
и ведущий научный сотрудник ЗАО НПП  
«РУСЭЛПРОМ-ЭЛЕКТРОМАШ» Богачков М. Л.

Тестовая схема оснащена регулирующими устройствами базовой ЭДМ — автоматическими регуляторами возбуждения, скорости, частоты и мощности (APB, APC, АРЧМ), автоматикой, моделирующей нормативные аварийные возмущения и действие систем ПА, датчиками режимных параметров и системой цифрового осциллографирования.

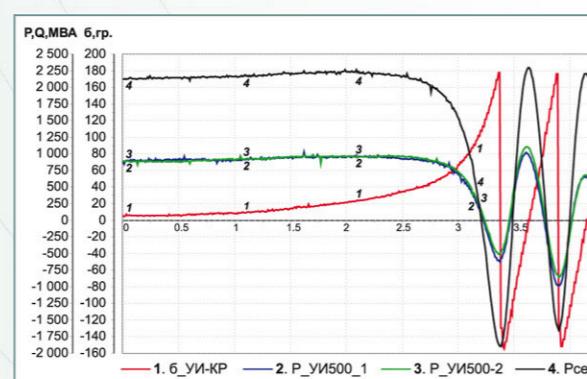
**Тестовая схема электродинамической модели энергосистемы**  
позволяет полностью реализовать типовую программу  
системных испытаний APB, утвержденную РАО «ЕЭС России»,  
и обеспечивает всестороннюю проверку регуляторов возбуждения.

**Типовая программа комплексных системных испытаний микропроцессорных APB включает следующие основные разделы:**

- обеспечение требований нормативов статической устойчивости и высокого качества демпфирования электромеханических колебаний в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах;
- обеспечение запасов динамической устойчивости при нормативных аварийных возмущениях в энергосистеме, в том числе при совместной работе с комплексами противоаварийной автоматики;
- проверка полного использования расчетных возможностей силовой части систем возбуждения по обеспечению динамической устойчивости;
- проверка правильности функционирования ограничителей перегрузки по току ротора и ограничителя минимального возбуждения при динамических возмущениях;



Область статической  
колебательной устойчивости



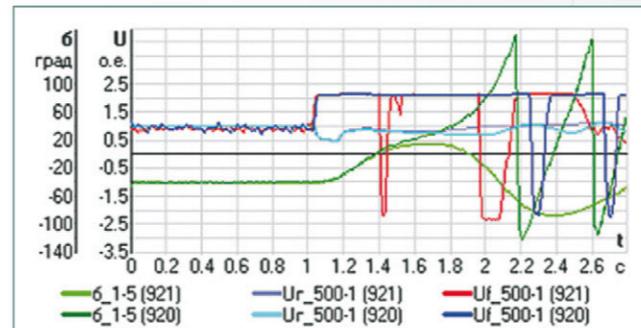
Характер нарушения устойчивости при выбранной  
настройке системных стабилизаторов APB-M тестовой схемы

— проверка устойчивости регулирования реактивной мощности и качества стабилизации режима при совместной работе двух APB в составе укрупненного блока генераторов.

**Этапы проверки эффективности структуры стабилизации (обеспечение статической колебательной устойчивости и высокого качества демпфирования нормальных, ремонтных и послеаварийных режимов):**

- определение областей статической колебательной устойчивости генератора в плоскости коэффициентов усиления каналов стабилизации для группы характерных режимов и выбор общей настройки каналов стабилизации регулятора;
- оценка качества демпфирования при выбранной настройке для различных режимов работы генератора и станции при малых тестовых возмущениях;
- определение характера нарушения устойчивости в предельных по условиям статической устойчивости электрических режимах при выбранных настройках.

Качество демпфирования больших послеаварийных колебаний при выбранной настройке APB проверяется при нормативных аварийных возмущениях в энергосистеме. При этом рассматриваются нормативные возмущения I, II и III группы в соответствии с «Методическими указаниями по устойчивости энергосистем»: аварии без изменения и с изменением баланса мощности и частоты энергосистемы (отключения отходящих линий; однофазные, двухфазные на землю и трехфазные короткие замыкания на отходящих линиях с их отключением; успешные ОАПВ и ТАПВ линий; отключения нагрузок и генераторов в приемной части энергосистемы, короткие замыкания с отключением двухцепных линий и при отказе фазы выключателя и работе УРОВ).



