

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 6 выпуск 3
июль 2009

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы Инвесторы
Генераторы Накопители
Токоограничители

РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Первый российский сверхпроводящий силовой кабель на основе ВТСП успешно прошел испытания

ОАО «ВНИИКП» и ОАО «НТЦ Электроэнергетики» совместно провели испытания первого российского силового ВТСП кабеля на полигоне для испытаний сверхпроводниковых электроэнергетических устройств. Трехфазный кабель длиной 30 м с номинальным током 1500 А и напряжением 20 кВ был изготовлен и испытан в рамках программы ОАО «РАО ЕЭС» по разработке и созданию сверхпроводящих электроэнергетических устройств. Работа финансировалась ОАО «ФСК ЕЭС».

Конструкция кабеля и испытательный полигон

Кабель и токовые вводы

Кабель длиной 30 м был рассчитан и разработан в ОАО «ВНИИКП». Все элементы кабеля были изготовлены во ВНИИКП кроме электрической изоляции, которая была изготовлена на заводе «Камкабель» (г. Пермь). Разработке 30-ти метрового кабеля предшествовали многочисленные технологические эксперименты, разработка и испытания отрезка кабеля длиной 5 м [1].

Конструкция кабеля подробно описана в [2, 3]. Кабель состоит из центрального несущего элемента – формера, двух повивов сверхпроводящих лент, высоковольтной изоляции из кабельной бумаги и экрана из медных лент. Фото кабеля показано на рис. 1. В его конструкции были использованы различные исходные ВТСП материалы первого поколения, различные токовые вводы и криостаты различного диаметра.



Рис. 1. Фотография модели кабеля.



Рис. 2. Два типа токовых вводов, присоединенные к электрической и криогенной системам полигона.

И далее...

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Перспективы европейской сверхпроводимости 5

ВТСП УСТРОЙСТВА

На пути к высоковольтному ВТСП токоограничителю 6

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

ВТСП ЛЭП большой протяженности. Конструкция и оценки 8

НТСП УСТРОЙСТВА

СП магниты для двигателей космических аппаратов 10

ДИБОРИД МАГНИЯ MgB_2

Токонесущие элементы на основе MgB_2 12

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

О роли ВТСП в энергетике будущего (США) 14

Одна фаза кабеля изготовлена из ВТСП лент типа СТ-ОР™ компании Sumitomo Electric Industry, Ltd. (Japan). Две фазы были изготовлены из лент типа Hermetic™ компании American Superconductor Corporation (USA).

Две пары токовых вводов были изготовлены в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова (С.-Петербург) и одна пара в РНЦ «Курчатовский Институт». Токовые вводы рассчитывались на максимальный ток 4 кА и рабочее напряжение – 20 кВ. Токовые вводы показаны на рис. 2.

30-ти метровые гибкие криостаты кабеля были поставлены компанией Nexans (Ганновер, Германия). Два криостата имели наружный диаметр 110 мм, один 92 мм. Внутренние диаметры всех криостатов были одинаковы – 60 мм.

Испытательный полигон

Испытания кабеля проводились на специально созданном полигоне для испытаний мощного сверхпроводникового электроэнергетического оборудования в ОАО «НТЦ электроэнергетики». Полигон подключен к подстанции «Южная» Московской энергосети и имеет возможность испытывать любое оборудование при напряжениях от 6 до 183 кВ и токах до 3000 А. Важно отметить, что на полигоне установлены реакторы, которые позволяют испытывать электротехнические устройства с полной нагрузкой, что делает его уникальным в ряду аналогичных испытательных центров.

Система криогенного обеспечения (СКО) полигона поставлена компанией Стирлинг (Нидерланды). Стандартный блок типа LPC4 был адаптирован под нужды полигона. Блок позволяет использовать два криокулера одновременно, хотя в настоящее время установлен только один. Холодопроизводительность СКО – до 3,4 кВт на уровне 77К и может быть увеличена до 7 кВт, если купить и установить второй криокулер.



Рис. 3. Криогенная система и БРН. Показаны направления потоков жидкого азота.

Важной частью СКО являются специально разработанные блоки распределения нагрузок (БРН). Эти блоки установлены на входе и выходе фаз кабеля и позволяют управлять потоками азота, перераспределяя их между фазами. Кроме того, в БРН установлены датчики давления, температуры и расходомеры, что позволяет получать полную информацию о состоянии криогенной системы. Все параметры собираются и записываются компьютерной системой сбора данных в реальном времени. Фото СКО показано на рис. 3, а на рис. 4 показан экран панели системы сбора данных.

СКО обеспечивает поток переохлажденного азота до 100 л/мин при температурах до 66К. Минимальное давление на входе системы 2 атм, максимальное давление на выходе системы – 6 атм.

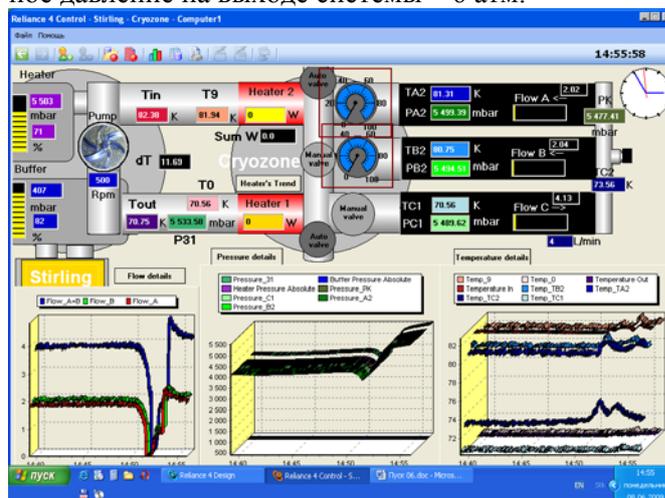


Рис. 4. Пример экрана контрольной панели системы криогенного обеспечения.

Испытания криогенной системы

Были проведены несколько циклов захлаживания – отогрева кабеля с помощью СКО. СКО может работать в трех режимах. Вначале производится так называемое «мягкое захлаживание» (soft cooling), когда система прокачивает газообразный азот через кабель, постепенно снижая его температуру. Азот подается в фазу С и возвращается через фазы А и В. Мягкое захлаживание производится в течение 7-10 часов, после чего включается «предзахлаживание» (subcooling). В этом режиме начинается впрыскивание жидкого азота в кабельную линию, что ускоряет охлаждение кабеля. Когда температура на входе кабеля достигает ~80К, а на выходе ~85К – включается криогенный насос и система переходит в режим нормального охлаждения.

Во всех режимах СКО работает полностью автоматически, но переключение режимов осуществляется оператором. Пример захлаживания кабеля показан на рис. 5. Общее время до выхода кабеля на рабочий режим с температурой ниже 77К занимает около 30 часов.

Были проведены также испытания работоспособности кабеля при отключении СКО. Для этого при

номинальном токе в кабеле в 1500 А и при начальных температурах на входе ~ 70К, а на выходе ~72К был остановлен криогенный насос и, соответственно, поток азота. В течение часа температура в кабеле на выходе достигла величины порядка 90К. Это означает, что энтальпии кабеля и жидкого азота в

нем недостаточно для сохранения работоспособности кабеля в течение часа.

В целом, испытания системы криогенного обеспечения показали ее полную работоспособность и гибкость, позволяющую проводить испытания при различных условиях охлаждения.

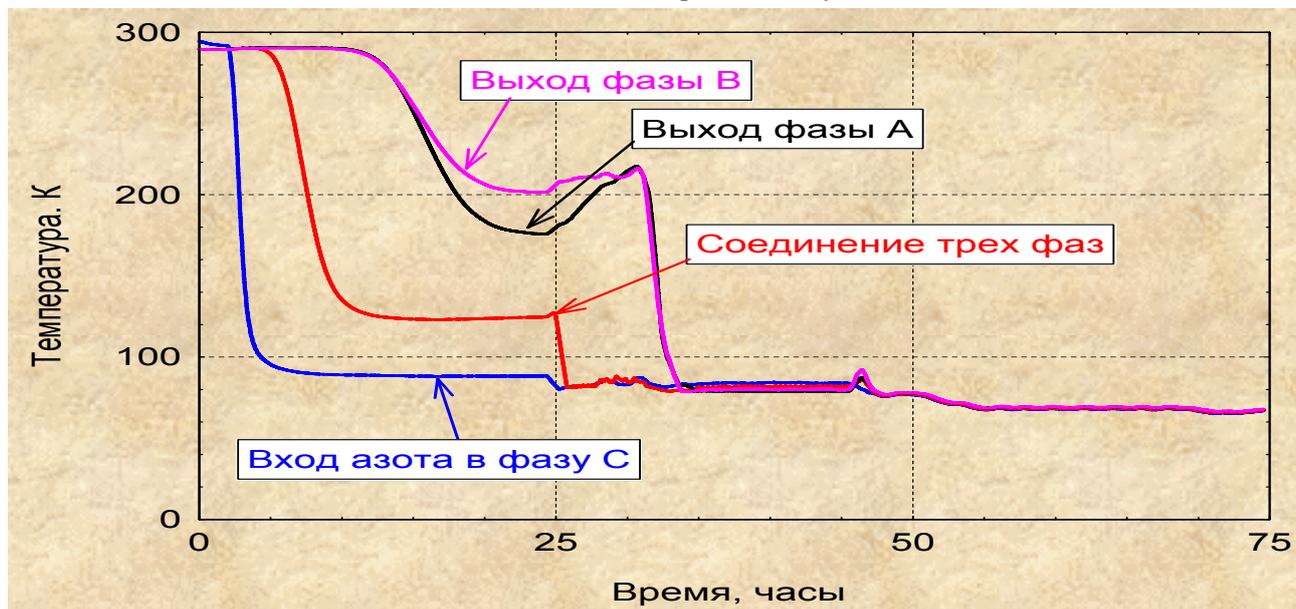


Рис. 5. Пример изменения температур при захолаживании кабеля.

