

Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия

ВЫСОЦКИЙ В.С.

Возможности применения сверхпроводимости стали обсуждаться сразу же после ее открытия в апреле 1911 г. голландским ученым Каммерлинг-Оннесом. Главные ожидания были связаны с получением сильных магнитных полей и передачей электроэнергии без потерь. Эти ожидания начали сбываться только в начале 1960-х годов, когда впервые были синтезированы сверхпроводники Nb_3Sn , $NbZr$ и $NbTi$, позволяющие сохранить высокую плотность тока в сильных магнитных полях. Следующий этап практического применения явления сверхпроводимости относится к середине 1980-х годов с открытием высокотемпературных сверхпроводников, способных работать при температуре жидкого азота. В предлагаемой читателю статье (обзоре) указаны как успехи, так и неудачи в применении низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, делается попытка наметить и обсудить современные тенденции разработок в этой области. Даны ссылки на некоторые общедоступные интернет-ресурсы, которые помогут заинтересованным читателям получить больше информации о конкретных сверхпроводниковых устройствах.

Ключевые слова: явление сверхпроводимости, обзор исследований, низко- и высокотемпературная сверхпроводимость, успехи и неудачи, современные тенденции применения

Явление сверхпроводимости было впервые замечено 8 апреля 1911 г. в лаборатории голландского ученого Каммерлинг-Оннеса (рис. 1). Спустя два года Каммерлинг-Оннес получил Нобелевскую премию, правда, не за сверхпроводимость, а за получение впервые в мире жидкого гелия. Но именно жидкий гелий и позволил обнаружить сверхпроводимость ртути при температуре около 4,2 К (около -269 °С). Возможности применения сверхпроводимости начали обсуждаться немедленно после ее открытия. Главные ожидания были связаны с получением сильных магнитных полей и передачей электроэнергии без потерь.

Однако эти ожидания начали сбываться только в начале 60-х, когда впервые были синтезированы сверхпроводники Nb_3Sn , $NbZr$ и $NbTi$, позволяющие сохранять высокую плотность тока в сильных магнитных полях [1]. Начались крупномасштабные применения сверхпроводимости (КПС). Прежде всего она использовалась для создания сильных магнитных полей в больших объемах (см., например, [2, 3]).

Следующий этап начался в 1986–1987 гг. с открытием Беднорцем и Мюллером, а затем П. Чу высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), способных работать при температуре жидкого азота [4]. Среди крупномасштабных применений как низко-, так и высокотемпературной сверхпроводимости (НТСП и ВТСП) наблюдались как явные успехи, так и некоторые неудачи. В настоящем обзоре сделана попытка кратко обрисовать те и другие и обсудить современные тенденции КПС. Под термином крупномасштабные обычно понимаются любые применения сверхпроводимости, отличные от её использования в электронике.

В обзоре будут даны ссылки на некоторые общедоступные интернет-ресурсы, в которых заинтересованные читатели смогут получить больше информации о конкретном применении. В начале обзора приводятся сведения о современном практическом использовании сверхпроводимости, заключение выражает личное мнение автора.

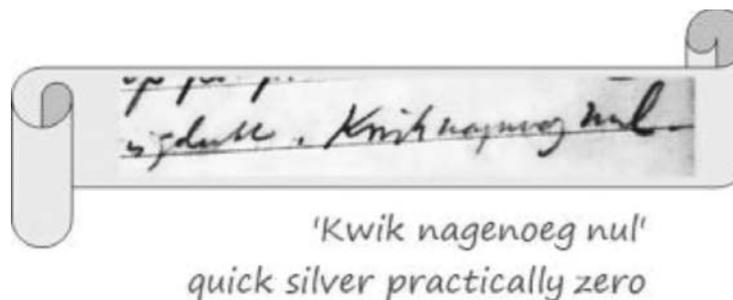


Рис. 1. Х. Каммерлинг-Оннес и копия из записи в его лабораторном журнале от 8.04.2011: «Быстрое серебро (ртуть) практически ноль»

Сверхпроводящие материалы. Любое применение сверхпроводимости основано на соответствующих сверхпроводящих материалах. К настоящему времени открыто множество соединений и металлов, теряющих сопротивление ниже определенно критической температуры и обладающих эффектом Мейсснера [2]. Однако способностью проводить большой ток в магнитных полях по изготовленному из них длинному проводу с достаточной технологичностью обладают лишь немногие – не больше десятка. Условно их можно разделить на низкотемпературные (НТСП – NbTi, Nb₃Sn); высокотемпературные (ВТСП – Bi-2223, Bi-2212; ReBCO) и промежуточные (MgB₂, pnictides – совсем недавно открытые арсениды железа).

Успех коммерциализации любого применения в большой степени зависит от цен на материалы. На рис. 2 приведены данные по сверхпроводникам, имеющимся на рынке. Указаны цены для удельной единицы кАж, т.е. стоимости одного метра сверхпроводника с током в 1 кА. Видно, что НТСП хорошо отработаны и имеют сравнительно низкие цены, ВТСП азотного уровня достаточно дороги, даже на уровне гелиевых температур. Возможной альтернативой для промежуточных температур от жидкого водорода до гелиевых является дешевый диборид магния, имеющий высокие параметры уже при 20 К.

Именно цены на исходные сверхпроводники сдерживают пока более широкое применение ВТСП устройств для электроэнергетики. Главным потребителем ВТСП материалов являются сверхпроводящие силовые кабели. Широкое внедрение

ВТСП кабелей может стать локомотивом рынка исходных ВТСП материалов, что приведет к снижению цен.

Низкотемпературная сверхпроводимость. Наибольшего успеха к настоящему времени применение сверхпроводимости достигло в производстве медицинских магнитно-резонансных томографов (МРТ). Первые томографы были созданы в конце 70-х годов прошлого века в компании Oxford Instrument (рис. 3). Стандартными полями в сверхпроводящих МРТ являются поля в 1–1,5 Тл, но уже широко начали производиться МРТ с полями в 3 Тл.

Наметились успехи в производстве магнитов для томографов в России. Группа разработчиков из Физического института им. П.Н. Лебедева под руководством проф. Е.И. Демихова создала небольшой томограф для ортопедических целей исследования конечностей (рис. 4,а) и ведет активную работу по разработке полномасштабного томографа с полем 1,5 Тл (рис. 4,б).

Помимо стандартных томографов широкого профиля идут разработки специальных МРТ с высокими магнитными полями для исследования в реальном времени процессов в человеческом мозге (рис. 5). Такие устройства, конечно, не будут массовыми, как стандартные магниты, которых производится в мире примерно 3000 шт. в год. Объем рынка производства сверхпроводящих магнитов для МРТ составляет около 3 млрд Евро в год (по данным компании «Conectus»: www.conectus.org).

