

Анализ состояния зарубежных и отечественных разработок по созданию сверхпроводниковых электрических машин¹

КОВАЛЕВ Л.К., КОВАЛЕВ К.Л., КОЛЧАНОВА И.П.

Проанализированы зарубежные и отечественные разработки по созданию электрических машин на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов. Представлен обзор токонесущих объёмных элементов на базе YBCO и MgB₂, композитных ВТСП проводов первого поколения на основе соединений BSCCO и MgB₂ и ВТСП лент с покрытием второго поколения.

Ключевые слова: электрические машины, высокотемпературные сверхпроводники, проектные разработки, обзор, зарубежный опыт

Для реализации ресурсосберегающей концепции развития энергетики и аэрокосмической техники необходимо дальнейшее совершенствование электроэнергетического оборудования на основе новых физических явлений. В концепции должны учитываться возрастающие требования к энергосбережению, экологии и экономии материальных затрат, что возможно лишь при использовании сверхпроводниковых (СП) материалов и технологий.

Положение в сверхпроводниковой технологии радикальным образом изменилось после открытия в 1986 г. высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с более высокими возможными рабочими температурами – вплоть до температуры кипения жидкого азота (77,4 К). Это достижение обусловило интенсивное развитие в мире процессов разработки и применения в электроэнергетических системах технологий со СП материалами и оборудованием, в том числе СП кабелей, синхронных компенсаторов, токоограничителей, кинетических и индуктивных накопителей энергии, генераторов и двигателей. В настоящее время практическое использование СП характерно для трех больших областей:

физические установки на основе сверхпроводящих магнитов с ВТСП вставками;

устройства на основе эффекта Джозефсона;

силовые элементы энергосистем (силовые кабели, генераторы, двигатели, токоограничители, накопители и др.).

Foreign and domestic developments in the field of constructing electrical machines on the basis of high-temperature superconducting (HTSC) materials are analyzed. Bulk current-carrying elements made using YBCO and MgB₂, first-generation HTSC wires made on the basis of BSCCO and MgB₂ compounds, and HTSC tapes with second-generation coatings are reviewed.

Key words: electrical machines, high-temperature superconductors, design developments, review, foreign experience

Реальное применение явление сверхпроводимости находит при создании крупных электромагнитных систем. Наиболее широко СП стали применять в ускорительной технике, детекторах частиц в физике высоких энергий, в исследовательских установках термоядерного синтеза, ядерно-магнитных спектрометрах для изучения структуры материалов, медицинских магниторезонансных томографах (МРТ). Только благодаря применению СП стало возможным создание по международным программам крупных физических установок: большого адронного коллайдера LHC и международного опытного термоядерного реактора ITER [1].

Интерес к ВТСП объясняется в первую очередь тем, что повышение рабочей температуры до температуры кипения жидкого азота позволяет существенно упростить и удешевить системы криогенного обеспечения, повысить их надежность. Применение ВТСП в сильноточной технике включает создание электроэнергетических устройств и систем, вырабатывающих, передающих и преобразующих электроэнергию в промышленных масштабах. Базой для этого является способность ВТСП транспортировать без потерь токи высокой плотности в сильных магнитных полях при температуре ниже критической. Таким образом, при передаче по кабельным линиям мощностей свыше 20 млн кВт на расстояние свыше 2000 км можно ожидать снижения электрических потерь на 10% по сравнению с потерями в традиционных электропередачах. При этом приведенные затраты на ВТСП кабельную ЛЭП могут быть не больше, чем на высоковольтную ЛЭП традиционного исполнения [1].

В последние годы значительное внимание в России и за рубежом (США, Япония, Германия и др.) уделяется также развитию электротехнического

¹ Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Мероприятия 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

оборудования для специальной техники и будущих транспортных систем, таких как морские суда, высокоскоростной транспорт на магнитном ВТСП подвесе, авиационно-космическая техника на криогенном топливе (сжиженные водород и природный газ).

В то же время существует ряд направлений, ориентированных на более далекую перспективу – применение сверхпроводниковых устройств в космической отрасли. Одним из перспективных направлений применения сверхпроводимости является создание сверхпроводникового электрореактивного двигателя. Рабочее тело в подобном двигателе ускоряется, находясь в состоянии плазмы. Скорость истечения плазмы значительно выше скоростей, предельных для типовых газодинамических двигателей. Другим важным для астрофизики и физики высоких энергий направлением является создание размещенных в космосе детекторов элементарных частиц, магнитное поле в которых создается сверхпроводниковыми магнитами [2].

По прогнозу Всемирного банка объем мирового рынка СП оборудования составит к 2015 г. более 40 млрд долл., а к 2020 г. – 244 млрд долл. Согласно данным европейского консорциума Conectus, созданного для изучения и пропаганды возможностей коммерческого использования явления СП, международный рынок оборудования, использующего это явление, вырастет до 38 млрд долл. к 2020 г. [3].

С открытием явления ВТСП и повышением их критической температуры примерно до 100 К возникли принципиально новые возможности для практического применения этого явления. Главная из них состоит в повышении рабочих температур СП устройств до 30–100 К. В настоящее время для создания ВТСП токонесущих элементов используются следующие соединения и оксидные системы [4, 5]:

иттриевая керамика $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO, критическая температура $T_c = 90$ К);

висмутовая керамика $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{10-x}$ (Bi-2212, критическая температура $T_c = 85$ К);

висмутовая керамика $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-x}$ (Bi-2223, критическая температура $T_c = 110$ К);

таллиевая керамика $Tl_2Ba_2CaCu_2O_x$ (критическая температура $T_c = 130$ К);

ртутная керамика $HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$ (критическая температура $T_c = 158$ К);

диборид магния MgB_2 (критическая температура $T_c = 40$ К).

Известные на сегодня технологии позволяют получать объемные токонесущие ВТСП элементы с монокристаллической и поликристаллической структурой, а также в виде листовых композитов. В последнее десятилетие в США была разработана технология получения плёночных ВТСП материалов методом напыления. Классификация СП материалов приведена на рис. 1.

Объемные ВТСП элементы на основе YBCO. Созданные в течение последних лет технологии изготовления токонесущих ВТСП элементов различной конфигурации для роторов электрических машин на основе массивной ВТСП керамики (YBCO) позволяют изготавливать керамические блоки с поперечными размерами более 40 мм с критической плотностью токов около 100 А/мм^2 и более при напряженности магнитных полей 0,5–1 Тл.

