

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 2 выпуск 4
август 2005

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы
Генераторы
Токоограничители

Инвесторы
Накопители

РЕКОРДЫ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

3 августа 2005 г. Intermagnetics' SuperPower (США) сообщила о достижении нового рекорда в параметрах ВТСП проводов 2 поколения (2G) – более **22000А-м** в проводе длиной **206 м**. ("Ампер-метр" – общепринятая мера для параметров ВТСП проводов, равная критическому току в проводе в Амперах, умноженному на длину провода в метрах). Новый рекордный 2G провод на 35-50% тоньше проводов предыдущего варианта за счет уменьшения на 50% толщины подложки, что позволяет их упаковать более емко, обеспечивая большую эффективность катушек для применения в моторах, генераторах, трансформаторах.

Los Alamos Nat. Lab. изготовила из новых тонких проводов прототип электромагнитной катушки, продемонстрировав их высокую механическую прочность.

Тонкий 2G провод (длина 207 м, ширина 4 мм) с медным стабилизатором и средним критическим током 140 А-см поставлен японской компании Sumitomo, которая изготовила демонстрационный 2G кабель длиной 1 м с уменьшенными потерями на переменном токе.

Новые катушки были поставлены компании Rockwell для 7,5 л.с. ВТСП мотора, который развил в 6 раз большую мощность в сравнении с подобным мотором, изготовленным из проводов предыдущей версии.

SuperPower изготовила электромагнитную катушку из провода длиной 20 м для демонстрации способности провода в катушке создать более высокое магнитное поле при 77 К, недостижимое с 1G проводами.

Испытания диэлектрических свойств новой конфигурации стабилизатора, проведенные в Oak Ridge Nat. Lab., показали ее пригодность для высоковольтных применений.

SuperPower изготовила также 2G провод шириной 1 мм с уменьшенными потерями на переменном токе, важные для оборонных применений. Технология нового 4 мм провода обеспечивает высокую производительность – скорость изготовления проводов большой длины до 30 м/час.

<http://www.igc-superpower.com>

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОМПАНИИ

American Superconductor Corporation (AMSC), США

American Superconductor Corporation основана в 1987 г., центральный офис расположен в Westborough (шт. Массачусетс), число сотрудников – 263. У истоков компании два известных американских ученых – Dr. Greg Yurek и Dr. Alex Malozemov.

AMSC является мировым поставщиком ВТСП проводов и больших сверхпроводящих машин, а также мировым лидером в разработке и поставке установок стабилизации динамической реактивной мощности в электросетях. AMSC's ВТСП провода и мощные электрические преобразователи являются основой широкого спектра устройств для передачи и распределения электроэнергии, транспорт-

И далее...

AMSC:

Ускорение перехода к 2G ВТСП проводам	2
2G 344 ВТСП провода	3
344 провода в изделиях	4
Годовой доход компании	5

ВТСП МАТЕРИАЛЫ

ВТСП ленты в Японии6

НТСП провода совершенствуются.....6

ВТСП УСТРОЙСТВА

От летящей тележки к летящим поездам.....6

ТОРЖЕСТВА

100 лет Альберту Иосифовичу Бертинову 7

ных средств, медицинской аппаратуры и промышленности, включая стабилизаторы реактивной мощности, большие моторы для судовых двигателей, генераторы, сверхпроводящие кабели, и перспективные оборонные системы

Продукция компании защищена сотнями (более 700) патентов и лицензий. Торговые марки American Superconductor - *AMSC*, *POWERED BY AMSC*, *Revolutionizing the Way the World Uses Electricity*. Среди потребителей продукции *AMSC* - General Electric Energy, Oxford Instruments, Nexas, Southwire, DuPont, *RICOR* (США), Central Japan Railway Company, Toshiba (Япония), *CERN* (Швейцария), Chinalight Oriental Corporation (Китай), *NKT* (Дания), *LG Cable* (Ю.Корея), *CONDUMEX* (Мексика), Siemens (Германия), *Škoda* (Чехия), *BISWIRE* (ЕС) и т.д. – 88 потребителей из 20 стран мира.

