



Том 4 выпуск 3
Июнь 2007

НОВЫЕ ПРОЕКТЫ

Российская Программа по сверхпроводниковым технологиям в электроэнергетике утверждена!

Рабочая группа (созданная в соответствии с решением Координационного совета по сверхпроводящим технологиям ОАО РАО «ЕЭС России» от 06.12.2006) сформировала и представила Координационному совету Программу работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости на 2007-2015 гг, основные позиции которой и сроки их выполнения представлены в табл. 1. В мае 2007 г Программа была утверждена Председателем Правления ОАО РАО «ЕЭС России» А.Б. Чубайсом.

Цели программы – разработка и освоение принципиально нового электрооборудования на базе сверхпроводниковых (СП) технологий для обеспечения качественно нового шага в развитии и функционировании электроэнергетики РФ и соответствия российской электроэнергетики мировым стандартам.

Средствами достижения целей программы приняты:

- Выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКР), позволяющих создавать опытно-промышленные образцы основных видов СП технологий и оборудования;
- Исследование широкого круга задач локальной энергетической системы (СП генератор, СП кабель/токопровод, СП токоограничитель, СП трансформатор, СП накопитель и нагрузка) для ТЭС и АЭС
- Организация промышленного производства СП электрооборудования для нужд электроэнергетики;
- Организация масштабного практического использования СП технологий и оборудования в электроэнергетических системах;
- Подготовка квалифицированных кадров (инженеров и техников) для работ с СП оборудованием на кафедрах МЭИ, МИФИ, Государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП), а также в ОАО «НТЦ электроэнергетики»;

Объемы финансирования программы со стороны РАО «ЕЭС России» в 2007-2009 гг приведены в табл. 2. Дальнейшее финансирование программы установлено ориентировочно и подлежит уточнению по мере выполнения работ на предыдущих этапах.

И далее...

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Металлическая основа ВСП-проводов 2

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

Новые решения для распределительных сетей на основе ВТСП кабелей 4

Наши в Олбани 6

Крупнейшие ВТСП кабели 7

ВТСП УСТРОЙСТВА

ВТСП моторы и генераторы для нужд флота 8

КОНКУРСЫ

Человек Года в Индустрии Сверхпроводников 10

Таблица 1. Основные проекты программы работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости на 2007-2015 гг.

	Название проектов	Сроки исполнения
1.	Разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение 10-20 кВ из ВТСП материалов первого поколения	2007-2010 гг
2.	Пилотный проект ВТСП кабеля на напряжение 10 – 20 кВ с передаваемой мощностью 100 – 200 МВА длиной более 1 километра на материалах первого поколения	2008-2012 гг
3.	Разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение 110 кВ и выше	2011-2015 гг
4.	Разработка СП технологий (СП кабелей, токоограничителей, трансформаторов, накопителей) для передачи электроэнергии постоянным и переменным током	2008-2009 гг
5.	Разработка и создание ВТСП токоограничителя на напряжение класса 10 – 20 кВ	2007-2010 гг
6.	Разработка и создание ВТСП токоограничителя класса 110 кВ	2009-2013 гг
7.	Разработка и создание ВТСП трансформатора 20/0.4 кВ мощностью 2500 кВА	2007-2011 гг
8.	Разработка и создание ВТСП трансформатора 110/20 кВ мощностью 50 МВА	2011-2015 гг
9.	Разработка и создание ВТСП генераторов	2011-2015 гг
10.	Разработка и создание синхронных ВТСП компенсаторов	2010-2015 гг
11.	Разработка и создание сверхпроводящих индуктивных накопительных устройств (СПИНЭ)	2007-2011 гг
12.	Разработка концепции применения сверхпроводящих технологий и оборудования в электроэнергетических системах и программа их использования в ЕЭС/ЕНЭС на период до 2030	2010 г
13.	Мониторинг зарубежного опыта применения сверхпроводниковых (СП) технологий в электроэнергетике	2007-2015 гг

Таблица 2. Финансирование программы.

Год	2007	2008	2009
Объем финансирования, млн. руб.	150,0	200,0	350,0

По соглашению между Росатомом и РАО «ЕЭС России» разработка ВТСП материалов второго поколения выделена в отдельную программу.

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Металлическая основа ВСП-проводов

Производство текстурированной металлической ленты является одним из ключевых этапов в ряде технологических подходов ВСП-проводов второго поколения. Напомним некоторые требования, предъявляемые к ленте:

- материал ленты должен обладать гранецентрированной (гцк) структурой. К гцк-металлам относятся Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Al, Pb, Rh, Ir, а также многие сплавы на их основе;
- технология холодной прокатки с последующей рекристаллизацией должна приводить к образованию острой кубической текстуры, которая должна быть устойчивой при высокой температуре (отсутствие вторичной рекристаллизации);
- лента должна обладать удовлетворительными механическими свойствами, это важно как при осаждении на нее покрытий при высокой температуре,

так и при изготовлении кабеля и последующей эксплуатации в криогенных условиях;

- для использования на переменном токе желательно, чтобы материал ленты не проявлял магнитных свойств при температуре использования ВТСП;
- должна существовать технология получения текстурированных слоев на таких лентах;
- материал ленты должен быть доступен по стоимости.