Производство магнитов для МРТ является несомненным и практически единственным полностью коммерческим успехом низкотемпературной

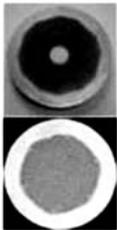
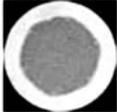
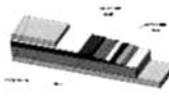
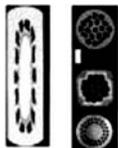
Характеристика СП - технология	Основной исходный материал, T _c	Вид и температура охладителя	Уровень цены за 1кА*м	Применения
 НТСП – металлургия	NbTi – сплав ~ 10 К	Жидкий гелий до 4.2 К и ниже	До 3-5\$ при 4,2 К	Рабочая лошадка КПС (особенно для МРТ)
 НТСП - металлургия	Nb ₃ Sn – соединение ~ 18 К	Гелий до 8-10 К и ниже	До 15\$ при 4,2 К	Рабочая лошадка КПС (для токамаков, магнитов, в т.ч. для NMR)
 ВТСП 1 поколения (Порошок в трубе – металлургия)	Керамика Bi ₂ Sr ₂ Ca _{n-1} Cu _n O _{2n+4} (Bi-2223, Bi-2212) ~110 К	Жидкий азот при 77 К и ниже (с другими хладагентами)	Порядка 120-140\$ при 77 К (в 2013 г.) ~35-40\$ при 20К ~20-30\$ при 4,2К	Сверхпроводящая энергетика Круглые Bi-2212 – магниты при 4.2К
 ВТСП 2 поколения (Длинномерные тонкие пленки – электроника)	Керамика ReBa ₂ Cu ₃ O _{7-d} ~90 К	Жидкий азот при 77 К и ниже (с другими хладагентами)	Порядка 300-500 \$ при 77 К (в 2013 г.) ~65-80\$ при 20К ~60-100\$ при 4.2К	Сверхпроводящая энергетика и магниты при низких температурах
 Диборид магния - (Порошок в трубе – металлургия)	MgB ₂ – соединение ~39 К	Жидкий неон, водород и ниже с гелием	Порядка 8-15\$ при 20 К 4-7\$ при 4.2К	Энергетика и магниты

Рис. 2. Практические сверхпроводники: их основные свойства, области применения и удельные цены при различном уровне температур

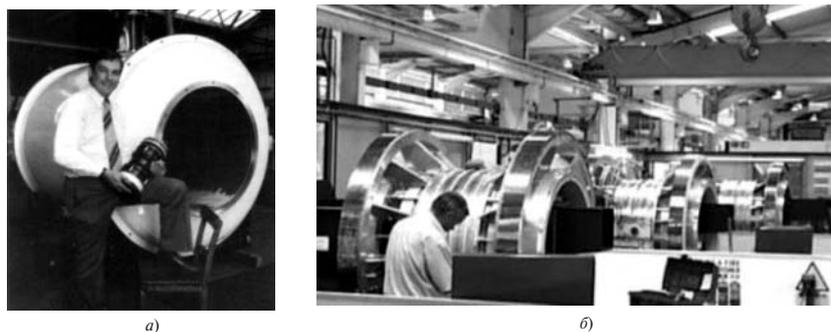


Рис. 3. Один из первых томографов, построенных компанией Oxford Instrument (Великобритания) в 1979 г. (а); завод по производству магнитов для томографов компании Сименс (Германия) в 2011 г. (б) См. <http://healthcare.siemens.ru/imaging/magnetic-resonance/>



Рис. 4. Томографы, разработанные в ФИАН им. П.Н. Лебедева: а – малый ортопедический МРТ для конечностей; б – магнит полномасштабного МРТ (предоставлено проф. Е.И. Демиховым)

сверхпроводимости. Это стало возможным, потому что без использования сверхпроводимости создать подобные машины с полями выше 0,5 Тл не представляется возможным. Сверхпроводимость в данном случае является так называемой «enabling» технологией, т.е. создает возможность разработки новых устройств или устройств с абсолютно новыми качествами.

Это относится и к сверхпроводящим магнитам для биологических исследований методом магнит-

но-резонансной спектроскопии, требующих получения постоянных, высокооднородных и стабильных магнитных полей 20 Тл и выше. Сверхпроводимость и здесь позволяет решать эти задачи (рис. 6). Однако рынок таких устройств невелик.

Конечно, нельзя не упомянуть созданный в результате появления практических низкотемпературных сверхпроводников, пусть и не очень большой по сравнению с МРТ, рынок сверхпроводящих магнитов для исследований. Сейчас трудно

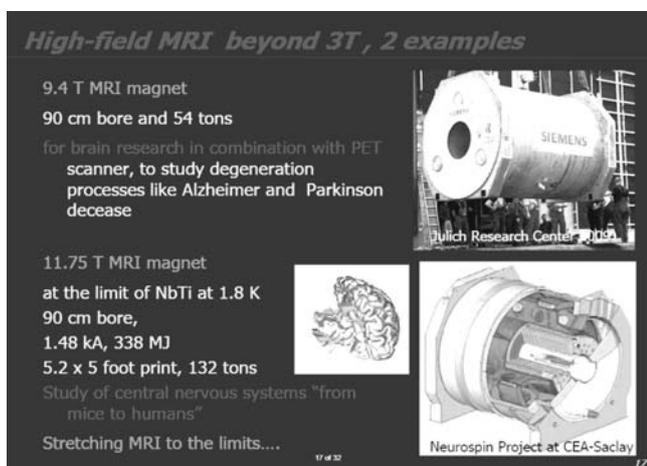


Рис. 5. Разработки магнитов для МРТ со сверхвысокими полями до 9,4 Тл (Германия) и 11,75 Тл (Франция) для изучения головного мозга (из доклада проф. Германа тен Кате на конференции МТ-22 в Марселе в 2011 г.)

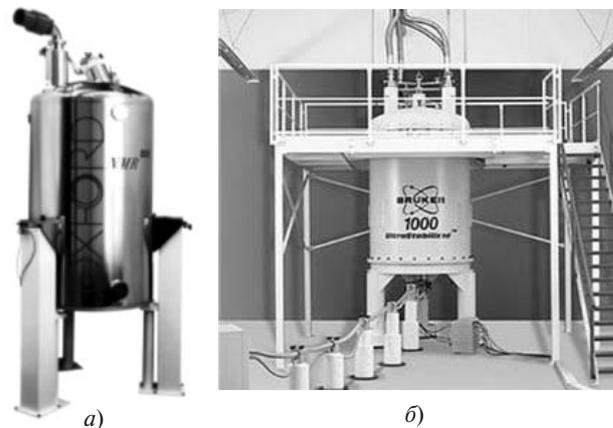


Рис. 6. ЯМР- спектрометр на 800 МГц с полем порядка 19 Тл компании Oxford Instrument (а); рекордный на сегодняшний день ЯМР спектрометр на 1 ГГц компании Брукер с полем 23,5 Тл (б); по-видимому, это предельное значение магнитного поля для современных низкотемпературных сверхпроводников <http://www.bruker.com/ru/products/mr/html?feed=rss&cHash=0c67f5eed23b9b56ca00425cdaabc808>)

найти физическую исследовательскую лабораторию, в которой не использовались бы сверхпроводящие магниты с полями от 3 до примерно 20 Тл.

Следует, однако, отметить, что возможности низкотемпературных сверхпроводников для повышения магнитных полей полностью исчерпаны. Дальнейшее увеличение магнитного поля, получаемого с помощью сверхпроводимости, может быть достигнуто только за счет использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), но при температуре жидкого гелия. В настоящее время рекордным значением поля является 35,5 Тл, полученным в 2011 г. с помощью вставки из ВТСП ленты на основе соединения $YBaCuO$ в водоохлаждаемый обычный магнит (рис. 7,а). Следствие этого успеха – проект полностью сверхпроводящего магнита на 32 Тл (рис. 7,б). В нем две наружные секции будут изготовлены на основе традиционных сверхпроводников $NbTi$ (наружная секция) и Nb_3Sn (промежуточная секция), а окончательно поле в 32 Тл будет создавать внутренняя вставка на основе ВТСП ленты. Проект должен быть закончен в 2014 г. Все эти работы выполняются Национальной лабораторией сильных магнитных полей Университета штата Флорида, г. Таллахасси (см. <http://www.magnet.fsu.edu/>).

Следующее выдающееся достижение крупномасштабных применений ВТСП – создание мощных ускорителей элементарных частиц для физики высоких энергий, самым крупным из которых является Большой Адронный Коллайдер (БАК – LHC) в Европейском центре ядерных исследований – ЦЕРН (рис. 8). Для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков используются 1624 сверхпроводящих магнита, общая длина которых превышает 22 км. Магниты работают при температуре 1,9 К (-271 °С), что немного ниже температуры перехода гелия в сверхтекучее состояние. Кроме того, в БАК установлены два крупнейших сверхпроводящих магнита детекторов СМС и АТЛАС (см. www.cern.ch).

