Информационный бюллетень
СВЕРХПРОВОДНИКИ для электроэнергетики
Исследовательские центры Фирмы Инвесторы
Провода Кабели Генераторы Накопители
Трансформаторы Токоограничители
Том 11 выпуск 5(50)
октябрь 2014

Юбилейный выпуск

http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/

Круглый стол «Текущее состояние дел и перспективы развития прикладной сильноточной технической сверхпроводимости в России»

Летом этого года состоялось заседание Круглого стола с участием представителей Государственной Думы, Гос. корпорации “Росатом”, НИЦ “Курчатовский институт”, Российской академии наук, ФГУП "Федеральная энергосервисная компания", ведущих специалистов в области технической сверхпроводимости и энергетики. Участниками Круглого стола признано, что разработка отечественных технологий изготовления технических сильноточных сверхпроводников и изделий на их основе является актуальной и имеет большой потенциал влияния на энергетику, медицину и экономику страны в целом. Особо было подчеркнуто, что для обеспечения экономической и политической независимости России стратегически необходимо иметь отечественное производство низко- и высокотемпературных сверхпроводящих материалов, включая изготовление проводников, токонесущих элементов, кабелей и других электротехнических изделий. Ориентация на импортные материалы нецелесообразна, так как их импорт может быть прекращен по экономическим или политическим мотивам. Правительству РФ рекомендовано организовать межведомственный совет по крупномасштабному применению сверхпроводимости для выработки дорожной карты и программы внедрения сверхпроводимости в экономику России. Эти Федеральные целевые программы предусматривают необходимость развития технологий изготовления низко- и высокотемпературных сверхпроводников; промышленного производства МР томографов; производства сверхпроводниковых изделий для электроэнергетики, промышленности, транспорта, а также для осуществления научных мегапроектов. Формированию крупных проектов будет предшествовать разработка предложений по созданию условий для внедрения сверхпроводниковых устройств в существующие технологические процессы. При Комитете по энергетике (Государственной Думы Федерального Собрания РФ) запланировано создание экспертной секции по сверхпроводимости. Ее цель - разработка концепции развития технической сверхпроводимости в России на период до 2035 года с учетом оценки масштаба внедрения прикладной сильноточной технической сверхпроводимости в инновационную экономику России и с предложениями по реализации первоочередных проектов в области сверхпроводниковой техники. Проявленное внимание к проблеме технической сверхпроводимости со стороны государства даст импульс к ускоренному развитию работ в этом направлении.

И далее…

Новости сайта «Сверхпроводники в электроэнергетике» *http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/* ***2***

КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

Сверхпроводимость в поиске аксионов ***3***

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

EuBCO - еще один перспективный ВТСП материал 2-го поколения ***5***

ВТСП УСТРОЙСТВА

Разработка трансформатора мощностью 20 МВА на основе ВТСП проводников второго поколения ***6***

Сильноточный ВТСП кабель для тяговых сетей ***8***

ТОРЖЕСТВА

О всех, всех, всех ***10***

Поздравление

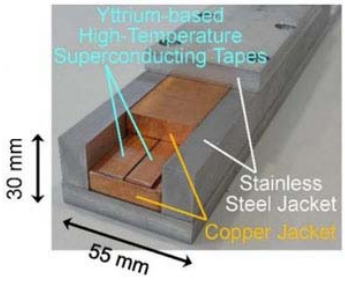
Новости сайта «Сверхпроводники в электроэнергетике»
http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/

Сверхпроводящий магнит для масс спектрометрии с рекордным полем 21 Тл

Корпорацией Брукер в сотрудничестве с Лабораторией сильных магнитных полей (NHMFL) университета Флориды разработан и успешно установлен магнит для ИЦР (ионно-циклотронный резонансного) спектрометра в NHMFL. Постоянный сверхпроводящий магнит с рекордным полем в 21 Тл с горизонтальным 110 мм теплым каналом предназначен для ИЦР спектрометрии высокого разрешения – перспективного метода исследования комплексных смесей нефтехимии, органических соединений, всевозможных биологических объектов и оценки качества лекарственных препаратов. Работа магнита при температуре 2 К обеспечена разработанной в Брукере уникальными технологиями магнитной экранировки - UltraShield™ и поддержания рабочей температуры практически без расхода хладагента - UltraStabilized™. На фото 21 Тл брукеровский магнит в NHMFL лаборатории (Alan Marshall, John Quinn и Chris Hendrickson)

Сайт корпорации Брукер

Япония: Рекордный ток токонесущего элемента на базе ВТСП 2-го поколения



Национальный институт плазменных исследований совместно с Национальным институтом естественных наук приступил к разработке обмоток для магнитов термоядерных установок на основе ВТСП 2-го поколения. На рисунке показано поперечное сечение токонесущего элемента повышенной механической прочности в виде стопки из 54 лент на основе YBCO толщиной 0,2 мм и шириной 10 мм. Совместно с Университетом Тохоку была разработана технология, обеспечивающая низкое сопротивление соединений. При испытании (ввод тока трансформаторным методом) прототипа токонесущего элемента при 20 К был достигнут рекордный ток в 100 кА. Инженерная плотность тока в проводнике, включая оболочку, превысила 40 А/мм^2.

site R&D Magazine

Новые сверхпроводниковые технологии увеличат на порядки быстродействие суперкомпьютеров

Группа ученых НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова под руководством М.Ю. Куприянова разрабатывает с использованием сверхпроводниковых устройств суперкомпьютер нового поколения. Эффективность ЭВМ на полупроводниковых технологиях достигла потолка из-за энергетики. Чтобы запустить машину, превосходящую современные аналоги, потребуется подвести к ней гигаватты электрической мощности, сравнимые с мощностью современной АЭС. Слабое место всех действующих сегодня сверхпроводниковых цифровых устройств - малые объемы памяти (несколько килобайт). Предлагаемое группой гибридное решение состоит в использовании преимуществ магнитных материалов (обладающих способностью “запоминать” свое состояние) и достоинств сверхпроводимости (высокие, более 100 ГГц, характерные частоты и малое, менее 1 мкВт, энергопотребление логических цепей). При этом быстродействие компьютеров нового поколения в ближайшей перспективе увеличится на три порядка, а в более отдаленной - даже на шесть порядков. Осуществление идеи состоит в получении необыкновенного эффекта при соединении в одной многослойной наноструктуре сверхтонких пленок сверхпроводящих и магнитных материалов. Аналогичные работы ведутся в США и Японии на государственном уровне финансирования. Группа МГУ надеется, что их разработки также будут включены в государственные программы и получат достойное финансирование.