Электрические испытания

Были проведены следующие электрические испытания кабеля:

- на электрическую прочность;
- на критические токи;
- под полной нагрузкой;
- имитации короткого замыкания (перегрузки током).

При испытании на электрическую прочность, при температурах 70-77К, последовательно на каждую фазу было подано постоянное напряжение в 70 кВ в течение 15 мин. Токи утечки не превысили 150 мкА. Проверка сопротивления изоляции при напряжении 2,5 кВ показала величину более 10 ГОм.

В дальнейшем была произведена проверка электрической прочности переменным напряжением 50 Гц. Все фазы кабеля и токовых вводов выдержали напряжение в 50 кВ действующего значения.

Критический ток фаз определялся на постоянном токе. При испытаниях на критический ток не было возможности подсоединить потенциальные контакты непосредственно к сверхпроводящей жиле. Потенциальные контакты подсоединялись к токовым вводам, и при измерениях снималась вольтамперная характеристика (ВАХ) на постоянном токе, включающая напряжение на токовых вводах (рис. 6). Для определения реальной ВАХ жилы кабеля, численным методом вычиталась наклонная часть начальной ВАХ и получалась ВАХ жилы кабеля (рис. 7). По ВАХ жилы кабеля по обычному критерию 100 мкВ/м определялся критический ток 30-ти

метровой жилы кабеля. Полученные результаты по зависимости критического тока фаз кабеля от температуры, показаны на рис. 7.

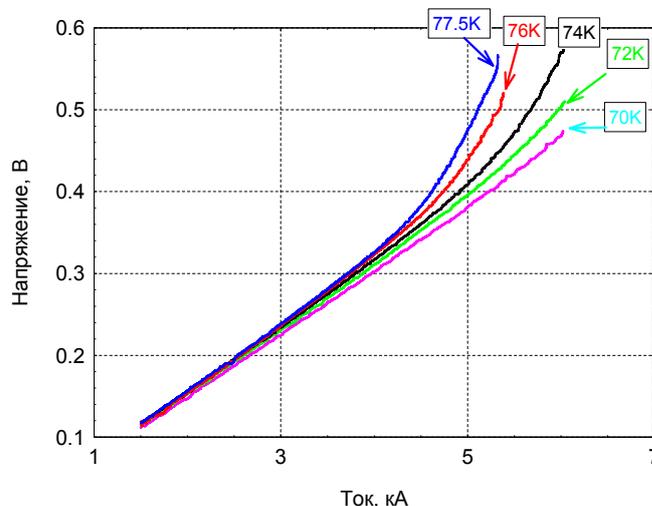


Рис. 6. Измеряемые вольтамперные характеристики при определении критического тока кабеля на постоянном токе.

Поскольку температура меняется по длине кабеля, то за температуру фазы принималась средняя величина. На графике (рис. 8) указаны погрешности измерения температуры и определения критического тока с учетом падения напряжения на токовых вводах. Сплошной линией на графике на рис. 8 показаны данные по зависимости $I_c(T)$, взятые из спецификаций производителей исходной ленты, которые мало различались для двух типов лент. Видно хорошее совпадение общего хода всех кривых.

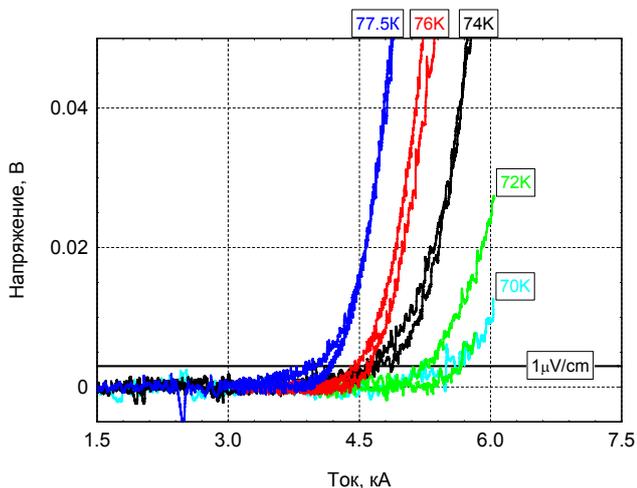


Рис. 7. Вольтамперные характеристики сверхпроводящей части кабеля после обработки данных, показанных на рис. 6.

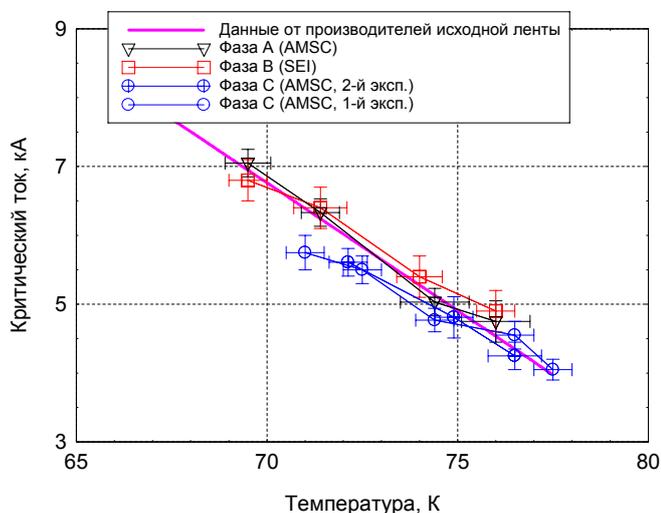


Рис. 8. Зависимости критических токов 30-ти метровых фаз кабеля от температуры. Сплошная линия – зависимость $I_c(T)$ по спецификациям производителей ВТСП лент.

Критические токи всех фаз больше 4200 А при температуре 77К, то есть практически совпадают с суммой критических токов отдельных лент.

Были проведены испытания кабеля на переменном токе и при полной нагрузке. При этих испытаниях медные экраны кабеля размыкались на одном конце. При замыкании экранов с двух сторон в них наводились вихревые токи, приводящие к дополнительным потерям в холодной зоне криостатов, что требовало дополнительной холодопроизводительности от криогенной установки.

На рис. 9 показан пример испытания кабеля на переменных токах. Видно, что кабель способен длительное время работать при 30%-й перегрузке (2000 А) от номинального тока и около часа проработал при 67%й перегрузке (2500 А) от критического тока.

При испытании под полной нагрузкой кабель проработал более 72 часов при токе 1500 А и 20 кВ действующего значения. Это соответствовало 50

МВА мощности передаваемой по трехфазному кабелю.

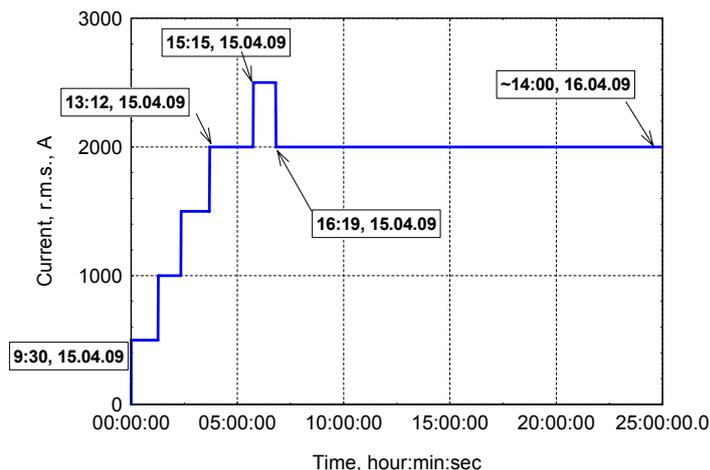


Рис. 9. Пример испытаний на переменном токе.

При испытаниях на токовую перегрузку или имитацию короткого замыкания на кабель подавался импульс тока от мощной LC – батареи. Максимальная амплитуда тока составила 28 кА, что более чем в 13 раз превышает амплитуду номинального тока. Повышения температур во внутреннем и внешнем каналах кабеля, показанные на рис. 10, составили 0,15-0,35К. Величины перегрева, рассчитанные по модели, описанной в [2], должны были составить 0,2-0,3К, что неплохо совпадает с экспериментом.

