

# СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В РОССИИ И МИРЕ. КРАТКИЙ ОБЗОР

АВТОР:

В.Е. СЫТНИКОВ,  
Д.Т.Н.,  
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**И**спользование сверхпроводящих кабелей позволяет существенно повысить пропускную способность линии электропередач. Сети, использующие такие кабели, имеют существенные преимущества, такие как снижение потерь, увеличение удельной мощности передачи, экологическая чистота

и пожарная безопасность. Сверхпроводящие линии постоянного тока дополнительно обеспечивают дальнейшее снижение потерь энергии, осуществление функции токоограничения, повышение управляемости и уменьшение мощности криогенного оборудования по сравнению с линиями переменного тока.

**Ключевые слова:** электрические сети; кабели; высокотемпературная сверхпроводимость; постоянный ток; переменный ток; оксидные соединения.



Два отрезка сверхпроводящего кабеля постоянного тока по 430 м каждый во время испытаний на полигоне АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

## ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛАХ, ОБЛАДАЮЩИХ ПРАКТИЧЕСКИМ ЗНАЧЕНИЕМ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

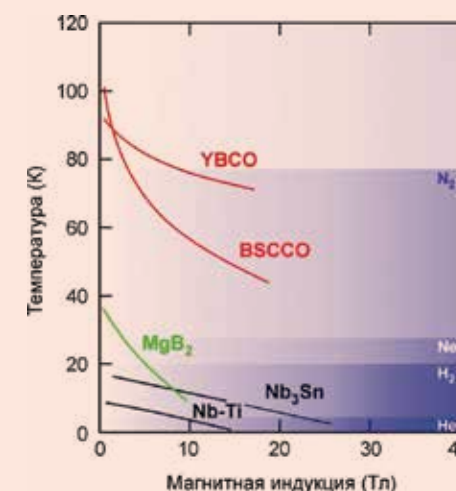


Рис. 1

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире разрабатываются различные устройства с применением технологии высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), в том числе ограничители тока короткого замыкания, двигатели, накопители электроэнергии и различные вариации сверхпроводящих кабелей. Сверхпроводящие кабели наряду с токоограничителями в наше время являются наиболее популярной темой в области применения эффекта сверхпроводимости в электроэнергетике. Сверхпроводящие кабельные линии (ВТСП КЛ) имеют очевидные преимущества при передаче больших потоков энергии по электрическим сетям по сравнению с традиционными линиями. Это стимулировало

разработку большого количества конструкций кабелей для передачи энергии. Именно при разработке ВТСП КЛ накоплен начальный опыт эксплуатации в реальных электрических сетях, а уровень передаваемой мощности находится в интервале от единиц мегаватт до единиц гигаватт на одну цепь.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основным элементом любого сверхпроводящего устройства являются сверхпроводящие материалы, из которых оно изготавливается. Более чем 50-летний опыт создания низкотемпературных практических сверхпроводников и почти

30-летний опыт разработок высокотемпературных сверхпроводников привели к формированию широкой номенклатуры различных сверхпроводящих материалов, из которых могут быть созданы всевозможные сверхпроводниковые устройства.

Терминологически технические сверхпроводящие материалы делятся на две категории: 1) низкотемпературные сверхпроводящие (НТСП) материалы, имеющие критическую температуру (температуру перехода в сверхпроводящее состояние в нулевом магнитном поле) ниже 25 К и работающие при гелиевом уровне температур; 2) высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) материалы, имеющие, как правило, критическую температуру выше 25 К и зачастую способные работать при температуре порядка температуры кипения жидкого азота (~77 К) и несколько выше.

В настоящее время известны десятки оксидных соединений, демонстрирующих сверхпроводимость при температурах выше 77 К. Выбор перспективных ВТСП-материалов основан на учете большого количества факторов, и температура перехода в состояние сверхпроводимости обычно не является главным из них. В результате после многих лет поисков основой для использования в ВТСП-устройствах стали лишь два соединения:  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  с  $T_c = 105\text{--}120$  К (условное наименование ВТСП первого поколения — G-1, или BSCCO) и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  с  $T_c = 90\text{--}92$  К (условное наименование ВТСП второго поколения — G-2, или YBCO, иногда RBCO).

