Информационный бюллетень
СВЕРХПРОВОДНИКИ для электроэнергетики
Исследовательские центры Фирмы Инвесторы
Провода Кабели Генераторы Накопители
Трансформаторы Токоограничители
Том 10 выпуск *1*
январь 2013

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

ASC-2012: ВТСП кабельные линии

Публикуем очередной обзор участника конференции по прикладной сверхпроводимости ASC-2012.

На конференции по прикладной сверхпроводимости ASC-2012 (Portsmuth, USA) был продемонстрирован существенный прогресс в создании реальных сверхпроводящих кабельных линий для электроэнергетики. Причём в настоящее время центр активности в этой сфере сместился в сторону восточных стран, где реализованы несколько впечатляющих проектов, демонстрирующих значительные преимущества сверхпроводниковых технологий. Ниже представлено описание двух из таких проектов.

Проект YOKOHAMA HTS Cable Project [1]

Целью проекта является создание ВТСП кабельной линии переменного тока напряжением 66 кВ на передаваемую мощность 200 МВА, демонстрация её работоспособности в реальной сети и изучение взаимодействия ВТСП линии и традиционной электрической сети. Проект реализуют японские фирмы: кабель и арматуру разрабатывает и изготавливает фирма Sumitomo Electric Industries, криогенику Mayekawa Mfg. Co., сетевые вопросы решает Tokyo Electric Power Company. Кабельная линия установлена на подстанции Asahi 154/66 кВ в городе Yokohama. Длина линии 250 метров и она включает одну соединительную и две концевых муфты. Конструкция кабеля «три в одном» показана на рис. 1.

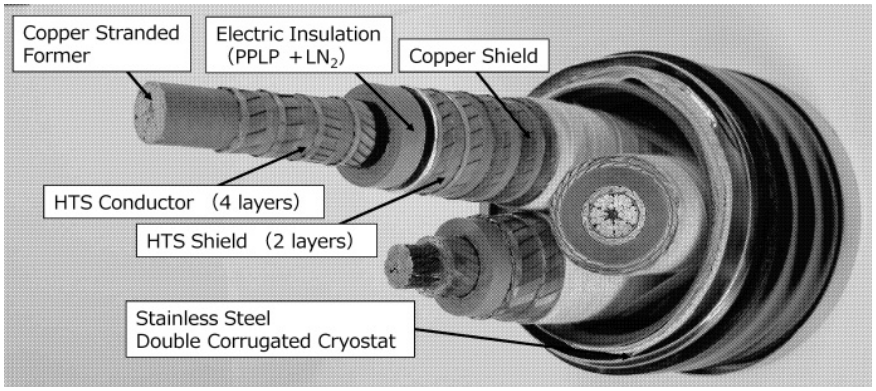

Рис. 1. Конструкция ВТСП кабеля.

Рабочий ток кабеля равен 1750 ампер, а максимальный ток 3000 ампер. При изготовлении кабеля использовались ВТСП ленты первого поколения на основе висмутовой керамики. Жила кабеля содержала 4 повива лент, а экран – два повива. Для снижения потерь энергии в двух внешних повивах жилы, где достигается максимальное магнитное поле, использовалась узкая лента (ширина 2,7 мм.) с твистированными волокнами [2]. В остальных четырёх повивах использовалась стандартная лента типа НТ шириной 4,5 мм.

И далее…

ВТСП УСТРОЙСТВА

ВТСП токоограничители компании Nexans **5**

Китай: разработка ВТСП токоограничителя на 10 кВ и 200 А **7**

Такая комбинированная конструкция позволила существенно снизить потери энергии в кабеле (см. рис. 2). В результате удалось снизить потери ниже 1Вт/м/фазу при токе, равном 2,0 кА. Следует, однако, отметить что ещё одним фактором, существенно повлиявшим на снижение потерь энергии, является большое соотношение между критическим током и рабочим током жилы и экрана. Критический ток жилы, измеренный на образцах двух фаз [3], был равен 6,1 кА, экрана - 7,1 кА.

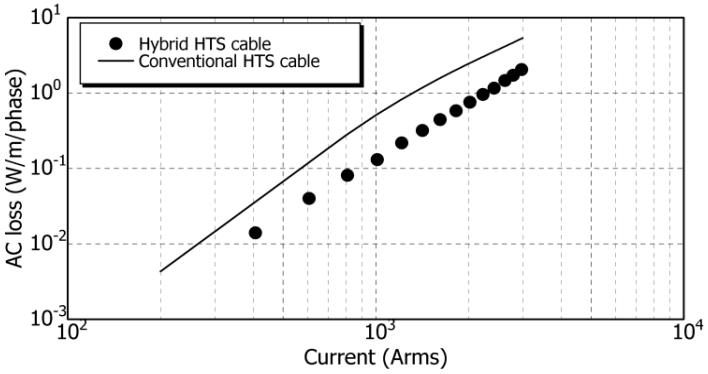

Рис. 2. Потери энергии в одной фазе кабеля.

Кабельная линия смонтирована на подстанции и соединяет низковольтную обмотку трансформатора с шиной 66 кВ. При этом сверхпроводящая линия шунтируется сетевым выключателем и последовательно с обоих концов линии размещены защитные устройства [4].

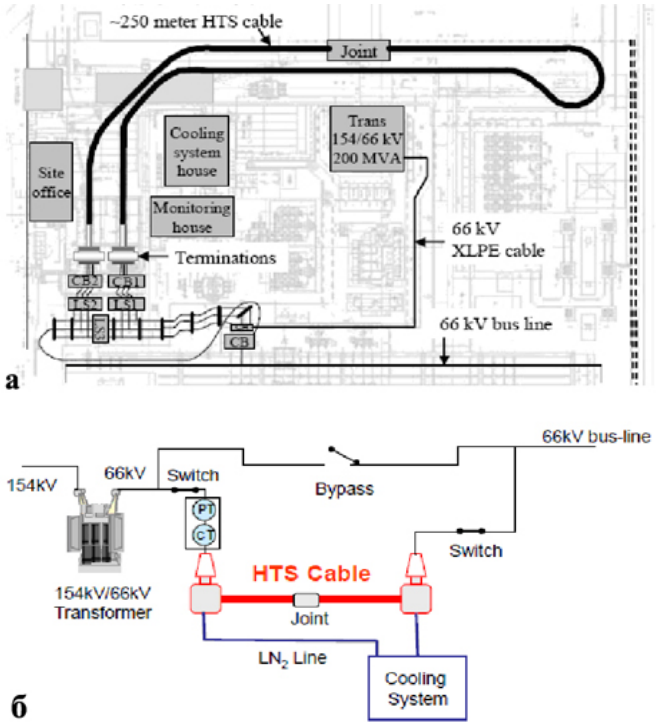

Рис. 2. Схема прокладки (а) и подключения (б) кабеля на подстанции.