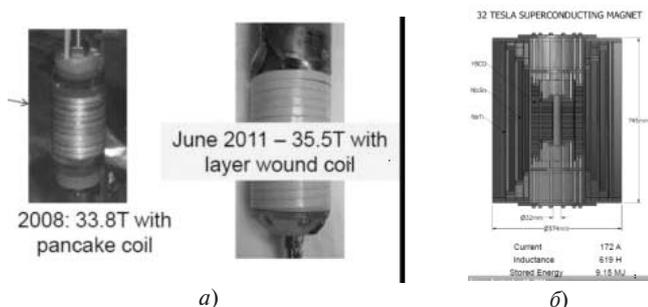


Рис. 7. Магниты, создающие сильные поля с использованием ВТСП: а – вставки в водоохлаждаемые магниты (2008 г. – 33,8 Тл, галетная намотка; 2011 г. – 35,5 Тл, послойная намотка); б – проект секционированного полностью сверхпроводящего магнита на поле в 32 Тл (см. <http://www.magnet.fsu.edu/>)

В настоящее время идет модернизация и перенастройка БАК на большие мощности, но уже ведутся разговоры об увеличении энергии частиц (за счет усиления полей сверхпроводящих магнитов) или постройке ускорительного кольца с большим диаметром и с энергией почти на порядок большей, чем в современном БАК. Безусловно, увеличение полей магнитов нового ускорителя будет невозможно без использования ВТСП материалов.

Наконец, использование сверхпроводящих низкотемпературных магнитов, по-видимому, позволит впервые осуществить полностью управляемую термоядерную реакцию в устройстве типа Токамак. В мире уже было построено несколько таких устройств с использованием сверхпроводящих магнитов – первый в мире сверхпроводящий Т-7 в Курчатовском институте и там же Т-15, французский ТорСупра. Успехи ученых позволили отработать технологии сверхпроводящих катушек для Токамаков и привели к крупнейшему международному проекту – созданию экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, в котором Россия принимает активнейшее участие.

В магнитной системе ИТЭР (рис. 9) используется около 600 т сверхпроводника Nb_3Sn и примерно столько же $NbTi$, 20% проводников для катушек тороидального поля и кабелей полоидального поля поступит из России. Для выполнения этой задачи в России было создано производство базовых сверхпроводников на Чепецком механическом заводе в Удмуртии (г. Глазов) и кабелей и проводников в ОАО «ВНИИКП» и ИФВЭ в г. Протвино, которые пройдут испытания в РНЦ «Курчатовский институт». Поставки сверхпроводников из России идут успешно, и в 2015 г. все российские обязательства будут выполнены (см. www.interrf.ru и www.iter.org).

Итак, можно с уверенностью констатировать большие успехи применений низкотемпературной сверхпроводимости. Наиболее масштабные из них – освоение производства магниторезонансных то-



Рис. 8. Тоннель и криостаты сверхпроводящих магнитов самого крупного ускорителя (по материалам доклада Л. Боттура на конференции МТ-23, Бостон, США, 2013)

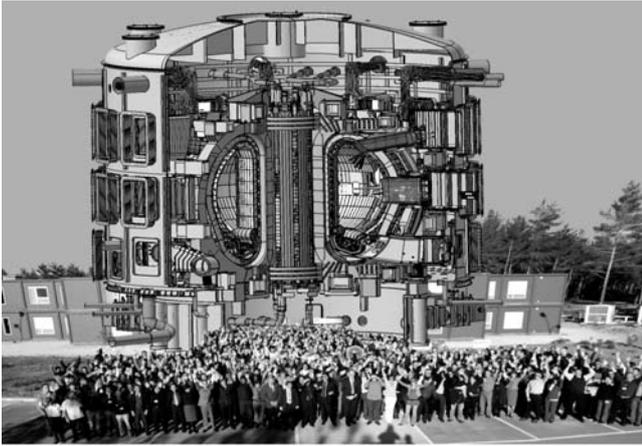


Рис. 9. Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР строится в местечке Кадараш на юге Франции в приморских Альпах (www.interrf.ru и www.iter.org)

мографов и создание мощных ускорителей элементарных частиц и устройств управляемого термоядерного синтеза.

Но один из наиболее заманчивых проектов применения сверхпроводимости для электроэнергетики — оказался экономически совершенно невыгодным: слишком велика стоимость охлаждения, сводящая на нет все преимущества нулевого сопротивления.

С открытием ВТСП осуществление проекта становятся вполне реальным. Электротехника не требует сверхсильных полей, и для ВТСП при температуре жидкого азота вполне возможно получать приемлемые энергетические параметры. В электроэнергетике сверхпроводимость может быть использована для генерации, транспортировки, потребления и даже аккумуляции энергии.

Применения ВТСП в электроэнергетике. С открытием в 1986–1987 гг. проводников, способных сохранять сверхпроводящие свойства при температуре жидкого азота, начался новый этап в применениях явления сверхпроводимости. Довольно быстро в нескольких компаниях было освоено производство и началась продажа длинномерных ВТСП проводников. Уже в конце 90-х годов появились

первые длинномерные ВТСП ленты типа «порошок в трубе» (ленты первого поколения) (рис. 10,а) на основе висмутовых соединений. Эти проводники сравнительно просты в изготовлении и имеют достаточно высокие критические параметры. Но в силу ряда технологических требований их матрица должна выполняться только из серебра или его сплавов, причем доля серебра в сечении составляет 50–70%. Естественно, такой проводник нельзя сделать достаточно дешевым, например, в сравнении с медью. Стоимость таких сверхпроводников в удельных единицах составляет около \$100–150 за кАж.

В последние несколько лет в ряде стран, в том числе и в России, велись активные разработки и начался коммерческий выпуск ВТСП второго поколения — длинномерных пленок с покрытием (рис. 10,б). Стоимость материала в этом сверхпроводнике невелика, однако технология в настоящее время настолько сложна, что стоимость в 3–5 раз превышает стоимость изделий первого поколения (рис. 3). Однако с увеличением масштабов производства цена должна значительно снизиться и достичь уровня \$10–20 за 1 кАж, что сравнимо со стоимостью меди.

Тем не менее исходные ВТСП проводники представлены на рынке, а разработки сверхпроводящих электротехнических устройств ведутся во всем мире. Главные направления исследований и разработок ВТСП электроэнергетических устройств следующие:

ВТСП силовые кабели, транспортировка энергии — наиболее продвинутое применение;

ВТСП ограничители тока короткого замыкания, организация защиты энергосетей абсолютно новым способом — наиболее востребованное применение;

ВТСП машины (генерация и потребление) и трансформаторы (преобразование);

НТСП и ВТСП индуктивные накопители энергии (аккумуляция).