Крупные монокристаллические объемные ВТСП элементы получают методом ориентированной кристаллизации из расплава с использованием монокристаллической затравки при высокой температуре (вплоть до ~ 1200 °С) в течение около 160 ч. Затравки инициируют ориентированный рост кристаллов, которые формируют монокристаллическую структуру массивного YBCO элемента. В качестве затравок обычно используются монокристаллы ок-

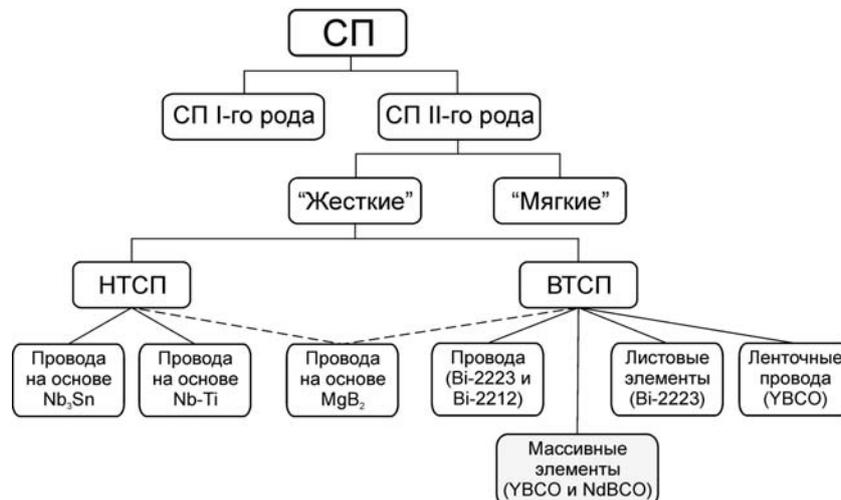


Рис. 1. Классификация СП материалов для электромеханики

сида магния и циркония или $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Варьируя число и расположение затравок, по данной технологии получают образцы разнообразной формы и размеров.

ВТСП элементы на основе MgB_2 . В настоящее время создана и применяется технология производства объемных ВТСП элементов и проводов на основе соединения MgB_2 . Этот материал обеспечивает характеристики и надежность, сравнимые или даже превосходящие эти параметры существующих магнитов при более низкой стоимости их производства. Благодаря слабой анизотропии критических свойств сверхпроводника MgB_2 сечению проводов на его основе можно придавать различную форму (для оптимизации размеров и плотности тока в обмотках), причем провода будут иметь небольшой вес [6]. Для увеличения их критических свойств применяется дополнительное легирование проводов карбидом кремния (SiC), а также вводятся Nb барьеры. Эти меры позволяют поднять критическую плотность тока J_c до 45 кА/см^2 при 10 Тл и 4,2 К. Затраты на изготовление таких проводов значительно ниже по сравнению с затратами на производство ВТСП лент (как на основе BSCCO, так и YBCO).

Самой привлекательной нишей для применения магнитных систем из MgB_2 являются магниторезонансные томографы (МРТ) с напряженностью магнитного поля до 1,5–3,0 Тл. Применение MgB_2 в трансформаторах, моторах, генераторах и токоограничителях также весьма перспективно [7].

На сегодня одним из лидеров в области производства проводов и кабелей на основе диборида магния является компания HyperTech Research Inc (США).

Листовые ВТСП композиты на основе BSCCO. Как правило, композиционные СП на основе BSCCO соединений, предназначенные для применения в силовой электротехнике, изготавливаются и используются в виде тонких (0,1–0,4 мм) лент малой ширины (2–6 мм). Во ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара были разработаны способ изготовления и конструкция композиционного СП материала в форме композитного листа (фольги) большой площади, что более эффективно для ряда применений, чем использование обычных узких ленточных ВТСП проводников. При разработке новых технологий листовых композитов метод «порошок в трубе» как базовый использовался для получения широких листов из сверхпроводящего материала. Эта технология была существенно модернизирована, что позволило достичь высокой токонесущей способности для 20-слойного ВТСП листа

толщиной 0,3 мм (до 150 А/мм^2 при 77 К в собственном поле) [8, 9].

Композитные ВТСП провода первого поколения. Среди ВТСП проводов выделяют провода двух поколений. Провода первого поколения (1G) – это провода на основе серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика, как правило, Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO). В 1995 г. был изготовлен первый ВТСП провод на основе соединения висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (обычно обозначается как BSCCO или Bi-2223 с критической температурой $T_c = 104 \text{ К}$), токонесущая способность которого существенно превышала токонесущую способность медного провода, охлажденного до той же температуры. На рис. 2 приведены поперечное сечение, внешний вид и параметры композитных ленточных проводов первого поколения на основе соединения Bi-2223, созданных во ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара [10].

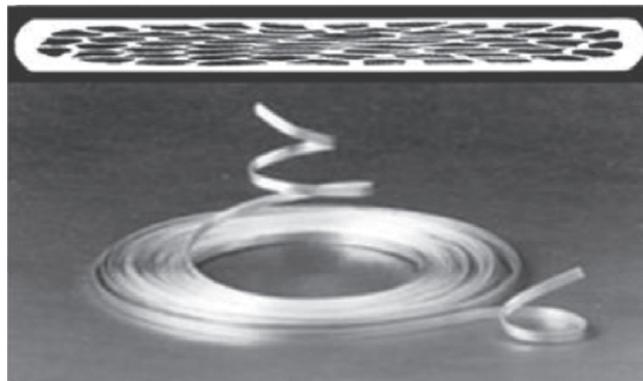


Рис. 2. Типичная конструкция композитных ленточных проводов из разработанных во ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара: тип проводника – ленточный; материал оболочки – серебро, сплавы серебра с Mg, Ni, Al, Cu, Au, Sb; число жил – 61; поперечное сечение – $0,25 \cdot 3,1 \text{ мм}^2$; объемная доля ВТСП соединения в сечении – 30%; длина единичного куска – до 1000 м; критический ток (77 К, 0 Тл) – 20–50 А; конструктивная плотность тока – до 7 кА/см^2 (77 К, 0 Тл); критическая плотность тока – до 40 кА/см^2 (77 К, 0 Тл); марка проводника – В2361Ж

Отметим один из недостатков материала BSCCO: его сверхпроводимость быстро разрушается во внешнем магнитном поле. Это ограничивает область применения ВТСП первого поколения устройствами с относительно слабыми рабочими магнитными полями, т.е. изготовление на их основе генераторов, двигателей, накопителей энергии и т.п. устройств бесперспективно.