Схема подключения ВТСП кабельной линии на подстанции Asahi показана на рис. 3. Монтаж кабеля проводился практически по тем же правилам, что и монтаж традиционного кабеля того же класса напряжения. Усилие при протяжке кабеля составило 1,3 тонны (расчётная величина 2,0 тонны).

Кабель рассчитан на ток короткого замыкания 31,5 кА в течение 2 секунд. Для защиты кабеля в формере и поверх ВТСП экрана размещались медные стабилизаторы сечением 140 мм^2 и 80 мм^2 соответственно.

Охлаждение кабеля производится прокачкой переохлаждённого азота при температуре на входе 69 К. Криогенная система, схема которой приведена на рис. 4, состоит из шести криорефрижераторов Стирлинга, каждый мощностью 1 кВт@77К или 0,8кВт@67К. Циркуляция осуществляется двумя параллельно включёнными насосами. Расчётный расход жидкого азота – 40 л/минуту. Общий объем системы – 10000 литров.

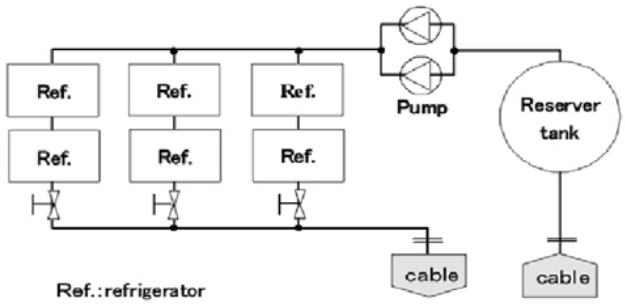

Рис. 4. Схема криогенной системы.

В штатном режиме для поддержания рабочей температуры достаточно мощности четырёх рефрижераторов. Два любых рефрижератора могут выводиться из рабочего режима для ремонта или профилактики без нарушения работы всей системы.

Первичное захолаживание системы было проведено в течение трёх суток. До температуры минус 150 градусов охлаждение осуществлялось газообразным азотом, после чего в кабель подавался жидкий азот. После захолаживания системы были проведены контрольные испытания критического тока отдельных фаз кабеля (результаты приведены на рис. 5) и высоковольтные испытания изоляции на постоянном напряжении 151,8 кВ в течение 10 минут.

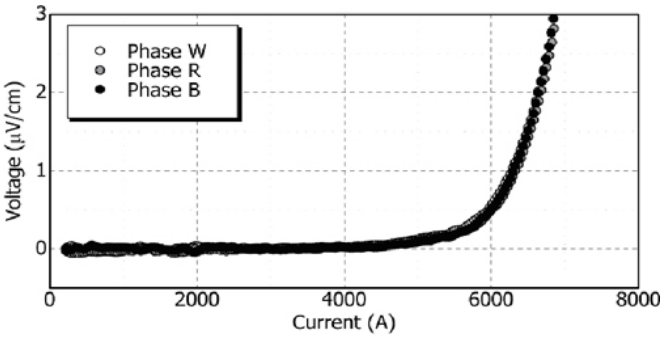

Рис. 5. Вольтамперная характеристика трёх фаз кабеля.

Внешние теплопритоки через криостат и токовводы без токовой нагрузки составили 1,3 кВт и 1,1 кВт при 69 К, соответственно.

После завершения конференции пришло сообщение из Японии об успешном подключении вышеописанной кабельной линии к сети. По ссылке [5] можно наблюдать рабочие параметры линии в реальном времени, как это показано на рис. 6.

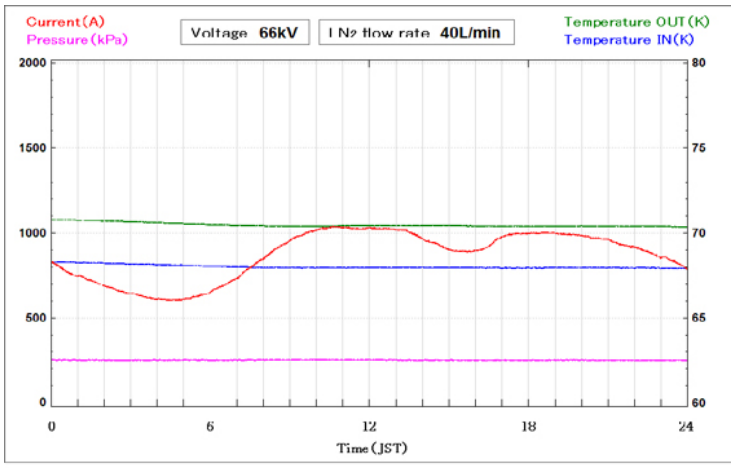

Рис. 6. Рабочие характеристики ВТСП кабельной линии 22.12.2012

Предполагается, что линия будет работать в тестовом режиме в течение 2013 года.

Проект создания высоковольтного ВТСП кабеля [6].

Разработка ведётся в рамках проекта M-PACC project (Materials & Power application of coated conductors), который предусматривает создание ВТСП кабелей, индуктивных накопителей энергии и трансформатора с функцией токоограничения. Разработчиком и изготовителем кабеля является компания Furukawa Electric. Этот ВТСП кабель является рекордным как по классу напряжений, так и по передаваемой мощности (более 1400 МВА).

Конструкция кабеля показана на рис. 7. Токонесущая система кабеля состоит из 4 повивов ВТСП лент, образующих жилу кабеля, и экрана, состоящего из двух повивов лент. В качестве изоляционного материала используется бумага типа PPLP (полипропиленовая ламинированная бумага). Основные проектируемые параметры кабеля: напряжение 275 кВ, рабочий ток 3,0 кА, потери энергии 0,8 Вт/м на фазу, ток короткого замыкания 63,0 кА в течение 600 миллисекунд, максимальный диаметр 150 мм.

