

# ОПЫТ РАЗРАБОТОК «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС» НА ПУТИ ВНЕДРЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

АВТОРЫ:

В.Е. СЫТНИКОВ, Д.Т.Н.,  
А.В. КАЩЕЕВ,  
М.В. ДУБИНИН,  
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

**И**спользование сверхпроводящих кабельных линий в электрических сетях позволит существенно повысить их эксплуатационные характеристики. Сети, использующие подобные устройства, имеют существенные

преимущества, такие как снижение потерь энергии, увеличение удельной мощности передачи, высокая надежность, экологическая чистота и пожарная безопасность. В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения таких сетей в реальную электроэнергетику.

**Ключевые слова:** сверхпроводящий кабель; токоограничивающее устройство; испытательный полигон; система криогенного обеспечения; мощность; потери энергии.



Структура высокотемпературного сверхпроводящего кабеля постоянного тока

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность выработки и транспортировки электроэнергии к потребителю, повышение качества поставляемой энергии становятся приоритетными направлениями в развитии электроэнергетики в XXI в. Одновременно повышаются требования к экологическим и ресурсосберегающим параметрам на всех этапах производства и распределения электроэнергии. Удовлетворить растущие требования можно только с использованием наиболее передовых и продвинутых технологий, в том числе сверхпроводниковых. Интерес к таким разработкам особенно усилился в последние годы в связи с открытием так называемых высокотемпературных сверхпроводников, работоспособных при охлаждении дешевым и легкодоступным жидким азотом. Кроме того, охлаждение до температуры жидкого азота требует на порядки меньших энергетических затрат, чем охлаждение жидким гелием, что снижает издержки.

Во всем мире ведутся активные исследования и разработки различных типов электротехнических устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников: трансформаторов, моторов и генераторов, токоограничителей и силовых кабелей. При этом силовые сверхпроводящие кабели и токоограничивающие устройства представляют собой наиболее разработанный и продвинутый способ применения сверхпроводимости в электроэнергетике в настоящее время.

## КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Реальные работы в сфере сверхпроводящих устройств для электроэнергетики после открытия сильноточного интерметаллического соединения  $Nb_3Sn$  [1] были начаты с попыток

## ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

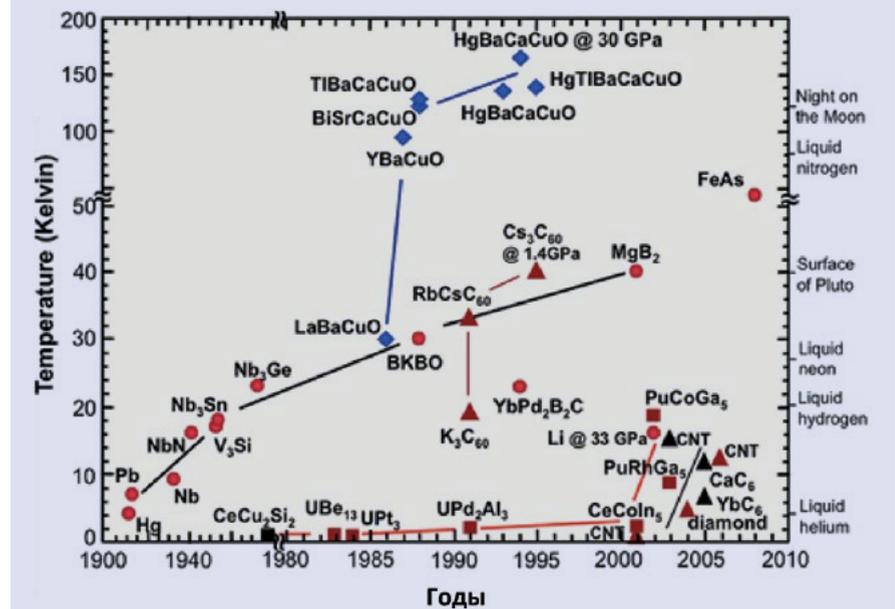


Рис. 1

## ТРЕБУЕМЫЕ ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ 1 Вт ХОЛОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

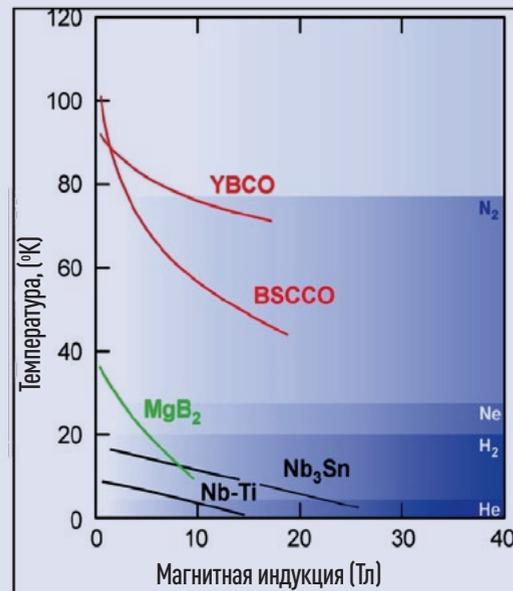
Криогенная температура, °K	Необходимая мощность при комнатной температуре, Вт
200	2
150	4
100	8
77	12
30	80
4	200

Таблица 1

создания силовых сверхпроводящих кабелей (СПК). Это была эра низкотемпературной сверхпроводимости, т.е. рабочие температуры сверхпроводящих материалов не превышали

10 °K, и хладагентом мог служить только жидкий гелий (рис. 1). Сверхпроводящий кабельный бум во многих развитых странах продолжался около 20 лет, до 1985 г. В России над со-

## ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ВТСП-МАТЕРИАЛАХ



зданием СПК трудились в ЭНИН, ВЭИ и ВНИИКП примерно с 1970 г. В мире было произведено и испытано множество образцов и моделей СПК длиной от 1 до 115 м. За рубежом наиболее последовательно этой темой занимались в Брукхэйвской национальной лаборатории в США (БНЛ) [2]. В БНЛ изготовлен стенд и испытана 115-метровая трехфазная кабельная линия (КЛ). Испытания подтвердили отличные характеристики СПК. Однако высокие стоимости сверхпроводника и жидкого гелия, а также криогенно-вакуумного оборудования подняли уровень экономической целесообразности замены традиционных кабелей на СПК до 5–10 ГВА на цепь. Кроме того, для поддержания низких рабочих температур на уровне 4–6 °К необходимы значительные затраты энергии на входе криогенной системы (табл. 1) [3]. В силу этого низкотемпературные

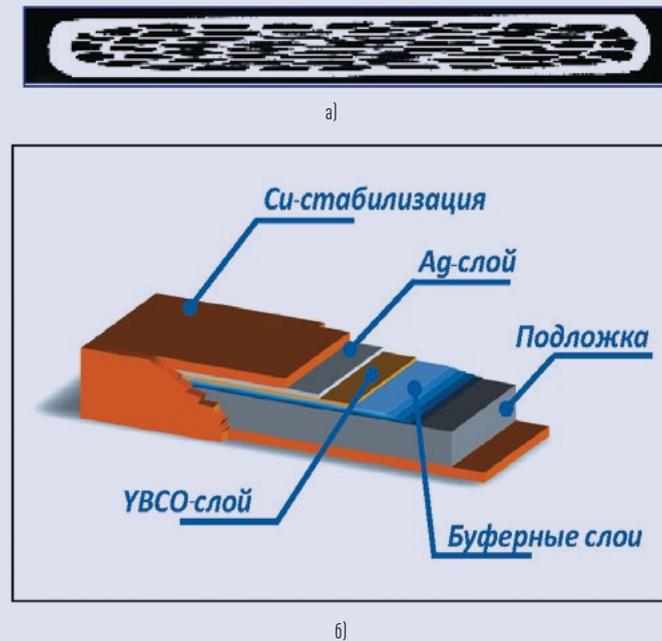
СПК не были востребованы и работы над ними были свернуты во всем мире.