Технологические разработки *AMSC*

AMSC разработала технологию и перешла к выпуску на коммерческой основе ВТСП проводов первого поколения (1G) на основе *Bi*-системы. Завод по производству проводов запущен в марте 2004 г. На сегодняшний день *AMSC* поставила в различные страны

мира более 540 тысяч метров 1G ВТСП проводов (155 тыс. м – в 2004 г. и 369 тыс. м – до марта 2005 г.)

На стадии коммерциализации находятся следующие изделия на 1G ВТСП проводах - судовые двигатели, синхронные конденсоры, силовые кабели, установки контроля материалов.

Ускорение перехода к 2G ВТСП проводам

Из-за высокой стоимости 1G ВТСП проводов *AMSC* с января 2005 г. ускоряет переход к технологии 2G ВТСП проводов на основе тонких пленок *YBCO*, ожидая снизить их стоимость в 2-5 раз в сравнении с 1G проводами. Компания подготавливает оборудование для пилотной линейки по производству 2G проводов с использованием широкой 4 см ленты и к декабрю 2007 г планирует достичь на этом производстве выпуска 2G ВТСП проводов до 300 тыс. м в год (вложив в обеспечение технологии до 10-15 млн. долл.), а затем запустить полномасштабное производство до 8,4 млн. м в год (по оценкам, к этому времени такой объем будет востребован потребителями). Переход к полномасштабному производству потребует 25-30 млн. долл. вложений.

Точка пересечения 1G и 2G проводов

(1G будут рабочей лошадкой в промышленности ближайшие 2-3 года)

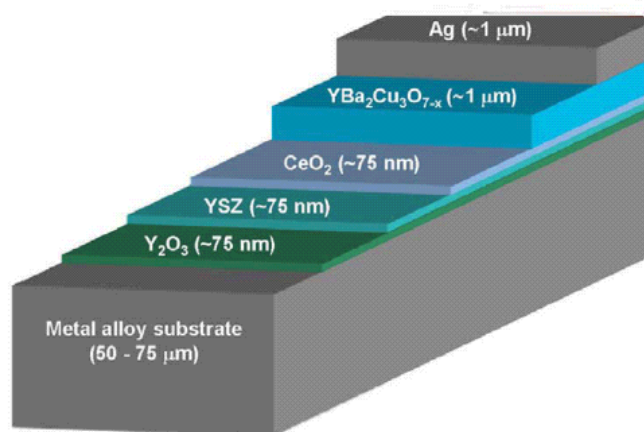


AMSC использует в качестве исходного полупродукта широкие полосы (до 4 см) относительно дешевого сплава *Ni-5%W* (текстурируемые в процессе деформации), буферные слои $Y_2O_3/YSZ/CeO_2$ с высокой скоростью реактивного распыления, технологию осаждения ВТСП слоя *YBCO* из паров металлоорганических (*TFA*) соединений и верхний защитный слой *Ag*, осаждаемый магнетронным распыле-

нием на постоянном токе. Планируется переход от 4 см к 10 см полоскам, что приведет к дальнейшему снижению стоимости проводов.

Конечная структура ленточного провода имеет вид, представленный на рис.

Width Evolution:
1 cm → 4 cm → 10 cm



**Новая технология 2G проводов
промышленного стандарта –
344 ВТСП провода**

В августе 2005 г. AMSC заявила о дальнейшем совершенствовании 2G ВТСП проводов, разработав новую технологию и архитектуру 2G провода. Для их обозначения AMSC ввела новую аббревиатуру – 344 ВТСП провода. 344 – это трехслойные провода шириной 4,4 мм и длиной на сегодня – 80-100 м.

Для их изготовления используют непрерывный процесс, включающей наложение и продольную резку по всей длине с намоткой на катушку (continuous reel-to-reel deposition processes). Эти технологические достижения позволили значительно увеличить электрическую и механическую стабильность 2G ВТСП проводов.