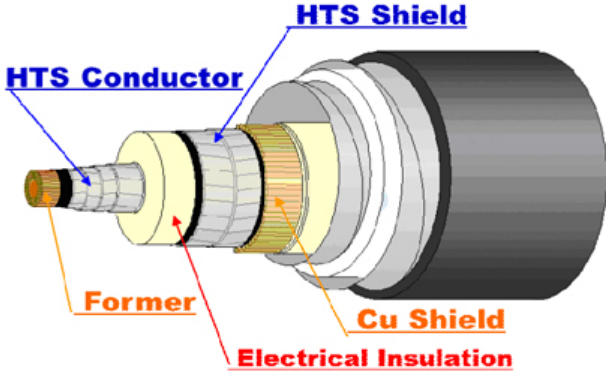

Рис. 7. Конструкция ВТСП кабеля высокого напряжения.

В кабеле используется лента второго поколения, структура которой и производственная кооперация представлены на рис. 8. Для изготовления экрана использовалась лента шириной 5 мм. Для изготовления жилы использовалась лента шириной 3мм., которая изготавливалась из 5 – миллиметровой путём лазерной обрезки, рис. 8б.

Рис. 8. Структура ленты G-2 (а) и схема обрезки.

Для экспериментальных исследований были изготовлены однофазные образцы кабеля с параметрами, указанными в таблице.

Таблица. Параметры образца высоковольтного ВТСП кабеля.

	Конструкция	**Диаметр,мм**
Формер	Скрутка из медных проводников. Поперечное сечение: 412 мм^2	30,6
ВТСП	2 слоя: 30 лент ВТСП 3 мм ширины	35,4 (33) (34)
Электрическая изоляция	Толщина изоляции 22 мм Диэлектрическая прочность 22,0 кВ/мм (AC), 83,0 кВ/мм (IMP)	79,4
ВТСП экран	1 слой: 43 ленты ВТСП 5 мм ширины	80
Медный экран	Поперечное сечение: 210 мм^2 2 слоя: 30 лент 3,5 мм^2	81 83
Весь ВТСП кабель		86,5
Криостат в оболочке		150

На рис. 9 представлены результаты измерения потерь энергии в ВТСП жиле кабеля [7], изготовленного из 5 мм лент. При этом потери при 68,7 К составили 0,235 Вт/м. Дальнейшее совершенствование лент и уменьшение их ширины до 3 мм позволили достичь следующих результатов [6]: потери при 3,0 кА в жиле – 0,127 Вт/м, в экране – 0,07 Вт/м, диэлектрические потери в изоляции – 0,6 Вт/м.

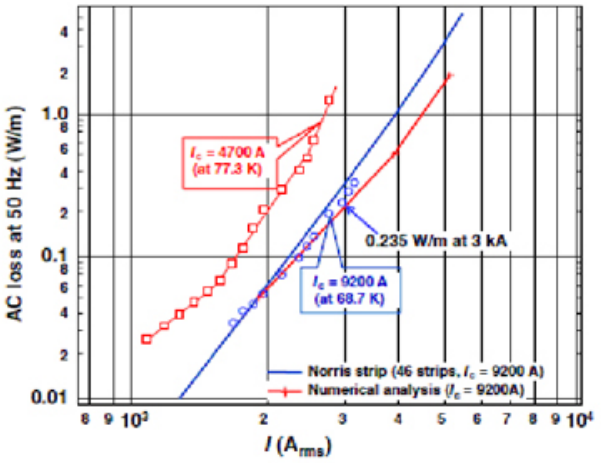

Рис. 9. Результаты измерения потерь энергии в образце кабеля, изготовленного из 5 мм лент [7].

Для испытаний на токи короткого замыкания была изготовлена 2-х метровая модель кабеля с контактным соединением (рис. 10). Образец выдержал ток 63 кА в течение 0.6 секунды. Изменение температуры различных элементов кабеля при свободном охлаждении жидким азотом показано на рис. 11.

Рис. 10. Соединение двух отрезков кабеля.

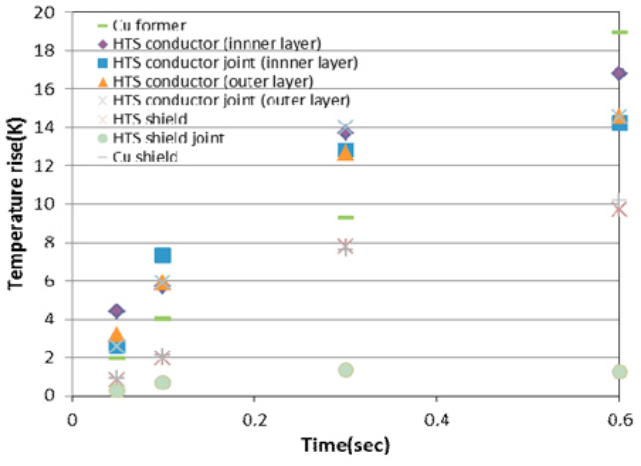

Рис. 11. Повышение температура различных элементов кабеля и контакта в процессе прохождения импульса тока короткого замыкания 63,0 кА в течение 0,6 секунды.

Максимальное увеличение температуры имело место на формере и достигало 19 градусов. Охлаждение до исходной температуры жилы и формера происходило за 500 секунд. Все характеристики кабеля не претерпели каких-либо изменений в результате воздействия токов короткого замыкания.

В результате проведенных расчётных и экспериментальных исследований определены конструктивные решения всех элементов кабеля.

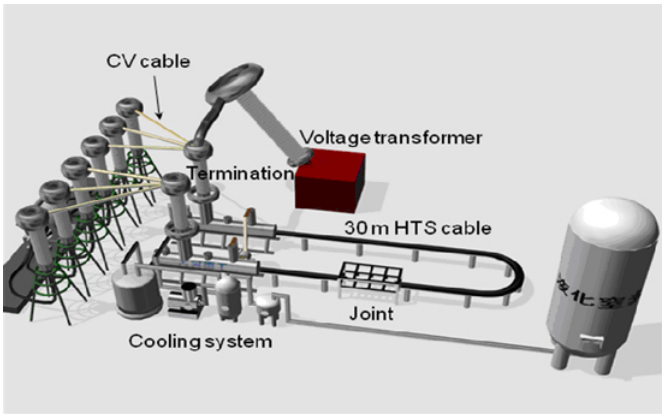

Рис. 12. Стенд для испытаний высоковольтной ВТСП кабельной системы.