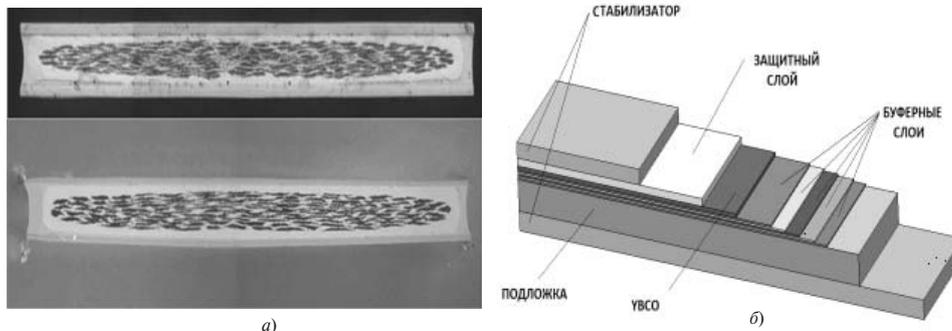


Рис. 10. Современные высокотемпературные сверхпроводники: а — первое поколение («порошок в трубе»), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223) или $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi2212), $T_c \approx 90\text{--}110\text{ K}$, $I_c = 80\text{--}200\text{ A}$ ($4 \times 0,4\text{ мм}^2$) при 77 K , $B = 0\text{ Тл}$; б — второе поколение (длинномерные пленки), $\text{REBCO} - \text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, где RE: (Y, Sm, Gd, Dy, Eu), $T_c = 92\text{ K}$, $I_c = 80\text{--}200\text{ A}$ ($4 \times 0,1\text{ мм}^2$) при 77 K , $B = 0\text{ Тл}$

Причем ВТСП силовые сверхпроводящие кабели – наиболее продвинутое применение, уже используемое в реальных энергосистемах.

Сверхпроводящие силовые кабели, транспортировка энергии. В ленточных ВТСП проводниках существует сильная анизотропия зависимости критического тока лент от направления магнитного поля [5]. В магнитном поле, параллельном поверхности ленты, падение критического тока довольно слабое [5]. В силовых сверхпроводящих кабелях, имеющих циркулярную геометрию, доминирующее магнитное поле параллельно поверхности ленты. Поэтому даже при использовании не очень совершенных первых образцов ВТСП лент удавалось получить высокие токнесущие свойства в силовых кабелях. Это обусловило быстрое развитие разработок ВТСП силовых кабелей в мире.

Сверхпроводящие силовые кабели, хотя и являются чисто замещающими технологиями, тем не менее использование высокотемпературной сверхпроводимости для транспортировки энергии достаточно перспективно, учитывая следующие преимущества:

возможность замены обычного кабеля на кабель большей передаваемой мощности в тех же габаритах;

высокая эффективность (в связи с малыми потерями в сверхпроводнике, несмотря на необходимость охлаждения), и возможность улучшения качества электроэнергии;

экологическая чистота и пожаробезопасность – отсутствуют горючие материалы (типа масла), азот является инертным негорючим газом, кабель не нагревается; сверхпроводящий экран полностью экранирует электромагнитное поле жилы кабеля, создавая возможность прокладки, например, рядом с линиями связи.

низкая стоимость туннеля (из-за малых размеров кабеля) и небольшая масса;

главное: возможность передачи большей мощности при пониженном напряжении, исключение промежуточных подстанций – это дает серьезную экономию на инфраструктуре (рис. 11).

Ниже представлены некоторые современные проекты сверхпроводящих ВТСП кабелей, являющиеся своего рода рекордными.

Институтом электроэнергетики Китайской академии наук на алюминиевом заводе разработан кабель постоянного тока (10 кА; 1,3 кВ; 360 м) – мировой рекорд по значению передаваемого тока [6].

Японской фирмой Фурукава создан однофазный кабель (использован ВТСП-2, 275 кВ, 3 кА, длина 30 м), проходящий испытания на китайском высоковольтном полигоне – рекорд по значению напряжения (<http://www.fegroup.com.cn/english/newsInfo.asp?ID=282> или http://www.furukawa.co.jp/english/wat/2012/kenkai_1_20518_2.htm).

Японская компания Сумитомо Электрик в свое время разработала несколько сверхпроводящих кабелей, используя идеологию «три-в-одном», когда все три фазы находятся в едином криостате. Однако кабели были установлены и успешно испытывались либо в Ю. Корее (100 м), либо в США (350 м). И только недавно (в 2012 г.) сверхпроводящий кабель (66 кВ, 200 МВА, 240 м) был установлен на подстанции в Японии под Йокогамой – рекорд по мощности (<http://global-sei.com/super/cable/ingrid.html>).

В начале 2014 г. в г. Эссен в рамках проекта «АмпаСити» был установлен наиболее длинный на сегодняшний день ВТСП кабель (10 кВ, 2310 А, 40 МВА). Он имеет оригинальную «триаксиальную» конструкцию, когда-то разработанную компанией ULTERA – совместное предприятие датской фирмы NKT и американской компании Southwire. В конструкции три фазы кабеля располагаются коаксиально, при этом нет необходимости в сверхпроводящем экране – расход дорогого сверхпроводника снижается вдвое. Плотность тока в кабелях такой конструкции наивысшая, но при этом они вряд ли смогут быть использованы на напряжения выше 30 кВ из-за невозможности конструктивно обеспечить достаточно толстую изоляцию между сверхпроводящими повивами. Однако для внутри городских сетей среднего напряжения такие кабели чрезвычайно перспективны – рекорд по длине –

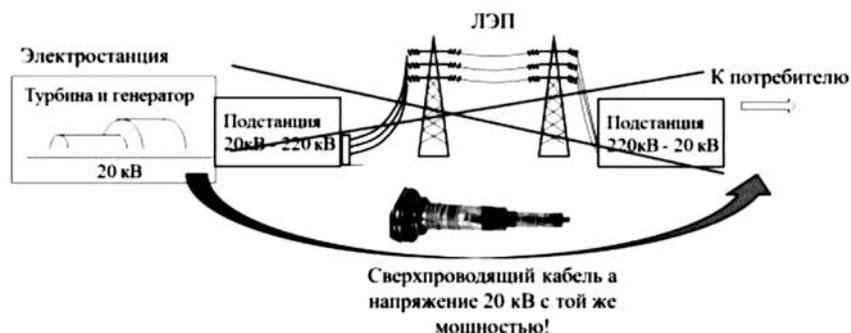


Рис. 11. Возможное изменение инфраструктуры передачи электроэнергии с использованием ВТСП силовых кабелей

1 км (<http://www.vde.com/de/Regionalorganisation/Bezirksvereine/Koeln/Transmitter-Downloads/Downloads/Documents/2014%20Downloads/VDEVortrag%20Ampacity Koblenz 0 9%2001%202014.pgfl>).

Еще одной особенностью этого проекта является использование сверхпроводящего ограничителя тока, установленного последовательно с кабелем для защиты его от возможных коротких замыканий.

И, наконец, необходимо упомянуть работы, выполняемые в России. В 2009 г. прошел предварительные испытания трехфазный сверхпроводящий кабель длиной 200 м (рис. 12). Проект выполнялся под руководством ЭНИН им. Кржижановского совместно с ВНИИКП, МАИ, НТЦ ФСК ЕЭС. Параметры кабеля: переменный ток – 1,5/2 кА, 20 кВ, 50/70 МВА. В настоящее время кабель находится на испытаниях в НТЦ ФСК ЕЭС. Планируется его установка на подстанции «Белорусская» в Москве. Это был первый длинный и мощный кабель, созданный и испытанный в Европе [7].



а)



б)

Рис. 12. Российский сверхпроводящий силовой кабель переменного тока длиной 200 м: а – установка кабеля на испытательном полигоне НТЦ ФСК ЕЭС; б – токовые вводы кабеля

В процессе работы во ВНИИКП были разработаны промышленные технологии изготовления ВТСП силовых кабелей. Технологии были проверены на экспериментальном прототипе без сверхпроводящего экрана длиной 30 м и в дальнейшем использованы в предпромышленном образце ВТСП кабеля длиной 200 м (рис. 13).

Разработанная технология в дальнейшем была использована для еще более амбициозного российского проекта кабеля постоянного тока (20 кВ, 2,5 кА) длиной 2,5 км для связи двух подстанций в С.Петербурге [8]. Проект финансируется ФСК ЕЭС и ведется под руководством НТЦ ФСК ЕЭС. К настоящему времени испытаны экспериментальные образцы длиной 30 м, токовые вводы и промежуточные соединения. Идет изготовление отрезков кабеля на заводе Иркутсккабель.

