

В.С. Высоцкий, д-р техн. наук,
 директор научного направления, заведующий отделом, ОАО «ВНИИКП»;
А.А. Носов, старший инженер лаборатории, ОАО «ВНИИКП»;
А.В. Рычагов, заведующий лабораторией, ОАО «ВНИИКП»;
В.Е. Сытников, д-р техн. наук; директор по исследованиям и разработкам
 ОАО «НТЦ-Электроэнергетики»;
С.С. Фетисов, заведующий лабораторией, ОАО «ВНИИКП»;
К.А. Шутов, заведующий производственно-техническим сектором, ОАО «ВНИИКП»

СОЗДАНИЕ СИЛОВОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ НА БАЗЕ ВТСП ТЕХНОЛОГИЙ

ИСТОРИЯ ПРОЕКТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Завершились приемочные испытания высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) кабельной линии длиной 200 м.

Применение сверхпроводящих кабельных линий позволяет существенно сократить потери электроэнергии, передавать большие потоки мощности при габаритах кабеля, близких к габаритам традиционных полиэтиленовых кабелей, продлить срок эксплуатации кабельных линий, повысить уровень их пожарной и экологической безопасности, уменьшить площадь отчуждаемых земель.

ВТСП линия была создана совместно ЭНИН им. Кржижановского, ОАО «ВНИИКП» (разработчик и изготовитель кабеля и токовых вводов), МАИ им. Орджоникидзе (разработчик токовых вводов и системы криогенного обеспечения), ОАО «НТЦ Электроэнергетики» (создатель полигона для испытаний сверхпроводникового оборудования, проведение испытаний и разработка вопросов применения ВТСП линий в энергосетях). Работа над линией длиной 200 м была продолжением успешной разработки и испытаний в 2007–2009 гг. экспериментальной ВТСП линии длиной 30 м – первой в России ВТСП кабельной линии.

Испытания проводились на полигоне, позволяющем проводить испытания сверхпроводникового оборудования под нагрузкой и до напряжений 110 кВ. В условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации, было получено подтверждение соответствия характеристик ВТСП кабельной линии всем требованиям, заложенным при ее разработке. Сверхпроводящий кабель работал под нагрузкой около 50 МВА (ток 1500 А), при этом параметры кабеля полностью соответствовали расчетным. Изоляция кабеля выдержала высоковольтные испытания. Критический ток кабеля, при котором сверхпроводник начинает терять свои сверхпроводящие свойства, составил более 5000 А.

После проведения дополнительных комплексных испытаний, предполагается установить кабельную линию на подстанции «Динамо» в Москве для опытной эксплуатации в 2011–2012 гг.

Важнейшей задачей, стоящей перед энергетикой, является создание эффективных и энергосберегающих систем передачи энергии. Наиболее эффективным способом значительного (в 3–8 раз) увеличения мощности распределительных сетей без изменения напряжения в сетях может быть достигнуто путем замены традиционных силовых кабелей сверхпроводящими.

Появление на рынке ВТСП материалов с высокими токонесущими характеристиками создало принципиально новые возможности для практического использования этого явления.

Основные преимущества силовых ВТСП кабелей следующие: высокая токовая нагрузка, малые потери в сверхпроводнике, экологическая чистота (отсутствие масел, минимальное электромагнитное и тепловое воздействие на окружающую среду), высокий уровень пожарной безопасности.

При передаче большой мощности при относительно низком напряжении – 10–20 кВ (генераторном) – не требуется промежуточных подстанций, что дает значительную экономию капитальных затрат и городских земельных ресурсов.

В настоящее время НИОКР по созданию силовых ВТСП кабельных линий ведутся во многих промышленно развитых и в ряде развивающихся стран мира. Крупные проекты ведутся в Японии, США, Корее и Китае. В июле и августе 2006 г. запущены в опытную эксплуатацию ВТСП кабельные линии длиной 350 м и 200 м в США, в 2008 г. – кабельная линия длиной 600 м (рис. 1).