Для проведения демонстрационных испытаний изготовлена 30-метровая кабельная система с одной соединительной муфтой, которая будет испытана на стенде, схема которого показана на рис. 12. Разработана программа испытаний. После проверки рабочих характеристик кабельной линии будет проведен комплекс долговременных испытаний, целью которых является подтверждение 30-летнего ресурса разработанной кабельной линии.

В.Е. Сытников

1. *H. Yumura et al., Update of YOKOHAMA HTS Cable Project, ASC 2012, manuscript 1JB-01.*
2. *N. Ayai, et. al., Progress in performance of DI-BSCCO family, Physica C, vol.468,.1747, 2008.*
3. *H. Yumura et al., HTS cable design and evaluation in YOKOHAMA Project IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum (esnf), no. 11, january 2010*
4. *S. Honjo, et. al., Status of superconducting cable demonstration project in Japan, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, No.3, 967, 2011.*
5. *http://global-sei.com/super/cable_e/yesterday_status.html*
6. *O. Maruyama et al., Development of 66 kV and 275 kV class REBCO HTS power cables, ASC 2012, manuscript 2LA-02.*
7. *Y. Shiohara et al., Overview of Materials and Power Applications of Coated Conductors Project, Japanese Journal of Applied Physics, vol.**51**, No 1 01007, 2012.*

ВТСП УСТРОЙСТВА

ВТСП токоограничители компании Nexans

Проект ENSYSTROB

Интенсивные исследования по созданию сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) начались в Германии 15 лет назад и к настоящему времени уже успешно работают в различных электросетях коммерческие прототипы.

В сентябре 2009 года стартовал проект ENSYSTROB, целью которого является создание трехфазного СОТ резистивного типа, рассчитанного на номинальные напряжение 12 кВ и ток 800 А. Над проектом работают специалисты из Karlsruhe Institute of Technology, University of Dortmund, компании Nexans Superconductors при поддержке правительства Германии. Разрабатываемый токоограничитель будет обеспечивать защиту собственных нужд электростанции. Отличительной особенностью этой области применения СОТ является большой ударный ток короткого замыкания.

Новый токоограничитель разрабатывается на основе устройства, ранее установленного на угольной электростанции г. Боксберг (Германия). Он будет отличаться от своего предшественника тем, что вместо токоограничивающих элементов круглого сечения из массива BSCOO-2212 в нем будут использоваться ВТСП ленты 2-го поколения производства компании SuperPower. Ширина YBCO лент составляет 12 мм, критический ток – 275 А, а толщина стабилизирующего серебряного покрытия, необходимого для защиты ВТСП лент от перегрева во время коротких замыканий, – 3 мкм.

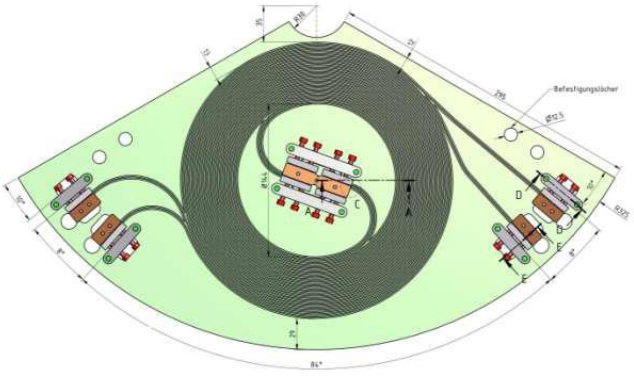

Рис. 1. Внешний вид прототипа ВТСП секции СОТ, разрабатываемого в проекте ENSYSTROB.

Сверхпроводниковые секции токоограничителя будут представлять собой бифилярные катушки галетного типа. Прототип ВТСП секции СОТ уже изготовлен и его внешний вид представлен на Рис. 1. Токонесущий элемент прототипа секции состоит из двух ВТСП лент, сложенных вместе таким образом, что YBCO слой одной сверхпроводящей ленты прижат к подложке другой ленты. Два токонесущих элемента бифилярно намотаны на каркас катушки и подсоединены к общему контакту в центре ВТСП секции. Длина токонесущего элемента составляет 2,3 м. Контакт между токонесущими элементами осуществлялся путем механического прижима YBCO поверхностей сверхпроводящих лент к медным пластинкам через индиевую прокладку.

Итоговая конструкция ВТСП секции будет очень близка к своему прототипу. Отличие заключается в том, что для намотки галеты будут использоваться не два, а четыре токонесущих элемента, соединенных параллельно. Таким образом, токонесущая способность секции увеличится в 2 раза. Токи в смежных токонесущих элементах будут протекать в противоположных направлениях. Длина токонесущего элемента также будет увеличена и составит – 4,3 м. Все ВТСП ленты в этом случае также будут подсоединены к общему контакту в центре ВТСП секции.

Для обеспечения необходимой токонесущей способности три ВТСП секции будут соединены параллельно друг с другом в ВТСП сборку. Каждая фаза СОТ будет состоять из 16 таких сборок, соединенных последовательно, поэтому для изготовления одной фазы потребуется 1660 м сверхпроводящей ленты. Каждая сборка токоограничителя рассчитана на напряжение 433 В, то есть напряженность электрического поля на ВТСП лентах устройства составит 0,5 В/см. При работе СОТ в номинальном режиме на токе 800 А ток в каждой ВТСП ленте составит 34% от своего критического значения, а именно 67 А.

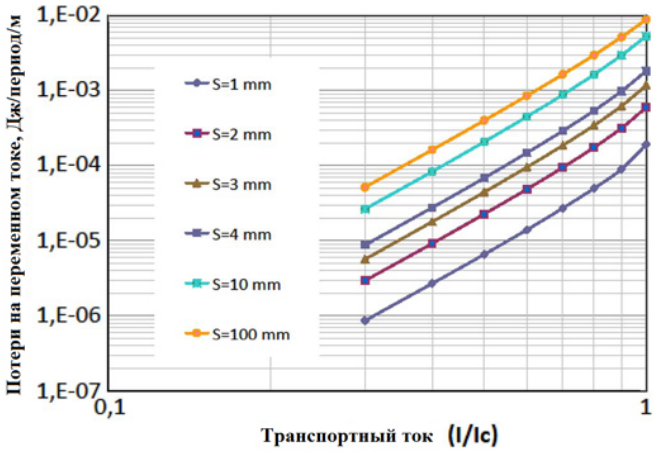

Рис. 2. Потери на переменном токе в зависимости от величины транспортного тока для различных расстояний между токонесущими элементами.