Композитные ВТСП провода второго поколения (2G). Основные надежды разработчики ВТСП устройств в настоящее время связывают с созданием ВТСП проводов второго поколения на основе иттриевых керамик (YBCO). Это так называемые «coated tapes» (т.е. пленки с покрытием). В этом случае на гибкой подложке из никелевого сплава или другого подобного материала формируется

специальный буферный слой с кристаллической структурой, подобной структуре СП из иттриевой керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_{6-7}$. В дальнейшем на этот слой осаждается СП (YBaCuO или подобный ему), на который затем наносится стабилизирующий металл. Таким образом, получается гибкая тонкая монокристаллическая сверхпроводящая пленка на несущей ленте. Критическая плотность тока такой пленки весьма высока (до 300 А/мм^2 в СП при температуре кипения жидкого азота). Высока также и конструктивная плотность тока (отнесенная ко всему поперечному сечению ленты) – около 100 А при ширине ленты 6 мм [11]. На рис. 3 приведена типичная структура композитного ленточного ВТСП провода второго поколения, разработанного компанией SuperPower (США) [12].

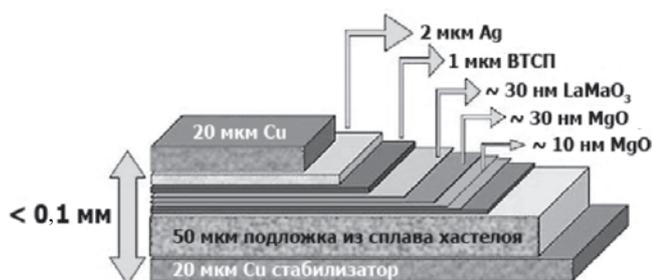


Рис. 3. Структурная схема композитного ленточного ВТСП провода второго поколения компании SuperPower

В ВТСП проводах второго поколения на основе иттриевых керамик (YBCO) плотность тока в несколько раз выше, чем в ВТСП проводах первого поколения (соединения Bi-2223 и Bi-2212). Они меньше подвержены влиянию внешнего магнитного поля, и их механические характеристики значительно выше [13].

Размеры силового оборудования, созданного на основе композитов 2G, могут быть в 2–3 раза меньше, чем размеры аналогичного оборудования традиционного исполнения при той же или более высокой мощности и при более чем двукратном снижении уровня потерь энергии. Кроме того, в отличие от оборудования на композитах 1G оборудование, выполненное на основе 2G, может работать при высоких напряженностях магнитных полей и стоимость материалов для провода по технологии 2G на порядок ниже этого показателя для провода на основе 1G.

Перед фирмами-производителями 2G ВТСП проводов стоит задача освоить промышленный выпуск высококачественной продукции при ее стоимости, меньше или равной $10 \text{ долл./}(кАж)$. Длительное время значительные успехи на этом пути демонстрировали фирмы Японии благодаря все возрастающим правительственным инвестициям.

Так, в июле 2010 г. Superconductivity Technology Research Association (ISTERA) и университеты Tohoku, Waseda, Kyushu, Nagoya объявили о начале проекта по разработке производственного процесса изготовления лент длиной 1 км с критическим током порядка 300 А из ВТСП второго поколения на основе иттрия с использованием технологий PLD и TFA-MOD для обмоток двигателей и генераторов [14].

По информации сайта японской фирмы Fujikura от 5 марта 2011 г. эта фирма изготовила ВТСП провод из керамики YBCO длиной $816,4 \text{ м}$ на ток 572 А , установив тем самым рекордное значение производства длины проводника на его критический ток в 466981 Аж , тем самым превысив свой прежний рекорд от октября 2010 г. – 374535 Аж .

В США в дополнение к действующей программе Министерства энергетики Superconductive Partner Initiative открыто финансирование программы Accelerated Coated Conductor Initiative. Перед рядом Национальных лабораторий США была поставлена задача создания оптимальной технологии производства 2G ВТСП проводов. Компания American Superconductor Corp. (AMSC) в июне 2011 г. заключила контракт с Defense Advanced Research Projects Agency на разработку 2G ВТСП проводов с высокими характеристиками для оборонных целей. Объем финансирования – $3,1 \text{ млн долл.}$ на три года. Цель проекта – снизить стоимость 2G проводов при сохранении высокой критической плотности тока.

В России в июне 2010 г. был подписан договор госкорпорации «Роснано» с ЗАО «СуперОкс» о строительстве в г. Дубна завода по производству ВТСП лент второго поколения мощностью до 1000 км в год. Стоимость проекта оценивается в $1,2 \text{ млрд руб.}$ [13].

Перспективы мирового производства ВТСП проводов с точки зрения немецких ученых оценил W. Prusseit (Theva GmbH, iv Supra) на IV семинаре по сверхпроводимости (рис. 4) [15].

Из рис. 4 видно, что общемировые объемы фактического годового производства провода второго поколения сегодня составляют несколько десятков километров, прогноз предполагает значительное увеличение объема в будущем. Общие заявленные производственные мощности американских компаний составляют более 1700 км/год .

На основании изложенного обзора существующих ВТСП материалов можно сделать следующие выводы. В настоящее время наиболее перспективными для применения в электротехнике и энергетике являются ВТСП соединения на основе иттриевой керамики YBCO – при температуре кипения

ния жидкого азота (77,4 К), диборида магния MgB_2 и висмутовой керамики $BSCCO$ – при температуре жидкого водорода (20,4 К) и неона (27,1 К). Каждый из перечисленных ВТСП материалов имеет свои достоинства и недостатки, что отмечено выше.

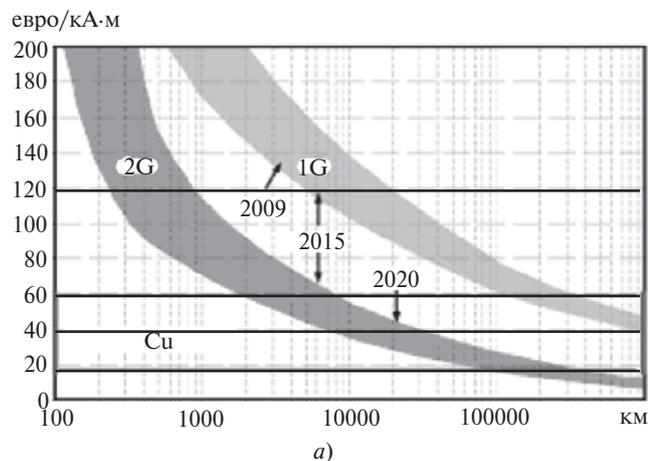


Рис. 4. Прогнозы развития мирового объема производства (а) и динамики стоимости (б) ВТСП проводов

Разработки криогенных ВТСП электрических машин на основе токнесущих элементов из высокотемпературных сверхпроводников. В связи с растущими требованиями к удельным массоэнергетическим характеристикам электромеханических преобразователей (ЭМП) требуется совершенствовать существующие и разрабатывать их новые типы. Успех в этом, в первую очередь, зависит от применения современных материалов и технологий, а также использования таких уникальных физических явлений, как сверхпроводимость. Применение ВТСП материалов позволяет резко увеличить мощность серий малых (десятки киловатт) машин (гистерезисных и реактивных). Техничко-экономический эффект от использования СП аналогов существующего оборудования при одинаковой электрической проходной мощности выражается в значительном

сокращении габаритов и массы при одновременном существенном увеличении перегрузочной способности и сокращении потерь энергии внутри оборудования. Из-за сокращения стоимости производства, связанного с уменьшением размеров ВТСП машин, ожидается, что их рыночная цена будет эквивалентна цене обычных машин с медной обмоткой.