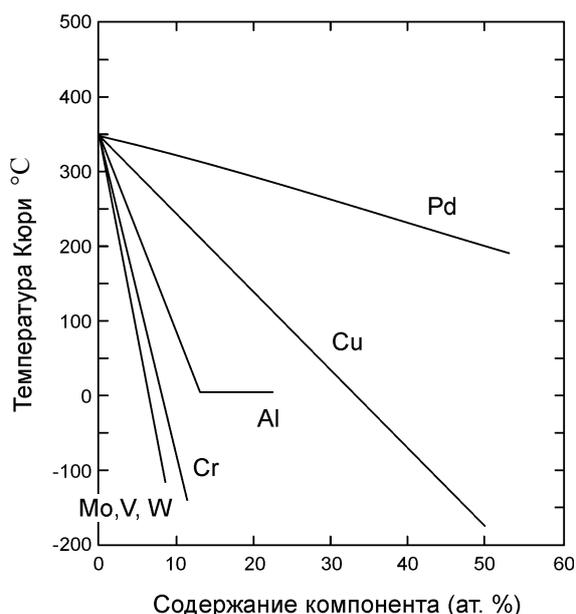


Рис. 1. Температура Кюри сплавов на основе никеля.

Тенденции развития в разработке текстурированной ленты на основе никеля достаточно полно отражены в обзоре индийских авторов, опубликованном в марте [1]. Отмечается, что оптимальными легирующими элементами для никеля по ряду соображений являются тугоплавкие переходные металлы VA и VIA групп периодической системы. Наибольших успехов добились, используя в качестве легирующего компонента вольфрам. В обзоре отмечены также усилия по "размагничиванию" никеля за счёт легирования хромом, ванадием и другими элементами (рис. 1). К сожалению, хоть во многих немагнитных сплавах и удаётся получить текстуру, эпитаксиальный рост слоев на таких лентах остается для исследователей "крепким орешком" – необходимые легирующие компоненты легко окисляются. Уделено внимание получению хороших механических свойств лент – твердорастворному упрочнению и биметаллическим (многослойным) лентам, в которых один из слоев несёт на себе механическую нагрузку, а внешний слой обеспечивает хорошую текстуру и стабильность к окислению. Рассматриваются результаты применения порошковой технологии для создания заготовки под прокатку.

В настоящее время проблему трудно назвать решённой, хотя большинство исследователей и компаний (например, успешная American Superconductor) "остановилось" на сплаве никеля с 5 ат. % вольфрама. Этот сплав является своеобразным компромиссом, обладает хорошими механическими свойствами, стабильной текстурой, достаточно устойчив к окислению. К его недостаткам можно отнести ферромагнитные свойства ($T_C = 335\text{K}$), вызывающие потери при использовании ВТСП – проводов на переменном токе.

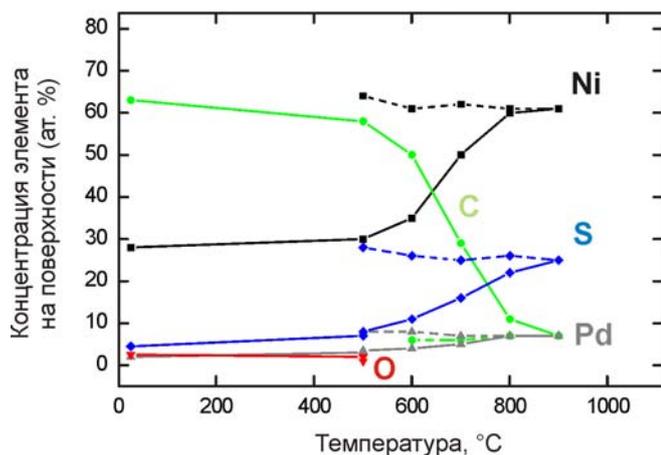


Рис. 2. Обогащение поверхности лент палладием и серой. Сплошные линии – нагрев, пунктир – последующее охлаждение образца.

Результаты по исследованию процессов текстуробразования в лентах, содержащих палладий, суммированы в совместной работе ИФМ УРО РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова [2]. В работе получены ленты состава $\text{Ni}_{94}\text{Pd}_6$ и $\text{Ni}_{92.5}\text{Pd}_5\text{W}_{2.5}$ с острой кубической текстурой. Хотя этот материал вряд ли имеет боль-

шую практическую значимость (палладий слишком дорог в качестве легирующего компонента), в [2] рассмотрен ряд явлений, имеющих ценность для понимания процессов, сопровождающих текстуробразование в холоднокатаных лентах. Обнаружено необратимое обогащение поверхности текстурированного сплава $\text{Ni}_{94}\text{Pd}_6$ палладием и серой при нагревании сплава (рис. 2). Действительно, концентрация S на поверхности повышается более чем в 2 раза относительно концентрации никеля. При этом серы в объёме образца содержится существенно менее 0.1%, то есть происходит обогащение поверхности микропримесью более чем в 1000 раз! Это поведение обусловлено явлением сегрегации примесей на поверхности, которое играет в технологии ВТСП очень важную роль. В настоящий момент достоверно известно, что именно сегрегация атомов серы ответственна за эпитаксиальный рост оксидного буферного слоя. Однако до конца механизм влияния серы на промотирование ориентированного роста пока не раскрыт. Сегрегация же металлических компонентов текстурированных лент-подложек до сих пор практически вообще не изучалась, хотя очевидно, что она также может оказывать существенное влияние на эпитаксию. Работа [2] в некотором смысле открывает эту важную тему. Более полное понимание процессов, происходящих на поверхности текстурированной ленты, совершенно необходимо для успешного развития технологии ВТСП-проводников второго поколения.