Для определения потерь на переменном токе в ВТСП лентах СОТ была построена двумерная модель, в которой бифилярная катушка галетного типа была представлена как пачка ВТСП лент с противоположными направлениями тока. Расчет проводился методом конечных элементов. Стоит отметить, что расчет потерь на переменном токе в пачке ВТСП лент можно провести аналитически, если для описания сверхпроводящих свойств использовать модель критического состояния. Результаты моделирования показали, что использование двух ВТСП лент для изготовления токонесущего элемента уве-

личивает величину потерь на переменном токе приблизительно в 2 раза.

Расстояние между токонесущими элементами также влияет на величину потерь на переменном токе. На Рис. 2 приведен график зависимости потерь от величины транспортного тока для различных расстояний между токонесущими элементами. Сближение токонесущих элементов до расстояния между ними в 3 мм снижает потери на переменном токе в 10 раз по сравнению с бесконечно отдаленными проводниками. При таком расстоянии в одной фазе СОТ при работе устройства на токе 800 А потери на переменном токе составят приблизительно 2 Вт, что значительно меньше, чем тепловые потери, выделяющиеся в токовводах, а в ВТСП секции потери не будут превышать 5 мВт/м. Такое низкое значение величины потерь на переменном токе связано с тем, что ток, протекающий в ВТСП лентах токоограничителя, составляет 34% от своего критического значения.

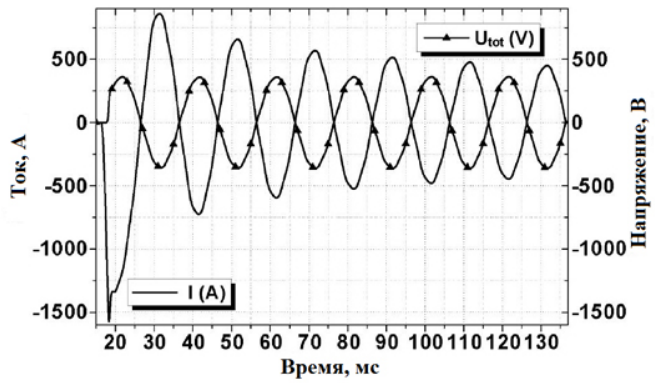

Рис. 3. Напряжение и ток в ВТСП секции СОТ в опыте короткого замыкания.

Исследование токоограничивающих свойств прототипа ВТСП секции проводилось в жидком азоте в открытом криостате. Секция подвергалась коротким замыканиям длительностью 120 мс. На Рис. 3 представлены изменения напряжения и тока ВТСП секции в течение опыта короткого замыкания. Напряженность электрического поля на ВТСП лентах составляла 0,54 В/см, а температура лент за время прохождения тока короткого замыкания через ВТСП секцию достигла 400 К. На первом полупериоде ударный ток короткого замыкания был ограничен до 21 кА (по амплитуде), через 50 мс амплитуда ударного тока короткого замыкания достигала 4,1 kA, что в 1,6 раза выше порога срабатывания токоограничителя, а по прошествии 100 мс ударный ток снижался до 6,6 – 7 кА. Всего ВТСП секция была подвергнута 20 коротким замыканиям. Деградации критических свойств не наблюдалось.

Проведенные исследования позволили выделить преимущества разрабатываемого токоограничителя над своим прототипом. Стоит отметить, что замена проводников на основе висмута YBCO лентами позволит сократить время восстановления токоограничителем сверхпроводящих свойств после устранения короткого замыкания с одной минуты до нескольких секунд.

Проект ECCOFLOW

Другой проект компании Nexans ECCOFLOW, направлен на создание резистивного СОТ, рассчитанного на напряжение в 20 кВ и ток 1 кА. В течение нескольких месяцев планируется испытать токоограничитель в месте соединения силовых шинопроводов в распределительной сети острова Мальорка (Испания), после чего он будет установлен на фидер трансформатора в VSE электросети в г. Кошице (Словакия) на длительный срок.

Разработанный токоограничитель будет состоять из трех фаз, каждая из которых набрана из 12 ВТСП секций диаметром 640 мм. Расстояние между секциями составляет 70 мм, а высота всей конструкции – 860 мм. Внешний вид одной фазы токоограничителя, а также его отдельной ВТСП секции представлен на Рис. 4.

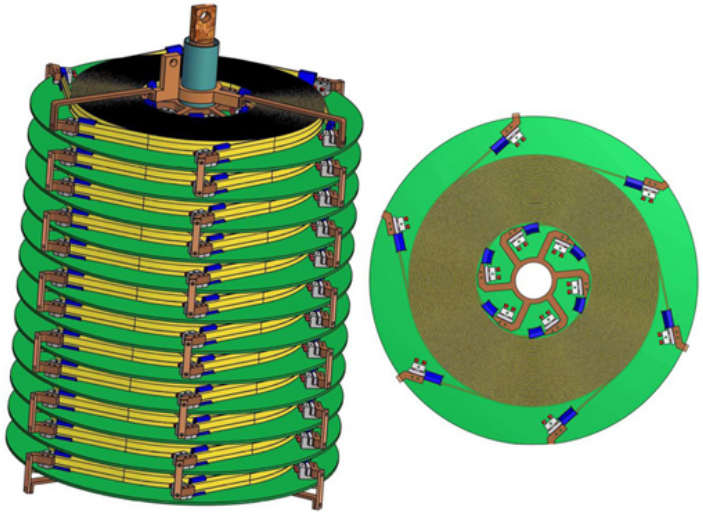

Рис. 4. Внешний вид фазы СОТ на 20 кВ и 1кА (слева) и ВТСП секции (справа).

Компактные ВТСП катушки низкой индуктивности намотаны из YBCO лент шириной 12 мм с критическим током 300 А. Толщина защитного серебряного покрытия выбранных лент составляет 4 мкм. Шесть токонесущих элементов, представляющих собой две сложенные вместе параллельные ВТСП ленты, намотаны на каркас катушки и присоединены к общему контакту, расположенному в центре секции. Контакты между ВТСП лентами и медными шинами – прижимные, через индиевые прокладки. Значение контактного сопротивления в этом случае будет меньше 0,5 мкОм. Токи в соседних токонесущих элементах текут в противоположных направлениях. В трех из них токи текут к центру секции, а в трех остальных – к периферии.

Каждая секция токоограничителя рассчитана на напряжение 680 В. Параллельное соединение токонесущих элементов в ВТСП секции и последовательное соединение ВТСП секций, образующих фазу, обеспечивается с помощью медного треуголь-

ника, являющегося общим контактом для секций, смещенных друг относительно друга на 60^0.

