

# СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 1 выпуск 2  
Ноябрь 2004

Исследовательские центры  
Провода Кабели  
Трансформаторы

Фирмы  
Генераторы  
Токоограничители

Инвесторы  
Накопители

## ВТСП МАТЕРИАЛЫ

*Почему необходимы ВТСП 2-го поколения? .....* 2

## НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ РОССИИ

*РНЦ "Курчатовский институт" .....* 2

Руководство и ведущие специалисты

Исследовательское оборудование

Международное сотрудничество

Исследования и разработки по применению сверхпроводников

## ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

*American Superconductor Corp. ....* 5

ВТСП провода и кабели

Планируемое снижение стоимости ВТСП проводов

*AMSC* для систем передачи электроэнергии

Основные свойства систем *D-SMES* и *D-VAR*

Сегодняшний рынок сетевых изделий корпорации *AMSC*

Другие ВТСП разработки *AMSC*

Двигатели, генераторы, магниты

Партнеры *AMSC* по бизнесу

## ВТСП УСТРОЙСТВА

*Эффективность ВТСП электрических генераторов .....* 9

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

*Европейский проект развития 2G .....* 10

*7 университетов США в разработке 2G проводников.....* 10

## ВТСП МАТЕРИАЛЫ

### Почему необходимы ВТСП 2-го поколения?

С появлением коммерческих ВТСП (*BSCCO-2223*) лент 1-го поколения разработки электротехнического оборудования на рабочие температуры выше 30 К резко активизировались – созданы прототипы генераторов, токоограничителей, трансформаторов, введены в действие локальные линии электропередач небольшой протяженности. Совсем недавно в коммерческую продажу предложены динамические синхронные компенсаторы, используемые для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Однако изучение изготовленных прототипов ряда устройств выявило и некоторые недостатки проводников 1-го поколения на основе ВТСП *Bi*-системы.

Наглядное сравнение поведения коммерческих и исследуемых сверхпроводников представлено на рис. 1, на котором показана фазовая диаграмма «магнитное поле (*H*)-температура (*T*)» для 3-х коммерческих материалов *NbTi*, *Nb<sub>3</sub>Sn*, *(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>* (*BSCCO-2223*) и 2-х находящихся в разработке - *YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>* (*YBCO*) и *MgB<sub>2</sub>*.

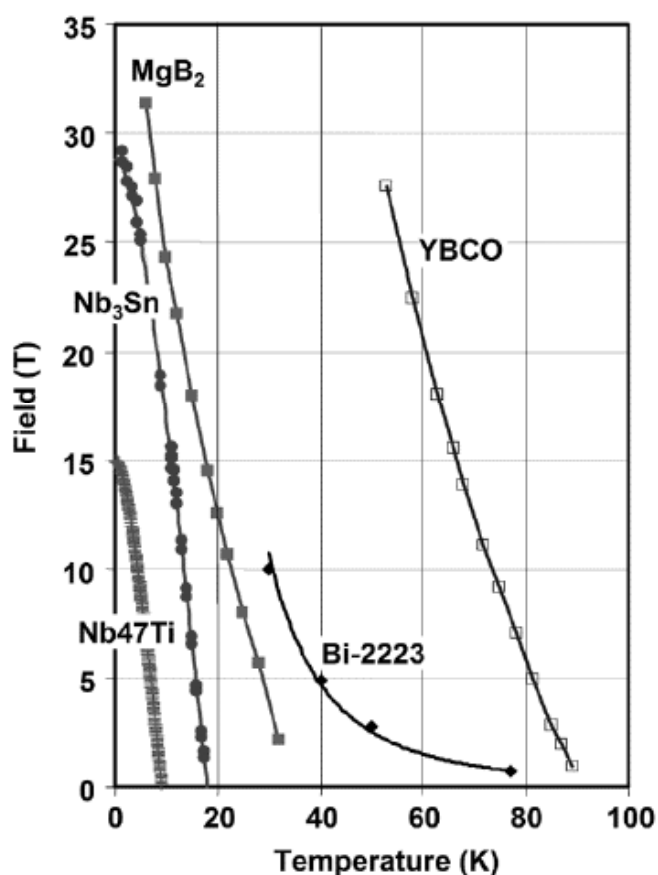


Рис. 1. Верхнее критическое поле ( $H_{c2}$ ) для *Nb(47в.%)Ti*, *Nb<sub>3</sub>Sn* и *MgB<sub>2</sub>* и поле необратимости (irreversibility) ( $H^*$ ) для *Bi-2223* и *YBCO*. Отметим, что поля очень близки для *NbTi*, *Nb<sub>3</sub>Sn* и *MgB<sub>2</sub>* ( $H^*$  составляет 85%–90% of  $H_{c2}$ ), а для всех купратных ВТСП сильно различаются.

Для всех сверхпроводников II рода объемная сверхпроводимость существует до верхнего критического поля, которое для *BSCCO-2223* и *YBCO* может превосходить 100 Тл при сильной анизотропии (т.е. зависит от направления поля по отношению к кристаллографическим плоскостям). Однако применение ВТСП материалов ограничено нижним критическим полем (т.н. полем необратимости), при котором сверхпроводник переходит в резистивное состояние при больших токах.