Таким образом, работы по созданию силовых ВТСП кабельных линий признаны актуальными во всем мире, поскольку они позволяют решить коренные проблемы передачи больших потоков электроэнергии и энергосбережения.



Triax HTS Cable

Проект США – Дания

Кабель 200 м, ток – 3000 А, напряжение – 13,2 кВ. Кабель с максимальной плотностью тока. Запущен 8.08.2006 на подстанции Биксби (США). Минимальная мощность – 19 МВА. Максимальная мощность – 55 МВА. Средняя мощность – 32 МВА



Проект США – Япония

Кабель 350 м, ток – 800 А, напряжение – 34,5 кВ. Запущен 20.07.2006 в г. Олбани (США). Вставка из ВТСП второго поколения



Проект Long Island Power Authority (LIPA) (США – Европа)

Кабель 600 м, ток – 2400 А, рабочее напряжение – 138 кВ, мощность ~ 574 МВА. Введен в эксплуатацию в апреле 2008 г. Самый крупный сверхпроводящий кабель на сегодняшний день

Рис. 1. Крупнейшие мировые проекты сверхпроводящих кабельных линий

В то же время до 2007 г. в России отсутствовало производство силовых ВТСП кабельных линий и ее основных компонентов.

С 2005 г. ОАО «ВНИИКП» включилось в работы по разработке и созданию сверхпроводящих кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников [1–4]. Главной целью этих работ является увеличение мощности распределительных сетей мегаполисов путем замены обычных силовых кабелей на кабельные линии с использованием ВТСП при существующем номинальном напряжении распределительных сетей.

Предыдущие работы по сверхпроводящим кабелям

В СССР еще в 70-х годах начались работы по созданию кабелей на низкотемпературных сверхпроводниках с активным участием ОАО «ВНИИКП» (рис. 2). Однако из-за сложности с охлаждением эти проекты не были внедрены. Подобные работы велись также и в США.

После открытия ВТСП работы по сверхпроводящим силовым кабелям возобновились во всем мире. Было создано несколько прототипов длиной от 5 до 30–100 м и затем три крупных кабеля, показанных на рис. 1. С 2005 г. по инициативе ОАО «РАО ЕЭС России» были начаты работы по разработке и внедрению сверхпроводящих силовых кабелей на высокотемпературных сверхпроводниках в России, в том числе и проект по кабельной линии длиной 200 м и мощностью 50 МВА [1, 2].

НАЧАЛО РАБОТ

В созданном под председательством А.Б. Чубайса Координационном совете по сверхпроводящим технологиям при ОАО «РАО ЕЭС России» принимали участие крупнейшие ученые и разработчики из всех ведущих организаций России.

Была утверждена Программа работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости и «дорожная карта» по силовым ВТСП кабелям (рис. 3), проведены НИР:

- по прототипу сверхпроводящего кабеля длиной 5 м,
- по экспериментальному трехфазному силовому ВТСП кабелю 3 × 30 м.

Работы велись по заказам ОАО «РАО ЕЭС России» и ФСК ЕЭС и выполнялись ОАО «ВНИИКП» и ОАО «НТЦ Электроэнергетики». Эти работы создали необходимую базу для успешного выполнения проекта по созданию кабельной линии длиной 200 м. Непосредственно перед началом разработки кабеля длиной 200 м был разработан, создан и испытан первый в России силовой трехфазный ВТСП кабель длиной 30 м (рис. 4). Кабель 3 × 30 м успешно прошел полный цикл испытаний с июня 2008 г. по июнь 2009 г., включая долговременную работу с перегрузкой и испытания на короткое замыкание [3, 4].