Таким образом, можно резюмировать, что сверхпроводящие кабели с использованием высоко-

котемпературных сверхпроводников находятся на стадии предкоммерческого внедрения как в мире, так и в России. Пока большинство кабелей, особенно установленных на подстанциях, изготовлены из ВТСП первого поколения и дороги из-за высокой стоимости исходного сверхпроводника. Однако предполагаемое снижение стоимости исходных сверхпроводников второго поколения поможет совершить прорыв в коммерциализации силовых ВТСП кабелей. Способствовать этому может более широкое внедрение сверхпроводящих силовых кабелей, являющихся главным потребителем исходных высокотемпературных сверхпроводников. Рост использования ВТСП-2 и расширение производства приведут к снижению стоимости сверхпроводника и к более широкому внедрению сверхпроводящих кабелей и других сверхпроводящих устройств.

Гибридный метод передачи энергии. Высоковольтные воздушные линии имеют очень малую плотность передачи энергии вследствие своих огромных размеров. Сверхпроводящие кабели, охла-

ждаемые жидким азотом, могут повысить мощность и плотность передаваемой энергии. Однако в еще большей степени повысить единичную мощность энергетической магистрали и плотность передаваемой энергии можно с использованием гибридного метода. Одна из идей, обсуждаемых в течение долгого времени, – использование магистрали с жидким водородом, передаваемым не только



а)

б)

Рис. 13. Фаза экспериментального кабеля длиной 30 м без сверхпроводящего экрана (а); фаза кабеля 200 м со сверхпроводящим экраном (б) [7]

как топливо, но и как охладитель сверхпроводящего кабеля. При этом появляется возможность использовать не только дорогие ВТСП сверхпроводники, а сравнительно простой и дешевый диборид магния MgB_2 . Открытый в 2001 г., он изготавливается в виде длинномерных проводников и имеет достаточно высокие параметры (сравнимые с ВТСП) при температуре жидкого водорода.

Концепция одновременной передачи и химической, и электрической энергии, используя MgB_2 провод, охлаждаемый жидким водородом, через один «кабельный коридор» впервые упоминается в работе П.М. Гранта [9, 10] вскоре после того, как MgB_2 был обнаружен в январе 2001 г. Эта концепция получила название «hydricity» – водоричество, как объединение названий «водород + электричество».

Водород имеет высокую топливную экономичность по сравнению с другими видами топлива (120 МДж/кг). Его можно передавать в сжиженном состоянии по длинной криогенной передающей линии к месту потребления, охлаждающая способность водорода 446 кДж/кг значительно выше, чем у жидкого гелия (20,3 кДж/кг) и жидкого азота (199 кДж/кг). Таким образом, идея поместить в линию перекачки жидкого водорода сверхпроводящий кабель и передавать электричество параллельно вполне естественна. Кроме упомянутых ссылок, эта идея также обсуждалась в [11–13].

Однако упомянутые работы носили только расчетно-теоретический характер. Впервые в мире эксперименты по гибридным водородно-сверхпроводящим линиям передачи энергии были проведены в России в 2011–2013 гг. Было создано и испытано два прототипа гибридных транспортных энергетических магистралей с жидким водородом и сверхпроводящим кабелем постоянного тока на основе диборида магния длиной 10 и 33 м (рис. 14) [14]. Первая модель имела длину криостата 12 м и кабеля 10 м, ток 2600 А при 20 К, поток жидкого водорода около 250 г/с. Это примерно соответствовало передаче

тепловой мощности 30 МВт и электрической мощности 50 МВт, т.е. всего около 80 МВт мощности по линии диаметром всего 80 мм.

Вторая модель имела гибкий криостат 33 м с тремя различными типами теплоизоляции, кабель длиной 30 м и высоковольтные токовводы. Критический ток кабеля составил примерно 3,5 кА, рабочий 3 кА. Система была испытана на высоком напряжении до 50 кВ постоянного тока, т.е. рабочее напряжение могло быть 25 кВ, что соответствует электрической мощности 75 МВт. Поток жидкого водорода достигал 450 г/с, что соответствует химической мощности около 56 МВт. Таким образом, в этой модели передаваемая мощность составила ~130 МВт. При этом плотность передаваемой мощности достигала ~106 Вт/м² при скромных размерах системы и относительно малом токе. Это сравнимо с плотностью потока мощности в нефтяных или газовых трубопроводных линиях.

Первые в мире эксперименты с гибридными транспортными энергетическими линиями доказали правильность концепции таких систем. В будущем они могут быть реально востребованы, особенно если учесть возрастающее потребление водорода в мире.

Сверхпроводящие ограничители тока короткого замыкания (СОТ). Это, пожалуй, единственное, что можно назвать enabling, т.е. создающее новые возможности применения сверхпроводимости в электроэнергетике. Кроме того, их часто называют «наиболее востребованным» применением в этой области, поскольку они обладают следующими уникальными свойствами:

быстрым (в первой четверти периода) появлением ограничивающего импеданса, чему нет аналогов в обычной электротехнике;

возможностью автоматического исчезновения ограничивающего импеданса для дальнейшей нормальной работы при устранении КЗ;



Рис. 14. Первые в мире модели гибридных транспортных энергетических линий: а – первая модель длиной 12 м; б – вторая модель длиной 33 м с гибким криостатом

непрерыванием полностью тока в сети в случае КЗ, отсутствием влияния на сеть в нормальном режиме работы;

возможностью объединения частей энергосистемы без повышения токов КЗ;

невозможностью замены другим элементом в интеллектуальных сетях

Общая схема работы простейшего СОР резистивного типа показана на рис. 15. В таком СОР реализовано одно из основных свойств сверхпроводника – находиться в состоянии с нулевым и конечным сопротивлением. При превышении током в цепи критического значения тока сверхпроводника последний теряет сверхпроводимость и своим сопротивлением ограничивает ток. При возникновении КЗ все напряжение цепи прикладывается к СОР и ток определяется сопротивлением сверхпроводника. Без токоограничителя значение тока в цепи будет определяться только внутренним сопротивлением источника тока.

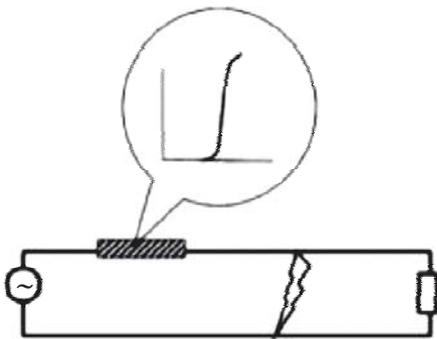


Рис. 15. Схема включения СОР резистивного типа

Помимо резистивной схемы СОР существует еще несколько вариантов токоограничения с использованием сверхпроводимости (рис. 16). Наиболее «прямолинейный» резистивный СОР часто

снабжают еще и параллельно подсоединенным реактором или сопротивлением, чтобы уменьшить ток в сверхпроводнике и его нагрев во время КЗ. С этой же целью (снижение разогрева сверхпроводника во время КЗ) используют последовательно подключенный быстродействующий выключатель (рис. 16,а).

Одним из наиболее распространенных вариантов СОР, помимо резистивного, является реактор с подмагничиванием (рис. 16,б). Его схема позволяет использовать сверхпроводящую катушку подмагничивания с постоянным током. Эта катушка вводит железный сердечник в насыщение, в результате чего обмотка переменного тока, включенная в сеть, имеет малый импеданс. При превышении тока в цепи сердечник выходит из насыщения, импеданс обмоток увеличивается и ограничивает ток. Основное преимущество такого СОР – мгновенное восстановление импеданса после снятия КЗ.