Открытие высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов в 1986 г. [4] обеспечило новые возможности для разработчиков сверхпроводящих электротехнических и электроэнергетических устройств [5]. Использование для охлаждения дешевого и доступного жидкого азота вместо дорогостоящего гелия позволило проектировать перспективные сверхпроводящие устройства. Кроме того, охлаждение до температуры жидкого азота требует на порядки меньших энергетических затрат (см. табл. 1). Однако только через полтора десятка лет были разработаны ВТСП-материалы, пригодные для изготовления электротехнических устройств.

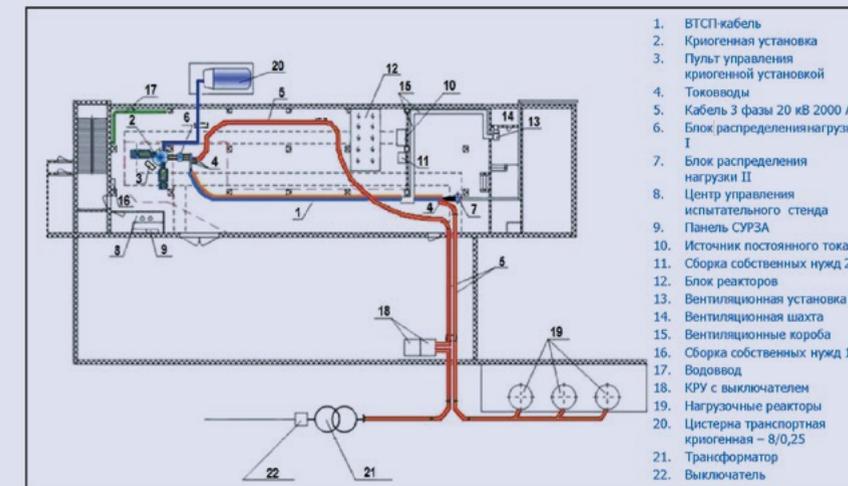
Практическое значение при создании ВТСП-устройств, охлаждаемых жидким азотом, сегодня имеют керамические соединения на основе висмута (Bi, Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (сокращенно BSCCO, с критической температурой 105–120 °К) и иттрия YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO, с критической температурой 90–92 °К) (рис. 2). ВТСП-материалы промышленно выпускаются в основном в виде лент шириной 3–12 мм с критической плотностью тока 30–50 А на 1 мм ширины ленты. Проводники первого поколения на основе висмута производятся по металлургической технологии (рис. 3а), а проводники второго поколения на основе иттрия — по тонкопленочной технологии (рис. 3б).

Для увеличения токонесущей способности исходные ленты должны быть объединены в различные комбинации. Для создания сильноточных

## СТРУКТУРА ВТСП-ЛЕНТ ПЕРВОГО (А) И ВТОРОГО (Б) ПОКОЛЕНИЯ



## КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА КРИОГЕННОГО ПОЛИГОНА



Примечание. Холодопроизводительность одного криокулера составляет до 3,4 кВт на уровне 77 °К. СКО обеспечивает поток переохлажденного азота до 100 л/мин при температурах до 66 °К. Минимальное давление на входе системы равно 2 атм, максимальное давление на выходе системы — 6 атм.

Рис. 4

проводников требуется параллельное объединение нескольких десятков-сотен исходных сверхпроводящих лент, при этом необходимо обеспечить их равномерную загрузку током, принимая во внимание тот факт, что ленты не имеют омического сопротивления. Кроме того, необходимо учитывать чрезвычайную хрупкость ВТСП-материалов, которая накладывает существенные ограничения на технологию изготовления и прокладки сверхпроводящих кабелей. Все это потребовало разработки специальных методов конструирования сверхпроводящих кабелей [6].

Еще одна волна исследований в России в сфере сверхпроводящих устройств для электроэнергетики началась в 2004 г. по инициативе РАО «ЕЭС России» и ОАО «ФСК ЕЭС» (ныне «Россети ФСК ЕЭС»). Была утверждена Программа работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости и дорожная карта по силовым ВТСП-

кабелям. С этого момента ОАО «НТЦ электроэнергетики», ныне «НТЦ Россети ФСК ЕЭС», принимает активное участие в данных работах.

В период с 2004 по 2010 г. основной задачей «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» было создание криогенного полигона для испытаний ВТСП-устройств и их проведение. На полигоне были проведены успешные испытания 30-метровой и 200-метровой ВТСП КЛ, разработанных в рамках проекта, возглавляемого ЭНИН им. Г.М. Кржижановского [7, 8]. После успешных испытаний в 2010 г. было принято решение о расширении спектра задач организации, а именно о начале собственных разработок сверхпроводящих устройств. При поддержке «Россети ФСК ЕЭС» был инициирован проект по комплексной разработке ВТСП КЛ постоянного тока для энергосистемы Санкт-Петербурга.

«НТЦ Россети ФСК ЕЭС» принимало участие в проекте «Сверхпроводниковая индустрия» ГК «Росатом».

В рамках проекта был изготовлен стенд для испытаний сверхпроводящих устройств на устойчивость к токам короткого замыкания вплоть до токов 70–80 кА. Создание этого стенда обеспечило участие «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» в разработке сверхпроводящих токоограничивающих устройств, проводимой компаниями «СуперОкс» и ОИВТ РАН.

Основной вклад в развитие данного направления в ОАО «НТЦ электроэнергетики» внесли Ю.Г. Шакарян, В.В. Дорофеев, В.Е. Сытников, П.Ю. Корсунов, Т.В. Рябин, А.В. Ка-

Рис. 5  
Криогенная система полигонаРис. 6  
Трехфазная индуктивная нагрузка

щев, М.В. Дубинин, С.Ф. Осетров, А.Н. Киселев, В.Н. Карпов и другие сотрудники.

## КРИОГЕННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН

На базе существующего испытательного центра был создан уникальный полигон для испытаний сверхпроводникового электроэнергетического оборудования, который позволяет проводить испытания силовых ВТСП КЛ напряжением до 110 кВ и токами до 4 кА под нагрузкой и при различных аварийных режимах (рис. 4–6).

На полигоне установлены реакторы, которые служат индуктивной нагрузкой и позволяют испытывать электротехнические устройства с полной нагрузкой, т. е. при одновременном приложении номинальных значений тока и напряжения, что делает его уникальным в ряду аналогичных

испытательных центров мира. Полигон был дооснащен источником питания постоянного тока на 6 кА. Схема полигона представлена на рис. 4.

Система криогенного обеспечения (СКО) полигона поставлена компанией «Стирлинг» (Нидерланды). Стандартный блок типа LPC4 был адаптирован под нужды полигона. Блок позволяет использовать два криокулера одновременно.

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

## КРАТКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ ВТСП-УСТРОЙСТВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРОВЕДЕННЫХ В «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Основное внимание при проведении исследований уделялось разработкам в области создания ВТСП КЛ для передачи энергии. Это было обусловлено очевидными преимуществами таких линий по сравнению с традиционными. Кроме того, из всех разрабатываемых к моменту начала работ ВТСП-устройств только КЛ могли обеспечить диапазон мощностей порядка десятков и сотен мегаватт, что представляло непосредственный интерес для «Россети ФСК ЕЭС». В токопроводящих элементах таких кабелей используются сверх-

проводящие материалы, которые при охлаждении ниже критической температуры имеют нулевое омическое сопротивление прохождению электрического тока. При этом максимальная рабочая плотность тока в этих материалах на два–три порядка превосходит соответствующую величину в меди и алюминии. Использование подобных материалов в конструкции кабеля обуславливает возникновение следующих их особенностей:

- высокая эффективность в связи с малыми потерями энергии в сверхпроводнике;
- возможность замены существующего кабеля на кабель с большей передаваемой мощностью при тех же габаритах;
- легкий вес за счет меньшего количества используемого материала;
- увеличение «жизненного цикла» кабеля в результате замедления процессов старения изоляции;
- низкий импеданс и большая критическая длина;
- отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния, экологическая чистота и пожаробезопасность;
- возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении.

