# Подумайте об идеях, которые вы доверяете бумаге. В Китае для этого необходимо много бумаги.

Поэтому мы помогли компании Asia Pulp and Paper построить самую мощную бумажную фабрику в мире. Компания АББ также создала интегрированную систему автоматизации нового поколения, позволяющую контролировать все предприятие и управлять им с одного экрана. Мы считаем, что самое важное из богатств, которые мы накапливаем сегодня – это знание. Поскольку движущей силой следующих ста лет будет сила знаний.

www.abb.com

©2002 ABB LTD.

На нашем сайте www.abb.com Вы можете найти более подробную информацию о компании АББ и о концепции устойчивого развития

ABB

4
03

# АББ Ревю

Корпоративный технический журнал группы АББ

4/2003

## Энергетические технологии в действии

ABB

Ни один крупный город мира не может игнорировать опасности, таящиеся в ненадёжном, неустойчивом электроснабжении, что справедливо и для быстроразвивающегося города Шанхай. Современные энергетические технологии сегодня несут свет миллионам китайцев. Перебоев в энергосистемах, которые недавно погружали значительную часть Северной Америки и Европы в темноту, при использовании этих технологий можно было избежать.

В этом номере: 50 лет технологии HVDC (передача высокого напряжения постоянного тока) – её истоки, технологические прорывы и этапные проекты. Кроме того, речь пойдет о самом последнем нашем проекте HVDC – супермагистрали, передающей энергию от плотины «Три ущелья» в крупнейшие населенные пункты и промышленные центры Китая. Не остались без внимания и другие технические решения, находящие применение в современных энергосистемах, например, FACTS, глобальный мониторинг, и силовые полупроводниковые приборы. Наконец, мы рассмотрим управление использованием энергии в реальном времени и уникальное средство, упрощающее генерацию и использование документации.

# Лидерство АББ в области силового оборудования – результат долгосрочного инвестирования в научные исследования и разработки

Современный деловой мир постоянно изменяется и скорость перемен растет. В таких условиях требуется умение быстро реагировать и осуществлять гибкое руководство компанией. В то же время в некоторых сферах по-прежнему делают ставку на долгосрочную перспективу, где вознаграждаются стойкость и упорство. К этим сферам относится область научных исследований и разработок, которая прогнозирует будущие нужды, позволяет овладеть специальными навыками, разрабатывает и тестирует опытные образцы. Короткого пути выхода на рынок новых продуктов или систем не существует.

АББ – неоспоримый лидер в области передачи электроэнергии, но эту позицию нужно было завоевать. Потребовались годы крупных капиталовложений на реализацию целевых научно-исследовательских программ. В этом выпуске «АББ Ревю» мы расскажем о наших самых последних достижениях: современных технологиях, которые в ближайшем будущем значительно помогут сформировать будущее электроэнергетики.

Речь пойдет о системах передачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC). Компания АББ разработала эту технологию еще полвека назад для энергосистем большой пропускной способности, способных передавать электричество на большие расстояния. По сей день компания АББ остается лидером в области передачи постоянного тока высокого напряжения и ставит один мировой рекорд за другим. Вставка постоянного тока высокого напряжения, которую не так давно мы применили на силовой станции в Китае, имеет пропускную способность в 3300 МВт!

Еще одним уникальным достижением АББ является технология HVDC Light™. Данная технология обеспечивает высокую стабильность напряжения, что повышает надежность системы, а также делает возможной реконструкцию сети. Технологию применила на практике американская компания «Кросс Саунд», соединив при помощи HVDC Light™ остров Лонг-Айленд и штат Коннектикут.

Другая гордость наших исследователей и разработчиков – возможность глобального контроля и мониторинга с использованием целого диапазона современных устройств, таких как регулируемые статические компенсаторы реактивной мощности и последовательные конденсаторы. Эта технология помогает увеличивать передаваемую мощность, сохраняя надежность и стабильность сети. Важную роль играют средства имитационного моделирования, с их помощью выявляют как «узкие места», так и возможности расширения сети (см. также «АББ Ревю», №1, 2003 г.). Такая технология жизненно необходима, чтобы избежать крупномасштабных сбоев в системе электроснабжения, подобных тем, что недавно случились в Северной Америке и Европе.

Кроме того, АББ активно помогает потребителям сократить расход электроэнергии, не снижая при этом качества или производительности. В настоящем выпуске вы познакомитесь со статьей, где говорится о том, как управление выработкой электроэнергии в режиме реального времени поможет оптимизировать эффективность энергопользования.

Упомянутая выше современная технология – лишь один из ключей к решению задачи. Не менее важно уметь реагировать на нужды клиентов. Определяющими моментами являются экономическая эффективность и скорость. В последние годы мы ввели в эксплуатацию несколько фабрик, выпускающих нашу продукцию, где использовали собственные запатентованные технологии и передовые автоматизированные системы под управлением разработанной нами новейшей информационной системы – Industrial$^{IT}$. Установленное на фабриках высокоэффективное производственное оборудование позволяет нам изготавливать продукцию высочайшего класса по индивидуальному заказу и выполнять этот заказ в максимально короткий срок.

Мы убеждены, что энергетические технологии АББ – выше упомянуты лишь некоторые из них, – сыграют главную роль в формировании будущего мировой электроэнергетики. Эти технологии будут востребованы в таких регионах как Азия, где для развития промышленности и повышения уровня жизни требуются серьезные дополнительные энергетические затраты, а так же в странах, где необходимо значительно повысить показатели надежности и качества электропитания за счет модернизации имеющейся инфраструктуры.

Маркус Байеган
Глава департамента технологии

# Содержание

**Стр. 6**
Системы электропередачи HVDC - 50-летний юбилей

**Стр. 14**
Магистрали HVDC в Китае


6 50-летие HVDC. Часть I и Часть II

Гуннар Асплунд, Леннарт Карлссон, Уве Толлерц

В 1954 году в эксплуатацию была введена первая в мире коммерческая линия передачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC), соединившая остров Готланд со Скандинавским полуостровом. Сегодня, спустя 50 лет, компания АББ остается бесспорным лидером в технологии HVDC и продолжает совершенствовать ее.

14 Магистрали HVDC в Китае

Лейф Энглунд, Матс Лагерквист, Ребати Дасс

Линии передачи постоянного тока высокого напряжения, строящиеся компанией АББ совместно с единой государственной энергетической системой Китая (SPG), позволят передавать энергию от гидроэлектростанции «Три ущелья» в крупнейшие центры потребления электроэнергии в прибрежных районах Китая. Сданная недавно в эксплуатацию 500 кВ линия «Три ущелья» – Чанджоу протяженностью 890 км обладает рекордной пропускной способностью – 3300 МВт.

21 Передовое управление FACTS

Горан Андерсон, Тим Грин, Бикаш Пал, Христиан Рехтанц

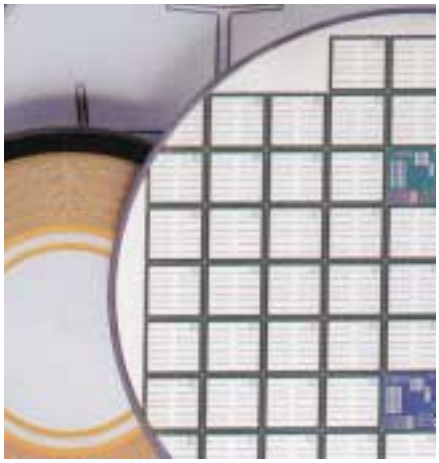
Работа над совместным проектом компании АББ и двух ведущих университетов позволяет решить проблемы глобального сетевого регулирования потоков мощности и демпфирования колебаний в электрических сетях.

27 Силовые полупроводниковые приборы – в центре тихой революции

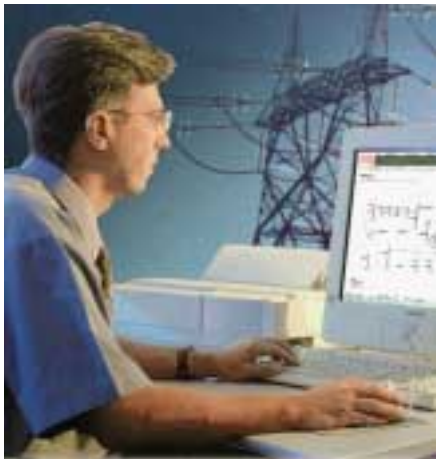
Штефан Линдер

Силовые полупроводниковые приборы практически полностью вытеснили электромеханические устройства в области электроприводов, транспортных средств, передачи и распределения электроэнергии. Но что же придает силовым полупроводниковым приборам столь замечательные свойства для применения в силовых системах?

# Содержание



**Стр. 27**
Силовые полупроводниковые приборы



**Стр. 32**
Вся энергосистема - как на ладони

**Стр. 37**
Управление использованием энергии


32 Платформа Inform$^{IT}$ Wide Area Monitoring PSG 850
Иоахим Берщ, Седрик Карнал, Андреас Сураньи
Благодаря внедрению устройств векторных измерений и достижениям в области связи появилась техническая возможность для глобального подхода к вопросу мониторинга устойчивости энергосистем в оперативном режиме. Модули PSG компании АББ позволяют оптимизировать использование основных средств и могут предотвратить потерю устойчивости в сетях электропередачи

37 Управление использованием энергии на промышленных предприятиях в реальном времени с помощью Industrial$^{IT}$
Тронд Хауген и др.
Реализация управления энергией опирается на сбор данных, поиск возможностей, определение целей и задач, внедрение изменений и контроль результатов. Ключом к решению проблемы является эффективный доступ к нужной информации, что и предлагает технология Industrial$^{IT}$ компании АББ.

43 Средство Engineer$^{IT}$ Documentation Assistant - помощник в работе со сложной документацией
Збигнев Корендо и др.
Сложные промышленные установки обычно сопровождаются горой документов, и электрическая подстанция - не исключение. Чтобы облегчить жизнь инженерам, компания АББ разработала средство Engineer$^{IT}$ Documentation Assistant.

## Исследования и разработки

47 Средство просмотра аспектных объектов Inform$^{IT}$ – эквивалент Adobe Acrobat для Industrial$^{IT}$
48 «Человеческие черты». Новый метод программирования роботов
50 Новое средство моделирования на основе Web для операторов установок получения полимеров

52 Новости


www.abb.com/abbreview

# 50-летие HVDC

**Часть I**

## АББ – от пионера до мирового лидера

Гуннар Асплунд, Леннарт Карлссон, Уве Толлерц

**В 1954 году, когда Европа активно расширяла инфраструктуру электроснабжения, чтобы покрывать растущий спрос, на берегах Балтийского моря зарождалось то, что в последствии должно было оказать долгосрочное влияние на передачу электроэнергии на большие расстояния. Четырьмя годами ранее Национальная администрация энергетики Швеции разместила заказ на первую в мире коммерческую линию передачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC), необходимую, чтобы соединить остров Готланд со Скандинавским полуостровом. В 1954 линию ввели в эксплуатацию.**

**Спустя 50 лет, АББ с гордостью смотрит на свой значительный вклад в технологию HVDC. С момента прокладки глубоководного кабеля (100 кВ, 20 МВт) протяженностью почти 90 км наша компания постоянно развивалась и стала неоспоримым мировым лидером в области передачи HVDC. Свыше половины установленных линий передачи HVDC общей мощностью 70 000 МВт во всем мире выполнены компанией АББ.**

В конце XIX века в домах Европы и США появилась электрическая лампочка. Спрос на электричество стремительно рос, и вскоре инженеры и предприниматели озадачились поиском экономичных способов производства и передачи электричества. Пионеры новой технологии уже добились некоторого успеха – передача энергии на считанные километры была фантастическим достижением – когда ответ был найден: гидроэлектроэнергия. Почти мгновенно интерес повернулся в сторону передачи этого «дешевого» электричества на дальние расстояния.

### Сначала постоянный, затем переменный ток

Первые электростанции Европы и США вырабатывали постоянный ток низкого напряжения (DC), но используемые при этом системы передачи электроэнергии оказались малоэффективными: большая часть генерируемой энергии терялась в проводах. Переменный ток (AC) оказался более практичным, поскольку его можно легко преобразовать в высокое напряжение и передавать со значительно меньшими потерями. Таким образом, для передачи электроэнергии на дальние расстояния было решено использовать переменный ток высокого напряжения (HVAC).

В 1893 году произошел новый прорыв: появилась трехфазная передача электроэнергии, которая позволила обеспечить ровный, непульсирующий поток электроэнергии.

Несмотря на то, что постоянный ток оказался неприменимым в развитии эффективной системы передачи электроэнергии, инженеры все же не отказывались от идеи его использования. По-прежнему предпринимались попытки построить высоковольтную линию электропередачи с последовательно соединенными генераторами постоянного тока и последовательно соединенными электродвигателями постоянного тока

Аналоговое моделирующее устройство, использовалось при разработке первых систем передачи постоянного тока высокого напряжения

на приемном конце, причем все двигатели располагались на едином валу. Сеть заработала, но оказалась экономически неэффективной.

### Переменный ток доминирует

Системы переменного тока расширялись, а электроэнергия вырабатывалась далеко от места нахождения потребителей. Строились длинные воздушные линии электропередачи, возрастало номинальное напряжение, с которым могли работать эти линии. Для пересечения водной шири был создан глубоководный кабель.

Ни одно из этих средств передачи не оказалось идеальным. Проблемы вызывала реактивная мощность, обусловленная паразитной ёмкостью и индуктивностью в системе. В результате разработчики систем энергоснабжения снова обратились к возможности использования постоянного тока.

### Возврат к постоянному току

Раньше передача постоянного тока высокого напряжения не находила применения главным образом из-за отсутствия надежных и экономичных вентилей, необходимых для преобразования переменного тока в постоянный и наоборот.

С появлением ртутного вентиля обозначилась долгосрочная линия перспективы развития. С тех пор как в конце 20х гг. шведская компания ASEA – учредитель компании АББ – наладила производство статических преобразователей и ртутных вентилей для работы с напряжением до 1000 В, велись постоянные разработки по созданию вентилей для работы с еще более высоким напряжением.

Когда передача постоянного тока высокого напряжения стала технически реализуемой, один вопрос еще долго оставался нерешенным: сможет ли HVDC составить достойную конкуренцию HVAC.

Потребовалось изучение новых областей, в которых прежний опыт не мог оказать существенной поддержки. В течение нескольких лет вопрос о том, возможно ли разрешить все имеющиеся проблемы, оставался спорным. Когда передача постоянного тока высокого напряжения стала технически реализуемой, оставался только один вопрос: сможет ли HVDC составить достойную конкуренцию HVAC?

Проектирование вращающейся электрической машины или трансформатора требует высокой точности, базирующейся на математически сформулированных законах физики, в то время как разработка ртутного вентиля зависит в большей степени от знаний, полученных опытным путем. В результате, попытки поднять напряжение в парортутной лампе за счет увеличения мертвой зоны между анодом и катодом неизменно оканчивались провалом.

Проблему решили в 1929 г., поместив между анодом и катодом электрод выравнивания напряжения. Впоследствии открытие было запатентовано и стало своего рода краеугольным камнем всех дальнейших разработок высоковольтного ртутного вентиля. Именно тогда д-р Уно Ламм, который возглавлял разработки, прослыл «отцом постоянного тока высокого напряжения».

### Связь с Готландом

Пришло время эксплуатационных испытаний при еще более высоком напряжении. В 1945 г. совместно с Национальной администрацией энергетики Швеции была запущена испытательная установка в Трольхеттане, где находилась крупнейшая электростанция, способная предоставить электроэнергию. В распоряжении испытателей была линия электропередачи протяженностью 50 км.

Спустя несколько лет, в 1950 г., Национальная администрация энергетики Швеции разместила заказ на оборудование для первой в мире линии передачи постоянного тока высокого напряжения. Новая линия должна была соединить остров Готланд, расположенный в Балтийском море, со Скандинавским полуостровом.

После выполнения этого заказа компания усилила работы в области разработки ртутного вентиля и высоковольтного кабеля для линий постоянного тока и занялась проектированием других компонентов преобразовательных подстанций: усовершенствованию подверглись трансформаторы, реакторы, коммутационные устройства, защитная и контрольная аппаратура.

В новой DC-системе можно было использовать лишь некоторые технологии AC-системы, поэтому требовалось создать абсолютно новую технологию. Специалисты из Людвики под руководством д-ра Эрика Ульманна и д-ра Харри Форселла приступили к разрешению множества имеющихся сложных задач. Впоследствии была разработана концепция Готландской системы. Эта концепция оказалась настолько удачной, что остается практически неизмененной и по сей день!

Готланд – остров, и поэтому межсистемную связь энергосети пришлось прокладывать под водой, для чего потребовался глубоководный кабель, способный

Один из первых высоковольтных ртутных вентилей.

передавать постоянный ток. Хорошим подспорьем для дальнейших разработок стал «классический» кабель с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой, применяемый с 1985 г. для передачи переменного тока напряжением 10 кВ. Вскоре был создан кабель постоянного тока на напряжение 100 кВ!

Наконец, в 1954 г, через четыре года прогрессивных разработок, была введена в эксплуатацию готландская линия передачи постоянного тока высокого напряжения (20 МВт, 200 А и 100 кВ). Началась новая эра передачи электроэнергии.

Готландская линия успешно проработала 28 лет и в 1986 г. была выведена из эксплуатации. Чтобы соединить остров Готланд со Скандинавским полуостровом были построены две новые более мощные линии: одна в 1983 г., другая в 1987 г.

Тщательная проработка конструкции ртутного вентиля является гарантией высокого уровня надежности – некоторые преобразователи на этих вентилях работают даже спустя 35 лет после ввода в эксплуатацию.

## Первые HVDC проекты

В начале 50х гг. департаменты энергетики Великобритании и Франции решили построить линию электропередачи через Ла-Манш. Выбор пал на высоковольтную линию постоянного тока и наша компания получила второй заказ на HVDC, на этот раз мощностью 160 МВт.

Успех первых проектов привлек мировой интерес. В результате в 60х гг. построены несколько линий передачи постоянного тока высокого напряжения: Конти-Скан между Швецией и Данией, Сакума в Японии (с преобразователями частоты 50/60Гц), еще одна линия соединила Южный и Северный острова Новой Зеландии, другая – Италию с Сардинией и еще одна – Канаду с островом Ванкувер. Самую большую линию передачи постоянного тока с преобразователями на ртутных вентилях компания установила между энергосистемами севера и юга Тихоокеанского побережья США [1]. Первоначально линия была рассчитана на мощность 1440 МВт, позже ее подняли до 1600 МВт с напряжением ±400 кВ, ее северный терминал находится в Далласе, штат Орегон, а южный – в верхней части лос-анджелесского бассейна. Проект был осуществлен совместно с компанией «Дженерал Электрик» и стартовал в 1970 г.

Итого, компанией установлено восемь высоковольтных систем постоянного тока на основе ртутных вентилей с общей номинальной мощностью 3400 МВт. И хотя после появления тиристорных вентилей некоторые из этих систем были заменены или модернизированы, остальные, спустя 30-35 лет с момента их пуска, по-прежнему находятся в эксплуатации.

Ртутные вентили первой готландскогой линии, 1954 г.

**Часть II: 50-летие систем электропередачи HVDC – Полупроводники «берут свое» ➠ стр.10**

Литература
[1] **Л. Энгстрём:** Постоянный ток несет Лос Анджелесу больше электроэнергии. «АББ Ревю», №1/88, 3-10.

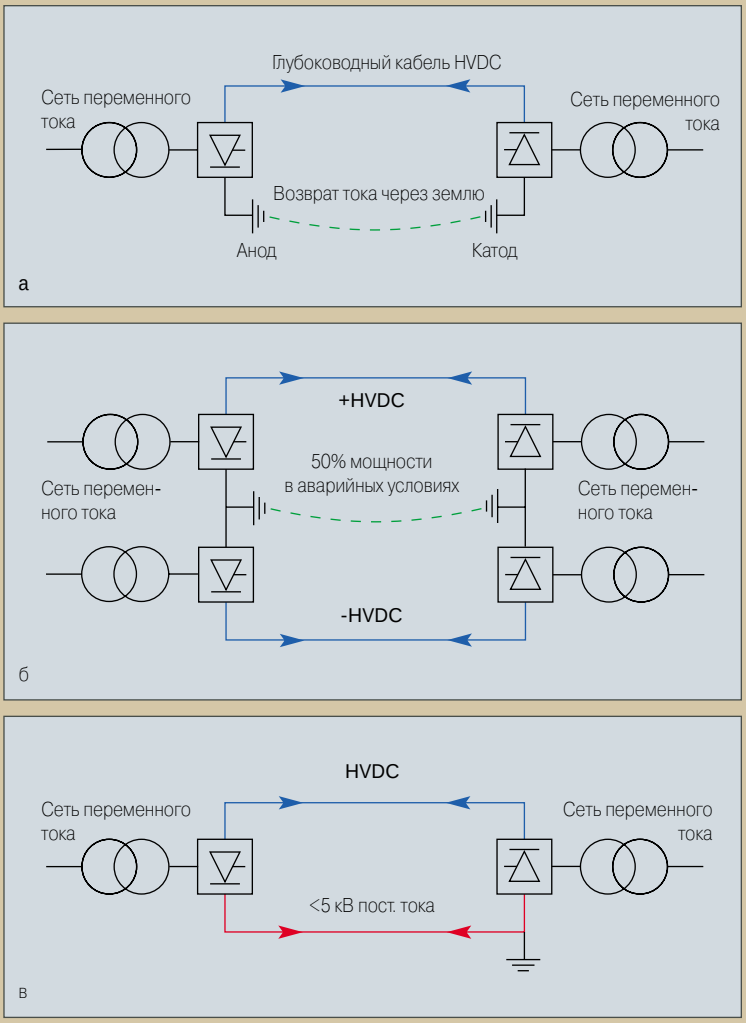
# Постоянный ток высокого напряжения пересекает море

В любом силовом кабеле, предназначенном для передачи переменного тока на большое расстояние, в виду его высокой емкости рассеивается реактивная мощность, которая ограничивает максимально возможную дальность передачи тока. В результате при длине глубоководного кабеля примерно 40 км или более его зарядный ток, поступающий с берега, создает полную нагрузку на кабель и не оставляет возможности для передачи полезной мощности. Постоянный ток не накладывает подобных ограничений и поэтому HVDC является единственно верным решением для кабельной линии большой протяженности. Еще одним положительным моментом использования кабеля DC является его более низкая стоимость по отношению к кабелю AC.

В системе HVDC электроэнергия поступает из 3-фазной сети переменного тока на преобразовательную станцию, где она преобразуется в постоянный ток и передается по глубоководному кабелю в пункт приема. Там на другой преобразовательной станции она снова преобразуется в переменный ток и подается в приемную сеть переменного тока. Существует несколько схем систем передачи постоянного тока высокого напряжения.

Основной схемой кабельной передачи постоянного тока является однополюсная система, в которой для возврата тока используются земля и морская вода. Использование морской воды в качестве проводника для обратного тока снижает стоимость линии, поскольку между двумя преобразовательными станциями находится один единственный кабель. Кроме того, за счет огромного поперечного сечения обратного проводника и, следовательно, пренебрежимо малого сопротивления, потери передачи сводятся к минимуму.

Основные используемые схемы передачи постоянного тока высокого напряжения.




а = Однополюсная схема передачи постоянного тока высокого напряжения с возвратом тока через землю
б = Двухполюсная схема передачи постоянного тока высокого напряжения
в = Однополюсная схема передачи постоянного тока высокого напряжения с обратным кабелем

Потери, вызванные падением напряжения, возникают только на заземляющем аноде и катоде. Во избежание коррозии трубопроводов или иных находящихся по соседству металлических конструкций, а также во избежание смещения нулевого потенциала нейтрали трансформаторов, заземляющие электроды должны располагаться достаточно далеко от преобразовательных станций и главного кабеля HVDC. Хорошая электропроводимость земли и морской воды облегчает проектирование электродов. Следует отметить, что на практике однополюсные линии электропередачи показали высокие результаты.

Дальнейшим этапом развития однополюсной схемы передачи является двухполюсная схема. Обычно она представлена в виде двух однополюсных систем: одна из которых имеет положительную, а другая отрицательную полярность по отношению к земле. Каждая однополюсная сторона способна функционировать самостоятельно, обеспечивая возврат тока через землю. Однако, если ток в этих системах одинаков, то суммарный ток, протекающий через землю, равен нулю. В таких случаях, если один из полюсов неисправен, для кратковременной работы в аварийных условиях используется заземляющий контур.

В однополюсной системе с обратным кабелем обратный ток проходит через проводник, в качестве которого используется кабель среднего напряжения, что помогает избежать потенциальных проблем, связанных с возвратом тока через землю.

SwePol Link устанавливает новый стандарт для систем передачи постоянного тока высокого напряжения, Лейф Содерберг, Бернт Абрахамссон.
«АББ Ревю», №4/2001, стр. 63 – 70.

# 50-летие HVDC

**Часть II**

## Полупроводники «берут своё»

Гуннар Асплунд, Леннарт Карлссон, Уве Толлерц

**Высоковольтные системы постоянного тока на основе ртутных вентилей за короткое время прошли долгий путь, но эта технология по-прежнему была не лишена недостатков. Одним из них являлось трудно предсказуемое поведение самих вентилей. Они не всегда выдерживали обратное напряжение, что приводило к возникновению обратной дуги. Кроме того, ртутные вентили требуют регулярного обслуживания, в ходе которого решающее значение имеет абсолютная чистота. Возникла необходимость в вентиле, который был бы лишен таких недостатков.**

**Изобретение тиристора в 1957 году открыло перед отраслью целый ряд новых возможностей, и передача постоянного тока высокого напряжения теперь рассматривалась как многообещающая область применения. На пороге стояла новая эра.**

В сю первую половину 1960х годов огромный интерес к полупроводниковой технике стимулировал продолжение работ по разработке высоковольтных тиристорных вентилей для замены ртутных. Весной 1967 года один из ртутных вентилей на готландской линии электропередачи HVDC был заменен тиристорным вентилем. Это стало первым в мире промышленным применением этого типа вентиля для высоковольтной линии постоянного тока. После года испытаний Национальная администрация энергетики Швеции заказала целую группу тиристорных вентилей для каждой преобразовательной подстанции, пропускная способность линии при этом увеличивалась на 50 процентов.

Примерно в то же время проводились испытания на готландском глубоководном кабеле, который эксплуатировался без проблем при напряжении 100 кВ. Целью испытаний была проверка возможности увеличения напряжения до 150 кВ, то есть до уровня, необходимого для передачи большей мощности. Испытания показали, что это возможно, и впоследствии кабель эксплуатировался при напряженности поля в изоляции 28 кВ/мм, что до сих пор является мировым эталоном для крупных кабельных линий электропередачи постоянного тока.

Новые группы вентилей были подключены последовательно с двумя имеющимися группами ртутных вентилей, увеличивая, таким образом, рабочее напряжение линии со 100 до 150 кВ. Эта система более высокой мощности была введена в эксплуатацию весной 1970 года, она стала еще одним «мировым рекордом» готландской линии электропередачи.

> Масштаб и сложность проекта Итайпу поставили серьезные задачи, и он может рассматриваться как начало современной эры систем постоянного тока высокого напряжения.

Появление тиристорных вентилей дало возможность упростить преобразовательные подстанции, и с тех пор полупроводники использовались во всех линиях электропередачи HVDC. Другие компании также начинали работать в этой области. В середине 1970х годов компания Brown Boveri (BBC) – которая впоследствии слилась с ASEA и образовала АББ

Станция Готланд 1 с первыми в мире высоковольтными тиристорными вентилями

– объединила усилия с Siemens и AEG для строительства высоковольтной линии электропередачи постоянного тока Кахора Басса мощностью 1920 МВт между Мозамбиком и ЮАР. Тот же консорциум затем построил линию «Нельсон-ривер 2» мощностью 2000 МВт в Канаде. В этом проекте впервые были задействованы высоковольтные вентили с водяным охлаждением.