Альтернативой никелю, как материалу текстурированных подложек, является медь. Она превосходно текстурируется, более проста в обработке, в несколько раз дешевле никеля. Однако получение на медных подложках ВТСП слоя связано с серьёзными технологическими затруднениями, которые удалось решить пока только американцам из ORNL [3]. Развиваемый ими подход с осаждением в качестве первого слоя нитрида титана (затем MgO и LaMnO_3) достаточно сложен, чтобы стать масштабной технологией. По медной тематике интересная работа находится сейчас в стадии публикации [4]. Авторы из Дрездена изучали текстуробразование и определяли механические характеристики меди и её сплавов с 1-3 ат. % Al, Mn и 35 ат. % Ni. Оказалось, что алюминий и марганец даже в небольших количествах нарушают процесс образования кубической текстуры; образцы с высокой степенью текстуры авторам удалось получить только для чистой меди и её сплава с никелем. При этом легирование меди 35 ат. % никеля приводит к повышению содержания двойников в 5 раз, средний размер зёрен уменьшается с 45 до 28 мкм, но зато твёрдость по Викерсу возрастает с 57 до 120.

Этим же авторам принадлежит интересная разработка по получению текстурированных лент с вытянутыми в направлении прокатки зёрнами, про которую мы уже писали в выпуске №3 за 2006 г. В

Appl. Phys. Lett. вышла очередная статья по этой теме [5]. Удлинение зерен позволяет уменьшить количество межзеренных границ на пути тока. Критический ток в ВТСП-покрытиях на таких лентах заметно анизотропен – в собственном поле в направлении вдоль ленты он в 4 раза превышает критток поперек ленты. Такую микроструктуру удалось получить пока только на лентах из меди и никеля, микролегированного серебром.

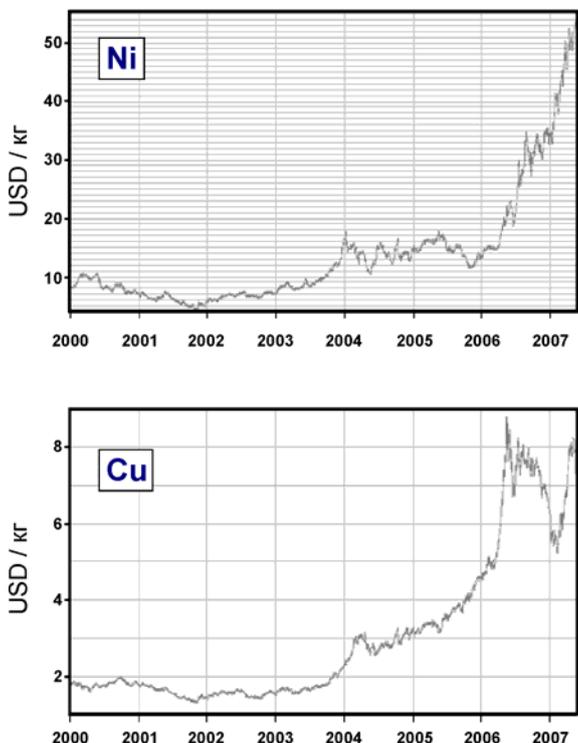


Рис. 3. Биржевые цены на покупку никеля и меди за последние 7.5 лет [6].

В заключение отметим быстрый рост цен на цветные металлы, который может сыграть свою роль в коррекции планов компаний, производящих ВТСП-провод. Это касается как выбора материала для ленты, так и желаемой цены в 10 \$/кАм, которая появилась из сравнения потенциальной цены ВТСП с ценой обыкновенного медного проводника. Медь прибавила в цене с 2000-го года в 4 раза (основной рост пришёлся на 2006-2007-й годы), а никель более чем в 5 раз (рис. 3).

С.В. Самойленков

1. Pinaki P. Bhattacharjee et al., *J. Mater. Sci.*, **42**, 1984 (2007).
2. В.М. Счастливец и др., *ДАН, серия химическая*, **412**, 361 (2007).
3. Cantoni et al., *J. Mater. Res.*, **18**, 2387 (2003).
4. Sarma et al, *J. Mater. Sci.*, в печати
5. Eickemeyer et al., *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 012510 (2007).
6. по материалам сайта <http://www.lme.co.uk>.

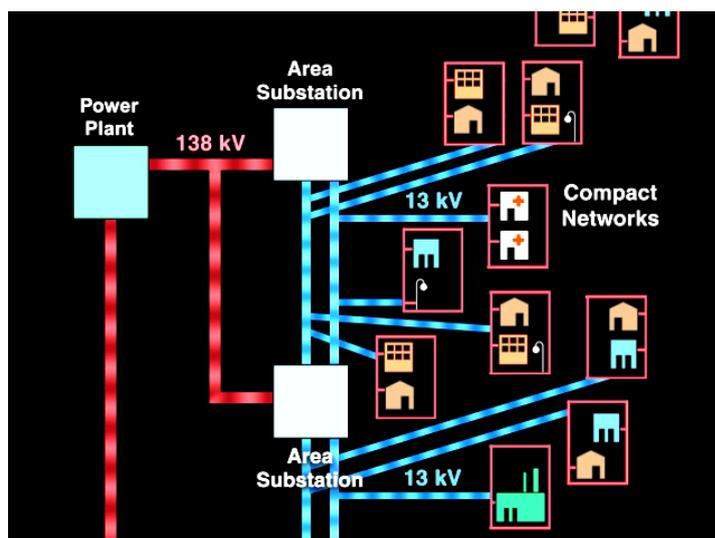
ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

Новые решения для распределительных сетей на основе ВТСП кабелей

21 мая корпорация American Superconductor (AMSC) объявила о подписании контракта с Con Edison на разработку и внедрение новой ВТСП технологии безопасности энергосистемы в сеть коммерческого центра города Нью-Йорк. Цель – защитить центр от любых перерывов энергоснабжения, причиной которых могут быть аварии из-за погоды, повреждения сети или актов терроризма. Название «Проект Гидра» («Project Hydra») программа получила по ассоциации с многоголовым мифическим чудовищем. Подобно тому, как у него отрастали головы после их отсечения, электроснабжение должно иметь множество запасных каналов на аварийные случаи (рис. 1).