Газета Поиск № 33-34(2014)

Россия: безгелиевый томограф в ФИАНе

На основе опыта эксплуатации первого в России ортопедического томографа с гелиевой системой охлаждения замкнутого цикла специалисты ФИАНа уже приступили к созданию полномасштабного (исследование человека во весь рост) безгелиевого «сухого» томографа. Катушка вместе с криостатом будет весить около трёх тонн, а двухметровый диаметр катушки позволит вместить туннель диаметром 60 см для размещения пациента. Напряжение магнитного поля составит 1,5 Тл. Охлаждение системы обеспечат охладители особого типа, так называемые рефрижераторы глубокого охлаждения (криорефрижераторы). Предстоят еще работы по упрочнению конструкции, совершенствованию программного обеспечения и созданию оптимального распределения магнитного поля в томографе.

Информационный Ресурс Машиностроения «и-Маш»

США: ВТСП кабель для Чикаго

Commercial Edison (ComEd) – чикагское подразделение крупной электроэнергетической компании Exelon Corporation и American Superconductor (AMSC) объявили о намерении проложить в центре города подземную распределительную сеть ВТСП кабелей длиной более трех миль (около 5 км). На осуществление проекта Министерство национальной безопасности (Department of Homeland Security, DHS) выделяет 60 млн. долларов. По мнению участников проекта, потребуются дополнительные вложения, которые можно получить из средств (2,6 млрд. долларов) целевой программы модернизации электросетей, осуществляемой в США с 2012 года. Следует отметить, что стоимость восстановительных работ после аварий в электросетях США, по оценке Министерства энергетики, составляла от 18 до 33 млрд. долларов в год! На первый этап - оценки масштаба работ - DHS выделило 1,5 млн. долларов. Завершенный, согласно плану, через 3,5 года пяти километровый ВТСП кабель будет не только самым масштабным из действующих, но и его первым коммерческим воплощением в США. Лиха беда – начало!

Новости сайта AMSC

Новый рекорд захваченного магнитного потока в массиве ВТСП:

В университете Кембриджа получен массивный ВТСП $GdBa_2Cu_3O_7$, способный захватить магнитное поле в 17,6 Тл при 29 К. Понадобилось 11 лет, чтобы превысить на 0,4 Тл предыдущий японский рекорд на массиве $YBa_2Cu_3O_7$ (17,2 Тл при 26 К). Два цилиндра диаметром 25 мм и высотой 13 мм из GdBaCuO с присадкой серебра были выращены стандартным методом из расплава с затравкой и механически усилены нержавеющей сталью. Данная технология получения сильных магнитных полей достаточно доступна и дешева.

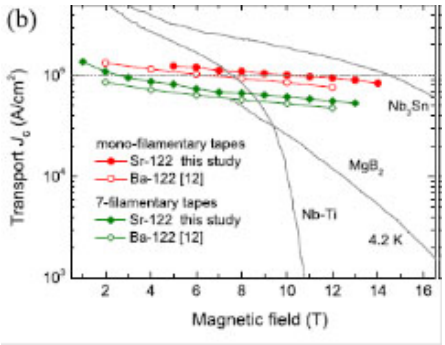
J.H. Durrell et al.,Supercond. Sci. Technol. 27, 082001(2014)

Япония: ВТСП для медицины

При поддержке Министерства экономики, торговли и промышленности начинается проект, нацеленный на создание ВТСП магнитных систем для медицинского оборудования, в том числе, магнитно-резонансной томографии (МРТ) и ускорителей для получения изотопов и ионной терапии. Проект рассчитан на пятилетку и содержит 5 основных тем. Первые две темы относятся к НИОКР по МРТ: 1) разработка технологии создания ВТСП обмоток, способных генерировать магнитное поле в 3 Тл при температуре близкой к температуре жидкого азота; 2) разработка технологии получения стабильных и высокооднородных магнитных полей с индукцией до 10 Тл при температуре 30 К, что позволит значительно повысить разрешающую способность МРТ. Для ускорителей медицинского назначения (тема 3 и 4) требуется создание компактных ВТСП обмоток с высокими магнитными полями, которые должны обладать низкой стоимостью и хорошими масс-габаритными характеристиками. Тема 5 целиком касается удешевления сверхпроводящих магнитных систем за счет совершенствования технологий: использования криогенной системы без жидкого гелия; улучшения фундаментальных характеристик ВТСП токонесущих элементов - достижению плотности тока 600 А/см при 65 К на кусках длиной от 200 м в поле 3 Тл и 1000 А/см при 35 К в поле 10 Тл; сведения к минимуму омического сопротивления и притоков тепла в спаях.

S. Yamamoto, ISTEC Superconductivity Web21 September 16 (2014)

Пниктиды для высокополевых магнитных систем



Совместными усилиями китайских и японских исследователей удалось достичь высокого значения транспортного критического тока в 0,1 МА/см^2 при 4,2К в магнитном поле 10 Тл у проводов из сверхпроводника на основе железа. Ленты на основе пниктида (Sr-122) $Sr_{0,6}K_{0,4}Fe_2As_2$ были получены по технологии «порошок в серебряной трубе», но благодаря добавлению олова и горячему прессованию после холодной прокатки удалось улучшить межзеренную связь и ослабить разориентацию границ зерен. Верхнее критическое поле $H_{кр}$ составило 199 Тл (параллельно плоскости ab) и 119 Тл (параллельно оси c), т.е коэффициент анизотропии относительно низок - 1,68.

X. Zhang, Applied Physics Letters 104, 202601 (2014)

А.К.Чернышева

КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

Сверхпроводимость в поиске аксионов

Уже несколько лет физики пытаются обнаружить аксион - гипотетическую нейтральную частицу, ответственную за сохранение CP инвариантности в квантовой хромодинамике - теории, описывающей сильное взаимодействие элементарных частиц. Открытие аксиона позволит не только уточнить существующие в физике элементарных частиц теоретические модели, но и решить целый ряд загадок в астрофизики и космологии. Аксионы являются одним из кандидатов на роль темной материи, предполагается, что аксионы могут образовывать невидимое гало вокруг галактик.

Согласно теоретическим предсказаниям аксионы нейтральны, обладают малой массой и практически не взаимодействуют с обычным веществом. Предполагается, что из-за эффекта Примакова, основанного на резонансных превращениях фотонов в электрических и магнитных полях, аксионы могут образовываться в недрах звезд. Для обнаружения аксионов ученые рассчитывают использовать обратный эффект Примакова - в постоянном магнитном поле аксион может распасться на пару фотонов, которые легко обнаружить при помощи рентгеновского детектора (см. Рис. 1).

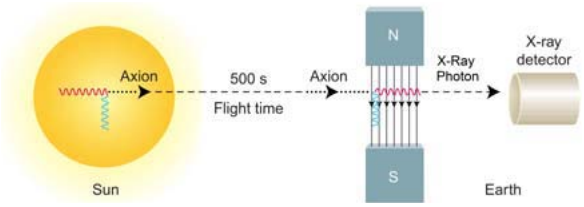


Рис. 1. Схема эксперимента по обнаружению аксиона.