В конце 70х было построено еще несколько объектов. Среди них – линии Скагеррак между Норвегией и Данией, Инга-Шаба в Конго, и проект CU в США.

В 1980х дважды расширялась Тихоокеанская линия электропередачи между северной и южной энергосистемами США, оба раза использовались тиристорные преобразователи для увеличения мощности линии до 3100 МВт при напряжении ±500 кВ. (В настоящее время компания АББ проводит модернизацию терминала Сильмар с применением новейшей технологии).

## Итайпу – новые рубежи

В 1979 году консорциум ASEA-PROMON получил подряд на строительство линии электропередачи постоянного тока высокого напряжения Итайпу в Бразилии мощностью 6300 МВт, которая до сегодняшнего дня остается крупнейшей в мире высоковольтной линией постоянного тока. Строительство и сдача в эксплуатацию осуществлялась поэтапно в период с 1984 по 1987 г. Эта линия играет ключевую роль в бразильской энергетической системе, поставляя большую часть электроэнергии в город Сан-Паоло.

Масштаб и сложность проекта Итайпу поставили серьезные задачи, и он может рассматриваться как начало современной эры систем постоянного тока высокого напряжения. Опыт, полученный во время выполнения этого проекта, в немалой степени помог компании АББ впоследствии получить многие заказы на строительство линий электропередачи HVDC.

После Итайпу самым сложным проектом, несомненно, стала высоковольтная линия Квебек – Новая Англия мощностью 2000 МВт. Она стала первой в мире системой электропередачи постоянного тока с промежуточными присоединениями.

## Высоковольтные кабели

По мере роста мощности преобразовательных станций увеличивалась мощность и напряжение, на которые должны быть рассчитаны кабели HVDC.

На сегодняшний день самые мощные глубоководные кабели рассчитаны на 600 МВт при напряжении 450 кВ. Самые длинные из них проложены по дну Балтийского моря между Швецией и Германией (230 км) и между Швецией и Польшей (кабель линии SwePol длиной 260 км).

## Системы HVDC сегодня

Большинство строящихся в настоящее время высоковольтных преобразовательных подстанций постоянного тока основаны на тех же принципах, которые принесли успех первой готландской линии еще в 1954 году. Первое серьезное изменение в конструкцию станций было внесено в начале 1970х годов с внедрением тиристорных вентилей. Первые из них имели воздушное охлаждение и предназначались для использования в помещениях. Но вскоре стали применяться вентили с масляным охлаждением и изоляцией, рассчитанные на эксплуатацию вне помещения. Выпускаемые в настоящее время высоковольтные вентили имеют водяное охлаждение [1].

Хорошим примером линии электропередачи постоянного тока высокого напряжения являются линии повышенной пропускной способности, которые компания АББ монтирует для гидроэлектростанции «Три ущелья» в Китае. (Начало статьи о проекте «Три ущелья» – на стр. 14 этого номера).

В 1995 году компания АББ представила новое поколение преобразовательных подстанций постоянно-

Преобразовательная подстанция Фоз-до-Игуацу. На заднем плане – электростанция Итайпу мощностью 12 600 МВт.

Преобразовательная подстанция HVDC проекта «Балтийский кабель»

го тока высокого напряжения: «HVDC 2000» [2]. Система «HVDC 2000» была разработана для обеспечения более жестких требований к стабильности электрических параметров, улучшения динамической устойчивости в режиме КЗ, для преодоления пространственных ограничений, а также для сокращения сроков доставки.

Ключевой особенностью «HVDC 2000» являлось внедрение преобразователей с емкостной коммутацией (CCC). Это было, фактически, первым коренным изменением, внесенным в основную технологию HVDC после 1954 года!

Глубоководный кабель для линии электропередачи HVDC проекта «Балтийский кабель» мощностью 600 МВт между Германией и Швецией

В «HVDC 2000» также вошли другие инновации компании АББ, такие как плавно регулируемые фильтры переменного тока (ConTune), активные фильтры постоянного тока, высоковольтные вентили наружного исполнения с воздушной изоляцией, а также полностью цифровая система управления MACH2™.

Первым проектом, в котором была задействована система HVDC 2000 с CCC и вентилями наружного исполнения, стала компенсационная станция Караби мощностью 2200 МВт в межсистемной линии электропередачи постоянного тока Бразилия – Аргентина.

## HVDC Light™

За прошедшие 50 лет была отработана технология HVDC, которая стала надежным способом передачи электроэнергии на большие расстояния с очень низкими потерями. В связи с этим возникает вопрос: в каком направлении будут вестись разработки в будущем?

Стало очевидным, что развитие систем постоянного тока высокого напряжения вновь может воспользоваться достижениями в области промышленных приводов. Здесь тиристоры уже давно заменены преобразователями источника напряжения (VSC) с такими полупроводниковыми приборами, отключением которых можно управлять точно также, как и включением. Это принесло массу преимуществ при создании систем промышленных приводов и стало ясно, что они могут применяться и в системах электропередачи. Однако, внедрение технологии преобразования источника напряжения в области систем HVDC – это непростая задача. Нужно изменить всю технологию, а не только вентили.

> Большинство строящихся в настоящее время высоковольтных преобразовательных подстанций постоянного тока основаны на тех же принципах, которые принесли успех первой готландской линии

По мере разработки преобразователей VSC в компании АББ поняли, что биполярный транзистор с изолированным затвором, или IGBT, является наиболее перспективным по сравнению с другими полупроводниковыми приборами. Прежде всего, для управления IGBT требуется очень малая мощность, что дает возможность последовательного подключения IGBT. Однако для работы с высоким напряжением требуется последовательное подключение большого количества IGBT, что не было необходимо для промышленных приводов.

В 1994 году компания АББ сконцентрировала свои силы на разработке преобразователей VSG для проекта, целью которого было введение в эксплуатацию двух конверторов на основе IGBT для небольшой линии HVDC. Для проекта была выделена расположенная в центральной Швеции линия электропередачи переменного тока длиной 10 км.

В конце 1996 года после проведения всесторонних испытаний на синтетической модели, оборудование было смонтировано для эксплуатационных испытаний. В 1997 году первая в мире система электропередачи постоянного тока высокого напряжения с преобразованием источника напряжения, HVDC Light™, начала передавать энергию между шведскими городами Хеллсьон и Грангесберг.

В тоже время были размещены заказы на семь подобных систем, и шесть из них уже находятся в промышленной эксплуатации в Швеции, Дании, США и Австралии. Современные системы HVDC Light имеют мощность до 350 МВт при напряжении до ±150 кВ. Компания АББ на сегодняшний день является единственной фирмой, которой удалось разработать и построить системы электропередачи постоянного тока высокого напряжения с преобразователем источника напряжения [4].

Одним из преимуществ системы HVDC Light является то, что она позволяет достичь высокой устойчивости и улучшить компенсацию реактивной мощности на каждом конце сети. Кроме того, она обладает очень низким значением мощности КЗ и даже

Станция в Шорехаме [Shoreham], система HVDC Light™ американской компании «Кросс Саунд» мощностью 330 МВт

Наземный кабель HVDC Light

допускает возможность «черного» пуска. Изоляция кабеля системы HVDC Light изготавливается из полимерного материала и поэтому обладает повышенной прочностью и надежностью. Это позволяет применять кабели там, где неблагоприятные условия прокладки могли бы вызвать повреждения обычного кабеля. Кроме того, экструдированные кабели сделали сверхдальние наземные линии электропередачи постоянного тока экономически жизнеспособными. Примером может служить 180-километровая межсистемная линия HVDC Light™ «Мюррейлинк» в Автралии.

## Еще 50 лет?

Системы электропередачи постоянного тока высокого напряжения прошли долгий путь с момента появления первой линии на острове Готланд. Но каково их будущее?

Весьма вероятно, что линии электропередачи большой пропускной способности будут опираться на тиристорную технологию в течение многих лет в силу ее надежности и дешевизны, а также малых потерь. Повышение напряжения – это один из путей, который позволяет значительно увеличить мощность и протяженность линий.

> Внедрение преобразователей с емкостной коммутацией стало первым коренным изменением, внесенным в основную технологию системы HVDC после 1954 года!

Система HVDC Light также обладает потенциалом для дальнейшего развития. Одним из его направлений может стать увеличение напряжения и мощности, но для небольших нагрузок и генераторов также возможно использование небольшой мощности при относительно высоком напряжении.

Разработка кабельной системы HVDC Light позволила связать сети, разделенные огромными водными глубинами, о чем раньше нельзя было и мечтать. Однако одной из самых интересных перспектив развития системы HVDC Light является ее потенциал при построении линий с промежуточными присоединениями. В долгосрочном плане она может стать реальной альтернативой передаче переменного тока, которая в настоящее время полностью господствует в этом секторе.

**Гуннар Асплунд,**
**Леннарт Карлссон,**
ABB Power Technologies
Людвика/Швеция
gunnar.asplund@se.abb.com
lennart.k.carlsson@se.abb.com

**Уве Толлерц**
ABB Power Technologies
Карлскрона/ Швеция
ove.tollerz@se.abb.com

Литература
[1] **Б. Шенг [B. Sheng], Х. О. Бьярме [H-O. Bjarme]:** Подтверждение рабочих характеристик – Синтетическая испытательная схема для проверки расчетных характеристик высоковольтных тиристорных вентилей. АББ Ревю 3/2003, 25-29
[2] **B. Aernlöv:** HVDC 2000 – a new generation of high-voltage DC converter stations. ABB Review 3/1996, 10–17.
[3] **G. Asplund, et al**: HVDC Light – DC transmission based on voltage sourced converters. ABB Review 1/1998, 4–9.
[4] **T. Нестли [T. Nestli] и др.:** Снабжение электроэнергией газодобывающей платформы Troll по новой технологии. АББ Ревю 2/2003, 15-19.

Более подробную информацию о системах HVDC можно найти на сайте www.abb.com/hvdc

高压直流

# Магистрали HVDC в Китае

Лейф Энглунд, Матс Лагерквист, Ребати Дасс

**После завершения строительства в 2009 году гидроэлектростанция «Три Ущелья» в среднем течении реки Янцзы станет крупнейшей в мире станцией подобного типа. 26 турбогенераторов, номинальная мощность каждого из которых составляет 700 МВт, составят впечатляющую генерирующую базу в 18,2 ГВт.**

**Не менее сложной задачей оказалась разработка технически и экономически оправданной системы передачи этой энергии в прибрежные районы Китая, где имеется острый энергетический дефицит. После выполнения технико-экономического обоснования, Единая государственная энергетическая система Китая приняла решение построить гибридную систему передачи постоянно-переменного тока высокого напряжения протяженностью более 10 000 км, трансформаторной мощностью около 2475 МВА. Линии постоянного тока, уходящие со станции, включают двухполюсные магистрали электропередачи общей мощностью более 10 000 МВт.**

В настоящее время в Китае монтируются две крупнейшие в мире по мощности и протяженности линии передачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC), номинальная пропускная способность каждой из которых составляет 3000 МВт. Они строятся компанией АББ совместно с единой государственной энергетической системой Китая (SPG). Эти линии будут передавать экологически чистую энергию, вырабатываемую гидроэлектростанцией «Три ущелья», которая расположена в среднем течении реки Янцзы, в крупнейшие центры потребления электроэнергии в прибрежных районах Шанхая и Шеньчженя.

С самого начала разработки проектов передачи энергии ключевыми задачами являлось повышение коэффициента готовности и снижение частоты аварийного простоя. Именно по этой причине на ключевых участках используются современные технологии, поддержанные солидным опытом реальной эксплуатации в сочетании с органической эксплуатационной гибкостью и малым объемом технического обслуживания.

Тесное сотрудничество между компанией АББ, заказчиком и представителями заказчика по проектированию и надзору, а также местными производителями, укреплялось в рамках проектных контрактов в форме обучения и передачи технологии (см. вставку), с целью обеспечения успеха проектов на всех стадиях.

**Передача технологии и местное производство**

Контракты на оба проекта (3GC и 3GG) включают в себя обширные программы совместного проектирования, обучения и передачи технологий.

По программе совместного проектирования разработка рабочей документации осуществляется совместно инженерами и специалистами SPG и АББ.

Обучение представителей SPG охватывает эксплуатацию и техническое обслуживание. Его целью является обеспечение правильной эксплуатации и технического обслуживания объектов местным персоналом.

Программы передачи технологий включают в себя передачу различным китайским организациям, относящимся и не относящимся к АББ, ноу-хау в области проектирования систем постоянного тока высокого напряжения, расчёта систем автоматического регулирования и производства аппаратуры. Эти программы будут способствовать достижению Китаем своих целей по укреплению самодостаточности в области проектирования и производства оборудования HVDC.

1 Местоположение электростанции «Три ущелья» на реке Янцзы

## Электростанция «Три ущелья»

Дамба гидроэлектростанции «Три Ущелья» (рис. 1) является крупнейшим в мире сооружением такого типа. Ее длина составляет около 1,5 км, высота - 185 м (590 футов). Водохранилище с нормальным подпорным уровнем в 175 м (560 футов) будет простираться на 560 км (350 миль) вверх по течению.

Общая мощность гидроэлектростанции с 26 турбогенераторами, мощностью 700 МВт каждый, составит 18,2 ГВт (мощность следующей по величине электростанции в Итайпу, Бразилия, составляет 12 ГВт). В будущем планируется смонтировать шесть дополнительных блоков в подземном здании ГЭС, доведя таким образом общую мощность до 22,4 ГВт. Эта цифра означает, что имеющаяся в Китае установленная мощность в 350 ГВт будет увеличена более чем на шесть процентов. Среднегодовая выработка электростанции «Три ущелья» составит 84,7 тераватт-час [1, 2].

Тесное сотрудничество между компанией АББ, заказчиком, представителями заказчика, и местными производителями укреплялось в рамках проектных контрактов в форме обучения и передачи технологии

## Система передачи мощности

Энергия, вырабатываемая электростанцией «Три ущелья», будет передаваться в энергосистемы центральных и восточных районов Китая, в провинции Сычуань и Гуандун с помощью системы электропередачи «Три ущелья». Эта система включает более 10 000 км линий передачи переменного и постоянного тока высокого напряжения. Она станет основой новой общегосударственной сети передачи электроэнергии по мере того, как существующие в настоящее время семь региональных сетей электроснабжения и пять независимых провинциальных сетей будут объединяться для создания двух новых региональных сетей. Создание общенациональной электроэнергетической системы запланировано на 2015 год.

Большая часть энергии будет передаваться в промышленно развитые прибрежные области Китая в районе Шанхая и Шеньчжене с помощью четырех высоковольтных линий постоянного тока (рис. 2):

- Двухполюсная высоковольтная линия постоянного тока Гежоуба - Шанхай, 1200 МВт, в эксплуатации с 1991 года.
- Двухполюсная линия «Три ущелья» – Чанджоу, 3000 МВт (3GC), сдана в эксплуатацию в марте 2003 года.
- Двухполюсная линия «Три ущелья» - Гуандун, 3000 МВт (3GG), сдается в эксплуатацию в настоящее время.
- «Три ущелья» - Шанхай, 3000 МВт (3GC), начало эксплуатации намечено на 2007 год.

Вариант передачи постоянного тока высокого напряжения, вырабатываемого электростанцией «Три ущелья», был избран по нескольким причинам. Так как сети переменного тока в восточном Китае/Гуандуне не синхронизированы, то передача переменного тока потребовала бы согласования и было бы чрезвычайно трудно обеспечить достаточный запас устойчивости.

Постоянный ток позволяет осуществлять управляемую передачу между сетями, которые сохраняют свою независимость. Постоянный ток также экономически более выгоден в плане стоимости строительства и потерь. Для передачи того же объема энергии потребуется пять линий переменного тока с последовательной компенсацией напряжением 500 кВ, и каждой линии потребуется большая полоса отчуждения по сравнению с одной линией HVDC мощностью 3000 МВт.

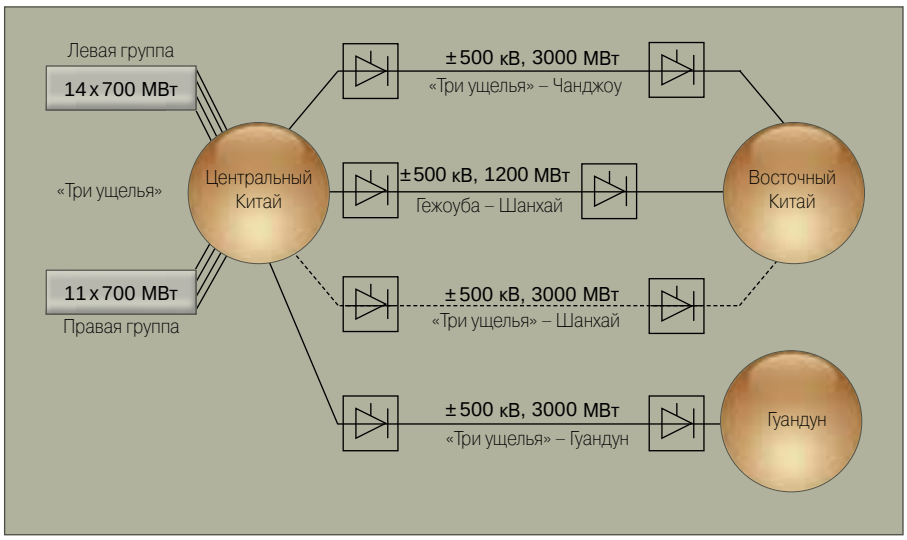
## Беспрецедентный опыт работы в области высоковольтных линий передачи постоянного тока большой мощности

Компания АББ обладает непревзойденным опытом в области двухполюсных систем HVDC. Перед получением подряда на строительство в «Трех ущельях» компания АББ успешно построила целый ряд крупных двухполюсных систем во всем мире, например:

- Итайпу (Бразилия): две двухполюсные системы, каждая номинальной мощностью 3150 МВт
- Энергетический проект «Интермоунтэн» (США): одна двухполюсная система, 1920 МВт.
- Проект Риханд-Дадри (Индия): одна двухполюсная система, 1500 МВт.
- Проект Чандрапур-Падхе (Индия): одна двухполюсная система, 1500 МВт.
- Мультитерминал Квебек - Новая Англия (Канада/США): три двухполюсные станции номинальной мощностью 2250/2250/2000 МВт

Постоянный ток высокого напряжения позволяет осуществлять управляемую передачу энергии между сетями переменного тока центральных и восточных районов Китая/провинцией Гуандун, которые сохраняют свою независимость.

| 2 | Четыре линии постоянного тока высокого напряжения будут передавать энергию гидроэлектростанции «Три ущелья» в прибрежные районы Китая и промышленный район провинции Гуандун. |
|---|---|




## Строительство магистральных линий в соответствии с заданным графиком

В апреле 1999 года компания АББ получила первый подряд на поставку оборудования для двух преобразовательных подстанций для двухполюсной высоковольтной линии постоянного тока мощностью 3000 МВт между «Тремя ущельями» и восточными районами Китая. По контракту на АББ была возложена общая ответственность за проект, включая надзор за работами на площадке, которые выполняются заказчиком. Контракт также предусматривал передачу технологии, включая проект системы HVDC, расчет системы автоматического регулирования и производство оборудования. Примерно 85 % от общей стоимости контракта составляло оборудование и услуги, предоставляемые Группой АББ. Установка была запущена по графику в мае 2003 года.

В октябре 2001 года АББ получила второй заказ, на этот раз на строительство линии передачи постоянного тока высокого напряжения мощностью 3000 МВт между «Тремя ущельями» и провинцией Гуандун. Время подготовки этого объекта скоростного строительства было сокращено на 30 %, что позволило ввести в строй первый полюс уже через 28 месяцев после подписания контракта. При аналогичных проекту 3GC объемах работ, он предусматривает большее содержание местного компонента.

Передача технологий охватывает проектирование системы HVDC, а также проекты систем управления и защиты. Выполнение проекта идет по графику и с опережением.

| 3 | Внутренняя площадка преобразовательной подстанции постоянного тока Женьпин (3GC) |
|---|---|

## Взаимодействие проектов 3GG и 3GC

Проект 3GC поставил мировой рекорд по передаче 1650 МВт на одном полюсе. Так как преобразовательная подстанция в Женьпине подвержена очень сильному промышленному загрязнению, изоляторы постоянного тока должны быть длиннее, чем те, которые могли предоставить производители. Это, а также трудности согласования внешней и внутренней изоляции сверхдлинных изоляционных втулок, привело к решению о строительстве специального помещения для подстанции постоянного тока (3). Всё высоковольтное оборудование постоянного тока смонтировано в помещении, а все нейтральное оборудование постоянного тока установлено на улице. Для каждого полюса имеется четыре отдельных зала: один для коммутаторов, два для конденсаторных батарей фильтров постоянного тока и один для конденсаторной батареи PLC постоянного тока.

Проект 3GG уникален, так как ввод в эксплуатацию однополюсной системы занял всего 28 месяцев, а работа по двухполюсной схеме началась через 32 месяца. И в этом плане та база знаний и опыта, которая была накоплена за время осуществления проекта 3GC, имела огромное значение. Этот опыт особенно пригодился на этапах конструирования, рабочего проектирования и доставки оборудования, сроки выполнения всех этих этапов значительно сократились. Экономический эффект для заказчика также оказался значительным.

Для максимального уменьшения размеров преобразовательной подстанции переменного тока проекта 3GG в Жинжоу во всех десяти секциях по 500 кВ используется элегазовое коммутационное оборудование наружного исполнения.

4 Площадка с элегазовыми выключателями на 500 кВ на преобразовательной подстанции в Жинжоу (3GG )

## Система передачи электроэнергии

Проекты 3GC и 3GG представляют из себя системы двухполюсной передачи энергии [3], в которых используется идентичное основное первичное и вторичное оборудование и принципы работы.

Две преобразовательные подстанции проекта 3GC расположены примерно в 890 км друг от друга в Лонкуане (провинция Хебей) и Женьпине (в Чанджоу, провинция Янгсу). Преобразовательная подстанция в Лонкуане расположена приблизительно в 50 км от плотины «Три ущелья». Приёмная подстанция в Женьпине расположена примерно в 200 км от Шанхая. Электроэнергия будет передаваться на восток во время периодов пиковой генерации и в сторону центральной энергетической системы тогда, когда требуется сохранить воду в водохранилище.

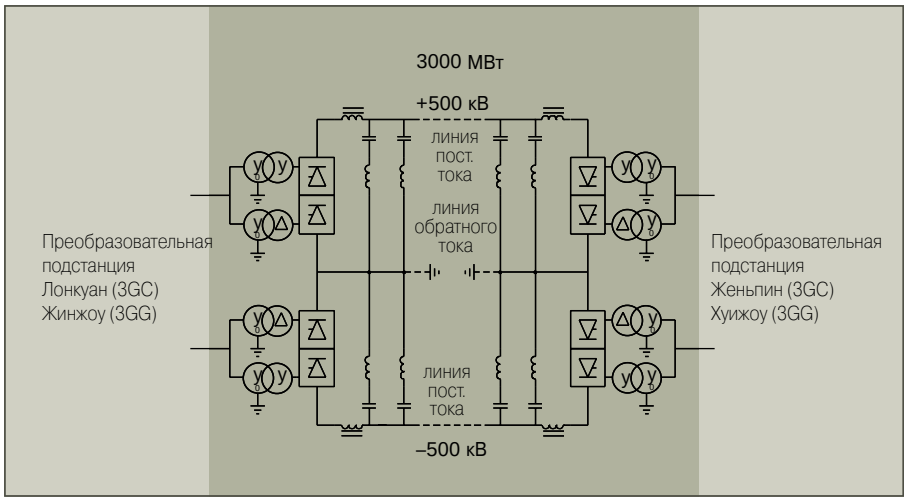
Преобразовательная подстанция на передающем конце проекта 3GG расположена в 16 км от города Жинжоу, и примерно в 135 км от электростанции «Три ущелья». Приёмная подстанция расположена в Хуижоу, в провинции Гуандун. Электроэнергия передается на расстояние более 940 км.

### Номинальная мощность

Линии рассчитаны на номинальную мощность 2 x 1500 МВт при (относительно консервативных) заданных условиях эксплуатации.

Они рассчитаны на продолжительную перегрузочную способность 3480 МВт, и перегрузочную способность 4500 МВт в течение 5 секунд.

5 Схема энергетической сети, которая использовалась в проектах 3GC и 3GG



В целях минимизации отключений двухполюсная система HVDC может эксплуатироваться с уравнительными биполярными токами, с использованием сеток заземления преобразовательной подстанции в качестве временного заземления в случае неисправности электродов заземления или их линий.

Номинальная обратная пропускная способность составляет 90 % от проектной мощности. Линии передачи постоянного тока высокого напряжения рассчитаны на непрерывную работу при напряжении до 70 % от проектного напряжения постоянного тока. Основные технические данные приведены в таблице.

### Схема энергетической сети

Схема главных цепей обоих линий идентична за исключением оборудования компенсации реактивной мощности.

Стабильность статических и динамических характеристик систем переменного-постоянного тока обеспечивается оптимизированной компенсацией реактивной мощности генераторов электростанции «Три ущелья» и сетей переменного тока на каждом конце линии. На стороне переменного тока обеих станций используется полуторная схема выключения.

6 Конструкции тиристорных вентилей

| Основные параметры | 3GC (3GG) |
|---|---|
| Номинальная мощность, МВт | 3000 |
| Номинальное напряжение постоянного тока, кВ | ±500 |
| Расстояние передачи, км | 890 (940) |
| Перегрузки по мощности при максимальной температуре окружающего воздуха и работающем резервном охлаждении, МВт: | |
| Продолжительные | 3150 |
| 2 часа | 3390 |
| 10 секунд | 4230 |
| 5 секунд | 4500 |
| Преобразовательные трансформаторы: | |
| Тип | 1-фазный, двухобмоточный |
| Номинальная мощность, МВА | 297,5/283,7 |
| Сглаживающие реакторы: | |
| Тип | С масляной изоляцией |
| Индуктивность, мГн | 290/270 (290) |
| Тип тиристора | YST-90 |
| Тип фильтра постоянного тока | Пассивный |
| Тип фильтра переменного тока | Пассивный |
| Линейное напряжение переменного тока, кВ | 525/500 |
| Линейная частота переменного тока, Гц | 50 |

Кроме схемы двухполюсной передачи, линии могут также работать по однополюсной схеме с возвратом тока через землю или металлический проводник. Подключение главной цепи со стороны постоянного тока - типовое для двухполюсной воздушной линии электропередачи HVDC. Установлены выключатели в цепи обратного тока по металлическому проводнику и переключатели в цепи обратного тока через землю для соблюдения требований при работе в однополюсном режиме с возвратом через металлический проводник и обеспечения возможности бесперебойного перехода.

Линии рассчитаны на мощность 2x1500 МВт, продолжительную перегрузочную способность 3480 МВт и перегрузочную способность 4500 МВт в течение 5 секунд.

Также на нулевых шинах обеих подстанций установлены заземляющие переключатели для соблюдения требований по временному заземлению.

### Тиристорные вентили

Была избрана схема с двойным вентилем (6) с учетом того, что преобразовательные трансформаторы являются однофазными и двухобмоточными. Каждый вентиль преобразовательных подстанций в Лонкуане и Жинжоу состоит из 90 тиристоров (3 кА, 7,2 кВ), в то время как на приёмных подстанциях в Женьпине и Хуичжоу вентили включают в себя 84 тиристора (с теми же характеристиками).