Рис. 1. Схема размещения ВТСП кабеля на 13 кВ в распределительной сети низкого напряжения. Power Plant – электростанция, Area Substation – подстанция, Compact Networks – группа потребителей на общем фидере.

Полная стоимость Проекта оценивается в 39.3 млн. долл. Министерство национальной безопасности США ([Department of Homeland Security \(DHS\)](http://www.dhs.gov)) пла-



нирует инвестировать в данный проект 25 млн. долл., ожидая, что в дальнейшем это позволит использовать технологию безопасных энергосистем «Secure Super Grid™» на основе ВТСП проводов, кабелей и токоограничителей в сетях США. 18 мая Министерство подписало с AMSC предварительное соглашение на 1.7 млн. долл. (из них 1.1 млн. долл. от DHS), и работа над проектом началась. Подписано отдельное соглашение между AMSC и Con Edison – субподрядчиком этого проекта.

Размещение ВТСП кабеля в сети Нью-Йорка планируется осуществить за три года двумя этапами. Первый, уже начатый этап, состоит в подготовке прототипов систем. К 2008 г намечено завершение испытаний первой системы Secure Super Grid.

Второй этап сфокусирован на размещении этой системы на участке энергосети Con Edison в Нью-Йорке. В рамках проекта к 2010 г фирмой [Southwire Company](#) (США) (по контракту с AMSC) будет изготовлен триаксиальный «Triax™» кабель из ВТСП провода 2-го поколения «344» на 13 кВ (рис. 2).

AMSC предлагает новую СП технологию «Secure Super Grids™» для энергосистем большой мощности с защитой от перенапряжения, обеспечивающую безопасное и эффективное снабжение электроэнергией предприятий города.

Почему ВТСП кабели могут помочь при решении проблем с постоянно увеличивающейся потребностью мегаполисов в электроэнергии? Во-первых, кабели из ВТСП могут передавать в 10 раз большую мощность по сравнению с традиционными медными кабелями при аналогичном сечении кабельного канала (рис. 2). Во-вторых, замена медных кабелей, используя уже имеющиеся в грунте коммуникации, позволит обеспечить недостающие мощности без дополнительного проведения дорогостоящих земляных работ. Кроме того, при необходимости новых распределительных или подводных электроэнергии сетей объем прокладочных работ также существенно меньше, чем в случае традиционных медных кабелей.

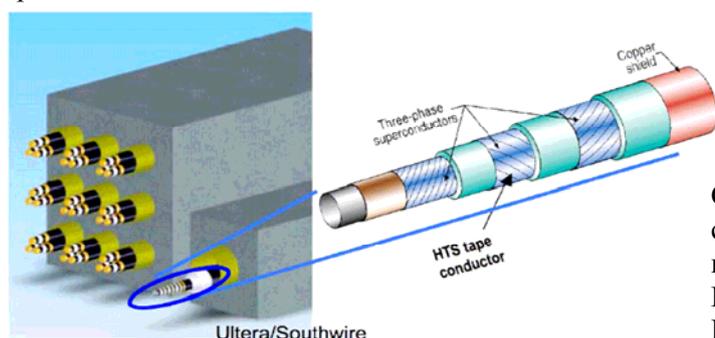


Рис. 2 Сравнение 3x3 сборки кабельного блока подземной распределительной сети из медного кабеля с одноканальным кабельным блоком ВТСП кабеля на 13 кВ при одинаковой передаваемой мощности в 69 МВА. Справа схема триаксиального кабеля совместного предприятия Southwire and NKT - ULTERA

В триаксиальном кабеле, как видно на рис 2, все три фазы расположены концентрически вокруг центрального стержня. Такая компактная конструкция позволяет вдвое сократить расход ВТСП провода и уменьшить охлаждаемую поверхность, таким образом, снизив требования к системе охлаждения. Эти особенности конструкции способствуют снижению стоимости СП кабеля.

К настоящему времени много компаний, в том числе и AMSC, занимаются разработкой и испытанием СП токоограничителей. «Secure Super Grids™» технология может соединить свойства ВТСП кабеля высокой мощности и ВТСП токоограничителей в одной системе. Токоограничение может быть достигнуто в кабеле из ВТСП 2-го поколения за счет

сравнительного высокого удельного сопротивления исходных сверхпроводящих лент, появляющегося при перегрузке током. По расчетам AMSC, рынок новой технологии и токоограничителей в виде самостоятельных устройств превысит миллиард долларов в год. Исполнительный директор компании Грегори Юрик (Greg Yurek) предполагает, что новое направление послужит катализатором ускоренного внедрения ВТСП технологий в энергетические системы. Он считает «Проект Гидра» удачным соединением трёх идей: концепции Министерства национальной безопасности – вложение средств в инновационные энергетические технологии для повышения уровня безопасности энергосетей; концепции Con Edison – внедрение СП технологии в свой энергетический план «System of the Future» для Нью-Йорка; концепции AMSC – коммерциализация СП технологии для нужд электроэнергетики. «Проект Гидра» имеет мощный фундамент 20 летних разработок ВТСП технологий в США, финансируемых Министерством энергетики и частными компаниями, уже функционируют ВТСП кабели в трех энергетических системах США (см. таблицу на стр.7 этого выпуска).