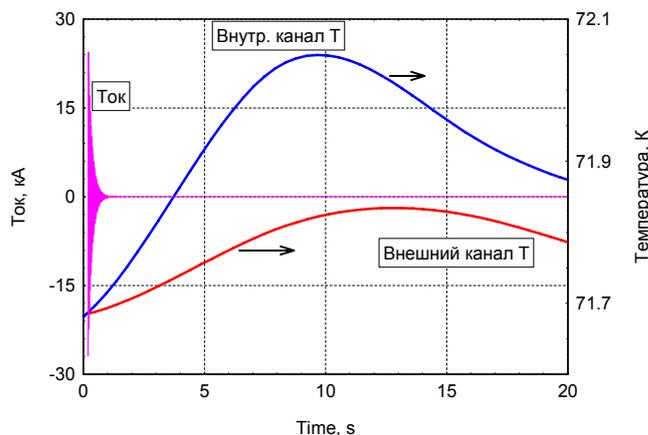


Рис. 10. Изменения температуры во внутреннем и внешнем каналах кабеля имитации тока короткого замыкания с амплитудой 28 кА.

Таким образом, кабель выдержал испытания на перегрузку током, что демонстрирует о правильном выборе его защиты.

Выводы

Испытания первого в России сверхпроводящего силового трехфазного кабеля на основе высокотемпературных сверхпроводников завершены. Кабель продемонстрировал полное сохранение сверхпроводящих свойств после прохождения всего технологического маршрута, критические токи всех трех фаз равны сумме токов исходных ВТСП лент. Параметры кабеля соответствуют техническому заданию, номинальный ток 1500 А, напряжение 20 кВ. Кабель способен работать при перегрузке в 20% от

номинального тока и выше и передавать мощность в 50 МВА (или в 70 МВА при 30% перегрузке). Кабель выдержал без повреждений более чем 13-ти кратную перегрузку током и 70 кВ постоянного и 50 кВ – переменного напряжения при высоковольтных испытаниях.

Испытания кабеля проводились на отечественном уникальном полигоне для испытания сверхпроводникового электротехнического оборудования. Полигон оборудован криогенной системой, позволяющей проводить испытания при охлаждении жидким азотом до 66К, давлении до 6 атм и потоке азота до 100 л/мин. Энергетика полигона позволяет испытывать оборудование **при полной электрической нагрузке** при напряжениях от 6 до 183 кВ и переменных токах до 3000 А.

В настоящее время завершается изготовление ВТСП трехфазного силового кабеля длиной 200 м. Его рабочие параметры аналогичны 30-ти метровому: 1500 А – 20 кВ – 50 МВА. Это кабель имеет сверхпроводящий экран. Начало испытаний кабеля длиной 200 м планируется на 1 октября 2009 г. В дальнейшем этот кабель предполагается установить для опытной эксплуатации на одной из подстанций Московской энергосети.

Успешные испытания первого российского ВТСП кабеля длиной 30 м позволяют с оптимизмом смотреть в будущее этого применения высокотемпературной сверхпроводимости, в том числе и в России.

В.С. Высоцкий

1. V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 1684 (2007).
2. V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 1702 (2009).
3. V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov et al., "The 30 m HTS power cable development and test", *Proceedings of ICEC-22-ICMC-2008, Korean Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, 907 (2009).
4. V.E. Sytnikov, K.A. Shutov, V.S. Vysotsky et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 1706 (2009).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Перспективы европейской сверхпроводимости

В мае в немецком городе Брауншвейг прошел четвертый семинар по сверхпроводимости. В этом году главной темой двухдневной встречи была электроэнергетика и перспективы ВТСП в этой области. Все 10 докладов на немецком находятся в свободном доступе [1].

Вернер Пруссеит (Theva GmbH, iv Supra) представил на семинаре концепцию эффективного снабжения электроэнергией крупных населённых пунктов. Исследование посвящено технико-экономической оценке, но, в основном, преследует цель популяризации идеи применения сверхпроводниковых технологий в современных энергосетях. Напомним, что промышленный союз iv Supra создан именно

для лоббирования интересов разработчиков ВТСП в политической и финансовой сферах Европы. Отмечается, что сегодня производственные возможности ВТСП-провода (имеется в виду, в первую очередь, второе поколение) реализованы только в США, производителей провода в Европе пока нет. Представляет интерес взгляд на перспективы ВТСП с точки зрения немецких ученых (табл. 1).

Таблица 1. Сегодняшнее состояние и перспективы ВТСП-технологии.

Сегодня	Цель 2015 г.
ВТСП-ленты Плотность тока: 250-300 А/мм ² Потери на перем. токе в ВТСП кабеле: 1,5 Вт/м/фаза	500-700 А/мм ² < 0.2 Вт/м/фаза
Производство Качество: 160 А/мм ² на 500 м Цена: 200-300 ЕВРО/кАм Объем производства: более 100 км/год	350 А/мм ² на 2000 м 50-100 ЕВРО/кАм более 1000 км/год
Криогенное обеспечение прототипы пульсационных труб Холодопроизводительность: около 100 Вт Стоимость: 100-200 ЕВРО/Вт	пульсационные трубы в серии 1-2 кВт 25-50 ЕВРО/Вт

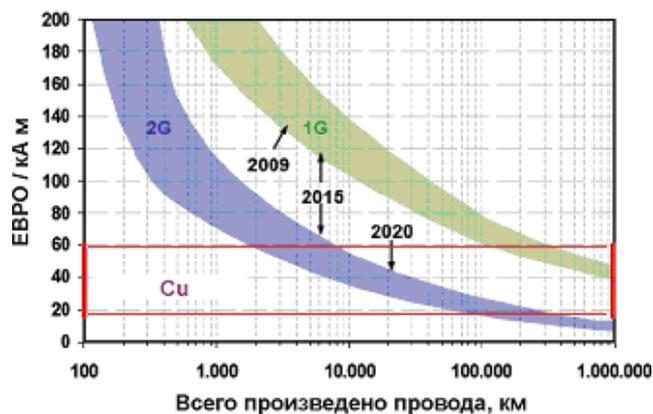


Рис.1. Прогнозы развития объема производства и стоимости ВТСП-провода.

Считается, что существенного снижения стоимости ВТСП-провода удастся достичь, путем увеличения объемов производства. Эту точку зрения иллюстрирует рис. 1, на нем же представлены интересные данные о годовом производстве ВТСП-провода. Из рисунка видно, что общемировые объемы фактиче-

ского производства провода 2-го поколения сегодня составляют несколько десятков км/год, с прогнозом к значительному увеличению в будущем. Напомним, что заявленные производственные мощности американских компаний составляют совместно более 1700 км/год.

Экономическое моделирование замены части городской сети площадью 100 км² на ВТСП-компоненты (кабели, токоограничители, трансформаторы) показывает, что это может оказаться выгодным предприятием, но только в недалёком будущем. Расчет основан на расходах на ВТСП-продукцию, прогнозируемых через 10-20 лет. Это означает, что инвестиционные расходы на ВТСП-сети должны сравняться с традиционными через 10-15 лет, к этому добавляются уменьшение потерь на 65-75% и отсутствие эмиссии CO₂ (меньше на 60000 т/год для города вроде современного Кёльна).

С.В. Самойленков

1. <http://www.htee.tu-bs.de/htee/veranstaltungen/supraleiterseminar/4B/SSupraleiter.html>

ВТСП УСТРОЙСТВА

На пути к высоковольтному ВТСП токоограничителю

В настоящее время каждая из компаний производителей ВТСП проводников 2-го поколения активно занимается разработкой на их основе ВТСП токоограничителей для распределительных сетей напряжением 110 кВ. Хотя ни одна из компаний пока не создала даже однофазного прототипа на рабочее напряжение, концепции предлагаемых устройств вырисовываются достаточно четко. Следует отметить, что конструкция ВТСП токоограничителя во многом определяется свойствами используемого в нем проводника. ВТСП ленты 2-го поколения производства American Superconductor и SuperPower сильно отличаются по своим свойствам. Большое отличие существует и в производственных мощностях компаний, а значит и в объемах ВТСП ленты, доступной разработчикам токоограничителей. Ниже дан краткий обзор по ВТСП токоограничителям, разрабатываемым компаниями American Superconductor и SuperPower.