Первоначально изготавливают широкие полосы 2G материала, затем эти полосы разрезают вдоль для получения лент длиной 80-100м, которые затем прокатывают совместно с медными (или из другого металла) лентами в тонкие трехслойные ленты, используя мягкий припой. В результате получают сэндвич из 2G ВТСП слоя, заключенного между тонкими медными полосками.

Транспортный ток в 344 ВТСП проводах длиной 5 м – 125 А (77 К). Это – рекордный ток для 2G ВТСП проводов стандартных геометрических размеров.

AMSC также изготовила ВТСП провод шириной 4,4 мм, состоящий из двух лент, которые были прокатаны вместе с медными лентами. Полученный сэндвич проводил ток 240 А (545 А/см ширины) при 77 К.



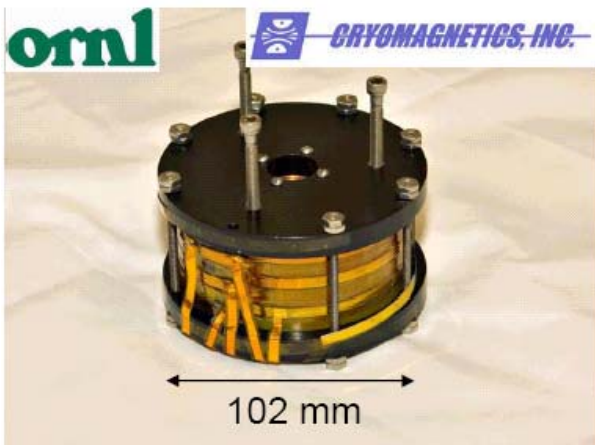
Архитектура	трехслойная, медные слои с обеих сторон ВТСП слоя
Ширина провода	4 мм
Прочность	выше требований промышленности
Электрические контакты	с обеих сторон
Стабилизатор	по требованию заказчика для конкретных применений
Стабильность в окружающих условиях	герметичен
Соединение	стандартная конфигурация с перекрытием (внахлест)

Новый технологический процесс достаточно гибкий и допускает различные варианты этапов в зависимости от требований заказчиков (см. рис.).



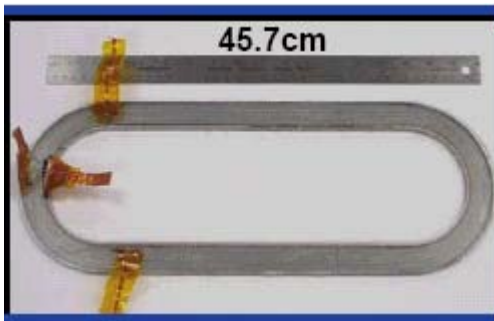
Примеры использования 344 ВТСП проводов в экспериментальных изделиях

Галетная катушка (изготовлена Oakridge Nat. Lab. из 344 проводов AMSC)



Число ампер-витков – 18042; критический ток – 31А (77В); поле по центру – 0.32Тл

Рейстрековая катушка (изготовлена AMSC)



Длина провода – 87 м; число ампер-витков – 4620; критический ток – 55А (77К)

Перспектива технологии MOD (осаждение из паров металлоорганических (TFA) соединений)

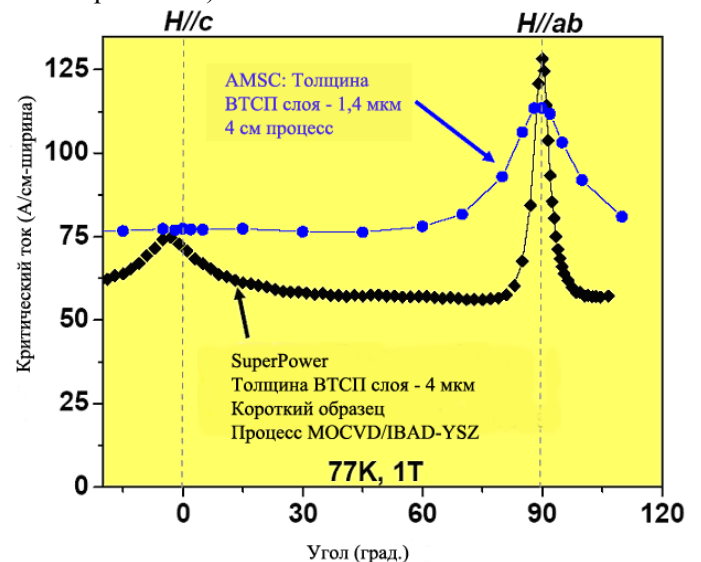
MOD технология позволяет формировать более толстые (до 1,4 мм) ВТСП покрытия, способные пропускать ток с плотностью $J_c=15800\text{A}/\text{cm}^2$.