1. http://www.amsuper.com/documents/NYCAM_SCRRelease-Final.pdf.
2. http://www.amsuper.com/documents/SSGTech_Release-Final.pdf.
3. <http://www.amsuper.com/products/hydra.cfm>.
4. <http://www.superconductorweek.com/pr/0507rmd/south1.htm>.

С дополнительной информацией о действующих сетях с ВТСП кабелями можно ознакомиться на нашем сайте в разделе [ВТСП кабели в сетях](#); а о ВТСП токоограничителях – в предыдущем выпуске Бюллетеня «Сверхпроводники для энергетики».

Мнение рецензента

Предложенная в проекте «Hydra» концепция объединения сверхпроводящими кабельными линиями районных трансформаторных подстанций в единую систему, несомненно, имеет свои преимущества, но не во всех случаях. К тому же это решение уже достаточно давно используется в энергетике, например, в системах тягового электроснабжения метрополитенов, где кабельные переключатели между распределительными устройствами тяговых подстанций в отличие от проекта «Hydra» нормально отключены. Это необходимо для того, чтобы ограничить переток мощности, сулящий перегрузку одних и, соответственно, недогрузку других тяговых подстанций, поэтому включаются они только на случай ремонта или выхода из строя одной из тяговых подстанций. Таким образом реализация поставленной задачи потребует больших капитальных затрат, однако на основе изложенного выше не совсем ясно, удастся ли организаторам этого проекта добиться его приемлемой экономической эффективности.

В.В. Лобынцев

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

Наши в Олбани

Проект сверхпроводящего силового кабеля в г. Олбани, столице штата Нью-Йорк, в настоящее время является крупнейшим действующим проектом среди ВТСП силовых кабелей. Кабель конструкции «три – в – одном» (рис. 1) длиной 350 м изготовлен компанией [Сумитомо](#) (Япония) из сверхпроводника 1-го поколения производства той же Сумитомо. Кабель установлен в 8 июля 2006 года на территории энергетической компании National Grid штата Нью-Йорк и соединяет две подстанции 34.5 кВ. Это первый сверхпроводящий кабель в реальной сети, первый подземный кабель и первый сверхпроводящий кабель, имеющий промежуточную муфту. Весь кабель, включая его криостат и токовые вводы, изготовлены компанией Сумитомо, криогенная система поставлена компанией [ВОС \(США\)](#).

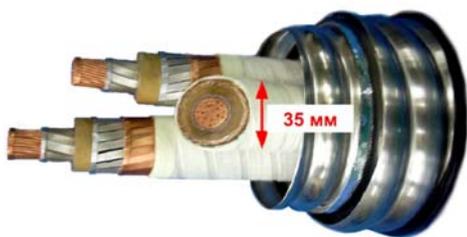


Рис. 1. ВТСП-кабель производства Сумитомо в Олбани.

В апреле этого года, сотрудники ОАО «ВНИИКТ» посетили полигон по испытанию кабеля на территории компании National Grid и осмотрели место входа кабеля под землю. В углу огромной стоянки для аварийных машин компании примостился небольшой «сарайчик» площадью 15×15 м². Сопровождавший нас сотрудник компании [Super Power](#) открыл дверь своим ключом и показал, что находится внутри. За дополнительной дверью жужжала криогенная система, а в небольшом «предбаннике» стоял дисплей, показывающий параметры кабеля и криогенной системы. И больше ничего и никого! Управляется криогенная система полностью автоматически, контролируется дистанционно из офиса компании ВОС в Пенсильвании (примерно за 1000 км от места работы системы). Эта вот полная автономность и автоматичность произвела наибольшее впечатление.

Вход кабеля под землю и его подключение к сети показаны на фото 2 и 3. Кабель проходит в уже имеющемся кабельном коллекторе, под оживленной скоростной магистралью Interstate 90, (которая пересекает всю Америку от Бостона на востоке до Сиэтла на западе). Он имеет один поворот на 90° и одну соединительную муфту через 30 м от своего начала. Эта муфта демонстрирует возможности соединения ВТСП кабелей непосредственно в кабельных коллекторах. А самое главное, уже через пару месяцев первый отрезок кабеля длиной 30 м изготовленный из ВТСП 1-го поколения будет заменен на такой же отрезок кабеля «три-в-одном» фирмы

Сумитомо, но уже изготовленного из ВТСП 2-го поколения производства фирмы Super Power. На этой неделе полностью готовый отрезок кабеля был отправлен из Японии в США.



Фото 2. Вход кабеля в коллектор.



Фото 3. Подключение к сети.

К настоящему времени кабель наработал более 7000 часов. В процессе работы кабеля (с июля 2006 года) в сети произошло одно короткое замыкание, при котором ток в кабеле достиг 7.5 кА, что почти в 10 раз превышает номинальный ток кабеля. Никаких неприятных последствий после этого случая не произошло и после проверки, кабель снова был включен в работу в сети. То есть кабель весьма надежен, не требует специального обслуживания и неприхотлив.

Результаты первого полугодия работы сверхпроводящего силового кабеля в реальной городской электрической сети можно признать весьма успешными и многообещающими. Есть на кого равняться в наших разработках.

Сотрудники ВНИИ КП не отказали себе в удовольствии сфотографироваться на фоне ввода кабеля вместе с ответственным исполнителем по проекту Олбани от компании Super Power доктором Чаком Вебером (фото 4).

Фото 4. Наши в Олбани.