На рис. 1 показаны области существования сверхпроводимости для различных материалов в виде зависимости критической температуры сверхпроводящего перехода от индукции внешнего магнитного поля.

ИНФОРМАЦИЯ

**ИЗ «ПРОГРАММЫ  
ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ  
ПАО «ФСК ЕЭС» ДО 2016 ГОДА  
С ПЕРСПЕКТИВОЙ  
ДО 2020 ГОДА» (УТВЕРЖЕНА  
СОВЕТОМ ДИРЕКТОРОВ  
ПАО «ФСК ЕЭС» 07.04.2011)**

5.2. Разработка и испытание новых технологий ПАО «ФСК ЕЭС»

Данное направление ориентировано на поиск, разработку и первичное испытание новых технологий и технических решений с целью решения задач повышения согласованности работы энергосистем, повышения надежности и безопасности энергосистемы, повышения эффективности транспорта и потребления электроэнергии, повышения качества энергообеспечения для потребителей. [...]

Приоритетным предметом для направления являются прорывные технологии, создающие новые рынки и новые категории продукции.

В настоящее время определен следующий состав технологий, которые будут разрабатываться в рамках направления:

Прорывные технологии: :

- Токоограничивающее устройство на основе взрывных коммутаторов для сетей 110 кВ и выше;
- Технологии аккумулирования электроэнергии;
- Технологии цифровой подстанции;
- Технологии сверхпроводимости.

Этот рисунок дает представление об основных современных сверхпроводящих материалах, их критических температурах и возможных охлаждающих средах.

Успехи, достигнутые в технологии производства ВТСП-материалов, позволяют производить сверхпроводящие ленты с величиной критического тока 25–50 ампер на миллиметр ширины при толщине 0,05–0,35 мм. Это послужило хорошей основой для успешной разработки сверхпроводящих кабельных линий постоянного и переменного тока. При этом следует отметить тот факт, что жидкий азот, служащий хладагентом в кабеле, является также прекрасным диэлектриком.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИКУ

Во всем мире ведутся активные исследования и разработки различных типов электротехнических устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников: силовых кабелей, токоограничителей, индуктивных накопителей энергии, электрических машин и пр. Причем именно силовые сверхпроводящие кабели являются наиболее разработанным и продвинутом видом применения сверхпроводимости в электроэнергетике в настоящее время [1, 2, 3].

Основными преимуществами сверхпроводящих кабелей являются:

- низкие потери энергии в сверхпроводящей кабельной линии;

- 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 потоков энергии при сравнительно низком напряжении.

Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии постоянного и переменного токов являются инновационной разработкой, позволяющей решить значительную часть проблемы электрических сетей. Однако при использовании ВТСП КЛ постоянного тока приобретает еще и новое качество передачи, так как линия становится управляемым элементом сети, регулирующим потоки передаваемой энергии вплоть до реверса передачи. ВТСП КЛ постоянного тока имеют ряд дополнительных преимуществ по сравнению с линиями переменного тока, а именно:

- ограничение токов короткого замыкания, что позволяет соединить по «низкой» стороне отдельные секторы энергосистемы без увеличения токов короткого замыкания;
- повышение устойчивости сети и предотвращение каскадных отключений потребителей за счет взаимного резервирования энергорайонов;
- регулирование распределения потоков мощности в параллельных линиях;
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле

## ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЯ ДВУХ ПОДСТАНЦИЙ

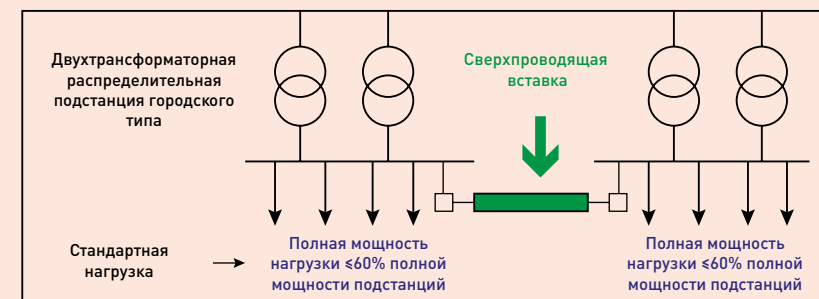


Рис. 2

- и, как следствие, снижение требований к криогенной системе;
- возможность связи несинхронизированных энергосистем.

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 итоге выбор определяется и техническими, и экономическими соображениями.

ВТСП КЛ переменного тока целесообразны в тех случаях, когда необходима передача больших потоков электроэнергии на распределительном напряжении, а также при замене воздушных линий на кабельные без изменения класса напряжения. Возможна также передача энергии непосредственно с шин генератора на подстанцию или в распределительную сеть.

ВТСП КЛ постоянного тока, выполняя те же функции, что и ВТСП КЛ переменного тока, способны также осуществлять функцию ограничения токов короткого замыкания и управление потоками мощности. Поэтому в тех случаях, когда помимо передачи больших потоков мощности

на низком напряжении требуется еще обеспечить и функцию ограничения токов короткого замыкания и управления потоками мощности, что характерно для мегаполисов, ВТСП КЛ постоянного тока наиболее предпочтительны. Кроме того, сверхдальние кабельные передачи возможны только при использовании линий постоянного тока.

Принимая во внимание очевидные преимущества ВТСП КЛ, во многих странах (США, Южная Корея, Китай, Япония, Европа) проводятся работы по созданию и опытной эксплуатации таких линий для различных целей. Условно их можно разделить на магистральные кабели и кабели для распределительных сетей. В России сначала по инициативе ПАО ЕЭС, а затем ПАО «ФСК ЕЭС» начали проводиться работы, целью которых является создание ВТСП КЛ постоянного и переменного токов на напряжение 20 кВ. При реализации этих проектов предусматривается как создание собственно сверхпроводящей кабельной линии, так и всей необходимой инфраструктуры: криогенной станции, токовых вводов, соединительных муфт, преобразовательных подстанций, систем диагностики, управления и защиты.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВСТАВКИ МЕЖДУ ПОДСТАНЦИЯМИ В МЕГАПОЛИСАХ

Энергетические сети мегаполисов являются динамично развивающейся структурой, которая имеет следующие особенности:

- быстрый рост потребления энергии;
- высокая плотность энергопотребления;
- наличие «дефицитных» по энергообеспечению районов;
- высокая степень разветвленности распределительных электрических сетей, что обусловлено необходимостью многократного дублирования линий электрообеспечения потребителей и приводит к снижению управляемости сети;
- секционирование электрической сети с целью уменьшения токов короткого замыкания.

Все эти особенности приводят к возникновению ряда проблем в сетях мегаполисов.

Однако загрузка подстанций в городе очень неравномерна. Во многих случаях трансформаторы подстанций загружены только на 30–60%. Как правило, подстанции глубокого ввода в городах запрашиваются по отдельным линиям высокого напряжения. Соединение подстанций на стороне среднего напряжения может обеспечить взаимное резервирование энергорайонов и высвободить резервные трансформаторные мощности, что в конечном итоге приведет к снижению потерь энергии в сети и повышению надежности энергоснабжения потребителей. Кроме того, данный тип подключения позволяет использовать высвободившиеся мощности