Оценка эффективности регулятора AVR-2  
при управлении силовой частью возбудителя  
в предельных режимах



Обсуждение результатов испытаний  
регулятора APB-НЛ разработки НПО «Элсиб»

**Испытания APB при наиболее тяжелых аварийных возмущениях  
в предельных по условиям динамической устойчивости режимах**  
позволяют оценить степень использования расчетных возможностей  
системы возбуждения и проверить правильность работы  
релейной форсировки.

**Испытания завершаются выпуском научно-технических рекомендаций  
по использованию регуляторов на объектах ЕЭС России  
при модернизации и новом строительстве.**

## НАЛАДКА И НАСТРОЙКА «ПОД КЛЮЧ» МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ



Испытания, наладка и настройка  
регуляторов возбуждения КОСУР-Ц  
генераторов Кольской АЭС.  
Старший научный сотрудник Кирьянко Г. В.

Выполняется по специально разработанной технологии позволяющей:

- осуществить выбор коэффициентов усиления каналов регулирования и стабилизации промышленных образцов АРВ генераторов по условиям обеспечения высокого качества демпфирования мало-возмущенного движения с учетом схемно-режимных особенностей работы конкретной станции;
- провести испытания регуляторов при всех расчетных аварийных возмущениях в энергосистеме с учетом действия комплексов противоаварийной автоматики.

### Технология включает:

- создание на базе ЦАФК физической модели энергосистемы;
- разработку программы испытаний;
- проведение испытаний регуляторов возбуждения и настройку их каналов регулирования и стабилизации.

### Создание физической модели состоит из нескольких стадий:

- разработка эталонной цифровой модели энергосистемы и выполнение в ней расчетов электрических режимов и устойчивости;
- создание эквивалентной схемы энергосистемы и проверка ее адекватности эталонной модели;
- разработка электрической схемы физической модели;
- выбор оборудования, настройка и сборка схемы, выставление базовых электрических режимов и моделирование тестовых аварий, подготовка системы измерений и регистрации.

Эталонная цифровая модель энергосистемы создается на основании исходных данных о параметрах схемы, ее структуре, характерных текущих и перспективных режимах.

ЭИЦ «Электродинамика» располагает достоверными цифровыми моделями энергосистем, которые включают адекватные модели систем регулирования агрегатного, станционного и системного уровня. Верификация цифровых моделей автоматических регуляторов возбуждения и их системных стабилизаторов выполняется путем сравнения частотных характеристик этих моделей и натурных АРВ. Верификация регуляторов скорости вращения турбин, а также других устройств регулирования

агрегатного, станционного и системного уровня осуществляется путем сопоставления их поведения в цифровой модели с данными регистрации в реальной энергосистеме.

Адекватность цифровых моделей энергосистем в целом определяется путем их верификации по данным цифровых регистраторов СМПР, получаемым при различных технологических нарушениях.

Цифровые модели энергосистем разработаны по заказу ОАО «СО ЕЭС» для всех ОЭС, используются соответствующими ОДУ для проведения эксплуатационных расчетов и периодически актуализируются ЭИЦ «Электродинамика».

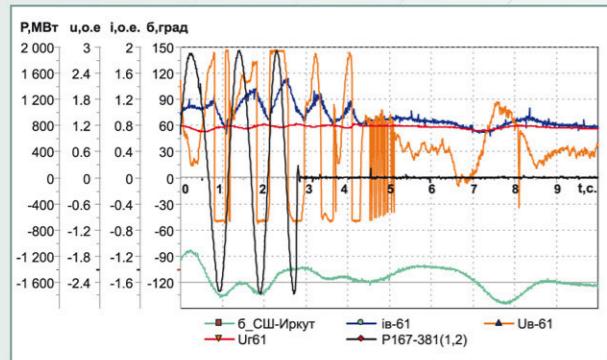
В этой модели выполняются расчеты режимов, статической апериодической и колебательной устойчивости и электромеханических переходных процессов, что позволяет выявить схемно-режимные особенности работы рассматриваемого энергообъекта (станции, генератора) в энергосистеме и учесть их при создании эквивалентной схемы. Эквивалентирование эталонной электрической схемы выполняется с использованием разработанного в ОАО «НИИПТ» специального программного комплекса, который обеспечивает тождественное совпадение режимных параметров в полной схеме и сохраняемой части эквивалентной схемы, а также сохранение динамических свойств эталонной цифровой модели. Степень детализации энергосистемы (размеры ее сохраняемой части) определяется в результате исследований путем выполнения сравнительных расчетов в эталонной и эквивалентной схемах. Критерием служит заданная допустимая погрешность эквивалентирования, которая, как правило, не превосходит погрешности исходной информации, составляющей около 5%.