Компания American Superconductor совместно с Siemens уже достаточно давно занимается разработкой ВТСП токоограничителей. Работы по созданию высоковольтного (115 кВ, 1200 А) ВТСП токоограничителя проводятся при финансовой поддержке министерства энергетики США. В 2007 г. был изготовлен и испытан однофазный ВТСП токоограничитель с рабочим током 300 А и напряжением 7,2 кВ, состоящий из 15 плоских безиндуктивных катушек, намотанных из ВТСП проводника типа 344S шириной 4 мм, соединенных параллельно и последовательно. Про этот токоограничитель уже писалось в нашем бюллетене ранее (т. 4,

вып. 2). В 2008 г. из ВТСП ленты типа 344S шириной 12 мм производства American Superconductor был изготовлен прототип модуля высоковольтного токоограничителя с номинальным током 425 А и напряжением 8,4 кВ (рис. 1). Токоограничивающий модуль состоит из шести бифилярных галетных катушек, соединенных последовательно. Межвитковая изоляция тефлоновая. На каждую из ВТСП катушек было израсходовано 52 м сверхпроводника, общий расход сверхпроводника составил 312 м. Высокая величина номинального тока связана с пониженной до 73,5К рабочей температурой; при работе в жидком азоте при атмосферном давлении номинальный ток падает до 300 А. Восстановление ВТСП элементом сверхпроводящих свойств после ограничения тока короткого замыкания происходило за 16 с (рис. 2).



Рис. 1. ВТСП токоограничивающий модуль Siemens (425 А, 8,4 кВ).

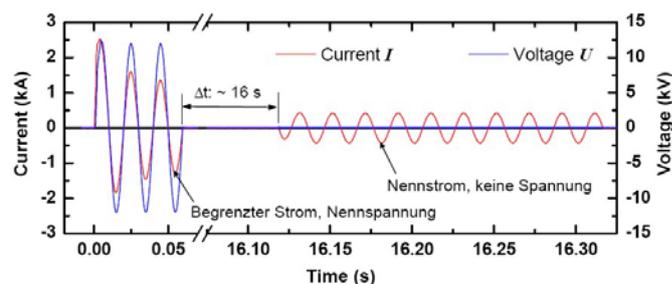


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений в ходе ограничения тока кз.

Одной из основных проблем при разработке высоковольтных токоограничителей является обеспечение требуемой диэлектрической прочности изоляции. Согласно техническим требованиям, ВТСП токоограничитель должен выдерживать испытательное напряжение в 275 кВ и грозовой импульс в 650 кВ, что потребовало особой конструкции криостата (рис. 3) в форме горизонтально расположенного цилиндра, на концах которого располагаются токовводы; также были предприняты специальные меры по оптимизации электрических полей внутри

криостата. Требуемой диэлектрической прочности изоляции удалось добиться за счет работы в переохлажденном до 72-74К жидком азоте при повышенном до 5 атм давлении. Для высоковольтного токоограничителя предполагается использовать токовводы, разработанные ранее компанией Nexans для ВТСП кабеля LIPA.

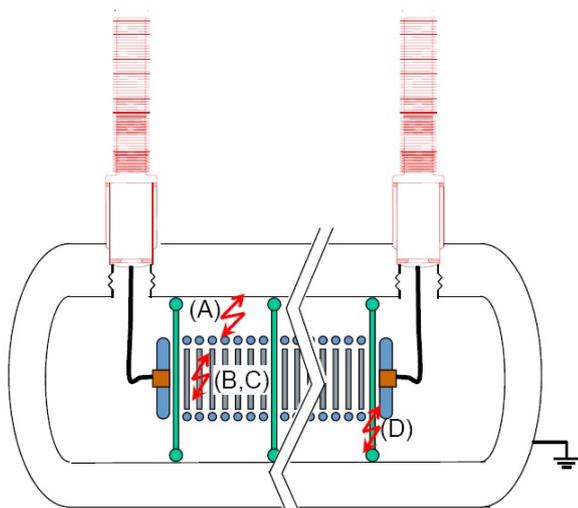


Рис. 3. Схема криостата высоковольтного ВТСП токоограничителя.

Компания SuperPower уже несколько лет разрабатывает ВТСП токоограничитель матричного типа (MFCL), представляющей собой большое число ВТСП элементов, соединенных друг с другом последовательно и параллельно. Каждый из ВТСП элементов шунтирован медной катушкой индуктивности. Такая схема позволяет существенно сократить ток, протекающий через ВТСП элементы во время короткого замыкания, снизить перегрев, уменьшить время восстановления токоограничителя и сократить расход сверхпроводника. С самого начала проект был направлен на создание высоковольтного (115 кВ, 1200 А) токоограничителя и выполнялся при финансовой поддержке министерства энергетики США. Первоначально планировалось использование массивных сверхпроводящих элементов из Bi-2212 керамики производства компании Nexans, однако, после неудовлетворительных результатов испытаний опытного образца концепция MFCL была пересмотрена в пользу использования ВТСП проводников 2-го поколения производства SuperPower. Компания Nexans сейчас занимается самостоятельными разработками матричного токоограничителя на основе массивных элементов из Bi-2212 в рамках проекта CULT-110, о чем мы уже писали ранее (т. 6, вып. 2).



Рис. 4. Токоограничивающий модуль MFCL.

В конце 2008 г. компания SuperPower изготовила и испытала прототип ВТСП токоограничивающего модуля MFCL, рассчитанного на номинальный ток в 1200 А, представляющего собой решетку, набранную из коротких отрезков ВТСП лент 2-го поколения собственного производства шириной 12 мм, спаянных друг с другом (рис. 4). Спаи между ВТСП лентами были разработаны таким образом, чтобы исключить риск возникновения "горячих точек". Положение ВТСП ленты в решетке выбиралось с учетом влияния их магнитных полей друг на друга, за счет чего удалось добиться равномерного распределения тока между всеми параллельно соединенными проводниками. ВТСП модуль зашунтирован медной катушкой индуктивности, отношение реактивного сопротивления которой к активному составляет 30. Данная конструкция обладает обширной охлаждаемой поверхностью, что позволяет не только добиться восстановления ВТСП токоограничителем сверхпроводящего состояния за времена меньшие времени автоматического повторного включения (около 0,3 с), но даже обеспечивает возврат ВТСП элемента в сверхпроводящее состояние в случае протекания через него тока - т.н. восстановление под нагрузкой. Данное требование было изначально заложено в техническое задание и во многом определило конструкцию прототипа модуля MFCL. Для исследования процесса восстановления под нагрузкой было изготовлено и испытано несколько малых макетных образцов. Осциллограммы напряжений и токов в процессе ограничения тока короткого замыкания и последующего возврата макета ВТСП элемента в сверхпроводящее состояние без отключения тока приведены на рис. 5. Большое внимание было уделено также вопросам диэлектрической прочности изоляции. Было проведено специальное исследование пробоя в жидком азоте при различной геометрии электродов, давлении азота и наличии (или отсутствии) пузырьков.

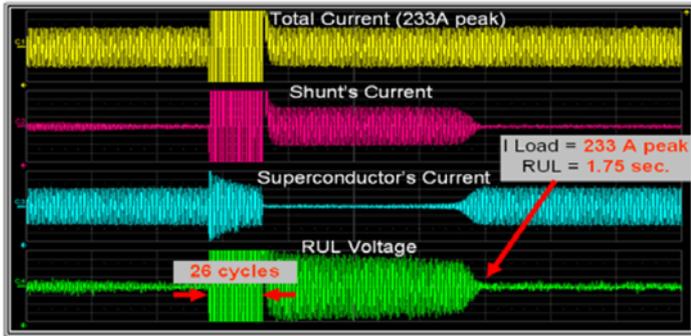


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений в ходе ограничения тока КЗ и восстановления под нагрузкой.

В.И. Щербаков

1. W. Schmidt, H.-P. Kramer, "Supraleitende Strombegrenzer aus YBCO-Bandleitern", Braunschweiger Supraleiter Seminar (2009).
2. C. Weber, "Transmission Level HTS Fault Current Limiter", EPRI Eighth Annual Superconductivity Conference (2008).

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

ВТСП ЛЭП большой протяженности.

Конструкция и оценки

В предложении о строительстве АЭС и ТЭС в дальневосточном регионе для возможного экспорта электроэнергии в Японию был проведен анализ возможности использования существующих обычных типов кабеля и эскизная проработка подводной ВТСП кабельной линии [1]. Предполагалось, что прокладка будет осуществляться по дну пролива Лаперуза между островами Сахалин (Россия) и Хоккайдо (Япония). Ширина пролива 50 км, максимальная глубина – 200 м.

Основным преимуществом ВТСП линии является её способность в существующих ВТСП проводниках при температуре 65-70К передавать высокие мощности ($P \geq 1$ ГВА) с минимальными электрическими потерями при относительно невысоких напряжениях (64-128 кВ) за счёт высокой критической плотности тока по сверхпроводнику ($j_c > 100$ А/мм² в сравнении с допустимой по нормальному металлу 1-2 А/мм² в обычных кабелях). Передача энергии по ВТСП кабелям в линиях на переменном токе менее привлекательна уже при расстояниях более 2-3 км из-за высоких потерь от наведённых вихревых токов в металлических элементах конструкции кабеля и токов смещения в изоляции. Величина таких потерь пропорциональна квадрату эффективного тока и при токе ~5 кА более чем на порядок превышает потери, связанные с теплопритоком к холодной зоне кабеля из окружающей среды (1-2 Вт/м при наружном диаметре холодной зоны $D \sim 100-200$ мм), и достигает 20 Вт/м (проект LIPA [2]). Однако этот вывод дискуссионный, зависящий от конкретной конструкции кабеля. По оценкам величина потерь для такого кабеля на длине 50 км

может превышать 6% при 1 ГВА передаваемой мощности (рис. 1). Кроме того, для поддержания температуры в холодной зоне 65-75К при таком уровне потерь потребуется прокачивать через холодную зону кабеля ~50-100 кг сверхкритического азота в секунду.