*Proc. IEEE 2004, 92, no 10, p.1639.*

## НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ РОССИИ

### Российский научный центр «Курчатовский институт»

#### Руководство РНЦ «Курчатовский институт»

Велихов Евгений Павлович

академик РАН, президент

Пономарев-Степной Николай Николаевич

академик РАН, вице-президент

Поляков Илья Николаевич - директор

#### Ведущие специалисты ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Знаменский Николай Владимирович

д.ф.-м.н., директор

Черноплеков Николай Алексеевич

чл.-корр. РАН, научный руководитель

тел. (095) 196-9223, факс 196-5973

e-mail: [chernopl@issph.kiae.ru](mailto:chernopl@issph.kiae.ru)

Круглов Виталий Сергеевич

к.т.н., заместитель директора

(095) 196-7717, [kruglov@issph.kiae.ru](mailto:kruglov@issph.kiae.ru)

Кейлин Виктор Ефимович

д.т.н., профессор, заместитель директора

(095) 196-9911, [kev@issph.kiae.ru](mailto:kev@issph.kiae.ru)

Клименко Евгений Юрьевич

д.ф.-м.н., профессор, начальник лаборатории (095)

196-9631, [klimenko@issph.kiae.ru](mailto:klimenko@issph.kiae.ru)

Красноперов Евгений Павлович

д.ф.-м.н., начальник лаборатории

(095) 196-7109, [kep@issph.kiae.ru](mailto:kep@issph.kiae.ru)

Сурин Михаил Израелевич

к.т.н., начальник лаборатории

(095) 196-9735, [sur@issph.kiae.ru](mailto:sur@issph.kiae.ru)

РНЦ “Курчатовский институт” (ранее - Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова) был создан в 1943 году для решения научных проблем советского атомного проекта. В настоящее время он является одним из крупнейших научных центров России как по численности, так и по широте научных интересов и экспериментальных возможностей не только в атомной науке и технике, но и в различных областях физики. В РНЦ “Курчатовский институт” входит 13 специализированных институтов и 4 научно-технических комплекса.

Работы по прикладной сверхпроводимости ведутся в

РНИЦ “Курчатовский институт” с 1961 года в тесной кооперации с другими отечественными организациями, прежде всего с ВНИИНМ им. А.А.Бочвара и НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Основное (но не единственное) направление работ - решение научно-технических проблем, связанных с созданием сверхпроводящих магнитов различного назначения. Из результатов этих работ в качестве примера можно указать на первый в мире токамак Т-7 со сверхпроводящей обмоткой основного тороидального поля (конец 70-х гг.) и крупнейший в мире токамак Т-15 с тороидальными обмотками на основе ниобий-оловянных проводов (конец 80-х годов). За работы по прикладной сверхпроводимости сотрудникам института дважды присуждались Государственные премии СССР. Работы по прикладной сверхпроводимости возглавляет член-корр. РАН Николай Алексеевич Черноплеков, научный руководитель Института сверхпроводимости и физики твердого тела (ИСФТТ). Кроме ИСФТТ, где сосредоточен основной объем работ по прикладной сверхпроводимости, работы по этой тематике проводятся также в Институте ядерного синтеза (ИЯС, директор, академик РАН В.П.Смирнов), главным образом, в связи с установкой токамак Т-15 и широким спектром криогенных проблем, а также в Институте молекулярной физики (ИМФ, директор, член-корр. РАН В.Ю.Баранов), где ведутся работы по изучению магнитных полей мозга человека с использованием сквид-магнитометров.

#### Исследовательское оборудование

РНИЦ “Курчатовский институт” располагает широкими возможностями для проведения исследований и разработок по прикладной сверхпроводимости. В институте имеется следующее уникальное технологическое и диагностическое оборудование:

- установки большой производительности для получения жидких гелия и азота (ИЯС, ИСФТТ);
- магниты для генерации стационарных магнитных полей (ИСФТТ):
  - водоохлаждаемые - до 19Тл в отверстиях диаметром 32мм;
  - сверхпроводящие - до 16Тл в отверстиях диаметром 40-45мм;
  - сверхпроводящие магниты с поперечным полем до 11Тл (ИСФТТ);
  - сверхпроводящие магниты в стандартной конфигурации УИС-1 (в экономичном криостате с отстыковывающимися тоководами) с индукцией до 13Тл в отверстиях 40-45мм (ИСФТТ);
- гибридный (сверхпроводящий + водоохлаждаемый) магнит КС-250 с индукцией до 25Тл. В настоящее время идет его модернизация с целью повышения индукции до 30Тл (ИСФТТ);
- стабилизированные источники питания для магнитов, в том числе мощный тиристорный выпрямитель (до 20кА и 300В) для питания водоохлаждаемых магнитов (ИСФТТ);
- системы защиты сверхпроводящих магнитов при их переходе в нормальное состояние (ИСФТТ и ИЯС);

- ·стенды для испытания и исследования сверхпроводящих магнитов, оснащенные криостатами, тоководами до 10кА, а также современной диагностикой (ИСФТТ);
- ·стенды для проведения испытаний сверхпроводящих магнитов с характерным размером до 4,5м (ИСФТТ);
- ·оборудование для изготовления сверхпроводящих магнитов - намоточные и изолировочные станки и печи для термообработки и компаундирования (ИСФТТ);
- ·оборудование для исследования и паспортизации электрофизических свойств сверхпроводников в широком интервале температур, магнитных полей и транспортных токов (комплекс “Аттестат”); оборудование для измерения механических свойств сверхпроводников при низких температурах и в магнитных полях, потерь в сверхпроводниках в переменных магнитных полях, а также высокочувствительные магнитометры для измерения магнитной восприимчивости (ИСФТТ);
- ·комплекс современных программ для расчета и проектирования сверхпроводящих магнитов (ИСФТТ).

В ИСФТТ ведутся работы по исследованию электродинамики реальных сверхпроводящих материалов, улучшению характеристик НТСП и ВТСП магнитов, совершенствованию вспомогательных систем (криогенное оборудование), разработке тоководов, токоограничителей, макетов линий электропередач, в т.ч. на основе ВТСП, а также разрабатываются и изготавливаются сверхпроводящие магниты различного назначения.