Рис. 2. Сверхпроводящий силовой кабель на основе низкотемпературных сверхпроводников, разработанный в 70-х годах прошлого столетия с участием ВНИИКП. Слева – модель кабеля. Справа – кабель в гибком криостате длиной 50 м и током 12500 А

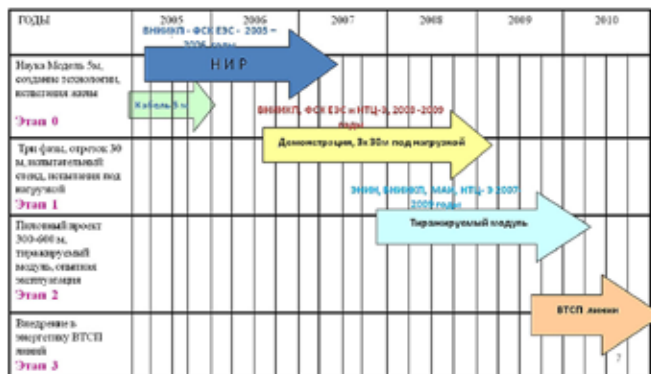


Рис. 3. «Дорожная карта» реализации проекта

Базовые технологии ВТСП кабелей

В ходе выполнения проекта ВТСП силового кабеля 200 м в ОАО «ВНИИКП» был создан комплекс базовых технологий производства силовых ВТСП кабельных линий для распределительных сетей, позволяющий вплотную подойти к промышленному производству ВТСП кабельных линий любой требуемой длины с передаваемой мощностью до 0,5–1 ГВА и напряжением до 110 кВ.

Комплекс технологий изготовления силовых ВТСП кабелей включает в себя:

- методы расчета, оптимизации и конструирования ВТСП кабелей любого типа;
- технологию изготовления центрального несущего элемента – формера;



Рис. 4. Экспериментальный ВТСП силовой кабель, три фазы по 30 м. Токовводы, подсоединенные к кабелю и электрической и криогенной системам (слева), и кабель, установленный на экспериментальном стенде (справа)



Рис. 5. Внешний вид формера. Было изготовлено 660 м формера (центрального несущего элемента)

- технологию укладки повивов кабеля и экрана с предварительно рассчитанными, строго заданными шагами и направлениями скрутки, с сохранением сверхпроводящих свойств исходных лент;
- технологию наложения промежуточных слоев между формером, повивами и изоляцией;
- технологию наложения высоковольтной изоляции;
- технологию наложения защитного экрана;
- технологию сборки кабеля с криостатом;
- технологию изготовления силовых вводов для обеспечения сопряжения ВТСП кабеля с существующей электрической сетью;
- технологию прокладки ВТСП кабельной линии;
- технологию сборки кабеля с токовыми вводами.



Рис. 6. Технологические операции наложения повивов сверхпроводящих лент со строго заданными шагами и направлениями скрутки. Были уложены по два повива на жилы каждой из трех фаз кабеля, а после наложения изоляции и сверхпроводящий экран. Длины фаз ~ 210 м каждая. Укладка велась в строгом соответствии с расчетами



Рис. 7. Технологическая операция наложения изоляции. Изготовленные жилы были упакованы, отправлены в Пермь на завод «Камский кабель». С участием специалистов и использованием оснастки ВНИИКП проведено изолирование всех фаз кабеля

На рис. 5–8 иллюстрируются созданные технологии и ход работ по созданию ВТСП кабеля длиной 200 м.

Сверхпроводящий силовой кабель

ОАО «ВНИИКП» был разработан и изготовлен ВТСП кабель (рис. 9). Кабель представляет собой сложную многослойную конструкцию. Центральный несущий элемент – формер – представляет собой спираль из нержавеющей стали, окруженную пучком проводов из меди и нержавеющей стали, обмотанных медной лентой. Он принимает на себя механические нагрузки и формирует основу для укладки сверхпроводящих повивов. Поверх формера уложены два повива сверхпроводящих лент. От углов укладки, точности выдержанности диаметров повивов по длине кабеля зависит соответствие кабеля заданным характеристикам. Следует заметить, что сверхпроводящая лента не переносит значительных механических нагрузок и изломов, что значи-