Используются демпфирующие конденсаторы сухого типа и плёночные резисторы постоянного тока. Проект зала вентилей предусматривает полную систему пожарообнаружения и пожаротушения.

### Фильтрация переменного тока

Используются четыре типа фильтров: 11й и 13й гармоник с двойной настройкой, 24й и 36й гармоник с двойной настройкой, 12й и 24й гармоник с двойной настройкой, и фильтр С-типа 3й гармоники. Батареи шунтирующих конденсаторов с демпфирующими реакторами и без них, уравновешивают реактивную мощность на преобразовательных подстанциях Жинжоу, Женьпинг и Хуижоу.

### Фильтрация постоянного тока

Устойчивая пассивная фильтрация постоянного тока обеспечивает уровень 500 mAp (двухполюс-

ная)/1000 mAp (однополярная) для обоих проектов. Каждая оконечная опора электропередачи снабжена двумя фильтрующими участками, которые спроектированы в виде фильтров с двойной настройкой, один из которых настроен на 12-ю и 24-ю гармонику, а другой – на 12-ю и 36-ю гармонику.

### Управление и защита

Проектные принципы управления и защиты реализованы с помощью современной системы MACH2 компании АББ. MACH2 характеризуется высокой эффективностью, небольшим объемом техобслуживания, очень мощной средой программирования и хорошими возможностями интеграции в системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA). Системы SCADA позволяют диспетчерским центрам осуществлять удаленный доступ к информации о рабочем состоянии каждой преобразовательной подстанции. Эти центры обладают возможностью осуществлять дистанционное управление со всеми функциями и могут регулировать передачу электроэнергии по этой линии. Связь между терминалами осуществляется по наземной оптоволоконной линии.

Электроэнергия будет передаваться на восток во время периодов пиковой генерации и в сторону центральной энергетической системы тогда, когда требуется сохранить воду в водохранилище.

Ресурсы линии, которые не требуются для связи, используются для диспетчерских функций и передачи данных по сети, а также могут использоваться в коммерческих целях.

В систему включены также такие функции управления как изменение мощности, стабилизация частоты, демпфирующая модуляция. Инженер подстанции может настроить интерфейс и параметры согласно требованиям системы.

### Преобразовательные трансформаторы и сглаживающие реакторы

Однофазные преобразовательные трансформаторы (рис. 7) на подстанциях Лонкуан и Жинжоу рассчитаны на 297,5 MBA, 525/v3:210,4/v3 (210,4 для Y-Δ) кВ, реактивное сопротивление 16 %, с диапазоном коррекции выходного напряжения путем переключения выводов обмотки трансформатора +25/-5 (1,25 % – на шаг). Трансформаторы в Женьпине рассчитаны на 283,7 MBA, 500/v3:200,4/v3 (200,4 для Y-Δ) кВ, реактивное сопротивление 16 %. В данном случае диапазон коррекции выходного напряжения путем переключения выводов обмотки трансформатора составляет +26/-2. Трансформаторы на подстанции Хуижоу рассчитаны на 283,7 MBA, 525/v3:200,6/v3 (200,6 для Y-Δ) кВ, реактивное сопротивление 16 %, также с диапазоном коррекции выходного напряжения путем переключения выводов обмотки трансформатора +28/-4 (1,193 % – на шаг). Для ввода в вентильный зал используются вводные изоляторы сухого типа.

| 7 | Конструкция преобразовательного трансформатора на каждом полюсе. |
|---|---|

Преобразовательные трансформаторы в Лонкуане, Жинжоу и Хуижоу также оборудованы электронными системами управления, которые позволяют осуществлять анализ и учет, а также обеспечивают интеллектуальное управление вентиляторами для снижения потерь.

Сглаживающие реакторы подключены к вентилям через вводные изоляторы, встроенные в стену вентильного зала. Система электронного управления реакторами на подстанциях в Лонкуане, Жинжоу и Хуижоу обладает теми же возможностями, которые реализованы для трансформаторов.

### Разъединители и выключатели на стороне постоянного тока

Элегазовые ($SF_6$) разъединители используются во всех случаях, когда необходимы быстродействующие коммутаторы постоянного тока. Это автоматические выключатели в цепи обратного тока по металлическому проводнику, заземляющие выключатели нулевых шин, переключатели шин и переключатели в цепи обрат-

**Отбор мощности**

Электростанции в Китае расположены, как правило, на северо-востоке (работающие на угле) и на западе и юго-западе (гидроэлектростанции), в то время как основные районы-потребители расположены на восточном побережье и в южном промышленном районе Гуандун.

Общая генерирующая мощность в Китае, которая на конец 2002 года составляла более 350 000 МВт, к концу десятилетия должна вырасти не менее чем до 500 000 МВт, чтобы справится с растущим спросом.

Уже сегодня в силу быстрого развития экономики многие районы, включая Шанхай, провинции Гуандун и Чжэцзянь, испытывают значительную недостачу поставок электроэнергии.

Например, в провинции Гуандун дефицит составляет более 30 000 МВт, который частично покрывается за счет импорта из соседнего Гонконга.

В настоящее время Китай планирует ежегодно наращивать мощности на 25 000 – 30 000 МВт вплоть до 2005 года, чтобы достичь темпов роста 7-8 % в год. Планируется расширение объемов передачи как переменного, так и постоянного тока.

На ближайшие десять лет рынок систем HVDC – передача электроэнергии на большие расстояния и компенсационные подстанции для соединения региональных сетей – оценивается в 40 000 МВт

ного тока через землю. Переключатели в цепи обратного тока через землю являются единственными из них, которые были спроектированы по традиционной пассивной схеме. Все остальные снабжены активной вспомогательной передаточной цепью, которая состоит из конденсатора и зарядного устройства. Зарядное устройство дает выключателям постоянного тока дополнительные возможности токовой коммутации, позволяя им справляться даже с наибольшими токами перегрузки.

## Схемы эксплуатации

Линии могут работать в различных конфигурациях и режимах.

Обеспечена возможность работы в аварийном режиме, а также эксплуатации в отсутствие связи.

Точность измерений и управления обеспечивает нулевой ток небаланса на землю в случае работы в двухполюсном сбалансированном режиме с заземлением на местной подстанции.

Предполагается, что система постоянного тока высокого напряжения, обладающая своими преимуществами при передаче электроэнергии на большое расстояние, сыграет важную роль в создании государственной электроэнергетической системы Китая.

Режимы работы:

- Двухполюсный
- Однополюсный с возвратом тока через землю и через металлический проводник
- Режим пониженного напряжения постоянного тока (с 500 кВ до 350 кВ).
- Режим обратной мощности
- Двухполюсное и однополюсное регулирование мощности
- Синхронное однополюсное и аварийное (раздельное) регулирование мощности
- Резервное синхронное однополюсное регулирование (для модуляции постоянного тока в отсутствие межстанционной связи)
- Регулировка тока полюса

## Удовлетворение спроса на электроэнергию в Китае

Китай планирует к 2010 году существенно увеличить генерирующие мощности с целью обеспечения прогнозируемого роста спроса (см. вставку). В тоже время будут созданы две региональные сети в качестве основы для общенациональной системы передачи электроэнергии. Предполагается, что система постоянного тока высокого напряжения, обладающая своими преимуществами при передаче электроэнергии на большое расстояние, сыграет важную роль в этом процессе.

**«Замечательное достижение в истории технологии HVDC компании АББ»**

Торжественное открытие линии передачи постоянного тока высокого напряжения «Три Ущелья» – Чанджоу в августе 2003 года в присутствии представителей китайского правительства, департамента Госсовета по проекту «Три ущелья», государственной энергетической корпорации и компании АББ, ознаменовало успешное завершение испытаний и пуск объекта в промышленную эксплуатацию. Линия HVDC с напряжением 500 кВ и протяженностью 890 км может эксплуатироваться с рекордной пропускной способностью до 3 480 МВт, и после ввода в строй в этом году генераторов электростанции «Три ущелья» она будет передавать электроэнергию миллионам потребителей на востоке Китая. Крупнейшая в Китае двухполюсная линия передачи постоянного тока была завершена в срок за четыре года.

«Учитывая техническую сложность проекта, это стало замечательным достижением в истории технологии HVDC компании АББ», – говорит Питер Смитс, руководитель подразделения энергетических технологий в компании АББ. «Осуществив этот сложный проект практически день в день, мы продемонстрировали свою приверженность точности и соблюдению сроков, а также стремление улучшить качество жизни для миллионов граждан Китая».

Лейф Энглунд
Матс Лагерквист
Ребати Дасс
ABB Power Technologies
SE-771 80 Людвика, Швеция
leif.englund@se.abb.com
mats.lagerkvist@se.abb.com
rebati.dass@se.abb.com

Литература:

[1] Introduction to China's Yangtze River Three Gorges Project. The PRC State Council Three Gorges Construction Committee, Ministry of Land and Resources, State Environmental Pollution Administration, State Bureau of Cultural Relics, September, 2002.

[2] Z. Xiaoqian, D. Gongyang, G. Ricai: The Three Gorges power grid and its development. Cigré 1998, 37–203, Paris.

[3] Z. Xiaoqian, et al: Design Features of the Three Gorges – Changzhou ±500 kV HVDC Project. Cigré 2000, 14–206, Paris.

# Передовое FACTS управление

Горан Андерсон, Тим Грин, Бикаш Пал, Христиан Рехтанц

**Устройства FACTS – силовые электронные приборы, предназначенные для управления компенсацией реактивной мощности и потоком мощности в сетях энергоснабжения – требуют специальных алгоритмов управления для того, чтобы реализовать свои преимущества в широком спектре областей применения.**

**Компания АББ, а также Швейцарский федеральный технологический институт и лондонский Имперский колледж начали разработку совместного проекта с целью обеспечить преимущества, которые могут быть получены при использовании нескольких устройств FACTS в определенном районе сети. Задачей проекта является поиск промышленно применимых ответов на вопросы, возникающие при глобальном сетевом регулировании потока мощности и демпфировании колебаний.**

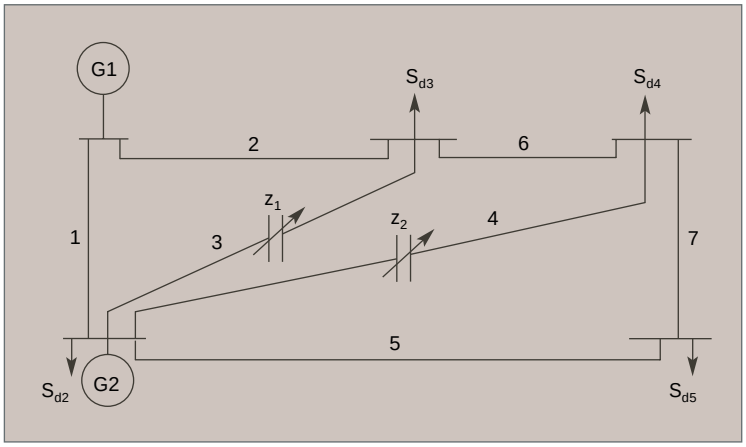
Сети электроснабжения продолжают расширяться и изменяться по мере роста спроса на электроэнергию, появления новых технологий и изменения рыночной конъюнктуры. Однако внедрение возможностей регулирования в целях полного использования ресурсов существующих средств электропередачи или новых регулируемых линий может принести новые проблемы. Часто управляемость системы в целом требует модернизации.

Сегодня имеются управляемые силовые электронные устройства, которые не только обеспечивают инженерные коммуникации целым набором новых возможностей, но также приводят к созданию нового класса систем: гибких систем электропередачи переменного тока, или FACTS. Устройства FACTS интегрируются в систему по многим причинам, например, для регулирования потока мощности, компенсации реактивной мощности или для осуществления вспомогательных функций, например, для демпфирования колебаний.

Потребность в управляемых линиях электропередачи растет в силу необходимости улучшения техники передачи и повышения конкурентоспособности работы энергетических систем. Однако количество линий, которые могут регулироваться, ограничено неспособностью сегодняшних систем управления справляться с внутренней тенденцией к неблагоприятным взаимодействиям. Более того, плохое демпфирование режимов колебаний может ограничить возможности передачи и препятствует эффективному использованию удаленно выработанной энергии, например, энергии гидроэлектростанций. Рыночная деятельность также может быть подвергнута ограничениям. С учетом всех этих сложностей согласование контроллеров демпфирования может оказаться непростой задачей.

Для решения связанных с этим проблем отдел исследований и отдел силовых систем компании АББ инициировал совместный проект со Швейцарским федеральным технологическим институтом и лондонским Имперским колледжем. Обе эти организации обладают обширным опытом в области управления силовыми сетями, и их работа оказала значительное влияние на внедрение систем FACTS в отрасли.

| 1 | Пятишинная система диагностирования. Регулируемые последовательные компенсаторы (обозначенные сопротивлениями Z1, Z2) расположены на линиях 3 и 4.<br>Sd – мощность в нагрузке на шинах 2-5 |
|---|---|




## Определены цели проекта

Основной проблемой является то что конструкция, контроллера нового регулируемого устройства влияет на всю энергетическую систему. Причиной этого является то, что каждое устройство работает в окружении нескольких других контроллеров, которые могут взаимодействовать друг с другом. Кроме того, все другие контроллеры в энергетической системе создают проблемы при проектировании. Следовательно, основным требованием к любому новому контроллеру является то, чтобы он не оказывал негативного воздействия на систему в целом и не требовал перекомпоновки уже внедренных контроллеров, например, устройств управления генератором или стабилизаторов энергетической системы.

Устройства FACTS интегрируются в систему по многим причинам, например, для регулировки потока мощности, компенсации реактивной мощности или для осуществления вспомогательных функций, например, для демпфирования колебаний.

Основной целью начатого проекта стала, таким образом, разработка требований и ограничений для таких контроллеров и предложение соответствующей конструкции. Эта конструкция должна быть легко масштабируемой для различных диапазонов регулирования и совместимой со вспомогательными функциями. Эти требования привели к определению следующих технических условий:

- Конструкция контроллера не должна требовать перекомпоновки уже внедренных сетевых контроллеров.
- Различные сетевые контроллеры должны работать совместно и использовать одинаковые принципы управления.
- Конструкция должна отличаться устойчивостью, то есть отвечать меняющимся требованиям эксплуатации современных силовых систем.
- Модульное исполнение необходимо для решения всех задач управления, чтобы устройства FACTS могли использоваться во всех областях применения.
- Должна быть обеспечена возможность масштабируемости конструкции по различным диапазонам управления.
- Следует предотвратить нежелательные последствия или нарушения нормальной работы в нештатных ситуациях (сбои, отключение линии, и т.д.).

## Согласованное управление FACTS

Сегодня, с разработкой устройств FACTS, может быть существенно расширена управляемость потока энергии в инженерных коммуникациях.

Это особенно важно в контексте растущего спроса на электроэнергию и появления вторичного энергетического рынка.

Другая проблема заключается в том, что по экологическим причинам часто накладываются ограничения на оборудование жизненно необходимых линий электропередачи. Таким образом, в будущем критическое значение будет иметь поддержание надежности энергоснабжения по определенным коридорам без воздействия на другие магистрали или на потребителей в системе.

Устройства управления потоком последовательного типа вводят новые управляющие переменные в расчеты потока мощности. Одним из важнейших компонентов является регулируемый последовательный компенсатор (CSC), который позволяет осуществлять быстрые плавные изменения полного сопротивления ЛЭП и обеспечивает эффективный способ управления мощностью. С помощью CSC можно поддерживать определенное значение потока активной мощности по компенсированной линии электропередачи в различных режимах эксплуатации.

Для анализа управления потоком мощности с помощью регулируемых устройств безусловно полезным будет применение более точного метода расчета чувствительности – такого, который учитывает фактическое состояние энергетической системы. Линеаризация формул потокораспределения нагрузки вокруг номинального эксплуатационного режима дает такие значения чувствительности, определяя, таким образом, матрицу чувствительности.

Параметры чувствительности могут использоваться для расчета общих потерь в системе электропередачи или для устранения влияния некоторых параметров на пропускную способность, то есть тех, которые описывают другие передачи, эксплуатационные режимы или принятые данные.

Количество линий, которые могут управляться, ограничено неспособностью систем регулирования справляться с внутренней тенденцией к неблагоприятным взаимодействиям.

Важным вопросом являются области линейного потока, которые доступны для набора регулируемых компонентов с данным диапазоном регулирования. На этот вопрос отвечает концепция границ осуществимости потокораспределения, представленная в [1]. Эта же концепция может быть использована для расчета увеличений нагрузки и генерации, которые возможны без нарушения данных ограничений линейного потока.

## Управление потоком мощности

Управление потоком мощности направлено на регулирование потока активной и иногда реактивной мощности по определенным линиям на заданном уровне. В этом случае регулирование основано на реализации значений чувствительности потока мощности. Регулируемыми устройствами являются CSC.

Поток мощности, проходящий по линии электропередачи, изменяется приблизительно как квадратическая функция степени последовательной ёмкостной компенсации между 0 и 100 %.

Лучше всего это можно объяснить, обратившись к простой пятишинной диагностической системе (рис. 1).

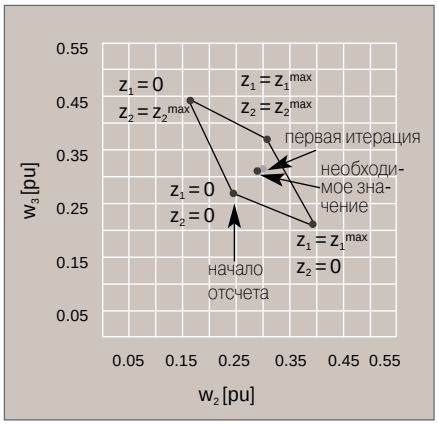
Квадратические модели могут использоваться для представления границ осуществимости потокораспределения для различных уровней компенсации.

Границы не являются абсолютно прямыми линиями, но они могут с очень высокой точностью приближенно выражаться прямыми линиями (рис. 2). Таким образом, достаточно вычислить линейные потоки в углах.

Теперь предположим, что потоки мощности в линиях 3 и 4 (рис. 1) регулируются в соответствии с заданными данными по управлению потоком мощности. С помощью матрицы чувствительности могут быть рассчитаны управляющие переменные для достижения заданной мощности.

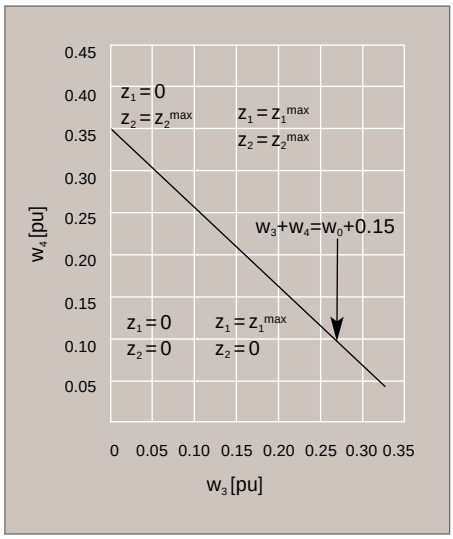
Принимая начальную точку на рис. 2 в качестве базового варианта, затем с помощью уравнений чувствительности и подстановки числовых значений получается решение после трех итераций. Первая итерация дает решение, очень близкое к необходимому значению. Вторая и третья итерации дают лишь небольшие улучшения.

2 Границы осуществимости потокораспределения




$w_2$, $w_3$ Переменные для потока активной мощности по линиям 2 и 3 на рис. 1

3 Границы осуществимости потокораспределения по сценарию I




$w_3$, $w_4$ Переменные для потока активной мощности по линиям 3 и 4 на рис. 1

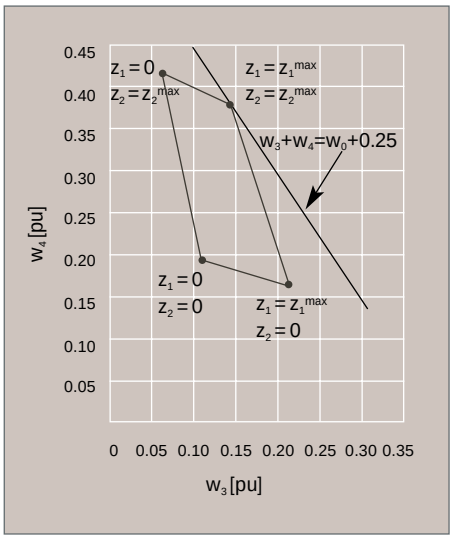
**Сценарий I**

| | |
|---|---|
| $PL_3$ | Базовый вариант + 15 % |
| $PL_4$ | Базовый вариант + 20 % |
| $G_2$ | Базовый вариант + 35 % |
| $w_3+w_4$ | Базовый вариант + 29 % |

**Сценарий II**

| | |
|---|---|
| $PL_3$ | Базовый вариант + 44 % |
| $PL_4$ | Базовый вариант + 38 % |
| $G_2$ | Базовый вариант + 82 % |
| $w_3+w_4$ | Базовый вариант + 69 % |

4 Границы осуществимости потокораспределения по сценарию II



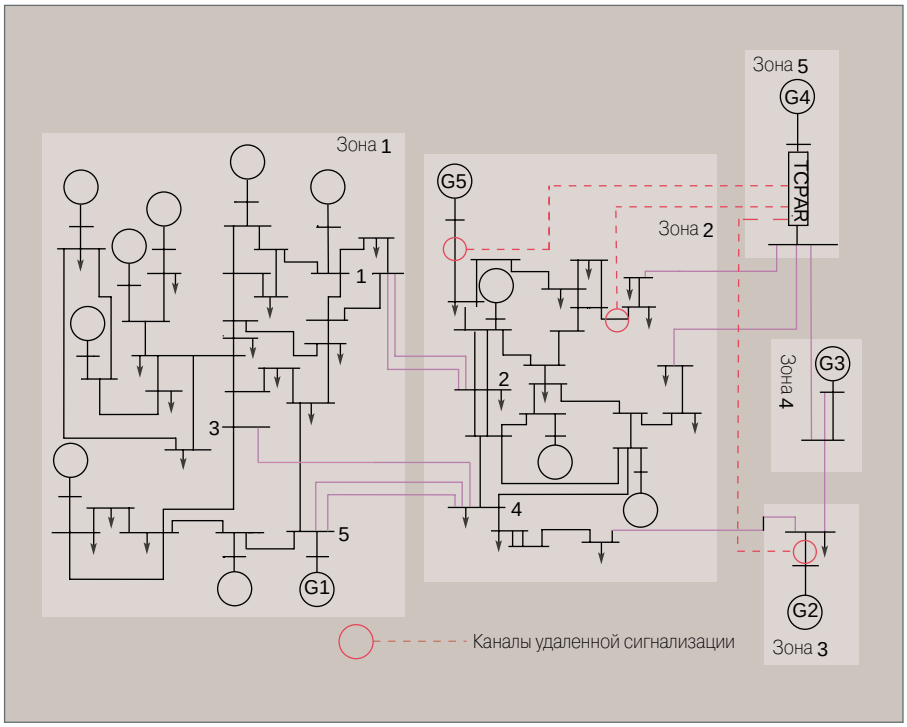
Теперь предполагается, что по сравнению с базовым вариантом, нагрузки на шины 3 и 4 возрастают и что этот рост обеспечивается генератором G2. Далее предполагается, что дополнительная мощность течет по линиям 3 и 4, где расположены CSC. Теперь следует задать вопрос: насколько долго и какой объем мощности может быть добавлен до того, как будет потеряна возможность регулирования потока на линиях 3 и 4. На рис. 3 и 4 показаны два разных сценария с различными областями линейного потока, в которых сохраняется управление. Но постольку, поскольку в случае на рис. 3 регулируемость сохраняет гибкость, на рис. 4 поток активной мощности через 3 и 4 не может быть увеличен до указанного значения. Еще одна возможность заключается в том, чтобы сохранять поток мощности по линиям 3 и 4 на одном уровне ($z_1^{max}$, $z_2^{max}$), при этом оставшаяся мощность течет по другим линиям.

## Управление демпфированием

Низкочастотные колебания (0,2-1,0 Гц), охватывающие большие подсистемы взаимосвязанной системы, являются неотъемлемой характеристикой работы энергетической системы [3].

Эти колебания включают множество электромеханических режимов, количество которых часто больше количества регулируемых устройств, установленных в системе. В последние годы исследователи сосредоточили свое внимание на разработке новых управляющих структур, которые должны улучшить демпфирование этих режимов множественных колебаний. Основной идеей проектирования управляющих систем является использование комбинации удаленных стабилизирующих сигналов и разнообразного модального содержания. Удаленные стабилизирующие сигналы часто называют «глобальными сигналами», для того чтобы показать, что они содержат информацию об общей сетевой динамике, в отличие от местных управляющих сигналов, которые не обладают достаточными возможностями для наблюдения за соответствующей системной динамикой [4]. Возможно, более экономически эффективным решением будет внедрение централизованных контроллеров с использованием глобальных сигналов, а не установка новых средств контроля [5]. Таким образом, задачей группы разработчиков проекта было, продемонстрировать и испытать методологию проектирования регулирования по нескольким параметрам для надежного демпфирования межсистемных колебаний с использованием удаленных стабилизирующих сигналов для TCPAR (Тиристорного регулятора угла сдвига фаз), который установлен в модели исследовательской системы, показанной на рис. 5.

| 5 | Системная модель для исследования TCPAR (тиристорного регулятора угла сдвига фаз) |
|---|---|




Исследование показывает, что при использовании схемы LMI (линейного матричного неравенства) можно спроектировать контроллер, который не подвержен влиянию изменения параметров на электростанции и допускает нелинейности.

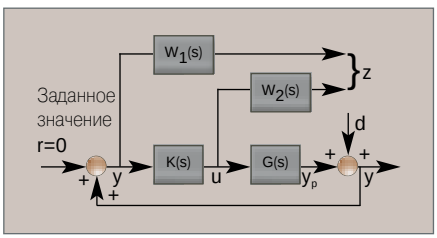
Это устройство FACTS должно гасить несколько режимов колебаний и предназначено для совместной работы с устройствами управления возбуждением генератора (которые включены в модель) и при этом не требовать перекомпоновки этой системы управления.

### Расчет управления демпфированием: задача многоцелевой оптимизации

Колебания в энергетической системе вызываются такими событиями, как неожиданное изменение графика нагрузки или срабатывание стабилизатора напряжения в ответ на сбои. Основной функцией демпфирующих контроллеров является минимизация влияния этих возмущений на работу системы.

Основной задачей конструкции является минимизация взвешенной смешанной целевой функции. Это

| 6 | Формулирование смешанной чувствительности |
|---|---|




| | |
|---|---|
| K(s) | Проектируемый контроллер |
| G(s) | Линеаризованная модель энергетической системы |
| $w_1(s)$, $w_2(s)$ | Смешанные веса чувствительности |
| d | Возмущение |

отображается как задача подавления помех с ограничением регулирующего действия (рис. 6).

Контроллер получается в результате числовой оптимизации, после того как проблема была сформулирована в рамках линейного матричного неравенства (LMI). Для показанной на рис. 5 системы (в качестве примера) для TCPAR был спроектирован контроллер

Исследования показали, что один регулятор TCPAR соответствующей конструкции может обеспечить эффективное демпфирование различных режимов отклонений.

с тремя входами и 1 выходом с использованием стабилизирующих сигналов от трех различных удаленных точек. Выход от решателя LMI дал контроллер высокого порядка, который будет трудно внедрить.