С 2003 г. в ЦЕРНе проводится эксперимент CAST (CERN Axion Solar Telescope) по поиску возникающих на Солнце аксионов. Детектор установки CAST выполнен на базе прототипа сверхпроводящего диполя Большого Адронного Коллайдера (БАК). Длина магнитной системы детектора составляет 9 м, а рабочее магнитное поле 9 Тл. В двух рабочих каналах диполя сечением 15 см^2 размещаются рентгеновские детекторы. К сожалению, обнаружить аксионы пока так и не удалось, и возникла необходимость в создании более чувствительного детектора.

В 2013 г. специалисты ЦЕРН приступили к созданию аксионного телескопа IAXO (International Axion Observatory), чувствительность которого будет в 300 раз выше, чем у CAST. Согласно теоретическим построениям, чувствительность детектора аксионов прямо пропорциональна его апертуре, пропорциональна квадрату величины его магнитного поля и квадрату длины магнитной системы детектора. Создание высокого магнитного поля в большом объеме является весьма сложной инженерной задачей, поэтому разработчики IAXO пошли по пути увеличения геометрических размеров устройства.

Магнитная система IAXO будет выполнена в виде удлиненного тороида из восьми секций внутренним радиусом 1,05 м, внешним радиусом 2,05 м при длине 21,8 м. Для изготовления секций сверхпроводящего магнита планируется использовать ниобий-титановый проводник. Для обнаружения аксионов служит объем между секциями тороида, магнитное поле в котором достигает 2,5 Тл (при максимальном магнитном поле на обмотке 5,4 Тл). Направление магнитного поля перпендикулярно оси детектора. Восемь рентгеновских детекторов располагаются позади криостата с магнитной системой и направлены в предусмотренные для них каналы. Телескоп IAXO должен быть постоянно направлен на солнце, для чего криостат со сверхпроводящей магнитной системой установят на подвижное основание, осуществляющее его наводку по вертикали и горизонтали. Внешний вид аксионного телескопа IAXO изображен на Рис. 2.

Запасенная в сверхпроводящей магнитной системе IAXO энергия составит 500 МДж. Общий вес магнитной системы достигнет 250 тонн (холодная масса составит 130 тонн, из которой на ниобий-титановый проводник придется 65 тонн) при габаритных размерах вместе с криостатом ∅5,2 × 25 м. Очевидно, что IAXO можно отнести к мегаустановкам.

По своей конструкции сверхпроводящая магнитная система IAXO (см. Рис. 3) весьма напоминает успешно работающий на БАК детектор ATLAS. Также, как и в последнем, в IAXO будут использоваться токонесущие элементы в виде ниобий-титановых кабелей Резерфордовского типа, заключенных в алюминиевый стабилизатор сечением 35 × 8 мм. Каждая из восьми обмоток детектора заключена в массивный корпус из алюминиевого сплава AL5083, который предполагается охлаждать путем прокачки жидкого гелия через контактирующие с ним трубки. Номинальный ток обмоток составляет 12,3 кА при критическом токе проводника в 58 кА в магнитном поле 5 Тл. Столь высокий запас по току объясняется как сложностями косвенного охлаждения обмоток, так и высокими механическими напряжениями в них. В отличии от детектора ATLAS, криостат IAXO подвижен, что значительно осложняет подвеску сверхпроводящего магнита и конструкцию системы криогенного обеспечения.

Криостат IAXO рассчитан на работу при углах наклона $\pm 25^0$, что требует надежного крепления магнитной системы внутри при минимальной величине притока тепла в криогенный объем. Секции магнитной системы IAXO скреплены друг с другом при помощи центральной опорной трубы и системы распорок. Центральную часть магнитной системы и внешний корпус криостата соединяет несколько опор из стеклопластика, узлы подвески располагаются вблизи центра масс (см. Рис. 3). Для уменьшения теплопритоков к сверхпроводящему магниту используется тепловой экран с температурой 40-80К. Также предполагается использовать ВТСП токовводы, аналогичные установленным на БАК.

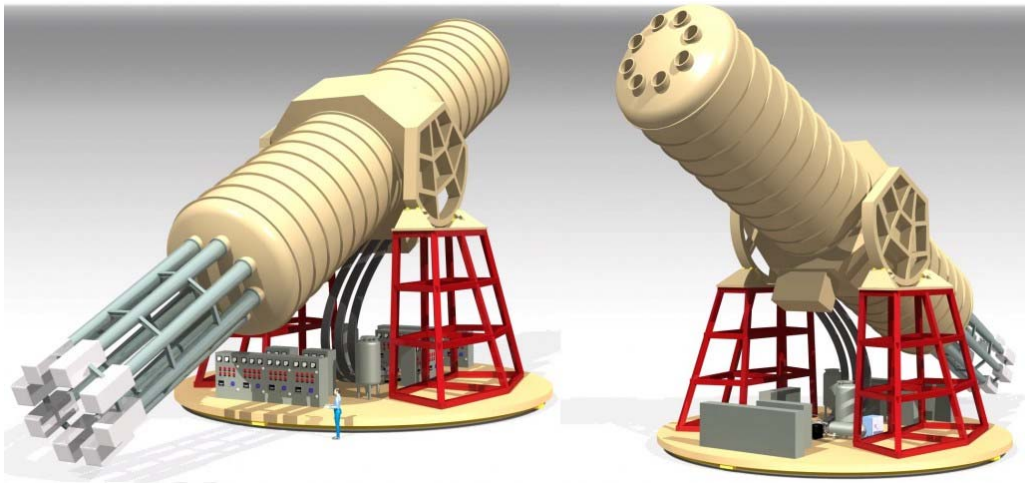


Рис. 2. Внешний вид сверхпроводящего аксионного телескопа IAXO.

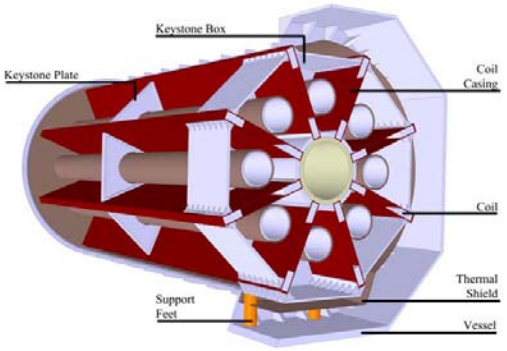


Рис. 3. Разрез сверхпроводящей магнитной системы аксионного телескопа IAXO в центральной плоскости.