Другой вариант исполнения СОР – использование свойств замкнутого сверхпроводящего контура сохранять неизменным захваченный магнитный поток (эффект Мейсснера), это СОР со сверхпроводящим экраном (рис. 16,в). При превышении тока в первичной обмотке сверхпроводящий экран выходит из сверхпроводящего состояния и импеданс первичной обмотки, включенной в сеть, повышается.

Комбинация вариантов СОР со сверхпроводящим экраном и резистивного – это гибридная схема. Первичная обмотка трансформатора включена в сеть, а вторичная замкнута сверхпроводящей обмоткой со сверхпроводящим переключающим элементом. В момент КЗ ток во вторичной цепи повышается, сверхпроводящий ключ размыкается и повышает импеданс первичной обмотки (рис. 16,г).

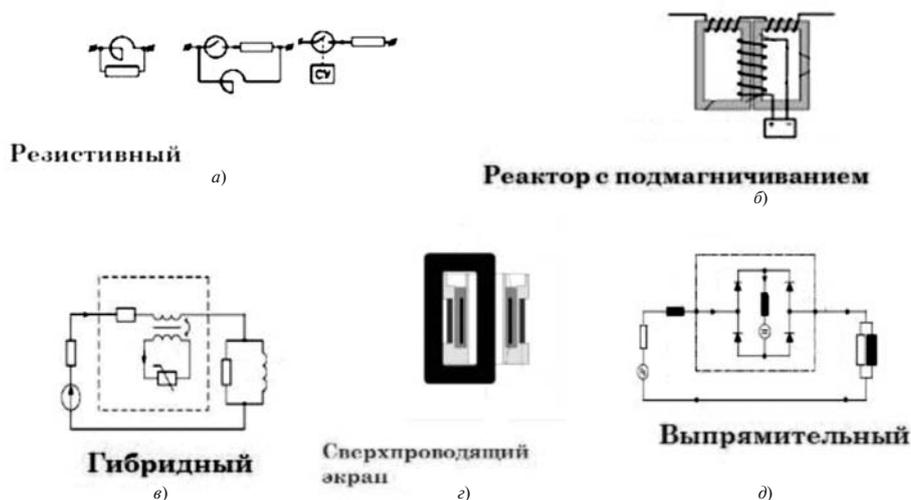


Рис. 16. Схемы исполнения токоограничителей с использованием сверхпроводимости

Эта схема позволяет понизить напряжение вторичной цепи со сверхпроводящим ключом.

Наконец, мостовая схема на рис. 16,д просто подключает сверхпроводящую катушку с высоким реактивным импедансом в случае разбаланса моста при КЗ.

В применении рассмотренных схем СОР нет единого подхода. Например, резистивная схема может обеспечить высокую глубину токоограничения (уменьшение значения ограниченного тока по сравнению с ожидаемым током КЗ), однако разогретый сверхпроводник не всегда сможет достаточно быстро восстановиться после снятия КЗ. Возникают сложности и с обеспечением высокого напряжения в криостате с СОР.

Nexans FCL systems Commercial Projects

12-100 (ASL 1)
first commercial system
Field tested for ~8 months

12-800 (Vattenfall)
first system in a power station
Field tested Nov. 2009- Dec. 2010

12-400 (ASL 2)
second system for UK (bifilar)
Presently under installation

XX-YYY
XX: Voltage [kV]
YYY: Current [A]

Joachim Bock, MRS Spring 2011 Nexans SuperConductor

Рис. 17. Резистивные СОР на основе объемного Bi-2212, используемые в проекте AMRACITY – наиболее коммерциализованные варианты (из доклада М. Парка на конференции МТ-22, 2011 г.)

Реактор с подмагничиванием предполагает мгновенное восстановление после СОР, однако глубина ограничения редко превышает 60%, тогда как резистивный СОР может ограничить ток в не-

сколько раз. Конкретный выбор схемы СОР зависит от поставленной задачи токоограничения. Наиболее востребованными являются СОР для магистральных сетей с напряжением 100 кВ и более, в которых токи КЗ могут достигать сотен килоампер.

Однако разрабатываются СОР и для систем среднего напряжения до 35 кВ, например для железнодорожного транспорта. Для таких СОР созданы прототипы, работающие в сетях (в том числе в проект AMRACITY). На рис. 17 показаны СОР резистивного типа, использующие объемные элементы сверхпроводника типа Bi-2212, разработанные в компании Nexans и установленные в сетях среднего напряжения Германии и Великобритании.

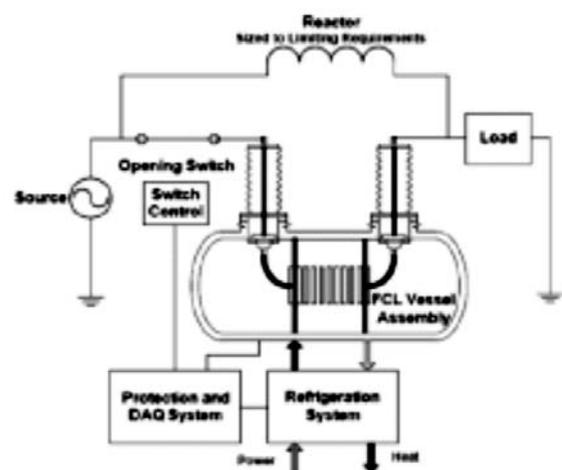
Идут разработки и испытания прототипов СОР на высокое напряжение. На рис. 18 показан вариант одной фазы резистивного СОР на 138 кВ, разработанный совместно компаниями American Superconductor в США и Сименс в Германии. Виден значительный размер криостата и токовых вводов СОР.

И, наконец, мировой рекорд по напряжению и мощности держит СОР типа реактор с подмагничиванием, «разработанный в Китае (рис. 19) и работающий» на одной из подстанций с 2012 г. Однако глубина токоограничения у него невелика по сравнению, например, с резистивным СОР, показанным на рис. 18.

В России также ведутся разработки различных типов СОР в рамках программы «Сверхпроводниковая индустрия». Например, в ВЭИ–НИИТФА разработаны резистивные СОР постоянного тока на 35 кВ, 3 кА и переменного тока на 35 кВ, 1 кА. Последний вариант имеет последовательно включенный вакуумный размыкатель для ограничения перегрева сверхпроводящей части СОР (рис. 20) [16].



Рис. 18. Наиболее высоковольтный резистивный СОР на 138 кВ, снижение токов с 40–90 до 10–20 кА; справа – принципиальная схема (www.amsc.com)



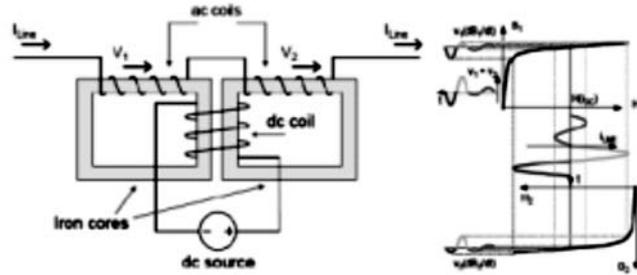


Рис. 19. СОР типа «реактор с подмагничиванием» (220 кВ/300 МВА) ограничивает ток с 50 до 30 кА; справа – схема и запись срабатывания (<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/pdf/RN29.pdf>)

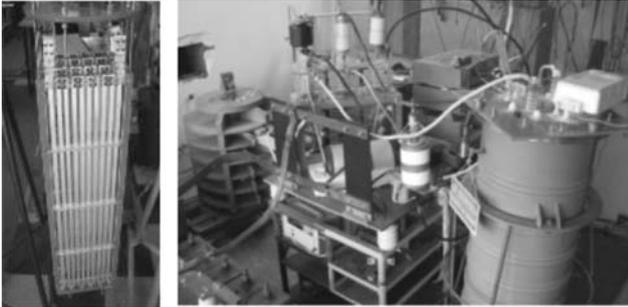


Рис. 20. СОР резистивного типа, разработанные в ВЭИ–НИИТФА

Вращающиеся машины. Преимущества сверхпроводимости во вращающихся электрических машинах (генераторах и двигателях) реализуются в основном в уменьшении их массы и габаритов. На рис. 21 показан сверхпроводниковый ВТСП двигатель для судов, разработанный компанией American Superconductor. Видно, что использование ВТСП позволяет более чем вдвое снизить массу и габариты двигателя при увеличении мощности.