Разработки ВТСП электрических машин, проводимые в ведущих научных центрах США, Великобритании, Германии, Франции и России, можно разделить на три основные группы:

электрические машины с композитными ВТСП проводами на основе висмутовых керамик;

электрические машины с ВТСП тонкими пленками (композитными ВТСП проводами второго поколения на основе иттриевых керамик);

электрические машины с объемными ВТСП элементами из иттриевых керамик (соединение $YBCO$), а также ВТСП композитными листовыми элементами на основе висмутовых ($BSCCO$) и иттриевых ($YBCO$) керамик.

Ниже перечислены реализуемые и планируемые проекты опытных образцов электродвигателей и генераторов на основе ВТСП ряда зарубежных компаний. Представленные данные базируются на обзоре А.М. Вольского «Вращающиеся ВТСП машины – проблемы и возможные решения» (Аргонская национальная лаборатория, штат Иллинойс, США в рамках программы оценки влияния высокотемпературной сверхпроводимости на развитие электроэнергетики), сайтах зарубежных компаний, журнала *Superconductor Week+International Superconductivity Reports (USA)* и электронном информационном бюллетене «Сверхпроводники для электроэнергетики» (издатель – НИЦ «Курчатовский институт»: perst.issph.kiae.ru).

American Superconductor u Northrop Grumman. Подразделение *AMSC – SuperMachines™ Business Unit* – занимается разработкой и изготовлением ВТСП электрических машин и устройств. Основные направления работ подразделения следующие [15]:

промышленные двигатели с высоким КПД и низкими издержками на техническое обслуживание. По оценкам специалистов, ежегодный рынок промышленных двигателей составляет 1,2 млрд долл.;

генераторы для морских судов (военного и коммерческого назначения) с низким уровнем шума, малой массой при высоком значении КПД;

двигательные системы морских судов для военных и коммерческих целей с высоким КПД, ударной прочностью, низким уровнем шума, неболь-

шими размерами, допускающими повышенные нагрузки.

В начале 2007 г. AMSC и Northrop Grumman (NOC) объявили об успешном завершении испытаний крупнейшего в мире ВТСП судового электродвигателя мощностью 36,5 МВт. Масса двигателя 75 т, что в 3 раза меньше, чем у двигателя традиционного исполнения. Элементы двигателя были изготовлены из Bi-2223 керамики производства AMSC. Стоимость всего проекта составила примерно 90 млн долл. В проекте также участвовали Ranor Inc. и Electric Machinery Company. По завершению испытаний двигатель передали ВМФ США [16].

Был изготовлен макетный образец ВТСП двигателя мощностью 5 МВт (230 мин⁻¹) с электронной системой управления для испытания на морских судах. Этот двигатель с большим вращающим моментом является первым этапом разработки двигателей с номинальными мощностями 25 и 36 МВт для военных кораблей. Ожидается, что массогабаритные показатели таких двигателей будут в 5 раз лучше, чем у двигателей традиционного исполнения [17].

Doosan Heavy Industries. В рамках южнокорейской программы Development of the Advanced Power System by Applied Superconductivity Technologies запланировано создание ВТСП двигателей мощностью 70 кВт, 1 и 5 МВт. Программа финансируется Ministry of Science and Technology и Ministry of Commerce, Industry and Energy страны. В ней участвуют ведущие институты и университеты Южной Кореи. Синхронные двигатели мощностью 74 кВт, частотой вращения 1800 мин⁻¹ и 957 кВт, 3600 мин⁻¹ были изготовлены с ВТСП обмотками из Bi-2223 ленты производства CAMSC. Рабочая температура обмоток у обоих двигателей 30 К при охлаждении от криокулеров.

General Electric. В 2003 г. GE создала прототип ВТСП генератора на 1,5 МВт, в котором был использован BSCCO провод производства АМС. General Electric разработала и изготовила ротор ВТСП генератора мощностью 100 МВт (предполагается, что его можно будет также использовать в уже имеющихся генераторах вместо ротора традиционного исполнения). В рамках соглашения Министерства энергетики США компания GE проводит исследования по использованию ВТСП роторов для генераторов мощностью 100–250 МВА. При финансировании Министерства обороны США GE разрабатывает тестовую модель авиационного генератора на основе ВТСП материалов, предназначенного для питания электроуправляемых изделий вооружения [18].

Большие усилия GE направлены на разработку и создание мощных униполярных ВТСП генераторов и двигателей для флота. Такие машины с ВТСП обмотками подмагничивания имеют преимущества перед традиционными электрическими машинами, особенно при высокой частоте вращения. В рамках проекта Air Force Research Lab в компании разрабатывается униполярный генератор с ВТСП обмотками подмагничивания мощностью 5 МВт и частотой вращения 16000 мин⁻¹ для мощных авиационных энергетических установок. Демонстрационный образец униполярного генератора мощностью 1 МВт был изготовлен и успешно испытан. Компанией GE были также разработаны четыре демонстрационных образца электрических машин с ВТСП обмотками подмагничивания для флота: основной генератор мощностью 36 МВт (3600 мин⁻¹), гребной электродвигатель мощностью 36 МВт (120 мин⁻¹), вспомогательные генератор (7000 мин⁻¹) и электродвигатель (132 мин⁻¹), оба мощностью по 4 МВт. Проведенные исследования в GE позволили заключить, что униполярные электрические машины с ВТСП обмотками подмагничивания при высокой частоте вращения (3600 мин⁻¹ или более) практически не уступают значительно более сложным машинам с ВТСП статором и ротором.

Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI) & Sumitomo & Fuji Electric & Meidensha (Япония). Компания поставила на рынок ВТСП двигатель, разработанный совместно с Sumitomo Electric, Taiyo Nippon Sanso (криогеника), Nakashima Propeller Co., Niigata Power Systems, Hitachi, Fukui University и Fuji Electric. В ближайших планах предприятия разработка судовой системы, содержащей два встречно вращающихся винта, приводимых в действие ВТСП двигателем мощностью 400 кВт. Двигатель индукторный, с осевым магнитным потоком, работает при температуре жидкого азота (77,4 К). Провода из BSCCO используются как для обмотки индуктора, так и для обмотки якоря, имеющей 6 или 8 полюсов. Диаметр двигателя 940 мм, длина 1176 мм; выходная мощность 400 кВт при частоте вращения 300 мин⁻¹. Главная цель исследований – разработка бесщеточного двигателя с высоким КПД и модернизация системы охлаждения.

Japan Motor & Generator Co. В 2005 г. в содружестве с Kyushu University фирма занялась разработкой полностью СП двигателя с YBCO проводами мощностью 1–3 МВт. Был построен двигатель мощностью 15 кВт с восьмиполюсной ВТСП обмоткой индуктора и медной обмоткой статора. Обмотка индуктора состоит из восьми отдельных рейстрекковых катушек длиной 340 и шириной около 90 мм. Для охлаждения используется жидкий гелий

(30 К при токе 280 А.). Катушки были изготовлены и испытаны при заданной температуре. Двигатель может применяться в приводе винтов морских судов.

Oswald ElektroMotoren GmbH. Эта фирма и ее партнеры работают над развитием высокоскоростных двигателей. Фирмой в кооперации с Московским авиационным институтом (МАИ) была создана и успешно испытана серия реактивных ВТСП двигателей мощностью 10, 25, 100 и 250 кВт.

В рамках германо-российского проекта «*High Dynamic HTS Motor*» фирмой *Oswald Elektromotoren GmbH* также совместно с МАИ разработан, изготовлен и прошёл испытания высокодинамичный четырехполюсный ВТСП синхронный двигатель мощностью около 500 кВт с радиальными редкоземельными магнитами и массивными YBCO элементами в конструкции ротора. Двигатель разработан для испытаний новых систем трансмиссии легковых автомобилей и в качестве специальных приводов в автомобильных компаниях Германии.

Power Conversion Company (Converteam). В начале 2011 г. фирма сообщила об успешном испытании основных узлов гидрогенератора мощностью 1,2 МВт. Ротор генератора из 28 ВТСП катушек производства Zenergy Power испытывался при номинальном токе 70 А и температуре 50 К. Первый в мире ВТСП гидрогенератор будет установлен на ГЭС Hirschaid в Баварии (Германия). Работа над проектом была начата в 2006 г. Его стоимость оценивается в 3,44 млн евро.

Siemens. Работы над ВТСП электродвигателями компания Siemens начала еще в 1999 г. В проекте участвуют также 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 2000 г. был разработан и испытан первый опытный образец ВТСП синхронного двигателя мощностью 400 кВт с охлаждением жидким неоном. Трехфазная медная обмотка якоря, охлаждаемая воздухом, расположена в воздушном зазоре (статор беспазовой конструкции). Температурный уровень криостата ротора 20–30 К обеспечивается жидким неоном. Массогабаритные параметры этого двигателя в 2–3 раза ниже, чем подобные показатели двигателей традиционного исполнения.

В 2005 г. компания Siemens успешно испытала ВТСП синхронный двигатель-генератор мощностью 4 МВт с частотой вращения 3600 мин⁻¹. Двигатель может использоваться как на морских судах, так и как доковый генератор. С 2006 по 2010 г. компания Siemens проводила работы по созданию

двигателя мощностью 4 МВт с частотой вращения 120 мин⁻¹ для морских судов с рабочей частотой тока 8 Гц.

Все разработанные ВТСП электрические машины отличаются высокой для традиционных устройств перегрузочной способностью – до 700 % номинального крутящего момента в кратковременном режиме и 150 % по мощности в течение 15 мин. ВТСП обмотки обеих машин охлаждаются криокулерами газообразным криоагентом до температуры 25 К.

В 2011 г. на очередной апрельской выставке в Ганновере Siemens и Технологический институт Карлсруэ представили проект создания в долгосрочной перспективе прототипа генератора мощностью от 150 до 900 МВт. Проектом намечено увеличение КПД генератора до 99,5%. К 2014 г. планируется изготовить и испытать катушки ротора, для чего потребуются решить ряд технических задач как в области криогеники, так и ВТСП обмоток с высокой критической плотностью тока. Проект финансирует федеральное министерство образования и научных исследований Германии.

Sumitomo Electric Industries (SEI). Разработала конструкцию компактного ВТСП двигателя постоянного тока для опытного образца электромотоцикла среднего класса Toyota Comfort [19]. Диаметр двигателя составляют 0,3 м при длине 0,4 м; мощность 31 кВт при частоте вращения 3100 мин⁻¹. Двигатель питается от 12 аккумуляторных батарей напряжением 12 В, соединенных последовательно (полное напряжение 144 В). Использование ВТСП элементов позволило получить большой крутящий момент и повысить эффективность использования энергии батареи по сравнению с типовым электромотоциклом.

Полюса двигателя постоянного тока представляют собой ВТСП катушки, изготовленные из BSCCO ленты производства SEI длиной 240 м, шириной 4 мм и толщиной 0,2 мм. Эти катушки используются как статор, в то время как медная катушка служит ротором. Статор охлаждается жидким азотом, хранящимся в резервуаре объемом 4 л. Такого объема хладагента хватает на два часа непрерывной работы. Катушка из BSCCO снабжена датчиком температуры, позволяющим контролировать охлаждение системы и отключать питание двигателя при достижении критической температуры ВТСП катушкой. Представители Sumitomo полагают, что дальнейшее развитие технологии ВТСП двигателей для электромотоциклов и гибридных машин может привести к существенному уменьшению размеров двигателя.

В Японии в рамках Applied Basic Project уже создан прототип электродвигателя для привода гребного винта мощностью 15 кВт и частотой вращения 360 мин⁻¹. Статор выполнен сверхпроводящим, а ротор – из традиционных материалов. Двигатель, вращающий винт диаметром 50 см, прошел тестовые испытания.

В России в последние 20 лет ведутся работы по созданию СП генераторов для общепромышленной энергетики и авиации. Во ВНИИЭлектромаш разработан проект синхронного ВТСП генератора мощностью 200 МВт на напряжение 220 кВ, предназначенный для проекта ветроэнергетической установки, располагаемой на платформе в океане.