ВТСП КЛ постоянного и переменного токов являются инновационной разработкой, позволяющей решить значительную часть проблем электрических сетей, где возможно создание схемы с применением обеих разновидностей ВТСП КЛ, которые имеют свои предпочтительные области применения. В конечном счете выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

## ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХ 200-МЕТРОВЫХ ФАЗ КАБЕЛЯ

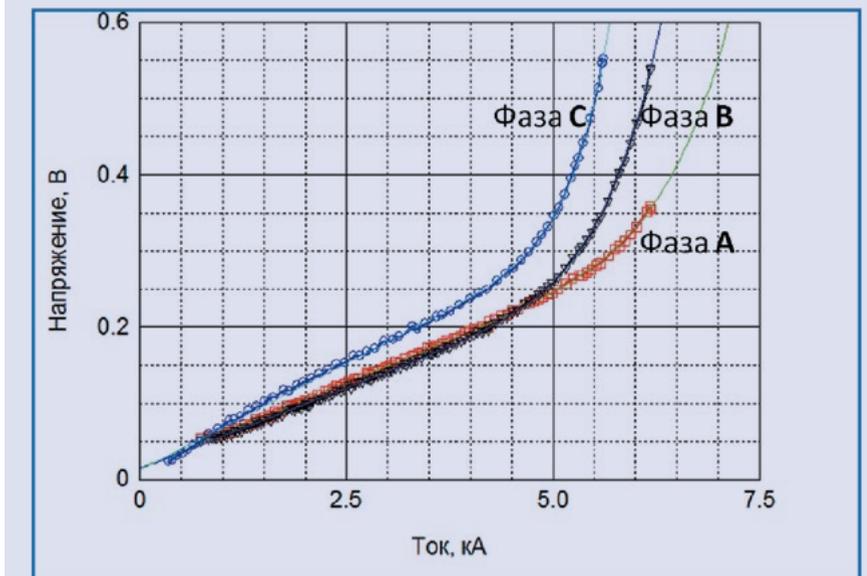
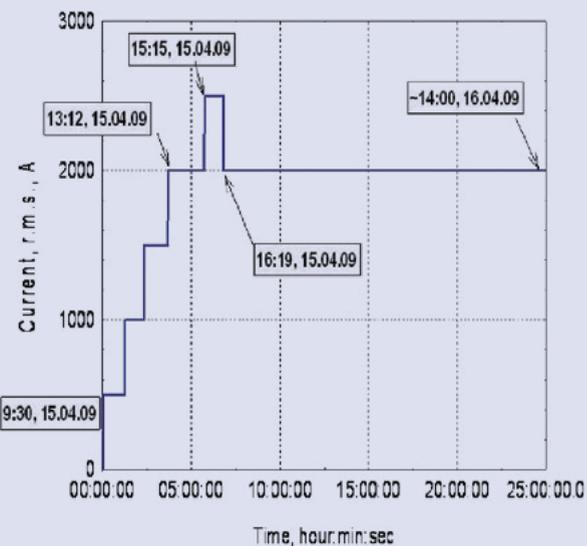


Рис. 8

## ОБЩИЙ ВИД ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ (А) И РЕЗУЛЬТАТЫ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ 20 КВ (Б)



а)



б)

Рис. 7

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Передаваемая мощность	50 МВт	Тип преобразователей	12-пульсный
Номинальное напряжение	20 кВ	Возможность реверса	Предусмотрена
Номинальный ток	2500 А	Холодопроизводительность криогенной установки	12 кВт, 70 °К
Рабочая температура	66–80 °К	Давление жидкого азота	До 1,4 МПа
Длина	2500 м	Расход жидкого азота	0,1–0,6 кг/с

Таблица 2

## ИСПЫТАНИЯ РОССИЙСКОЙ ВТСП КЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В России была разработана демонстрационная КЛ переменного тока длиной 200 м на передаваемую мощность 50 МВА. Генеральным подрядчиком по проекту являлось ОАО «ЭНИН

им. Г.М. Кржижановского». Задача АО «НТЦ ФСК ЕЭС» (ныне «НТЦ Россети ФСК ЕЭС») — создание испытательного стенда и проведение испытаний. Подробно содержание и ход работ по этому проекту описаны в статье Э.П. Волкова и соавт. [8], а ниже приведены краткие результаты.

КЛ имеет номинальные параметры 20 кВ, 1500 А с возможностью

## СТРУКТУРА ВТСП-КАБЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Рис. 9

30%-ной перегрузки по току. Это соответствует передаваемой мощности от 50 до 70 МВА. Кабельная система состоит из трех отдельных фаз, размещенных в трех криостатах. Конструкция каждой фазы кабеля включает центральную спираль, медный стабилизатор, два слоя сверхпроводящих лент, выполняющих функцию токопроводящей жилы кабеля, высоковольтную изоляцию, один слой сверхпроводящих лент, выполняющих

функцию экрана, медный защитный слой и гибкий криостат. Коаксиальная конструкция кабеля с двумя ВТСП-проводниками обеспечивает протекание тока в проводнике и экране лишь по сверхпроводящим лентам, что приводит к отсутствию омических потерь энергии в кабеле. Электромагнитное поле таких сверхпроводящих кабелей сосредоточено только внутри сечения самого кабеля. Расчет конструкции кабеля проводился на базе

учета электрических и механических характеристик лент и необходимости обеспечения их равномерной загрузки током. Сечение медных стабилизаторов выбиралось исходя из условия обеспечения допустимого нагрева кабеля при воздействии токов короткого замыкания в течение времени срабатывания релейной защиты. Потери энергии на переменном токе определялись с учетом конструктивных особенностей кабеля, распределения электромагнитного поля между токопроводящей жилой и экраном, соотношения значений рабочего и критического токов.

В ходе работ была изготовлена трехфазная кабельная система длиной 30 м, после успешного испытания которой на стенде «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» была изготовлена штатная 200-метровая ВТСП КЛ. На рис. 7 показан трехфазный кабель во время испытаний.

Результаты испытаний опубликованы в нескольких работах [7–9]. Критический ток фаз кабеля (на постоянном токе) составлял не менее 4500 А при 77 °К и критерии 1 мкВ/см при рабочем токе 1500 А. Вольтамперные характеристики 200-метровых фаз кабеля показаны на рис. 8.

Рис. 10  
Общий вид 860-метровой ВТСП КЛ на полигоне

Начальный наклон кривых соответствует сопротивлению токовых вводов. Ток перегрузки в 2000 А линия успешно выдержала в течение 24 ч (см. рис. 7).

В ходе испытаний было продемонстрировано равномерное распределение токов между двумя повивами лент сверхпроводящей жилы. Линия успешно выдержала высоковольтные испытания напряжением 50 кВ в течение 15 мин.

В результате проведенных испытаний было подтверждено соответствие всех параметров КЛ техническим требованиям, а также приобретен опыт проведения испытаний ВТСП КЛ при постоянном и переменном токах.