Система криогенного обеспечения IAXO будет основана на гелиевом ожижителе с хладопроизводительностью 360 Вт при температуре 4,5 К. Расчетная величина притоков тепла к сверхпроводящему магниту составляет около 150 Вт. Большая часть гелиевого ожижителя (за исключением компрессора и блока газоподготовки) будет смонтирована на подвижном основании аксионного телескопа. Внутри криостата телескопа располагается заполненный жидким гелием бак с теплообменником, который распределяет хладагент по обмоткам магнитной системы. Ожижитель и криостат соединяются системой гибких криогенных трубопроводов, обеспечивающих подвижность во всем диапазоне рабочих углов. Для охлаждения ВТСП токовводов и теплового экрана предусмотрены дополнительные контуры охлаждения с газообразным гелием при температуре 20К и 40-80К.

Вне всякого сомнения, реализация проекта аксионного телескопа IAXO станет заметной вехой для физики элементарных частиц. Остается лишь пожелать нашим коллегам в ЦЕРНе успехов в поиске аксиона.

В.И.Щербаков

1. I. Shilon, A. Dudarev, H. Silva, U. Wagner, H.H. Kate, AIP Conference Proceedings ***1573****, 1559 (2014).*

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

EuBCO – еще один перспективный ВТСП материал 2-го поколения

Исследователи из Международного центра сверхпроводимости (ISTEC, Япония) разработали новые ВТСП проводники 2-го поколения на основе европия $EuBa_2Cu_3O_7$ с искусственными центрами пиннинга в виде наностерженьков $BaHfO_3$ (BHO). Для коротких образцов с толщиной EuBCO слоя 3,6 мкм значение минимального критического тока при 77 К в магнитном поле 3 Тл составило 141 А/см, для кусков длиной 93,7 м – 108 А/см, а для кусков в 200 м - 55,5 А/см. ВТСП ленты получены по технологии лазерного напыления на хастелоевую подложку с IBAD буферными слоями.

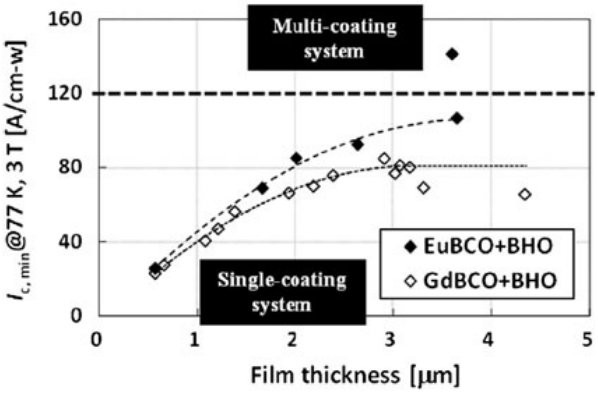


Рис. 1. Зависимости критического тока от толщины сверхпроводящего слоя.

На Рис. 1. изображены зависимости критического тока от толщины ВТСП слоя для проводников на основе гадолиния и европия. В отличие от ВТСП проводников 2-го поколения на основе гадолиния или иттрия использование европия позволяет получать сверхпроводящие пленки толщиной до 4 мкм без падения критической плотности тока. У новых ВТСП проводников наблюдается достаточно низкая анизотропия критических свойств, сравнимая с лучшими образцами GdBCO проводников.

На Рис. 2. показаны профили критического тока вдоль EuBCO ленты длиной 200 м снятые при температуре 77 К во внешних параллельно направленных магнитных полях с индукцией 0,1 Тл и 0,5 Тл, а также в собственном магнитном поле проводника. От начала и конца ВТСП ленты были взяты короткие образцы для исследования анизотропии критических свойств, наблюдается хорошее совпадение свойств для обоих образцов.

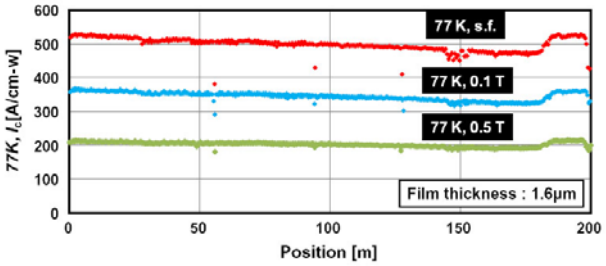


Рис. 2. Профили критического тока вдоль снятые вдоль EuBCO проводника длиной 200 м при различных значениях магнитного поля.

Авторы считают, что возможность получать более толстые сверхпроводящие слои и более высокие значения критических параметров с высокой однородностью по длине связана с более удачным сочетанием физико-химических свойств EuBCO по сравнению с GdBCO. В конечном счете, это привело к резкому сокращению объема зерен с неблагоприятной для протекания тока ориентацией. Возможно, именно этот материал будет более технологически предпочтительным, чем широко используемые сейчас соединения на основе иттрия и гадолиния.

В.И. Щербаков

1. T. Yoshida et al., Physica C, 504.42 (2014)

ВТСП УСТРОЙСТВА

Разработка трансформатора мощностью 20 МВА на основе ВТСП проводников второго поколения

К настоящему время в мире разработан и изготовлен целый ряд опытных образцов ВТСП трансформаторов с мощностью до нескольких сотен кВА. Однако современные успехи в производстве ВТСП лент 2-го поколения позволяют приступить к созданию трансформаторов значительно большей мощности. Исследовательская группа из организации (NEDO) New Energy and Industrial Technology Development Organization в составе: Kyushu Electric Power Co., Fuji Electric Co., Taiyo Nippon Sanso Co., International Superconductivity Technology Center (ISTEC), Fujikura, Showa Cable Systems Co., Kyushu University, Iwate University и Japan Fine Ceramics Center (JFCC), Япония разработала и создала один из самых мощных на сегодня ВТСП трансформаторов, мощность которого составляет 2 МВА. Данный ВТСП трансформатор был изготовлен из ВТСП ленты 2го поколения и является уменьшенной моделью перспективного трехфазного ВТСП трансформатора на 20 МВА. Работа выполнялась в кооперации большого числа исследовательских организаций и компаний: International Superconductivity Technology Center (ISTEC), Fujikura Ltd, Kyushi Electronic Power Co., Showa Cable Systems Co.

Напряжения первичных и вторичных обмоток ВТСП трансформатора на 20 МВА составляют 66 кВ и 6 кВ. Трансформатор будет выполнен в трехфазном исполнении с теплым магнитопроводом. Общий вид ВТСП трансформатора показан на Рис. 1, его обмотки работают в переохлажденном жидком азоте при температуре 66 К. Согласно проекту, габариты и вес ВТСП трансформатора (с учетом системы криогенного обеспечения) будут в 2 раза меньше, чем у его традиционного аналога такой же мощности. За счет более высокой плотности тока в ВТСП обмотках удается значительно сократить их объем (даже с учетом пространства занимаемого криостатом), также уменьшаются сечение и размеры магнитопроводов. Полные потери в ВТСП трансформаторе, даже с учетом мощности потребляемой системой криогенного обеспечения, также будут в 2 раза ниже, чем у традиционного устройства.