В 2006 г. коллективом предприятий и учреждений Санкт-Петербурга, Москвы и Екатеринбурга закончено изготовление опытной автономной электроэнергетической установки мощностью 50 кВт, состоящей из ВТСП синхронного генератора, ВТСП трансформатора, ВТСП кабеля и синхронного двигателя с ВТСП элементами. Ротор ВТСП генератора четырехполюсный, традиционной конструкции, охлаждается газообразным азотом. Сердечник статора выполнен из аморфного сплава

5БДСР российского производства. Катушки обмотки статора (из ВТСП ленты Bi-2223 в серебряной матрице сечением 0,3'4,3 мм²) наматываются на стеклотекстолитовый цилиндр, который также выполняет роль внутренней обечайки криостата статора. Обмотка и сердечник размещаются внутри криостата, образованного двумя внешними обечайками и торцевыми крышками. Многодисковый синхронный двигатель вертикального исполнения мощностью 50 кВт состоит из трех дисковых индукторов на основе постоянных магнитов (Nd-Fe-B) и одного дискового индуктора на основе ВТСП массивов из иттриевой керамики [21].

В большинстве разработок зарубежных ВТСП электрических машин в настоящее время в индукторе используются композитные ленточные ВТСП провода первого поколения (соединения Bi-2223). В таблице приведены данные о текущих и планируемых проектах опытных образцов электродвигателей и генераторов на основе ВТСП по материалам доклада W. Prusseit «Supraleiterindustrie in Deutschland – Status und Perspektiven», представленного на семинаре «Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern» [22].

Компания-изготовитель, страна	Год	Тип изделия	Мощность, МВА	Частота вращения, мин ⁻¹	Масса, т	ВТСП материал
AMSC, США	2001	Электродвигатель	3,8	1800	6,8	BSCCO
	2003	Судовой электродвигатель	5	230		BSCCO
	2007	Судовой электродвигатель	36,5	120	75	BSCCO
AMSC/TECO, США	2012	Ветрогенератор	10	11	120	Не решено
Couvertteam/Zenergy/EON, Великобритания	2009	Гидрогенератор	1,25	214	-	BSCCO
Couvertteam/Zenergy, Великобритания	2010	Ветрогенератор	8	12	-	BSCCO
DTU/Vestas, Дания	2010	Ветрогенератор	-	-	-	Не решено
General Electric, США	2003	Генератор	1,5	-	-	BSCCO
		Униполярный генератор	36	3600	-	BSCCO
		Гребной электродвигатель	36	120	-	BSCCO
		Генератор	4	7000	-	BSCCO
		Гребной электродвигатель	4	132	-	BSCCO
KERI/Doosan, Южная Корея	2007	Электродвигатель	0,08	-	-	BSCCO
	2011	Электродвигатель	5	-	-	BSCCO
Oswald Elektromotoren GmbH, Германия	2002	Моментный электродвигатель	0,2	-	-	YBCO
		Электродвигатель	0,5	-	-	YBCO
Siemens, Германия	2002	Генератор	0,4	1500	-	BSCCO
	2005	Генератор	4	3600	7	BSCCO
	2008	Судовой электродвигатель	4	120	-	BSCCO
Sumitomo Electric Industries, Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	4,4	BSCCO
		Двигатель для автомобиля	0,31	3100	-	BSCCO

При температуре жидкого азота 77,4 ВТСП проводники на основе Bi-2223 обладают существенным недостатком: чрезвычайно сильной зависимостью их критического тока от магнитного поля, уже при магнитной индукции в 0,1 Тл критический ток таких проводников снижается более чем в 2 раза. При охлаждении Bi-2223 проводников до температуры 20–40 К такая зависимость снимается, а критический ток возрастает. Электрические машины на основе Bi-2223 проводников мощностью выше 100 кВт, как правило, работают при температуре, существенно меньшей 77,4 К, и для их охлаждения необходимо использовать сложные системы криостатирования, обеспечивающие достаточно низкие температуры (существенно ниже температуры кипения жидкого азота) в зоне индуктора. Для этих целей применяются системы криостатирования с жидким неоном или криокулеры, работающие по циклу Стирлинга и Гиффорда–МакМагона.

Ряд отечественных разработок в области исследования и создания сильноточного СП оборудования для электроэнергетики, получивших широкое признание как в России, так и за рубежом, были проведены «Центром сверхпроводниковых машин и устройств» МАИ. Среди этих разработок представляют интерес исследования ВТСП гистерезисных и реактивных двигателей, а также синхронных двигателей на основе объемных ВТСП элементов из YBCO керамики и редкоземельных постоянных магнитов. Эти работы выполнялись в кооперации с научными центрами России (ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, ФГУП ВЭИ, НИИЭМ (Истра), «АКБ Якорь») и Германии (IPHT, Йена, IFW, Дрезден, «Oswald Elektromotoren GmbH», Мильтенберг).

В период 1995–2001 гг. в МАИ были разработаны и успешно испытаны серии гистерезисных двигателей с массивными ВТСП элементами в конструкции ротора мощностью до 4 кВт (рис. 5,а). Было показано, что ВТСП гистерезисные двигатели имеют в 2–3 раза более высокие массоэнергетические показатели по сравнению с традиционными гистерезисными машинами. В 2000–2005 гг. МАИ в рамках сложившейся кооперации была разработана и успешно испытана серия реактивных ВТСП двигателей с массивными YBCO элементами в конструкции ротора мощностью от 1 до 100 кВт (рис. 5,б и 6). В кооперации с фирмой Oswald Elektromotoren GmbH был создан и успешно испытан реактивный ВТСП двигатель мощностью 250 кВт. Исследования разработанных машин показали, что применение ВТСП элементов позволяет существенно увеличить магнитную анизотропию ротора машины, при этом удельные массоэнергетические параметры реактивных ВТСП двигателей в 2–2,5 раза превосходят параметры традиционных реактивных двигателей при равных режимах охлаждения жидким азотом.

В последние годы в МАИ ведутся разработки электрических двигателей с использованием массивных ВТСП элементов и постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов (РЗМ). Разработан, изготовлен и прошёл испытания макетный образец высокодинамичного ВТСП двигателя мощностью порядка 20 кВт с радиально-тангенциальными постоянными магнитами (рис. 7).