тельно усложняет технологические процессы. Поверх повивов накладывается высоковольтная изоляция, для чего кабель был доставлен в город Пермь, за 1500 км от Москвы, на завод «Камский кабель». Наложение сверхпроводящего экрана вновь проводилось на технической базе ОАО «ВНИИКП». Поверх сверхпроводящего экрана уложены повивы гибких медных лент, обмотанных лентой из нержавеющей стали. Каждая жила кабеля затягивается в свой собственный гибкий криостат длиной 200 м, распрямленный на стапеле, снабжается токовыми выводами с высоковольтной заделкой изоляции.

Криогенные токовые вводы

МАИ им. Орджоникидзе и ОАО «ВНИИКП» совместно была разработана конструкция высокоэффективных токовых вводов, которые были изготовлены в мастерских МАИ. ОАО «ВНИИКП» поставило токонесущие элементы, узлы стыковки кабеля и экрана с токовыми вводами и штыковые



Рис. 8. Технологические операции затягивания кабеля в длинномерные криостаты. На полигоне для джекетирувания ВНИИКП в ИФВЭ, г. Протвино, проведено затягивание кабеля в криостаты

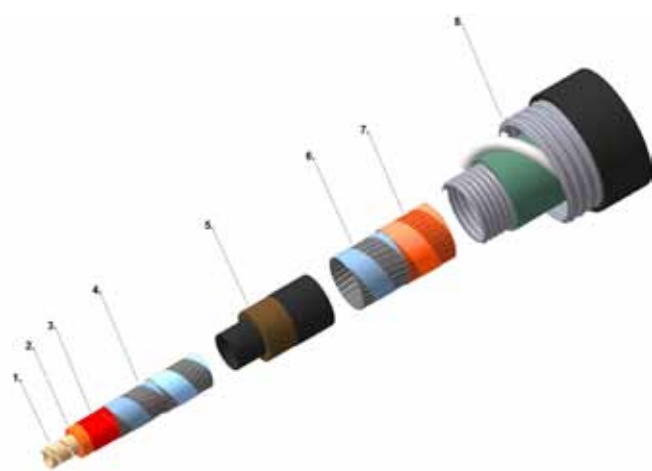


Рис. 9. *Сверхпроводящий силовой кабель: 1, 2, 3 – формер; 4 – повивы ВТСП лент; 5 – изоляция; 6 – сверхпроводящий экран; 7 – защитный медный экран; 8 – гибкий криостат*

Испытания проводились в соответствии с утвержденной программой и методикой, результаты испытания проиллюстрированы на рис. 15–17.

Захолаживание кабельной линии. Требование, заданное в ТЗ – не более 7 суток. Результат испытаний: общее время захолаживания ~ 30 ч ~ 1,25 суток. Захолаживание производилось из азотной емкости, со сбросом в атмосферу газообразного азота. Включение криогенной установки производилось после заполнения системы жидким азотом.

Диапазон рабочих температур. Требование ТЗ – 66–78 К – довольно жесткие и их необходимо поддерживать во всем кабеле. Эти требования обусловлены необходимостью обеспечения циркуляции жидкого азота для поддержания в системе сверхпроводящих свойств и обеспечения свойств высоковольтной изоляции. Для поддержания высоковольтных свойств криогенной кабельной изоляции необходимо поддерживать пропитывающий изоляцию кабеля азот в переохлажденном состоянии под избыточным давлением не менее 2–3 атм. Наличие пузырьков азота приводит к прооям в изоляции и, как следствие, её разруше-