Другое популярное направление разработок – сверхпроводниковые генераторы для ветроэлектростанций. Проблема в том, что ветрогенераторы – медленно вращающиеся машины. Если использовать машины без редукторов (которые ненадежны и часто ломаются), то при снижении частоты вращения увеличения мощности генератора на 10 МВт можно достичь либо применяя постоянные магниты, либо ВТСП машины. Оценки показывают: обычный генератор 10 МВт с редуктором имеет

массу 500 т; генератор с постоянными магнитами – 200–300 т; на основе ВТСП – 50–80 т. Разработки таких генераторов ведутся по всему миру, в том числе и в Московском авиационном институте.

Трансформаторы. Сверхпроводниковые трансформаторы – это в чистом виде замещающая технология. Первый такой трансформатор мощностью 800 МВт был запущен еще в 1996 г. в японском университете Кюсю. Затем были созданы прототипы мощностью 1 МВт компанией Сименс и 5/10 МВт компанией Waukesha. Однако высокая стоимость исходных высокотемпературных сверхпроводников, а также надежность и эффективность обычных трансформаторов сдерживают энтузиазм разработчиков ВТСП трансформаторов. И все же при использовании эффекта токоограничения в сверхпроводниковом трансформаторе место их применения может быть найдено (см., например, [17]).

В России в рамках проекта «Сверхпроводниковая индустрия» ведется разработка трансформатора на 1 МВт под руководством ЭНИН им. Г.М. Кржижановского.

Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН). Сверхпроводимость может быть в принципе использована для аккумуляции электроэнергии. Сверхпроводящий магнит с полем, переведенный в режим замороженного потока с помощью сверхпроводящего ключа, может сохранить энергию, пропорциональную квадрату магнитного поля и его размерам, сколь угодно долго. Работы по сверхпроводящим накопителям энергии актив-

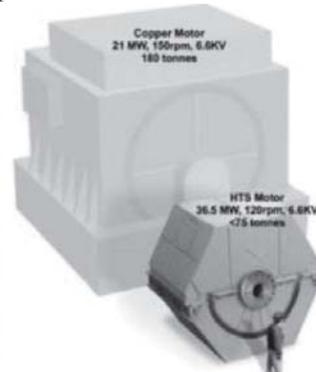


Рис. 21. Сверхпроводниковый двигатель для судов, разработанный компанией American Superconductor и его сравнение с обычным судовым двигателем (www.amsc.com)

но велись в мире еще в 70-х годах прошлого века с применением низкотемпературных сверхпроводников, однако успехи в разработке суперконденсаторов уменьшили энтузиазм разработчиков СПИН.

В электроэнергетике СПИН может использоваться для многих целей: улучшения качества электроэнергии, в качестве источника бесперебойного питания или компенсатора суточного потребления энергии.

Поскольку энергия запасается в магнитном поле, а при температуре жидкого азота с помощью ВТСП сложно получить сильное магнитное поле, проекты СПИН с ВТСП, как правило, рассматриваются при пониженных температурах примерно 30–50 К. Однако в этом случае возникает вопрос: а почему не использовать низкотемпературные сверхпроводники при 4,2 К? Возможной альтернативой является применение «промежуточного» (по критической температуре) сверхпроводника MgB_2 при температурах жидкого водорода и ниже.

К настоящему времени работы по СПИН ведутся во многих странах, но достигнутый пока максимум запасенной энергии составляет несколько мегаджоулей, чего явно недостаточно для энергетических применений.

Следует упомянуть еще одну область возможного использования СПИН — как трансформатора мощности. Сверхпроводящий индуктивный накопитель может быть заряжен от сравнительно слабого источника, но затем быстро (за миллисекунды) выдать разряд высокой мощности. Такое применение возможно для импульсных систем, таких как лазеры, электромагнитные пушки и т.п.

Выводы. 1. Со времени открытия сверхпроводимости ее крупномасштабные применения в некоторых областях достигли впечатляющих успехов, особенно в области низкотемпературной сверхпроводимости. Создан рынок практически используемых сверхпроводящих материалов. Однако о коммерческом применении сверхпроводимости можно говорить только в отношении МРТ сканеров и небольшого производства ЯМР спектрометров и сверхпроводящих магнитов для исследований. Низкотемпературные сверхпроводящие материалы производятся во всем мире, включая Россию. Для развития их применения нужно создавать крупные проекты, например, новый термоядерный реактор (после ИТЭР), новые ускорители (после БАК — ЛНС) и т.п. Главная задача НТСП — создание сильных магнитных полей, особенно в больших объемах.

2. Открытие ВТСП позволяет говорить о ее применении в электроэнергетике. В электротехнических устройствах, не требующих использования слишком сильных магнитных полей, решение этой задачи вполне реально. Работы ведутся достаточно активно, особенно в области силовых кабелей и ог-

раничителей токов КЗ. Силовые ВТСП кабели уже рассматриваются как предкоммерческие изделия.

3. Высокая стоимость ВТСП материалов сдерживает их коммерческое применение в электроэнергетике. Для снижения цен необходимо создавать рынки ВТСП электротехнических устройств и увеличивать выпуск ВТСП материалов. Создание ВТСП рынка потребует воспитания и обучения специалистов (возможно, статья поможет в этом). Нельзя забывать о разработках новых сверхпроводящих материалов, таких как диборид магния MgB_2 и арсениды железа.

4. Главные направления разработок ВТСП устройств: кабели, токоограничители и, возможно, ветрогенераторы, а также военные применения (кабели размагничивания и электродвижение судов). Для развития исследований практического применения сверхпроводимости необходимо привлекать мощные госкорпорации (Россети, ФСК ЕЭС, Росатом) и правительственные организации (Минобрнауки, Минпромторг, Минобороны).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хьюм Дж., Кюнцлер Дж., Маттиас Б. Путь к сверхпроводящим материалам. — В сб.: Физика за рубежом. — М.: Мир, 1982, 327 с.
2. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — М.: Мир, 1985, 406 с.
3. Iwasa Y. Case studies in superconducting magnets. — New York: Plenum press, 1994, 421 с.
4. Bednorz J.G. and Müller K.A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. — Z. Physik, B64 (1), 1986, pp. 189–193.
5. Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Radchenko I.P., Polyakova N.V. 1-G versus 2-G — comparison from the practical standpoint for HTS power cables use. — Journal of Physics: Conf. Series 97 (2008) 012058, doi:10.1088/1742-6596/97/1/012058.
6. Dong Zhang, Shaotao Dai, Yuping Teng, Fengyuan Zhang, Naihao Song, Zhiyuan Gao, Zhiqin Zhu, Xi Xu, Tao Ma, Zhifeng Zhang, Weiwei Zhou, Yinshun Wang, Yubao Lin, Jingye Zhang, Guomin Zhang, Liye Xiao, Liangzhen Lin. Testing and Demonstration of a 10-kA YNS DC Power Cable. Applied Superconductivity. — IEEE Trans. April 2014, vol. 24, No. 2, pp. 99–102.
7. Высоцкий В.С., Носов А.А., Рычагов А.В., Сытников В.Е., Фетисов С.С., Шутов К.А. Создание силового сверхпроводящего кабеля на базе ВТСП технологий. — Кабели и провода, 2010, No. 2 (321), с. 3–10.
8. Kopylov S., Sytnikov V.E., Bemert S.E., Ivanov Y.V., Krivetsky I., Romashov M., Shakaryan Yu., Kellir V., Shikov A., Patrikeyev V., Lobytsev V., Shcherbakov V. HTS DC Transmission Line for Megalopolis Grid Development. — Journal of Physics: Conf. Series 05/2014 507(3):032047.
9. Grant P.M., Energy for the City of the Future. — The Industrial Physicist, Feb-Mar, 2002, pp. 22–25.
10. Grant P.M. Potential Electric Power Applications for Magnesium Diboride. — Proc., Mat. Res. Soc. Symp, 689, E1.1 2002.
11. Grant P.M. Energy for the City of the Future. — Nuclear Future, 2005, No 1, pp. 34–37.
12. Grant P.M., Starr C. and Overbye T.J.A Power Grid for the Hydrogen Economy. — Scientific American, 2006, 295, pp. 76–82.
13. Grant P.M. The Energy Super Grid. — Proc. World Energy Conference (Shanghai), 2004, pp. 109–112.