В рамках германо-российского проекта «High Dynamic HTS Motor» фирмой Oswald Elektromotoren GmbH совместно с МАИ разработан, изготовлен и прошёл испытания высокодина-

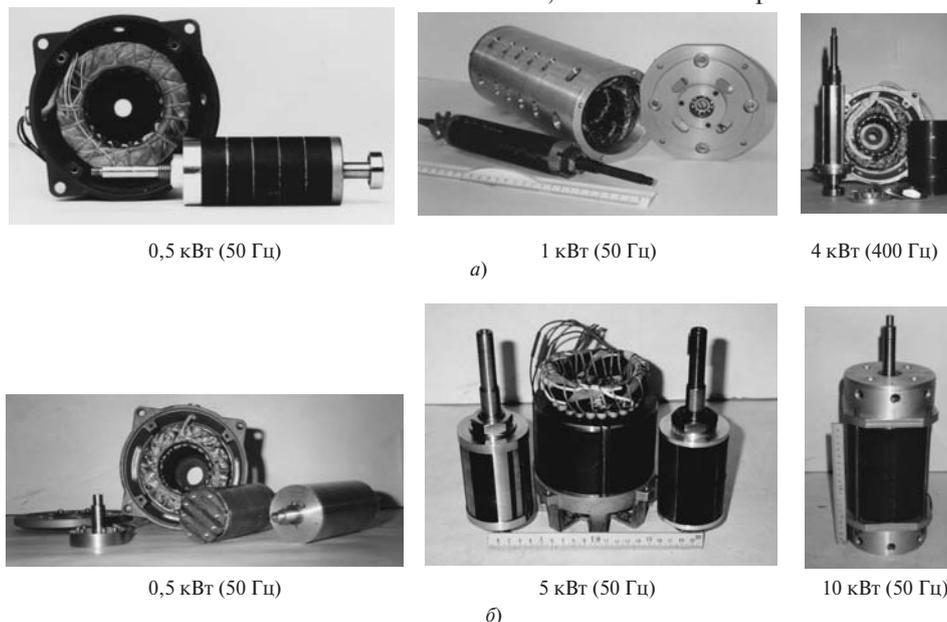


Рис. 5. Общий вид гистерезисных (а) и реактивных (б) ВТСП двигателей

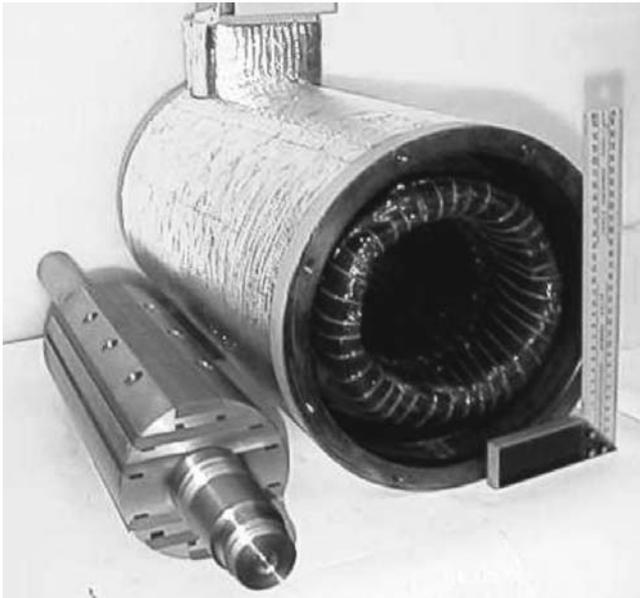


Рис. 6. Реактивный VTSP двигатель мощностью 100 кВт

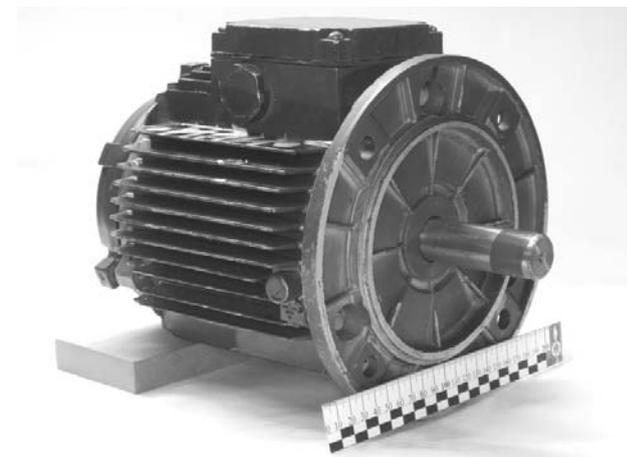


Рис. 7. Экспериментальная модель шестиполюсного синхронного VTSP двигателя ДС-20/6000 М с радиально-тангенциальными ПМ в конструкции ротора и вставками из массивных VTSP элементов

мичный четырехполюсный VTSP синхронный двигатель мощностью около 500 кВт с радиальными РЗМ магнитами и массивными YBCO элемен-

тами в конструкции ротора [23]. Двигатель разработан для использования в автомобильных компаниях Германии для испытаний новых систем трансмиссии легковых автомобилей и специальных приводах. Как показали исследования, синхронные электрические машины с ПМ на основе РЗМ в широком диапазоне мощностей обладают более высокими удельными массоэнергетическими показателями, чем машины с электромагнитным возбуждением. Дальнейшее улучшение характеристик ПМ и совершенствование конструктивных схем магнитоэлектрических машин позволяют достичь серьёзного экономического эффекта и значительно расширить область их применения.

Накопленный в МАИ опыт совместных работ по созданию VTSP машин на основе объемных VTSP элементов в конструкции ротора показал целесообразность использования их в качестве привода крионасоса в системах криостатирования силовых СП кабелей и водородных транспортных магистралей. В МАИ разработаны, изготовлены и прошли успешные испытания следующие приводы крионасосов.

Первый образец бортового крионасоса с VTSP приводом на основе реактивного VTSP двигателя (совместно с ОАО «Туполев» для проекта «Криоплан»). Конструкция насоса объединяет реактивный четырехполюсный электродвигатель и центробежное рабочее колесо. Ротор состоит из магнитомягкого сердечника и VTSP элементов на основе BSCCO/Ag.

Экспериментальный образец VTSP привода мощностью 15 кВт, выполненный на основе четырехполюсного VTSP двигателя с радиальными ПМ в конструкции ротора для магистрального крионасоса системы криостатирования СП (рис. 8).