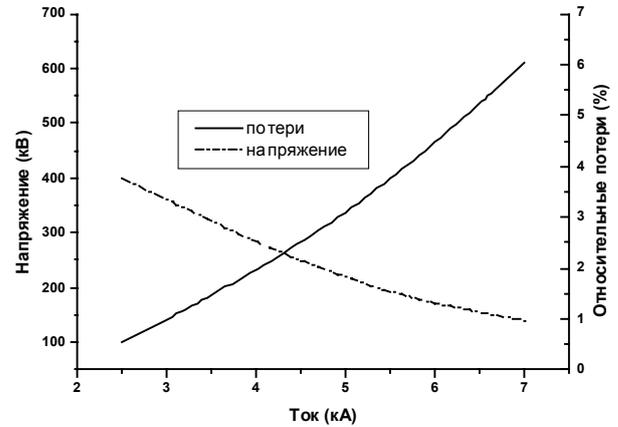


Рис. 1. Зависимость эффективного напряжения и относительных потерь от величины эффективного тока при передаче мощности 1 ГВА на расстояние 50 км.

Для преодоления гидравлического сопротивления кабеля при разумном перепаде давления на концах линии $\sim \Delta P \leq 1$ МПа потребуется увеличение размеров поперечного сечения холодной зоны кабеля (криостата) до размеров, соответствующих $D \sim 400$ мм (рис. 2), что, в свою очередь, приведёт к увеличению теплопритока из окружающей среды. Представленные здесь расчёты для длины линии 50 км носят гипотетический характер, т.к. возможности передачи по ВТСП линиям переменного тока ограничены волновым сопротивлением собственно линии, которая представляет собой параллельные индуктивность и конденсатор. По всем литературным оценкам предельная длина ВТСП линии переменного тока 30-35 км.

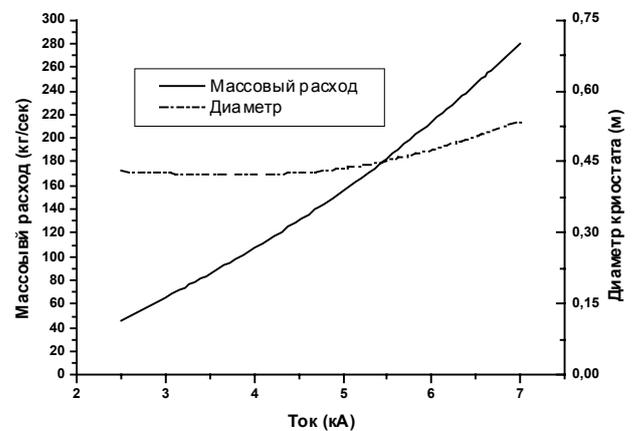


Рис. 2. Зависимость массового расхода хладагента и диаметра криостата для одной фазы кабеля переменного тока длиной 50 км от величины эффективного тока в предположении, что гидравлический диаметр $D_g \approx 0,6D$ (расчёт).

Очевидно, что при передаче мощности на переменном токе теряется основное преимущество ВТСП кабеля – возможность передачи энергии при относительно низком напряжении и большом токе. В связи с этим более привлекательной является ВТСП линия на постоянном токе. В отличие от оценок, сделанных почти 10 лет назад [1] (тогда цена ВТСП за $\text{kA}\cdot\text{м}$ была выше в пять раз), представленные оценки сделаны для существенно больших величин тока и, соответственно, меньших напряжений.

В линии электропередачи постоянного тока электрические потери зависят линейно от величины тока и при постоянном напряжении на спаях даже при токе ~ 10 кА существенно (более чем на порядок) ниже потерь от внешних теплопритоков к криостату. Относительные потери собственно в кабеле при токе 7,1 кА и напряжении 69 кВ составляют всего 0,18% от полной передаваемой мощности. При этом диаметр криостата $\sim 0,15$ м и массовый расход хладагента не превышает 8 кг/сек. Здесь, конечно, следует учитывать потери ($\sim 2\%$) на преобразование переменного тока в постоянный и обратно. Эти потери не зависят от длины линии и при передаче на расстояния порядка нескольких сотен и более километров (расстояние между двумя соседними компрессорными станциями принималось 50 км) эти потери не столь ощутимы на фоне общих потерь. Кроме того, потери на преобразование тока могут быть существенно понижены при использовании криогенных и ВТСП преобразователей. При рассматриваемом нами расстоянии 50 км право выбора остаётся за разработчиками. Все вышеприведенные оценки сделаны для перепада температуры по кабелю от 65 до 71К (в работе [1] $\Delta T = 10\text{K}$) и перепада давления от 3 МПа до 2 МПа. К тому же работа на постоянном токе в данном случае будет естественной, поскольку этого требует необходимость согласования различных энергосистем (русской и японской).

В конструировании ВТСП кабелей для передачи малой мощности на относительно небольшие расстояния (внутри города, через небольшие водные преграды и пр.) прослеживается тенденция создания гибких кабелей большой единичной длины куска (> 1 км) с криогенной электрической изоляцией и узкой концентрической щелью для прокачки хладагента (проект LIPA, выполняемый компанией Nexans совместно с AMSC). Для линий большой протяжённости, предназначенной для передачи больших мощностей ($P > 1$ ГВА), вполне подходят модули небольшой (~ 50 м) протяжённости, с разделением для каждого модуля вакуумом, где в качестве основной электрической изоляции используется сверхкритический азот (рис. 3). Модули могут соединяться между собой посредством муфт, имеющих отдельный вакуум (рис. 4).

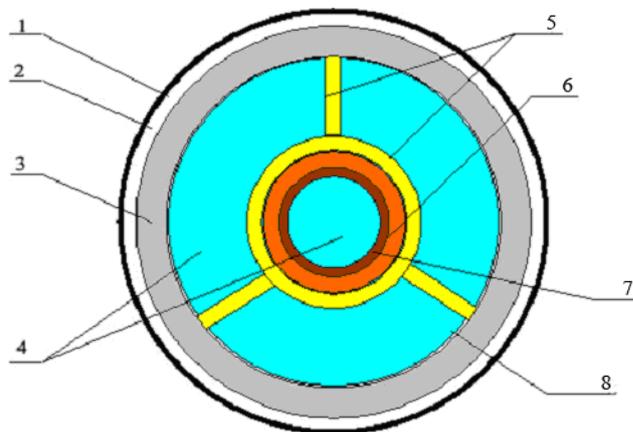


Рис. 3. Схематическое изображение кабеля в разрезе: 1 – наружный вакуумный кожух, 2 – вакуум, 3 – многослойная экрановакуумная изоляция, 4 – сверхкритический азот, 5 – стеклотекстолит, 6 – ВТСП, 7 – медный формер (он же защита), 8 – внутренний кожух.

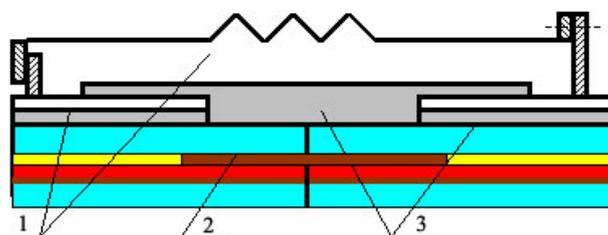


Рис. 4 Схематическое изображение соединительной муфты: 1 – вакуум, 2 – соединительная медная муфта, 3 – экрановакуумная изоляция (для муфты можно использовать и порошковую изоляцию).

Преимущества такой конструкции заключаются в том, что при нарушении вакуума в одном из модулей линия может оставаться работоспособной продолжительное время, а место нарушения вакуума легко может быть обнаружено.

Соединительная муфта может закрепляться на месте спая ВТСП кабелей, как при помощи болтов, так и сваркой. Прокладка такой линии не намного сложнее, чем прокладка магистрального газопровода. По такой линии легко прокачивать требуемые количества сверхкритического азота на большие расстояния при разумных ($D < 200$ мм) поперечных сечениях ЛЭП. Потери на спаях при токе ~ 7 кА остаются более чем на порядок меньше потерь на теплоприток из окружающей среды.

При относительно невысоком (генераторном) напряжении (16-24 кВ) возможно расположение прямого и возвратного кабелей в одном криостате (два в одном) [3]. Кроме того, при прохождении кабельной линии постоянного тока через водную преграду в качестве обратной ветки линии можно использовать морскую воду, как это было сделано при передаче энергии по обычному кабелю из Норвегии в Данию через пролив Скагеррак.