В настоящее время активность Курчатовского института в области сверхпроводимости можно условно разделить на:

- 1) участие в конструировании, изготовлении и испытании сверхпроводящих устройств (в основном, по зарубежным заказам);
- 2) исследования и разработки по использованию сверхпроводников (как НТСП, так и ВТСП) в электроэнергетике и специальной технике;
- 3) исследования и разработки по криогенной технике широкого диапазона температур.

#### Международное сотрудничество

В середине 90-х годов Курчатовский институт разработал, изготовил и поставил сверхпроводящий индуктивный накопитель электроэнергии (СПИН, в английской транскрипции – *SMES*) для Республики Кореи. Накопитель был укомплектован *DC-AC-DC* преобразователем, что позволяло обмениваться энергией между двумя 0,5 МДж катушками за 2 с. Скорость передачи энергии соответствовала 2 Тл/с.

С 1995 года функционирует в Калифорнийском университете в непрерывном режиме другое устройство, разработанное и изготовленное в Курчатовском институте - 4 Тл сверхпроводящий магнит с теплым (комнатнотемпературным) объемом диаметром 250 мм. Магнит используется для проведения исследований по плазме (рис.2).





Рис. 2. Курчатовский сверхпроводящий магнит в Калифорнийском университете в Беркли

В конце 90-х годов курчатовцы разработали, поставили и установили 6 Тл сверхпроводящий вигглер на Китайском источнике синхротронного излучения (рис. 3).

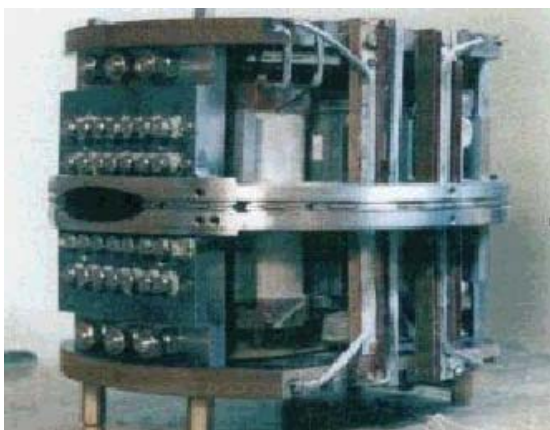


Рис. 3. Сверхпроводящий 6 Тл магнит для вигглера

Однако, основная часть международного сотрудничества курчатовцев все же связана с тремя сверхпроводящими токамаками (установками термоядерного синтеза, использующими принцип магнитного удержания плазмы), которые в настоящее время разрабатываются и конструируются в странах Азии – Индии (*SST-1*), Китае (*HT-7U*) и Республике Корея (*KSTAR*). Во всех этих конструкциях кабель с внутренним каналом для охлаждения используется не только для тороидальной обмотки, но также и для полоидальной, а также в одной из конструкций (*KSTAR*) и для центрального соленоида. Например, построена и проходит испытания модельная катушка для *SST-1*, в которой этот кабель используется и для тороидальной, и для полоидальной обмоток (рис. 4).

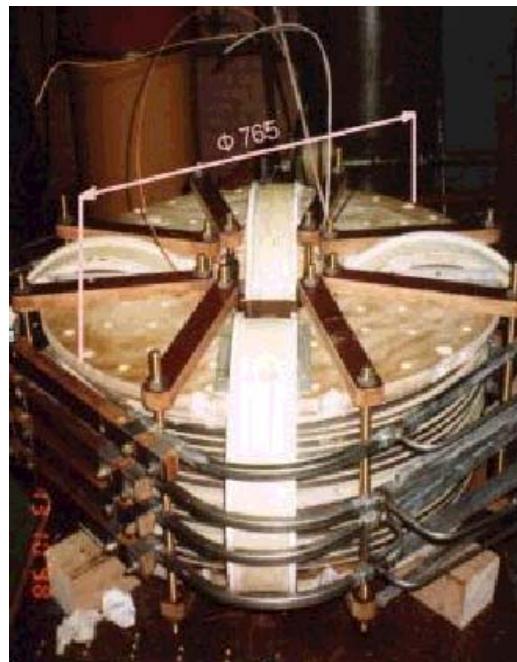


Рис. 4. Модельная катушка для индийского токамака *SST*

Интерес представляет также проект производства стабильных изотопов (*MCIRI*) методом ионного циклотронного резонанса (*ICR*). Устройство сейчас разрабатывается в Курчатовском центре (Институт молекулярной физики) – стабильные изотопы используются в медицине (*Tl-203*, *Pd-102*), физических исследованиях (*Nd-150*) и ядерных реакторах (*Gd-157*). ИСФТТ РНЦ участвует в этом проекте, проектируя большой с однородным полем сверхпроводящий магнит (3-4 Тл, при теплом объеме диаметром 1 м и длиной 7 м). Этот магнит уникальной конструкции показан на рис. 5.

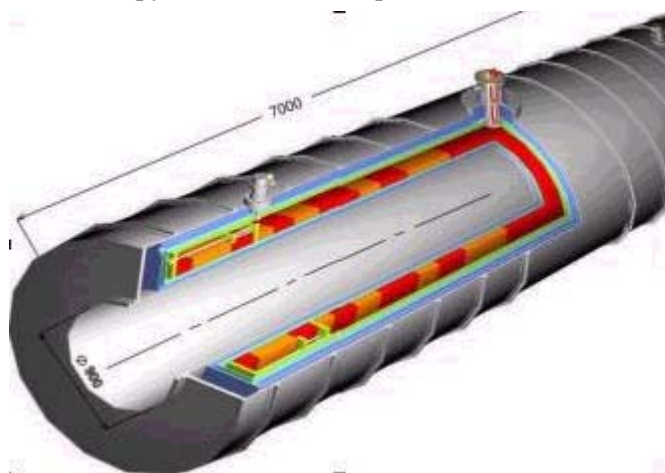


Рис. 5. Магнит для установки по производству стабильных изотопов.