РАЗРАБОТКА  
И ИСПЫТАНИЯ ВТСП КЛ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Линия постоянного тока длиной 2500 м на передаваемую мощность 50 МВт соединит две подстанции в Санкт-Петербурге: 330 кВ «Центральная» и 220 кВ «РП-9» [10]. Генеральным подрядчиком по проекту является «НТЦ Россети ФСК ЕЭС», основные соисполнители: ОАО «НТЦ ЕЭС» (вопросы обоснования и интеграции линии в энергосистему Санкт-Петербурга), ОАО «Иркутсккабель» и НИЦ «Курчатовский институт» (разработка и изготовление кабеля и арматуры), Leds Group при научном руководстве «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» (изготовление двух вентильных преобразовательных установок), НПО «Гелиймаш» и НИЦ «Курчатовский институт» (разработка и изготовление криогенной системы) [11]. Испытания разработанных устройств и контроль всех конструктивных решений осуществляет «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» при участии заказчика «Россети ФСК ЕЭС». На всех этапах изготовления оборудования органи-

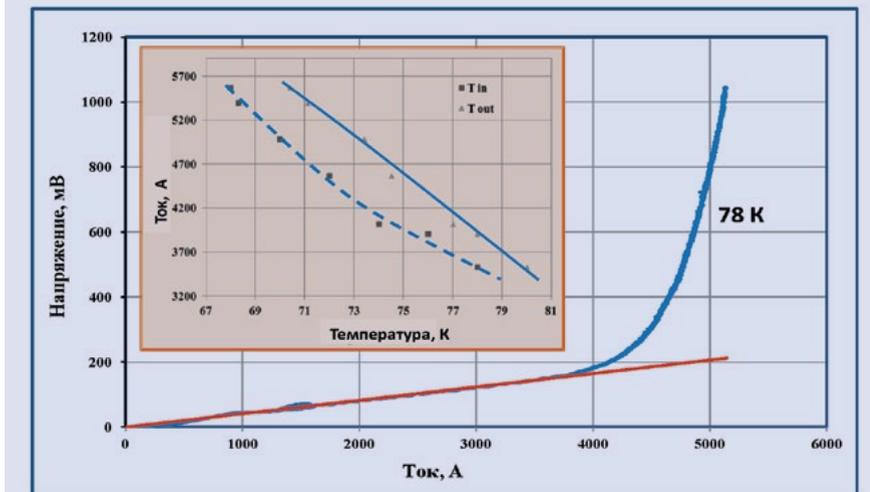
ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА  
860-МЕТРОВОЙ ЛИНИИ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ  
ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ 60-МЕТРОВОЙ ЛИНИИ

Рис. 11

## КРИОГЕННАЯ СХЕМА ВТСП КЛ

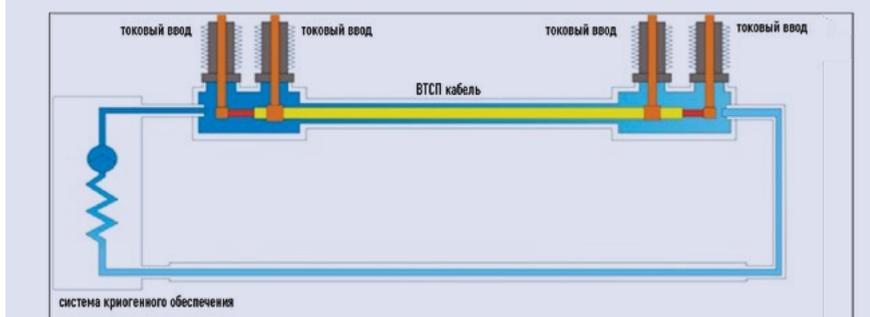
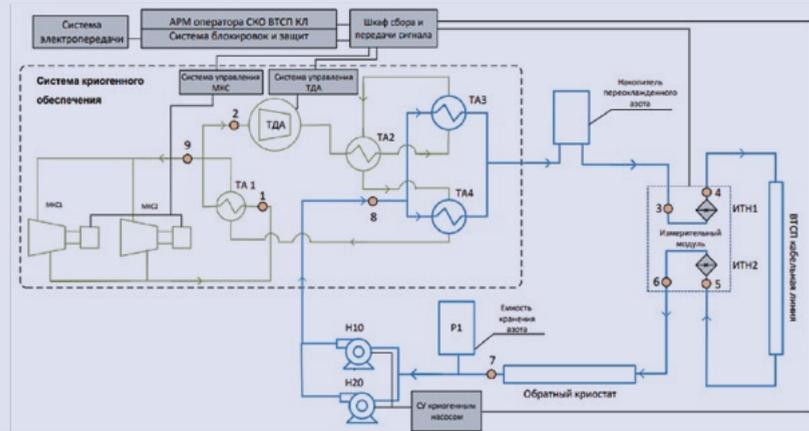


Рис. 12

зована тесная кооперация научных и производственных организаций с целью облегчения процесса дальнейшей передачи разработок в промышленное производство. Проектные параметры линии представлены в табл. 2.

В качестве базовой была выбрана монополярная конструкция с прямым и обратным проводником в одном кабеле (рис. 9). Кабель состоит из концентрических слоев, содержащих следующие элементы: стабилизирующий формообразующий элемент,

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ДВУХКОНТУРНОЙ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ



Обозначения:

1–9 — измерительные точки с датчиками температуры и давления; ТДА — турбодетандерный агрегат; МКС — модульные компрессорные станции; H10 и H20 — криогенные насосные станции (ЦНУ); ТА — теплообменный аппарат; ИТН — имитатор тепловой нагрузки.

Рис. 13

## КЛ ДЛИНОЙ 2,4 КМ С СИСТЕМОЙ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

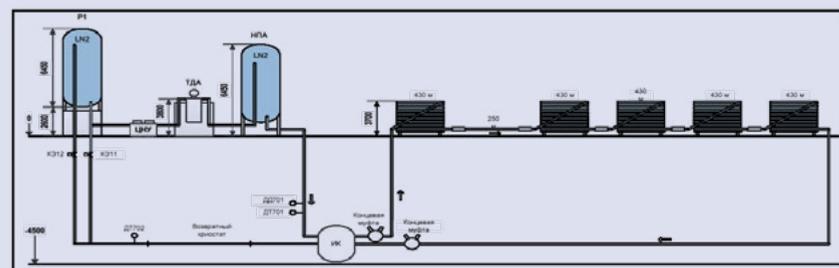


Рис. 14

сверхпроводящий прямой проводник, высоковольтная изоляция, сверхпроводящий обратный проводник, внешний стабилизатор, внешняя (экранная) изоляция, электрический (несверхпроводящий) экран, криостат с защитным покрытием из сшитого полиэтилена [11]. Высоковольтная изоляция между прямым и обратным проводником рассчитана на номи-

нальное напряжение, а экранная изоляция — на 2 кВ. Прямой и обратный проводники изготовлены из ВТСП-лент первого поколения с критическим током 160 и 180 А, а количество лент в проводниках подобрано, исходя из условия обеспечения суммы критических токов лент на уровне 3500 А. Высокое значение критической плотности тока в сверхпровод-

нике позволило разместить прямой и обратный проводники в конструкции одного кабеля, что приводит к локализации магнитного поля внутри сечения обратного проводника кабеля.

Отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния, использование в качестве пропиточного состава жидкого азота делает такие кабели экологически чистыми и существенно снижает требования к условиям прокладки кабельной трассы.

Токовые вводы и соединительные муфты для линии были разработаны и изготовлены в НИЦ «Кутчатовский институт» [12]. Токовый ввод (концевая муфта) служит для соединения ВТСП-кабеля с «теплой» электрической системой и снабжен криогенным интерфейсом для присоединения гибкого криостата с ВТСП-кабелем и для подачи переохлажденного азота.

Первоначально были изготовлены два 30-метровых кабеля, которые собрали в одну 60-метровую линию с двумя токовыми вводами и одной соединительной муфтой. На этой стадии были отработаны конструкции муфт и технология соединения отрезков кабеля. Успешные испытания данной линии и подробное исследование характеристик соединений позволили приступить к изготовлению в заводских условиях штатных длин кабеля.

КЛ была изготовлена на заводе «Иркутсккабель» и состоит из пяти отрезков длиной 430 м и одного меньшего отрезка в соответствии с проектом кабельной трассы. На рис. 10 показана 860-метровая кабельная линия, состоящая из двух штатных отрезков, во время испытаний на полигоне «НТЦ Россети ФСК ЕЭС».

На рис. 11 показана вольтамперная характеристика 860-метровой КЛ и температурная зависимость критического тока, отнесенная к температуре азота на входе и выходе из линии. При изменении температуры от 68 °К

до 80 °К критический ток линии изменялся от 5600 до 3500 А.

Основные результаты испытаний сводятся к следующему:

- Критический ток кабеля равен сумме критических токов исходных ВТСП-лент. Подтверждена надежность разработанных конструкции и технологий.
- Сопротивление соединений стабильно вплоть до 5000 А и не превосходит для токовых вводов 20 мкОм.
- Все кабели успешно прошли испытания высоким напряжением 50 кВ в течение 30 мин.

## КРИОГЕННАЯ СХЕМА ЛИНИИ

Общая схема криогеннопроточной части КЛ показана на рис. 12. Криогенная станция располагается с одной стороны КЛ. Жидкий азот прокачивается по криостату с ВТСП-кабелем и возвращается по обратному криостату меньшего диаметра. Общая длина петли прокачки составляет 5 км.

Принцип работы СКО заключается в переохлаждении жидкого азота путем теплообмена с холодным газообразным гелием после прохождения азота через КЛ и соответствующего нагрева.

Система криогенного обеспечения замкнутого типа выполнена по двухконтурной схеме, показанной на рис. 13. Контур охлаждения включает ВТСП-кабель в криостате, циркуляционный насос, теплообменник и емкость с переохлажденным азотом. Газовый (гелиевый) контур переохлаждения состоит из теплообменников, компрессора и детандера. Этот контур обеспечивает понижение температуры азота после его нагрева при прохождении

## ТЕПЛОПРИТОК В ХОЛОДНУЮ ЗОНУ И ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ КАБЕЛЬНОГО КРИОСТАТА

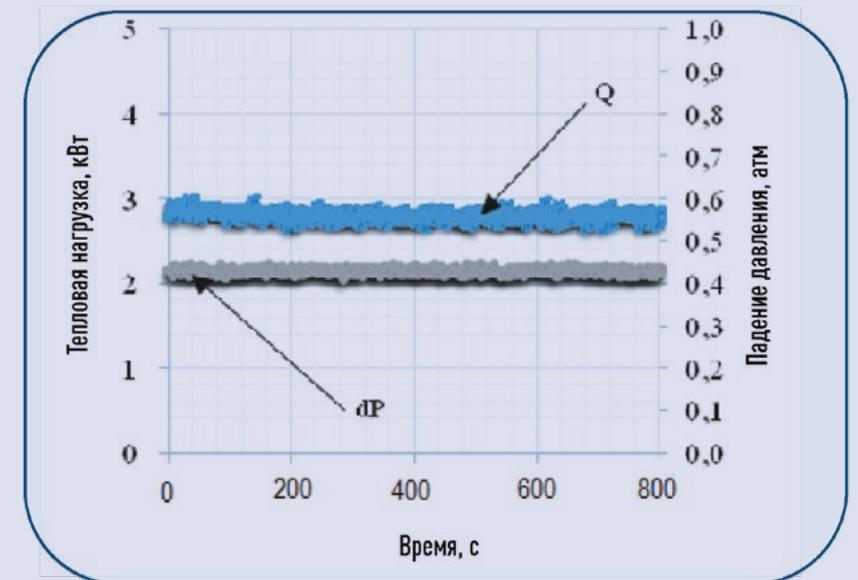


Рис. 15

## ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ В КРИОГЕННОЙ ПЕТЛЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСХОДА ЖИДКОГО АЗОТА

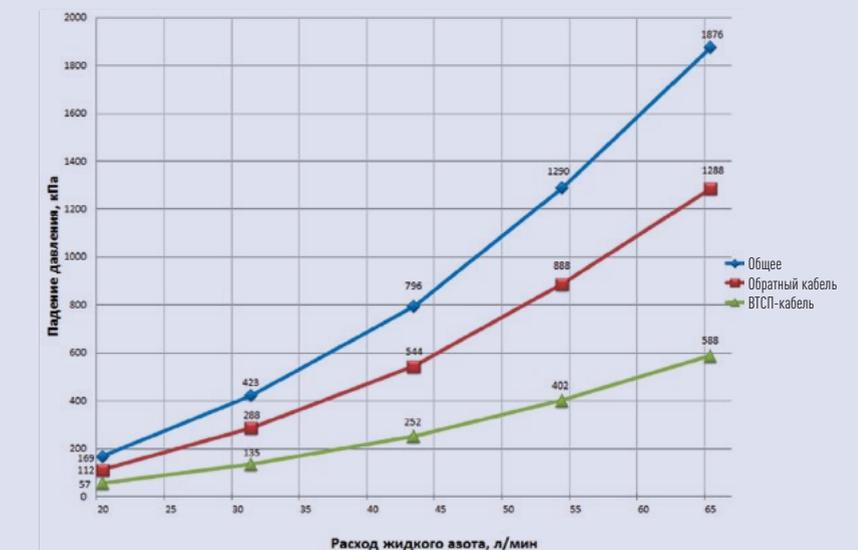


Рис. 16

контур охлаждения. Для повышения надежности системы и предотвращения аварийных ситуаций в криогенной системе предусмотрено дублирование циркуляционного насоса и компрессора, наличие запаса переохлажденного азота и запаса азота в заправочной емкости при атмосферном давлении.

Работа СКО автоматизирована, включая этапы начального охлаждения, поддержания теплового состояния кабеля, сброса жидкого азота из криостата и отогрева, с возможностью переключения на ручное дистанционное управление и включения автономных схем автоматического управления с пультов управления. Система автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП) модульных компрессорных станций (МКС) и криогенной насосной станции (ЦНУ) позволяет автоматически переключать работу криогенной системы на резервную гелиевую модульную компрессорную станцию и резервную криогенную азотную насосную станцию.

Криогенные испытания системы проводились на линиях 860, 1200 м и полной сборке КЛ длиной 2400 м с обратным криостатом (рис. 14).

Главной целью криогенных испытаний были подтверждение охлаждающей способности криогенной системы и оценка гидравлических характеристик криогенного контура. Во время испытаний перепад высот по длине кабеля составил 8,2 м. Датчики температуры и давления были установлены на входе и выходе СКО, прямо и обратном криостатах, как было показано на рис. 13. Два нагревателя были установлены в криогенном контуре для имитации полной тепловой нагрузки в полномасштабном криогенном контуре длиной 5 км. Полученные данные по тепловой нагрузке приведены на рис. 15. Среднее значение тепловой нагрузки в криогенной среде составило 2,82 кВт. Следует иметь в виду, что это количество включает

теплопритоки через криостаты, тоководы и соединительные трубопроводы между СКО и тоководами. В ходе экспериментов СКО показала стабильное значение холодопроизводительности на уровне 12 кВт. Она обеспечивала температуру на выходе из СКО в пределах от 66 °К до 68 °К при расходе азота 20–65 л/мин.

Одной из основных задач экспериментальных исследований является получение данных о величине гидравлического сопротивления гофрированного криостата и оценка достоверности ранее предложенного теоретического расчета перепада давления [13]. Установившиеся условия течения азота в гофрированном криостате соответствуют турбулентному режиму, значение числа Рейнольдса (Re) составляет около 30000.

Для уменьшения влияния внешних факторов при определении величины гидравлического сопротивления была выбрана термостабильная область с постоянным перепадом давления и массовым расходом. В результате эксперимента было получено среднее значение перепада давления, которое составило 0,43 бар для кабеля длиной 860 м. Средний коэффициент трения для внутреннего диаметра гофрированной трубы криостата 64 мм и кабеля 40 мм составил 0,0672. Наличие гофр в кри-

остате увеличивает коэффициент трения, что ограничивает длину КЛ при заданном допустимом перепаде давления. Коэффициент трения жесткой трубы при одинаковом гидравлическом диаметре равен 0,02405. Коэффициент корреляции для гофрированной трубы с коэффициентом для жесткой трубы в нашем случае равен 2,74 [14, 15].

Для определения зависимости перепада давления от расхода была проведена серия экспериментов.

На рис. 16 показаны экспериментальные результаты по всей длине криогенного контура. Как ранее предполагалось [13], обратный криостат вносит значительно больший вклад в падение давления вдоль криогенного контура. Из рис. 16 следует, что максимальный расход жидкого азота, не приводящий к превышению допустимого давления, составляет 47 л/мин. Перепад температур при этом расходе по сверхпроводящему кабелю длиной 2,5 км составит 3,0–3,5 °К. Таким образом, ранее выбранный рабочий расход азота 30 л/мин обеспечивает приемлемые рабочие параметры (перепад температур по длине кабеля 4,0–5,0 °К и перепад давления около 4 бар). Этот режим также гарантирует отсутствие газовой фазы при возврате азота в криогенный циркуляционный насос [16].



Рис. 17  
Блоки тиристорных вентилялей БВ ТВ-835/8,27 УХЛ4.2 с реакторами РФ30С-20-2200-0,03 УЗ

## ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИННОМЕРНОГО ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПРОВОДНИКОВ

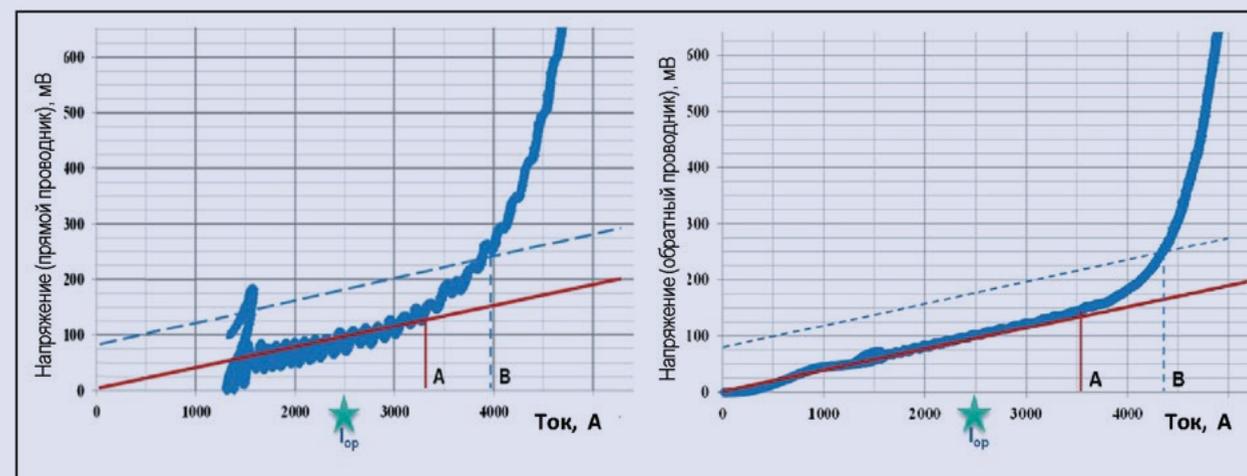


Рис. 18

## КОМПЛЕКСНАЯ ВЕНТИЛЬНАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПОДСТАНЦИЯ

Две комплексные вентиляльные преобразовательные установки (КВПУ), размещаемые по концам линии передачи постоянного тока, связывают ее с сетями переменного напряжения. КВПУ собраны по 12-пульсной схеме и снабжены L-C-фильтрующими цепями и системой управления, релейной защиты и автоматики. КВПУ выполняются по схеме двухмостового 12-пульсного ведомого (коммутируемого) сетью преобразователя. Полюсы постоянного тока двух КВПУ соединяются через сверхпроводящий кабель. Преобразовательные трансформаторы — трехфазные трехобмоточные. На стороне постоянного тока предусмотрены цепи фильтрации сигнала, настроенные на 6-ю и 12-ю гармоники. Проектом предусматривается двухсторонняя передача

энергии, и каждый из КВПУ рассчитывается на работу как в инверторном режиме, так и в режиме выпрямителя. Предусматривается также регулирование передаваемой мощности. Изменения передаваемой мощности сопутствуют изменения реактивной мощности вентиляльных преобразователей. Соответственно предусмотрено регулирование реактивной мощности. Оно осуществляется переключениями фильтро-компенсирующих конденсаторных батарей. На рис. 17 показаны тиристорные блоки в сборе. В заключение были проведены электрические испытания проводников кабеля (рис. 18).

Значения критического тока короткой и длинной (см. рис. 11 и 17) линий абсолютно идентичны, что свидетельствует о высокой надежности разработанной методики конструирования и заводской технологии изготовления ВТСП-кабелей.

Все кабели выдержали высоковольтные испытания выпрямленным напряжением 50 кВ для основной изоляции

и 10 кВ для изоляции экрана в течение 30 мин. Схема прокладки ВТСП линии в Санкт-Петербурге показана на рис. 19.

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СВЕРХ- ПРОВОДЯЩИХ КЛ

В линиях переменного тока среднего напряжения потери электрической энергии имеют место в самом кабеле, электрической изоляции и токовых вводах. В линии постоянного тока потери энергии в кабеле и изоляции отсутствуют, однако они есть в преобразовательных устройствах, токовых вводах. Кроме того, криогенная система потребляет электроэнергию для компенсации всех теплопритоков в «холодную» зону и для прокачки хладагента по всей трассе.

Для трехфазной линии переменного тока среднего напряжения на передаваемую мощность 100 МВА потери

энергии на фазу складываются из следующих величин: электромагнитные потери в жиле кабеля 1,0–1,5 Вт/м, теплопритоки через криостат 1,5 Вт/м, теплопритоки через токовые вводы (200–300 Вт) × 2. Потери энергии в изоляции равны примерно 0,1 Вт/м. Тогда общие теплопритоки в «холодную» зону при длине трехфазной линии 10 км составят 78,5–93,5 кВт. Умножая эту величину на типичное значение коэффициента рефрижирации, равное 20, получим 1,57–1,87 МВА, или менее 2% передаваемой мощности.

Для аналогичной линии постоянного тока теплоприток в «холодную» зону ограничивается только теплопритоками через криостат и токовводы. Тогда общие потери энергии в кабеле длиной 10 км с учетом криогенной системы составят 0,31 МВА, или 0,31% передаваемой мощности. Для оценки общих потерь в линии постоянного тока следует прибавить потери в преобразователях — 2% передаваемой мощности. Итоговые потери в ВТСП-линии постоянного тока длиной 10 км мощностью 100 МВт оцениваются величиной, равной не более 2,5% передаваемой мощности.

Приведенные оценки показывают, что потери энергии в ВТСП КЛ существенно меньше, чем в традиционных КЛ. При увеличении передаваемой мощности доля потерь энергии снижается. При сегодняшнем уровне характеристик материалов возможна передача 100–300 МВт энергии при напряжении 20 кВ и до 1000–1500 МВт при 110 кВ.

## УЧАСТИЕ «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС» В РАБОТАХ ПО СОЗДАНИЮ ВТСП ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

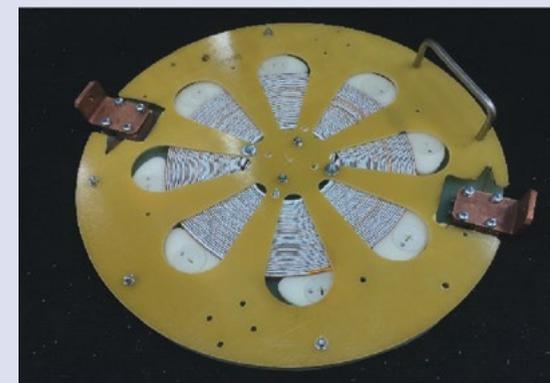
ВТСП токоограничивающие устройства (ТОУ) предназначены для снижения уровней аварийных токов, например токов короткого замыкания. Применение таких устройств позволяет снизить последствия от аварий, одновременно повышая качество электроснабжения в электроэнергетике, промышленности и электротранспортной

инфраструктуре. Подобные устройства не имеют аналогов по быстродействию, надежности и занимаемой площади.

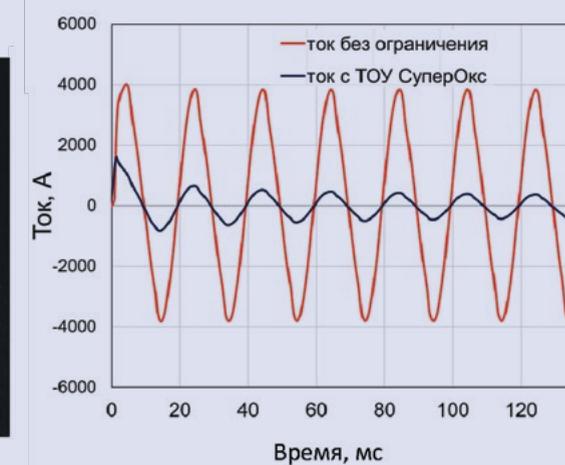
В основе действия этих устройств лежит свойство сверхпроводника переходить из состояния с нулевым сопротивлением в состояние с конечной проводимостью при превышении некоторого порогового значения тока. Переключение не требует внешнего воздействия и происходит при превышении критического значения тока, уровень которого задается конструкцией ТОУ. С электротехнической точки зрения ВТСП ТОУ позволяют решить две фундаментальные проблемы: обеспечить защиту электрооборудования и/или безопасное объединение энергосистем.

С использованием разработанного в «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» трансформатора для испытаний на токи короткого замыкания с регулированием количества циклов и угла возникновения короткого замыкания были проведены исследования галет ТОУ с бифилярной намоткой ВТСП-лент. Типичный результат показан

## ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ГАЛЕТА С ВТСП-ЛЕНТОЙ (А) И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ (Б)



а)



б)

Рис. 20

на рис. 20. Также были определены граничные условия работы ленты, на основании которых в компании «СуперОкс» спроектировали фазу ТОУ, состоящую из последовательно соединенных галет. В последующем испытательный стенд применялся в режиме контроля изготовленных галет. Трехфазный ВТСП ТОУ был изготовлен и установлен на ПС «Мневники» в Москве (рис. 21) [17].

В настоящее время начаты аналогичные исследования ТОУ со сверхпроводящим размыкателем в ОИВТ РАН.

Проведенные НИОКР и успешные испытания ВТСП КЛ постоянного и переменного токов продемонстрировали высокую эффективность сверхпроводящих линий и подтвердили правильность принятых технических решений. В процессе выполнения работы были организованы научно-производственная кооперация предприятий, технологическая и испытательная базы, обеспечивающие решение подобных и более сложных задач. Отработанные конструкторские и технологические решения могут служить надежной базой при проведении последующих

работ и позволят существенно сократить объем и стоимость новых НИР.

Кардинально новые технические решения обычно с большим трудом внедряются в старые, устоявшиеся инфраструктуры. Одним из основных преимуществ сверхпроводящих КЛ является возможность передачи больших потоков энергии (сотни мегаватт) на распределительном напряжении. Открывающиеся новые возможности целесообразно учитывать и использовать при проектировании или реконструкции сетевых объектов. Например,

## СХЕМА ПРОКЛАДКИ КЛ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ (А) И ЗДАНИЕ КРИОГЕННОЙ СТАНЦИИ И КВПУ НА ПС «ЦЕНТРАЛЬНАЯ» (Б)



а)



б)

Рис. 19

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ РАБОТ В «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС» В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ВТСП-УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ

Рис. 21  
ВТСП ТОУ на ПС  
«Мневники» ОЭК, Москва

при реконструкции/создании энергосистемы Новой Москвы целесообразно было бы предусмотреть создание продольных мощных сверхпроводящих линий, а несколько мощных ПС связать в кольцевую структуру сверхпроводящими линиями постоянного тока на стороне среднего напряжения. Это позволит существенно повысить энергоэффективность сети, уменьшить количество базовых ПС, обеспечить высокую управляемость энергопотоками и в конечном счете увеличить надежность энергоснабжения потребителей. Такая сеть может стать реальным прообразом «умной» сети будущего. Подобные предложения находят поддержку и предусмотрены в плане мероприятий по реализации национального проекта «Разработка и внедрение сверхпроводниковых технологий в топливно-энергетический комплекс Российской Федерации» как в направлении создания ВТСП КЛ постоянного и переменного токов, так и в плане создания ВТСП ТОУ.

Исследование энергосистемы Санкт-Петербурга, проведенное «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» (НИИПТ), показало

целесообразность использования ВТСП КЛ постоянного тока для соединения подстанций в городе с целью повышения надежности снабжения потребителей и управляемости сети (рис. 22).

В Москве также рассматривается возможность использования ВТСП КЛ постоянного и переменного токов в процессе реконструкции ряда ПС. В настоящее время по заказу предприятий ГК «Росатом» в «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» начаты исследования, направленные на создание ВТСП-систем вывода энергии от АЭС и других мощных источников энергии. Изготовлен образец фазы кабеля на 24 кВ и 5 кА. Особенность данной разработки — полностью отечественное производство, тогда как во всех предыдущих проектах сверхпроводник и криостаты закупались за рубежом. В 2021 г. будут проведены испытания кабеля на базе «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» с использованием нашей криогенной системы. В этот проект «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» планирует поставить сверхпроводящую систему вывода мощности, а также совмест-

но с профильными компаниями ГК «Росатом» создать систему криогенного обеспечения системы вывода мощности. Планируется также наше участие в инициативной разработке, проводимой в АО «НИИЭФА» и направленной на создание гибридного токопровода для АЭС, который совмещает в себе все преимущества традиционного и сверхпроводящего решений и способен пройти сертификационные испытания по действующим нормативам. Подобное решение может быть тиражировано и на прочих мощных объектах генерации — ГЭС, ТЭС, солнечных и ветровых электростанциях и др.

Дальнейшее развитие кабельного направления ВТСП-устройств связывают с увеличением передаваемой мощности и длины КЛ [18–20]. В международном плане особое внимание привлекают планы создания Азиатского энергетического суперкольца (Asian energy supergrid). Приказом Минэнерго России Сколковский институт науки и технологий назначен оператором проекта, одной из целей которого является удвоение транспорта энергии из России к 2035 г. Использование новых более мощных ВТСП КЛ позволит повысить роль России и ПАО «Россети» в данном международном проекте. Японские компании ведут в этом плане активные разработки с целью создания в перспективе ВТСП КЛ между островами Сахалин и Хокайдо [21–23]. «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» заключило соглашение о сотрудничестве в данной сфере с университетом Чубу, Япония. В этой области ключевой задачей является увеличение расстояния между криогенными станциями, прокачивающими жидкий азот для охлаждения ВТСП КЛ.

«НТЦ Россети ФСК ЕЭС» планирует продолжить участие в работах компании «СуперОкс» и ОИВТ РАН по созданию резистивных ВТСП ТОУ. Также планируется начало собственных разработок ВТСП ТОУ индуктивного

типа, имеющих определенные преимущества перед резистивными ТОУ.

Кроме того, обсуждается участие «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» в работах по созданию систем электродвижения автономных объектов и специальных проектах ГК «Росатом».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения ВТСП КЛ в реальную электроэнергетику. В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного токов. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения, и в конечном счете выбор обуславливается техническими и экономическими соображениями. По результатам проведенных исследований можно утверждать, что в сегменте передачи большой мощности в условиях мегаполисов появилась новая доступная технология, которая выдерживает конкуренцию с традиционными технологиями, а в ряде случаев превосходит их.

Подводя итоги проделанной в «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» за последние 15 лет работы, можно с уверенностью сказать, что накопленный опыт, созданная материально-техническая база и сформированный коллектив специалистов свидетельствуют о готовности организации решать масштабные и амбициозные задачи на пути внедрения в электросетевой комплекс России новых электротехнических устройств на основе явления сверхпроводимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kunzler J.E., Buehler E., Hsu F.S., Wernick J.H. Superconductivity in Nb Sn at high current density in a magnetic field // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 6. P. 89–97.
2. Forsyth E.B., Thomas R.A. Performance summary of the brookhaven superconducting power transmission

- system // Cryogenics. 1986. Vol. 26. Issue 11. P. 599–614.
3. Ter Brake H.J.M., Wiegerinck G.F.M. Low power cryocooler survey // Cryogenics. 2002. Vol. 42. P. 705–718.
4. Bednorz J.G., Mueller K.A. Possible high temperature superconductivity // Z. Phys. 1986. Vol. B64. P. 189–193.
5. Дорофеев В.В., Черноплеков Н.А., Кейлин В.Е., Волков Э.П., Шакарян Ю.Г., Михайлов А.К., Сытников В.Е., Чубраева Л.И., Новиков Н.Л. Проблемы создания и применения в электрических сетях устройств, использующих явления сверхпроводимости // Электричество. 2005. № 7. С. 22–30.
6. Сытников В.Е. Основы конструирования высокотемпературных сверхпроводящих силовых кабелей // Известия Академии электротехнических наук. 2008. № 1. С. 29–44.
7. 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 test results of 30 m HTS power cable // Adv. Cryog. Eng. 2010. Vol. 55. P. 461.
8. Волков Э.П., Высоцкий В.С., Карпышев А.А., Костюк В.В., Сытников В.Е., Фирсов В.П. Создание первого в России высокотемпературного сверхпроводящего кабеля // Известия Академии наук. Энергетика. 2009. № 4. С. 31–43.
9. Sytnikov V.E., Vysotsky V. S., Rychagov A.V., Polyakova N.V., Radchenko I.P., Shutov K.A., Fetisov S.S., Nosov A.A., Zubko V.V. The 30 m HTS power cable development and test // Proceedings of ICEC-22-ICMC-2008. Korean Institute of Applied Superconductivity. 2009. P. 907–912.
10. Сытников В.Е., Бемерт С.Е., Бердников Р.Н., Фролов О.В., Шакарян Ю.Г., Шершнева Ю.А. Российский проект: сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока для электрических сетей современного мегаполиса // Энергия единой сети. 2012. № 4. С. 24–27.
11. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Ivanov Yu.V., Kopylov S.I., Krivetskiy I.V., Rimorov D.S., Romashov M.S., Shakaryan Y.G., Berdnikov R.N., Demytyev Y.A., Goryushin Yu.A., Timofeev D.G. HTS DC Cable Line Project: On-going Activities in Russia // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013. Vol. 23. No 3. Art. 5401904.
12. Naumov A., Diev D., Anashkin O., Denisov A., Anashkin O., Keilin V., Kovalev V., Lobytsev V., Shcherbakov V., Shutova D., Sytnikov V. Current leads and joints for HTS DC Cable of 2.5 kA 20 kV // Adv. Cryog. Eng. 2014. Vol. 1573. P. 1692.
13. Ivanov Y., Romashov M., Bemert S., Sytnikov V. Choice of flexible cryostat for 2.5 km DC HTS cable

- to be laid in St. Petersburg // Advances in Cryogenic Engineering. Transaction of the CEC. 2014. Vol. 1573. P. 887.
14. Рябин Т.В., Вишневецкий Г.В., Дубинин М.К., Кашеев А.В., Сытников В.Е. Результаты испытаний сверхпроводящей кабельной линии с системой криогенного обеспечения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 1 (52). С. 94–100.
15. Рябин Т.В., Сытников В.Е., Кашеев А.В., Дубинин М.В. Комплексные испытания ВТСП кабельной линии постоянного тока протяженностью 1200 метров // Энергия единой сети. 2019. № 5 (48). С. 30–38.
16. Sytnikov V., Kashcheev A., Dubinin M., Karpov V., Ryabin T. Test Results of the Full-Scale HTS Transmission Cable Line (2.4 Km) for the St. Petersburg Project // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021. Vol. 31. Issue 5. Art. 4201405.
17. Mozykh V., et al. First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter for Application in City Grid // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021. Vol. 31. Issue 5. Art. 5601707.
18. Аксютин О.Е., Ишков А.Г., Грачев В.А., Панцырный В.И., Карлюк Л.А., Абдюханов И.М., Сытников В.Е. Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводников для передачи энергии на большие расстояния // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22 (3). С. 15–21.
19. ASS e.V. / CERN. Long-distance transport of green power: first successful testing of a 20 kA superconducting cable. 2014. Press release.
20. Ballarino A., et al. The BEST PATHS Project on MgB2 Superconducting Cables for Very High-Power Transmission // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26. No 3. Art no. 5401705.
21. Yamaguchi S., Yamada T., Iitsuka T., Sato A., Sawamura T., Sytnikov V. Low voltage and large current DC superconducting power cable designs for 10 km to 100 km transmission line using experimental data of Ishikari project // Journal of Physics: Conf. Series 1293 (2019) 012067 IOP Publishing.
22. Сытников В.Е., Кашеев А.В., Рябин Т.В. Перспективы создания сверхпроводящих кабельных линий для передачи электроэнергии на большие расстояния // Энергия единой сети. 2018. № 1 (36). С. 34–40.
23. Sytnikov V.E., Ryabin T.V., Yamaguchi S., Ivanov Yu. Prospects of using HTSC cable lines for long distances energy transfer // Report on CIGRE Session. 2018. B1-301.

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТСП КЛ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

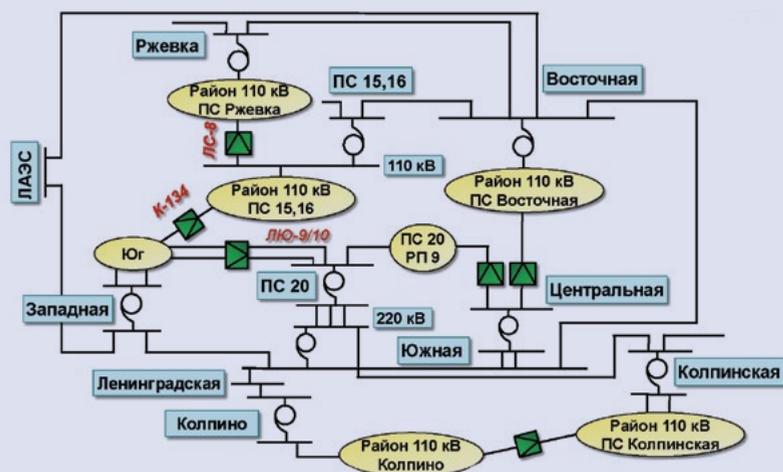


Рис. 22