Резюмируя изложенное, можно констатировать, что возможное решение проблемы протяженных ВТСП линий электропередач большой мощности сводится к следующим положениям:

1. ВТСП кабельная ЛЭП должна работать на постоянном токе (это позволит повысить ток в линии при значительном снижении напряжения);
2. Гидравлический диаметр кабеля 150-200 мм. Сверхкритический азот следует использовать как в качестве хладагента, так и в качестве основной электрической изоляции кабеля. Это позволит увеличить расстояние между криогенными компрессорными станциями до 50 км и отказаться от использования других видов изоляции (PPL и пр.);
3. ВТСП линию электропередачи нужно изготавливать из модулей длиной не более 50 метров с собственным вакуумом и термомеханическими компенсаторами;
4. Модули ВТСП ЛЭП соединять сильфонными муфтами предлагаемой конструкции.

Следует отметить также, что примерно к таким же выводам пришли коллеги из США [4-7] и Японии, судя по их презентациям на 8^{ой} ежегодной конференции EPRI Superconductivity Conference, проходившей в ноябре 2008 г. в Оак-Ридже (труды ещё не опубликованы).

С.А. Лелехов

1. И.А. Ковалёв, С.А. Лелехов, Н.А. Черноплёков и др., "Оценка возможности создания подводной ВТСП линии электропередачи постоянного тока мощностью 1 ГВА с рабочим напряжением 500 кВ", Сборник трудов «Российский электротехнический конгресс», секция 9, стр. 16.
2. J.E. Maguire et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15**, 1787 (2005).
3. I.I. Akimov et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 1934, (2003).
4. J.V. Minervini et al., "Development of HTS Cables for DC Power Transmission and Distribution", *EPRI Eighth Annual Superconductivity Conference (2008)*.
5. W.V. Hassenzahl, "A High-Power Superconducting DC Cable", *EPRI Eighth Annual Superconductivity Conference (2008)*.
6. T. Overbye, "Power Flow and Transient Stability Impacts of Superconducting DC Cables", *EPRI Eighth Annual Superconductivity Conference (2008)*.
7. T. Baldwin et al., "Issues Associated with a Superconducting DC Line Fed by a Multi-Terminal VSC System", *EPRI Eighth Annual Superconductivity Conference (2008)*.

Примечание редактора

Предлагаемое сообщение о возможностях протяженного кабеля постоянного тока носит дискуссионный характер. Никак не оспаривая тезисы ав-

тора о заметных преимуществах ВТСП линий постоянного тока при необходимости передачи больших потоков энергии на значительные расстояния (это абсолютно правильная и нужная идея!), некоторые оценки автора можно оспорить. Это относится к аргументации, как недостатков силовых кабелей переменного тока, так и преимуществ кабелей постоянного тока, включая оценки криогенных мощностей.

Тем не менее, считаю правильным публикацию этой статьи, которая является интересным примером «сумасшедшей идеи», и вполне может оказаться правильной и работоспособной.

В.С. Высоцкий

НТСП УСТРОЙСТВА

СП магниты для двигателей космических аппаратов

В феврале текущего года компания Scientific Magnetics Ltd. (Оксфорд, Великобритания) поставила для американской компании Ad Astra Rocket Company (AARC) в г. Вебстер (Техас, США) созданный на основе НТСП материалов магнит VX-200. Магнит является ключевым элементом разрабатываемого в AARC двигателя для магнитоплазменных ракет с переменным удельным импульсом (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket, VASIMR).

Принцип действия магнитоплазменного ракетного двигателя представлен на рис. 1. Он состоит из трёх основных частей. В первой происходит получение холодной плазмы (температура – 10⁴°С) из топлива, в качестве которого предполагается использовать легкий газ (рассматриваются следующие возможные варианты: водород, дейтерий, гелий, азот, неон, аргон). Во второй части двигателя происходит нагрев плазмы с помощью радиочастотного излучения до температур порядка 100 млн. С. Третья часть двигателя – магнитное сопло, которое позволяет контролировать количество и скорость выходящей высокотемпературной плазмы, создающей реактивную тягу. На всех этапах управление плазмой осуществляется с помощью магнита, который также изолирует компоненты системы от соприкосновения с плазмой. Высокие требования на создаваемые магнитные поля и массогабаритные характеристики делают сверхпроводниковые материалы необходимыми при конструировании двигателя.

Удельный импульс, создаваемый выходом ускоренной плазмы из сопла магнитоплазменного двигателя, в сотни раз превышает удельный импульс современных ракетных двигателей, принцип действия которых основан на сжигании жидкого топлива. Поэтому использование в ракетносителях магнитоплазменных двигателей позволит значительно сократить расход топлива и, соответственно, связанные с ним затраты. Кроме того, магнитоплазменные двигатели смогут существенно увеличить грузоподъемность космических аппаратов.

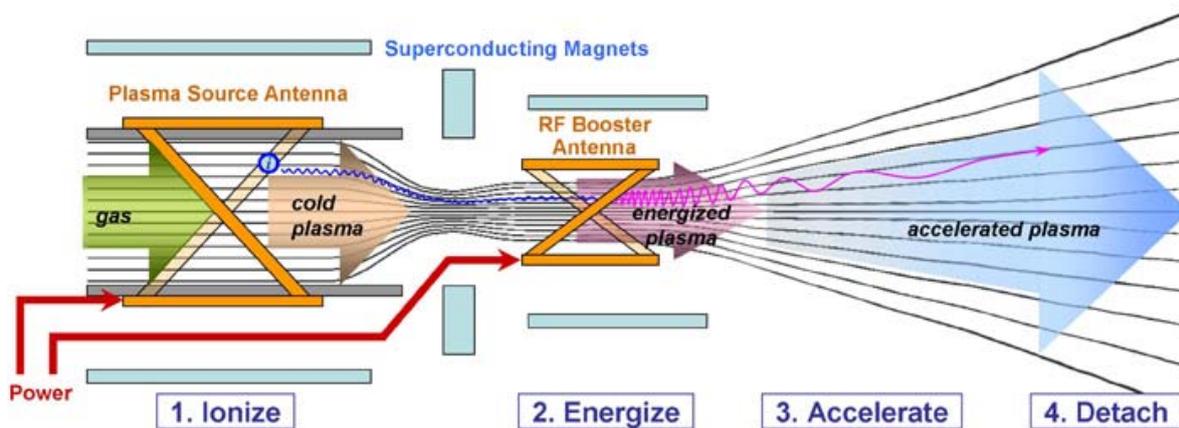


Рис. 1. Принцип работы магнитоплазменного ракетного двигателя Ad Astra Rocket Company.

Такие двигатели могут быть полезны для перевода с орбиты на орбиту и позиционирования орбитальных станций и спутников, а также, в дальнейшей перспективе, для осуществления полетов к другим планетам.

Созданный для проекта VASIMR НТСП-магнит VX-200 показан на рис. 2. Максимальная создаваемая им магнитная индукция составляет 2 Тл. Магнит помещался в вакуумный кожух, охлаждение осуществлялось с помощью криокулера без использования хладагента. Номинальная рабочая температура устройства – 5К; отсутствие жидкого гелия принципиально для космического аппарата, поскольку в случае утечки восполнить его запасы в открытом космосе было бы проблематичным. Длина магнита – более 2 м; он является одним из самых больших в мире магнитов, использующих косвенное охлаждение. Проектирование и создание магнита и его компонентов обошлось разработчикам более чем в 1 млн. USD.



Рис. 2. Сверхпроводящий магнит VX-200 производства Scientific Magnetics Ltd.

После доставки магнита на полигон (рис. 3) объединённая команда разработчиков из AARC и Scientific Magnetics Ltd. подвергла его двум недель-

ным комплексам стендовых испытаний термических и магнитных параметров. Было установлено, что при рабочей температуре он способен создавать и поддерживать требуемое магнитное поле (2 Тл на оси). Расхождение между измеренными и запланированными характеристиками было небольшим и находилось в допустимых пределах – менее 0,3%.



Рис. 3. Монтаж сверхпроводящего магнита VX-200 на полигоне AARC и проведение испытаний.

Успешные стендовые испытания VX-200 являются последним шагом перед установкой его на двигатель VASIMR и открывают дорогу к проведению полномасштабных испытаний самого двигателя, намеченных на май 2009 года (о результатах этих испытаний пока не сообщалось). Результаты тестов магнитоплазменного двигателя, оборудованного магнитом VX-200, дадут AARC необходимые дан-

ные для создания двигателя VF-200, который, как ожидают разработчики, может быть использован на реальных космических аппаратах.