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЕКТОВ ПО СОЕДИНЕНИЮ ДВУХ ПОДСТАНЦИЙ НА СТОРОНЕ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

| Проект      | P, МВА/МВт | U, кВ | L, км | Ограничение токов короткого замыкания | Максимальная мощность, МВА | Управление потоками | S-N переход | Надежность |
|-------------|------------|-------|-------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------|------------|
| Hydra       | 96         | 13,8  | 0,2   | +                                     | 100                        | -                   | Длительно   | +          |
| AmpaCity    | 40         | 10    | 1,0   | ++                                    | 100                        | -                   | Кратко      | ++         |
| С-Петербург | 50         | 20    | 2,5   | +++                                   | 250                        | +++                 | Никогда     | ++         |

Таблица 1

для подключения дополнительной нагрузки без необходимости ввода в эксплуатацию новых трансформаторов или строительства новых подстанций и линий электропередачи [4, 5]. Рис. 2 иллюстрирует эту концепцию.

Как видно из рисунка, при наличии вставки три трансформатора полностью обеспечат электроэнергией присоединенных потребителей при загрузке не более 80%. Четвертый трансформатор и линия, его питающая, могут быть выведены в оперативный резерв, что приведет либо к снижению потерь энергии, либо к их использованию для подключения дополнительных потребителей. Разумеется, такая вставка может быть выполнена как по традиционным технологиям, так и с использованием ВТСП КЛ. Однако при передаче больших потоков энергии на распределительном напряжении сверхпроводящие линии имеют неоспоримые преимущества. Основной проблемой при реализации вышеприведенной схемы является тот факт, что прямое соединение подстанций приведет к существенному увеличению токов короткого замыкания. Данная схема будет работоспособна только в том случае, если вставка станет выполнять две функции: передачу мощности и ограничение токов короткого замыкания. В связи с тем, что решение задачи создания вставки, вы-

полняющей две вышеприведенные функции, сулит большие перспективы по совершенствованию систем электроснабжения мегаполисов, в настоящее время в мире осуществляются три крупных научных проекта в этом направлении:

- Hydra, Нью-Йорк, США [3, 6];
- AmpaCity, Эссен, Германия [3, 7];
- Санкт-Петербург, Россия [3, 8].

Все три проекта имеют целью задачу высокой мощности на среднем напряжении между двумя подстанциями при одновременном ограничении токов короткого замыкания.

В проекте Hydra сочетаются функции передачи большой мощности и ограничения тока в одном устройстве — сверхпроводящем кабеле переменного тока специальной конструкции. При возникновении короткого замыкания в сети кабель ВТСП переходит в нормально проводящее состояние, импеданс сети увеличивается, что и приводит к ограничению токов короткого замыкания. Это делает чрезвычайно сложной задачу оптимизации кабеля с учетом возможных сетевых режимов, условий охлаждения и прокладки кабеля. Кроме того, технические решения, разработанные для одного проекта, не могут тиражироваться для других проектов в силу различных режимных условий и ус-

ловий прокладки, а значит, и условный охлаждения кабеля, который периодически должен переходить из сверхпроводящего состояния в нормально проводящее.

В проекте AmpaCity функции передачи мощности и ограничения токов короткого замыкания разделены между кабелем и токоограничителем. Это упрощает задачу разработки каждого устройства и позволяет изготавливать кабель с высокой степенью стабилизации, что невозможно в проекте Hydra. Разумеется, требуется согласование характеристик кабеля и токоограничителя, однако это не является сложной задачей, и разработанные при выполнении проекта технические решения могут тиражироваться при создании других линий с аналогичными параметрами.

В Санкт-Петербургском проекте функции передачи мощности и ограничения токов короткого замыкания разделены между кабелем постоянного тока и преобразователями при их соответствующей настройке. Сверхпроводящий кабель постоянного тока в отличие от кабеля переменного тока не имеет потерь энергии, что существенно снижает требования к мощности криогенной установки. В отличие от двух вышеупомянутых проектов, линия постоянного тока является активным элементом сети

и позволяет управлять энергетическими потоками в прилегающих линиях как по направлению, так и по мощности передачи. Кроме того, в отличие от двух предыдущих проектов в данном случае при любых режимах работы сети сверхпроводящие элементы вставки никогда не переходят в нормально проводящее состояние.