В варианте наслоения двух MOD проводов плотность инженерного тока достигает величины $J_e=20000\text{A}/\text{cm}^2$

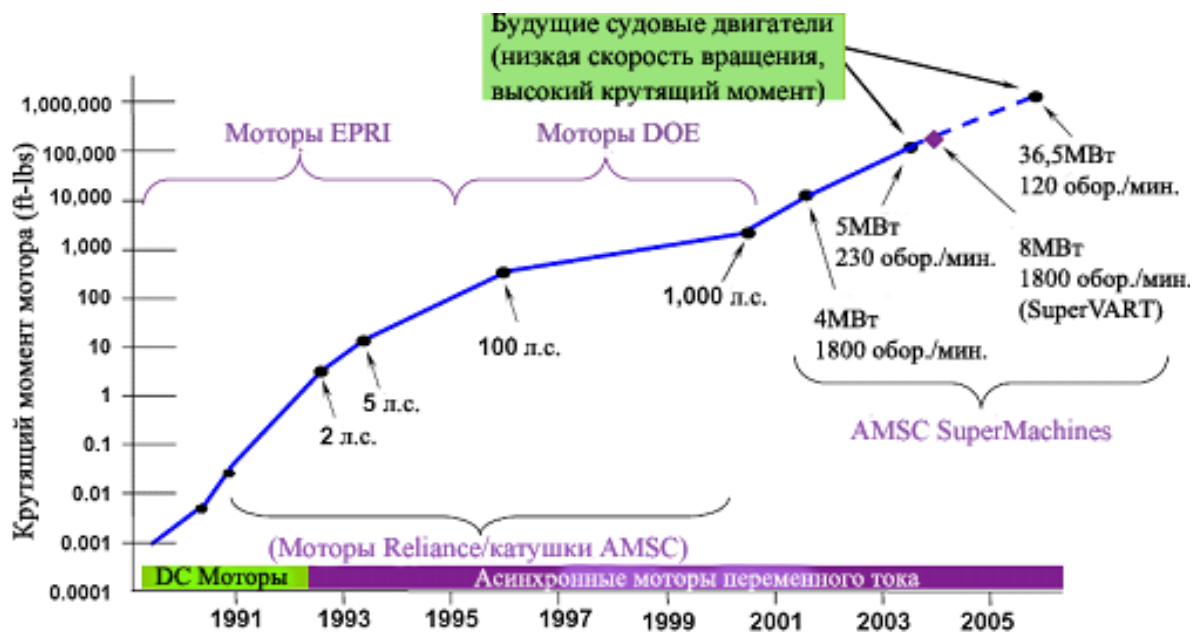


Сравнение поведения критического тока в магнитных полях различной ориентации относительно кристаллографических осей ВТСП слоя для новых 2G проводов AMSC и 2G проводов компании SuperPower (на рис. синий цвет – провода AMSC, черный – SuperPower).



AMSC по контракту с ВМС США разрабатывает и изготавливает ВТСП мотор для судовых двигателей (торговая марка SuperMachines) мощностью 36,5 МВт. Традиционный мотор аналогичной мощности весит 300 тонн, а ВТСП – 75 тонн при меньших размерах, большей эффективности, меньшем шуме при эквивалентной стоимости. В июле 2003 г. компания изготовила и поставила заказчику первый экспериментальный 5 МВт ВТСП мотор, который прошел испытания на стендах ВМС США. 36,5 МВт мотор будет поставлен летом 2006 г. Компания проводит сбор информации о других возможных потребителях ВТСП моторов. К слову, проекты ВТСП моторов для судовых двигателей появились в Европе и Японии.