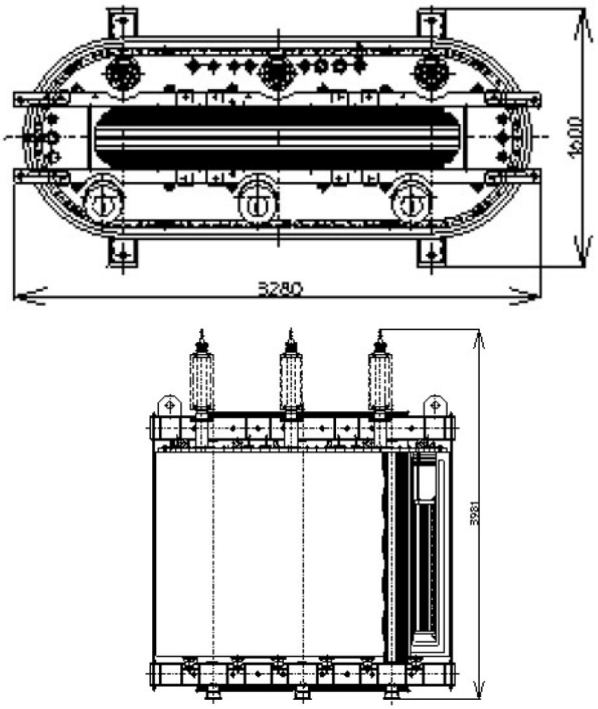


Рис. 1 Общий вид ВТСП трансформатора на 20 МВА.

Первое сообщение о разработке в ISTEC сверхпроводящего трансформатора на основе ВТСП лент 2-го поколения появилось в январе 2008 года. В течение 2008-2010 гг. был создан макетный образец ВТСП трансформатора мощностью 400 кВА, напряжения его первичной и вторичной обмоток составили 6,9 кВ и 2,3 кВ. Номинальные токи в первичной и вторичной обмотках соответственно - 58 А и 174 А. Первичная обмотка была намотана одиночным ВТСП проводником, а вторичная - тремя

параллельными ВТСП лентами. В первичной обмотке насчитывалось 576 витков, а во вторичной - 192 витка. ВТСП трансформатор был выполнен в однофазном исполнении по схеме с холодным магнитопроводом. Суммарная длина ВТСП проводника составила 1172 м (в виде отрезков по 100 м), критический ток отдельно взятой ленты достигал 121 А при 77 К в собственном поле.

Возможность ограничения токов короткого замыкания является одним из основных преимуществ ВТСП трансформаторов, наряду с их компактностью. Традиционные маслозаполненные трансформаторы при коротком замыкании становятся взрыво- и пожароопасными, что не позволяет их использовать в условиях плотной застройки.

На макетном образце ВТСП трансформатора мощностью 400 кВА был исследован процесс ограничения тока. Максимальный ток короткого замыкания составил 559 А, но через 0,25 с снизился до 174 А, что в три раза выше, чем номинальный ток первичной обмотки. При испытаниях трансформатора в режиме короткого замыкания давление в криостате возрастает на 0,25 бар, затем в течение нескольких десятков секунд давление спадает. Деградации токонесущей способности ВТСП проводника в ходе опытов короткого замыкания не происходило. Была создана математическая модель ограничения тока короткого замыкания, учитывающая разогрев ВТСП обмотки, наблюдается хорошее соответствие расчета и эксперимента [4].

КПД обычных трансформаторов достаточно высок и составляет более 99 процентов. Использование ВТСП материалов позволяет повысить КПД лишь на 0,4 % (99,7 % против 99,3 % у традиционных устройств). Однако эти цифры становятся достаточно внушительными для систем охлаждения трансформатора: при мощности в 20 МВт повышение КПД на 0,4 % снижает тепловыделение более чем в 2 раза (или на 8 кВт). Следует также отметить, что основное тепловыделение в ВТСП трансформаторах приходится на магнитопровод, который может находиться вне криогенного объема. Потери на переменном токе в ВТСП проводнике являются главным фактором, определяющим необходимую хладопроизводительность системы криогенного обеспечения. Для снижения величины потерь, путем лазерного скрайбирования, ВТСП лента была разделена на полоски, что позволило снизить потери на переменном токе в 3 раза по сравнению с оригинальным проводником.

В 2012 г. после проведения описанных выше исследований, было начато создание опытного образца трехфазного ВТСП трансформатора мощностью 2 МВА и рабочими напряжениями 66 кВ и 6,9 кВ, который станет прототипом ВТСП трансформатора на 20 МВА. Коэффициент трансформации, напряжения первичной и вторичной обмоток, падение напряжение на виток, конструкция магнитопровода и криостатов у опытного образца ВТСП трансформатора на 2 МВА в точности такие же, как и у трансформатора на 20 МВА.

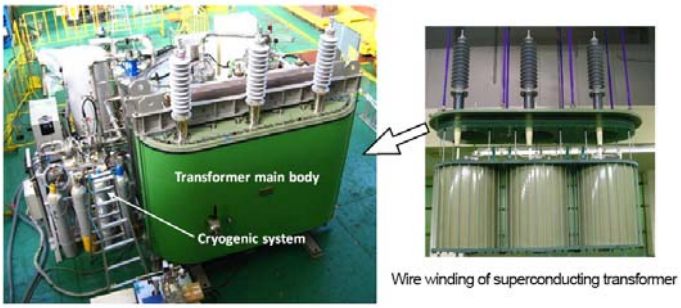


Рис.2 Трехфазный ВТСП трансформатор на 2 МВА и его обмотки

Первичная обмотка ВТСП трансформатора на 2 МВА намотана из одиночной ВТСП ленты 2-го поколения (шириной 5,3 мм и толщиной 0,35 мм, проводник дополнительно стабилизирован), номинальный ток в первичной обмотке - 17,5 А. Номинальный ток во вторичной обмотке составляет 167 А, намотка производится восемью параллельными ВТСП лентами (4 слоя по 2 ленты в каждом слое). Столь низкие токи в ВТСП лентах связаны с тем, что данный трансформатор является макетом устройства на 20 МВА, и геометрические размеры его обмоток такие же, как и у будущего трансформатора. Расход ВТСП проводника для создания трансформатора на 2 МВА составляет около 10 км. Для охлаждения трансформатора используется переохлажденный жидкий азот при температуре 67-68 К. Хладопроизводительность системы криогенного обеспечения составляет около 2 кВт, что относительно немного для подобной системы.