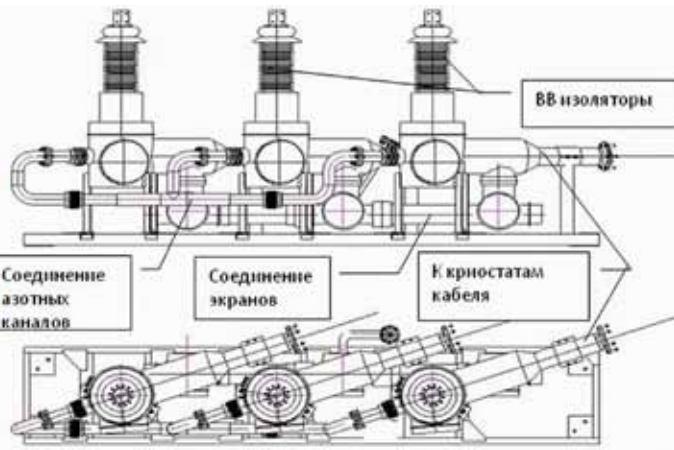
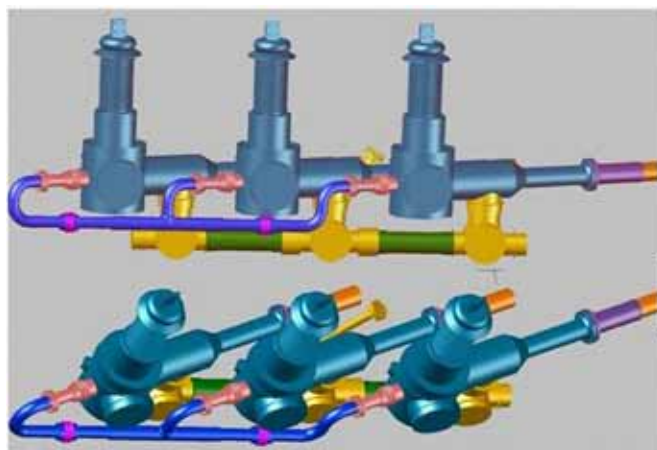


Рис. 10. *Токовые вводы (концевые криогенные муфты)*

разъемы для соединения с криостатами кабеля. Особенность технологии токовых вводов – соединение сверхпроводящих экранов на азотном уровне с использованием сверхпроводящих вставок и высоковольтные изоляторы с отбойниками жидкого азота (рис. 10).

Испытательный полигон

В ходе работ был создан полигон для испытаний сверхпроводящего электроэнергетического оборудования (рис. 11, 12), который позволяет проводить испытания силовых ВТСП кабельных линий напряжением до 110 кВ и токами до 3 кА как под нагрузкой, так и в различных аварийных режимах. Полигон оборудован импортной системой криогенного обеспечения.

Испытания опытного образца кабельной линии

В сентябре 2009 г. криостаты с кабелем были доставлены на полигон в ОАО «НТЦ Электроэнергетики» и разложены по территории полигона (рис. 13). Специалистами ОАО «ВНИИКП» и МАИ был произведен монтаж кабеля с токовыми вводами и криогенной системой. Кабельная линия была полностью подготовлена к испытаниям (рис. 14).

нию. Данный диапазон температур – это область состояния жидкой фазы азота. Из-за потерь при гидродинамиче-



Рис. 11. *Криогенная система полигона*



Рис. 12. Трехфазная нагрузка на полигоне

ском сопротивлении, теплопритоков, выделения джоулева тепла на омических участках температура по кабельной линии колеблется на 4–7 градусов.

Критический ток линии. Требование – не менее 4 кА при 66 К. Измерения критического тока линии производились

на образце «свидетеле» на испытательном стенде ОАО «ВНИИКП» [3]. При проведении испытаний 200-метровой кабельной линии необходимо было обеспечить сохранность высоковольтной изоляции и защиту измерительного оборудования от высокого напряжения, что практически исключает возможность проведения целого ряда тестов. Для получения необходимых данных проводились испытания образца «свидетеля». От сверхпроводящего кабеля в процессе изготовления был отсечен отрезок длиной 5 метров, оснащен набором датчиков, токовыми вводами и помещен в криостат. Результат испытаний: по образцу «свидетелю» – 4,5 кА при 77,4 К; по длинномерной линии – не менее 5,2 кА при 74 К, что соответствует не менее ~ 7,7 кА при 66 К. Дополнительно с измерением критического тока кабеля на образце «свидетеле» получены данные по распределению токов по повивам, контактные сопротивления, определен уровень собственных потерь сверхпроводящей линии на переменном токе, определены параметры сверхпроводящего экрана.