Следует отметить, что для испытаний плазменной системы VASIMR во время доставки и проверки магнита VX-200 использовался охлаждаемый водой магнит меньшей мощности VX-200i (индекс "i" означает interim, то есть, временный). Этот магнит, совпадающий по своим габаритным характеристикам с VX-200, являлся временной заменой, используемой AARC для того чтобы уложиться в запланированные сроки. Замена временного магнита на сверхпроводящий проводилась в марте 2009 г.

Работы над VASIMR были инициированы в NASA бывшим астронавтом Франклином Чанг-Диазом. Идея создания плазменной тяги для ракет возникла у него в 1979 году. Путь VASIMRa не был простым – Чанг-Диазу постоянно приходилось бороться за выживание проекта в рамках постоянно снижающегося финансирования и в 2005 г. Чанг-Диаз уходит из NASA и создаёт Ad Astra Rocket Company, которая в настоящее время и является пионером магнитоплазменных технологий для двигателей космических аппаратов.

В то же время сотрудничество NASA и Ad Astra Rocket Company не прекращалось: в обозримом будущем организации планируют подписать договор, согласно которому, магнитоплазменный двигатель будет испытан на МКС. Однако даже приблизительные сроки доставки на МКС и ввода в действие двигателя VASIMR пока не сообщаются.

Финансирование проекта по созданию двигателя осуществлялось AARC, в основном, за счет частных вложений. Кроме того, значительное количество дополнительных денежных ресурсов компании удалось привлечь, используя собственные наработки в плазменных технологиях, в частности, от технологии плазменного травления в микроэлектронике. AARC также активно сотрудничает с компаниями, специализирующимися на плазменном разрушении промышленных высокотоксичных химических и медицинских отходов.

М.П. Смаев

1. <http://www.adastrarocket.com/>.
2. *Superconductor Week*, 23, no. 6, 1 (2009).

ДИБОРИД МАГНИЯ MgB_2

Токонесущие элементы на основе MgB_2

С 2001 года интерес сверхпроводящего научного сообщества направлен на изучение уже давно известного интерметаллического соединения MgB_2 , обладающего неожиданно высокой для простого бинарного соединения критической температурой в 39К. Несмотря на то, что критическая температура MgB_2 намного ниже, чем у высокотемпературных сверхпроводников, малая анизотропия сверхпроводящих свойств и низкая стоимость делают этот материал привлекательным для производства из него

различных проводников и токонесущих элементов. Пригодность MgB_2 для использования в сверхпроводящих магнитах уже доказана на практике: итальянская компания ASG Superconductors изготовила катушку для магниторезонансного томографа на основе таких проводов.

В январе 2007 года итальянские ученые из INFN (Генуя) опубликовали сообщение об изготовлении 9-жильного токонесущего элемента на основе MgB_2 . Изготовленный методом «порошок в трубе» проводник производства компании Hyper Tech Research Inc. диаметром 0,83 мм разрезался на 9 кусков длиной по 2 метра каждый. Полученные отрезки провода скручивались по три с шагом в 5 см, затем три триплета еще раз скручивались друг с другом с тем же шагом, в результате чего был получен токонесущий элемент. Готовый токонесущий элемент в течение 20 минут отжигался при температуре 700°C. Снятые при разных значениях магнитной индукции и температуры вольтамперные характеристики токонесущего элемента не выявили какой-либо деградации критических свойств.

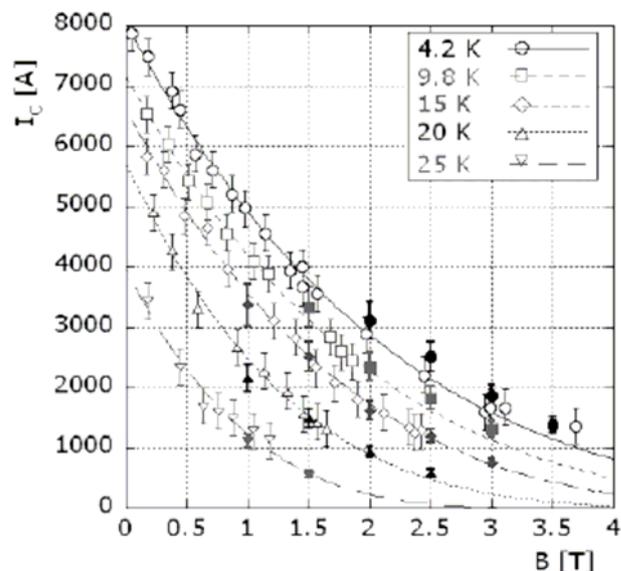


Рис. 1. Полевые зависимости критического тока токонесущего элемента (пустые символы) и суммарного критического тока его отдельных проводников (сплошные символы).

В октябре 2008 года из Электротехнического института АН Словакии поступило сообщение об изготовлении и измерении критических свойств 7-жильного токонесущего элемента на основе MgB_2 проводов в медно-титановой матрице, изготовленных по технологии «порошок в трубе» (MgB_2 - 15%, Ti - 35%, Cu - 50%). Критическая плотность тока в кабеле при температуре 4,2К составила 10^4 А/см² в поле 9,5 Тл и 10^5 А/см² в поле 4,5 Тл. Провода из MgB_2 изготавливались путем последовательной прокатки: исходный проводник квадратной формы сечением 0,28×0,28 мм (далее обозначен как WS) вытягивается в круглый проводник с выемками (наружный диаметр 0,35 мм, обозначен как WSR), а затем еще раз прокатывается до получения кругло-

го проводника диаметром 0,335 мм (далее обозначен как WR). Сечения проводников и сборка токонесущего элемента на примере проводника WSR изображены на рис. 2. После скрутки и финальной опрессовки токонесущий элемент в течении 30 минут подвергался отжигу в потоке аргона при температуре 850°C.

Обычно из-за высокой пористости MgB_2 после отжига плотность жилы составляет только половину от расчетного значения. По мнению авторов, многоступенчатая прокатка проводов до скручивания существенно повышает плотность жилы MgB_2 , что предотвращает деградацию критических свойств кабеля в процессе скрутки. Однако из-за растрескивания MgB_2 жилы в процессе изготовления круглого провода авторам не удалось на нем достичь высокой плотности тока, и образцы токонесущих элементов были изготовлены только из квадратных и полукруглых проводов.

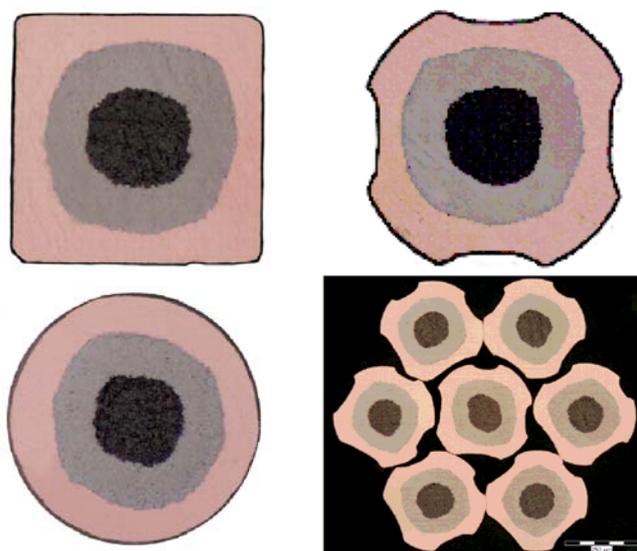


Рис. 2. Сечения токонесущего элемента и одиночных проводников на разных стадиях прокатки.

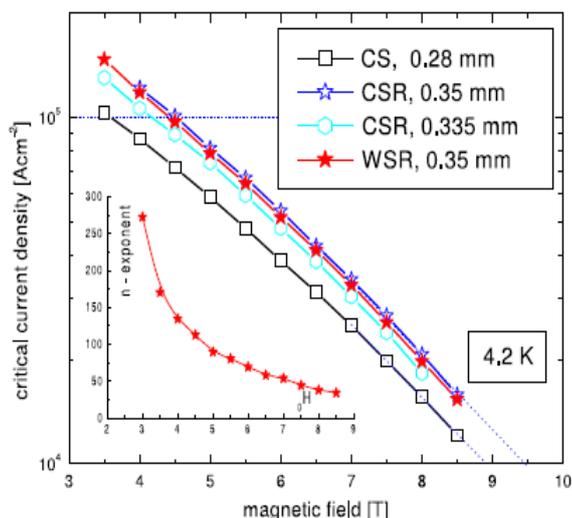


Рис. 3. Полевые зависимости критической плотности тока токонесущих элементов и одиночных проводников.

Критические токи определялись по вольтамперным характеристикам (критерий 1 мкВ/см) при температуре 4,2К в магнитных полях 2-8,5 Тл как для токонесущих элементов из разных типов проводов (рис. 3), так и для одиночных проводников. При скрутке проводников в токонесущий элемент не было обнаружено существенной деградации критических свойств. Результаты данной работы (максимальная плотность тока 16 400 – 18 200 А/см² в поле 4 Тл) хорошо соотносятся с исследованиями итальянских ученых, экстраполяция результатов которых на аналогичный токонесущий элемент, состоящий из двух триплетов, дает инженерную плотность тока в 16 122 А/см².