Такая конструкция токоограничителя позволяет исключить параллельное соединение ВТСП секций, обеспечить низкое напряжение в ВТСП секциях, а также использовать для изготовления обмоток СОТ короткие отрезки ВТСП лент.

Длина ВТСП ленты, необходимая для изготовления обмоток токоограничителя, определяется из условия возможного нагрева сверхпроводника во время короткого замыкания. Температура сверхпроводника, в свою очередь, зависит от падения напряжения на устройстве (8 кВ), которое определяется импедансом сети (1,4 Ом) и максимальной величиной ограниченного тока (действующее значение – 1,4 кА). Максимальная температура ВТСП лент не должна превышать 360 К. Проведенные вычисления показали, что при длительности короткого замыкания в 80 мс это условие достигается при напряженности электрического поля в 0,515 В/см (действующее значение). Таким образом, длина ВТСП ленты, необходимая для изготовления одной фазы токоограничителя, составляет приблизительно 960 м, а для изготовления всего СОТ потребуется 2880 м сверхпроводника.

В случае короткого замыкания СОТ ограничивает ударный ток короткого замыкания на первом полупериоде до 10,8 кА.

Каждую фазу токоограничителя предполагается разместить в отдельном резервуаре, заполненном жидким азотом. Все три резервуара будут расположены в общем вакуумном объеме. Теплоприток по криостату, диаметр которого составит 2099 мм, а высота – 2215 мм, оценивается в 128 Вт без учета токовводов. Для обеспечения рабочей температуры устройства в 77 К планируется использовать микрорефрижератор замкнутого цикла хладопроизводительностью 1000 Вт. При нормальной работе СОТ тепло, идущее от ВТСП секций, испаряет жидкий азот, и газообразный азот течет к криокулеру, затем в теплообменнике газообразный азот превращается в жидкий и под действием гравитации спускается обратно в криостат.

Общие потери в СОТ при низкой температуре складываются из потерь на переменном токе в сверхпроводящих лентах, которые при номинальном токе составят 600 Вт, теплопритоков по криостату и токовводам, а также джоулева тепловыделения в токовводах и соединениях внутри криостата. При токе, составляющем 50% от критического значения, и температуре жидкого азота потери в токоограничителе не превысят 365 Вт.

Н.С. Вохмянина

1. *Steffen Elschner et al., ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3,1209, June 2011*
2. *Mathias Noe et al., Conceptual Design of a 24 kV, 1 kA Resistive Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 5600304, June 2012*

Китай: разработка ВТСП токоограничителя на 10 кВ и 200 А

Китайские специалисты из Shanghai Jiao Tong University разработали прототип СОТ резистивного типа, рассчитанный на номинальные напряжение 10 кВ и ток 200 А.

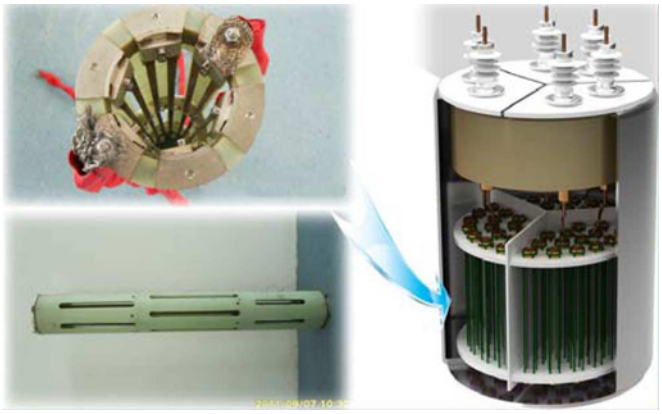

Рис. 1. Внешний вид ВТСП токоограничителя на 10 кВ и 200 А (справа) и фотография отдельной токоограничивающей секции (слева).

Внешний вид устройства представлен на Рис. 1. СОТ состоит из трех фаз, каждая из которых состоит из 15 соединенных последовательно токоограничивающих секций. Была изготовлена и испытана одна из токоограничивающих секций, рассчитанная на напряжение 400 В.

В токоограничивающей секции размещены 12 одиночных ВТСП лент длиной по 1 м. Сверхпроводящие ленты в секции соединяются в два параллельных участка, каждый из которых состоит из 6 последовательно соединенных лент (см. Рис. 2).

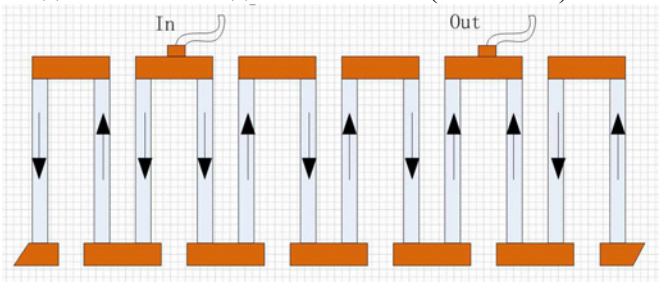

Рис. 2. Способ соединения ВТСП лент в токоограничивающей секции.

Для изготовления токоограничивающей ВТСП секции использовались YBCO ленты шириной 10 мм и толщиной 140 мкм, покрытые с обеих сторон медным стабилизатором толщиной 20 мкм. Изготавливались ленты методом PLD (Pulsed Laser Deposition) в Shanghai Jiao Tong University. Критический ток отдельной ВТСП ленты составляет примерно

145 А, а параллельное соединение двух YBCO лент в секции обеспечивает критический ток в 290 А.

Каждая токоограничивающая секция весит 4,5 кг, а вся трехфазная система, включая поддерживающую конструкцию – 265 кг.

Потери на переменном токе и контактное сопротивление.

В отличие от токоограничителей, секции которых представляют собой бифилярные обмотки, конструкция разработанного китайскими специалистами СОТ обеспечивает непосредственный контакт всей поверхности ВТСП ленты с жидким азотом, что улучшает теплообмен и сокращает время восстановления сверхпроводящих свойств после короткого замыкания. Более того, токи в соседних ВТСП лентах текут в противоположных направлениях, и магнитное поле каждой ленты компенсируется магнитным полем от соседней ленты, что снижает величину потерь на переменном токе. Однако в такой конструкции возникает большое число спаев, в рассматриваемом токоограничителе – 1080 спаев. Поэтому необходимо исследовать два типа тепловых потерь: потери на переменном токе, возникающие в сверхпроводящих лентах, и потери из-за контактного сопротивления, возникающие в медных соединениях и токовводах.