Проверка величины передаваемой мощности кабельной линии. Требование – 50±5 МВА. Кабельная линия была поставлена под нагрузку при напряжении 20 кВ. В течение 24 ч без проблем передавалась мощность порядка 50±5 МВА.

Проверка величины потерь кабельной линии. Данный критерий является одним из определяющих при оценке рентабельности кабельных линий. При отсутствии омических потерь при передаче тока в кабельной линии присутствуют теплопритоки через токовводы и криостаты, к тому же при переменном токе в сверхпроводящих жилах и изоляции кабеля наличествуют потери, вызванные переменным характером электромагнитных полей. По результатам измерения потерь в собственно сверхпроводящих лентах на образце «свидетеля» была получена величина потеря не более 1 Вт/м при токе 1500 А. Общие потери в длинномерном кабеле с учетом теплопритока в криостате составили около 3 Вт/м при том же токе. А полные потери во всей линии вместе с токовыми вводами не превысили 3500 Вт. Криогенная установка успешно поддерживала



Рис. 13. Три фазы кабеля в криостате на территории испытательного полигона

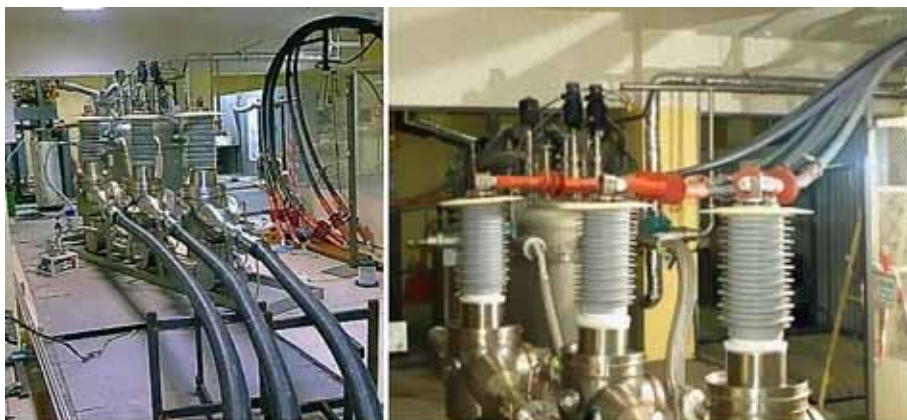


Рис. 14. Кабельная линия, подсоединенная к электрической и криогенной системам полигона

мочные испытания и готова к установке для опытной эксплуатации в энергосеть г. Москвы.

В настоящее время проводится работа по подготовке кабельной линии к новой серии испытаний для определения свойств кабеля в аварийных режимах и определения характеристик линии в ходе выполнения ресурсных испытаний.

Результаты выполнения проекта

Созданный опытный образец силовой ВТСП кабельной линии является по своим параметрам (длина и передаваемая мощность) крупнейшим силовым сверхпроводящим кабелем в Европе и третьим-четвертым в мире.

Разработана технология создания энергосберегающих, эффективных и экологически чистых сверхпроводящих кабельных линий.

Области и масштабы использования полученных результатов:

- Базовая технология производства силовых ВТСП кабельных линий для распределительных сетей позволяет выпускать промышленным способом ВТСП кабельные линии любой требуемой длины с передаваемой мощностью до 0,5–1 ГВА и напряжением до 110 кВ. Планируется в ближайшие 4–5 лет создание более масштабных энергосетевых объектов как по протяженности (1,5–2 км) так и по передаваемой мощности (110 МВА).
- Опытный образец силовой ВТСП кабельной линии длиной 200 м на напряжение 20 кВ и мощностью 50/70 МВА запланировано в дальнейшем использовать для опытно-промышленной эксплуатации в энергосети г. Москвы на подстанции ПС № 798 «Динамо» согласно принятому совместному решению ОАО «Федеральная сетевая компания ЕЭС» и ОАО «Московская объединенная электросетевая компания».