14. Костюк В.В., Антюхов И.В., Благов Е.В., Высоцкий В.С., Каторгин Б.И., Носов А.А., Фетисов С.С., Фирсов В.П. Экспериментальная гибридная энергетическая магистраль с жидким водородом и сверхпроводящим кабелем на основе дигборида магния (MgB_2). – Письма в ЖТФ, 2012, т. 38, вып. 6

15. Fisher L.M., Voloshin I.F., Yeysin D.V., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Degtyarenko P.N., Alferov D.F., Akhmetgareev M.R., Budovskii A.I., Bunin R.A., Tshai E.V. Superconducting DC Current Limiting with Vacuum Circuit Breaker. – Physics Procedia, 2012, vol. 36 No. 1, pp. 1264–1267.

16. Okubo H., Kurupakorn C., Ito S., Kojima H., Hayakawa N., Endo F., Noe M. High-Tc Superconducting Fault Current Limiting

Transformer (HTc-SFCLT) With 2G Coated Conductors. Applied Superconductivity. – IEEE Trans., June 2007, vol.17, No.2, pp. 1768,1771, doi: 10.1109/TASC.2007.897813.

[07.07.14]

Автор: Высоцкий Виталий Сергеевич окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1972 г. В 2004 г. получил ученую степень доктора технических наук. Директор научного направления, заведующий отделением ОАО «ВНИИКП».

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 11, pp. 4–16.

Large-Scale Application of Superconductivity after a Century of Its Discovery

V.S. VYSOTSKII

The possibilities of using superconductivity began to be discussed immediately after it was discovered in April 1911 by the Dutch scientist Kamerlingh Onnes. The main expectations were connected with the possibility of obtaining strong magnetic fields and transmission of electric power without losses. These expectations began to be realized only in the early 1960s when the Nb₃Sn, NbZr, and NbTi superconductors were synthesized for the first time, the use of which made it possible to retain high density of current in strong magnetic fields. The next stage of using the superconductivity phenomenon for practical applications relates to the mid 1980s with the discovery of high-temperature superconductors able to operate at the liquid nitrogen temperature. The proposed article (review) indicates both successes and failures in the use of low- and high-temperature superconductivity, and an attempt is made to outline the modern trends relating to developments in this field. References to commonly accessible Internet resources are given that will help the interested readers to get more information about particular superconducting devices.

Key words: *superconductivity phenomenon, review of investigations, low- and high-temperature superconductivity, successes and failures, modern trends of application*

REFERENCES

1. Kh'yum Dzh., Kyuntsler Dzh., Mattias B. *Put' k sverkhprovodyashchim materialam. – V sbornike «Fizika za rubezhom» (Way to superconducting materials, Collection «Physics abroad».* Moscow. Publ. «Mir», 1982, 327 p.

2. Vilson M. *Sverkhprovodyashchiye magnity (Superconducting magnets).* Moscow. Publ. «Mir», 1985, 406 p.

3. Iwasa Y. Case studies in superconducting magnets. – New York: Plenum press, 1994, 421 c.

4. Bednorz J.G. and Müller K.A. Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. – Z. Physik, B64 (1), 1986, pp. 189–193.

5. Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Radchenko I.P., Polyakova N.V. 1-G versus 2-G – comparison from the practical standpoint for HTS power cables use. – Journal of Physics: Conf. Series 97 (2008) 012058, doi:10.1088/1742-6596/97/1/012058.

6. Dong Zhang, Shaotao Dai, Yuping Teng, Fengyuan Zhang, Naihao Song, Zhiyuan Gao, Zhiqin Zhu, Xi Xu, Tao Ma, Zhifeng Zhang, Weiwei Zhou, Yinshun Wang, Yubao Lin, Jingye Zhang, Guomin Zhang, Liye Xiao, Liangzhen Lin. Testing and Demonstration of a 10-kA YNS DC Power Cable. Applied Superconductivity. – IEEE Trans. April 2014, vol. 24, No. 2, pp. 99–102.

7. Vysotskii V.S., Nosov A.A., Rychagov A.V., Sytnikov V.E., Fetisov S.S., Shutov K.A. *Kabeli i provoda (Cables and wires),* 2010, No. 2 (321), pp. 3–10.

8. Kopylov S., Sytnikov V.E., Bemert S.E., Ivanov Y.V., Krivitsky I., Romashov M., Shakaryan Yu., Kellir V., Shikov A.,

Patrikeyev V., Lobyntsev V., Shcherbakov V. HTS DC Transmission Line for Megalopolis Grid Development. – Journal of Physics: Conf. Series 05/2014 507(3):032047.

9. Grant P.M. Energy for the City of the Future. – The Industrial Physicist, Feb-Mar, 2002, pp. 22–25.

10. Grant P.M. Potential Electric Power Applications for Magnesium Diboride. – Proc., Mat. Res. Soc. Symp, 689, E1.1 2002.

11. Grant P.M. Energy for the City of the Future. – Nuclear Future, 2005, No 1, pp. 34–37.

12. Grant P.M., Starr C. and Overbye T.J. A Power Grid for the Hydrogen Economy. – Scientific American, 2006, 295, pp. 76–82.

13. Grant P.M. The Energy Super Grid. – Proc. World Energy Conference (Shanghai), 2004, pp.109–112.

14. Kostyuk V.V., Antyukhov I.V., Blagov E.V., Vysotskii V.S., Katorgin B.I., Nosov A.A., Fetisov S.S., Firosov V.P. An Experimental Hybrid Power Mains with Liquid Hydrogen and a Superconducting Cable on the Basis of Magnesium Diboride (MgB_2). – Letters to the Journal of Technical Physics, 2012, t. 38, iss. 6.

15. Fisher L.M., Voloshin I.F., Yeysin D.V., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Degtyarenko P.N., Alferov D.F., Akhmetgareev M.R., Budovskii A.I., Bunin R.A., Tshai E.V. Superconducting DC Current Limiting with Vacuum Circuit Breaker. – Physics Procedia, 2012, vol. 36 No. 1, pp. 1264–1267.

16. Okubo H., Kurupakorn C., Ito S., Kojima H., Hayakawa N., Endo F., Noe M. High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) With 2G Coated Conductors. Applied Superconductivity. – IEEE Trans., June 2007, vol.17, No.2, pp.1768,1771,doi: 10.1109/TASC.2007.897813.

Author: Vysotskii Vitalii Sergeevich (Moscow, Russia) – Doctor Tekhn. Sci., Head at science, JSC «All-Russia Scientific Institute of the Cable Industry».