На рис. – динамика улучшения параметров ВТСП моторов *AMSC* в 14 летний период с 1991 по 2005 г.г.



AMSC принимает участие в реализации политики правительства США на замену стареющего оборудования и сетей в энергосистеме США, являясь главным подрядчиком в проекте установки в 2006 г. ВТСП электрокабеля для действующей электросети на территории East Garden City, Long Island (шт. Нью-Йорк). В сеть напряжением 138 кВ будет включен ВТСП кабель длиной 610 м. Субподрядчик по изготовлению кабеля – компания Nexans, которая изготовит кабель из ВТСП проводов компании *AMSC*.

AMSC также примет участие в других ВТСП кабельных проектах:

Соисполнитель	Место установки ВТСП кабеля
LG Cable Company, Ю.Корея	District of Gueongbuk, South Korea
Cheng Tong Company, Китай	District of Lanzhou, China
Utera (Southwire/nkt Cable Company), США	Columbia, Ohio (заказ – апрель 2005 г)
Condumex Cable Company, Мексика	Mexico City, Mexico (заказ – июнь 2005 г)

AMSC разработала устройство стабилизации реактивной мощности в электросетях – SuperVAR™ и первые 5 устройств готовит к поставкам для Tennessee Valley Authority (*TVA*). Прототип SuperVAR уже установлен на подстанции *TVA*. Первая поставка коммерческого SuperVAR намечена на лето 2006 г.

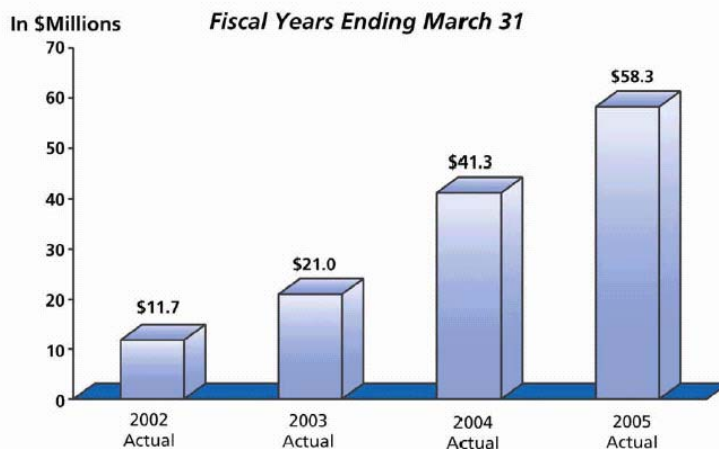
Партнеры *AMSC*

С февраля 2005 г. *AMSC* вступила в альянс с компанией Siemens (Германия) для совместной разработки ограничителей тока, предназначенных для сглаживания бросков тока в электросетях. *AMSC* будет поставлять 2G ВТСП провода, а Siemens – разрабатывать и поставлять токоограничители. К слову, Министерство энергетики США оценивает рост рынка в ближайшие 15 лет токоограничителей в несколько млрд. долл..