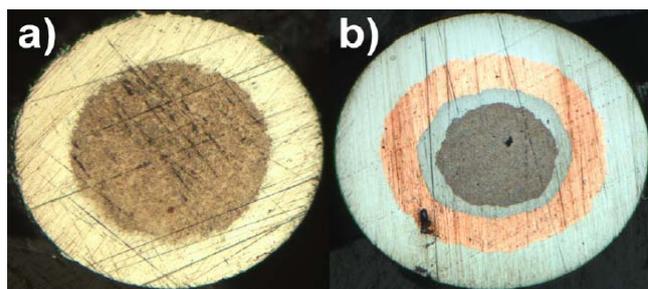


Рис. 4. Поперечное сечение MgB_2 проводников в нержавеющей (а) и ниобий-медно-нержавеющей матрицах (б).

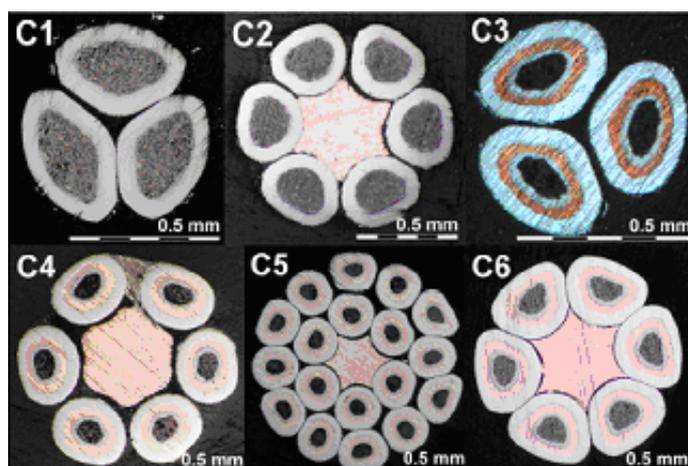


Рис. 5. Поперечные сечения MgB_2 токонесущих элементов различной конструкции.

На рис. 5 показаны изготовленные токонесущие элементы: 3-х жильные (C1, C3); 6-ти жильные с центральным медным формером (C2, C4 и C6), а также 18-жильный с медным формером C5, представляющий собой шестижильный C6 на который было дополнительно намотано еще 12 проводников.

По сравнению с предыдущими работами шаг скрутки удалось сократить до 5 мм (при внешнем диаметре токонесущего элемента около 1 мм), что в 3 раза меньше, чем достигнутые ранее результаты. После скрутки проводилась опрессовка токонесущего элемента для улучшения электрического и теплового контактов между его отдельными проводниками и центральным медным формером. Все токонесущие элементы подвергались финальному отжигу в течение часа при температуре 665°C.

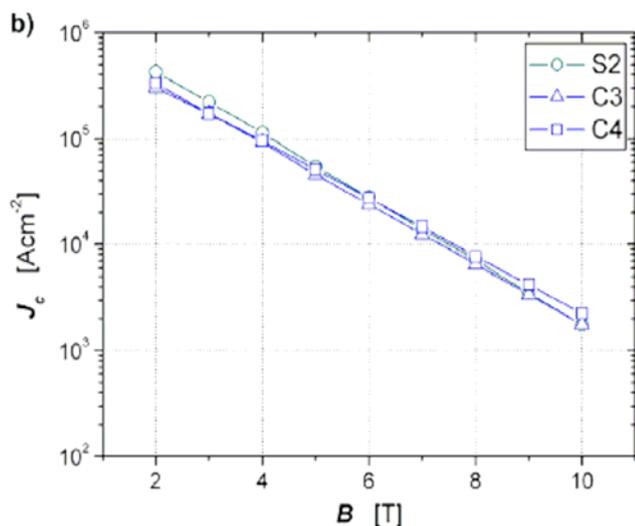


Рис. 6. Полевые зависимости критической плотности тока для некоторых токонесущих элементов.

Для коротких образцов одиночных проводников и токонесущих элементов при температуре 4,2К четырехконтактным методом во внешнем магнитном поле с индукцией 2-10 Тл были сняты вольтамперные характеристики (рис. 6). Для большинства токонесущих элементов не наблюдалось существенной деградации критических свойств, и критический ток токонесущего элемента соответствовал сумме критических токов его отдельных проводников. Только токонесущий элемент из 18-ти жил показал заметное падение своей токонесущей способности (до 50%), что можно объяснить высокими продольными механическими напряжениями во внешнем полевом, возникающими в процессе скрутки. Можно сделать вывод, что изготовление многожильных стабилизированных токонесущих элементов на основе MgB_2 диаметром около 1 мм и шагом скрутки 5 мм возможно без заметной деградации критических свойств проводников. Создание сложных многослойных токонесущих элементов из MgB_2 проводников в дальнейшем потребует совершенствования технологии каблирования. Использование легирующих добавок в MgB_2 проводниках оказалось весьма полезным, особенно в высоких магнитных полях.

Д.И. Шутова

1. R. Musenich et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **20**, 235 (2007).
2. P. Kovac et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **21**, 125003 (2008).
3. T. Holubek et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **22**, 055011 (2009).

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

О роли ВТСП в энергетике будущего (США)

27 апреля в своём выступлении в Национальной академии наук президент США Барак Обама обнаружил уровень финансирования науки в размере 3% от ВВП, составляющего 14075,5 млрд. долла-

ров; т.е. 422 млрд. долл. будет направлено на развитие научного потенциала страны.

В конце апреля этого года Министерство энергетики США (МЭ) объявило о создании отобранных на конкурсной основе 46 Центров перспективных исследований по энергетике (31 – в университетах, 11 – в национальных лабораториях, 2 – в некоммерческих организациях и 1 – в корпоративной исследовательской лаборатории). Отбор проводился на основании 260 заявок из 385 организаций. В течение 5 лет эти научные центры будут ежегодно получать от правительства ассигнования в объеме от 2 до 5 млн. долларов.

При поддержке МЭ каждый из Центров намерен собрать воедино ведущих специалистов по установленной тематике и обеспечить их первоклассным оборудованием, таким образом, помогая университетам, национальным лабораториям, коммерческим и некоммерческим организациям продолжать фундаментальные и прикладные исследования. 11% заявок нацелено на рациональное использование энергии, включая исследования сверхпроводимости. Всего в 2009 году центры получают 100 млн. долларов от Управления фундаментальных энергетических исследований МЭ. Дополнительные 277 млн. долл. будут выделены на создание новых Центров и поддержание их деятельности в течение 5 лет в рамках America Recovery and Reinvestment Act (Антикризисный план на 787 млрд. долл., предложенный Бараком Обамой, и утвержденный Конгрессом США в феврале 2009 г.).

В последнем докладе Министерства энергетики США (МЭ) «Современная наука для безопасности и надёжности энергетики будущего» особое внимание было уделено сверхпроводящим материалам в связи с необходимостью повышения эффективности энергосистемы страны и более масштабного привлечения возобновляемых энергоресурсов. Главная идея доклада состоит в том, что решение проблем в области энергетики и охраны окружающей среды, требует крупных научных достижений в области материаловедения. Для этого необходимо фундаментальное понимание свойств новых материалов и технологии их изготовления, что непосредственно касается промышленного освоения ВТСП материалов.

В долгосрочных планах, Министерство энергетики США ожидает, что использование силовых ВТСП кабелей существенно повысит надёжность электросетей. В представленном докладе, в частности, сообщается, что убыток от перебоев электроснабжения в Соединенных Штатах за 2006 год составил 80 млрд. долл. Эти цифры показывают, что надёжность электрических сетей в США в 5 и 10 раз ниже, чем в Японии и Франции соответственно. Для улучшения характеристик предлагается создать кольцевые кабельные сети вокруг крупных городов с размещением в существующих подземных ка-

бельных каналах СП кабелей, что должно увеличить в пять раз пропускную способность городских сетей. Также упоминается в докладе о потребности в СП линиях электропередач для уменьшения потерь в них и стабилизации эксплуатационных характеристик.

А.К. Чернышева

1. *Superconductor Week*, **23**, no. 6, 5 (2009).
2. <http://www.bea.gov/newsreleases/national/gdp/gdpnewsrelease.htm>.
3. <http://www.bnl.gov/>.

Издатель РИЦ «Курчатовский институт»

Институт сверхпроводимости и физики твердого тела
(при поддержке Фонда «Научный потенциал»)

Научный редактор: *В.С. Круглов*, зам. директора ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

Редакторы: *В.С. Высоцкий* vysotsky@gmail.com, *В.И. Щербаков* sherby@isssph.kiae.ru

Ответственный редактор: *М.П. Смаев* perst@isssph.kiae.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *С.А. Лелехов*, *С.В. Самойленков*,

А.К. Чернышева perst@isssph.kiae.ru, *Д.И. Шутова*

Верстка: *И.Л. Фурлетова*