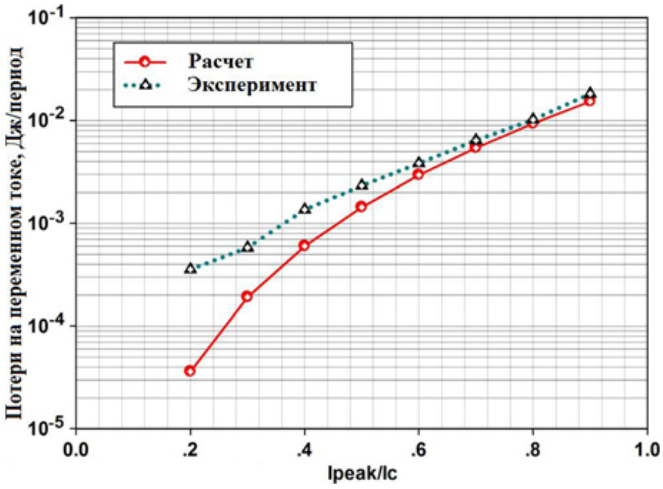

Рис. 3. Потери на переменном токе в ВТСП секции СОТ.

На Рис. 3 представлены экспериментальные и расчетные значения потерь на переменном токе в токоограничивающей секции. Численный анализ основан на распределении тока и магнитного поля по поперечному сечению 12 ВТСП лент. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными при превышении током значения 0,6 I_c. Исследование отдельной ВТСП секции позволило оценить величину потерь на переменном токе в прототипе СОТ на 10 кВ. При рабочем токе устройства в 200 А потери составят приблизительно 90 Вт.

Другим источником тепловых потерь в разработанном токоограничителе является наличие сопротивления в контактах, соединяющих сверхпроводящие ленты в ВТСП секциях, а также в местах соединения с токовводами.

Контакт между YBCO лентами в секции осуществляется с помощью специально разработанных зажимов, которые позволяют не только точно и устойчиво расположить ленты на каркасе, но и минимизировать контактное сопротивление. Площадь поверхности контакта в каждом соединении составляет 2 см^2. Несколько поддерживающих зажимов расположены в центральной части ВТСП секции для подавления перемещения лент во время перехода в нормальное состояние. Для достижения наилучшей электропроводности вместе с прижимным контактом использовалась пайка индием.

По вольтамперной характеристике на участке между соседними лентами была вычислена величина контактного сопротивления. ВАХ всей токоограничивающей секции позволила определить общее сопротивление. В том случае, когда между сверхпроводящими лентами осуществлялся только прижимной контакт, контактное сопротивление ВТСП секции, возникающее из-за соединений сверхпроводящих лент, составило 0,294 мОм, а общее сопротивление секции – 0,330 мОм. Таким образом, контакт между соседними сверхпроводящими лентами дает значительно больший вклад в общее сопротивление ВТСП секции, чем соединения секции с токовводами. Применение совместно с прижимным контактом пайки индием позволило сократить величину общего контактного сопротивления токоограничивающей секции до 0,09 мОм, то есть приблизительно в 3,5 раза.

На Рис. 4 представлены зависимости потерь, возникающих в ВТСП лентах на переменном токе, тепловыделений в контактах, а также величина общих тепловых потерь в ВТСП секции СОТ от тока. Тепловыделения в контактах, представленные на графике, приведены для случая, когда ВТСП ленты в секции соединены только путем прижима, без применения индиевого припоя.

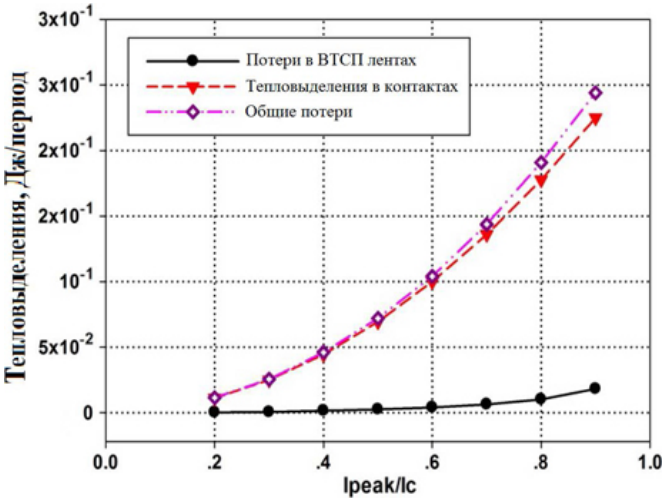

Рис. 4. Потери в ВТСП секции трехфазного СОТ на 10 кВ.

Из Рис. 4 видно, что потери на переменном токе, возникающие в ВТСП лентах, значительно меньше тепловыделений в контактах, однако при прибли-

жении тока к критическому значению потери в ВТСП лентах на переменном токе растут значительно быстрее.

Максимально допустимое падение напряжение на YBCO ленте.

Напряжение, которое может выдержать единица длины YBCO проводника за время короткого замыкания, определяет количество ленты, необходимое для создания токоограничителя на заданный уровень напряжения.

Для определения максимально допустимого падения напряжения на одиночных YBCO лентах был проведен ряд экспериментов по имитации короткого замыкания длительностью от 20 мс до 200 мс. Для исследования максимально допустимого падения напряжения были выбраны ВТСП ленты с максимально близкими критическими токами (от 143 до 146 А).

Для имитации коротких замыканий использовался понижающий трансформатор с током 500 А во вторичной обмотке. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора постоянно и составляло20 В, длину ленты постепенно уменьшали от 25 см с шагом 5 см вплоть до ее перегорания. Таким образом, определялось максимально допустимое значение напряжения, приходящегося на единицу длины YBCO ленты. При увеличении длительности короткого замыкания лента нагревается до большей температуры, то есть максимально допустимое напряжение снижается. В таблице 1 приведены максимально допустимые напряжения при разной длительности короткого замыкания.