На основании расчетных исследований создается физическая модель энергосистемы. При этом объем физической модели зависит не только от размерности эталонной схемы, сколько от схемно-режимных условий работы генераторов станции в электроэнергетической системе. Степень детализации самой станции зависит от главной схемы, состава оборудования и решаемых задач.

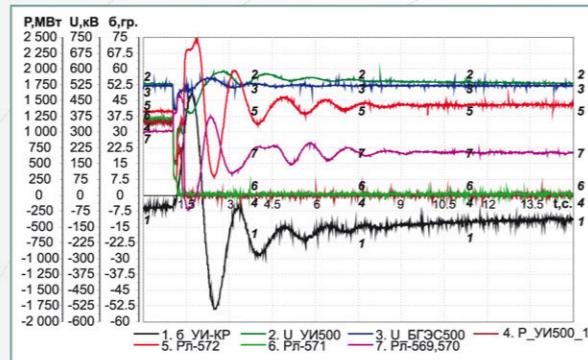
**Программа системных испытаний по наладке и настройке регуляторов возбуждения** формируется, как правило, на базе описанной выше типовой программы с учетом индивидуальных особенностей станции, ее схемы примыкания к энергосистеме и конкретных задач, решаемых в процессе испытаний.

Например, при испытаниях АРВ-М для генераторов Усть-Илимской ГЭС была учтена поэтапная модернизация систем возбуждения, для чего были рассмотрены вопросы совместной работы этих регуляторов и демонтируемых регуляторов типа АРВ-СД в составе укрупненного блока. Это позволило, в частности, скорректировать закон регулирования АРВ-М с учетом совместной работы с АРВ-СД и обеспечило возможность проведения модернизации систем возбуждения генераторов станции в любой последовательности. Кроме того, в процессе испытаний была подтверждена **возможность существенного снижения кратности форсировки по напряжению возбуждения генераторов** без пересмотра настроек централизованного комплекса противоаварийной автоматики узла Братской ГЭС.

При испытаниях регуляторов возбуждения генераторов Саяно-Шушенской ГЭС эффективность выбранной настройки была проверена путем моделирования имевшей место системной аварии, связанной с нарушением устойчивости параллельной работы ОЭС Сибири по сечению Красноярск, Хакасия – Запад.



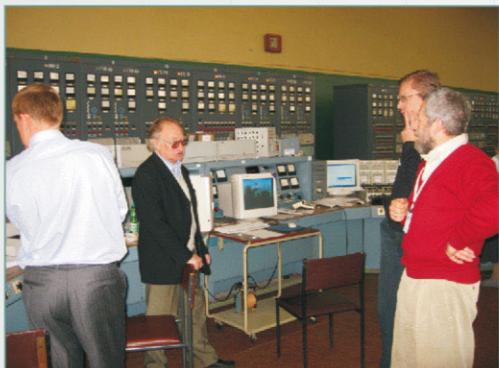
Оценка эффективности работы АРВ при ликвидации последствий системных аварий



Двухфазное на землю к.з. у шин 500 кВ Усть-Илимской ГЭС с отключением ВЛ-571 при отказе фазы выключателя и работе УРОВ с учетом действия комплекса ЦПА Братской ГЭС

### ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ГРНРМ И ГРАМ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для проверки алгоритмов ГРНРМ и ГРАМ, разрабатываемых различными организациями для многоагрегатных станций, создаются физические модели энергообъединений, в которых адекватно воспроизводятся установившиеся режимы и переходные процессы исследуемой станции в энергосистеме. На физической модели исследуемой станции устанавливаются макеты испытуемых устройств ГРАМ и ГРНРМ.