Исследования по ограничению токов короткого замыкания были проведены и на опытном образце ВТСП трансформатора на 2 МВА. Временная зависимость тока короткого замыкания во вторичной обмотке показана на Рис. 2. Длительность короткого замыкания составляла 0,2 с, за это время ток успевал снизиться до 725 А, что близко к утроенному амплитудному значению номинального тока.

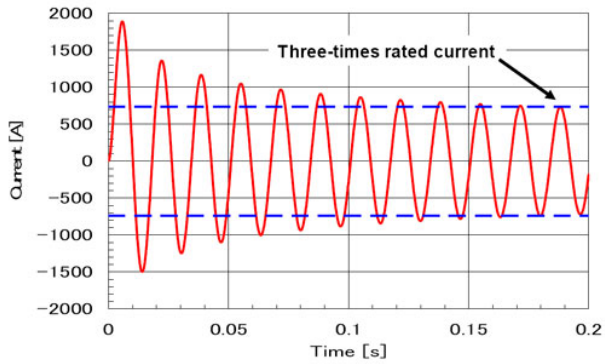


Рис. 3. Временная зависимость тока короткого замыкания во вторичной обмотке ВТСП трансформатора мощностью 2 МВА.

Как отмечают авторы [1], величина установившегося тока короткого замыкания регулируется за счет толщины и удельного сопротивления стабилизирующего слоя ВТСП проводника, которые и определяют активное сопротивление ВТСП обмотки после ее перехода в нормальное состояние. Для ВТСП трансформаторов мощностью 2 МВА и 20 МВА был специально разработан ВТСП проводник со слоем Cu-Ni толщиной 300 мкм и слоем серебра толщиной 18 мкм, ширина ВТСП ленты составляла 5 мм.

Трансформатор успешно выдержал высоковольтные испытания под воздействием грозового импульса амплитудой 354 кВ и длительностью 120 мкс.

На основании проведенных исследований разработан проект трансформатора на 20 МВА. Номинальный ток в первичной обмотки составит 175 А (достигается параллельным соединением трех ВТСП лент, что соответствует току 58 А на ленту). Номинальный вторичной обмотки составит 1670 А, для чего будут использоваться 24 параллельно соединенных ВТСП проводника.

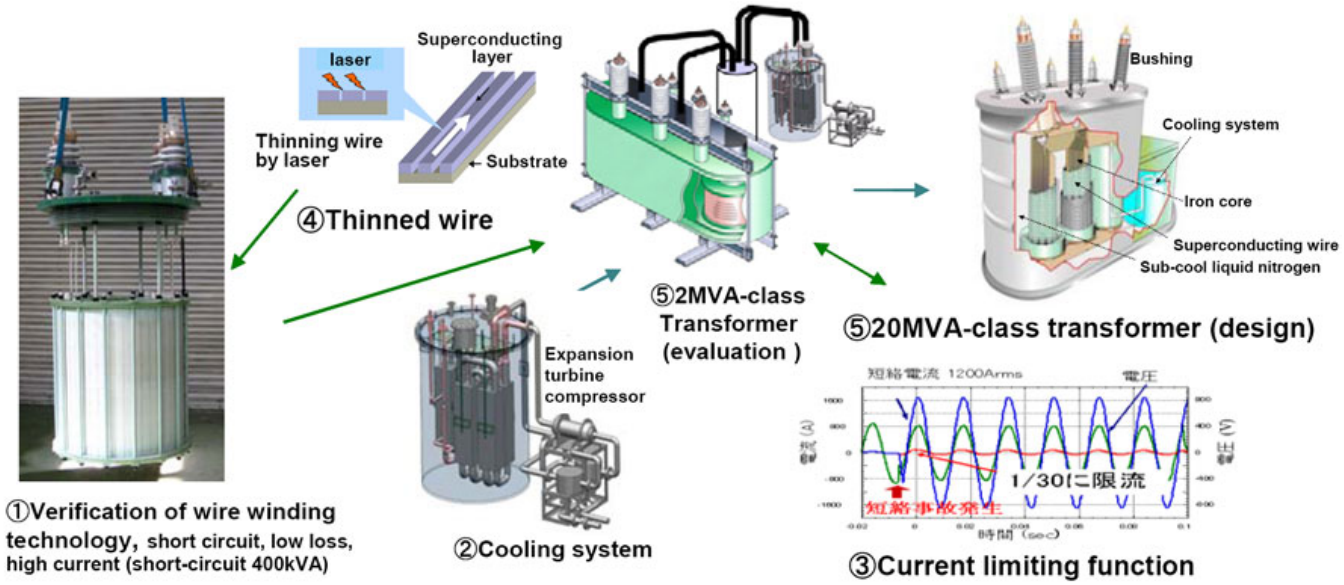


Рис. 4. Этапы разработки сверхпроводящего трансформатора мощностью 20 МВА.

Таким образом, с 2008 г. по 2014 г. были проведены исследования и создано два работающих прототипа ВТСП трансформаторов (400 кВА и 2 МВА), характеристики которых целиком удовлетворяют предъявленным требованиям, что позволяет надеяться на создание в ближайшее время ВТСП токоограничивающего трансформатора мощностью 20 МВА.

В.С. Коротков

1. ISTEC Superconductivity Web21 Date of Issue: January 16, 2012.
2. ISTEC Superconductivity Web21 Date of Issue: August 15, 2013 .
3. ISTEC Superconductivity Web21 Date of Issue: March 17, 2014.
*4. A. Tomioka et al., Physica C **484**, 239 (2013).*

Сильноточный ВТСП кабель для тяговых сетей

Специалисты исследовательского центра Railway Technical Research Institute (Япония) разрабатывают сильноточный ВТСП кабель постоянного тока для использования в тяговых сетях железнодорожного транспорта. На сегодня разработан, изготовлен и испытан короткий образец ВТСП кабеля с рабочим током 10 кА и длиной 30 м. ВТСП кабель выполнен в биполярном исполнении с холодным диэлектриком. На данный момент это самый сильноточный ВТСП кабель постоянного тока в мире. Для изготовления ВТСП кабеля был использован ВТСП проводник первого поколения на основе Bi-2223. Опытный образец ВТСП кабеля проходит испытание в железнодорожной тяговой сети (Рис. 1). Конструкция кабеля изображена на Рис. 2. Вокруг алюминиевого формера в виде трубы диаметром 35 мм с толщиной стенки 2 мм в три слоя намотана медная лента толщиной 0,25 мм (по 25 лент в каждом слое), которая служит в качестве стабилизатора сверхпроводящего слоя.