В табл. 1 представлены основные характеристики вышеописанных проектов и их сравнение на основании экспертных оценок.

## НЕКОТОРЫЕ ПРОЕКТЫ ВТСП КЛ

Ниже представлено краткое описание основных проектов в мире и в России, которые прошли тестовые испытания или находятся в опытной эксплуатации, а также проекты, имеющие рекордные значения по номинальным характеристикам.

### ПРОЕКТЫ ВТСП КЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Проект AmpaCity, Эссен, Германия.** Схема соединения двух подстанций представлена на рис. 3. Как видно

## СХЕМА ПРОЕКТА АМРАСИТИ

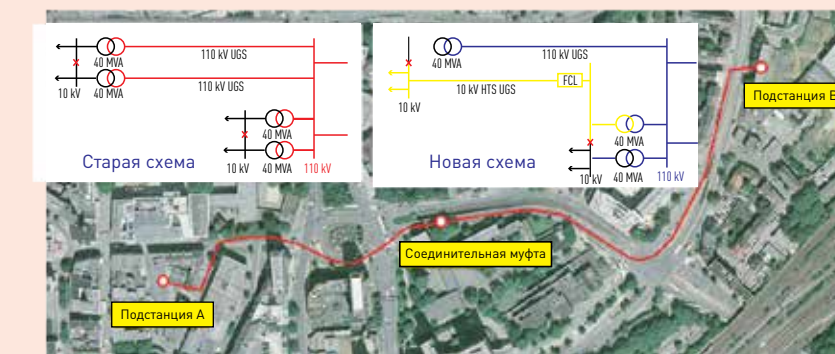


Рис. 3

из рисунка, реализация данного проекта позволит вывести из эксплуатации один трансформатор на 40 МВА и высоковольтную линию 110 кВ.

Это первый проект ВТСП КЛ, в рамках которого сверхпроводящая линия установлена в реальную городскую сеть как связь между двумя подстанциями. Линия включает последовательно соединенные кабель ВТСП и токоограничитель.

Характеристики кабеля таковы:

- конструкция — триаксиал (рис. 4а);

- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 10 кВ/2,4 кА/40 МВА;
- сверхпроводник — G-1;
- длина — 1000 м с одной соединительной муфтой;
- внешний диаметр — 150 мм.

Расчетные токи короткого замыкания в проекте достигают до 20 кА, ограниченный ток короткого замыкания составляет не более 5 кА. Используется криогенная система открытого типа холодопроизводительностью 4 кВт при 67 К, она требует подвоза жидкого азота в объеме 1 трак в 10 дней.