### Исследования и разработки по применению сверхпроводников

Естественно, что после открытия ВТСП курчатовская группа в тесном контакте с ВНИИНМ приступила к исследованиям и разработкам ВТСП приборов и устройств для всевозможных применений.

Конечно, плотность критического тока в ВТСП проводниках при температуре жидкого азота на сегодняшний день почти на порядок величины ниже, чем у  $NbTi$  и  $Nb_3Sn$ . Несмотря на это в ряде устройств сегодняшние ВТСП проводники достаточно эффективны. К таким применениям можно отнести детально исследованные в ИСФТТ ВТСП токовводы для сверхпроводящих магнитов и электрические устройства, используемые для намагничивания железных магнитопроводов.

В ИСФТТ разработана, изготовлена и испытана небольшая ВТСП модель (см. рис. 6) ограничителя аварийных токов с насыщенным магнитопроводом, которая подтвердила реализуемость разработанного в институте подхода.



Рис. 6. Модель ВТСП ограничителя тока

В планах ИСФТТ – построить и испытать (в сотрудничестве с ВНИИНМ и ВНИИКП) модель ВТСП линии электропередач.

ВТСП исследования и разработки в ИСФТТ финансируются Министерством науки и образования РФ и Агентством по атомной энергии (в ограниченном объеме).

<http://www.kiae.ru>

### ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

#### *American Superconductor Corporation (AMSC)*

<http://www.amsuper.com/>

AMSC является мировым лидером в разработке и производстве изделий, использующих сверхпроводящие провода для энергосистем. Корпорация основана в 1987 году, центральный офис расположен в Westborough (штат Массачусетс).

Разработки корпорации сосредоточены на ВТСП материалах, провода из которых могут проводить в 140

раз большие токи в сравнении с медными проводами тех же размеров.

Сегодняшние распределительные электросети в США не могут обеспечить возросшие требования к объему и качеству передаваемой мощности. В ближайшие 10 лет в энергосистему США будет инвестировано около 56 млрд. долл. для модификации национальных сетей в соответствии с новыми требованиями растущей экономики.

В настоящее время электрические компании сталкиваются с проблемами, связанными с возрастанием нагрузки, появлением конкуренции на рынке электроэнергии и настойчивыми требованиями клиентов повысить качество электроэнергии и надежность работы сетей. Усилия, предпринимаемые для децентрализации передачи и распределения электроэнергии, а также возросшие требования к ее качеству заставляют электрические компании быстро реагировать на изменения условий на рынке и предлагать своим клиентам новые технические решения.

American Superconductor включилась в программы модернизации национальных сетей США с разработками и производством ВТСП проводников и изделий на их основе, которые призваны обеспечить возрастание передаваемых мощностей при сохранении надежности и качества сетей. Уже сегодня ВТСП провода и мощные преобразователи энергии, предоставляемые AMSC, используются в ряде инновационных сетевых решений.

#### ВТСП провода и кабели

AMSC организовала первое в мире крупномасштабное коммерческое производство ВТСП проводов на своем заводе, расположенном в г. Devens (шт. Массачусетс). Современное оборудование завода способно производить ВТСП провода в объеме, удовлетворяющем растущие запросы промышленности. Большие производственные мощности дают возможность AMSC выполнять заказы клиентов быстро и с низкими затратами.

Токонесущая способность проводов первого поколения (1G – Bi-2223) производства AMSC, имеющих архитектуру многожильных композитов (MFC – *multi-filamentary composite*), более чем в 140 раз выше, чем у медных проводов такого же сечения. Конструкция проводов с архитектурой многожильных композитов запатентована Г.Юреком и Дж. Вандером (G.Yurek и J.Vander) от имени MIT (Массачусетского технологического института), а AMSC приобрела исключительные права на ее использование вплоть до 2011 г.

В производстве AMSC – широкий ассортимент ВТСП проводов, оптимизированных для использования в различных технических устройствах:

HTS Compression Tolerant Wire – противостоит сжимающим напряжениям;

HTS High Current Density Wire – ВТСП провод с наивысшей токонесущей способностью;

HTS High Strength Wire – имеет самую высокую на сегодня механическую прочность;

HTS Hermetic Wire – специально разработан для обеспечения долговечности при эксплуатации в условиях воздействия жидких криогенных сред;



HTS CryoBlock™ Wire – проводник, в котором применена специальная матрица, ограничивающая теплоперенос вдоль температурного градиента (проводник такого типа используется в тоководах CryoSaverB™).

С 1995г. AMSC проводит интенсивные научные исследования и конструкторские разработки ВТСП проводов второго поколения (2G) на основе иттрий-бариевого купрата (Y-123), так называемые покрытые композитные проводники (CCC - coated conductor composite). Конструкция разрабатываемого 2G ВТСП провода будет пригодной для замены уже через 3-4 года (время создания их производства в коммерческом масштабе) всех функций, выполняемых сегодня 1G ВТСП проводами и не потребует никаких инженерных доработок устройств, но приведет к улучшению их параметров. AMSC ожидает, что запатентованная ею технология 2G проводов позволит снизить их стоимость в 2-5 раз по сравнению с сегодняшними 1G проводами. Вместе с тем 1G провода останутся «рабочей лошадкой» еще в течение следующих 3-4 лет.

В свое время Министерство энергетики США (DOE) установило уровни технических характеристик 2G проводов и сроки их достижения: достичь к декабрю 2003 г токнесущую способность на ВТСП проводе длиной 1м - более 100 Ампер на сантиметр ширины провода, а при длине 10 метров – более 50 Ампер на сантиметр ширины провода. Как видно из рис. 7, AMSC уже в октябре 2002г. (за 15 месяцев работы) достигла и превзошла заданные параметры. Совместные испытания Окриджской национальной лабораторией и AMSC подтвердили возможность последней воспроизводимо получать 10 м провода с токнесущей способностью 100 Ампер на сантиметр ширины провода.