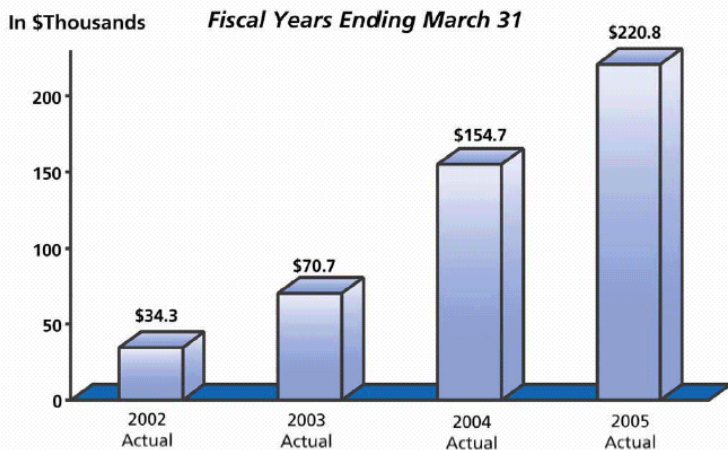
Другие проекты с проводами *AMSC*

Quantum Design (США) разработала и поставляет новую измерительную систему для исследования материалов. В ее состав входит электромагнитная катушка фирмы HTS-110 Ltd, изготовленная из *AMSC* ВТСП проводов. В ближайшие 6-9 месяцев Quantum Design планирует изготовить и поставить заказчику 20 таких систем.

Central Japan Railway Company (Япония) планирует испытать поезд с ВТСП электромагнитом осенью 2005 г. Электромагниты изготовлены из *AMSC* ВТСП проводов.



Увеличение оборота компании с 2002 по текущую ситуацию в 2005 году



Выработка на одного сотрудника компании

По материалам Web сайта компании AMSC -

<http://www.amsuper.com>

ВТСП МАТЕРИАЛЫ

ВТСП ленты в Японии

Sumitomo Electric Industries (SEI) продолжает совершенствовать технологию длинномерных 1G ВТСП лент на основе $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ - (Bi-2223). Традиционно Bi-2223 ленты изготавливают по технологии порошок-в-трубе (powder-in-tube – PIT) – исходным ВТСП порошком заполняют серебряные трубки, прокатывают и отжигают. В процессе прокатки порошок уплотняется до необходимой плотности, но при этом возникают трещины приводящие к снижению критического тока. Собственно для удаления трещин вводят процесс отжига. Специалисты Sumitomo усовершенствовали процесс отжига, проводя его при повышенном давлении, что позволяет «залечить» трещины и избежать снижения плотности порошка, сопровождающего процесс отжига при атмосферном давлении. В процессе отжига при атмосферном давлении относительная плотность проводников достигала 85%, критический ток – 99А (77К, 0Тл), а при повышенном давлении – плотность 100%, критический ток до 140А. С использованием отжига при повышенном давлении удалось получить однородные ВТСП ленты толщиной от 0,2 до 0,24 мм, шириной в диапазоне 4 – 4,5 мм и длиной до 1500 м с хорошими механическими характеристиками (напряжение растяжения около 300МПа, что достаточно для намотки магнитов).

SEI использует собственные ВТСП провода для конструирования и изготовления ВТСП кабелей. В июле 2005 г. SEI анонсировала поставку коммерческого ВТСП кабеля в Ю.Корею (KEPCO), а также предполагает поставлять коммерческий ВТСП кабель для Министерства энергетики США для проекта Albany. Кабель SEI будет установлен и включен в сеть Albany в течение 2006 г. SEI полагает, что она будет доминировать по продаже 1G проводов на мировом рынке до 2014 г.

Fujikura Ltd разрабатывает ионно-лучевой метод (Ion Beam Assisted Deposition – IBAD) как основу получения 2G ВТСП лент. Разработав большие источники ионов, Fujikura на новом IBAD оборудовании стала стабильно осаждать буферные высокоориентированные слои $Gd_2Zr_2O_7$ со скоростью 5 м/час на ленты-подложки длиной до 500 м. ВТСП пленки Y-системы с внедренными наночастицами (для улучшения пиннинга) синтезируют методом импульсного лазерного осаждения. На конец 2004 года этим методом получены ленты с током 126 А на длине 105 м. Из этих лент изготовлен соленоид, устойчиво работающий при 77 К.