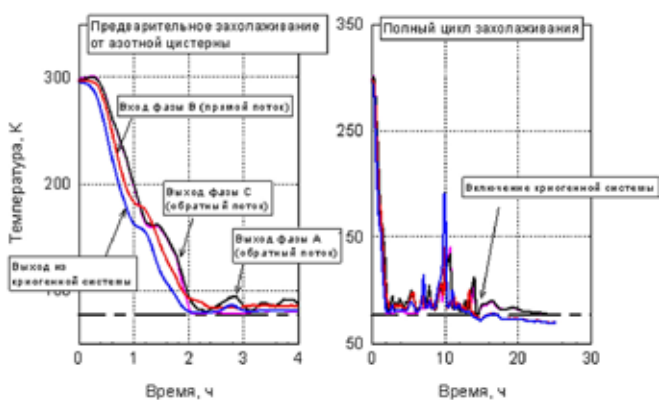


Рис. 15. Захлаживание кабельной линии

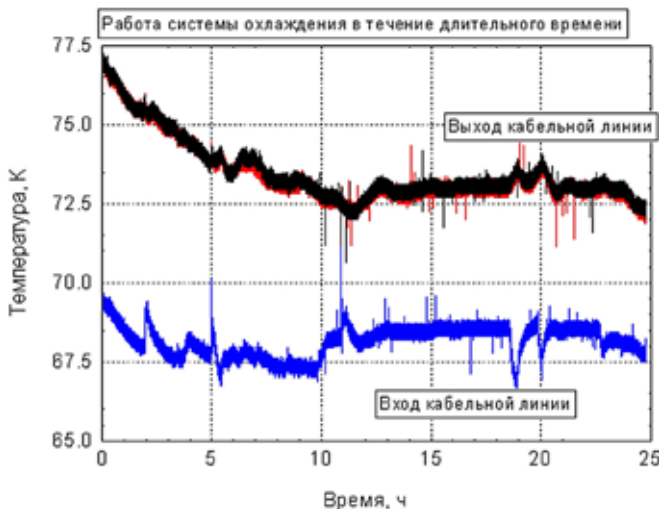


Рис. 16. Диапазон рабочих температур кабельной линии

состояние кабельной линии на всех режимах работы, что подтверждает соответствие кабельной линии заявленным требованиям.

В результате проведенных испытаний было подтверждено соответствие всех параметров кабельной линии значениям, заданным в техническом задании на работу. Сверхпроводящая кабельная линии на основе высокотемпературных сверхпроводников успешно выдержала прие-

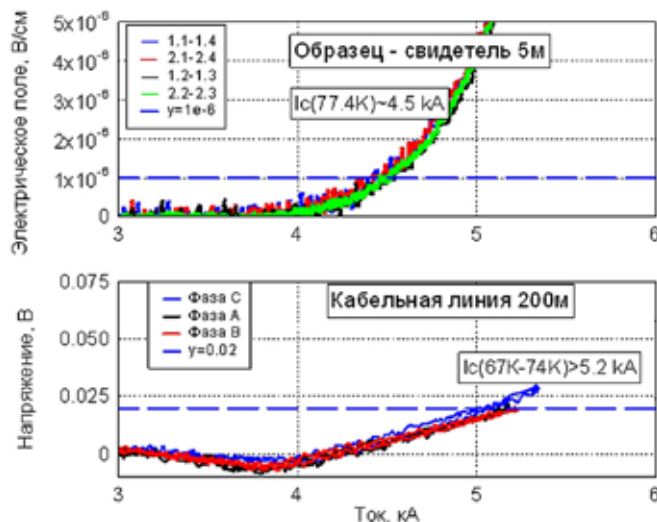


Рис. 17. Испытания критического тока кабельной линии (на постоянном токе) – приведены вольтамперные характеристики образца «свидетеля» и длиномерной кабельной линии

ВЫВОДЫ

В результате выполнения НИОКР по разработкам силовых сверхпроводящих кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников Россия вышла на передовые позиции в мире. Накоплен многогранный опыт, создан и отработан ряд передовых технологий по изготовлению сверхпроводящих кабельных линий и сопутствующих криогенных устройств.