В.С. Высоцкий

Крупнейшие ВТСП кабели

В настоящее время в мире сразу несколько масштабных проектов ВТСП кабелей либо уже находятся на стадии эксплуатационных испытаний в составе энергосистемы, либо вплотную приблизились к ней. В достаточной степени отработана технология прокладки ВТСП кабелей, уже существуют специальные соединительные муфты и разработаны токовые вводы. Для напряжений до 35 кВ уже существует несколько конструкций трехфазных кабелей с общим криостатом. Большинство ВТСП кабелей сделано по схеме с холодным диэлектриком, что сильно упрощает конструкцию кабельных муфт и токовых вводов. В таблице и на рисунке представлены данные по крупнейшим проектам ВТСП кабелей.



Название проекта/страна	Southwire – ULTERA США, Дания	Albany Project США, Япония	Project LIPA США, Германия, Франция	Super-ACE Япония
Сроки выполнения	2003 - 2006 гг.	2003 - 2006 гг.	2003 - 2007 гг.	2000 - 2005 гг.
Сроки испытаний	Начаты в августе 2006 г.	Начаты в июле 2006 г.	Начнутся в 2007 г.	Закончены в 2005 г.
Материал	Bi-2223 лента AMSC	Bi-2223 лента Sumitomo*	Bi-2223 лента AMSC	Bi-2223 лента Furukawa
Тип кабеля	Триаксиальный	«Три в одном» плюс оединительная муфта	Три отдельные фазы в индивидуальных криостатах	Однофазный
Рабочее напряжение, кВ	13	34.5	138	77
Передаваемая мощность, МВА	69	48	574	133
Номинальный рабочий ток, А	3000	800	2400	1400
Число фаз	3	3	3 (каждая фаза в своем криостате)	1
Длина, м	200	350 (320 + 30)*	660	500

Внешний диаметр, мм	143	135	-	133
Максимальный ток кз., кА	20	23	69	-
Максимальная длительность кз., с		0.63 (испытано при 0,13)	0.25	-
Температура хладагента, К	65 – 80	67 – 77	65 – 71	65 – 77
Хладопроизводительность криогенной установки, кВт	2	5 (при 77 К)	более 12	6 (при 77 К)
Максимальный расход хладагента, л/мин	-	50	-	100
Давление хладагента, атм	-	1 – 5	2.6 – 7.5	-

*Вставка длиной 30 м из Bi-2223 ленты будет заменена летом 2007 года вставкой изготовленной из ВТСП ленты 2-го поколения производства Superpower.

1. M.J. Gouge et al, *IEEE Trans. Appl. Super.*, **15**, 1827 (2005).
2. T. Masuda et al, *IEEE Trans. Appl. Super.*, **15**, 1806 (2005).
3. J.F. Maguire et al, *IEEE Trans. Appl. Super.*, **15**, 1787 (2005).
4. A. Kimura, K. Yasuda, *IEEE Trans. Appl. Super.*, **15**, 1818 (2005).

ВТСП УСТРОЙСТВА

ВТСП приводы и генераторы для нужд флота

Сверхпроводниковые технологии чрезвычайно привлекательны для применения на флоте как гражданском, так и военном. Сверхпроводниковые приводы и генераторы отличаются высокой компактностью при массе в 2-3 раза меньшей, чем у традиционных аналогов. Уровень вибраций и шумов также значительно ниже, что важно не только для военных применений, но и для круизных лайнеров и рыболовецких судов. Низкая шумность силовых установок круизных лайнеров способна гарантировать комфорт и тишину во всех пассажирских помещениях при возросшей скорости и вместимости лайнера. Отказ от механических редукторов и переход к прямому приводу гребного вента электродвигателем существенно поднимает к.п.д. силовой установки, следует помнить также и об отсутствии омических потерь в сверхпроводниках. Даже с учетом потребляемой криогенным обеспечением мощности к.п.д. ВТСП электродвигателей выше, чем у традиционных. Однако основной выигрыш от сверхпроводниковых технологий на флоте заключается в невиданной ранее свободе конструирования судна: дизеля (или турбины), работающие на компактные ВТСП генераторы, могут быть размещены без жесткой привязки к гребному валу. Вынос ВТСП гребных электродвигателей в гондолы за пределы корпуса судна не только высвобождает массу места в кормовой оконечности, но и позволяет радикально улучшить гидродинамику. Если же гондолы с гребными электродвигателями сделать поворотными, то можно резко улучшить маневренность судна, не прибегая к установке дополнительных боковых подруливающих устройств.

Хотя в 70-80 гг. прошлого века и было несколько проектов сверхпроводниковых судовых электродвигателей, они не были осуществлены, так как их

реализация на низкотемпературных сверхпроводниках требовала сложного и ненадежного криогенного обеспечения. С появлением коммерчески доступных Bi-2223 ВТСП проводников в мире началось сразу несколько проектов по созданию двигателей, генераторов и синхронных компенсаторов для использования на флоте. Однако при температуре жидкого азота (77К) Bi-2223 ВТСП проводники обладают существенным недостатком: чрезвычайно сильной зависимостью их критического тока от магнитного поля, уже при магнитной индукции в 0.1 Тл критический ток таких проводников падает более чем в два раза. При охлаждении Bi-2223 проводников до уровня температур в 20-40 К, проблема полевой зависимости ВТСП проводников снимается, а критический ток возрастает. Электрические машины на основе Bi-2223 проводников мощностью выше 100 кВт, как правило, работают при температурах существенно меньших, чем 77 К, а для их охлаждения требуется весьма сложное и дорогое криогенное обеспечение. К счастью, наработка на отказ современных криокулеров достигает 20000 часов, что позволяет говорить о возможности их использования на флоте, однако следует иметь в виду, что криогенное обеспечение на 77 К в любом случае будет компактнее, эффективнее, надежнее и дешевле. Ожидаемый эффект от использования ВТСП электродвигателей и генераторов на флоте настолько велик, что даже устройства на основе Bi-2223 проводников, работающие при температуре 20-40 К, будут востребованы, даже при современном уровне цен на ВТСП материалы и криогенное оборудование. Разработка электрических машин на основе Bi-2223 проводников работающих при температуре 77 К представляется чрезвычайно сложной задачей, так как магнитная индукция на обмотке не должна превышать 0.1 Тл, что требует специальных мер по оптимизации обмоток и ферромагнитных сердечников. Мощность электрических