1. *Superconductivity Web 21, 2005, 15 July*

[\(www.istec.or.jp/Web21/\)](http://www.istec.or.jp/Web21/)

НТСП провода совершенствуются

В ряде применений пока нет конкурентов НТСП проводникам (Nb_3Sn , Nb_3Al) – это ускорители частиц и ЯМР томографы. Снижая содержание меди в стабилизирующей матрице, Oxford Instruments (США) достигла в Nb_3Sn проводниках плотность критического тока 600000 A/cm^2 (4,2 К, 12 Тл). Более высокие критические поля и лучшие в сравнении с Nb_3Sn механические свойства имеет Nb_3Al с перспективой применения в ускорителях частиц, термоядерных реакторах, ЯМР томографах. На сегодня, используя новую технологию «быстрый нагрев-закалка-трансформация» (rapid heat-quenching-transformation – RHQT), изготовлены Nb/Al провода-прекурсоры длиной до 2600 м. При введении в Nb_3Al примесей, усиливающих пиннинг, возможно достижение критических полей до 15 Тл.

Быстрый прогресс реализуется на проводах недавно открытого сверхпроводника MgB_2 , изготавливаемых методом «порошок-в-трубе». Несмотря на раннюю стадию исследований, уже сегодня получены ленты длиной до 1000 м. Важно, что эти материалы имеют высокое магнитное поле необратимости (второе критическое поле) – до 10 Тл при 20 К, величина, аналогичная достигнутой на коммерческих проводах $NbTi$ при 4,2 К. Однако, критический ток в MgB_2 проводниках еще невысок. Его повышение связывают с различными легирующими примесями, из которых наиболее обнадеживают наночастицы SiC , при добавлении которых достигнута критическая плотность тока 60000 A/cm^2 (20 К, 4 Тл).

1. *Superconductivity Web 21, 2005, 15 July*

[\(www.istec.or.jp/Web21/\)](http://www.istec.or.jp/Web21/)

ВТСП УСТРОЙСТВА

От летящей тележки к летящим поездам.

Идея транспорта на магнитном ВТСП подвесе медленно, но верно реализуется. Основные достоинства такого транспорта – бесшумность, высокие скорости, экологическая безопасность, низкие энергозатраты. Существует два направления разработок – пригородный транспорт, связывающий мегаполис с

аэропортом, и высокоскоростной транспорт на большие расстояния. Даже краткий перечень маглев-проектов говорит о масштабах проводимых разработок. В США, Германии, Японии, Китае реализованы проекты поездов на основе магнитного подвеса, созданы испытательные участки высокоскоростного наземного транспорта. В России в Московском авиационном институте совместно с ОАО «Новые транспортные технологии» и при участии *IPHT* (г. Йена, Германия) разработаны действующие модели транспорта с магнитным подвесом на основе массивных ВТСП элементов на экипаже и с редкоземельными магнитами на полотне дороги. Разработаны, спроектированы и созданы модели



Аналогичная конструкция транспортного экипажа с магнитным подвесом на основе массивных ВТСП элементов испытывается в Китае [2] с 2000 года. Для испытаний изготовлен участок полотна из *NdFeB* длиной 15,5 м и левитирующий транспортный экипаж длиной 3,5 м. Экипаж рассчитан на четырех пассажиров. Общий вес транспортного средства с четырьмя пассажирами равен примерно 530 кг.

За три года эксплуатации экипаж перевез 27000 человек, а суммарное пройденное расстояние составило 400 км.

И.А. Руднев

1. *Перст*, 2004, 11, вып.5

http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2004/4_05/index.htm

подвеса с магнитными ВТСП опорами для экспериментальных исследований их параметров.

В настоящее время в МАИ проходит испытание на 5 м участке модель транспорта на магнитном ВТСП подвесе. Масса левитирующего экипажа 500 кг. Зазор между экипажем и полотном составляет 3 см. Длительность левитации до полного выкипания криоагента – около 3 часов, при своевременной дозаправке криоагентом – не ограничена [1].

Ученые МАИ принимают участие в разработке концепции создания наземной системы связи московских аэропортов на основе высокоскоростного транспорта с магнитным подвесом.



На фото слева - ректор МАИ А.М.Матвеевко в левитирующем экипаже (стоит - руководитель проекта Л.К.Ковалев), справа – китайская модель.