Испытания ГРНРМ Саяно-Шушенской ГЭС.  
В центре — главный специалист  
ЗАО «Уралэнерго-Союз» Перельман И. Ф.



Комплексные испытания МП-ГРНРМ Новосибирской ГЭС.  
В центре — заместитель директора ОДУ Сибири по развитию  
технологий диспетчерского управления Федоренко Ю. П.

Испытания проводятся по разрабатываемой для конкретной станции программе, которая согласовывается с Заказчиками. По результатам проводимых экспериментов вносятся изменения и дополнения в алгоритмы ГРАМ и ГРНРМ, обеспечивающие наиболее рациональное использование силового оборудования станции с позиций обеспечения максимальных запасов статической и динамической устойчивости генераторов.

### СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦАФК

ЭДМ расположена в отдельном лабораторно-технологическом корпусе НИИПТ, общей площадью 2700 м<sup>2</sup>, занимает 3 основных этажа и 2 кабельных полуэтажа корпуса. На первом этаже находится машинный зал, в котором сосредоточены модельные агрегаты:

- синхронные машины с приводными двигателями, моделирующие генераторы и первичные двигатели;
- асинхронные машины, моделирующие нагрузку энергосистемы;
- активные сопротивления — модели активной нагрузки.



Лабораторно-технологический корпус



Панели генераторов и нагрузок

На втором этаже расположены модели трансформаторных подстанций, линий электропередачи, установок, моделирующих шины бесконечно большой мощности.

В зале третьего этажа размещены высоковольтный и низковольтный коммутационные щиты, щит управления всей электродинамической модели.

### МОДЕЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Располагаемый парк модельных синхронных машин содержит 66 установок с номинальными мощностями 1,5, 2, 3, 5, 10, 15 и 30 кВ·А.

Номинальное напряжение статора модельных машин — 230 В, номинальная скорость вращения 1000–3000 об./мин. От стандартной машины малой мощности модельная отличается специальной геометрией сердечников статора и ротора и габаритной мощностью, которая у модельных машин в несколько раз превышает натуральную. Это дает возможность выдерживать длительные нагрузки по току и напряжению без повреждения оборудования и, кроме того, облегчает настройку параметров ( $x_d$ ,  $x'_d$ ,  $x''_d$ ,  $T_{d_0}$ , кривая намагничивания), обеспечивая их соответствие натуральным. Возможность моделирования различных типов генераторов (гидро или турбо) и синхронных компенсаторов обеспечивается необходимым запасом сменных роторов, при этом подгонка механической инерционной постоянной агрегата осуществляется путем подбора и установки на вал ротора сменных дисков.



Генераторы и первичные двигатели



Особенно удобны для целей моделирования разработанные в НИИПТ агрегаты в обращенном исполнении, у которых трехфазная сетевая обмотка расположена на вращающемся роторе, а обмотка возбуждения на статоре. Подгонка моделируемых параметров у таких машин осуществляется рядом разнообразных приемов: изменением воздушного зазора между ротором и полюсами; путем набора сменных прокладок между ярмом и полюсом; изменением положения стальных стержней в специальных отверстиях ярма полюсов; с помощью специальных магнитных шунтов в шлицах пазов демпферной обмотки, расположенной на статоре.

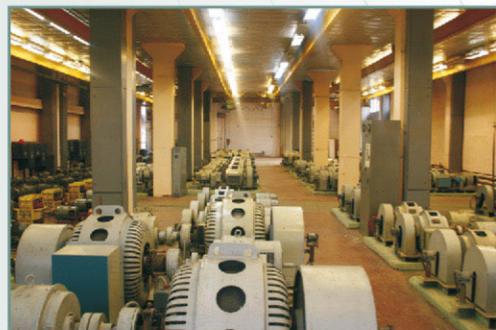
Большое разнообразие систем возбуждения синхронных машин моделируется исходя из соответствия наиболее важных в данном случае параметров: постоянной времени контура возбуждения ( $T_{d_0}$ ) и кратностей форсировки и расфорсировки возбуждения. Для настройки  $T_{d_0}$  модельных синхронных машин применяются разработанные в НИИПТ системы компенсации избыточных активных сопротивлений обмоток. Эффект достигается введением в контур возбуждения добавочной ЭДС, пропорциональной току возбуждения и обратной по знаку падению напряжения в активном сопротивлении контура.