Динамика улучшения характеристик 2G ВТСП проводов (при однородности характеристик по длине провода и воспроизводимости параметров от процесса к процессу) исключительно высока (измерения при 77 К):

- февраль 2004 г. – 10 м, 250-270А на см ширины провода;
- июнь 2004 г. – короткий образец, 330 А на см ширины провода;
- июль 2004 г. – 34 м, 186 А на см ширины провода.

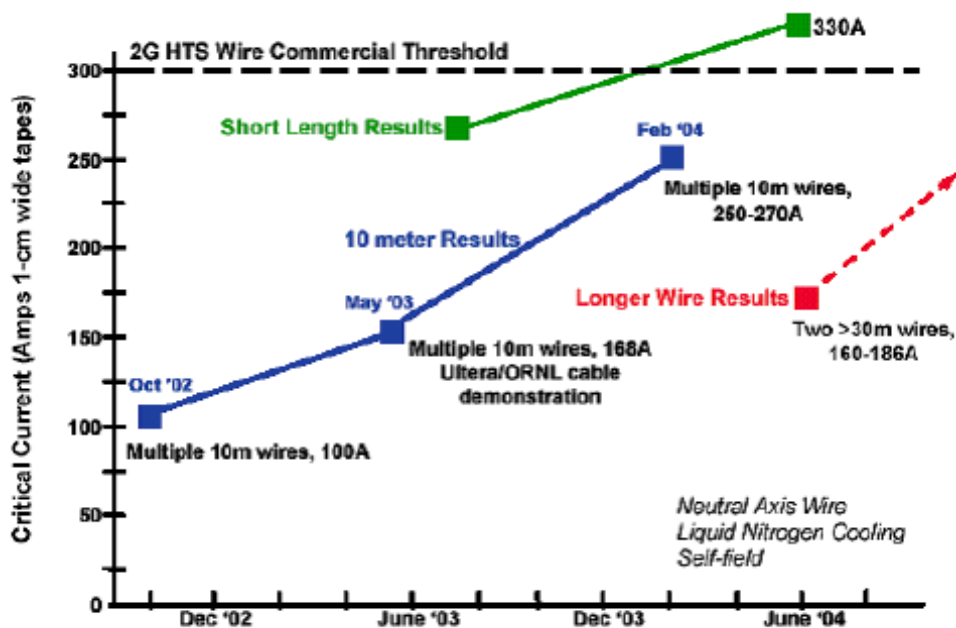


Рис. 7. Динамика улучшения параметров 2G ВТСП проводов в корпорации AMSC

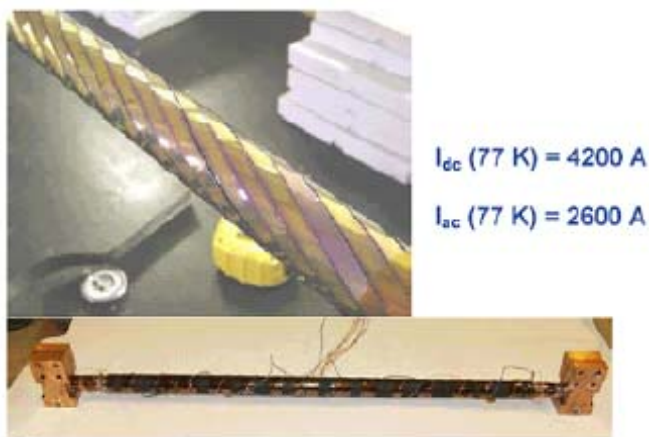


Рис. 8. Кабель длиной 1,25 м, изготовленный корпорацией Ultera из 2G ВТСП проводов, поставленных AMSC

## Планируемое снижение стоимости ВТСП проводов

Для производства ВТСП проводов второго поколения *AMSC*, как, впрочем, и другие компании, работающие в этом направлении, используют несколько модификаций двух основных технологий нанесения тонкопленочных слоев (и/или подслоев), называемых *IBAD* (Ion Beam Assisted Deposition – ионно-лучевое осаждение) и *RABiTS* (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate – прокатка на биаксиально текстурированной подложке).

*IBAD* технология разработана японской фирмой Fujikura и затем существенно усовершенствована сотрудниками Los Alamos National Laboratory, а вторая разработана в Oak Ridge National Laboratory (в которой ей и была присвоена торговая марка *RABiTS*). Особенности этих технологий описаны в первом выпуске этого бюллетеня. Отметим, что *AMSC* развивает высокопроизводительный и недорогой вариант технологии, использующий для осаждения на текстурированную металлическую подложку жидкие металлоорганические соединения. Этот процесс разработан учеными *MIT* и эксклюзивно лицензирован фирмой *AMSC*.

В конце мая с.г. *AMSC* объявила о создании многожильного провода, состоящего из 30 2G проводов длиной 1,5 м по заказу совместной американско-датской фирмы Ultera (рис.8).

### *AMSC* для систем передачи электроэнергии

*AMSC* предлагает серию изделий, предназначенных для увеличения надежности и безопасности электрических сетей. Центральными элементами ее систем динамической стабилизации реактивной мощности в сетях являются силовой модуль *AMSC* PowerModule™ 250 (*PM250*), новые силовые электронные преобразователи - системы *D-VAR*® и *D-SMES* и синхронные компенсаторы *SuperVAR*™. Каждое из этих устройств способно поднимать уровень активной и/или реактивной мощности в сети, чтобы в течение нескольких миллисекунд увеличить напряжение в сети (упавшее ниже номинального вследствие аварии или перегрузки).

### Основные свойства систем *D-SMES* и *D-VAR*

Устройства динамической компенсации реактивной мощности *AMSC* способны:

- устранять частичное снижение напряжения в сети или полное его падение, препятствующие повышению пропускной способности электрической сети (повышение на 10-50%);
- обеспечивать генерацию как активной, так и реактивной мощности, чтобы в течение нескольких миллисекунд уменьшить негативное воздействие от нестабильности величины напряжения в сети;
- устранять необходимость строительства новых линий электропередачи, до тех пор, пока не достигнуты пределы термической нагрузки на действующую линию.

Системы *D-SMES* и *D-VAR* являются мобильными, они могут быть размещены именно там, где наиболее требуется снижение нестабильности напряжения в электрической сети.

## Синхронные компенсаторы *SuperVAR*

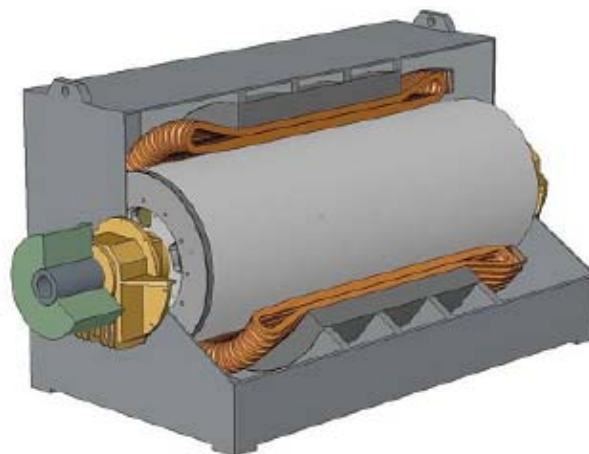


Рис. 9.

Динамический синхронный компенсатор *SuperVAR* (рис. 9) является новейшим изделием, стабилизирующим напряжение в сети, повышающим надежность ее эксплуатации и способствующим увеличению ее пропускной способности. Компания *AMSC* поставила первый динамический синхронный компенсатор *SuperVAR* электрической компании Tennessee Valley Authority в ноябре 2003г. В настоящее время он успешно работает в одной из электрических сетей штата Огайо, став тем самым важным этапом внедрения ВТСП технологий для коммерческого использования в системах передачи электроэнергии.

Синхронные компенсаторы *SuperVAR* - электрические машины (синхронные двигатели, работающие без нагрузки на вал, то есть на холостом ходу), в конструкции которых *AMSC* использует магнитные системы из ВТСП элементов. Эти машины работают как «амортизаторы» реактивной мощности в электрических сетях, генерируя или потребляя реактивную мощность в динамическом режиме, в зависимости от величины напряжения в электрической сети.

**Системы *D-SMES*** (Distributed Superconductor Magnetic Energy Storage - распределенные сверхпроводящие магнитные системы накопления энергии) обеспечивают кратковременную величину активной мощности до 3 МВт, получаемую от сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии (СПИН) и до 8 МВА реактивной мощности от силовых преобразователей PowerModule. Одна из первых разработок системы *D-SMES* была выполнена в 2000г. и работает в электрической сети напряжением 115 кВ электрической компании Wisconsin Public Service в северной части шт. Висконсин.

### Сегодняшний рынок сетевых изделий корпорации *AMSC*

Проникновение на рынок изделий *AMSC*, предназначенных для динамической компенсации реактивной мощности, осуществляется компанией *GE* Industrial Systems. В соответствии с достигнутым соглашением, компания *GE* имеет исключительное право продажи серий изделий *D-SMES* и *D-VAR* электрическим компаниям США и некоторым производственным отделением *GE* в других странах.

Систему *D-SMES* установила у себя в течение лета 2000 г. электрическая компания Wisconsin Public Service Corp. (*WPS*). Эффективное сочетание динамической системы регулирования реактивной мощности и системы регулирования активной мощности с помощью установленных в ее сети ВТСП устройств позволило компании *WPS* решить проблему нестабильности напряжения сети и увеличить пропускную способность сети на 15%.

Система передачи электроэнергии *WPS Northern Loop* имеет протяженность 320 км (от города Уосо (Wausau) до города Райнлэндер (Rhinelander) в штате Висконсин), напряжение 115 кВ. В этом регионе расположены бумажные фабрики, потребляющие значительную часть пиковой мощности системы, составляющей приблизительно 200 МВт. В летние месяцы, когда происходит наплыв туристов в живописные леса штата, электродвигатели систем кондиционирования воздуха в коттеджах для размещения туристов создают дополнительную нагрузку на систему.

Для решения проблемы неустойчивости компания установила, в частности, предлагаемую компанией *AMSC* систему *D-SMES*. Из всех рассмотренных вариантов она оказалась наиболее дешевой и имеющей самый короткий срок ввода в эксплуатацию. Так как система *D-SMES* сделана мобильной и может быть передислоцирована, то для *WPS* выбор системы *D-SMES* стал очевидным. Все передвижные контейнеры с *D-SMES*'ами для *WPS* прошли тщательную заводскую проверку перед отправкой потребителю, а полное время размещения каждого из контейнеров составило лишь двое суток.

Одно из первых значительных коротких замыканий в сети *WPS Northern Loop* после установки системы *D-SMES* произошло 1 сентября 2000 г. на одной из подстанций - трехфазное короткое замыкание снизило напряжение до 0,5 от номинального на одну установку. Менее чем через 0,5 сек после возмущения сеть стала работать с номинальным напряжением - в данной ситуации, одно единственное устройство *D-SMES* легко устранило последствия КЗ.

В другой ситуации - 2 ноября 2000 г. - в результате удара молнии между двумя подстанциями сети напряжение упало до 0,2 от номинального значения. Запуск всех стабилизирующих устройств произошел автоматически с независимым откликом каждого из них на локальные изменения напряжения, и через 0,5 сек напряжение во всей сети было восстановлено до номинального. Если бы в сети не было системы *D-SMES*, то подобная авария могла бы вызвать массовые перебои в электроснабжении на значительной территории.

#### **Другие ВТСП разработки AMSC - двигатели и генераторы**

Подразделение *AMSC - SuperMachines™ Business Unit* - занимается разработкой и изготовлением ВТСП электрических машин и устройств.

Основные направления работ подразделения.

**Промышленные моторы** (рис. 10) - с высокой производительностью и низкой стоимостью технического обслуживания. *AMSC* разрабатывает ВТСП промышленный мотор на 5000 л.с. По оценкам, ежегодный рынок промышленных моторов составляет 1,2 млрд. долл. Ниша ВТСП моторов в этом рынке - применения, в которых вес и размеры мотора играют ключевую роль.



Рис. 10.

**Генераторы для морских судов** (рис.11) - для военных и коммерческих приложений с низким уровнем шумов, малым весом при большей эффективности.

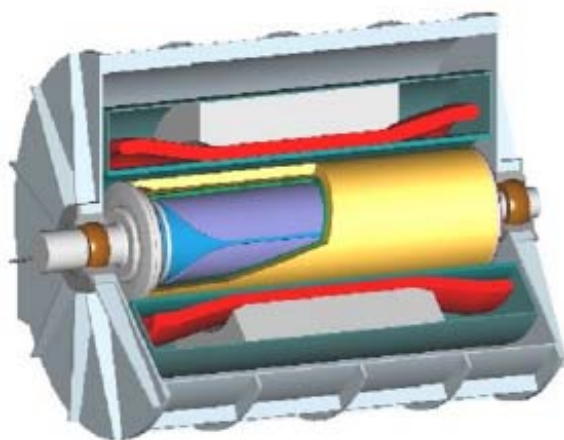


Рис. 11.

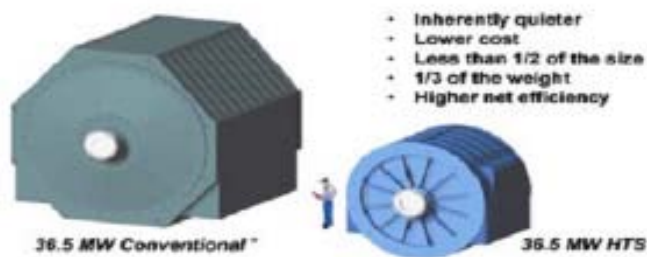
**Магниты специального назначения** – ВТСП катушки для магнитной сепарации.

**Движительные системы для судов (Ship Propulsion Systems)** - для военных и коммерческих приложений с повышенной эффективностью, ударной прочностью, низким уровнем шумов, небольшими размерами, допускающими повышенные нагрузки. В феврале 2003 г. Naval Research заключила с *AMSC* контракт (70 млн. долл.) на создание и поставку 36,5 МВт (49000 л.с.) ВТСП мотора (вес мотора - 69 тонн в сравнении с 200-тонным традиционным аналогом). Этой разработке предшествовали два ВТСП мотора – на 1000 и 5000 л.с., исследования и испытания по которым заложили основу успеха для новой разработки 36,5 МВт мотора, планируемого к выпуску в 2006 г.

В настоящее время изготовлен макетный образец ВТСП электродвигателя мощностью 5 МВт (230 об/мин, напряжение 4160 В) с электронной системой управления для испытания на морских судах. 5 МВт низкооборотный ВТСП электродвигатель с большим вращающим моментом – первый шаг в разработке двигателей с номинальными мощностями 25 МВт и 36 МВт для полностью электрифицированных военных кораблей. Ожидается, что ВТСП электродвигатели мощностью 25 МВт и 36 МВт будут обладать в пять раз лучшими массогабаритными показателями по срав-



Рис. 12. Сравнение размеров традиционного и ВТСП



моторов

нению с двигателями традиционного исполнения (рис.12). В настоящее время *AMSC* инвестировала свыше 64 млн. долл. в разработку электрических машин на основе ВТСП. Жесткая инвестиционная политика *AMSC* приведет в дальнейшем к экспансивному насаждению ВТСП технологий сначала в военной технике, а затем и в промышленности. Притом не только в США, но и во всем мире...

### Партнеры *AMSC* по бизнесу

- **Electricite de France** – французская компания-поставщик электроэнергии
- **EPRI** (Electric Power Research Institute) - Исследовательский электротехнический институт (США)
- **GE Industrial Systems** – производитель электротехнического оборудования для распределения, защиты и управления электрической мощностью
- **Northrop Grumman Ship Systems** - производитель морских судов
- **Alstom** – компания по производству электротехнического оборудования

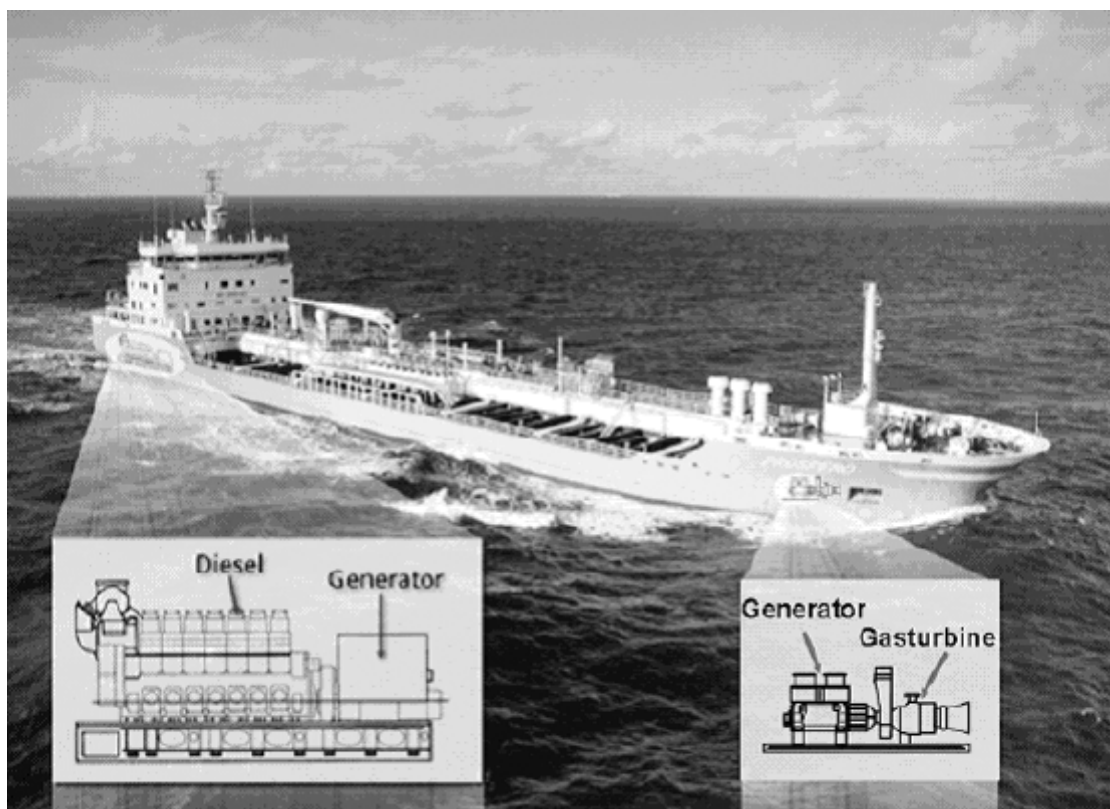
*AMSC* тесно сотрудничает с ВВС США в рамках программ Dual Use (технологии двойного назначения, в первую очередь для Министерств обороны и энергетики) и SBIR (Space-Based Infra-Red System). Она также сотрудничает с Naval Research Lab (измерение параметров ВТСП-проводов), а также с Национальными лабораториями (Los Alamos and Argonne) и University of Wisconsin (характеризация материалов и оценка альтернативных технологий). Развитию технологии ВТСП проводов второго поколения также способствуют контакты с *EPRI* и National Institutes of Health, а также сотрудничество с учеными Electricity de France и Industrial Research Limited of New Zealand.

## ВТСП УСТРОЙСТВА

### Эффективность ВТСП электрических генераторов

Ниже помещенная фотография с вставными рисунками наглядно отражает преимущества компактной системы, оборудованной ВТСП генератором, в сравнении с традиционной системой генерации мощности (Siemens).

*Proc. IEEE, 2004, no.10, p. 1688*



## ФИНАНСИРОВАНИЕ

### Европейский проект развития 2G

Немецкая фирма Nexans Corp. – координатор Европейского проекта “Super3C” (Super Coated Conductor Cable) по разработке ВТСП электротехнического кабеля на основе т.н. «покрывных» технологий [1]. Речь идет о ВТСП проводниках второго поколения, 2G.

Конечная цель проекта – разработать и испытать однофазный ВТСП кабель длиной 30м на 10кВ, 1кА. Этот проект призван укрепить европейское лидерство в области ВТСП кабелей.

Проект, рассчитанный на 3 года, включен Европейской Комиссией в 6 Рамочную Программу (Sixth Framework Programme). Финансирование (половина общей стоимости проекта) было открыто с 1 июня 2004 г. Наряду с Nexans рабочая группа по выполнению проекта включает

- European High Temperature Superconductors, E.ON Energie, E.ON Engineering, Center for Functional Materials (ZFW) (Германия),
- Barcelona Institute of Materials Sciences (CSIC) и Labein (Испания),
- Tampere University of Technology (Финляндия),
- Air Liquide (Франция),
- Bratislava Institute of Electrical Engineering (Словакия).

Задачи Nexans в созданной коллаборации – разработка и изготовление ВТСП ленты по технологии осаждения слоев из металлоорганических соединений и сборка кабеля.

Кроме того, Nexans участвует в ряде других международных проектов:

- в партнерстве с American Superconductor, Air Liquide, the Long Island Power Authority (при поддержке U.S. Department of Energy) ведет разработку самого длинного (610м) в мире ВТСП кабеля на 600МВА при 138кВ;
- совместно с китайской фирмой Innopower Superconductor Cable Co. участвует в установке трехфазного ВТСП кабеля длиной 30м на 35кВ и 2кА в электрической сети в провинции Юннань в Южном Китае) - Nexans поставит электрическую и тепловую изоляцию для кабеля, а также будет сопровождать разработку технологии и изготовление ВТСП проводов 2 поколения на ф. Innopower [2].

1. <http://www.nexans.com/>

2. <http://www.engineeringtalk.com/>

### Министерство энергетики США выбрало 7 университетов для разработок 2G проводов

5 июня с.г. DOE объявило о финансировании в размере 1 млн. долл. разработки второго поколения ВТСП проводов в каждом из следующих американских университетов - California, Massachusetts, Missouri, New York, Texas и Wisconsin. Отмечается, что участие именно этих университетов может сыграть важную роль в модернизации национальных систем передачи и распределения электроэнергии.

#### Издатель ООО НИЦ «НЕОТОН»

(при поддержке ОАО «ФСК ЕЭС»)

Научный редактор *Н.А. Черноплеков*, член-корр. РАН,  
научный руководитель ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Редактор

*С.С. Иванов ssi@iht.mpei.ac.ru*

В подготовке выпуска принимали участие: *С.Т. Корецкая* (095) 930 3389;  
*А.К. Чернышова* (095) 196 7200; *Н.Н. Балашов*, *К.Л. Ковалев*, *Ю.Г. Метлин*

Верстка *И.Л. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Ю.К. Мухин*