Рис. 1. ВТСП 30 м кабель в железнодорожной тяговой сети

Через формер прокачивается переохлажденный жидкий азот, охлаждающий внутреннюю ВТСП жилу кабеля. Поверх медного стабилизатора намотано два слоя ВТСП проводника на основе Bi-2223 (тип CA50 производства компании Sumitomo Electric Industries) по 26 лент в каждом слое с шагом намотки 450 мм.

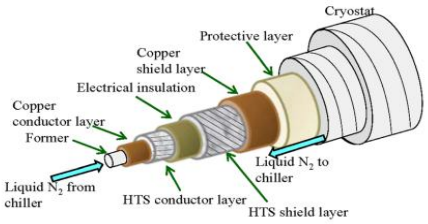


Рис. 2. Конструкция ВТСП кабеля постоянного тока.

ВТСП лент первого поколения была выбрана, потому что:

1) при использовании в кабелях магнитное поле направлено параллельно плоскости проводника, следовательно, высокая анизотропия критических свойств в магнитном поле, характерная для Bi-2223 лент, не оказывает значимого влияния на токонесущие свойства кабеля;

2) по мнению авторов, на данный момент производство длинномерных ВТСП лент 1-го поколения развито лучше по сравнению с ВТСП проводниками 2-го поколения.

Внутренняя ВТСП жила кабеля изолирована слоем полипропиленовой бумаги (PPLP) толщиной 2 мм, которая отделяет ее от ВТСП экрана, выполненного в виде двух слоев по 30 ВТСП лент в каждом из них, шаг намотки составлял 500 мм. Для тепловой и электрической стабилизации ВТСП экрана вокруг него в два слоя с шагом 600 мм намотаны медные ленты толщиной 0,25 мм (по 32 ленты в слое). Поверх медных лент был намотан защитный слой из бумаги.

Рис. 3. Внешний вид биполярного ВТСП 5 м кабеля постоянного тока в криостате.

В пространстве между нержавеющим криостатом и кабелем прокачивается обратный поток жидкого азота, который охлаждает ВТСП экран. Реализация в одном криостате прямого и обратного потоков жидкого азота, является, по мнению авторов, весомым преимуществом данной конструкции ВТСП кабеля, по сравнению с конструкциями, где возврат жидкого азота осуществляется по отдельному криогенному трубопроводу.

Созданию ВТСП кабеля длиной 30 м предшествовала отработка его конструктивных решений на коротком 5 м образце (см. Рис. 3), токовводные муфты с которого были использованы впоследствии для 30 м кабеля.

Стойкость ВТСП кабеля к токам короткого замыкания является одной из его важнейших характеристик. Для оценки работы ВТСП проводников в условиях сильной перегрузки по току несколько различных типов ВТСП лент производства Sumitomo были подвергнуты испытаниям импульсами тока длительностью 100 мс и амплитудой до 3 кА (Рис. 4). При амплитуде импульса тока, большей, чем допустимый для данной ВТСП ленты ток перегрузки, происходила необратимая деградация токонесущей способности ВТСП проводника. Исследовались ВТСП ленты, покрытые фольгой из нержавеющей стали, меди, а также проводники с дополнительно припаянной медной стабилизирующей лентой сечением до 2 мм^2. Наилучший результат был достигнут на образце, покрытом медной фольгой толщиной 50 мкм и дополнительно усиленным медной стабилизирующей лентой толщиной 0,5 мм. Хотя критические токи для исследованных образцов были достаточно близки (от 181 А до 196 А), их токи перегрузки различались более чем в 5 раз, что указывает на важность дополнительной стабилизации ВТСП проводника для работы в кабелях.

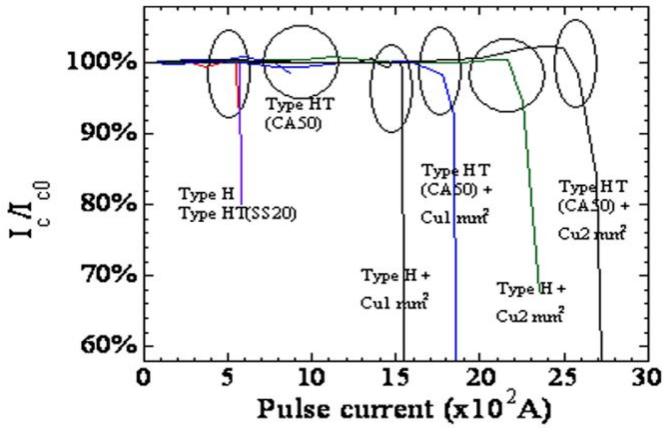


Рис. 4. Деградация токонесущей способности различных ВТСП проводников Sumitomo в зависимости от величины импульса тока.

В ходе токовых испытаний короткого образца ВТСП кабеля длиной 5 м были измерены вольтамперные характеристики его жил в собственном магнитном поле при 77 К (см. Рис. 5), критические токи внутренней ВТСП жилы и сверхпроводящего экрана составили 10130 А и 10910 А соответственно. Несколько большее значение критического тока сверхпроводящего экрана связано с большим количеством ВТСП лент в нем. Практически полное равенство критических токов ВТСП жилы и экрана сумме критических токов составляющих их лент говорит о равномерном распределении тока между отдельными проводниками и слабом влиянии собственного магнитного поля кабеля на его токонесущую способность.

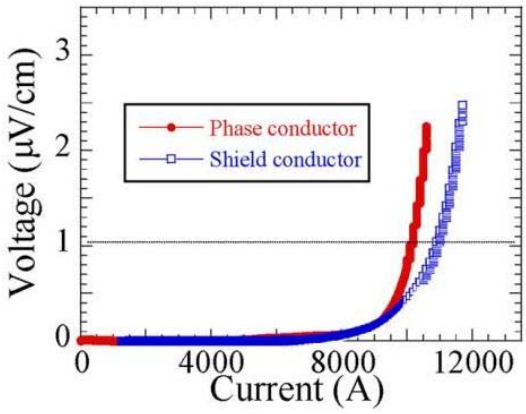


Рис. 5. Вольтамперные характеристики ВТСП жилы и экрана кабеля 5 м кабеля.

На Рис. 6 изображены вольтамперные характеристики 5 м ВТСП кабеля, измеренные при различных температурах. Горизонтальной линией на графике обозначено падение напряжения, соответствующее критерию 1 мкВ/см. При понижении температуры 5 м ВТСП кабеля с 77,3 К до 73.7 К его токонесущая способность возрастает с 10 кА до 11,79 кА.