2. *Supercond. Sci. Technol.* 2005, 18, S215

ТОРЖЕСТВА

100 лет Альберту Иосифовичу Бертинову

В июне в Московском авиационном институте прошла научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Альберта Иосифовича Бертинова, основателя научной школы по электроэнергетике летательных аппаратов. А.И.Бертинов является автором 200 научных публикаций и 60 авторских свидетельств, научным руководителем 20 докторов и 60 кандидатов наук, бессменным многолетним членом редколлегии журнала «Электричество», основателем кафедры электрических машин МАИ, которой он руководил в течение 25 лет.

А.И. Бертинов стоял у истоков работ по созданию искусственного сердца, ему принадлежат разработки первых в мире синхронных двигателей большой мощности, много сил он отдавал созданию авиационного электрооборудования (в том числе, разработке экспериментального бортового генератора мощностью 700 кВА на основе сверхпроводящих композитных проводов из Nb-Ti). Учебным пособием ста-

ла его книга по прикладной сверхпроводимости и сверхпроводниковым электрическим машинам.

Усилиями и собственным примером постоянного благожелательного и ровного отношения к людям Альберт Иосифович создал на кафедре теплый климат, который поддерживал его преемник на посту заведующего кафедрой Д.А. Бут, а в настоящее время - Л.К. Ковалев и другие.

Благодаря неустанным заботам А.И. Бертинова кафедра укомплектована современным электротехническим оборудованием, им созданы лаборатории с современной актуальной тематикой. Бертиновскую кафедру 310 по многообразию тематик можно было сравнить с небольшим институтом; в ее состав входили:

- Лаборатория сверхпроводниковых синхронных и униполярных машин (здесь впервые созданы сверхпроводящий униполярный 500 кВт генератор с жидкометаллическим контактом и сверхпроводящий синхронный бортовой генератор);
- Лаборатория прикладной магнитной гидродинамики и МГД генераторов (здесь разрабатывались установки типа Памир-1, Памир-2);
- Лаборатория электрических машин с катящимся ротором (здесь разрабатывались двигатели с катящимся ротором и электродвигатели, работающие при температурах до 500°C);
- Лаборатория импульсной техники (усилениями этой лаборатории созданы источники питания для радиолокаторных установок, для мощных лазеров);
- Лаборатория бесконтактных электрических машин (в этой лаборатории созданы современное медицинское оборудование и опытные образцы искусственного сердца);
- Лаборатория полупроводниковой техники (здесь создавалась электронная аппаратура для первых искусственных спутников и современных электропоездов).

В настоящее время на кафедре 3 лаборатории – сверхпроводниковых электрических машин и устройств, силовой электроники; бесконтактных электромашин для медицинской техники. Как и во времена А.И. Бертинова, кафедра продолжает сохранять традиции перспективных фундаментальных исследований в области электротехники при тесной связи с прикладными потребностями современности.

На кафедре разработаны и внедрены в производство:

- статические преобразователи и современное высоковольтное полупроводниковое оборудование для электропоездов;
- зуботехнические бормашины (двигатель к ней запатентован);
- серия стерилизаторов для медицины;
- система вспомогательного кровообращения для хирургических целей (находится на предклинических испытаниях).

Не забыты и перспективные исследования:

- разрабатываются новые типы ВТСП двигателей – реактивные, гистерезисные, гибридные с высокими массоэнергетическими характеристиками (в 2002 г. испытан 100 кВт ВТСП двигатель). Такие двигатели могут найти применение в крионасосах для летательных аппаратов, использующих жидкий водород, и в системах водородной энергетики;
- проходит испытания макет экспериментального транспортного средства с ВТСП подвесом грузоподъемностью ~ 0.5т;
- разработан сверхпроводящий двигатель на основе диборида магния как более дешевый (в сравнении с ВТСП) привод, работающий при «водородных» температурах;
- разрабатываются кинетические накопители электроэнергии с использованием ВТСП подвеса.

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 stk@issp.ras.ru (095) 930 3389; *А.К. Чернышова* chak@newmail.ru (095) 196 7200;

Ю.Г. Метлин; *И.Руднев*

Верстка *И.Л. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Ю.К. Мухин*