## КОНСТРУКЦИЯ ТРИАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ



Рис. 4а

## ФРАГМЕНТ ГРАФИКА ЗАГРУЗКИ ТРИАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ В ПРОЕКТЕ ВИХВУ

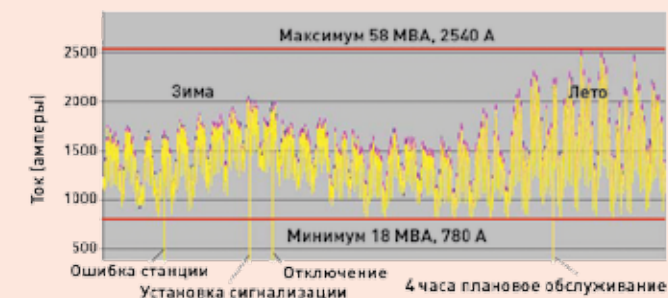
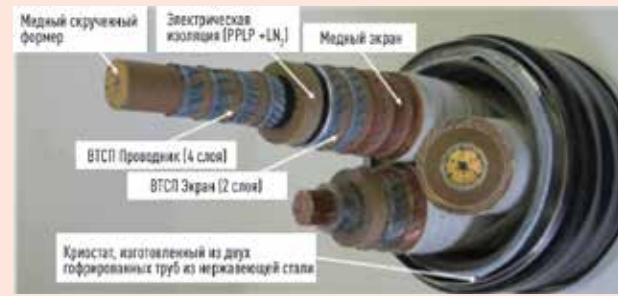
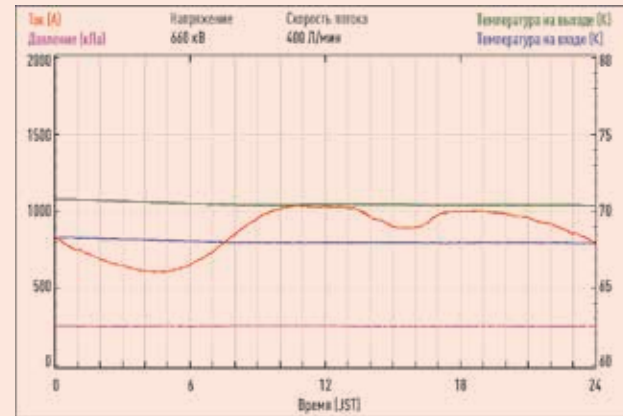


Рис. 4б

## КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЯ «ТРИ В ОДНОМ» ПРОЕКТА YOKONAMA (А) И ФРАГМЕНТ ГРАФИКА ЕГО ЗАГРУЗКИ (Б)



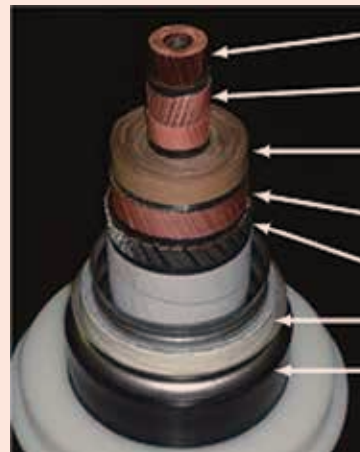
а)



б)

Рис. 5

## КОНСТРУКЦИЯ ОДНОЙ ФАЗЫ ВТСП КЛ ПРОЕКТА FURUKAWA



Медный формер  
Сверхпроводящий слой: 2 повива YBCO-ленты шириной 3 мм  
Полипропиленовая бумага  
Экранирующий слой: 1 повив YBCO-ленты шириной 5 мм  
Медный стабилизатор  
Гибкий криостат  
Кожух Ø150 мм

Рис. 6

Монтаж линии завершен в 2013 г. С 10 марта 2014 г. линия подключена к сети. В работе более 2,5 лет. Нагрузка (переток мощности между подстанциями) незначительная. Серьезных проблем при эксплуатации не возникло.

### Проект Vixby, штат Огайо, США.

Данный проект имеет большой срок эксплуатации ВТСП КЛ при нагрузках, близких к номинальным в реальной энергосистеме.

Характеристики кабеля таковы:

- конструкция — триаксиал (рис. 4а);
- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 13,2 кВ/3 кА/69 МВА;
- сверхпроводник — G-1;
- длина — 200 м;
- внешний диаметр — 150 мм.

Дата включения линии в сеть — 08.08.2006 г., наработка общая составила 51 800 ч, под нагрузкой — более 35 000 ч. Количество переходов в нормальное состояние — более 100.

Наибольшие токи короткого замыкания были равны 27,0 и 17,0 кА. Все токи короткого замыкания кабель выдержал без повреждений. Общие теплопритоки при 70 К составили 3,0 кВт. Используемая криогенная система открытого типа требовала подвоза жидкого азота в объеме 3 трака в неделю.

**Проект Yokonama, Япония.** Данный проект имеет реальный срок опытной эксплуатации ВТСП КЛ при среднем классе напряжения в условиях подстанции Asahi.

Характеристики кабеля таковы:

- конструкция — «три в одном» (рис. 5);
- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 66 кВ/1,75 кА/200 МВА;
- сверхпроводник — G-1;
- длина — 250 м;
- соединительная муфта — одна.