Длительность короткого замыкания	20 ms	60 ms	100 ms	140 ms	180 ms	200 ms
Максимальное напряжение	>4 V/cm	1.67 V/cm	0.77 V/cm	0.73 V/cm	0.65 V/cm	0.60 V/cm

Падение напряжения на единицу длины нормального участка проводника растет преимущественно линейно с увеличением длительности короткого замыкания, пока ВТСП лента не сгорит. В проведенных опытах не было подключено последовательно или параллельно ленте ни шунтирующего, ни линейного сопротивления. Все напряжение во время короткого замыкания было приложено к лентам, поэтому полученные результаты отражают наиболее неблагоприятную ситуацию.

Эксперименты по короткому замыканию.

Для исследования влияния шунтирующего сопротивления на величину ограниченного тока были проведены эксперименты по имитации короткого замыкания, в которых к ВТСП ленте длиной 20 см были параллельно подсоединены шунтирующие сопротивления в 20 мОм и 200 мОм. Эксперименты проводились на двух уровнях напряжения. При приложенном к ВТСП ленте напряжении в 20 В (действующее значение) ударный ток короткого замыкания составлял 1,4 кА (по амплитуде), а при напряжении в 40 В (действующее значение) – 2,8 кА (по амплитуде). Результаты экспериментов представлены на Рис. 5.

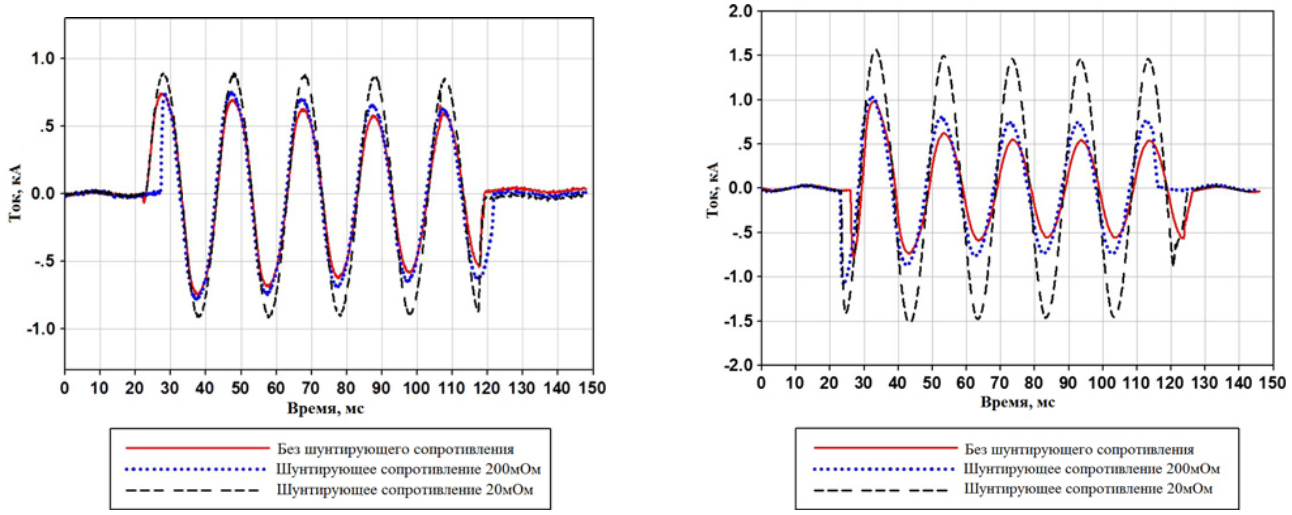

Рис. 5. Ток короткого замыкания при различных значениях шунтирующего сопротивления. Действующее значение напряжения, приложенного к ВТСП ленте, составляет 20 В (слева) и 40В (справа).

Добавление шунтирующего сопротивления позволяет снизить величину ограниченного тока, причем при большем значении приложенного напряжения шунтирующее сопротивление оказывает большее влияние на величину ограниченного тока. Таким образом, использование шунтирующего сопротивления позволяет заметно снизить падение напряжения на ВТСП лентах и защитить их от перегорания.

Сравнение результатов экспериментов по имитации короткого замыкания, проведенных при приложенных к образцу напряжений 20 В и 40 В (действующие значения), показывает, что увеличение в 2 раза приложенного напряжения увеличивает ограниченный ток короткого замыкания на первом полупериоде только на 30%. Это говорит о том, что в эксперименте с большим напряжением ВТСП секция токоограничителя развивает и большее сопротив-

ление. Связан этот эффект с более однородным переходом сверхпроводящих лент в нормальное состояние при большем значении напряжения. Всего было проведено 20 экспериментов, последующее измерение вольтамперных характеристик не показало деградации критического тока.

Важной характеристикой устройства является время восстановления токоограничителем сверхпроводящего состояния под нагрузкой после устранения короткого замыкания, для чего с одиночной ВТСП лентой длиной 20 см были проведены эксперименты при напряжении 40 В. Критерием, определяющим время восстановления сверхпроводящего состояния, являлось снижение напряжения до значения 1 мкВ/см. Длительность короткого замыкания менялась от 20 мс до 120 мс. Нормальный ток составлял 100 А, а ограниченный ток короткого замыкания – 1 кА (действующие значения), шунтирующее сопротивление в исследованиях времени восстановления не использовалось. Результаты измерения времени восстановления ВТСП секцией сверхпроводящего состояния под нагрузкой для различных длительностей короткого замыкания приведены в таблице 2.

Таблица 2

Длительность короткого замыкания (мс)	20	40	60	80	100	120
Время восстановления (периоды)	1	7	16	18	25	31

Н.С. Вохмянина

1. *Z. Hong et al., The Development and Performance Test of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 5600504, June 2012*
2. *L. Ying et al., AC Loss and Contact Resistance of Resistive Type Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductors IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 5602204, June 2012*
3. *B. Lin et al., Test of Maximum Endurable Quenching Voltage of YBCO-Coated Conductors for Resistive Superconducting Fault Current Limiter IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 5602904, June 2012*

Примечание научного редактора:

Обращаем Ваше внимание, что большинство проектов по электротехническим устройствам на основе ВТСП 2-го поколения реализуется из сверхпроводящих материалов собственного изготовления.

Издатель *НИЦ «Курчатовский Институт»,*
НБИК, НТК «Прикладная сверхпроводимость»

Научный редактор: *В.С. Круглов,* зам. директора *НТК сверхпроводимость*
Редактор: *В.И. Щербаков* sherby@isssph.kiae.ru
В подготовке выпуска принимали участие: *Н.С. Вохмянина, В.Е. Сытников, А.К. Чернышева* perst@isssph.kiae.ru,
Верстка: *И.Л. Фурлетова*