машин на основе Bi-2223 проводников, работающих при 77 К пока не превышает 100 кВт, а массогабаритные показатели лишь незначительно лучше, чем у обычных электрических машин. С появлением ВТСП проводников 2-го поколения, для которых зависимость критического тока от магнитного поля значительно слабее, чем у Bi-2223 проводников, стало возможно создание по настоящему эффективных ВТСП электрических машин, работающих при температуре жидкого азота. Пока электрические машины на основе ВТСП проводников 2-го поколения представлены лишь несколькими мало-мощными макетными образцами.

Ниже подробно описано несколько различных проектов синхронных электрических машин для флота. За рамки данного обзора вынесен целый ряд проектов ВТСП электрических машин: гистерезисных электродвигателей, дисковых машин с массивными ВТСП элементами и прочих устройств, применение которых ни в качестве судового генератора, ни в качестве гребного электродвигателя по ряду причин затруднено или невозможно.

American Superconductor и Northrop Grumman

28 марта 2007 года American Superconductor (AMSC) и Northrop Grumman (NOC) объявили об успешном завершении испытаний крупнейшего в мире ВТСП судового электродвигателя мощностью 36.5 МВт (рис. 1). В проекте также участвовали Ranor Inc, и Electric Machinery Company. Масса электродвигателя составляет 75 т, что в три раза меньше чем для двигателя традиционного исполнения. Сразу по завершению испытаний электродвигатель передали ВМФ США, в последствии предполагается установить электродвигатель на новейший эсминец класса DDG-1000.



Рис. 1. Судовой двигатель AMSC.

В силу военной направленности проекта доступно крайне мало технических деталей устройства. Можно лишь с уверенностью сказать, что мотор изготовлен из Bi-2223 производства American Superconductor и работает при температуре около 30 К. Известно, что весь проект обошелся примерно в 90 млн. долл.

Doosan Heavy Industries

В рамках корейской программы по разработке сверхпроводниковых технологий для электроэнергетики (DAPAS) запланировано создание ВТСП электродвигателей мощностью 70 кВт, 1 МВт и 5 МВт. Синхронные электродвигатели на 100 л.с. (74 кВт; 1800 об/мин.) и 1300 л.с. (957 кВт; 3600 об/мин.) были изготовлены в 2004 и 2007 годах. ВТСП обмотки изготовлены из Bi-2223 ленты производства American Superconductor. Рабочая температура обмоток у обоих моторов 30 К, с охлаждением от криокулеров.

Siemens

Работы над ВТСП электродвигатели начались в Siemens еще в 1999 г. Помимо Siemens в проекте участвуют компании: TransMIT Gesellschaft für Technologietransfer mbH, ThyssenKrupp Marine Systems AG и Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, финансовую поддержку оказывает Министерство по экономике и технологиям Германии. В 2005 г был успешно испытан ВТСП синхронный электродвигатель мощностью 400 кВт, сейчас проходит испытания ВТСП синхронного мотора-генератора на 4 МВт (рис. 2).



Рис. 2. Синхронный ВТСП генератор Siemens.

	Siemens		Doosan	
Номинальная мощность, кВт	400	4000	74	957
Крутящий момент, Н·м	2600	10600	-	-
Скорость вращения, об/мин.	1500	3600	1800	3600
Рабочее напряжение, В	380	6600	380	-
Рабочая частота, Гц	3-50	3-60	-	-
КПД (с учетом криогеники), %	96.8	98.7	-	-
Масса, т	-	6.9	-	2
Габариты (без криогеники), м	-	1.9 × 1.2	-	1.3 × 0.8

ВТСП электрические машины отличаются недостижимой для традиционных устройств перегрузочной способностью до 700% по крутящему моменту в кратковременном режиме и 150% в течение 15 минут по мощности. ВТСП обмотки обоих устройств охлаждаются криокулерами через теплообменный газ до температуры 25 К. Основные параметры электрических машин Siemens и Doosan приведены в таблице.

В.И. Щербаков

1. H.W. Neumuller et al, Supercond. Sci. Technol., **19**, 114 (2006).
2. <http://www.amsuper.com/products/motorsGenerators/marineGenerators.cfm>.
3. <http://www.amsuper.com/products/motorsGenerators/shipPropulsion.cfm>.
4. http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=978900&highlighthttp://www.sei.co.jp/news_e/press/05/05_03.html.
6. <http://www.superconductorweek.com/pr/0407tnx/amsc3.htm>.
7. <http://www.superconductorweek.com/pr/0407tnx/siemens1.htm>.

КОНКУРСЫ

Человек Года в Индустрии Сверхпроводников

В понедельник, 21 мая, 2007 г международному бизнес сообществу и научной аудитории были представлены победители престижной премии «Человек Года в Индустрии Сверхпроводников».