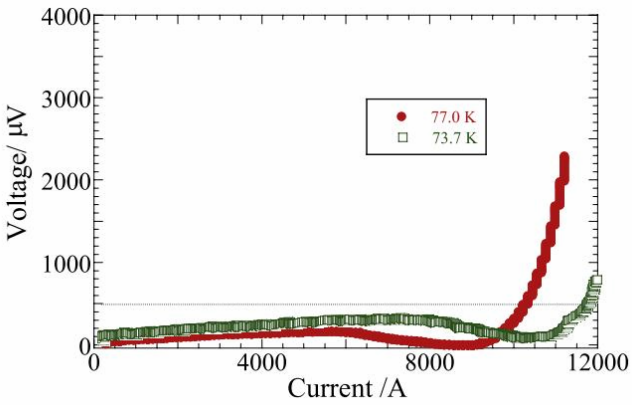


Рис. 6. Вольтамперные характеристики 5 м ВТСП кабеля, измеренные при различных температурах.

Криостат ВТСП кабеля позволяет поддерживать температуру жидкого азота в диапазоне от 65 К до 77 К, что позволяет еще больше поднять его токонесущую способность.

О.И. Свистунова

*1. M. Tomita, M. Muralidhar, K. Suzuki, Y. Fukumoto, and A. Ishihara, J. Appl. Phys.**111**, 63910 (2012).*

*2. M. Tomita, M. Muralidhar, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka and Y. Kobayashi, Supercond. Sci. Technol. **26**, 105005 (2013).*

ТОРЖЕСТВА

О всех, всех, всех

Пятьдесят – число магическое – 5 раз по 10. Оно относится скорее к летоисчислению, чем просто к счету каких-либо объектов. И вот, однако, именно 10 лет назад, в октябре 2004 года, Николай Алексеевич Черноплеков, светлая ему память, предложил издавать информационный бюллетень, посвященной прикладной сильноточной сверхпроводимости, а в октябре этого года увидел свет его выпуск под очередным номером 50. Так что и года и объекты соединились в мозаичную картину венка более чем из 150 (50x3) обзоров на тему, предложенную нашим любимым учителем. Под его редакцией вышло чуть менее половины выпусков. Потом его сменил и по сей день выполняет обязанности научного руководителя, строгого и скрупулезного научного редактора и цензора этого издания Виталий Сергеевич Круглов – директор Курчатовского центра сверхпроводимости. Немного об истории. Может не все читатели нашего бюллетеня читают еще и Информационный бюллетень ПерсТ – «Перспективные Технологии» (наноструктуры, сверхпроводники, фуллерены и нанотрубки), уже 20 лет отражающий на своих страницах достижения в фундаментальных и прикладных аспектах этих направлений физики конденсированного состояния. Светлана Тимофеевна Корецкая - безусловный основатель и сердце этого издания. Нашему бюллетеню повезло, поскольку опыт Светланы Тимофеевны позволил сразу же определить формат нового изда-

ния и технологические тонкости его подготовки. При ее непосредственном участии было сформировано почти треть выпусков нашего бюллетеня. Благодаря ее огромной помощи на начальном пути мы до этих пор успешно преодолевали препятствия, которые время от времени преграждали нам дорогу. Первые несколько выпусков были тиражированы в печатном варианте и рассылались по почте, за что отвечал незабываемый Юрий Константинович Мухин. В 2006 году был создан сайт «Сверхпроводники в электроэнергетике», украшением которого стал, по свидетельству пользователей, информационный бюллетень с похожим названием. Сами издания были представлены обзорами сильнейших специалистов в области сверхпроводниковой электроэнергетики Александра Константиновича Шикова, Виктора Евгеньевича Сытникова, Виталия Сергеевича Высоцкого, Константина Львовича Ковалева. Безупречный научный уровень публикаций обеспечивался высокой квалификацией корреспондентов – сотрудников Курчатовского института Дарьи Игоревны Шутовой, Михаила Станиславовича Новикова, Сергея Андреевича Лелехова, Сергея Викторовича Шавкина и подрастающего поколения молодежи Центра сверхпроводимости. Особенно хочется отметить нашего выпускающего редактора, на котором лежит вся ответственность, в том числе и за своевременность выпуска. Владимир Игоревич Щербаков – трижды юбиляр: 20+30=50: 50 – порядковый номер выпуска и его 30-ый как редактора, в этом выпуске будет опубликован его 20-ый обзор. По-видимому, не все так просто, но, честное слово, так получилось естественным образом. Корреспонденты бюллетеня - не только сотрудники нашего института, но почти пятнадцати научных организаций Москвы: МГУ, МАИ, МИФИ, ВНИИКП, ВНИИНМ, ВЭИ, ФИАН, ОИВТ – неполный их список. Среди корреспондентов Сергей Викторович Самойленков - наш самый активный и непревзойденный автор рекордного числа (22) обзоров по технологическим проблемам производства высокотемпературных сверхпроводников - сегодня он Генеральный директор ЗАО «СуперОкс». Как известно, хорошее содержание требует и красивой формы. Ее безотказно и выразительно обеспечивала все эти 10 лет сотрудник ИФТТ РАН Ирина Львовна Фурлетова. Программные возможности сайта и все размещаемое на нем поддерживает наша любимая «скорая помощь» – сотрудник КИСИ Курчатовского Алексей Александрович Велигжанин. Если посчитать всех принимавших участие в «проекте» информационный бюллетень «Сверхпроводники для электроэнергетики», то тоже юбилейное число и получится. Мы низко с чувством огромной благодарности за плодотворное сотрудничество кланяемся всем, всем, кто принимал участие в создании его выпусков. Ваши таланты позволяют с оправданным оптимизмом надеяться на повышение качества нашего бюллетеня, поскольку совершенство предела не имеет. Пожелаем рекордных достижений в фундаментальных исследованиях, технологических прорывов в производстве токонесущих элементов с высокими характеристиками и изделий на их основе. Пусть оправдается наша надежда, и за всем этим будут стоять ваши имена и имена ваших коллег.

От редакционной группы -
А. К. Чернышева

ПОЗДРАВЛЕНИЕ

От всего сердца искренне поздравляю замечательный коллектив «Сверхпроводников для энергетики» с юбилеем!

Ваша спокойная и тихая работа исключительно важна для всего русскоговорящего «сверхпроводящего» сообщества! Когда надо что-то о чем-то быстро найти в нашей области достаточно просто набрать ваш адрес и искомое будет обнаружено.

Желаю вам всем и дальше продолжать вашу работу в пользу сверхпроводимости и готов всегда помогать! Только скажите!

Удачи и успехов всему коллективу и его душе милой Алле Кузьминичне! Ура!

В.С.Высоцкий

Курчатовский Центр Сверхпроводимости

Сайт «Сверхпроводники в электроэнергетике»

http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/

Научный редактор: *В.С. Круглов,* руководитель Курчатовского центра сверхпроводимости
Редактор: *В.И. Щербаков*

В подготовке выпуска принимали участие: *В.С. Коротков, О.И. Свистунова*
А.К. Чернышева Chernyshova_AK@nrcki/.ru,
Верстка: *И.Л. Фурлетова*