В настоящее время в МАИ проводятся исследования и разрабатываются конструкции VTSP электрических машин (генераторов и двигателей) мощ-

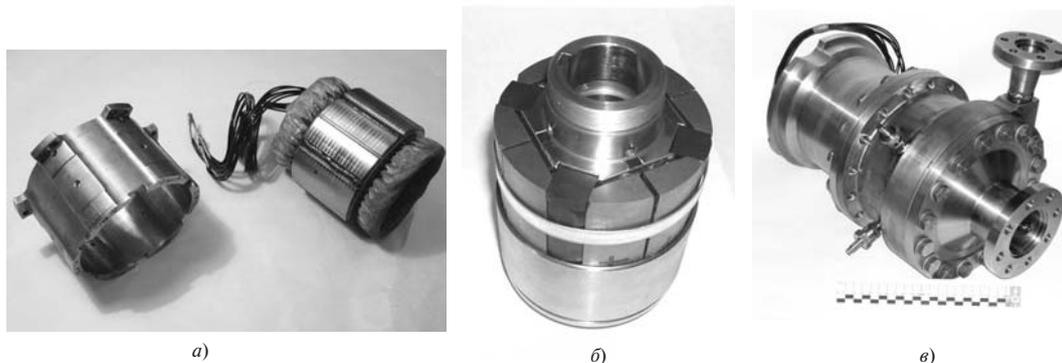


Рис. 8. Криогенный насос на базе высокодинамичного VTSP двигателя для водородной энергетики и систем криобеспечения силовых СП кабелей: а – статор привода криогенного насоса; б – ротор привода крионасоса; в – крионасос с VTSP электродвигателем в сборе

ностью от 20 кВт до 1 МВт на основе композитных ленточных ВТСП проводов второго поколения.

Выводы. 1. Применение ВТСП материалов позволяет резко увеличить мощность серий машин (гистерезисных, реактивных и др.). Технико-экономический эффект от использования ВТСП аналогов существующих машин при одинаковой электрической мощности выражается в значительном уменьшении габаритов и веса при одновременном существенном увеличении перегрузочной способности и сокращении потерь энергии в них.

2. В настоящее время для применения в электротехнике и энергетике используют ВТСП соединения на основе иттриевой керамики YBCO – при температуре жидкого азота (77,4 К), диборида магния MgB₂ и висмутовой керамики BSCCO – при температуре жидкого водорода (20,4 К) и неона (27,1 К). Наиболее перспективными из них являются ВТСП ленточные провода второго поколения на основе YBCO. Однако широкое коммерческое применение таких ВТСП проводов возможно лишь при снижении их цены ниже стоимости проводов из меди. Достичь этого можно за счет роста объема производства и снижения себестоимости единицы длины (метра) провода, а также повышения значения критического тока.

3. Применение ВТСП материалов в силовой технике (создание электроэнергетических устройств и систем, вырабатывающих, передающих и преобразующих электроэнергию в промышленных масштабах) позволит существенно уменьшить массогабаритные характеристики электротехнического оборудования и увеличить его КПД, снизить потери при транспортировке электроэнергии, повысить надежность электрических систем, улучшить параметры энергоснабжения потребителей.

4. Применение сверхпроводниковых преобразователей особенно перспективно на объектах, использующих различные криогенные жидкости (например, крионасосы, крупные суда ВМФ, специальные электроэнергетические комплексы большой мощности и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Применение** сверхпроводников. Сайт ООО «Русский сверхпроводник»: [//www.rhsc.ru](http://www.rhsc.ru)
2. **Диев Д.Н.** Использование сверхпроводниковых устройств в космической отрасли. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2012, т. 9, вып. 1: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
3. **Значение** сверхпроводимости в современном мире и ближайшем будущем. – Интернет-портал сообщества ТЭК: [//www.EnergyLand.info](http://www.EnergyLand.info)
4. **Гуревич А.В., Минц Р.Г., Рахманов А.Л.** Физика композитных сверхпроводников. – М.: Наука, 1987.
5. **Malozemoff A.P.** The New Generation of Superconductor Equipment for the Electric Power Grid – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, vol. 16, № 1.
6. **Шутова Д.И.** Токонесущие элементы на основе MgB₂. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2009, т. 6, вып. 3: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
7. **Шутова Д.И.** HyperTech Research, Inc. «головокружение от успехов» в производстве MgB₂. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2004, т. 8, вып. 1: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
8. **Mikhailov B.P.** High Temperature Superconductors (HTSCs): Investigation, Designs, and Applications. – Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2004, vol. 49, suppl. 1.
9. **Shikov A., Akimov I.** Sheet-Like Composite HTSC Materials, Processing, Properties and Possible Applications - Materials of 6th Inter. Workshop on High Temperature Superconductors and Novel Inorganic Materials Engineering, Moscow – St. Petersburg, 24–30 June 2001.
10. **Успех** сверхпроводников в электроэнергетике обеспечат 2G ВТСП провода. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2004, т.1, вып. 1: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
11. **Selvamanickam V.** Progress in scale up of 2G conductor at SuperPower presentation at Superconductivity for Electric Systems–2007. – Annual DOE Peer Review, Arlington, VA (USA), 2007.
12. **Последние** достижения SuperPower. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2007, т. 4, вып. 5: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
13. **Сверхпроводимость.** Сайт фирмы ЗАО «СуперОкс»: [//www.superox.ru](http://www.superox.ru)
14. **Самойленков С.В.** Перспективы европейской сверхпроводимости. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2009, т.6, вып. 3: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
15. **American Superconductor Corporation (AMSC).** – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2004, т. 1, вып. 2: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
16. **Щербаков В.И.** ВТСП приводы и генераторы для нужд флота. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2007, т.4, вып. 3: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
17. **Journals Superconductor Week+International Superconductivity Reports (USA).** 2009, vol. 23, № 3.
18. **Шутова Д.И.** ВТСП устройства. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2008, т. 5, вып. 3: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
19. **Никонов А.А., Смаев М.П.** Электромобиль Sumitomo Electric Industries с ВТСП двигателем. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2008, т.5, вып. 5: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
20. **Journals Superconductor Week + International Superconductivity Reports (USA),** 22, 2008, №. 11.
21. **Российские** разработки. ВТСП электроэнергетическая установка. – Электронный информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2007, т. 4, вып. 4: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
22. **Электронный** информационный бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике», 2008, т.5, вып. 31: [//perst.issph.kiae.ru](http://perst.issph.kiae.ru)
23. **Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конев С.М.-А., Полтавец В.Н.** Электромеханические преобразователи на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. – М.: Изд-во МАИ-Принт, 2008.

24. **Вольский А.М.** Вращающиеся ВТСП машины – проблемы и возможные решения (Аргонская национальная лаборатория, Иллинойс, США), 2006.

[29.05.12]

А в т о р ы : Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» МВТУ им. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет МГУ в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в МАИ. Профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» МИФИ. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Колчанова Ирина Петровна окончила в 1983 г. факультет «Системы автоматического управления, приборостроения и электроэнергетики летательных аппаратов» МАИ. Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.