Литература

1. Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Rychagov A.V., Polyakova N.V., Radchenko I.P., Shutov K.A., Lobanov E.A., Fetisov S.S. The 5m HTS

Power Cable Development and Test, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol. 17, N 2, p.1684–1687, 2007 (Paper 3LG07 presented at ASC-2006, Seattle, USA, August 2006).
 2. Сытников В.Е., Высоцкий В.С., Севалов Г.Г. Сверхпроводящие кабельные изделия на пути внедрения в электротехнику и электроэнергетику – Кабели и провода, № 5 (306), 36–48, 2007.
 3. Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Fetisov S.S., Nosov A.A., Shakaryan Yu.G., Kochkin V.I., Kiselev A.N., Terentyev Yu.A., Patrikeev V.M., Zubko V.V. Cryogenic and Electrical Tests Results of 30 M HTS Power Cable, (Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC 2009, Vol. 55).
 4. Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Rychagov A.V., Polyakova N.V., Radchenko I.P., Shutov K.A., Fetisov S.S., Nosov A.A. and Zubko V.V. 30 m HTS Power Cable Development and Witness Sample Test, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, N 3, 2009 p. 1702–1705.



Из журнала
«Wire & Cable Technology International», май 2010

Венкат Сельваманикам (Venkat Selvamaniakam), директор центра прикладных исследований, отделение механики университета, Хьюстон, США

Диапазон областей применения высокотемпературных сверхпроводников достаточно широк: от современного медицинского оборудования, такого как, например, диагностические магнитно-резонансные томографы, до проектов замены существующих проводов с медными жилами сверхпроводящими кабелями с целью повышения надежности систем передачи и распределения электроэнергии и сокращения затрат на их эксплуатацию. Их можно использовать в конструкциях накопителей, электродвигателей, генераторов, систем сотовой связи и поездов на магнитной подушке.

Высокотемпературная сверхпроводимость обладает высокими потенциальными возможностями и способна произвести революцию в области использования электроэнер-

гии аналогично тому, как волоконно-оптическая технология произвела революцию в области связи. Результаты наших исследований могут быть немедленно применены на практике – это не то, что может стать полезным лет через 10.

Применение высокотемпературных сверхпроводников также благотворно скажется на окружающей среде, в том числе и в будущем. Предполагается, что 131 млн т углекислого газа не будет выпущен в атмосферу благодаря использованию высокотемпературных сверхпроводников. Применение этой технологии могло бы также сократить выбросы, эквивалентные выбросам 40 стандартных электростанций.

Проработав почти 25 лет в области сверхпроводимости, я все еще считаю эту технологию магическим явлением.

Фактически отсутствует теория, объясняющая, почему эти материалы обладают сверхпроводимостью. И существуют материалы, которые способны стать сверхпроводящими при комнатной температуре, а мы даже не знаем о них пока.

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на II полугодие 2010 года (3 номера), в рублях с учетом НДС:

- для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1062 руб.,
- для учебных заведений и студентов – 390 руб.,
- для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1170 руб.,
- для подписчиков других зарубежных стран – 33 у.е.

По вопросам подписки обращайтесь
 к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу:
 ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;
 КПП 772201001;
 ОКОНХ 87100
 р/с: 40702810238120102932
 в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва
 «Сбербанк России ОАО», г. Москва,
 к/с: 30101810400000000225
 БИК 044525225; ОКПО 18711078.

Подписной индекс
 в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**