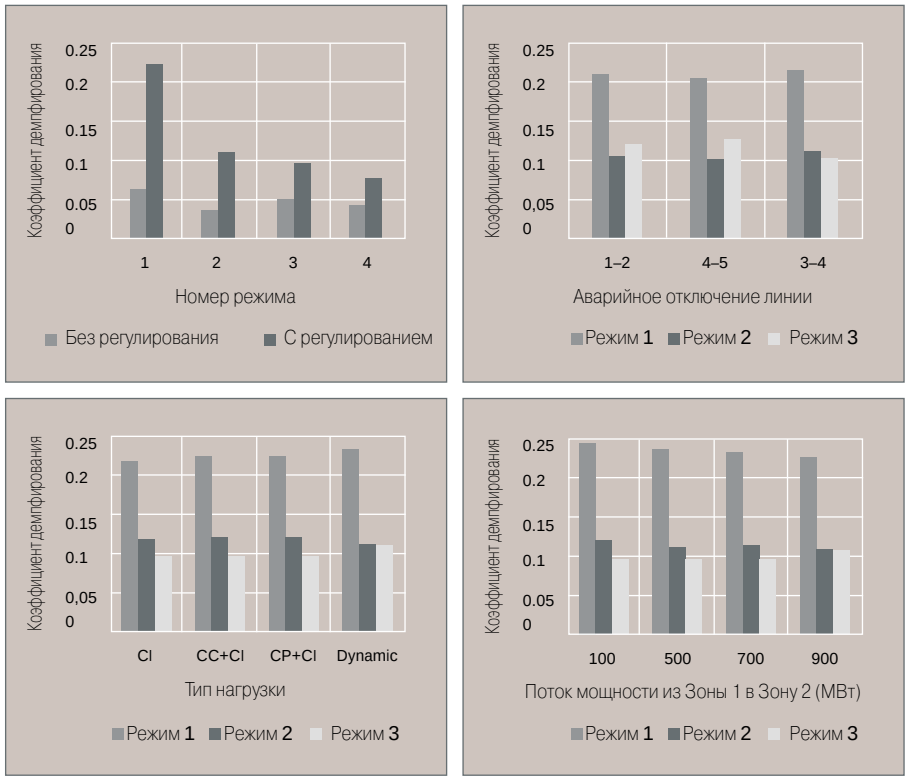
Затем было произведено упрощение контроллера путем понижения порядка модели до контроллера 6-го порядка. Для обеспечения сохранения им всех заданных свойств и достаточной надежности для обработки отклонений параметров на электростанции, контроллер пониженного порядка тестируется на модели исходной системы в различных режимах работы. Испытания обеспечивают анализ собственных значений системы.

На рис. 7 показано, что контроллер значительно улучшает коэффициенты демпфирования как минимум в 4 режимах. Кроме того, хорошее демпфирование сохраняется и при различных типах нагрузки, значениях нагрузки межсистемных линий и аварийных отключениях линии.

Для оценки работоспособности основанного на LMI контроллера во время воздействия на систему нелинейности, например насыщения, выполняется пошаговое моделирование.

На 80 мс (примерно 4 периода) инициируется устойчивое трехфазное замыкание

**7** Подтверждение надежности в различных режимах эксплуатации

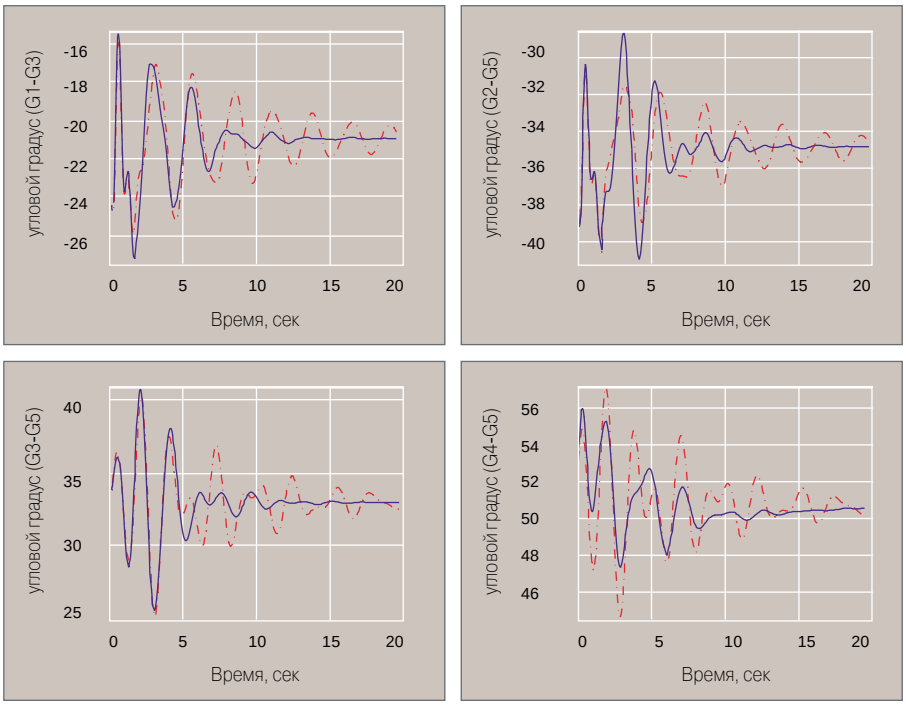



| | |
|---|---|
| CI | Модель нагрузки с постоянным полным сопротивлением |
| CC | Модель нагрузки с постоянным значением тока |
| CP | Модель нагрузки в режиме постоянной мощности |

в районе шины 4 на одной из связующих линий, соединяющих шины 4 и 5, после чего размыкается поврежденная линия. Графики на рис. 8 показывают относительное угловое разнесение машин G1, G2, G3 и G4 от машины G5, показывая, что межсистемные колебания демпфированы в течение 10-5 секунд, то есть существенно быстрее, чем без нового контроллера с дистанционной сигнализацией. Наблюдение динамической характеристики различных цепей управления не выявило неблагоприятного взаимодействия при демпфирующем срабатывании регулятора TCPAR.

Исследования показали, что один регулятор TCPAR соответствующей конструкции может обеспечить эффективное демпфирование различных режимов отклонений. Для этого требуется использовать дистанционные или глобальные сигналы (с помощью которых идет отслеживание режимов),

| 8 | Динамическая характеристика исследуемой системы |
|---|---|




Пунктирная линия: без регулирования Сплошная линия: с регулированием

однако это является реалистичным вариантом, учитывая быстрое развитие в области векторных измерений и глобального мониторинга с применением системы GPS, что может обеспечить синхронные векторные и управляющие сигналы в реальном времени [6].

Без такого измерения каждое устройство FACTS может демпфировать только режимы, отслеживаемые локально, что дает большие ограничения, учитывая то, что устройства FACTS вероятнее всего располагаются в небольшом количестве линий электропередачи по причинам регулирования мощности в стационарном режиме. Исследование показало, что при использовании схемы LMI можно спроектировать контроллер, который достаточно надежен, чтобы выдерживать влияние изменения параметров на электростанции, допускает нелинейности и может работать без негативных последствий для существующих контроллеров генератора.


**Проф. д-р Горан Андерсон**
Power Systems Laboratory
Швейцарский федеральный технологический институт
CH-8092 Цюрих/Швейцария
andersson@eeh.ee.ethz.ch

**Д-р Тим Грин**
**Д-р Бикаш Пал**
Отдел электротехники и электронной техники
Лондонский имперский колледж
Великобритания
t.green@imperial.ac.uk
b.pal@imperial.ac.uk

**Др. Христиан Рехтанц**
ABB Power Technologies
CH-8050 Цюрих/Швейцария
christian.rehtanz@ch.abb.com


Литература


[1] M. Noroozian, G. Andersson: Power flow control by use of controllable series components. IEEE Trans on Power Delivery, vol 8, no 3, 1420–1429, 1993.

[2] Y. V. Makarov, D. J. Hill, I. A. Hiskens: Properties of quadratic equations and their application to power system analyses. Electrical Power & Energy Systems, vol 22, no 5, 313–323, June 2000.

[3] J. Paserba: Analysis and control of power system oscillation. CIGRE Special Publication 38.01.07, Technical Brochure 111, 1996.

[4] I. Kamwa, R. Grondin, Y. Hebert: Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems – a decentralized/hierarchical approach. IEEE Trans on Power Systems, vol 16, no 1, 136–153, February 2001.

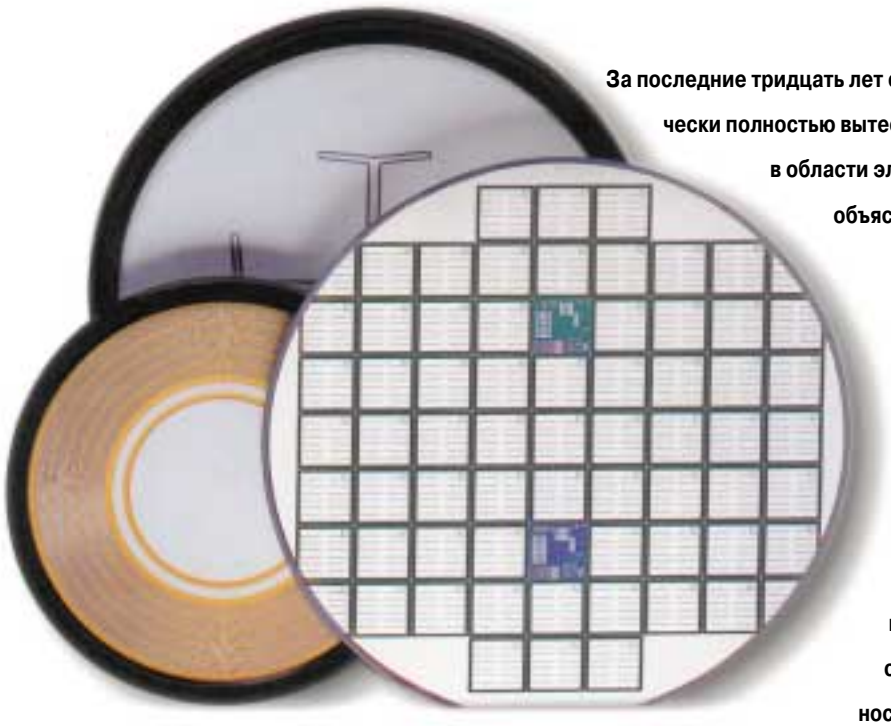
[5] J. Chow, J. Sanchez-Gasca, H. Ren, S. Wang: Power system damping controller design using multiple input signals. IEEE Control System Magazine, 82–90, August 2000.

[6] C. Rehtanz, J. Bertsch: Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control. IEEE PES Winter Meeting, Panel Session on Emergency Voltage Stability Control, New York, January 2002.

# Силовые полупроводниковые приборы

## В центре тихой революции

Штефан Линдер



**За последние тридцать лет силовые полупроводниковые приборы практически полностью вытеснили электромеханические преобразователи в области электроприводов и энергоснабжения. Это легко объяснимо: в различных отраслях промышленности и на транспорте, а также в системах передачи и распределения энергии, силовые полупроводниковые приборы обеспечивают почти неограниченную свободу в формировании потоков электрической энергии.**

**И все же, что придает силовым полупроводниковым приборам столь замечательные свойства для применения в системах большой мощности? Пришло время познакомиться с еще одной историей успеха компании АББ.**

Описать работу силовых полупроводниковых приборов довольно просто: как и обычные выключатели, эти устройства могут находиться всего в двух состояниях – «открытом» и «закрытом». Однако, в отличие от выключателей, полупроводниковые приборы обладают способностью очень быстро переходить из одного состояния в другое – обычно всего за несколько микросекунд. Поэтому применение быстро чередующихся управляющих импульсов включения и выключения позволяет получить практически любую желаемую форму потока энергии, например синусоидальную (см. рис. 1).

Номинальные параметры полупроводниковых ключей при разработке могут выбираться в широком диапазоне напряжений и токов, что позволяет изготавливать приборы в точном соответствии с требованиями промышленности. В настоящее время максимальное значение запирающего напряжения достигает 6500-8500 В, в то время как максимальный ток в открытом состоянии прибора может доходить до нескольких тысяч ампер. При более высоких токах и напряжениях приборы могут быть соединены параллельно или последовательно.

Так поступают, например, при создании линий электропередачи постоянного тока высокого напряжения (HVDC), где используются напряжения до 600 кВ.

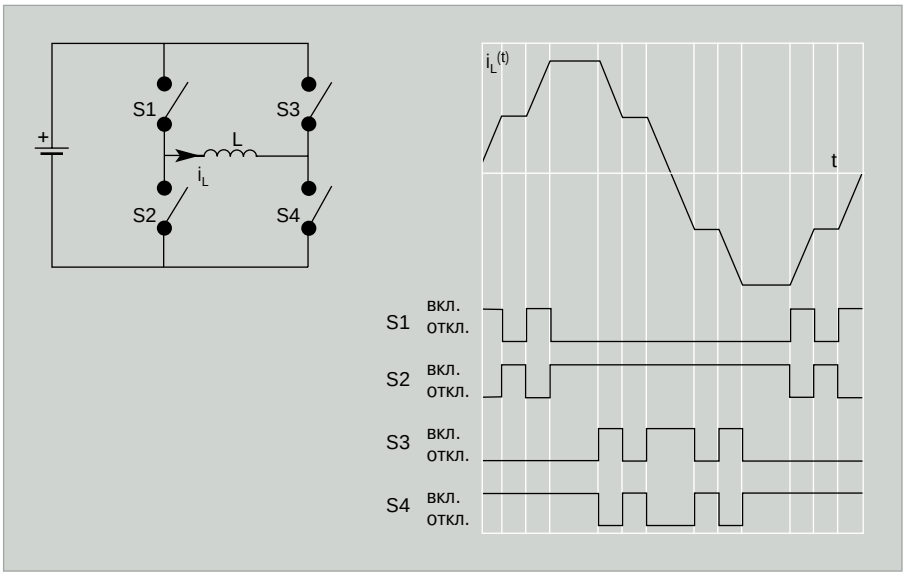
### Потери: низкие, но не нулевые

В области силовой электроники получили распространение три типа полупроводниковых устройств: тиристор, IGCT (integrated gate-commutated thyristor – запираемый тиристор с интегрированным блоком управления) и IGBT (insulated gate bipolar transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором), представленные на рис. 2 и 3. Хотя доминиро-

вание этих приборов наводит на мысль об их идеальности, это неверно: в этих приборах происходят потери. Хотя эти потери относительно малы – обычно менее 0,5% от коммутируемой энергии рассеивается в виде тепла, – количество энергии, проходящей через приборы, велико, поэтому и суммарные потери оказываются существенными. Отвод выделяемого тепла может оказаться сложной задачей, на решение которой затрачиваются значительные средства.

Причина таких потерь лежит в физической природе этих устройств. В выключенном состоянии в кремниевом кристалле отсутствуют подвижные электроны, вследствие чего ток не течет. При включении прибора кристалл буквально наводняется подвижными электронами, и ключ становится хорошим проводником тока. Однако концентрация подвижных носителей заряда во включенном состоянии в кристалле не столь высока, как, скажем, в металле. Как следствие, наблюдается заметное падение напряжения. Связанные с ним потери называются потерями на электропроводность.

1 Четыре простых выключателя и батарея – это все, что необходимо для создания приблизительно синусоидального тока в катушке индуктивности (L)




При возврате ключа в запертое состояние все ранее введенные электроны необходимо удалить из кристалла. Это осуществляется востанавливающим напряжением, которое «уносит» эти электроны. Следовательно, при выключении прибора ток в течение короткого промежутка времени течет при высоком напряжении, что приводит к, так называемым, потерям на выключение.

## «Старая экономика»: тиристор

Тиристор – это самый старый коммутирующий прибор, используемый в настоящее время, но он все так же пользуется коммерческим успехом. Однако в отличие от более новых приборов, транзисторов IGBT и тиристоров IGCT, его можно лишь включить, но не выключить. Тиристор возвращается в непроводящее состояние только при изменении направления тока на обратное. На практике это осуществляется с помощью внешней цепи, так называемой цепи принудительной коммутации, либо посредством естественной коммутации, например, при пересечении синусоидальной волной нулевой отметки. В новых системах принудительная коммутация с появлением IGBT и IGCT более не используется. Эти приборы обеспечивают возможность отключения подачей сигнала на управляющий электрод, и необходимость в дорогостоящей внешней схеме отпадает. Причиной того, что тиристоры еще применяются наряду с более совершенными запираемыми приборами, является то, что потери на электропроводность в них значительно ниже. Поэтому они идеально подходят для использования в системах с большими токами и естественной коммутацией, таких как HVDC. Фактически тиристоры до сих пор являются предпочтительными для систем HVDC с номинальной мощностью выше 500 МВт.

Несмотря на то, что с помощью управляющего сигнала тиристор можно лишь открыть, но не закрыть, малые потери на электропроводность делают его идеальным элементом для систем с большими токами и естественной коммутацией, таких как HVDC.

## «Новая экономика 1»: IGCT

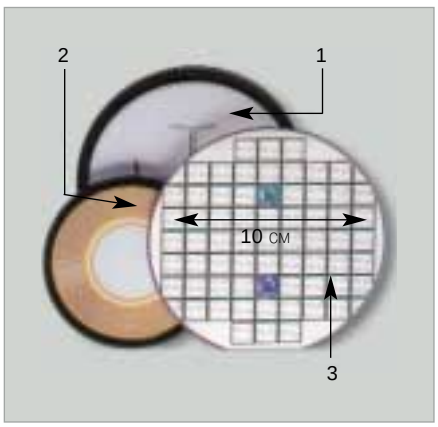
В отличие от классического тиристора, запираемый тиристор с интегрированной схемой управления, или IGCT, можно включить или выключить в любой момент времени, что делает его «настоящим» ключом. К сожалению, за эту свободу необходимо платить: падение напряжения в проводящем состоянии на IGCT выше, чем на классическом тиристоре.

IGCT управляется с помощью тока через управляющий электрод. Мощность, затрачиваемая на управление, сильно зависит от силы коммутируемого тока и частоты коммутации и обычно лежит в диапазоне 10-50 Вт.

Из-за особенностей физических процессов, протекающих в IGCT-тиристоре, повлиять на скорость перехода из проводящего в непроводящее состояние невозможно. После подачи управляющего сигнала пути назад нет: прибор перейдет в другое состояние в соответствии с динамикой внутренних процессов. Это влечет за собой следующие практические выводы:

- Тиристор IGCT при включении вызывает резкие броски тока (di/dt), способные повредить вспомо-

2 В силовых схемах получили распространение три типа полупроводниковых приборов




1 Тиристорный элемент, используемый в линиях электропередачи HVDC
2 Элемент IGCT для систем с номиналом 2-5 МВт
3 Кремниевая пластина, на которой размещены приблизительно 50 чипов IGBT, способных коммутировать около 200 кВт каждый

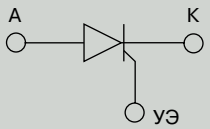
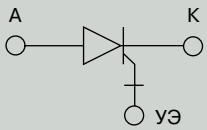
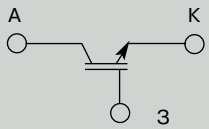
гательные элементы, в особенности диоды (выпрямляющие приборы, являющиеся электрическим эквивалентом обратных клапанов). В силу этого, последовательно с таким тиристором необходимо включать защитную цепь – так называемый di/dt-дроссель – для ограничения максимальной скорости нарастания тока.

- Тиристоры IGCT можно соединять параллельно только при условии включения параллельно с ними второй защитной цепи – ограничителя dv/dt (в сущности, RC-цепи). Чтобы исключить необходимость применения такой демпфирующей цепи, необходимо очень точно синхронизировать момент запирания (в наносекундном масштабе), что на сегодняшний день практически не осуществимо.
- Если необходимо применение нескольких тиристоров IGCT, соединенных последовательно, необходимо скомпенсировать все внутренние и внешние допуски, способные вызвать несовпадение моментов запирания. Для этого опять требуется зашитная цепь dv/dt. Конденсатор этой цепи поглощает все избыточные заряды, возникающие вследствие незначительных различий в моментах запирания, тем самым равномерно распределяя напряжение по всем приборам.

Благодаря этой информации легко увидеть, что IGCT имеет наибольшее преимущество в системах большой мощности, где не требуется (или нежелательно) применение ни последовательных, ни параллельных соединений. К примеру, при использовании IGCT можно изготовить очень компактный высоковольтный привод с номинальной мощностью более 500 кВт, который будет работать с малыми потерями.

Остается упомянуть, что тиристоры IGCT были созданы на основе запираемых тиристоров GTO (gate turn-off thyristor – запираемый тиристор). Широко применяемые до внедрения IGCT, тиристоры GTO в настоящее время в новых разработках практически не применяются.

**3** Основные свойства тиристора IGCT и IGBT

| Элемент | Тиристор | IGCT | IGBT |
|---|---|---|---|
| Условное обозначение |   |   |   |
| | А = анод; К = катод; УЭ = управляющий электрод; З = затвор | | |
| Управление | Отпирается импульсом тока на УЭ Запирается при смене направления тока через А-К | Отпирается/запирается с помощью импульсов тока на УЭ | Прибор с переменной проводимостью, зависящей от напряжения между З-К |
| Параллельное включение | Необходимо согласование параметров (подбор приборов) | Требуется защитная цепь | Допускается работа без защитной цепи |
| Последовательное включение | Необходимы защитные цепи | | Защитные цепи необязательны (рекомендуются) |
| Защита от короткого замыкания и отказа | Ток КЗ не ограничивается, необходимы защитные схемы | | Прибор ограничивает ток КЗ, короткое замыкание может быть устранено с помощью сигнала на у.э. |

## «Новая экономика 2»: IGBT

Биполярный транзистор с изолированным затвором, как и все транзисторы (но принципиально отличаясь этим от тиристоров), представляет собой линейный элемент, и поэтому является управляемым в любой момент времени. Благодаря такой управляемости, скорость переходов между открытым и закрытым состоянием может быть резко снижена, что делает транзистор IGBT очень удобным в использовании:

- Не требуется применение защитных схем, необходимых для IGCT;
- Транзисторы IGBT без особых сложностей включаются параллельно;
- Последовательное включение также возможно без применения dv/dt-ограничителя. Однако для оптимальной работы все же рекомендуется включение небольших RC-фильтров параллельно с каждым прибором.

Помимо удобства в использовании, транзисторы IGBT обладают еще двумя важными преимуществами:

- Управление ими осуществляется приложением управляющего напряжения к, так называемым, МОП-входам (МОП – структура металл-оксид-полупроводник). Поэтому необходимая мощность управления очень мала, обычно достаточно 1-2 ватт. Это очень важно для схем с последовательным включением, например, схем HVDC, поскольку обеспечение достаточного питания формирователей импульсов (драйверов) в высоковольтных системах технически сложно, а потому дорого.
- В случае короткого замыкания через такой транзистор, например, вследствие замыкания в обмотке электродвигателя, транзистор автоматически ограничивает ток короткого замыкания на уровне 5-10-кратного значения собственного номинального тока. После этого короткое замыкание можно безопасно устранить в течение 10 микросекунд с помощью обычного запирающего сигнала IGBT. В результате таких коротких замыканий прибор не выходит из строя.

Преимущества IGCT сильнее всего проявляются в системах большой мощности, где нет необходимости в их последовательном или параллельном соединении: например, в высоковольтных приводах с номинальной мощностью более 500 кВт.

Единственная расплата за эти преимущества – это то, что плотность подвижных носителей заряда в открытом состоянии в транзисторе IGBT несколько ниже, чем в тиристоре IGCT, а следовательно, потери на проводимость – выше. Однако в силу того, что при выключении необходимо вывести меньшее количество носителей заряда, потери на выключение также ниже.

Гибкость и легкость применения IGBT предопределяют его применение в широком ряду систем передачи и распределения энергии. Хорошим примером может послужить технология HVDC Light™ компании АББ [1].

## Выбор подходящего исполнения

Соответствие типа корпуса силового полупроводникового прибора и области его применения очень важно. Существуют корпуса двух различных типов, при этом подходящий выбирается на основе трех основ-

ных критериев:

- метод, используемый для передачи тепла от полупроводника к теплоотводу;
- метод, используемый для изоляции силовых выводов от теплоотвода;
- механизм отказа прибора.

### Изолированное исполнение: гибкое решение

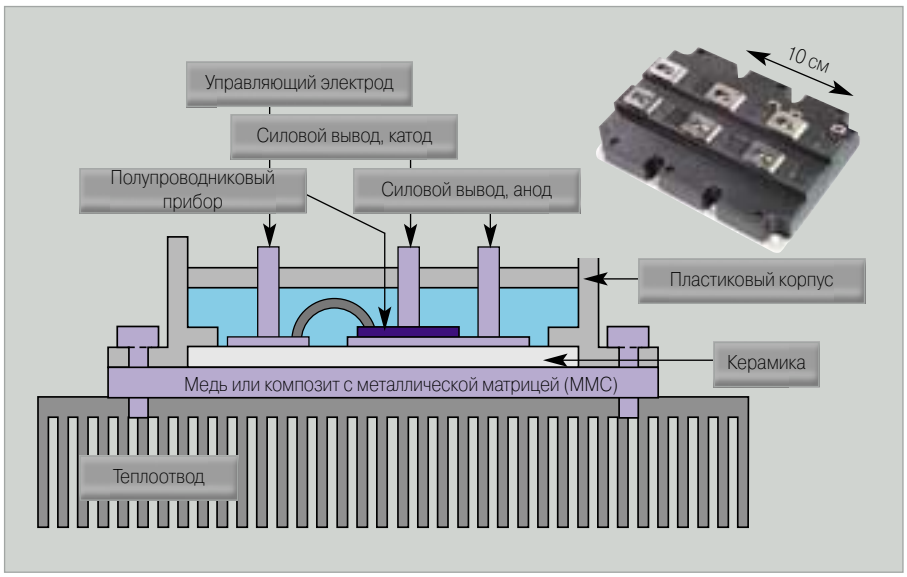
Основной особенностью конструкции изолированного корпуса является керамическая пластина, обладающая электроизоляционными свойствами, но при этом также хорошо проводящая тепло, которая разделяет электрические и тепловые потоки. Корпус размещается над стороной пластины, где закреплены полупроводниковые элементы, а затем сборка нижней стороной крепится с помощью болтов к теплоотводу. Благодаря такой гальванической развязке, на одном теплоотводе могут размещаться несколько компонентов с разным электрическим потенциалом. Сам теплоотвод также может иметь определенный потенциал (например, заземлен). Компоненты системы, например, всего инверторного преобразователя, могут быть собраны внутри одного корпуса такого типа.

Изолированный корпус на сегодняшний день является стандартным исполнением для IGBT. Выполненный таким образом прибор обычно называется модулем IGBT, поскольку, как правило, включает в себя несколько полупроводниковых чипов. Одними из приборов IGBT, производимых фирмой АББ в изолированном корпусе, являются модули LoPak™ с максимальным напряжением в закрытом состоянии 1200 и 1700 В и номинальным током от 50 до 900 А. Модуль по конфигурации может быть однофазным плечом (два последовательно соединенных прибора с отводом в средней точке) или трехфазным мостовым инвертором. Серия HiPak™ имеет конфигурацию одного ключа с обратным диодом с номиналами от 1200 В, 3600 А с рядом напряжений 1700 В, 2500 В, 3300 В вплоть до 6500 В, 600 А.