Согласитесь, что на фоне непрекращающихся дискуссий о необходимости тратить огромные деньги на развитие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в нашей стране, где само словосочетание ВТСП и Промышленность вызывает скорее улыбку, такое выделение успехов сверхпроводящих материалов на коммерческом рынке (если конечно это не чисто рекламная акция) сразу привлекает всеобщее внимание. Всем уже порядком надоели разговоры о том, что на западе материалы, созданные на базе ВТСП, широко используются в быстро развивающихся отраслях производства энергетических установок, начиная от магнитного резонанса до ядерной энергетики. Что сверхпроводники, передавая энергию без потерь, в скором времени могут преобразовать многие отрасли промышленности, включая электроэнергетику, коммуникации, вычислительную технику, нанотехнологию и транспорт. Однако, как видно, одними разговорами дело не обходится.

Издание Superconductor Week, публикующее материалы по внедрению и использованию сверхпроводников, а также технологии их производства, сегодня выделило двух лидеров в промышленном применении ВТСП в мировом масштабе. Так кто же

эти герои, и за какие достижения они удостоились такого внимания?

Премией “Человека Года в Индустрии Сверхпроводников” – наиболее престижной международной наградой за вклад в развитие и коммерциализацию



Сверхпроводников, были награждены:

Сверхпроводников, были награждены:

Амалия Балларино (Amalia Ballarino), – Лидер проекта сверхпроводящих токовводов для Large Hadron Collider (CERN), – ускорителя частиц, предназначенного для работы на самых передовых рубежах физики и расширения нашего по-



нимания Вселенной. Др. Джэймс Далеи (Dr. James Daley) - в недавнем прошлом Менеджер ВТСП Программы в Американском Министерстве энергетики США, чья деятельность на этом посту была по достоинству оценена правительством присуждением ему Lifetime Achievement Award.

Краткая характеристика деятельности претендентов:

Ballarino Heralds – коммерциализация ВТСП

Боле 1000 ВТСП токовводов переносят 3000000 А ток к тысячам сверхпроводящих магнитов большого ускорительного кольца ЛНС в CERN. Как менеджер Проекта, Амалия Балларино была ответственна за, проведение начального испытания и отбор материалов, разработку концептуального и детального технического проекта токовводов, налаживание связи между промышленными предприятиями и научными лабораториями, для производства и испытания конечного продукта.

Вот, что сказал Марк Биттерман – Исполнительный Редактор Superconductor Week ~ 99% всех токовводов ЛНС уже поставлено и успешно испытано в 2006, следует признать, что работа Балларино, представляет собой самое большое коммерческое использование ВТСП в мире, далеко выходящей за границы CERN. Чтобы достичь своих экстремальных характеристик, огромные сверхпроводящие магниты ЛНС охлаждаются сверхохлажденным жидким гелием до температуры более низкой, чем в космосе (1.9 К, или -271 С). При этом источники тока находятся при комнатной температуре. Таким образом, необходимо было решить сложную техническую задачу – подвести огромное количество

электрической энергии без значительной передачи тепла. В теории токовводы на основе ВТСП, обладая хорошими электропроводящими и низкими теплопроводящими характеристиками, очень хорошо подходят для решения этой задачи, но как осуществить это на практике, ведь в случае ЛНС, использование ВТСП должно приводить к уменьшению потока тепла к ванне с жидким гелием более чем в десять раз. Здесь необходимо соединить талант ученого со способностями руководителя крупного проекта.

Кен Маркен, лидер Центра Технологии Сверхпроводников Лос Аламосской Национальной Лаборатории заявил, что Балларино в большой степени ответственна за успех программы ВТСП токовводов в ЛНС, который открывает двери для широкого использования ВТСП в коммерческих целях.

Dr. James Daley – новые бизнес-схемы для развития ВТСП технологий

Доктор Джеймс Далеи, работая в Министерстве Энергетики США, разрабатывал и руководил программами, играющими ключевую роль в организации сотрудничества между бизнесом и правительством. Это сделало ВТСП программу, столь успешной, что обеспечило лидерство ВТСП программы США почти на два десятилетия.

Марк Биттерман – “Он (Далеи) признан Чемпионом по организации кооперативных товариществ между правительством и промышленностью, его забота о налаживании контактов между исследованиями и внедрением привела к успешной реализации ~ 90 совместных проектов между промышленными предприятиями и национальными лабораториями. Доктор Далеи также отмечен за организацию большого ряда Симпозиумов по Развитию промышленного изготовления ВТСП проводов”.

Боб Хавсей, Директор программы по Эффективному использованию энергии, возобновляемым источникам энергии (Оак-Риджской Национальной Лаборатории) сказал, что перед приходом Джима Далеи в Вашингтон не имелось никакого механизма для организации сотрудничества промышленности и национальных лабораторий. Далеи ввел новый инструмент ускорения продвижения научных разработок в ВТСП материалах в электроэнергетику – Программу партнерства в использовании СП в электроэнергетике (SPI). Эта инициатива помогла держать Американскую программу в положении лидера в международной гонке по коммерциализации ВТСП. Доктор Далеи был менеджер Программы ВТСП для электроэнергетики с самого начала. Перед приходом в министерство, в течение 15 лет доктор Далеи был сотрудником Аргоннской Национальной Лаборатории, выполняя исследования в разных областях науки, включая ядерную энергетику, создание двигателей на ВТСП, и создание систем безопасного использования и хранения электроэнергии.

Как можно видеть, премия действительно присуждена за титанический труд по масштабному внедрению ВТСП на коммерческий рынок. Этот пример показывает, что для широкого внедрения ВТСП необходимо параллельно развивать научную, материальную (промышленную) базу и главное искать людей способных организовать сотрудничество (как это многим не покажется странным) между учеными, бизнесменами и правительством. Как всегда – кадры решают ВСЕ.

А.А. Никонов

1. Suprconductor Week, 21, no. 9, 1 (2007).