Различные типы автоматических регуляторов возбуждения моделируются с помощью разработанного и изготовленного в НИИПТ унифицированного аналогового блока. Модель допускает использование нескольких каналов регулирования с переменными коэффициентами усиления: для системы пропорционального регулирования — по отклонению напряжения статора и по току статора; для системных стабилизаторов — дополнительно по производной напряжения статора, отклонению и производной частоты напряжения на выводах и по производной тока ротора. Регулятор содержит устройства форсировки и расфорсировки, действующие при достижении напряжением статора установочных максимальных и минимальных значений, а также дополнительные входы для реализации различных программных воздействий от устройств защиты и противоаварийной автоматики.

ЭДМ допускает включение натурных устройств, в частности, промышленных регуляторов возбуждения различных типов.

### МОДЕЛИ ПЕРВИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для правильного отображения длительных переходных процессов (от 1 с и более) на ЭДМ необходимо обеспечить подобие характеристик первичного двигателя со всеми его системами автоматического регулирования, правильно учесть величину резерва мощности, его размещение и способ реализации, а также (в отдельных случаях) переходные процессы в паровых котлах и их системах автоматического регулирования (САР). Моделирование гидравлических и паровых турбин, котлов и их систем регулирования обеспечивается на ЭДМ электродвигателями постоянного тока, источниками питания которых служат регулируемые тиристорные преобразователи с соответствующими системами управления, являющимися, по существу, аналоговыми моделями котла, турбины и их САР.



Генераторы и первичные двигатели

В НИИПТ разработаны и установлены на ЭДМ унифицированные аналоговые устройства — «модель энергоблока» трех модификаций — от наиболее полной до предельно упрощенной. Полная модель энергоблока описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений 14-го порядка и правильно отображает:

- все основные постоянные времени турбины, котла и их САР;
- нелинейности турбины и ее САР, в том числе несимметрию хода клапанов, а также характеристики хода клапанов частей высокого и среднего давления в зависимости от сигналов управления;
- зону нечувствительности САР к изменению частоты (скорости вращения);
- величину резерва мощности (ограничения);
- соотношение мощностей частей высокого, среднего и низкого давления;
- наличие промежуточного перегрева пара;
- возможность воздействия на энергоблок по различным каналам от защиты и противоаварийной автоматики.

Имеется на ЭДМ и специализированный аналоговый блок, моделирующий гидротурбину. Подробная модель гидротурбины описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 8-го порядка и воспроизводит ее моментно-скоростную характеристику, характеристики регулятора скорости, а также учитывает переходные процессы в трубопроводе (гидравлический удар).

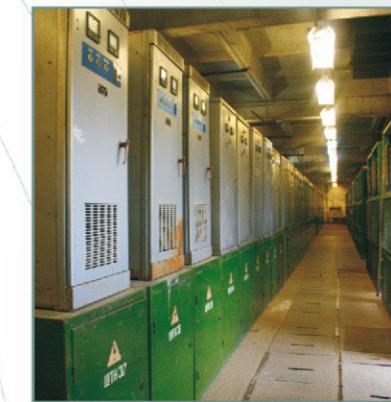
### МОДЕЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Имеющиеся в составе ЭДМ 150 модельных силовых трансформаторов позволяют отобразить любые заданные характеристики повышательных и пониженных трансформаторных подстанций.

Практически все модельные трансформаторы выполнены однофазными, двухстержневыми, двухобмоточными, открытыми, с воздушным охлаждением. Изменение индуктивного сопротивления трансформаторов достигается либо несимметричным расположением обмоток, либо с помощью специального магнитного шунта. Трехфазные группы большинства модельных трансформаторов имеют номинальную мощность 6 и 20 кВ·А. Первая предназначена для синхронных машин 3–5 кВ·А, вторая — для машин 15 кВ·А и выше. Номинальные напряжения всех трансформаторов одинаковы — 220–127/1024 В. Обмотки ВН имеют 36 выводов, обмотки НН — 8 выводов. Это позволяет в широких пределах изменять коэффициент трансформации. В конструкции приняты меры для снижения потерь в стали и тока холостого хода. Суммарная величина активных потерь в номинальном режиме работы трансформатора не превышает 2%.

### МОДЕЛИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

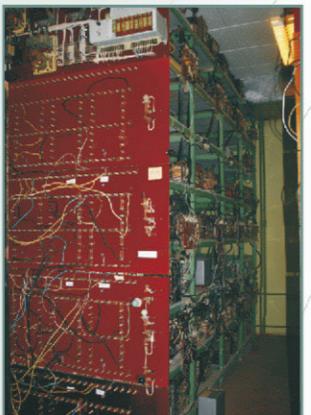
Каждая фаза трехфазной линии электропередачи моделируется одной или несколькими ячейками, представляющими П-образные схемы замещения, составленные из обладающих необходимой добротностью катушек самоиндукции и конденсаторов. Таких ячеек на ЭДМ — 700, что позволяет воспроизвести высоковольтную системообразующую и распределительную сеть большой сложности.



Тиристорные преобразователи



При исследовании электромеханических переходных процессов в сети 50 Гц вполне достаточная точность обеспечивается моделированием одной ячейкой отрезков линии длиной до 250 км. Выбором соответствующих масштабов определяется номинальное напряжение модели линии. Ориентировочно можно указать, что при моделировании высоковольтных линий 1 В модели соответствует 1 кВ натуры. Эксперименты на ЭДМ НИИПТ выполняются для сетей высокого напряжения до 1150 кВ при правильном воспроизведении нормальных и аварийных (симметричных и несимметричных) режимов различных типов линий электропередачи: одноцепных, двухцепных, с грозозащитным тросом и без него, линий повышенной пропускной способности, компактных, настроенных и т. п.



Линии электропередачи

### МОДЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В состав модели линий постоянного тока и преобразовательных подстанций входят следующие элементы:

- 20 двухмостовых двенадцатифазных тиристорных преобразователей. Максимальное выпрямленное напряжение полюса преобразователя — 2,5 кВ, максимальный рабочий ток — 10 А;
- 20 групп силовых трансформаторов с секционированными обмотками. Номинальная мощность трансформатора — 6,67 кВ·А, номинальное напряжение сетевой обмотки — 500 В, номинальное напряжение обмотки, питающей мост — 720 В;
- 20 линейных реакторов стержневого типа со съемным ярмом, предназначенных для моделирования пяти ячеек линии постоянного тока;
- набор реакторов и конденсаторов, позволяющий моделировать индуктивности полюсов и «земли», взаимные и собственные емкости проводов;
- 20 наборов трехфазных фильтров, настроенных на 5, 11, 13-ю гармоники и широкую полосу;
- 20 быстродействующих регуляторов тиристорных преобразователей. Каждый из регуляторов включает в себя подсистемы регулирования выпрямленного тока, минимального тока и углов погасания тиристоров инверторных мостов. Регулятор осуществляет взаимодействие с системой автоматики и управления преобразовательного блока, центральным регулятором мощности (при моделировании сети постоянного тока) и системой измерений на стороне постоянного и переменного тока;



Передачи постоянного тока, ШР, УПК, СТК, СТАТКОМ



Заведующий экспериментально-исследовательским сектором Мичурин Н. А.

— 40 наборов исполнительных устройств, преобразующих выходные импульсы управления в режимные параметры, необходимые для управления тиристорами мостов.

### МОДЕЛИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

В состав ЭДМ входят 166 узлов электрической нагрузки, состоящей из комбинаций асинхронно-двигательной нагрузки, активных шунтов и выпрямительной. Такой набор позволяет отобразить любые заданные статические и динамические нагрузочные совокупности.

Силовая часть агрегатов нагрузки выполнена в двух вариантах:

- асинхронные двигатели мощностью 20, 14, 10, 7, 4,5 кВт (30 шт.) имеют на валу генератор постоянного тока, отдающий мощность либо в сеть через тиристорный инвертор (рекуперация), либо через коммутатор однофазных сопротивлений на активные сопротивления. Выбором соответствующей настройки САР тиристорного инвертора обеспечиваются заданные характеристики электрической нагрузки;
- двигатели мощностью менее 4,5 кВт (50 шт.) работают также совместно с генераторами постоянного тока, которые отдают мощность активным сопротивлениям.