Дата включения линии в сеть — 29.10.2012 г., завершение опытной эксплуатации — февраль 2014 г. Критический ток жилы составляет 6,1 кА, экрана — 7,1 кА. Потери энергии при 2,0 кА равны 1 Вт/м/фаза. Расчетный ток короткого замыкания — 31,5 кА. Ток короткого замыкания образец кабеля выдержал без повреждений. Общие теплопритоки при 70 К составили 2,4 кВт. Криогенная система замкнутого типа включает шесть рефрижераторов Stirling, четыре из которых в работе и два в резерве. За работой линии можно было наблюдать в режиме реального времени на сайте компании SEI.

**Проект Furukawa, Япония.** Примененный в этом проекте кабель ВТСП является рекордным как по классу

напряжений, так и по передаваемой мощности.

Характеристики кабеля таковы:

- конструкция — каждая фаза в отдельном криостате (рис. 6);
- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 275 кВ/3 кА/1400 МВА;
- сверхпроводник — G-2;
- длина — 30 м;
- фаза — одна;
- диаметр кабеля — 86,5 мм;
- внешний диаметр фазы — 150 мм.

В процессе испытаний потери энергии в жиле при силе тока 3,0 кА и температуре 68,7 К составили 0,36 Вт/м, потери энергии в экране — 0,07 Вт/м, диэлектрические потери — 0,6 Вт/м, приведенные потери — 59 кВт/км, тогда как для XLPE-кабеля аналогичной линии — 240 кВт/км. Ток короткого замыкания 63,0 кА в течение 600 мс образец длиной 2 м выдержал.

**Российский проект ВТСП КЛ для установки на подстанции «Динамо».** Первый российский про-

ект ВТСП КЛ предназначен для установки на опытную эксплуатацию на подстанции «Динамо» [9].

Характеристики кабеля таковы:

- конструкция — каждая фаза в отдельном криостате (рис. 7);
- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 20 кВ/1,5 кА/50 МВА;
- сверхпроводник — G-1;
- критический ток 5,2 кА при температуре 74 К;
- длина — 200 м без соединительной муфты.

В ходе испытаний все расчетные характеристики кабеля были подтверждены. Он был испытан на стойкость к току короткого замыкания силой 28 кА. Была использована криогенная система замкнутого типа производительностью 8 кВт при температуре 67 К.

### ПРОЕКТЫ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Проект IEE CAS ВТСП КЛ, Китай.

ВТСП КЛ соединяет подстанцию, оборудованную выпрямителем с алюминиевым производством (рис. 8). Данный проект демонстрирует рекордные характеристики по токонесущей способности.

Характеристики кабеля таковы:

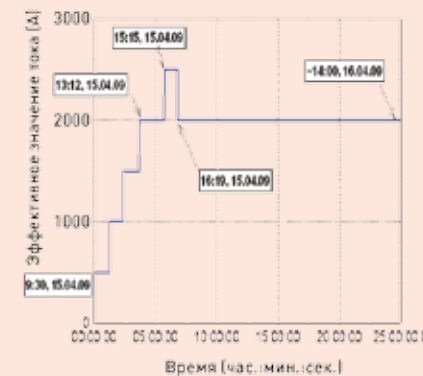
- конструкция — два параллельных униполярных кабеля с несверхпроводящим экраном и теплой изоляцией (рис. 8);
- класс напряжения /расчетный ток / мощность — 1,3 кВ/10 кА/10 МВт;
- сверхпроводник — G-1;
- длина — 362,4 м;
- внешний диаметр — 151 мм.

Дата включения линии в сеть — начало 2011 г., она работает по настоящее время. Общие теплопритоки

## ОБЩИЙ ВИД ВТСП КЛ (А) И ГРАФИК НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ (Б)



Рис. 7



## КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЯ (А) И ОБЩИЙ ВИД ЛИНИИ ПРОