

Сверхпроводники для электроэнергетики

провода кабели трансформаторы накопители
генераторы токоограничители фирмы инвесторы
перспективы и прогнозы исследовательские центры

Информационный бюллетень

Том 1, выпуск 1
октябрь 2004 г.

В этом выпуске:

- 2** *Сверхпроводники для электроэнергетики*
- | | | |
|------------------------|--|-----------|
| ВТСП МАТЕРИАЛЫ | ФИНАНСИРОВАНИЕ | |
| <i>2G ВТСП провода</i> | <i>Финансирование электротехнических разработок в Японии</i> | 11 |
- 3** ...от ВТСП-1 к ВТСП-2
...Технологические этапы
...2G в США
...2G в Японии
...2G в Германии
- | | | |
|--|--|-----------|
| ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ | ОРГАНИЗАЦИИ В СИЛЬНОТОЧНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ | |
| <i>IGC SuperPower Inc., (США)</i> | <i>...в России</i> | 12 |
| 6 Основные этапы становления SuperPower, Inc. | I. Синтез и исследование ВТСП длинномерных проводов и массивной керамики для высоковольтных применений | |
| 7 ВТСП кабель для Southwire Company
Проект «Albany Cable Project» | II. Изготовление и исследование ВТСП высоковольтных приборов и устройств | |
| 8 ВТСП трансформаторы для Rochester Gas & Electric | III. Методики контроля ВТСП материалов и ВТСП высоковольтных устройств | |
| 9 Матричный ВТСП ограничитель тока
ВТСП регулятор тока на 15,5 кВ | <i>...в США</i> | 13 |
| 10 ВТСП токовводы
ВТСП катушки для генераторов SuperPower в оборонных программах | Ведущие компании
Ведущие исследовательские центры | |

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*

Уважаемые читатели!

Перед Вами первый выпуск информационного бюллетеня «Сверхпроводники для электроэнергетики».

Выдающееся открытие физики конца 20 столетия - открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), изменило облик сверхпроводниковой технологии больших токов. Теперь есть все основания ожидать, что эта технология будет востребована не только в области ее безальтернативного использования («индустриальная» физика высоких энергий, термоядерные устройства, уникальная медицинская технология и ряд других), но и в создании электроэнергетического оборудования общепромышленного назначения. В настоящее время технологии ВТСП бурно развиваются, и осуществляется переход на материалы 2-го поколения с существенно улучшенными техническими характеристиками (плотность рабочего тока и диапазон рабочих магнитных полей). Уже до конца текущего десятилетия в индустриально развитых странах начнется их крупномасштабный выпуск. Снижение стоимости 1 кА·м такого материала до уровня меди и даже ниже, создает предпосылки для разработки некоторых типов уникального оборудования на основе ВТСП технологий, коммерчески обоснованного для применения в электрических сетях.

Периодический выпуск бюллетеня «Сверхпроводники для электроэнергетики» позволит сотрудникам «ФСК ЕЭС», научным и проектным организациям, связанным с решением проблем развития электрических сетей знакомиться с ходом и результатами работ по использованию сверхпроводниковой технологии.

Пожелаем ему успеха.

*Заместитель Председателя
Правления ОАО «ФСК ЕЭС»
В.В. Дорофеев*

Сверхпроводниковые технологии для электроэнергетики

В условиях свободного рынка перед системой транспорта электроэнергии России встает ряд неотложных задач, решение которых призвано обеспечить надежное обеспечение потребителей качественной электроэнергией:

- преодоление недостаточной пропускной способности межсистемных и системообразующих линий электропередач;
- повышение управляемости электрических сетей и увеличение объема устройств регулирования напряжения и реактивной мощности;
- оптимизация распределения потоков мощности по параллельным линиям электропередач различного напряжения.

Наряду с этим, в электрических сетях России имеет место и общее старение основных фондов: полно-

стью отработали нормативный срок службы более 10% трансформаторов, 6% - реакторов, 29% - выключателей.

Все это в совокупности ставит вопрос о необходимости модернизации электросетей, о замене устаревшего оборудования на новое. И, если уж затрачивать силы и средства, то хотелось бы, чтобы новое оборудование соответствовало требованиям уже наступившего XXI века и по техническим, и по коммерческим показателям – эффективное, надежное, пожаробезопасное, экологически приемлемое. Современная наука предлагает новые эффективные решения, как на иных физических принципах, так и на более перспективных конструктивных и технологических решениях. Новые решения могут быть основаны, в частности, на сверхпроводниковых технологиях, к которым уже обратились и достигли первых успехов все технически развитые страны мира. На сегодняшний день для создания нового поколения электроэнергетического оборудования сверхпроводниковые технологии предлагают как самостоятельные решения, так и сочетающиеся с технологией *FACTS* (Flexible Alternating Current Transmission System).

Разработки по сильноточной прикладной сверхпроводимости начались еще в 1961 году. Эти разработки использовали так называемые низкотемпературные сверхпроводники (НТСП), требующие охлаждения до температур гелиевого уровня (4,2 К). Из-за сложности и дороговизны гелиевых систем охлаждения разработанные устройства не нашли широкого коммерческого применения. Новым стимулом для разработок явилось открытие в 1986 г. высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), а, особенно, создание в середине 90-х годов ВТСП проводов 1-го поколения (многожильные провода на основе керамики висмутовой системы в серебряной оболочке, изготавливаемые по методу «порошок-в-трубе»). Устройства на основе ВТСП материалов могли работать при азотном уровне температур (77 К), что значительно упростило и удешевило системы охлаждения. В результате в короткий срок были разработаны, изготовлены и испытаны сверхпроводниковые прототипы всех видов электротехнического оборудования. Однако эксплуатационные характеристики устройств на ВТСП проводах 1-го поколения (first generation *HTSC*, *1G*) при температуре жидкого азота были относительно низкими, а их стоимость - неоправданно высокой (1кА·м ВТСП провода 1-го поколения в десятки раз превышает стоимость 1кА·м медного проводника).

Тем не менее, разочарование не наступило. Фактически параллельно с технологией «порошок-в-трубе» на ведущих фирмах осваивалась и к настоящему времени приближается к промышленному уровню технология ВТСП проводов 2-го поколения, в дословном переводе с английского так называемая

«покрывная» (coated) технология (в российской практике больше утвердился термин «пленочная технология» и, соответственно, пленочные провода). ВТСП пленочные покрытия (иттриевая система) осаждаются на длинные металлические ленты в непрерывном процессе. ВТСП провода 2-го поколения (second generation *HTSC*, *2G*) могут обеспечить безусловную экономическую выгодность. Они имеют при азотной температуре эксплуатационные характеристики (плотность тока и рабочее магнитное поле), конкурирующие с низкотемпературными сверхпроводниками, а стоимость, при промышленном выпуске, равную или ниже стоимости медного проводника. В настоящее время изготовлен целый ряд экспериментальных устройств на ВТСП проводах 2-го поколения. Еще до конца текущего десятилетия начнется промышленный выпуск электротехнического сверхпроводникового оборудования, которое и по техническим, и по коммерческим показателям (в массовом производстве) будет существенно превосходить электрооборудование традиционного исполнения.

Интенсивные разработки проводятся ведущими в техническом отношении странами мира (США, Япония, Германия). США, где такие разработки имеют наибольшую поддержку со стороны правительства, намерены после 2010 года выйти на мировой рынок со сверхпроводниковым оборудованием широкой номенклатуры и тем обеспечить свое стратегическое превосходство в мире в области электроэнергетики.

С удовлетворением можно констатировать, что правление ОАО «ФСК ЕЭС», рассматривая стратегию отрасли, включило использование современных сверхпроводниковых технологий в качестве одного из магистральных путей технического перевооружения систем транспортировки и распределения электроэнергии. И это не дань моде, а насущная потребность. Успех будет обеспечен целевыми финансовыми вложениями и неременным объединением усилий науки, технологии, производства.

Европейская комиссия создала и финансирует «Европейскую сеть по сверхпроводимости», включающую более 70 ведущих промышленных, правительственных и академических групп. Как отмечал ее инициатор Colin Gough (Бирмингемский университет), – «Политика сотрудничества между промышленными исследовательскими центрами и университетами поможет Европе захватить и сохранить лидирующие позиции в сверхпроводниковом бизнесе». Объединение усилий различных групп в нашей стране – настоятельная задача. Для ее решения не последнюю роль может сыграть выпуск регулярного информационного бюллетеня, призванного познакомить читателя с сегодняшними отечественными и зарубежными организациями (компаниями, исследовательскими центрами), ведущими исследования и разработки в области сильноточной сверхпроводимости,

уровнем сегодняшних разработок, первыми коммерческими образцами сверхпроводникового электротехнического оборудования, перспективами их широкого внедрения в действующие электроэнергетические системы. Это особенно важно в ситуации продолжающегося до настоящего времени серьезного информационного голода в нашей стране.

В текущем выпуске бюллетеня будет представлена информация:

- о российских организациях, в той или иной мере занятых в области сильноточной сверхпроводимости;
- о ведущих компаниях и исследовательских центрах США;
- о ВТСП ленточных проводах 2-го поколения – основе успеха разработок в электроэнергетике;
- о текущих разработках одной из компаний США – SuperPower, Inc., достаточно полно характеризующих сегодняшний уровень разработок ВТСП электротехнического оборудования за рубежом.

В последующих выпусках планируется представить подробную информацию о разработках ведущих российских центров, продолжить характеризовать американские компании и их разработки, представить ситуацию в ЕС, Японии, Китае, следить за ситуацией со строительством термоядерного реактора *ITER*, как перспективного альтернативного источника энергии.

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

ВТСП МАТЕРИАЛЫ

Успех сверхпроводников в электроэнергетике обеспечат 2G ВТСП провода

Сверхпроводники обеспечивают решение проблем качества и надежности электрических сетей и, как результат, например, по оценкам *EPRI*, экономии 30 млрд. долл. в год за счет исключения потерь электроэнергии только в сегодняшних электрических сетях США.

К 2010 г. - времени наиболее активной замены электротехнического оборудования, отработавшего свой срок во многих энергосистемах мира, электромашиностроительные фирмы США стремятся завоевать большую часть мирового рынка, предъявив ему дешевое и компактное сверхпроводниковое оборудование, превышающее по эффективности и надежности оборудование традиционного исполнения.

...от ВТСП-1 к ВТСП-2

На первом этапе разработки сильноточных ВТСП проводов большинство разработчиков сосредоточилось на хорошо освоенной ранее (на низкотемпературных сверхпроводниках) технологии «порошок-в-трубе». Этот технологический процесс включает 3 этапа – 1) заполнение металлической трубки (как правило, из серебра) ВТСП порошком-прекурсором

(в основном *Bi*-системы); 2) обжим и прокатка заполненной трубки; 3) многократные циклы «отжиг-плоская прокатка». В России в ГНЦ ВНИИНМ им. акад. Бочвара по технологии «порошок-в-трубе» получены ленты *Bi*-системы длиной до 250 м.



Рис. 1. Фото ленты *Bi-2223/Ag*, полученной во ВНИИНМ. В верхней части рисунка – поперечное сечение ленты.

Однако, технология «порошок-в-трубе» обладает рядом недостатков – 1) необходимость деформировать ВТСП материал в процессе прокатки (отсюда – многократные отжиги); 2) токонесущая способность полученных проводов висмутовой системы падает уже в магнитных полях ~1 Тл (что ограничивает их применение в ряде устройств); 3) высокая стоимость, определяемая не в последнюю очередь дороговизной серебряной матрицы.

Свою задачу эти материалы выполнили - на прототипах изделий (а их изготовлено много - кабели, трансформаторы, ограничители и регуляторы тока, моторы и генераторы) показано принципиальное преимущество ВТСП сильноточных устройств перед традиционными. Оставив за ними название ВТСП провода 1-го поколения - *1G*, разработчики приступили к принципиально новой технологии – пленочной (за рубежом более принят термин «покрывная» (coated) технология) – ВТСП (*Y*- система) материал осаждается на специальном образом подготовленную ленточную подложку (исключается процедура деформации ВТСП материала). Результаты – весьма обнадеживают. Новые провода получили название ВТСП провода 2-го поколения (*2G* – second generation).

Технологические этапы получения 2G ВТСП проводов

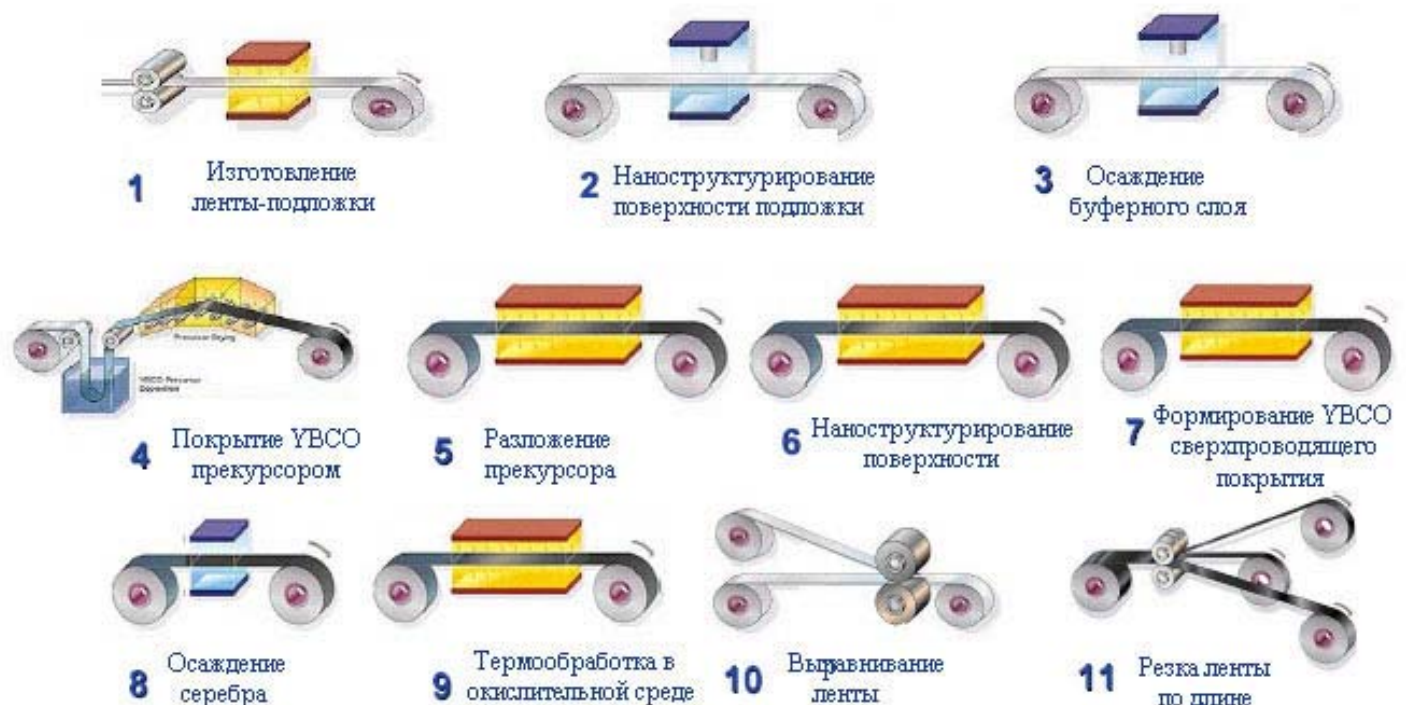


Рис. 2.

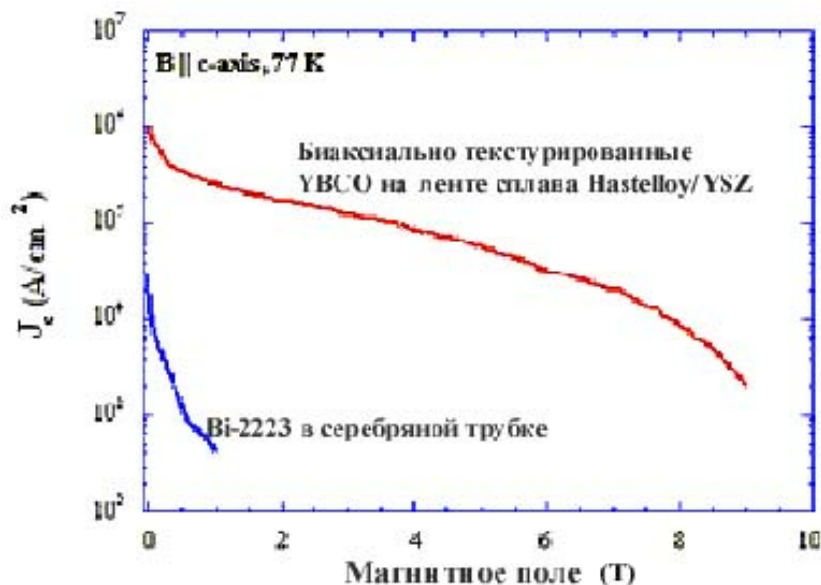


Рис. 3. Сравнение поведения плотности критического тока в магнитных полях для ВТСП проводов *Bi*- (1G) и *Y*- систем (2G).

Характеристики 2G ВТСП проводов (на основе иттриевой системы *YBaCuO*) в сравнении с 1G ВТСП проводами (*BiSrCaCuO*) представлены на рис. 3 - плотность критического тока в проводах на основе *Y*-системы более, чем в 10 раз выше, чем в проводах *Bi*-системы, и остается на этом уровне в значительно большем интервале магнитных полей.

...ВТСП-2 в США

Перед конкурирующими фирмами мира стоит задача первыми выйти на освоение промышленного производства 2G ВТСП проводов высокого качества со стоимостью (к концу десятилетия) меньше или равной 10 долл./1 кА·м. Длительное время более значительные успехи на этом пути демонстрировали фирмы Японии, благодаря все возрастающим правительственным инвестициям. Для того чтобы перехватить инициативу, в США в дополнение к действующей программе Министерства энергетики (*DoE*) - *SPI* (*Superconductive Partner Initiative*) открыто финансирование программы *ACCI* - *Accelerated Coated Conductor Initiative* (Инициатива ускоренного освоения пленочных проводов).

Перед Национальными лабораториями США поставлена задача поиска оптимальной технологии 2G ВТСП проводов. Каждая из трех лабораторий - Лос-Аламосская (*LANL*), Окриджская (*ORNL*) и Аргоннская (*ANL*) - разрабатывала независимые методы ее решения. В результате SuperPower, Inc. выбрала своим партнером *LANL*, подписав с ней в 1999 году соглашение о безвозмездной передаче разработанной технологии (в соответствии с политикой, проводимой МЭ США). Со своей стороны Министерство энергетики выделило *LANL* в 2001 году 2,6 млн. долл. (в том числе 1,9 млн. долл. на капитальные за-

траты) для доведения технологического процесса до стадии массового производства ленточных проводов иттриевой системы - *YBaCuO* шириной 1 см и длиной не менее 1 м на токи не менее 120 А.

LANL использует два подхода для осаждения ВТСП (*YBCO*) покрытия на гибкую металлическую подложку-ленту с текстурированным буферным слоем:

- 1) импульсное лазерное напыление (*Pulsed Laser Deposition, PLD*),
- 2) ионно-лучевое осаждение (*Ion Beam-Assisted Deposition, IBAD*).

Многослойная структура покрывается сверху тонким слоем серебра.

Другая американская компания *American Superconductor Corp. (AMSC)* в июне с.г. заключила контракт с *DARPA* (*Defense Advanced Research Projects Agency* -

Агентство по перспективным оборонным исследовательским проектам) на разработку 2G ВТСП проводов с высокими характеристиками для оборонных целей (системы электронного противодействия и электронные системы для вооружений). Объем финансирования - 3,1 млн. долл. на 3 года. Цель проекта - снизить стоимость 2G проводов при сохранении высоких электрических параметров. Хотя финансируемая технология предназначена для проводов специального назначения, планируемые улучшения дадут прямую выгоду и коммерческим 2G ВТСП проводам.

Контракт является частью *DARPA's Superconducting Hybrid Power Program*, целью которой является разработка мощных криогенных энергосистем более компактного объема и меньшего веса при лучшей эффективности в сравнении с традиционными энергосистемами. Наряду с *AMSC* отдельные контракты в рамках этой программы заключены с Исследовательской лабораторией ВМС США (*NRL*), Окриджской (*ORNL*) и Лос-Аламосской (*LANL*) национальными лабораториями.

Заключению контракта с *AMSC* способствовали ее недавние заметные успехи в достижении рекордных характеристик 2G проводов в непрерывном процессе.

AMSC приобрела лицензии на *RABiTS* процесс подготовки текстурированной подложки у *ORNL* и у *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* на *MOD* процесс формирования сверхпроводящего *YBCO* покрытия. К тому же *AMSC* самостоятельно разработала (и запатентовала) нанотехнологический процесс создания точечных дефектов (наноточек) в сверхпроводящем покрытии для усиления пиннинга магнитного потока, что привело к значительному возрастанию плотности критического тока.

В *MOD* (*Metal Organic Deposition*) процессе используют жидкофазный прекурсор - металлоорганиче-

ский трифторацетат (*TFA*), впервые примененный в *MIT*. Прекурсор – смесь растворов трифторацетатов *Y*, *Ba* и *Cu* в необходимом соотношении с желаемой вязкостью наносят на подложки центрифугированием (для коротких образцов) или выдавливанием через узкую щель (для длинных образцов). Затем покрытие проходит термообработку в печи, где *TFA* разлагаются и образуется сверхпроводящего соединения *Y-123* (толщина 1 мкм). Процесс формирования (эпитаксиальный, повторяющий структуру буферного слоя – окись церия и стабилизированная иттрием окись церия, *YSZ/CeO*) производят в 10 м печи с непрерывной подачей ленты. Это – наиболее дешевый из освоенных на сегодняшний день процессов получения 2G проводов.

В качестве подложки *AMSC* использует ленту (толщина 50-70 мкм) из хорошо текстурирующегося сплава *Ni-5%W* (или *NiCrW*), устойчивого к окислению при термообработке в ходе формирования слоя *Y-123*. В завершение процесса ленту уплотняют прокаткой и разрезают вдоль для получения ленты стандартной ширины – 0,4 см.

Последнее достижение *AMSC* – 34 м провод с линейной плотностью тока 186 А/см.

К концу 2004 года *AMSC* планирует достичь производительности 10 км провода в год в кусках длиной 100 м.

На сегодняшнем уровне технологии стоимость 2G проводов оценивается в 50 долл./кА·м (для проводов «азотного» диапазона температур) и снижается до 30 долл./кА·м (для проводов, предназначенных для работы при 20-60 К). При увеличении рынка продаж (ориентировочно к 2010 году) цены могут снизиться четырехкратно, т.е. сравняться или даже стать ниже стоимости медных проводов (15 долл./кА·м).

1. *American Superconductor's URL:*

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

2. *Los Alamos National Laboratory's URL:*

<http://www.lanl.gov/>

...*ВТСП-2 в Японии*

В Японии в разработке 2G ВТСП проводов заняты фирмы *Toshiba*, *Furukawa*, *Sumitomo Electric Industry*, *Fujikura*, *Showa Electric*. Научную поддержку разработкам оказывает *ISTEC-SRL* (Международный центр по сверхпроводниковой технологии – Лаборатория исследований по сверхпроводимости). При этом центре создано специальное подразделение по разработке покрытых проводов – *Nagoya Coated Conductor Center*.

В отличие от подхода, господствующего в США (*PLD*, *IBAD*), японские фирмы освоили процесс осаждения ВТСП покрытия из паров металлоорганических соединений (*MOCVD*). В качестве буферного слоя они используют *GdZrO*, а в качестве ВТСП покрытия исследуют соединение *HoBaCuO*. Цель сле-

дующего этапа разработок в Японии – достичь длины ленты – 500 м с критическим током 300 А при скорости осаждения покрытий 5 м/час.

...*ВТСП-2 в Германии*

Для продвижения сверхпроводниковых технологий в промышленность в Германии в 1999 году был создан консорциум *Trithor GmbH*. Держателем акций консорциума является *MVV Energie AG*, фирма-поставщик электроэнергии в потребительские сети Германии. В настоящее время консорциум занял лидирующее положение в Европе, как производитель ВТСП проводов 1-го поколения. Консорциум поставляет многожильные *Bi-2223/Ag* провода длиной до 1200 м в одном куске (поперечное сечение 4,1 мм x 0,22 мм) на токи 50 А, 60 А, 70 А, 80 А, 90 А (77 К, в собственном поле). В конце 2003 года консорциум получил 2 млн. евро от Европейской комиссии (*EU Commission*) на создание промышленного производства 2G ВТСП проводов. Заместитель директора консорциума д-р *J.Muller* полагает, что сочетание высокого финансирования с научной поддержкой от лучших лабораторий Европы обеспечит резкий подъем активности 2G разработок.

По мнению *M. Hegel'я*, заместителя директора *Energy Group* инвестиционного банка «*Sal. Oppenheim*», кредитующего консорциум, ВТСП провода имеют шанс изменить образ всей структуры электроэнергетики.

1. *Trithor Company's URL:* <http://www.trithor.com/>

ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

SuperPower Inc., (США)

- дочерняя компания *Intermagnetics General Corporation (IGC)*, является одним из ведущих в США коммерческих поставщиков ВТСП материалов и изделий (последние - в кооперации с другими компаниями) для электроэнергетики. На счету компании – ВТСП кабели для электросетей, трансформаторы, токоограничители, токовводы.

Основные этапы становления SuperPower, Inc.

1971-1988 – создание *Intermagnetics General Corporation* и формирование групп, нацеленных на разработку сверхпроводящих материалов и изделий (сначала из низкотемпературных, а затем и высокотемпературных сверхпроводников).

1995 – изготовление первого экспериментального ВТСП магнита и ВТСП двигателя.

1996 – создание дочерней компании *SuperPower Inc.* и передача ей деятельности по ВТСП технологиям.

1996 – изготовление ВТСП проводов 1-го поколения.

1997 – испытание ВТСП трансформатора и изготовление рейстрекowego ВТСП генератора.

1998 – изготовление ВТСП трансформатора мощностью 1 МВ·А.

1999 – изготовление ВТСП катушки для регулятора тока.

2000 – изготовление первого *коммерческого* кабеля из 1G ВТСП проводов; приобретение лицензии на технологию изготовления 2G ВТСП проводов.

2001 – получение гранта (6 млн. долл.) от New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) на установку ВТСП кабеля в потребительскую сеть Niagara Mohawk's Albany (штат Нью-Йорк); приобретение лицензии от LANL на изготовление системы регуляторов тока.

2002 – начало непрерывного производства 2G ВТСП лент.

2003 – изготовление 2G ВТСП проводов длиной 10 м в одном куске на ток 1000 А·м; открытие финансирования (13 млн. долл.) от Министерства энергетики на реализацию проекта установки ВТСП кабеля в

потребительскую сеть Niagara Mohawk's Albany (проект Albany HTS Cable); открытие финансирования (6 млн. долл.) на разработку и изготовление матричного ограничителя тока (проект Matrix Fault Current Limiter - MFCL).

ВТСП кабель для Southwire Company – одно из детищ Партнерской инициативы

В рамках программы США «Superconductivity Partnership Initiative» в 1998 году Министерство энергетики США (DoE) открыло финансирование проекта «Southwire Cable Project» - «Создание на заводах «Southwire Company» (Carrollton, штат Джорджия) локальной подземной электрической сети, включающей сверхпроводящий кабель».

В Таблице представлены партнеры и распределение работ между ними.

Партнеры по проекту «Southwire Cable Project»

Компания или Исследовательский центр	Содержание работы
SuperPower, Inc.	Изготовление ВТСП лент из висмутовой керамики Bi-2223 (1G ВТСП ленты)
Southwire Company	Разработка конструкции и изготовление кабеля
Southern Company Services, Georgia Transmission Corporation, Southern California Edison	Вопросы включения ВТСП кабеля в сеть
Plastronics-EURUS, Oak-Ridge National Laboratory	Научная поддержка проекта

По этому проекту в 1999 г. изготовлен трехфазный ВТСП кабель длиной 30 м на напряжение 12,5 кВ и токи до 1,25 кА (см. рис. 4). Кабель в феврале 2000 г. был встроен в локальную подземную электроэнергетическую систему, обслуживающую три завода фирмы Southwire Company. На сегодняшний день система продолжает функционировать в режиме полного автоматического контроля.



Рис. 4. Кабель SuperPower Inc, изготовленный из ВТСП лент 1-го поколения, для подземной локальной линии электропередач на заводах Southwire Company.

Успех вдохновил, и в 2004 году SuperPower, Inc. приступила к выполнению нового заказа – изготовление сверхпроводящего кабеля длиной 300 м на напряжение 13,8 кВ и ток до 2,5 кА для подземной линии электропередач в городе Colambia (шт. Огайо).

Проект «Albany Cable Project» - подземный кабель на основе 2G ВТСП проводов

Министерство энергетики США ускоряет внедрение 2G ВТСП проводов в действующие энергосистемы, открывая финансирование проекта «Albany Cable Project». В рамках этого проекта в 2005 году будет создан и установлен в действующей энергосистеме подземный кабель длиной 350 м на основе 1G ВТСП лент. Затем в 2006 году его секцию длиной 30 м заменят кабелем на основе 2G ВТСП лент. Программа рассчитана на 4 года с финансированием в 26 млн. долл. - в частности, 13 млн. долл. – от Министерства энергетики США и 6 млн. долл. – от New York State Energy Research and Development Authority - NYSERDA. «Albany Cable Project» будет первой в мире демонстрацией применения 2G ВТСП в электроэнергетике.

На сегодняшний день укомплектована команда участников проекта: криогенную инфраструктуру обеспечивает компания BOC, ленточные 2G ВТСП про-

вода поставляет SuperPower, а кабель производит Sumitomo Electric (Япония).

Для осуществления этого проекта к 2005 году SuperPower планирует изготовить 2G ВТСП провода общей длиной 8 км.

Основные технические требования к кабелю:

- напряжение – 34,5 кВ, ток - 800 А, мощность - 48 МВ·А;
- гибкий подземный кабель длиной 350 м с межкабельными соединениями (в 3,5 раза превысит длину прежде смонтированного на основе ВТСП проводов кабеля);
- три фазы в одном криостате;
- холодный диэлектрик;
- автономная, коммерчески жизнеспособная криогенная система, превышающая по надежности существующие стандарты.

Утверждается, что впервые:

- кабель будет проложен стандартным для коммунальных сетей способом под землей (в более ранних вариантах кабель прокладывался на территориях промышленных объектов или подстанциях);
- 30 метровая секция 2G ВТСП кабеля может повысить технико-экономические показатели системы;
- демонстрация подземного соединения ВТСП кабелей даст толчок созданию длинных ВТСП кабельных линий.

Уже весной 2004 года на опытном производстве SuperPower получены рекордные параметры для 2G ВТСП проводов: токонесущая способность 6000 А·м, длина 57 м.

ВТСП трансформатор для компании Rochester Gas & Electric



Рис. 5. ВТСП трансформатор на 1 МВ·А

В начале 1998 года успешно испытан прототип ВТСП трансформатора на 1 МВ·А, изготовленный компанией Waukesha Electric Systems из 1G ВТСП лент, поставленных SuperPower. Научную поддержку проекта осуществляли Окриджская Национальная лаборатория (Oak-Ridge National Laboratory – ORNL) и Ренсселарский политехнический институт (Rensselaer Polytechnic Institute).

В настоящее время на заводе фирмы Waukesha проходит испытания новый вариант трансформатора на 5/10 МВ·А, разработанный и изготовленный тем же составом исполнителей.

ВТСП регулятор тока (FCC) на 15,5 кВ

В рамках программы SPI в 1993 году SuperPower совместно с фирмой General Atomics начала разработку ВТСП трехфазного регулятора тока FCC 15 кВ, 20 МВА для фирмы Southern California Edison. Провода и катушку для регулятора тока FCC изготовила SuperPower при научной поддержке LANL.

На изготовление 15 кВ прототипа ВТСП регулятора тока FCC Министерство энергетики выделило 10 млн. долл. Конструкция регулятора тока FCC включает 3 модуля с ВТСП катушками длиной 0,75 м и диаметром 1 м (рис. 6 а, б). На изготовление каждой из катушек затрачено 15 км Bi-2223 ленточного провода, изготовленного по методу «порошок-в-трубе» в серебряной оболочке. Катушка рассчитана на 2 кА постоянного тока с переменной пульсацией до 16 А при 120 Гц, индукцию в 4 мГн, на напряжение 12,47 кВ и импульсный ток в 10 кА. Рабочие температуры в 35 К обеспечиваются холодным гелием из криокуллера. Каждый из магнитов снабжен двумя криостатами для охлаждения тепловых экранов и ВТСП тоководов. Вся система весом 38 тонн была доставлена заказчику.



Рис. 6 а) ВТСП катушка регулятора тока



б) Регулятор в сборке

Однако при первом испытании произошел электрический пробой во всех трех модулях, причем в одном из модулей пробой был внешним, а в двух других – внутренним. Министерство энергетики запросило

LANL проверить, не повреждены ли в результате пробоя катушки, и восстановить работу регулятора тока. Как выяснилось, при внутреннем пробое произошло короткое замыкание высоковольтной шины, ведущей к терминалам катушек. На территории LANL, по данным на 2003 год, проведены успешные испытания каждого из модулей с высоковольтными шинами новой конструкции.

Матричный ВТСП ограничитель тока - Matrix Fault Current Limiter (MFCL)

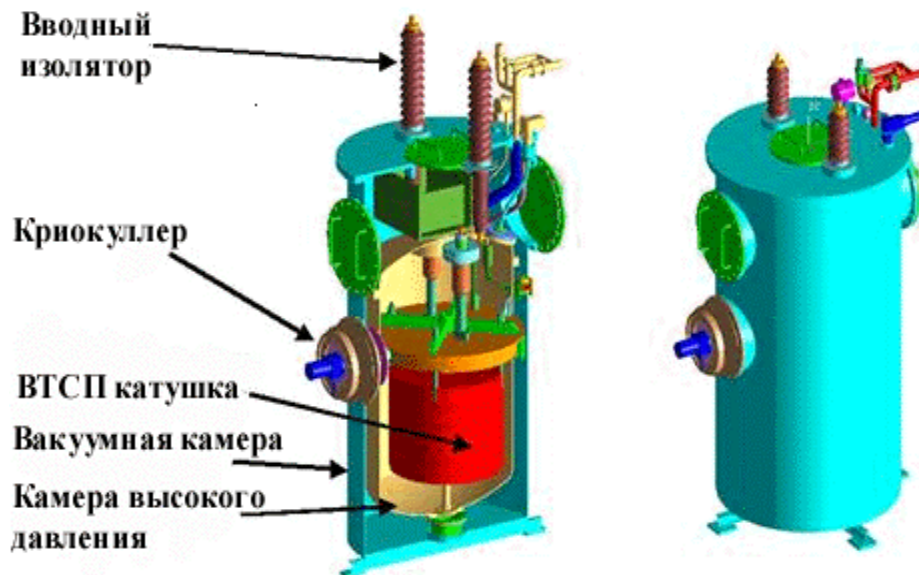


Рис. 6. Низковольтный прототип токоограничителя на 138 кВ

ВТСП токоограничивающее устройство включается в защищаемую часть сети. Его преимущество заключается в существенно более низком сопротивлении по сравнению с эксплуатируемыми токоограничительными реакторами в нормальном режиме. Кроме того, имеется возможность практически безинерционно увеличивать его сопротивление до требуемой величины при коротком замыкании. Это позволяет использовать ВТСП токоограничитель в сетях с напряжением 1-500 кВ для координации токов короткого замыкания с отключающей способностью коммутационной аппаратуры. Уникальные свойства сверхпроводящих материалов позволяют создавать токоограничители, не имеющие аналогов среди традиционных электротехнических устройств.

Включение токоограничителей в определенные узлы энергосистемы позволит продлить срок коммутационной аппаратуры и создаст условия для ее постепенной замены современным оборудованием.

Работы по включению различных типов ВТСП токоограничителей в опытно-промышленную эксплуатацию активно проводятся в промышленно развитых странах – США, Японии, Швейцарии.

Компания SuperPower разработала новую конструкцию ограничителя тока, так называемый матричный

ВТСП токоограничитель (*HTS MFCL*), предназначенный для работы при 138 кВ. SuperPower заявила патент на новую конструкцию.

Серийный *HTS MFSL* ограничитель компания планирует изготовить в кооперации с немецкой фирмой Nexans SuperConductors GmbH к 2006 году. Научную поддержку проекта осуществляют Rensselaer Polytechnic Institute, Argonne National Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Florida State University (в состав этого университета входит Центр испытаний перспективных систем в области электроэнергетики - Center Advanced Power Systems - CAPS).

Проект рассчитан на 4 года, общий объем финансирования 12,2 млн. долл. (из них 6 млн. долл. предоставляет Министерство энергетики, 600 тыс. долл. – Исследовательский электротехнический институт (Electric Power Research Institute - EPRI).

Этапы разработки

2004 г. - создание и испытание прототипа однофазного *MFCL*,
 2005 г. – создание и испытание однофазного альфа-прототипа *MFCL*,
 2006 г. – создание серийного трехфазного бета-прототипа *MFCL*.

Разработчики отмечают следующие особенности токоограничителя *MFCL*:

- модульная конструкция (позволяет переходить к более высоким напряжениям, гибко приспосабливается к требованиям конкретных потребителей);
- отсутствие потерь и падений напряжения в ситуации безаварийной работы;
- пассивное детектирование и ввод токоограничивающего импеданса без активного мониторинга или контроля (импеданс вводится только в условиях повреждения);
- повышенная надежность, как следствие матричности системы;
- относительно низкая стоимость при использовании ВТСП материала *BSCCO-2212*, производимого фирмой SuperPower по методу **Melt Cast Processed (MCP)**, разработанному немецкой компанией Nexans.
- экологическая и пожаро- безопасность.

Возможные потребители *HTS MFSL* ограничителей тока - фирмы-поставщики электроэнергии в потребительские сети: American Electric Power, New York Power Authority, Southern California Edison, Tennessee Valley Authority.

ВТСП токовводы



ВТСП токовводы (рис. 8) предназначены для ввода тока в устройства (например, сверхпроводящие магниты), находящиеся в криостатах. Такие токовводы, обеспечивая минимальный теплоприток из-за низкой теплопроводности ВТСП материала, значительно экономят расход

хладоагента (жидкий азот). Их роль особенно возрастает на объектах, использующих множество охлаждаемых устройств, как например, Большой адронный коллайдер в ЦЕРН^е, включающий тысячи сверхпроводящих магнитов. SuperPower, Inc. серийно выпускает набор ВТСП токовводов на токи от 50 А до 13 кА при рабочей температуре ~80 К. ВТСП токовводы используются компанией SuperPower, например, для ввода тока в регулятор тока на 15,5 кА.

ВТСП катушки для генераторов



SuperPower изготавливает и поставляет компании General Electric ВТСП ленточный провод и катушки из него для генераторов (рис. 9), предназначенных для сетевой компании Niagara Mohawk Power Corp. Научная поддержка разработок - Argonne National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory,

Los Alamos National Laboratory.

Замена традиционных медных катушек в генераторе на ВТСП позволяет получать более высокие магнитные поля и, следовательно, большие токи и мощности при тех же габаритах генератора.

Преимущества:

- увеличение КПД выше 99%;
- снижение потерь на 50%;
- снижение загрязнения на единицу произведенной энергии;
- снижение эксплуатационных и амортизационных расходов;
- повышение стабильности электросети за счет улучшения электрических характеристик;
- уменьшение вдвое массогабаритных характеристик генераторов в сравнении с традиционными генераторами аналогичной мощности.

Участие SuperPower в оборонных программах

SuperPower стала участником программы *DUST* - «Dual Use Science and Technology» - «Наука и технология двойного назначения». В рамках этой программы SuperPower получила финансирование (2,4 млн. долл. на 3 года) от Исследовательской лаборатории ВВС США (U.S. Air Force Research Laboratory - *AFRL*), расположенной на базе ВВС США в Wright-Patterson, штат Огайо. Как считает руководитель технологических разработок компании Dr. Venkat Selvamamickam, новые ВТСП материалы и изделия могут быть востребованы в таких областях, как

- лазерное оружие,
- полностью «электрические» (без механических устройств) военные корабли,
- сверхзвуковые самолеты,
- авианосцы,
- системы разминирования.

С октября 2003 года Министерство обороны США (*DoD*) совместно с Министерством энергетики (*DoE*) открыли финансирование компании SuperPower в рамках программы «Title III», уже давно поддерживающей разработки в области высоких технологий двойного назначения (военного и коммерческого).

1. SuperPower, Inc.' URL: <http://www.igc.com/>
2. IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2003, 13, p.1984

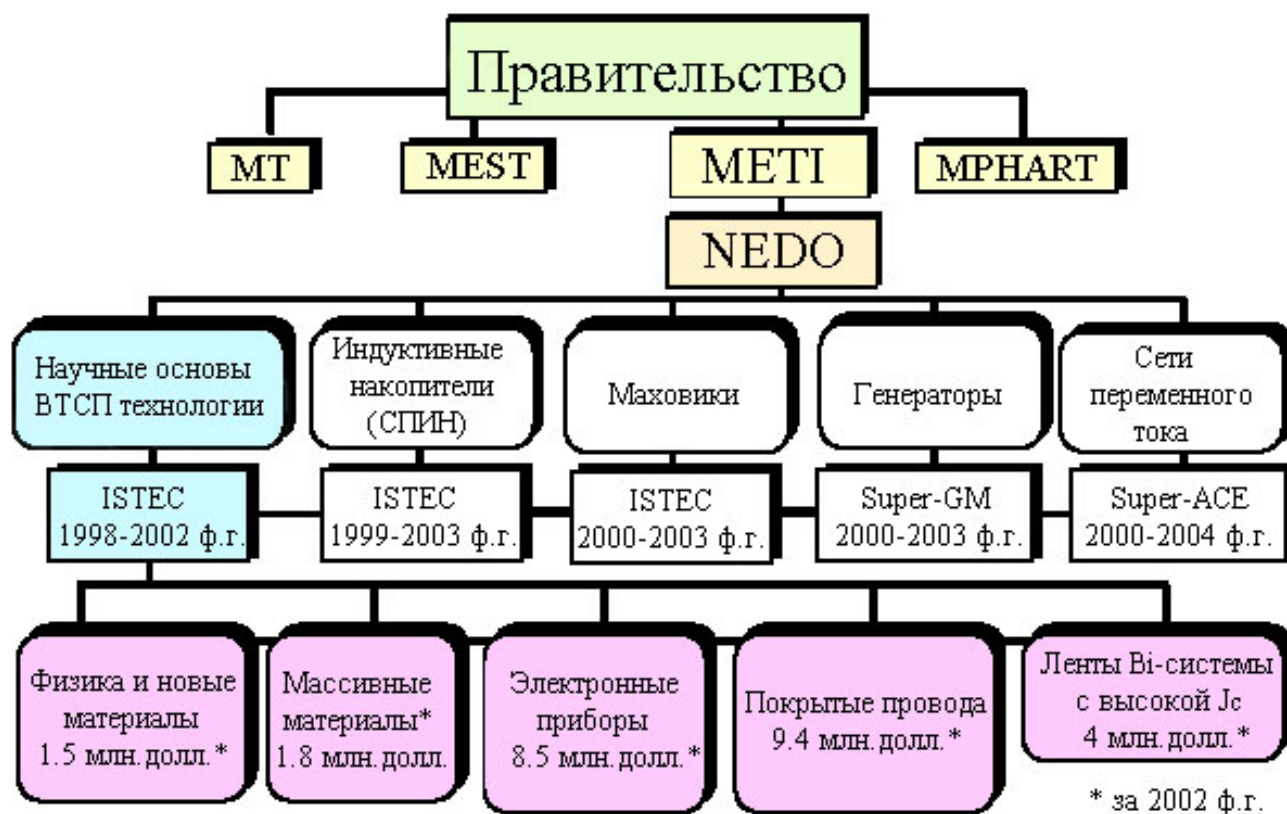
ФИНАНСИРОВАНИЕ

Финансирование электротехнических разработок в Японии

В Японии ВТСП разработки в интересах электроэнергетики финансируются несколькими правительственными ведомствами:

- *METI* - Ministry of Economy, Trade, and Industry (Министерство экономики, торговли и промышленности)
- *NEDO* - New Energy and Industrial Technology Development Organization (Ведомство по новым разработкам в области энергетики и промышленных технологий)
- *MEST* - Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий)
- *MIT* - Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Министерство земель, инфраструктуры и транспорта)
- *MPHAPT* - Ministry of Public Management, Home Affairs, Post and Telecommunications (Министерство имущества, почт и телекоммуникаций)

Проекты по исследованию сверхпроводимости Японии



ISTEC - Международный центр по сверхпроводниковой технологии в Цукубо

На схеме указано финансирование *ISTEC* в 2002 году, в Таблице 1 – общее финансирование электротехнических разработок из бюджета *METI/NEDO* в 2002 г. Согласно устным источникам, в 2003-2004 г.г. объем финансирования значительно увеличен.

Объем финансирования (приведен бюджет *METI/NEDO* на 2002 ф.г.)

Направление исследований	2002 ф.г., млн. долл.
Технологические разработки	25.2
Индуктивные накопители (<i>SMES</i>)	9.1
Маховики (<i>Flywheel</i>)	3.0
Генераторы (<i>Generator</i>)	7.0
Сети переменного тока (<i>AC Power application</i>)	12.6
Итого	62.1

1. U.S. Department of Energy "Energy Efficiency and Renewable Energy" URL: <http://www.eere.energy.gov/>

ОРГАНИЗАЦИИ, ПРОВОДЯЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СИЛЬНОТОЧНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

...в России

№ п/п	Организация	Предмет исследований
<i>I. Синтез и исследование ВТСП длинномерных проводов и массивной керамики для высокоточных применений</i>		
1.	Всероссийский НИИ неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара (ВНИИНМ).	ВТСП висмутовые ленты и листы ВТСП иттриевые однодоменные массивные материалы
2.	ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО ВНИИКП). http://www.vniikp.ru/index.asp?p=act_td	Низкотемпературные сверхпроводящие «кабели-в-оболочке» по программе термоядерного реактора – <i>ITER</i> Сверхпроводящие соленоиды
3.	Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН). http://www.imet.ac.ru/	ВТСП композиты для токоограничителей, экранов
4.	Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет) - МГИСиС, http://www.misis.ru/main.php	Многожильные ВТСП композитные ленты <i>Ag-BSCCO</i>
5.	Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ). Химический факультет. http://www.inorg.chem.msu.ru/	Порошки-прекурсоры для синтеза ВТСП материалов Эпитаксиальные ВТСП пленки Эпитаксиальные буферные подслои
6.	ГНЦ РФ «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова» (НИФХИ). Москва. http://www.nifhi.ac.ru/	Технология осаждения ВТСП пленок на подложках протяженной длины
<i>II. Изготовление и исследование ВТСП высокоточных приборов и устройств</i>		
1.	РНЦ «Курчатовский институт». Москва. http://www.kiae.ru/	Макет ВТСП линии электропередач ВТСП ограничители токов ВТСП токовводы Накопители электроэнергии
2.	ГНЦ РФ «Всероссийский электротехнический институт». Москва. http://www.vei.ru/	ВТСП материалы для роторов электрических машин, магнитных подвесов, магнитных экранов
3.	Отдел электроэнергетических проблем РАН (испытания изделий проводятся на стендах «НИИ-электромаш»). Санкт-Петербург. http://spbrc.nw.ru/russian/org/oeep.htm	Сверхпроводниковые турбогенераторы Криогенные автономные высокооборотные источники питания
4.	Объединенный институт высоких температур РАН, (ОИВТ РАН). Москва. http://oivt.nm.ru/razd-oivt/oivt.htm	Сверхпроводниковые накопители энергии ВТСП токоограничители
5.	ОАО «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского». Москва.	Силовые сверхпроводящие трансформаторы
6.	Московский авиационный институт (ГТУ МАИ). Москва. http://www.mai.ru/	Криогенные гистерезисные ВТСП двигатели мощностью Реактивные ВТСП двигатели Систем магнитного подвеса, в том числе для транспорта Макет левитирующего поезда
7.	Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова	Криогенные токовводы Сверхпроводящие индуктивные накопители –

	(НИИЭФА). Санкт-Петербург. http://www.nfenergo.sp.ru/index.htm	СПИН'ы Сильноточные магнитные системы
8.	Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (МГТУ). Москва. http://www.bmstu.ru/	Макеты магнитных подвесов для маховиковых накопителей Массивные однодоменные ВТСП материалы
9.	ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий» (ИФВЭ). Протвино, Московская обл. http://www.ihep.su/	ВТСП дипольные магниты. ВТСП токовводы
III. Методики контроля ВТСП материалов и ВТСП сильноточных устройств		
1.	Московский инженерно-физический институт (МИФИ). Москва. http://www.mephi.ru/	Стенды для контроля параметров длинномерных ВТСП лент
2.	Институт теплофизики Уральского отделения РАН. Екатеринбург.	Тестирование ВТСП материалов в производственных условиях
3.	Институт физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН) . Черноголовка, Московская обл. http://www.issp.ac.ru/	Магнито-оптическая визуализация для контроля качества ВТСП материалов Криомагнитные системы с полями до 16 Тл (0,3 - 300 К)
4.	Марийский государственный университет (МарГУ). Йошкар-Ола.	Бесконтактное (в собственном поле) измерение плотности критического тока в ВТСП материалах и изделиях

(более подробно с российскими организациями можно ознакомиться на Интернет сайте «Сверхпроводимость» - <http://perst.issph.kiae.ru> в разделе «Российские организации в сверхпроводимости»)

...в США

Ведущие компании США

- American Magnetic Inc. - Oak Ridge, Tennessee, USA
Токовводы (Current leads)
2G провода (Coated Y-123 conductors)
- American Superconductor Corporation – Westborough, Massachusetts, USA
1G ленточные Bi-2223 провода (порошок-в-трубе)
2G ленточные Y-123 провода (покрывная технология)
Индуктивные накопители электроэнергии – СПИН'ы (SMES),
Двигатели для военных кораблей
Генераторы
- DuPont Superconductivity Experimental Station – Wilmington, Delaware, USA
Катушки на основе лент Bi-2223
- General Atomics - San Diego, California, USA
Ограничитель аварийный токов (Fault current limiters) на основе лент Bi-2223
- GE-Industrial Systems
Индуктивные накопители электроэнергии – СПИН'ы (D-SMES)
Регуляторы напряжения (PQ-VR™: Power Quality Voltage Regulator)
Промышленные регуляторы напряжения (PQ-IVR™ - Power Quality Industrial Voltage Regulator)
- Northrop Grumman Corp. –Pascagoula, Massachusetts, USA

- Трансформаторы на основе Bi-2223 лент
- Oxford Superconducting Technology – Carteret, New Jersey, USA
1G ленты Bi-2212
2G ленты Y-123 (coated conductors)
- Pirelli Cables Systems – Lexington, SC, USA
Кабели на основе Bi-2223 лент
Линии электропередач (Power transmission lines) на основе Bi-2212 кабеля
- SPD Technologies Inc – Philadelphia, Pennsylvania, USA
Трансформаторы на основе Bi-2223 лент
- Southwire Corp. – Carrollton, GA, USA
Кабели на основе Bi-2223 лент
- SuperPower, Inc. – дочерняя компания Intermagnetics General Corp. – Schenectady, New-York, USA;
2G Y-123 ленточные провода
Токоограничители матричной конструкции
Токовводы
Трансформаторы
- Wang NMR, Inc. – Livermore, California, USA
1G ленты Bi-2223
Магниты для синхротронов и ускорителей
Токовводы
- Waukesha Electric Systems – Waukesha, USA
Трансформаторы

Ведущие исследовательские центры в США

- State University of Florida (Университет штата Флорида). Center for Advanced Power Systems – CAPS (Центр перспективных электроэнергетических систем)

Центр для испытаний энергетического оборудования на основе сверхпроводников (кабели, трансформаторы, моторы, индуктивные накопители электроэнергии – СПИН’ы) и подготовки специалистов в этой области. В 2004 году планируется проведение испытаний СПИН’ов.

2. Los-Alamos National Laboratory - *LANS*

(Лос-Аламосская национальная лаборатория)

ВТСП провода

ВТСП кабели

Ограничители тока

3. Oak-Ridge National Laboratory - *ORNL*

(Окриджская Национальная лаборатория)

ВТСП катушки для моторов, трансформаторов, генераторов

Аппаратура и оборудование для испытаний

ВТСП кабелей

Криогенное обеспечение ВТСП подземных кабелей

4. Electric Power Research Institute – *EPRI*

(Исследовательский электротехнический институт)

Кабели

Синхронные моторы

Индуктивные накопители

Токоограничители

Трансформаторы

Ведущие центры США выбраны по максимальному числу публикаций за 2003-2004 годы в области сверхпроводниковой электроэнергетики и сверхпроводящих материалов. Реально, в США в ВТСП разработки включено значительно большее число исследовательских центров, информация о которых будет периодически представляться в последующих выпусках бюллетеня «Сверхпроводники для электроэнергетики».

Используемые сокращения

2G – Second Generation – 2-ое поколение (относится к ВТСП проводникам 2-го поколения)

ACCI - Accelerated Coated Conductor Initiative (Программа «Инициатива ускоренного развития покрытых (пленочных) проводов»)

ANL – Argonne National Laboratory (Аргоннская Национальная Лаборатория)

CAPS - Center for Advanced Power Systems (Центр испытаний перспективных энергосистем)

DoE – Department of Energy (Министерство энергетики)

EPRI – Electric Power Research Institute (Исследовательский электроэнергетический институт)

IBAD – Ion Beam Assisted Deposition (Ионно-лучевое осаждение)

ISD – Inclined Substrate Deposition (Осаждение на наклонную подложку)

ISTEC-SRL – International Superconductivity Technology Center – Superconductivity Research Laboratory (Международный центр сверхпроводниковых технологий – Лаборатория исследований по сверхпроводимости)

J_c - плотность критического тока

LANS - Los-Alamos National Laboratory (Лос-Аламосская Национальная Лаборатория)

MOCVD – Metal Organic Chemical Vapor Deposition (Химическое осаждение из паров металлоорганических соединений)

MOD – Metal Organic Deposition (Осаждение из металлоорганических соединений реакцией в жидкой фазе)

ORNL - Oak-Ridge National Laboratory (Окриджская Национальная Лаборатория)

RABITS – Rolling Assisted Biaxial Textured Substrate (Биаксиальное текстурирование подложки специальной прокаткой)

SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage (Сверхпроводящий магнитный накопитель энергии)

SPI - Superconductive Partner Initiative (Программа «Партнерская инициатива в области сверхпроводимости»)

YBaCuO – $YBa_2Cu_3O_7$

BSCCO – $Bi_2Sr_2Ca_2CuO_{10}$