При необходимости некоторые синхронные машины могут быть использованы для моделирования синхронной нагрузки. Узлы нагрузки имеют дополнительные силовые коммутаторы, предназначенные для выбора активных сопротивлений, присоединяемых к данному узлу нагрузки.

### КОММУТАЦИОННЫЕ ЩИТЫ

Силовая схема модели энергосистемы собирается на коммутационных щитах, на которые выведены кабели от узлов модельных генераторов, трансформаторов, линий и узлов нагрузки. Количество силовых связей от моделей линий индивидуально для моделей сетей конкретных энергосистем.

Коммутационные щиты и кабельные связи, оборудованные разъемами, позволяют просто собирать любые схемы энергосистем без прокладки каких-либо временных кабельных перемычек.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦАФК

На щите управления расположены устройства управления и контроля, позволяющие экспериментатору устанавливать расчетный режим исследуемого энергообъединения, изменять его в желаемом направлении, создавать расчетную аварийную ситуацию, обеспечивать определенную последовательность действий автоматических устройств по ее ликвидации, а также устройств, моделирующих мероприятия системной автоматики, действующей в послеаварийном режиме.



Модели нагрузки



Зал управления ЦАФК



Система управления ЦАФК выполнена двухуровневой. Станционный (подстанционный) уровень составляют генераторные и нагрузочные панели управления, с помощью которых производится запуск всех агрегатов, синхронизация генераторов и синхронных компенсаторов, включение нагрузок.



Выставление исходного режима.  
Старший научный сотрудник  
Гущина Т. А.

Выставление расчетного режима производится на системном уровне управления со специальных пультов, на которых сосредоточены органы управления возбуждением и скоростью генераторов и лабораторные приборы для измерения скорости вращения, фазового угла роторов генераторов, напряжения на их зажимах и на шинах станций, активной и реактивной мощности, вырабатываемых станциями, и перетоков мощности по линиям электропередачи. Для удобства органы управления и приборы контроля модели каждой станции размещены на отдельных стандартных блоках, которые соединены со схемой с помощью гибких кабелей на разъемах и, будучи установленными на лабораторных столах, образуют системный пульт управления ЭДМ. Для управления коммутационными аппаратами по заданной временной программе (короткие замыкания, автоматическое повторное включение и т. п.) используются электронные программирующие устройства, обеспечивающие возможность исполнения большого числа команд с точным заданием времени с дискретностью 0,01 с.

#### СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

- предназначена для записи электрических сигналов, их просмотра и дальнейшей обработки с помощью персонального компьютера (ПК);
- включает устройство ввода, ПК с платой ЦАП–АЦП и программу цифрового осциллографирования;
- обеспечивает:
  - одновременность записи входных сигналов по 32 аналоговым каналам и их гальваническую развязку от ПК и друг от друга (относительная погрешность каждого из каналов при измерении переменных и постоянных сигналов — не более 1%);
  - задание периода опроса входных сигналов (от 0,125 мс) и длительности опроса;
  - синхронизацию частоты опроса с частотой сети исследуемой схемы;
  - возможность просмотра и последующей обработки как всего процесса, так и отдельных его частей и явлений с помощью специальной компьютерной программы.



Цифровой осциллограф.  
Испытания проводят  
инженеры Кузьминова А. А., Кабанов Д. А.

Научно-исследовательский институт  
по передаче электроэнергии  
постоянным током высокого напряжения

#### Экспериментально-исследовательский центр «Электродинамика»

194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1, лит А

Телефон: (812) 297 54 10  
Факс: (812) 552 62

E-Mail: niipt@niipt.com  
<http://www.niipt.com>

#### Фролов О. В.

Генеральный директор ОАО «НИИПТ»

#### Герасимов А. С.

Заместитель генерального директора –  
руководитель экспериментально-исследовательского центра  
«Электродинамика»  
gerasimov\_a@niipt.com

#### Есипович А. Х.

Заместитель руководителя  
экспериментально-исследовательского центра  
«Электродинамика» – заведующий лабораторией  
esipovich\_a@niipt.com