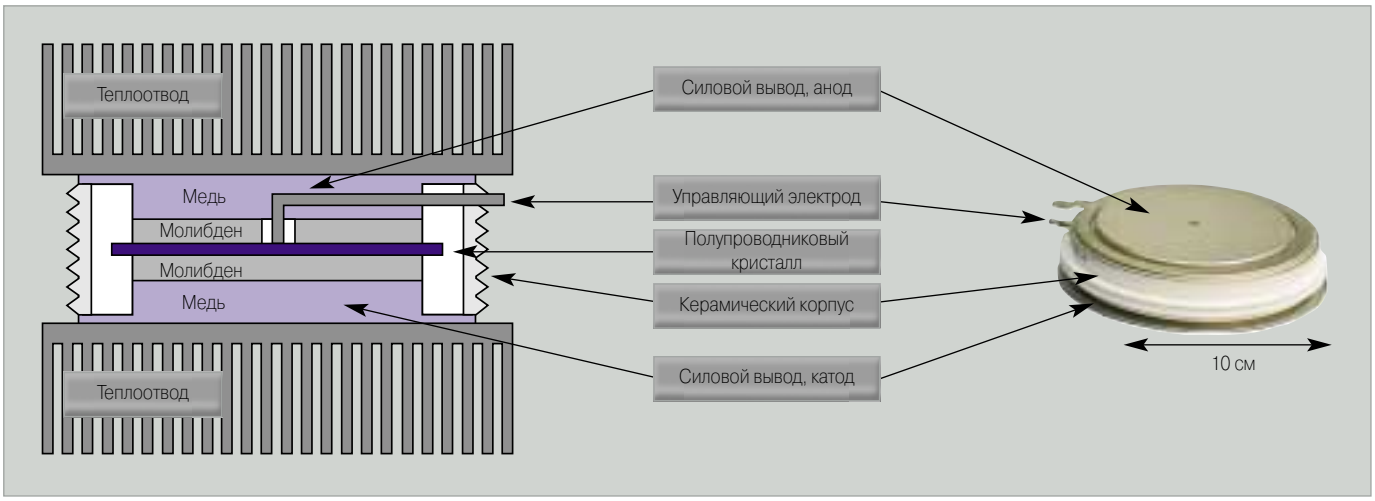
Изолированный корпус предпочтителен для использования в системах с номинальной мощностью до нескольких мегаватт. Системы более высокой мощности (например, системы электропередачи HVDC) обычно требуют последовательного соединения элементов. Однако у изолированного корпуса имеются определенные недостатки, делающие его непригодным для последовательного включения:

- Изоляционная способность керамики ограничена всего несколькими киловольтами, поэтому последовательное соединение на общем теплоотводе возможно лишь при относительно невысоких напряжениях.
- Чтобы повысить надежность систем HVDC и других высоковольтных систем, используются резервные устройства. Если один из последовательно включенных приборов отказывает, оставшиеся элементы обеспечивают работу вентиля, но только в том случае, если отказавший прибор переходит в состояние с низким сопротивлением (т.е., если он «замкнут»). Однако особенности конструкции изо-

4 Изолированный корпус. Благодаря гальванической развязке теплоотвода от силовых выводов, на общем теплоотводе можно смонтировать несколько элементов




5 Прижимной таблеточный корпус. Теплоотводы имеют электрический потенциал анода и катода. Молибденовые диски служат «буферами», снижающими механический износ, вызванный температурными колебаниями



лированного корпуса обычно способствуют отказу прибора в «открытом» состоянии.

Чтобы получить возможность использовать преимущества элементов IGBT в системах HVDC и других системах высокого напряжения и большой мощности, например, для компенсации реактивной мощности или борьбы с пульсациями, компания АББ разработала для IGBT уникальный полностью прижимной корпус.

### Полностью прижимной корпус: мощное решение

В корпусе такого типа отсутствует керамическая пластина, а тепловые и электрические потоки не разделены. Корпус выполняется с полностью прижимными контактами, т. е. прибор и его электрические контакты сжимаются между двумя охладителями с большим усилием при помощи внешнего устройства сжатия. Таким образом, ток проходит через прибор и теплоотводы «вертикально». Последовательное соединение приборов в прижимном исполнении осуществляется просто размещением их друг на друге, при этом между приборами находятся только теплоотводы. Другим преимуществом является поведение прибора при отказе: сильное давление способствует сплавлению металлических электродов анода и катода, в результате чего образуется надежный контакт с малым сопротивлением для тока (т. е. короткое замыкание).

Эти две особенности делают полностью прижимной корпус идеально подходящим для систем большой мощности и высокого напряжения.

Корпус с прижимными контактами – это стандартное исполнение для классических тиристоров, тиристоров GTO и IGCT, выпускаемых компанией АББ. Выпускаются тиристоры для большого диапазона номинальных токов и напряжений вплоть до 8500 В. Тиристоры IGCT поставляются в различных конфигурациях с максимальным напряжением в закрытом состоянии от 4500 до 6500 В.

Полностью прижимной корпус для IGBT компании АББ упрощает конструкцию прижимного устройства и процесс сборки преобразователей, позволяет легко адаптировать требования заказчика по номинальному току.

Полностью прижимной корпус для IGBT компании АББ заслуживает особого внимания. Рассчитанная на удовлетворение самых жестких требований, уникальная патентованная конструкция делает прибор практически неуязвимым к неравномерному распределению давления при сжатии. Это позволяет значительно упростить конструкцию прижимного устройства и процесс сборки, а также повышает эксплуатационную надежность, что ведет к очень существенной экономии.

Благодаря модульной конструкции прибора, компания АББ может с легкостью подбирать номинальный ток согласно требованиям заказчика. Компания предлагает IGBT в прижимном исполнении под товарным знаком StakPak™. Это изделие лежит также в основе системы HVDC Light™ компании АББ.

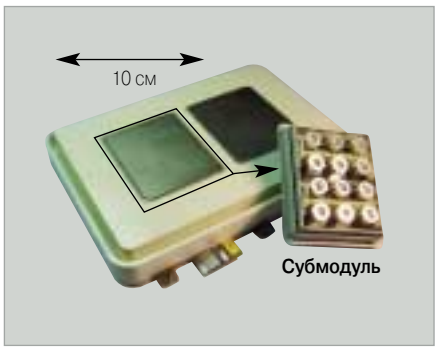
### Непрерывное совершенствование

Технология силовых полупроводниковых приборов в настоящее время практически полностью использует возможности кремния, поэтому большого прогресса ожидать не стоит. Кроме того, компоненты со значительно более высокими номинальными напряжениями (выше 10 кВ) технически очень труднореализуемы.

Для преодоления этих ограничений исследовательские институты во всем мире ведут программы, нацеленные на нахождение новых материалов с лучшими свойствами. На данный момент наиболее перспективным является карбид кремния (SiC). К сожалению, использование этих новых материалов сопряжено с трудноразрешимыми технологическими сложностями. С нынешней точки зрения кажется маловероятным, что на практике эти материалы смогут стать альтернативой кремнию в диапазоне мощности выше 100 кВт в ближайшие 10-15 лет.

Тем временем, можно ожидать непрерывного усовершенствования современных компонентов: снижение потерь, повышение токов и лучшие характеристики коммутации. Также следует ожидать значительного прогресса в технологии изготовления корпусов. Приборы станут более удобными в использовании, тогда как новые материалы обеспечат лучшее охлаждение, позволяя еще полнее реализовать весь потенциал полупроводникового материала.

| 6 | StakPak™, фирменный вариант прижимного исполнения IGBT компании АББ |
|---|---|




Возможно сочетание до 6 субмодулей с коммутирующей способностью от 600 до 1000 кВт у каждого.

**Штефан Линдер**
ABB Power Technologies
CH-5600 Ленцбург
Швейцария
stefan.linder@ch.abb.com

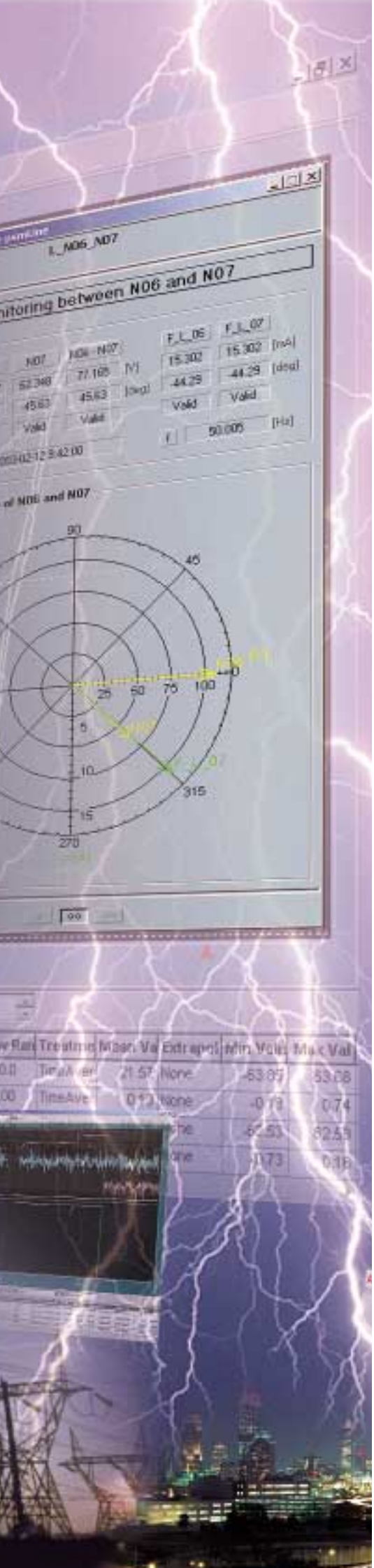
Литература
[1] **G. Asplund, et al:** HVDC Light – DC transmission based on voltage sourced converters. ABB Review 1/1998, 4-9.

За дополнительной информацией обращайтесь на веб-сайт www.abb.com/semiconductors.

# Вся энергосистема как на ладони

Выявление неустойчивости энергосистемы и оптимизация использования основных средств с помощью платформы Inform$^{IT}$ Wide Area Monitoring PSG 850

Иоахим Берщ, Седрик Карнал, Андреас Сураньи




**События, происходящие на мировых энергетических рынках, вынуждают производителей электроэнергии повышать рентабельность и, соответственно, уделять большее внимание эффективности использования основных средств. В то же время, как показали недавние широкомасштабные отключения в Северной Америке и Европе, существует не менее насущная необходимость иметь защитные средства, которые могли бы гарантировать надежность сетей электропередачи в целом.**

**Именно по этой причине все чаще приходится задумываться о мониторинге динамики энергосистем. Для такого мониторинга нужны более точная информация и более быстрое реагирование на отклонения, чем те, которые могут обеспечить традиционные системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA. Кроме того, процессы мониторинга необходимо синхронизировать в более широких географических масштабах, чем те, которые охватывают обычные системы защиты.**

**Благодаря внедрению устройств векторных измерений и недавним достижениям в области связи и компьютерных технологий, появилась техническая возможность для глобального подхода к вопросу мониторинга устойчивости энергосистем в оперативном режиме. Именно для такого подхода и была разработана современная платформа под названием Inform$^{IT}$ Wide Area Monitoring PSG 850. С помощью этой платформы, основанной на информационных технологиях (IT), можно решать задачи оптимизации использования основных средств, а также предотвращения потери устойчивости в сетях электропередачи.**

Сегодняшний мир настолько зависит от электричества, что для обеспечения непрерывного снабжения электроэнергией приходится прикладывать неимоверные усилия и вкладывать огромные средства. Не говоря уже о том, что энергетикам нужно постоянно изыскивать эти средства, им еще приходится сталкиваться с другой проблемой – с давлением рынка, которое вынуждает их искать пути повышения рентабельности. В совокупности эти факторы являются для энергетиков сильным стимулом для внедрения технологии, сочетающей в себе как возможность оптимизации использования основных средств и снижения производственных издержек, так и возможность предотвращения аварийных отключений энергосистем. Именно для этого и была создана платформа Inform$^{IT}$ Wide Area Monitoring PSG 850, которая представляет собой один из модулей/блоков семейства PSG, в числе которых PSG 870 (глобальная защита и управление), PSG 830 (глобальные измерения) и PSG 810 (глобальная связность) (см. рис. на стр. 34). PSG 850 позволяет:

- увеличить передаваемую мощность за счет оперативного мониторинга безопасности системы или пределов ее устойчивости;
- планировать инвестиции в энергосистему, основываясь на поступающей по обратной связи информации, полученной в ходе анализа динамики системы;
- внедрить координированный подход к мерам, принимаемым для восстановления устойчивости в случаях серьезных возмущений в сетях;
- использовать дополнительные функции, например, компенсацию реактивной мощности;
- лучше понять динамическое поведение системы;
- инсталлировать систему упреждающего оповещения, предназначенную для предотвращения возможных полных отключений.

## Использование данных при глобальном мониторинге

Мониторинг энергосистем в целом с помощью PSG 850 основан на динамических векторных измерениях, которые все чаще рассматриваются как основной принцип в технологии сбора данных. Блоки векторных измерений PMU (Phasor Measurement Unit), размещенные в критических местах сети, позволяют быстро измерять векторы напряжений и токов (то есть их величины и фазовые углы) и оптимизировать процесс управления на основе динамического и высокоточного обзора системы. Некоторые электроэнергетические компании уже ввели PMU-блоки в свои сети – в основном для ручного сбора и обработки данных.

Главной особенностью систем глобального мониторинга является централизованный сбор данных от PMU-блоков, который позволяет энергетикам в любой момент воспользоваться векторной информацией. При решении задач управления основными средствами данные, полученные с помощью PSG 850, можно использовать различным образом.

### Мониторинг динамического поведения системы – оценка устойчивости

В настоящее время эксплуатация энергосистем базируется, как правило, на статической или квазидинамической информации, в основном полученной в результате измерений среднеквадратических значений с помощью систем SCADA. Векторные измерения на важных узлах помогают системным операторам получить динамическую картину энергосистемы и своевременно инициировать принятие необходимых мер для сохранения ее устойчивости. Существенную поддержку здесь оказывают алгоритмы оценки устойчивости, для которых и необходимы результаты векторных измерений. Такой мониторинг повышает эффективность эксплуатации энергосистемы и помогает поддерживать безопасность на требуемом уровне.

### Мониторинг межсистемных линий – управление перегрузками

Энергией довольно часто обмениваются по межсистемным линиям, соединяющим энергосистемы. На свободных рынках это существенно увеличивает себестоимость энергии и, соответственно, тарифы на ее потребление. В то же время мощность, которую можно передать по таким коридорам, нередко ограничивается из соображений устойчивости, поскольку существуют неопределенности в отношении состояния системы. Традиционное решение – увеличение пропускной способности путем строительства новых линий – действительно позволяет обеспечить высокую эксплуатационную готовность, однако для строительства линий нужны как время, так и значительные новые капиталовложения.

Альтернативное решение состоит в значительном улучшении использования основных средств за счет глобального мониторинга, благодаря которому становится меньше неопределенностей и, следовательно, снижаются эксплуатационные риски. При определенных условиях, например, когда температуры окружающего воздуха оказываются ниже, чем предполагалось, очень существенным может оказаться динамическое увеличение пропускной способности. Меньшие затраты делают предлагаемое компанией АББ решение значительно более целесообразным, чем строительство новых линий. Например, увеличение передаваемой мощности на 4-6 процентов, обеспечиваемое внедрением системы глобального мониторинга, может позволить повременить с крупными инвестициями в объеме от 10 до 100 млн. долларов или даже вообще от них отказаться. Таким образом, PSG 850 является также важным инструментом для принятия решений при управлении перегрузками и планировании инвестиций.

Векторные измерения на важных узлах помогают системным операторам получить динамическую картину энергосистемы и своевременно принять необходимые меры для сохранения ее устойчивости.

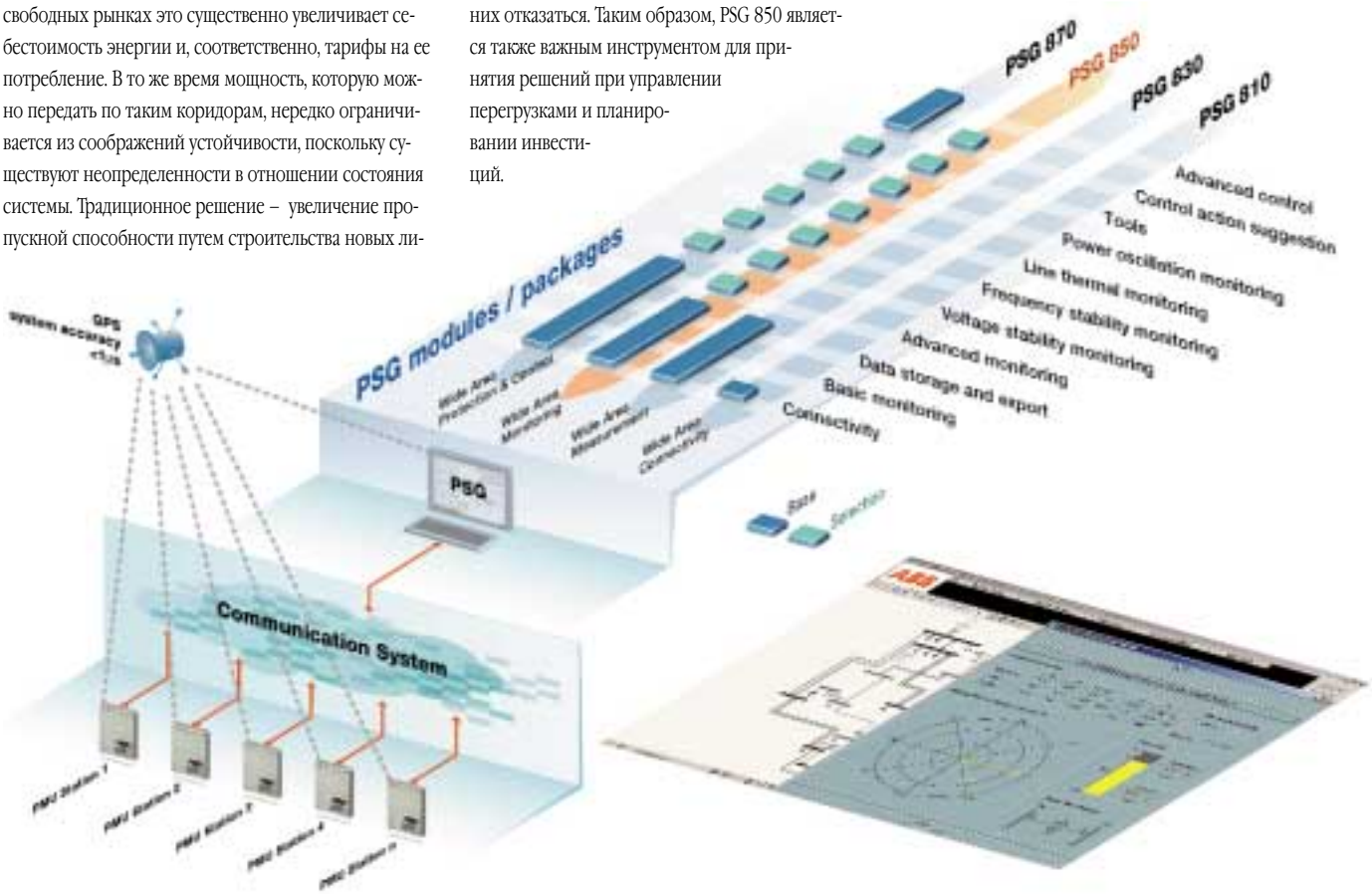
### Анализ возмущений и планирование расширения систем

Функция непрерывного сохранения данных, заложенная в PSG 850, является ценным источником информации для анализа событий и возмущений, возникающих в энергосистеме. Эта функция не только повышает эффективность анализа энергосистемы, но и помогает выявить и устранить фактические причины таких событий. Такая точная идентификация обеспечивает надежную основу для планирования расширения системы и последующего улучшения ее стабильности.

## Системная платформа

### Векторные измерения как базовая технология

Системы глобального мониторинга во многом базируются на новой технологии получения данных. В противоположность обычным системам управления, в которых для получения среднеквадратичных значений токов и напряжений используются, напри-



мер, удаленные терминалы, система глобального мониторинга получает синхронизированные с помощью GPS[1] векторные параметры токов, напряжений и частот, измеренные с помощью PMU-блоков в заданных местах энергосистемы. Измеренные параметры включают в себя как величины векторов, так и их фазовые углы, при этом все эти параметры с точностью до 1 мкс синхронизируются по времени через GPS-приемники. До сих пор мониторинг критических узлов систем электропередачи обычно осуществлялся с использованием статических или квазидинамических данных, основанных на измерении среднеквадратичных величин. Векторы, измеренные в одно и то же время, дают мгновенные картины состояния контролируемых узлов. Сравнивая эти картины, можно наблюдать как за динамическими, так и за установившимися состояниями критических узлов в основных и вспомогательных сетях электропередачи. Результатом является динамический мониторинг энергосистем.

### Системная архитектура платформы глобального мониторинга

Архитектура платформы для мониторинга выстроена с использованием следующих аппаратных средств:

- блоки векторных измерений
- блоки связи
- центр системного мониторинга

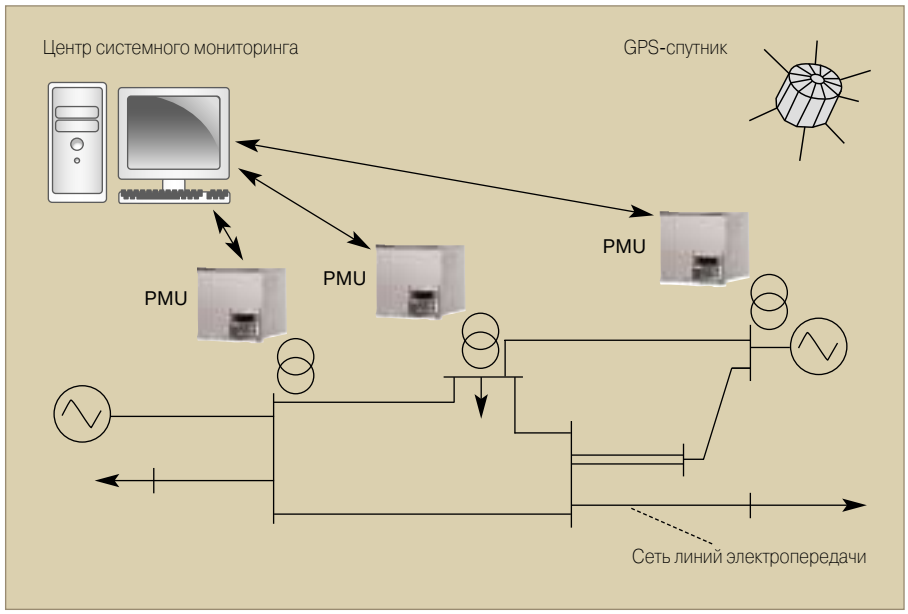
PMU-блоки размещены на подстанциях, что позволяет наблюдать за энергосистемой при всех различных условиях эксплуатации (сетевое обособление, выход из строя линии или генератора и т.п.). Предусмотрено и некоторое резервирование для сохранения информации в случае отсутствия определенных данных из-за, например, выхода из строя PMU-блока или отказа линии связи. По выделенным каналам связи измеренные параметры пересылаются в центр системного мониторинга SMC (System Monitoring Center), то есть в центральный вычислительный блок, в котором собранные данные синхронизируются и сортируются (рис. 1). Таким образом получается моментальный снимок состояния энергосистемы.

Системы глобального мониторинга во многом базируются на новой технологии получения данных, при этом находящиеся в заданных местах PMU-блоки измеряют векторные параметры токов, напряжений и частот с синхронизацией через GPS.

В случае топологий замкнутых сетей снимок обрабатывается пакетом базового мониторинга, который является частью SMC.

[1] GPS (Global Positioning System) – глобальная (спутниковая) система навигации и определения положения

| 1 | Конфигурация системы глобального мониторинга с PMU-блоками, производящими синхронизированные векторные измерения, результаты которых являются входными данными для центра системного мониторинга |
|---|---|




Пакет базового мониторинга показывает набор алгоритмов, включенных во все инсталляции глобальной платформы в качестве базиса для различных программных приложений. Этот пакет решений отличается:

- способностью сформировать непротиворечивые входные данные для всех приложений PSG 850
- быстротой исполнения, благодаря чему остается достаточно времени для работы дополнительных приложений в пределах интервала выборки
- устойчивостью – система невосприимчива к плохому качеству некоторых входных данных (их наличию, диапазону, синхронизации)

Опорный вектор может быть выбран из различных точек энергосистемы. Программные приложения, которые связаны с выходом пакета базового мониторинга, указывают на различные динамические явления, возникающие в энергосистемах. Они прогнозируют состояние энергосистемы и предлагают меры, которые должны быть приняты ее операторами при обнаружении появляющейся неустойчивости. Выходная информация отображается на эргономичном графическом пользовательском интерфейсе (рис. 2).

В системе предусмотрена возможность ретроспективного просмотра предыдущих результатов векторных измерений для их последующего анализа. Наконец, есть и функция навигации, с помощью которой можно легко найти и вывести на дисплей необходимую информацию.

### Последовательность внедрения и современные программные приложения

Чтобы воспользоваться всеми преимуществами платформы InformIT Wide Area Monitoring PSG 850, рекомендуется поэтапный подход к ее внедрению. Прежде всего производитель электроэнергии и поставщик PSG 850 проводят предварительные исследования, направленные на выявление типовых проблем и самых критичных мест сети. После этого выбираются соответствующие алгоритмы мониторинга и наиболее подходящие места для размещения PMU-блоков. Компания АББ разработала полный набор алгоритмов, которые в различных ситуациях подсказывают оптимизированные решения.

Фундаментальные программные модули включают в себя графический пользовательский интерфейс (с однолинейной схемой, всплывающими рабочими окнами и дисплеями для отображения трендов), легко расширяемый пакет обеспечения связности PMU-блоков, программы сохранения данных и функции их экспорта для последующего анализа.

Программные приложения, входящие в состав платформы InformIT Wide Area Monitoring PSG 850, обеспе-

чивают:

- упреждающий мониторинг,
- мониторинг стабильности напряжений для межсистемных линий,
- мониторинг температур линий электропередачи,
- мониторинг колебания мощности,
- мониторинг стабильности частоты,
- подсказки по корректирующим действиям.

## Положительные отзывы заказчиков

Для практического использования в высоковольтных энергосетях уже было установлено или спроектировано несколько систем, включающих в себя до 16 PMU-блоков. Компания АББ скрупулезно регистрирует все отзывы о работе прототипных приложений на объектах заказчиков, которые постоянно подтверждают улучшения в работе энергосистем. Анализ этих отзывов показывает, что результатами внедрения платформы PSG 850 являются:

- увеличение рентабельности эксплуатации энергосистем, благодаря отслеживанию критических мест сетей,
- более эффективное использование основных средств за счет оперативного мониторинга критических узлов,
- выявление и устранение причин ухудшения качества электроэнергии, что стало возможным благодаря высокой точности, обеспечиваемой заложенной в платформу системой измерений,
- тщательный анализ критических событий,
- наличие дополнительной стратегической информации для планирования развития и капитальных вложений.

Результатом полученных положительных отзывов является то, что несколько опытных проектов глобального мониторинга сейчас приобретают статус доведенных до состояния «готовности к коммерческому использованию».

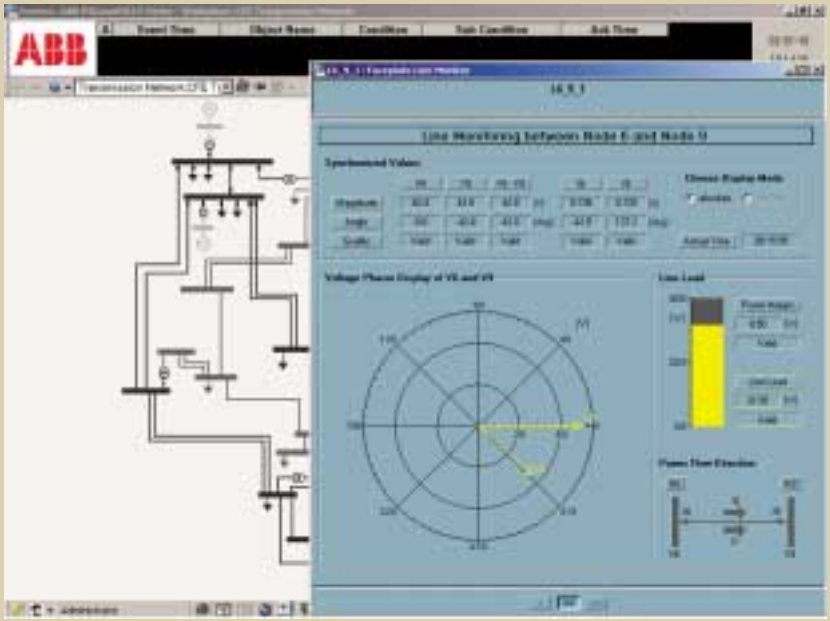
## Очевидные преимущества

Опыт работы с установленными прототипами показывает, что системы глобального мониторинга помогают значительно улучшить использование энергосистем, особенно в периоды пикового спроса на электроэнергию. Не менее важно и то, что эти системы облегчают выявление критических факторов, влияющих на фундаментальную устойчивость сетей.

После установки системы глобального мониторинга энергетики, отвечающие за эксплуатацию линий электропередачи при высоких уровнях нагрузки, могут существенно снизить себестоимость, отложив инвестиции в новую инфрастуктуру при одновременном сохранении высокой эксплуатационной готовности энергосистемы.

В этом смысле платформа Inform$^{IT}$ Wide Area Monitoring PSG 850 по своим возможностям значительно превосходит существующее оборудование местного мониторинга и защиты. Она повышает эффективность использования основных средств и при долгосрочном стратегическом планировании капиталовложений в значительной степени сокращает будущие издержки.

| 2 | Пример дисплея графического пользовательского интерфейса системы PSG 850. В всплывающем окне (справа) показано сравнение векторов напряжений |
|---|---|




Максимальную выгоду от глобального мониторинга можно получить после того, как производитель электроэнергии и компания АББ совместно выявят типовые сетевые проблемы и наиболее критические места линий электропередачи.

Иоахим Берщ
Седрик Карнал
Андреас Сураньи
ABB Power Technologies
CH-5400 Баден/Швейцария
joachim.bertsch@ch.abb.com
cedric.carnal@ch.abb.com
andreas.suranyi@ch.abb.com

# Управление использованием энергии на промышленных предприятиях в реальном времени с помощью Industrial$^{IT}$

Тронд Хауген, Ян Вейк, Эдгар Йеллум, Видар Хегре, Оле Яков Сордален, Гуннар Беннстам

**Сокращение потребления энергии, снижение стоимости энергии, уменьшение времени простоев, повышение качества продукции, рост коэффициента использования основных фондов, повышение безопасности… список пожеланий промышленников велик. И тем не менее он реалистичен. Компания АББ разработала информационную архитектуру Industrial$^{IT}$, которая позволяет эффективно работать с подобными критериями в реальном времени. При этом возможно постепенное, по мере роста уверенности и опыта, внедрение системы с минимумом технических сложностей.**

Промышленность работает за счет электроэнергии. От электроэнергии зависит любой производственный процесс. В среднем по промышленности стоимость потребленной энергии составляет около 5% стоимости готового товара. В некоторых обрабатывающих отраслях этот показатель доходит до 70 или даже 80%. Но важна не только стоимость, – количество потребленной энергии имеет значение для окружающей среды. Помимо этого, надежность и качество энергоснабжения также требуют внимания, поскольку эти факторы оказывают влияние на качество продукции, производительность, коэффициент использования основных фондов и безопасность работы. Большинство из этих факторов в то или иное время проявляют себя в каждой отрасли промышленности, но в каждой отдельной отрасли предприятия обязательно фокусируют внимание на индивидуальных факторах, наиболее важных для них (см. вставку) [2, 3].

Несмотря на растущее понимание необходимости управления использованием энергии, специалисты обрабатывающих предприятий обычно концентрируют усилия на производительности и качестве. В результате им не хватает осведомленности и знаний о важнейших причинах потерь, что не позволяет в реальном времени повышать эффективность использования энергии. Кроме того, агрегаты и системы обычно разбросаны по заводу, а эксплуатанты видят лишь часть общей картины. Ситуация усугубляется наличием большого количества источников данных. Неудивительно поэтому, что работа с данными, касающимися потребления энергии, ведется неэффективно и несогласованно.

Реализация управления энергией, как и любые другие программы усовершенствования, опирается на сбор данных, поиск возможностей, определение целей и задач, внедрение изменений и контроль результатов.

**Актуальные задачи промышленности**

Стремление предприятий повысить эффективность управления энергией реализуется по трем основным направлениям [1]:

*Снижение потребления энергии*

- Пересмотр процессов эксплуатации и обслуживания
- Модификация установленного оборудования и используемых процессов (например, модернизация). В качестве альтернативы, усовершенствования могут вноситься в новые разработки.
- Более эффективное использование основных фондов благодаря тщательному анализу производственных процессов, графиков и методов эксплуатации.

*Снижение стоимости энергии или повышение цены на продукцию*

- Планирование и составление графиков производства согласно тарифам, зависящим от времени; смещение периодов потребления на промежутки времени с низкими тарифами; продажа генерируемой избыточной энергии по высоким ценам
- Мониторинг использования энергии, проверка счетов, выставляемых компанией энергоснабжения
- Составление графика производства, исключающего возникновение пиков потребления энергии, выходящих за оговоренные контрактом пределы; мониторинг состояния межсистемных линий, сброс нагрузки

*Повышение коэффициента готовности и качества услуг*

- Составление графика производства, исключающего пики мощности, выходящие за пределы допустимого для оборудования; мониторинг пределов допустимых значений, сброс нагрузки при необходимости
- Слежение за качеством услуг, предоставляемых компанией энергоснабжения
- Автоматическая коммутация конденсаторов
- Автоматический запуск резервных генераторов

Ключом к решению проблемы является эффективный доступ к нужной информации.

Хотя для решения различных задач разным пользователям требуется различная информация, большая ее часть может быть получена из первичных данных об использовании энергии, например, данных о потреблении, потерях, эффективности и коэффициенте готовности (рис. 1). Обычно не хватает средств эффективной организации и группировки сведений об энергопользовании. Для оптимизации работы операторы предприятия нуждаются в согласованной информации, получаемой в реальном времени, а при необходимости и в ракурсах, разработанных для конкретного пользователя. Решения Industrial[IT] компании АББ нацелены на достижение именно этих целей, а также много большего.

## Важность «контекста»

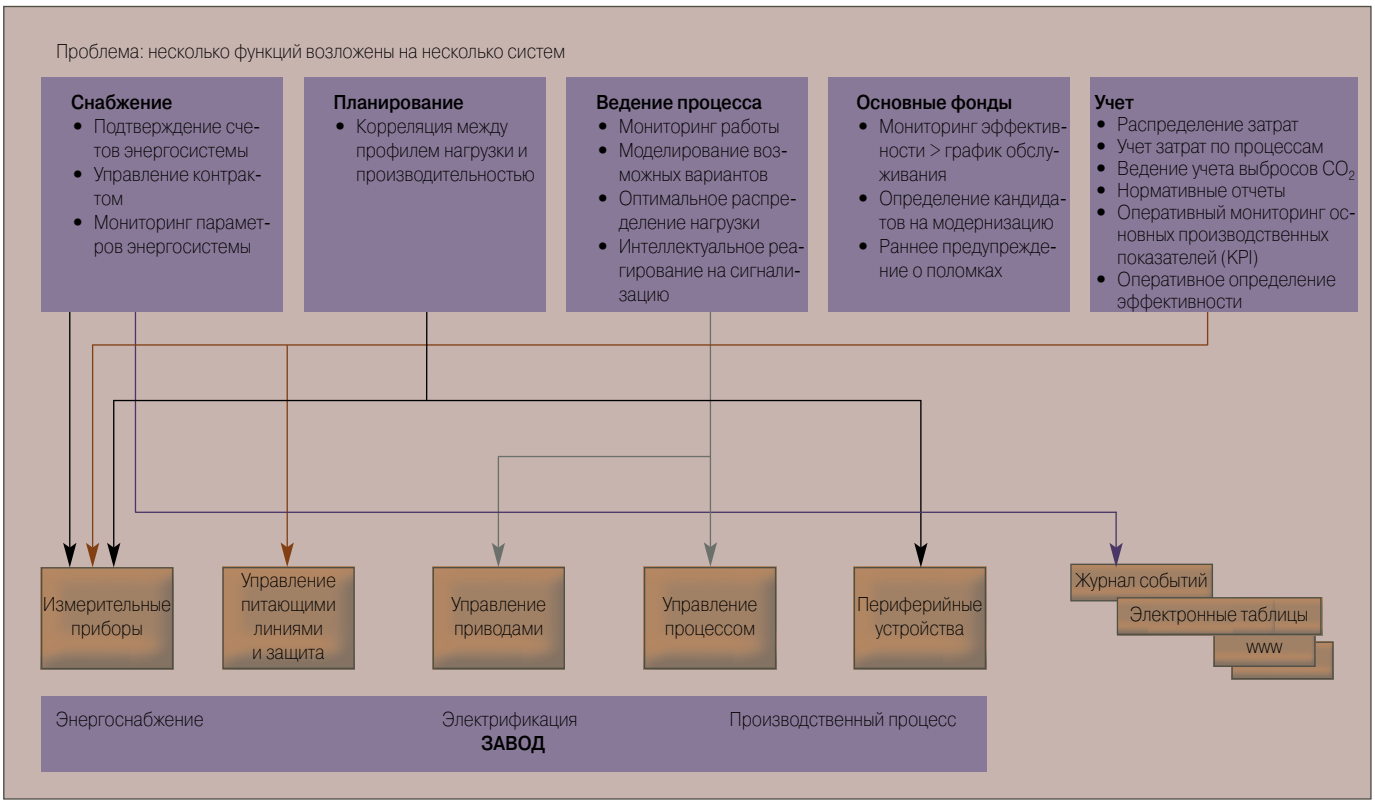
После того как стало ясно, что каждый специалист, вовлеченный в управление энергопотреблением, должен быть вовремя обеспечен нужной информацией, возникает следующий вопрос: «какой информацией?» Обычно в распоряжении имеются большие объемы информации, но часто они бесполезны для пользователя по одной простой причине: их нельзя просто и эффективно поместить в правильный контекст. Это - серьезное упущение, поскольку организация и умелое использование данных приносит больше пользы, чем простое расширение специализированного инструментария существующего набора программного обеспечения для управления энергопотреблением.

Когда эксплуатационные данные подаются в контексте, становится возможным определение целей усовершенствования и их мониторинг. Важно также и то, что используемые средства и методы позволяют вносить пошаговые усовершенствования и изменения.

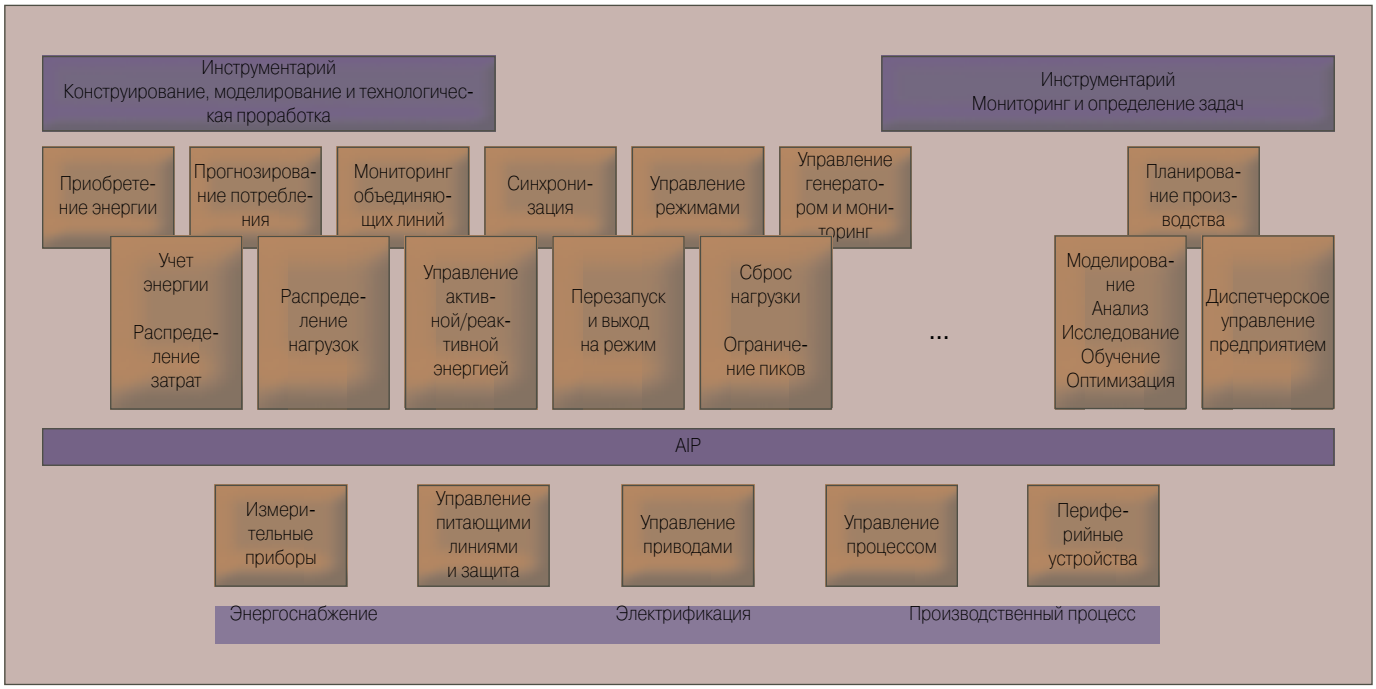
## Отказ от революционного подхода

На рис. 2 продемонстрирован диапазон и разнообразие функций и систем, задействованных в управлении энергопотреблением в промышленности. Как видно из иллюстрации, количество и сложность систем, баз данных, моделей процессов и используемых приложений могут быть значительными. При такой сложности «революционный» подход - подход, при кото-

1 На промышленном предприятии информацию об электроэнергии необходимо получать от широкого ряда систем для выполнения множества задач

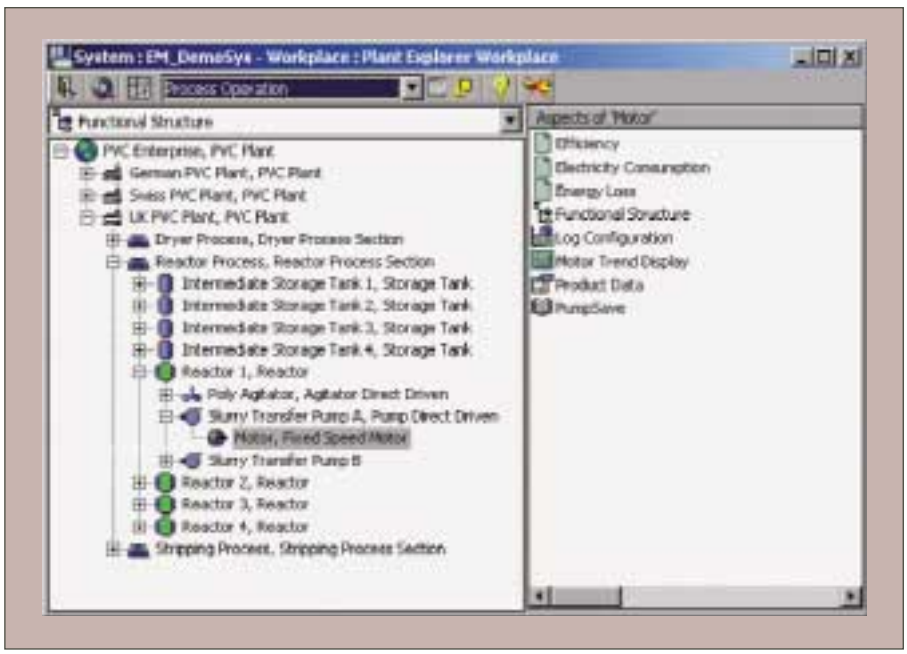


| 2 | Типичный набор функций и систем, необходимых для управления энергопотреблением. Продукт Aspect Integration Platform (AIP) компании АББ упрощает их интеграцию за счет общего доступа к данным, единовременного ввода информации для нескольких приложений и простой навигации. |
|---|---|




ром все установленное ПО заменяется новым – вряд ли практически осуществим. К счастью, в нем теперь нет необходимости. Благодаря технологии Aspect Object™ компании АББ и ее программной архитектуре, платформе интеграции аспектов (Aspect Integrator Platform, AIP), все системы могут получить возможность связи друг с другом, что обеспечит пользователя согласованной, своевременной и существенной информацией, предоставляемой точно согласно требованиям.

| 3 | Составные части завода иерархически организуются в виде «объектов». С каждым объектом связаны «аспекты». Например, энергетические аспекты объекта «электродвигатель» таковы: КПД, потребление энергии и потери. |
|---|---|




Для лучшего понимания работы архитектуры Industrial™ было бы полезно рассмотреть ее внедрение на реальном промышленном предприятии. Но прежде чем сделать это, давайте рассмотрим способ организации данных в Industrial™ и используемую терминологию.

## Industrial™: технология

Информация и функциональность структурируются в Industrial™ посредством организации элементов предприятия, называемых «объектами», в структуры и последующей привязки к ним оперативной информации и/или функциональности, называемых «аспектами». Аспектные объекты (Aspect Objects™) могут быть определены на различных уровнях детализации предприятия, например, на уровне двигателя, реакционного аппарата или завода в целом.

Благодаря такому структурному определению аспектных объектов, технология Industrial™ позволяет получить мощное средство поиска и получения итоговых сведений. Она, кроме того, предоставляет информацию о функциональном членении предприятия.

Информацию можно представить с желаемым уровнем детализации. Например, пользователю могут потребоваться данные об общем энергопотреблении всего предприятия, отдельного производственного процесса или элемента оборудования.

Различные элементы информации об энергопотреблении привязываются к аспектным объектам с по-

мощью выбранных энергетических аспектов. Эти аспекты обеспечивают единообразный доступ к различным элементам энергетической информации. Например, пользователи получают информацию об энергопотреблении одного насоса таким же образом, как и информацию об энергопотреблении всего завода (рис. 3). Аспект КПД рассчитывается на основе исходных данных от других аспектов, таких как энергопотребление и данные об изделии. Модель расчета определяется один раз для всех электродвигателей. После

Более 65% всей электрической энергии, потребляемой промышленностью, потребляется электродвигателями. С помощью ПО для анализа и усовершенствования от компании АББ, информацию об энергопотреблении можно эффективно использовать в этой области.

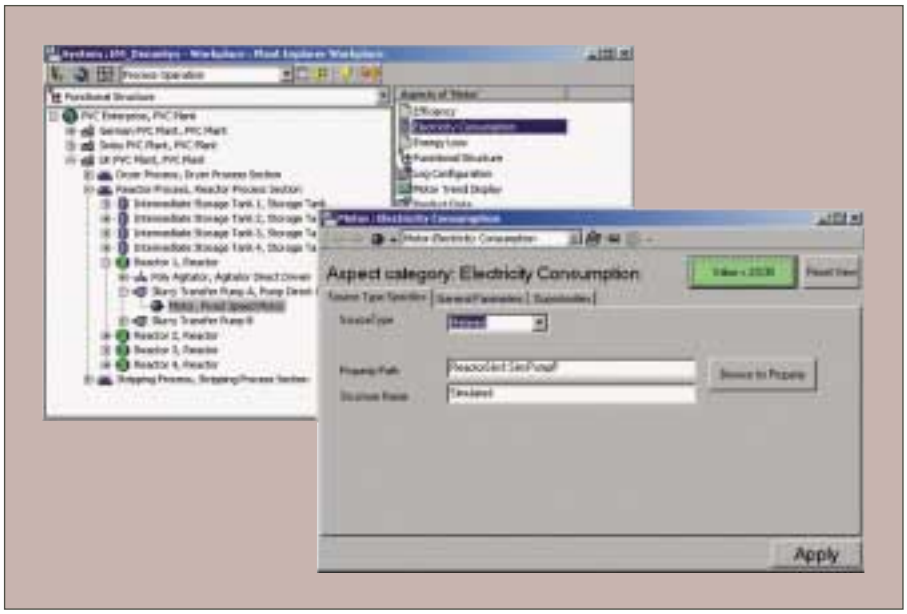
определения структуры аспекты могут объединяться на любом желаемом уровне детализации с помощью всего нескольких щелчков мышью (рис. 4, 5).

### Взгляд в направлении «процесс – верхнее звено управления»

Предположим теперь, что директор, скажем, завода, выпускающего ПВХ, только что вышел из зала заседаний совета директоров и размышляет над тем, как он обеспечит десятипроцентное снижение потребления электроэнергии за год, которое он только что пообещал, не говоря уже о систематическом мониторинге фактического потребления и предоставлении отчетов. Причем сделать это необходимо, не отвлекая столь дефицитные кадры от основной работы по своевременному производству качественной продукции.

С помощью Industrial$^{IT}$ его организации не потребуется затрачивать дополнительные ресурсы для мониторинга использования электроэнергии, этот процесс автоматизирован и согласован, а для уведомления персонала об отклонении процесса от заданных параметров предусмотрены настраиваемые сигналы и журнал событий. Кроме того, директор может провести поиск возможностей для улучшения, либо воспользоваться тестами для сравнения подразделений собственного предприятия или сравнения предприятия с мировыми лидерами.

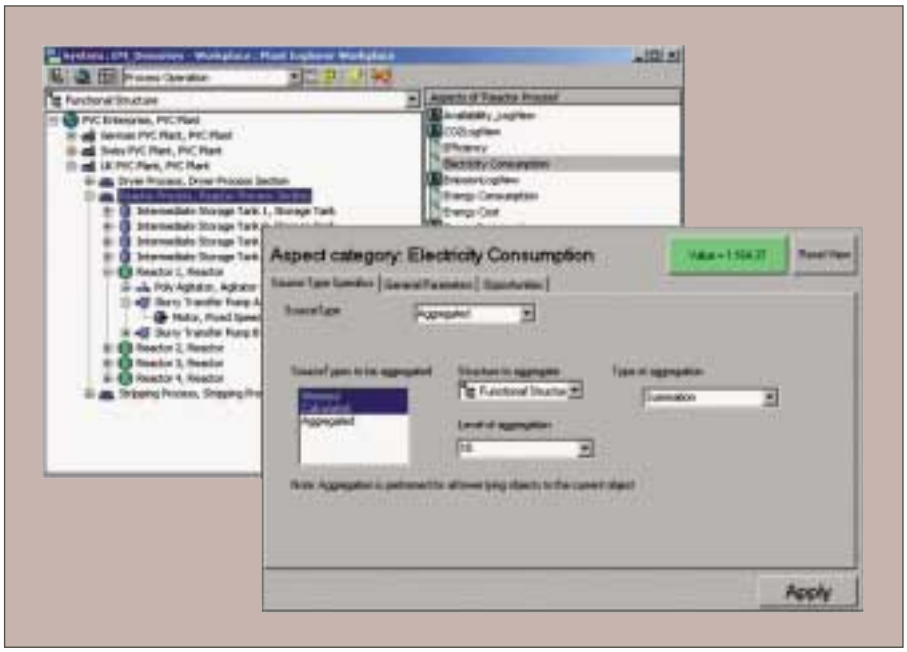
| | |
|---|---|
| 4 | Аспектная информация легко конфигурируется. Она может представлять собой показания датчика, результаты расчета или получаться из объединенного источника по заданному пути |




Директор может повысить ответственность, связывая задачи и фактические результаты согласно обязанностям. Данные об энергопользовании автоматически и согласованно связываются в соответствующую иерархическую структуру.

Не следует пренебрегать и информацией, которую необходимо считывать и вводить вручную, и информацией, приблизительно оцененной или получаемой лишь с ограниченным разрешением. Начав с любых доступных ресурсов, дополнительные компоненты – данные и функции оптимизации – можно постепенно добавлять в дальнейшем.

| | |
|---|---|
| 5 | Совокупная энергетическая информация может быть получена в реальном времени из энергетических аспектов составных частей предприятия на любом уровне детализации. В данном случае энергопотребление сектора реакционных аппаратов получено из данных потребления энергии объектами на низших уровнях |



Технология Industrial$^{IT}$ обеспечивает реальный взгляд в направлении «от процесса в сторону совета директоров», при котором поддерживается жесткая организация данных, но обеспечивается гибкость в мониторинге и сборе информации, как для предопределенных задач, так и для произвольных нужд. Внедрение этой технологии стимулирует усовершенствование процессов, позволяет повысить компетенцию и правильно распределить ответственность.

## От основных производственных показателей к возможностям для улучшения

Чтобы наш директор смог выполнить свое обещание относительно снижения энергопотребления, он и его сотрудники нуждаются в целом наборе информации, в особенности, в основных производственных показателях, которые позволяют определить успешность действий. Подборка таких показателей показана на «приборной панели» устойчивого развития на рис. 6. Данная приборная панель является также и отправной точкой для навигации, где пользователю представлен первый ракурс многоуровневой системы, позволяющей ему находить возможности для улучшения и изучать подробности.

Для выявления возможностей для улучшения пользователь вначале исследует характер основных производственных показателей и проводит поиск потенциала для улучшений на основе фактических данных о работе. Industrial$^{IT}$ помогает принимать решения, привлекая внимание пользователя к «горячим участкам» (например, компрессорам, насосам или нагревателям), эффективность которых можно повысить посредством изменения графика или режима работы. Также для более подробного анализа приводятся предыстория работы, статистика и номиналы оборудования. Пользователь может даже провести по всему предприятию поиск компонентов, вносящих наибольший вклад в потери энергии (рис. 7). Поиск и анализ информации из других аспектов ведется сходным образом.

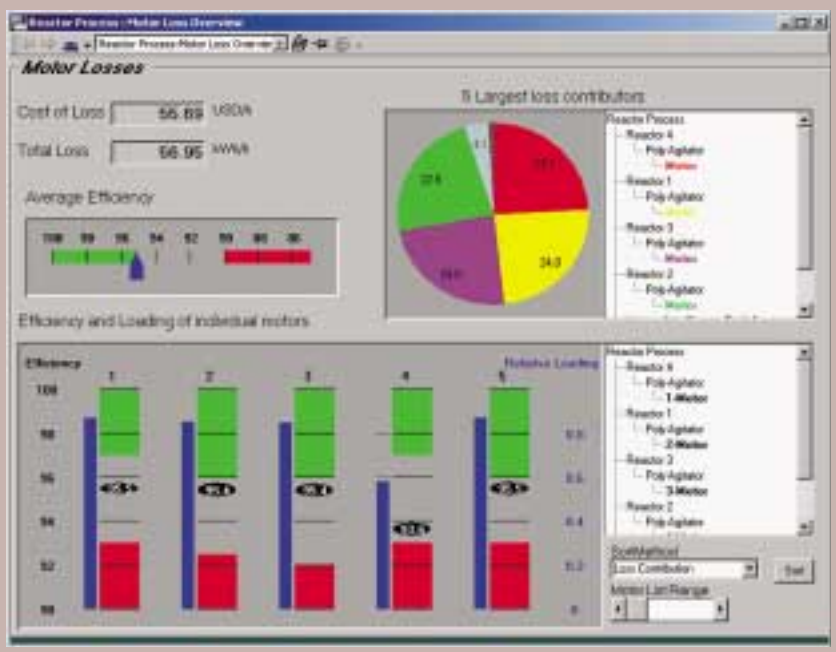
## ПО для оптимизации

Более 65% всей электроэнергии, потребляемой промышленностью, расходуется электродвигателями, что, конечно, делает их основной мишенью, когда речь заходит об экономии энергии или снижении влияния на окружающую среду. Компания АББ предлагает набор ПО для анализа и усовершенствования, которое позволяет применить информацию об энергопотреблении для повышения эффективности использования электродвигателей.

В распоряжении владельцев заводов имеется три отдельных средства, облегчающих принятие решений:

| 6 | Приборная панель устойчивого развития снабжает пользователя фактическими показателями работы и целевыми значениями. В данном случае рассмотрение идет в масштабе предприятия, но имеется возможность более детального анализа. |
|---|---|

| 7 | Возможен поиск объектов по предприятию. В данном случае пользователь нашел 5 главных «виновников» потерь электроэнергии на заводе ПВХ |
|---|---|



* Инструмент КПД приводов рассчитывает КПД имеющейся системы привода переменного тока и сравнивает его с КПД новой, более современной системы

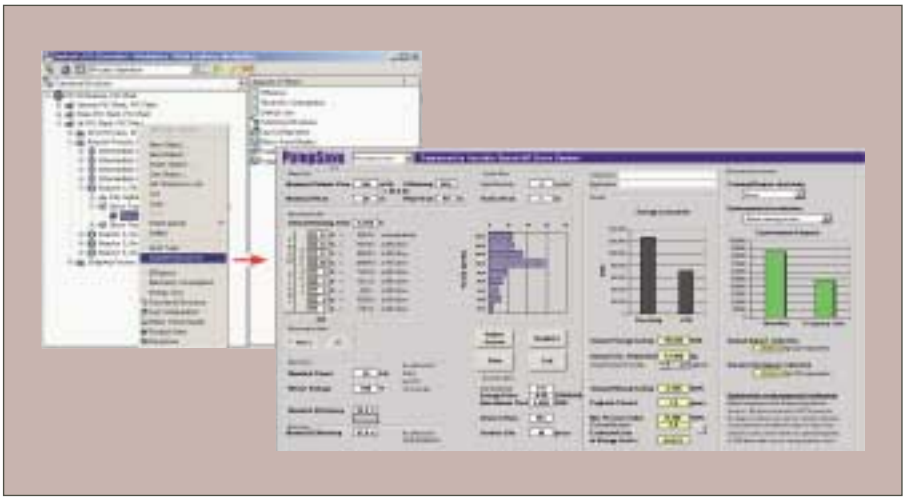
* Инструменты FanSave и PumpSave рассчитывают экономию и срок окупаемости при замене старого метода управления потоками на управление с помощью электропривода переменного тока (на рис. 8 показана программа PumpSave, интегрированная в AIP).

Платформа интеграции аспектов позволяет непрерывно выполнять программы анализа электрических приводов и двигателей, а также вести анализ модернизации и расчет экономического эффекта на основе фактических данных с предприятия. Это способствует эффективному осуществлению программы, а соответствующие средства становятся доступными для всех аспектных объектов-двигателей, независимо от аспектных объектов нагрузки.

Конечно, обычно контроль КПД, нагрузки электродвигателя и его влияния на окружающую среду и прочие параметры не проводится каждый день. Однако на крупном предприятии обычно имеются сотни электродвигателей, и хотя потребление энергии одним мотором может быть незначительным, суммарное энергопотребление может оказаться существенным.

Преимущества, получаемые от сочетания управления энергией на основе Industrial$^{IT}$ и правильно подобранных инструментов, выходят на передний план при планировании остановок производства. В таком случае средства можно использовать для анализа электродвигателей по всему предприятию или для подготовки перечня кандидатов на модернизацию на основе заданного срока окупаемости. И это – еще не все! Экономический и физический эффект энергосберегающих и экологических усовершенствований, а также объемы соответствующих инвестиций, могут быть сведены воедино.

| 8 | Анализ КПД электродвигателя на основе фактической динамики работы и номиналов двигателя и нагрузки. Инструмент отображает потенциальные финансовые и экологические выгоды от замены |
|---|---|




Платформа интеграции аспектов компании АББ позволяет непрерывно исполнять ПО анализа работы электрических приводов и двигателей, а также модернизировать процедуры анализа и расчет экономического эффекта для использования фактических данных предприятия.

Для дополнительного усовершенствования можно интегрировать другие программные продукты компании АББ или иных производителей, что позволяет с максимальной пользой использовать данные об энергопользовании, получаемые с помощью Industrial$^{IT}$ и энергетических аспектов.

## Управление эффективностью

Благодаря тому что данные со всего предприятия эффективно организованы, технология Industrial$^{IT}$ облегчает сбор, анализ и суммирование данных об энергопотреблении, а также интеграцию ПО для усовершенствования. При этом не обязательно прилагать значительные усилия по разработке и настройке, которые необходимы, например, при развертывании традиционных систем с использованием предыстории процесса.

За дополнительной информацией обращайтесь по адресу: trond.haugen@no.abb.com

Тронд Хауген
Ян Вейк
Эдгар Йеллум
Видар Хегре
Оле Яков Сордален
ABB Corporate Research
NO-1375 Биллингштат
Норвегия

Гуннар Беннстам
ABB AB
SE-77180 Людвика
Швеция

Литература
[1] IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities, IEEE STD 739 – 1995
[2] C. Resnick: Energy management and optimization systems providing documented savings and ROI. ARC Insights no. 2001-047M, ARCweb.com, Oct. 2002.
[3] D. Forsyth, B. Ahmad: Importance of energy management systems in the deregulated power market. EXFOR 2003, 89th Annual Meeting of the Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal.
[4] Manage your energy resources and reduce costs. ipw Internationale Papierwirtschaft International Paperworld 4.2001, 23-26.

# ПРОЗРАЧНОСТЬ

## Средство Engineer$^{IT}$ Documentation Assistant – помощник в работе со сложной документацией

Збигнев Корендо, Александра Дуда, Джеральд Копач,
Готц фон Гролль, Энтони Байэтт

**Сложные промышленные установки обычно сопровождаются горой документов, и электрическая подстанция – не исключение. Проблем прибавляет также и то, что вся эта важная информация обычно поступает из разных источников и хранится на разнообразных бумажных и дисковых носителях в разных форматах, из-за чего усложняются извлечение и сбор данных.**

**Чтобы облегчить жизнь инженерам, компания АББ разработала средство Engineer$^{IT}$ Documentation Assistant. Этот новый инструмент, являющийся частью архитектуры Industrial$^{IT}$, упрощает и автоматизирует процесс генерации и извлечения документации.**

Разработка подстанции не представляется очень сложным делом: распределительное устройство для входного напряжения, трансформатор для повышения или понижения напряжения и распределительное оборудование для подачи энергии потребителям. В самом деле, задача не столь проста. Каждый из этих трех основных узлов включает в себя значительное число устройств, выполняющих важнейшие функции: переключение мощности, управление, защиту и измерения. Компания АББ поставляет целый ряд изделий, реализующих эти функции, в том числе: силовые трансформаторы, автоматические выключатели, измерительные трансформаторы, разрядники, реле для управления и защиты, высоковольтные распредустройства, батареи конденсаторов и кабели.

Но этим все не ограничивается: для подстанций также требуются стальные конструкции, здания и вспомогательные системы, такие как системы пожаротушения или кондиционирования воздуха. Обычно эти компоненты поставляются сторонними фирмами. Разработка каждой новой подстанции с чистого листа подобна изобретению колеса снова и снова. А поскольку на подстанции приходится около 25% общих капитальных затрат на систему электропередачи, это – недешевое удовольствие. Как этого избежать?

### Упрощение конструкции подстанций

АББ предлагает несколько модульных компоновок подстанций в качестве решений «под ключ». Их конструкция создается на основе набора электрического оборудования и может модифицироваться с помощью системы разработки подстанции от компании АББ. Хотя этим подразумевается некоторое ограничение свободы конструктора, это практически не имеет значения, поскольку предопределенные ком-

поновки рассчитаны на все разнообразие практических требований.

Кроме того, предварительная сборка наполовину сокращает срок поставки и позволяет выполнить тестирование на заводе, а не на месте установки. Использование крупных блоков также позволяет компании АББ сократить количество основных поставщиков, участвующих в создании подстанции с более чем 30 до менее чем десятка, благодаря чему повышается качество.

## Информационные горы

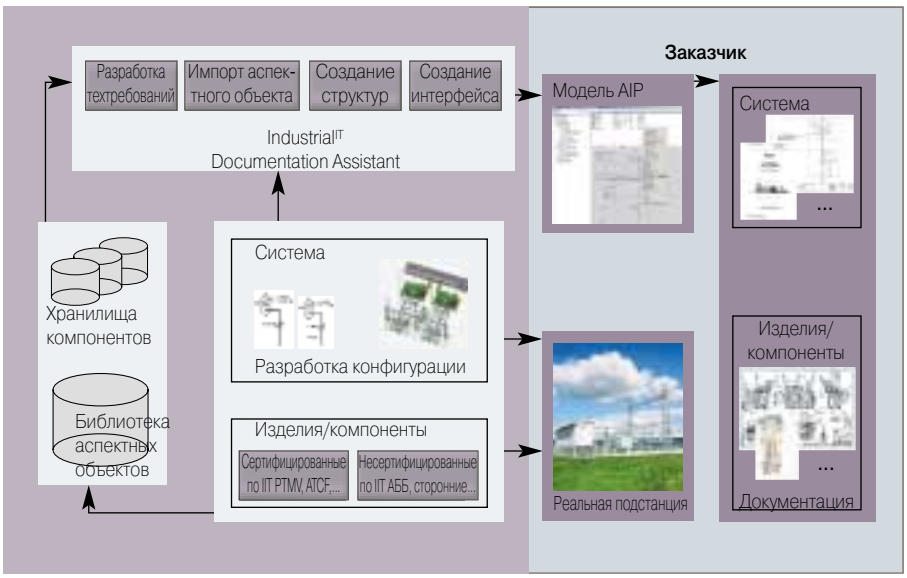
Подстанции АББ, как самые современные и сложные изделия, сопровождаются огромным количеством документации: по эксплуатации подстанции, обеспечению жизненного цикла, обслуживанию и ремонту – здесь перечислены только самые очевидные документы. Но это – лишь начало. На каждом этапе, от получения справочных листков отдельных компонентов, разработки системы, конфигурирования до монтажа, пуска, эксплуатации и вплоть до вывода из эксплуатации к информации, сопровождающей конечный продукт, добавляются новые документы. На протяжении жизненного цикла подстанции вся эта информация должна быть доступна.

## Поиск нужной информации

Преобладающая часть документации для подстанций в настоящее время содержится на бумажных носителях, а некоторая часть – на компакт-дисках. Хотя использование компакт-дисков упрощает поиск, оно не решает фундаментальных проблем распределенного доступа, обеспечения простоты навигации, адаптации представлений для конкретных пользователей и внесения обновлений. Кроме того, различные поставщики предоставляют информацию в разных форматах и разрабатывают ее по разным стандартам. Совершенно неясно, как информацию необходимо структурировать: по типу документов (например, все электрические схемы), по поставщику, по изделию или по носителю?

Сведение всех данных вместе – задача сложная, трудоемкая и подверженная ошибкам. Налицо необходимость в гибкой информационной системе, позволяющей за несколько секунд получить руководство по обслуживанию или идентификационный номер изделия посредством выбора мышью соответствующего устройства в простой однолинейной схеме. И вот здесь в игру вступает основная концепция технологии IndustrialIT компании АББ – концепция аспектных объектов.

1 Сертификация решений с помощью EngineerIT Documentation Assistant




## Аспектные объекты

С помощью аспектных объектов может быть представлено все, что угодно – от установленного оборудования, такого как роботы, резервуары, вентили, трансформаторы или выключатели, до готовой продукции, такой как автомобили, фармацевтические препараты и даже электроэнергия. Но аспектные объекты могут быть и не столь осязаемыми: например, это может быть наряд на производство или заказ на покупку, проектный документ на какое-либо изделие. Вся информация по аспектному объекту (его «аспекты») может быть получена щелчком мышью по его значку. Аспект – это полностью универсальный «носитель информации», содержащий данные самых различных типов: простые ссылки на чертежи, схемы управления, информацию по обслуживанию, размещению или ссылки на стандарты, бизнес-информацию, например, серийные номера компонентов или номера заказов, и даже ссылки на связанные записи в системе SAP или данные измерений и мониторинга в реальном времени. В случае подстанций АББ аспектные объекты могут, например, представлять измерительные трансформаторы, реле защиты или подсистемы, такие как высоковольтное распределительное устройство.

Поскольку аспектные объекты создаются со стандартными «интерфейсами», задача документирования подстанции становится очень простой: она сводится к подбору соответствующих аспектных объектов и объединению их, как деталей конструктора Lego©. Сбор информации при этом легко автоматизировать. Очевидны и возможности повторного использования данных.

Благодаря логичной организации данных экономится время: различные пользователи могут структурировать отображение информации согласно индивидуальным требованиям.

Чтобы отобразить такой сложный объект, как подстанция, одной структуры явно недостаточно. Например, оператору подстанции необходима функциональная структура, а обслуживающему персоналу – схема с привязкой к реальному положению. Технология IndustrialIT работает с множеством таких структур, чего не предлагает ни один конкурент. Благодаря этому каждый пользователь может пользоваться иерархией, соответствующей его задачам. Независимо от внешней организации, компоненты архитектуры обеспечивают целостность соответствующих объектов независимо от выбранной структуры или ракурса представления.

## EngineerIT Documentation Assistant

Аспектный объект действует как стандартизованный контейнер для документации, как традиционная папка. Но каким образом аспектные объекты подстанции, соответствующие отдельным изделиям с поддержкой IndustrialIT, фактически объединяются в составной аспектный объект, представляющий подстанцию в целом? А что происходит в случае, если в подстанции используются компоненты сторонних поставщиков?

Ответ заключается в использовании инструмента EngineerIT Documentation Assistant. Это средство отвечает за сборку аспектного объекта всей подстанции из всей доступной информации (рис. 1). Эта мощная программа охватывает весь процесс разработки подстанции:

- определение технических требований (входная модель)
- нахождение и импорт аспектных объектов применяемых изделий
- создание объектов, представляющих несертифицированные изделия
- создание структур данных
- загрузка документации на локальный компьютер
- запись компакт-диска для подстанции IndustrialIT

Вся информация, содержащаяся в отдельных аспектных объектах, также связывается и структурируется, тем самым упрощается генерация документов для подстанции в целом. Этот принцип, называемый моделированием аспектных объектов, является основополагающим принципом для программы Documentation Assistant. После построения аспектного объекта, представляющего подстанцию, его можно с легкостью использовать повторно.

> Documentation Assistant решает фундаментальные задачи обеспечения распределенного доступа, простой навигации, адаптации представлений для конкретного пользователя и работы с обновлениями.

В ходе работы Documentation Assistant связывается с различными внешними приложениями:

- библиотекой ABB Library – источником аспектных объектов изделий и связанной документации;
- системой разработки подстанций АББ – источником модели подстанции с данными технического задания;
- EDMS – источником принципиальных документов и документации сторонних поставщиков.

Заказчик может затем либо установить данный объект в собственной среде IndustrialIT, либо обращаться к документации непосредственно на дистрибутивном компакт-диске с помощью прилагаемого средства просмотра аспектных объектов Aspect Object Viewer (AOV), подобного Acrobat Reader для файлов PDF. Однако в последнем случае теряются некоторые преимущества, реализуемые при установке подходящей платформы интеграции аспектов (т.е., возможность внесения изменений, работа по сети и т.д.). Также можно установить продукт на локальный жесткий диск для просмотра с помощью AOV.

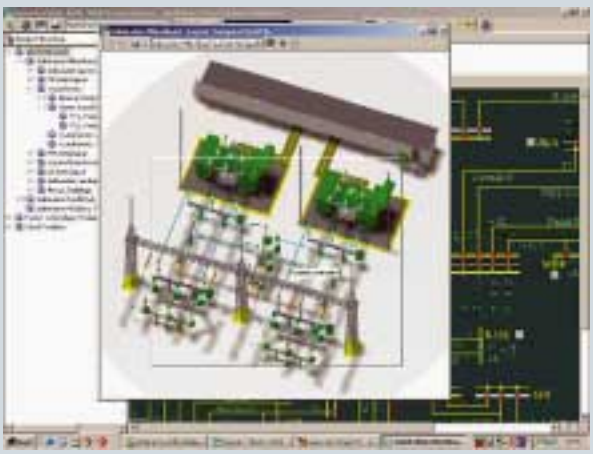
## Сочетание Documentation Assistant и AIP

Ключевым элементом архитектуры IndustrialIT является платформа интеграции аспектов (AIP). Помимо основных служб уровня инфраструктуры, таких как открытые интерфейсы для интеграции с другими системами, идентификация пользователя и авторизация, платформа AIP содержит полноценный набор функций управления информацией на протяжении всего срока службы изделия.

Для упрощения стоящей перед инженерами задачи по генерации документации, Documentation Assistant обращается к многим базовым функциям AIP:

- Некоторый стандартный набор документации поставляется со всеми подстанциями. Во избежание копирования этой информации каждый раз, используется супертип – еще один элемент AIP. Аспектный объект супертипа создается однажды и может использоваться необходимое число раз. Аспектный объект каждой новой подстанции связывается с объектом супертипа и может обращаться ко всем аспектам, заданным предварительно для аспектного объекта супертипа.
- Для описания данных способом, наиболее подходящим для персонала, которому она предназначена, в программе Documentation Assistant используется описанная выше возможность задания в AIP нескольких структур.
- Чтобы упростить нахождение нужных аспектных объектов, в Documentation Assistant применяются также графические представления, такие как электрические схемы или монтажные схемы панели управления и защиты.
- Для ускорения поиска документов пользователь может также прибегнуть к контекстным меню, ссылкам на встроенные аспектные объекты и другим функциям, схожим с функциями проводника Windows©, таким как печать или сохранение файлов.

| 2 | Трехмерная схема подстанции. Оператор в этом окне выбирает необходимое ему распределительное устройство. |
|---|---|



- После того как аспектный объект подстанции сконфигурирован и подготовлен к сдаче, для сохранения его на компакт-диске вместе со всей необходимой документацией необходимо сделать всего несколько щелчков мышью. Полученный пакет документации для подстанции впоследствии может быть с легкостью импортирован в системы клиента.
- Повторное использование данных играет важную роль, а для этого необходима программа Reuse Assistant, входящая в состав пакета Industrial$^{IT}$ Engineering Studio. Она работает в двух режимах. Эксперт воспользуется режимом Architect при подготовке стандартных решений для дальнейшего повторного использования. В данном режиме для сбора информации используется процедура опроса. Конструктор воспользуется режимом Build для применения стандартных решений в контексте конкретного проекта. В этом режиме работает пользовательский интерфейс с предварительно заданной последовательностью вопросов. Ответы на них можно дать, просто выбрав один из предлагаемых вариантов или указав технические данные. Далее на основе полученной информации создается инструкция по повторному использованию, содержащая операции в определенном порядке. В Documentation Assistant предусмотрен набор таких инструкций для применения при создании документации к подстанциям, что позволяет экономить время на определении необходимого набора документов для подстанции.

Архитектура Industrial$^{IT}$ позволяет различным пользователям, например, операторам подстанций и инженерам по обслуживанию, структурировать отображение информации соответственно их индивидуальным нуждам.

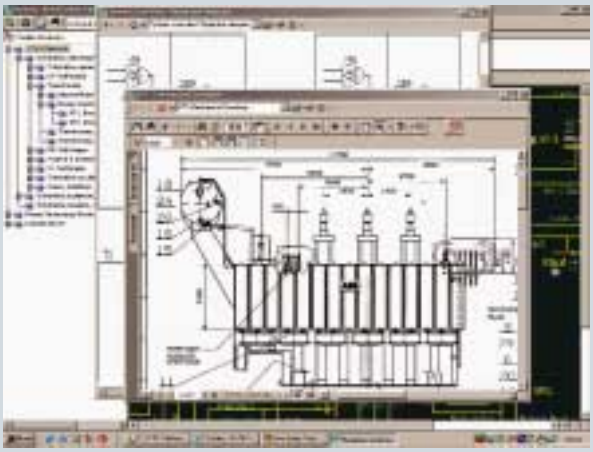
## Поиск информации

Древовидная структура папок или графический интерфейс обеспечивают легкость нахождения информации. Предположим, например, что оператору технической службы необходимо отправить техника на удаленную подстанцию. Для проведения проверки необходимы чертежи силового трансформатора. На обзорной панели, отображающей сеть, оператор выбирает интересующую его подстанцию, при этом открывается трехмерное представление подстанции (рис. 2), из которого оператор выбирает первичную зону подстанции.

После этого отображается однолинейная схема, содержащая больше подробностей. Оператор щелчком мыши выбирает значок трансформатора и на книжной полке выбирает аспект «Сборочные чертежи». Теперь необходимая информация найдена и готова к печати. Для нахождения ее потребовалось всего четыре щелчка мышью. При этом был исключен бесцельный поиск возможно несуществующей папки или утерянного компакт-диска.

Сочетание программных продуктов ABB Engineer$^{IT}$ Documentation Assistant и AIP – это мощное средство, позволяющее автоматически генерировать полную документацию для сложных изделий, таких как рассмотренная в данной статье подстанция, и выполнять поиск данных в документации. Информация об устройствах представляется в разных удобных в использовании форматах.

| 3 | Искомая информация, в данном случае – сборочный чертеж силового трансформатора |
|---|---|




**Д-р Збигнев Корендо**
**Александра Дуда**
ABB Corporate Research
PL 31-038 Краков/Польша
zbigniew.korendo@pl.abb.com

**Джеральд Копач**
ABB Power Technologies
DE-68309 Мангейм
Германия

**Д-р Готц фон Гролль**
Corporate Research
ABB Switzerland

**Энтони Байэтт**
ABB Ltd.
Finnabair Industrial Park
Дандолк/Ирландия

# Средство просмотра аспектных объектов Inform$^{IT}$ – эквивалент Adobe Acrobat для Industrial$^{IT}$

Для получения маркировки «Industrial$^{IT}$ Enabled» («поддержка Industrial$^{IT}$»), все выпускаемые ныне и новые изделия АББ проходят проверку и сертификацию по одному из четырех уровней. Низший уровень (уровень 0) предписывает наличие базового набора информации, предоставляемой для каждого изделия или приложения Industrial$^{IT}$, более высокие уровни предполагают наличие возможностей взаимодействия с другими изделиями или в рамках систем. На сегодняшний день более 36000 изделий АББ имеют по меньшей мере сертификат уровня 0.

Для получения статуса, официально именуемого «Industrial$^{IT}$ Level 0: Information Enabled», изделие должно иметь следующие характеристики или «аспекты»:

- идентификатор изделия
- документацию к изделию:
  1. справочный листок или техническое справочное руководство
  2. руководство по монтажу и пуску
  3. руководство по применению
  4. руководство по эксплуатации
  5. руководство по обслуживанию и ремонту
  6. сертификат соответствия маркировке CE
  7. сертификат соответствия экологическим требованиям
  8. экологические сведения

- данные САПР
- технические характеристики и классификацию изделия

Вся указанная информация компонуется и сохраняется в одном файле аспектной структуры типа Aspect Frame Work (AFW). Расширение .afw обозначает частный формат файла, предназначенный для хранения аспектных объектов[1)] и используемый при распространении информации об изделии (для изделий уровня 0).

Приведенный выше набор аспектов и аспектных объектов используется компанией АББ в качестве шаблона организации всей информации об изделиях и процессах. Создание, модификация и отображение аспектных объектов выполняется в рамках общей архитектуры АББ, именуемой «платформой интеграции аспектов» (Aspect Integrator Platform или AIP). Однако у многих потенциальных покупателей изделий с сертификатом Industrial$^{IT}$ уровня 0 программа AIP не установлена, а значит, они не могут открыть файл AFW. Поэтому возникла необходимость в небольшом и простом средстве просмотра для Industrial$^{IT}$, эквивалентном программе Acrobat Reader, которое позволяло бы отображать файлы AFW без необходимости устанавливать AIP. Кроме того, оно должно послужить важным маркетинговым инструментом и привлечь внимание к платформе Aspect Object компании АББ.

В ответ на эту необходимость, ученые из польского и немецкого исследовательских центров АББ в сотрудничестве со специалистами по Industrial$^{IT}$ из Швеции разработали программу Aspect Object Viewer (AOV). Это компактное (около 8 Мб) приложение занимает меньше места на диске, чем Acrobat Reader, и позволяет просматривать файлы AFW с использованием методов навигации, очень схожих с методами, применяемыми в заводской программе, но при этом функционирует независимо от программы AIP.

Проект под названием Inform$^{IT}$ Aspect Object Viewer был выполнен за шесть месяцев, и в январе 2003 года было начато открытое распространение версии 1. В сентябре была выпущена обновленная версия 2.1, включающая следующие добавления:

- поддержку аспектов-закладок;
- ассоциацию с типом файлов – делает программу AOV средством по умолчанию для просмотра файлов AFW;
- автоматическое обновление – автоматически удаляет старую версию AOV;
- содержательные сообщения об ошибках, дающие больше информации в случае сбоя;
- функцию поиска по свойствам объектов.

Два подразделения АББ уже пользуются средством просмотра AOV. Подразделение низковольтного оборудования выпустило компакт-диск с каталогом автоматических выключателей, реле и управляющих устройств. На каждом компакт-диске теперь имеется программа AOV, позволяющая просматривать информацию об изделиях. С середины 2003 года подразделение силовых трансформаторов начало предоставлять клиентам AOV вместе с аспектными объектами, распространяемыми с изделиями, сертифицированными по уровню 0.

Маркус Грайнер
Corporate Research
ABB Switzerland
markus.greiner@ch.abb.com

1) Концепция Industrial$^{IT}$ определяет набор информации, необходимой для сопровождения каждого промышленного устройства, как «аспектный объект» (Aspect Object™), содержащий все характеристики («аспекты») устройства.

# «Человеческие черты». Новый метод программирования роботов

*Совместный проект АББ привел к созданию усовершенствованного метода программирования, который не только ускоряет процесс программирования робототехнических задач, но также открывает новые области для автоматизации, на сегодня недоступные в силу значительной сложности программирования традиционными методами и длительности процесса в сравнении со временем производства.*

Роботы АББ должны быть весьма универсальными. Поскольку они используются практически во всех отраслях промышленности для решения задач от автоматической сборки и обработки материалов до электросварки, даже незначительное повышение гибкости позволит значительно расширить область применения. Поскольку робот является подвижным объектом, он нуждается в надежном снабжении точной информацией о пространственном положении. Поэтому при повышении гибкости традиционное программирование становится еще более сложным и трудоемким. Многообещающие возможности нахождения новых, альтернативных способов быстрой (и точной) передачи информации роботу делают эту область исследования сложной и одновременно интересной.

В наше время, когда роботы играют все более важную роль в нашей повседневной жизни, становится популярной мысль о том, что способ общения людей с ними должен быть как можно более близок к способу общения людей между собой. Общение между людьми многомодально (т.е. включает комбинацию жестов и речи) и зачастую основывается на интуиции. Исследовательские учреждения, такие как Университет Карнеги-Меллона (CMU) воспользовались этим для упрощения взаимодействия «человек-машина». Компания АББ, как мировой лидер в промышленной робототехнике, может использовать результаты этой работы благодаря сотрудничеству с Лабораторией сложной механотроники CMU (Advanced Mechatronics Laboratory, AML) над проектом, в котором реализуется идея использования движений человеческой руки, жестов, в качестве естественного способа передачи пространственной информации. Иными словами, речь идет о программировании с помощью жестов. Выбранный компанией подход поддерживает профессор Прадип Кхосла, заведующий лабораторией AML и Факультетом электротехники и вычислительной техники в CMU. По его словам, «по мере того, как роботы осваиваются в человеческой среде и начинают контактировать с неопытными пользователями, им потребуется способ взаимодействия с пользователями на интуитивном уровне. Клавиатура и мышь более не годятся в качестве единственного способа ввода данных».

## В двух словах о программировании жестами

Ученые университета Карнеги-Меллона работают в области программирования жестами (ПЖ) уже много лет. Целью развития ПЖ является обеспечение более естественной среды для пользователя и генерация более завершенных и надежных программ, благодаря работе со специалистами по выполняемым задачам, а не со специалистами по программированию.

Процесс начинается с демонстрации человеком программируемой задачи. Движения ладони и кончиков пальцев человека регистрируются с помощью сенсорной перчатки с чувствительными элементами на кончиках пальцев. Модульная перчатка определяет положение руки, углы сгиба пальцев и фиксирует прикосновения кончиков пальцев. Окружающие объекты распознаются системой компьютерного зрения, тогда как система распознавания речи принимает высокоуровневую управляющую информацию. Из необработанных данных датчиков извлекается информация об основных классах жестов, которая передается в сеть интерпретации жестов. Система обладает способностью к самообучению в том смысле, что ранее приобретенные навыки, сохраненные в системе, используются для интерпретации в ходе обучения, а в ходе выполнения программы обеспечивается обратная связь. На выходе система ПЖ выдает исполняемую программу для выполнения показанной задачи на обучаемом оборудовании.

## Результаты для компании АББ

Поскольку процесс роботизированной электродуговой сварки по своему существу является трехмерным, подаваемые рукой жесты могут быть интуитивно понятным средством указания таких параметров, как положение, скорость, ускорение, размер, направление, угол и угловая скорость для обеспечения более

быстрого и точного программирования робота. Речь также может играть важную роль, придавая системе способность получать высокоуровневую управляющую информацию. Таким образом, ученые CMU вместе со специалистами АББ разработали и испытали систему программирования с многомодальным интерфейсом для применения в робототехнике и в области дуговой сварки.

Система включает в себя следующие основные компоненты:

- кибер-перчатку для регистрации положения и перемещения пальцев и запястья (распознавания жестов);
- датчики с шестью степенями свободы Polhemus Fastrak для определения положения;
- систему распознавания речи компании Microsoft;
- ПК;
- программу WebWare для связи ПК и робота;
- робот компании АББ.

Персональный компьютер служит посредником между многомодальными устройствами ввода (перчаткой и системой распознавания речи) и роботом АББ.
В части обработки входящей информации на нем исполняется программа, преобразующая данные о голосе и движениях перчатки в команды контроллера робота. Система вывода отправляет роботу команды, содержащие точную информацию о положении и ориентации, полученную посредством соответствующих преобразований координат.

Робот программируется в трех режимах: абсолютном, толчковом и подчиненном. В абсолютном режиме «рабочие точки» программируются посредством задания пространственных координат с помощью указательного пальца и их запоминания. Однако из-за ограниченной точности системы позиционирования (±5 см), сохраненные координаты необходимо уточнять для достижения точности, требуемой для дуговой сварки (<1 мм). Уточнение может выполняться либо в толчковом режиме, либо в подчиненном. Толчковый режим в робототехнике подразумевает непосредственное управление рабочим органом (устройством или инструментом, расположенным на конце руки робота) с помощью джойстика или кнопок.
В данном случае джойстик и кнопки заменяются жестами и голосовыми командами. Например, команда «jog» заставляет робота переместиться на некоторое расстояние в направлении, сообщаемом указательным пальцем. В подчиненном режиме робот копирует движения руки с использованием заданного масштаб-

ного коэффициента. Это означает, что если рука человека перемещается на расстояние 1 см, робот реагирует перемещением на 1 мм (в зависимости от настроек масштабирования), и так далее, пока не будет достигнута желаемая точность.

Испытание системы и оценка ее функционирования в реальной работе по дуговой сварке велись с использованием роботов АББ IRB140 и IRB1400. На данный момент система программирования продемонстрировала способность обеспечивать необходимую точность, что позволяет получать высококачественные сварные швы. Кроме того, наблюдения показали, что данный метод управления очень прост для освоения.

Совместная работа инженеров CMU и специалистов АББ привела, помимо получения ценных результатов, к созданию значительного «ноу-хау», которое будет использоваться в компании АББ при дальнейших исследованиях в области программирования роботов.

**Д-р Джон Долан**
Институт робототехники
Университет Карнеги-Меллона
jmd@cs.cmu.edu

**Мартин Стрэнд**
Advanced Industrial Communication Group
ABB Corporate Research
Вастерас/Швеция
martin.strand@se.abb.com

# Новое средство моделирования на основе Web для операторов установок получения полимеров

*Применение системы моделирования, построенной с использованием современной веб-технологии, для обучения операторов газофазных установок производства полипропилена по процессу Novolen® на точной динамической модели установки через Интернет, интрасеть или на локальном компьютере.*

Тренажеры сегодня используются многими компаниями для обучения без отрыва от производства. По мере роста вычислительных возможностей и появления на рынке усовершенствованных средств обучения, расширяются и службы по обучению с помощью компьютеров, в частности, в химической промышленности. Такие службы могут моделировать работу реальной установки с помощью компьютера, что дает возможность безопасно и эффективно обучать операторов установок и другой производственный персонал. Кроме того, операторы могут обучаться работе при нормальном и нештатном режиме функционирования установки, не подвергая опасности реальную установку [1].

Специалисты подразделения ABB Corporate Research разработали средство обучения работе с установками производства полипропилена на основе модели. Вместе с компанией Novolen Technology Holdings C.V. (NTH), совместным предприятием фирм ABB Lummus Global и Equistar, компании АББ удалось создать инструмент для обучения работе с установкой процесса Novolen, имеющейся у NTH. Система, названная Novolen OTS (Novolen Operator Training Simulation, тренажер для обучения операторов процесса Novolen), построена на основе уникальной модели и обладает преимуществами в надежности программного обеспечения и тренажера, легкости обслуживания и возможностях расширения. Поскольку установки, работающие по процессу Novolen, работают по всему миру, использование системы с поддержкой Web особенно удобно. Обучение на тренажере Novolen OTS можно проводить по Интернету, по интрасети или на отдельном компьютере. Тренажер предназначен для операторов технологических установок, инструкторов и технологов. Важной целью обучения является ознакомление операторов с динамическими характеристиками установки при нормальной работе и в нештатных ситуациях, включая отклонения от нормального хода процесса, запуск и останов установки и переходы между различными сортами продукции. Более того, операторы приобретают понимание связи между параметрами процесса и качеством получаемой продукции. Это позволяет операторам усовершенствовать навыки по управлению установками и распознаванию проблем.

| 1 | Установка производства полипропилена компании NTH |
|---|---|

## Установка процесса Novolen

В процессе Novolen® полимеризация ведется в газовой фазе в одном или двух реакционных аппаратах. Для получения широкой гаммы продуктов, включая сверхударопрочные сополимеры, достаточно всего двух последовательно соединенных реакторов. Кроме реакционных аппаратов, в состав установки входят холодильники, дегазаторы, емкости для хранения конечного продукта, экструдер, управляющие устройства и аварийные клапаны (рис. 1).

## Краткое описание компонентов тренажера

В состав системы Novolen® OTS входят следующие основные компоненты:

- система моделирования, включающая модели процесса, системы управления и системы защиты;
- обобщенный пульт оператора в качестве интерфейса «человек-система»;
- программная система, объединяющая главные составные части и обеспечивающая работу через Интернет.

Графический интерфейс пользователя (GUI) представляет собой обобщенное представление пульта оператора (рис. 2). Поскольку тренажер Novolen® OTS используется в самостоятельном режиме, пульт инструктора не предусмотрен. Стандартный веб-браузер, например, Internet Explorer, играет роль GUI, отображая результаты моделирования и принимая команды пользователя.

Компоненты пользовательского интерфейса, такие как клапаны, текстовые и цифровые окна, кнопки, индикаторы уровня и факелы, отражают текущее состояние модели. При необходимости с помощью этих компонентов ход моделирования можно изменять. Например, щелчок по клапану открывает или закрывает его, а в цифровые окна вводятся численные значения. В тренажере представлены и холодильники, дегазаторы, емкости хранения, экструдер, устройства управления и аварийные клапаны.

Помимо описанных базовых функций в системе реализованы дополнительные функции, позволяющие расширить опыт обучаемого. Например, для более эффективного использования тренажера может быть увеличена скорость моделирования, также можно запомнить текущее состояние и использовать его затем во время других сеансов обучения.

Чтобы начать обычный сеанс обучения, необходимо зайти на веб-сайт сервера. После процедуры входа, при которой выполняется проверка прав, запускается моделирование по одному из нескольких предварительно определенных сценариев. Обучаемый может изменять ход работы модели, меняя параметры процесса, такие как расходы или уставки температуры. Эти изменения приводят к динамическому отклику системы, который обучаемый наблюдает и на который он соответствующим образом реагирует. После остановки моделирования и закрытии окна браузера сеанс обучения заканчивается.

Тренажер Novolen® OTS можно установить и эксплуатировать без ограничений на ПК стандартной конфигурации. Его можно также использовать через Интернет или интрасеть, при этом на стороне пользователя необходим лишь браузер.

## Принцип работы

Динамическая модель представляет собой фундаментальную модель процесса Novolen® с моделированием основных аппаратов [2]. Она построена на основе обыкновенных дифференциальных уравнений

| 2 | Снимок экрана тренажера, демонстрирующий общий вид процесса |
|---|---|

и имеет около 100 состояний. Широкий диапазон рабочих параметров реализован в связи с тем, что тренажер разрабатывался для решения важной задачи обучения: концентрации усилий при обучении на динамических характеристиках установки при нормальной работе (например, при переводе с одного сорта продукции на другой) и нештатных ситуациях (например, при засорении трубопровода).

Модель параметризована, что позволяет легко вносить изменения, отражающие характеристики установок различного размера и конфигурации. Особое внимание уделено непрерывности численного решения, чтобы исключить сбои моделирования во время сеанса обучения.

В системе применяется архитектура клиент-сервер, в которой модель расположена на сервере. Графический интерфейс пользователя размещается на компьютере-клиенте. Взаимодействие между клиентом и сервером осуществляется по протоколу HTTP, самому распространенному протоколу передачи данных в Интернете. Экраны тренажера создаются в форме HTML-страниц, на которых с помощью Java-апплетов отображаются данные. Подход с использованием HTML дает возможность создавать ссылки на другие информационные источники, а также допускает интеграцию с другими системами электронного обучения. Благодаря использованию языка Java можно запрограммировать разнообразные специализированные компоненты, которые позволяют пользователю разными путями модифицировать данные. Для доступа к серверу можно использовать все распространенные браузеры с поддержкой языка Java.

На стороне сервера веб-серверное приложение многоуровневой архитектуры обеспечивает функции, необходимые для передачи динамических данных со страниц и обратно. Ядром служит сервер OPC, включающий в себя модель и предоставляющий стандартный интерфейс к ее данным. Веб-сервер создает службу на базе HTTP, благодаря которой потоки данных направляются из сервера OPC в сервлеты Java. Эти сервлеты связаны по протоколу HTTP с Java-апплетами, исполняемыми на стороне клиента. Компания АББ разработала внутреннюю структуру связи с OPC с использованием интерфейса прямого доступа Java Native Interface, чтобы обеспечить совместимость между приложениями Windows 32 и Java [3].

## Успешное дополнение к технологии

Компания NTH повысила ценность предлагаемой ею в настоящее время технологии, создав высоконадежный и наращиваемый тренажер с использованием стандартных технологий программирования и моделирования. Эта система позволит нынешним и будущим владельцам лицензии на процесс Novolen повысить уровень знаний и улучшить работу установок. Лицензиаты имеют возможность выбирать между локальными сеансами обучения или обучением через Web. Первая реакция пользователей была настолько положительной, что многие высказывают мнение о том, что такое средство станет когда-либо совершенно необходимым для любой компании в химической промышленности.

Д-р Расмус Нюстрем
Д-р Андреас Кроль
Д-р Александер Фрик
Кристиан Штих
ABB Corporate Research Center
Ладенбург, Германия

Клаус Хюттен
Д-р Франц Лангхаузер
Д-р Вильгельм Зебас
Д-р Майнольф Керстинг
ABB Lummus Global
Novolen Technology Division

Литература

[1] **A. Kroll:** Trainingssimulation fur die Prozessindustrien: Status, Trends und Ausblick. Teil 1+2. Automatisierungstechnische Praxis atp (2003) 45, no. 2, pp 50-57, and no. 3, pp 55-60.
[2] **C.-U. Schmidt, R. Bottcher:** 2000. ProveT – Training simulator for Novolen Process. 1st European Conf on the Reaction Engineering of Polyolefins, 2000, Lyons, 114-116.
[3] **R. Nystrom, et al:** 2003. Web-based training for polymer plant operators using process simulation. Automatisierungstechnik 51, no. 11.

## Благодаря технологии HVDC проект компании Murraylink с технической и экологической точки зрения оказался наиболее успешным

*Энергетический проект, имеющий важное значение для Австралии и реализованный с помощью технологии компании АББ, был вторично отмечен престижной наградой в экологической номинации.*

Высоковольтная 177-километровая подземная линия электропередачи компании Murraylink является самой протяженной в мире, и именно благодаря ей в начале 2003 года штат Южная Австралия присудил компании Murraylink Transmission Company (MTC) награду за выдающееся техническое решение. Это уже вторая престижная награда, которой удостоен проект: в 2002 году он был отмечен, как один из лучших проектов в области гражданского строительства, в котором новейшие технологии самым удачным образом сочетались с защитой окружающей среды.

В соответствии с проектом были соединены энергосистемы штатов Виктория и Южная Австралия, и теперь эти штаты могут непосредственно обмениваться энергией друг с другом. Для соединения были проложены подземные кабели, так как на большой части территории между двумя штатами находятся национальные парки-заповедники, а также крупные частные сельскохозяйственные владения. К достоинствам подземных кабелей относится не только то, что они незаметны и никому не мешают, но и то, что они защищены от обычных для Австралии причин отключений электроэнергии, в том числе от молний и повреждений, вызываемых представителями животного мира и горящими кустарниками.

Для увеличения пропускной способности и надежности системы электроснабжения Южной Австралии при прокладке подземного соединения была использована уникальная технология компании АББ под названием HVDC (High Voltage Direct Current) Light™. Пропускную способность удалось довести почти до 220 МВт, что вполне достаточно для того, чтобы обеспечить электроэнергией около 120 тысяч домашних хозяйств. При этом не следует забывать, что системы HVDC Light, благодаря продуманности технологии, не могут оказаться перегруженными, что исключает риск каскадных отключений.

По мнению П. Смитса, руководителя департамента энергетических технологий компании АББ, «награда является еще одним подтверждением полезности нашей технологии HVDC Light. После недавних полных отключений электроэнергии задачи обеспечения устойчивости и безопасности стали еще более актуальными. Разработав технологию HVDC, компания АББ сумела предложить операторам энергосистем эффективные решения для этих задач.»

MTC является дочерним предприятием фирмы TransEnergie – подразделения компании Hydro-Quebec (Канада), которое занимается системами передачи электроэнергии.

## Qatar Petroleum делает выбор в пользу Industrial$^{IT}$

В 2002 году компания Qatar Petroleum (QP), владелец крупнейшего в мире газового месторождения, подписала с компанией АББ контракт на модернизацию и последующий ввод в эксплуатацию двух из принадлежащих QP предприятий с внедрением технологии Industrial$^{IT}$. В прошлом году компания АББ успешно усовершенствовала операторские интерфейсы на двух из принадлежащих QP предприятиях – на газоперерабатывающем заводе NGL 3 и на морской газодобывающей платформе PS4, где были установлены консоли Operate$^{IT}$ [1].

Для модернизации был использован разработанный компанией АББ модуль оптимизации основных средств, который является основой для дистанционного мониторинга их состояния. В сочетании с программным обеспечением Industrial$^{IT}$ для мониторинга основных средств дистанционный доступ позволил QP получить значительную выгоду за счет:

- повышения эффективности использования основных средств и снижения затрат на их техническое обслуживание
- более высокой эксплуатационной готовности, повышенной производительности и снижения потерь на качестве продукции
- улучшения взаимосвязи между эксплуатационной готовностью и стратегией производства
- снижения затрат на обработку
- ускоренной окупаемости основных средств и капиталовложений

Ключевым достоинством такого сочетания технологий является гибкость. Данные о состоянии основных средств либо могут запоминаться на месте, собираться и отправляться по электронной почте, либо могут в любой момент непосредственно запрашиваться специалистами по дистанционному мониторингу. Конкретный вариант определяется тем, как меняются потребности компании Qatar Petroleum.

Все это означало переключение почти семи тысяч информационных меток с существующей операторской интерфейсной системы на новые консоли Operate$^{IT}$, а также разработку четырехсот трехмерных технологических графиков для замены ранее существовавших двумерных.

Остановив свой выбор на платформе Industrial$^{IT}$, которая позволяет разрабатывать стратегии действительной оптимизации основных средств, Qatar Petroleum лишний раз подтвердила свое стремление поддерживать производство на самом высоком мировом уровне. Франк Дугган, глава департамента АББ, работающего с предприятиями нефтехимической отрасли и с их потребителями, отметил: «Платформа Operate$^{IT}$ даст QP возможность воспользоваться всеми преимуществами

[1] К продуктам серии Operate$^{IT}$ относятся такие продукты, которые позволяют быстро и в реальном масштабе времени использовать по всему предприятию данные, формируемые каждым контрольным и информационным устройством любого оборудования.

Industrial$^{IT}$, в том числе не имеющей себе равных технологией полевых шин – то есть технологией реальной оптимизации основных средств.»

Только после того, как компания АББ завершила все проектные, технические и программные разработки, в течение трехнедельной остановки производства на профилактику были заменены модули связи.

В следующих выпусках АББ Ревю мы более подробно расскажем о дистанционном доступе к оборудованию.

## Темпы электрификации

На несколько месяцев раньше срока компания АББ завершила в Бразилии строительство линии электропередачи протяженностью 943 км, тем самым создав межсистемную связь, которая объединяет северную и северо-восточную части страны в общенациональную энергосистему.

В рамках проекта развития бразильской системы линий электропередачи со сметной стоимостью 227 млн. долларов компании EATE (Empresa Amazonense de Transmissao de Energia) совместно с консорциумом, в состав которого входила компания АББ, удалось связать регион Амазонки – область с огромным гидроэлектрическим потенциалом – с энергосистемой, которая снабжает электроэнергией остальную часть страны. Новая система, которая была полностью введена в эксплуатацию в марте 2003 года, позволяет использовать произведенную в регионе Амазонки энергию тем жителям Бразилии, которые проживают у границ с Аргентиной и Уругваем.

Линия объединяет в одно целое существующие подстанции в городах Тукуруи и Мараба (оба в штате Пара) с подстанциями в городах Acailandia, Президенти-Дутра и Императрис (в штате Маранья).

Контракт на строительство системы электропередачи компания АББ получила в июне 2001 года, а в марте 2003 года уже был закончен последний участок. По словам Марчело Тосто, директора EATE, исходным сроком сдачи системы в эксплуатацию по контракту была середина апреля 2003 года. Фактически первый участок был сдан в конце января 2003 года, на два с половиной месяца раньше срока! М. Тосто добавил, что «составляющий 21 месяц плановый период уже можно было считать рекордным».

Одним из важнейших обстоятельств, которые помогли выполнить контракт досрочно, было то, что 943-километровая линия передачи (между Тукуруи и Президенти-Дутра) была сооружена всего лишь за 12 месяцев! По словам Геральдо Виерра из компании АББ, «то, что было построено и смонтировано за 12 месяцев, должно было бы занять от 24 до 30 месяцев». Для достижения такого результата бригады должны были работать с неимоверной скоростью: в среднем за сутки количество построенных фундаментов опор составляло 7,73, количество установленных опор составляло 9,30, а протяженность проложенных кабелей составляла 6,10 км. Понятно, что необходима была и тщательно продуманная сеть поддержки, способная ежедневно обеспечивать бригады всеми необходимыми материалами. Поэтому бригады поддержки располагались через каждые 100 км трассы.

## Проблема качества

Одной из самых больших проблем, с которой столкнулась компания АББ при строительстве линии электропередачи, была проблема обеспечения качества энергии. В ходе строительства компания АББ использовала гибкие системы передачи переменного тока FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), то есть то техническое решение, которое обеспечивает как надежность, так и устойчивость. Для улучшения контроля напряжения и увеличения динамической устойчивости линии на 500 кВ в нее были добавлены четыре последовательные компенсационные батареи, а технология FACTS позволила уменьшить передаточное реактивное сопротивление протяженной линии электропередачи.

Без этих новшеств для передачи такого же количества энергии потребовались бы дополнительные линии. Кроме того, для подержания системы в удовлетворительном состоянии во всем диапазоне передаваемой мощности по всей линии была введена компенсация шунтирующими реакторами.

## Две линии

943-километровая линия электропередачи между Тукуруи и Президенти-Дутра была построена одновременно с другой системой. В июне 2001 года компании АББ было также поручено строительство 324-километровой линии между Тукуруи и Вила-до-Конде, которое и было завершено спустя примерно 14 месяцев – в августе 2002 года.

Хотя вторая линия электропередачи была значительно короче, географические проблемы и физические особенности маршрута чрезвычайно затруднили ее строительство. На одном из этапов для доставки оборудования на рабочие площадки пришлось даже использовать упряжки волов. В среднем за сутки количество построенных фундаментов опор составляло 4,23, количество установленных опор составляло 4,36, а протяженность проложенных кабелей составляла 6,10 км. В настоящее время новая линия делает более надежным снабжение электроэнергией г. Белен, столицы штата Пара, которая до этого обслуживалась лишь одной сетью.

Обе построенные линии (на 1200 МВт каждая) вносят значительный вклад в дело развития бразильской системы электроэнергетики.

# Index 2003

| Номер 1 | Стр. |
|---|---|
| CRP Azipod® увеличивает КПД морской силовой установки | 6 |
| Управление технологическими процессами с «переднего фронта» с помощью OperateIT Pocket Portal™ | 12 |
| Маленький да удаленький – новый сухой конденсатор для использования в высоковольтных установках постоянного тока | 15 |
| Новая серия погружных распределительных трансформаторов с твердой изоляцией | 21 |
| GridView: Моделирование ситуации на рынке электроэнергии для оптимизации использования основных средств | 26 |
| IPv6 - новый протокол для сети Internet | 30 |
| DesignIT – программа для создания различных конфигураций систем передачи электроэнергии | 36 |

| Номер 2 | Стр. |
|---|---|
| Система телеметрии GlobalRemote, совместимая с технологией IndustrialIT | 6 |
| Точная синхронизация времени для задач автоматизации | 9 |
| Снабжение электроэнергией газодобывающей платформы Troll по новой технологии | 15 |
| Работающая скважина. Методы анализа надежности умных скважин | 20 |
| Уменьшение «палубных» габаритов. Существенные сокращения капиталовложений возможны в течение пяти лет | 23 |
| RADAR™. Усовершенствованная инспекция стволовой трубы | 26 |
| Глубоководная технология NuDeep™ для подводных работ | 30 |
| Новые технологии производства этилена | 36 |
| Быстрое переключение позволяет не останавливать производство | 38 |
| Статический компенсатор реактивной мощности производства компании АББ стабилизирует напряжение в энергосистеме Намибии | 43 |
| Нанотехнология - от малых размеров к большим возможностям | 49 |

| Номер 3 | Стр. |
|---|---|
| Уверенность в топливе. Применение технологии AnalyzeIT для определения низких концентраций серы в топливе | 6 |
| Соединение. Решение для повышения эффективности эксплуатации терминалов | 11 |
| Точная смесь. Технология IndustrialIT позволяет оптимизировать смешение бензинов на нефтеперерабатывающем заводе Preem | 15 |
| Победа над простоями | 21 |
| Синтетическая испытательная схема для проверки расчетных характеристик высоковольтных тиристорных вентилей | 25 |
| Модельно-прогнозируемое управление пуском первого котла (BoilerMax) | 30 |
| IEC 61850 и IndustrialIT: полная согласованность | 37 |

| Номер 4 | Стр. |
|---|---|
| 50-летие HVDC | 6 |
| Магистрали HVDC в Китае | 14 |
| Передовое управление FACTS | 21 |
| Силовые полупроводниковые приборы – в центре тихой революции | 27 |
| Вся энергосистема как на ладони: платформа InformIT Wide Area Monitoring PSG 850 | 32 |
| Управление использованием энергии на промышленных предприятиях в реальном времени с помощью IndustrialIT | 37 |
| Средство EngineerIT Documentation Assistant – помощник в работе со сложной документацией | 43 |

Любознательность была движущей силой на протяжении всей истории человечества и до сих пор остается его характерным признаком. Развитие технологий с течением веков – это одно из проявлений пытливого человеческого разума.

В нашем следующем выпуске мы начинаем цикл статей, посвященных тому, как изобретательность проявляется за пределами исследовательских лабораторий и центров делового развития. В статьях, выходящих под заголовком «Инновации в технике», будет уделено особое внимание творчеству наших инженеров по адаптации гаммы изделий АББ для решения проблем клиентов – не более чем обычная практика для наших инженерных подразделений по всему миру.

Мир Технологий АББ представлен сообщениями о нашем новом ряде средств автоматизации и микроприводах, а также значительных технологических прорывах в аккумулировании энергии. Другие статьи расскажут о достижениях в области создания высоковольтных вакуумных выключателей и обнаружения отказов на высоковольтных ЛЭП, полученных благодаря неустанному труду наших исследователей.

Мы уверены, такой калейдоскоп статей вызовет интерес наших читателей. Прогресс будет двигаться вперед до тех пор, пока человек сохраняет свое стремление к переменам и нахождению новых решений.

ABB Review The corporate technical journal of the ABB Group

Editorial board
Markus Bayegan
Group R&D and Technology
Björn Edlund
Corporate Communications
Friedrich Pinnekamp
Group R&D and Technology
Wylie Rogers
Corporate Communications
Charlotte Brogren
Group R&D
Nils Leffler
Chief Editor
nils.leffler@ch.abb.com

The ABB Review is published four times a year in English, French, German, Spanish, Chinese and Russian.

Publisher and copyright © 2003
ABB Ltd
Zurich/Switzerland

Publisher's office
ABB Schweiz AG
Corporate Research
ABB Review / RD.REV
CH-5405 Baden-Dättwil
abbreview@ch.abb.com

The ABB Review is free of charge to those with an interest in ABB's technology and objectives or those in management positions who need to be kept informed of the latest technology advances.
For a free subscription please contact your nearest ABB representative or the publisher's office.

Printers
Vorarlberger Verlagsanstalt AG
AT-6850 Dornbirn/Austria

Design
DAVILLA Werbeagentur GmbH
AT-6900 Bregenz/Austria

Partial reprints or reproductions are permitted subject to full acknowledgement.
Complete reprints require the publisher's written consent.

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview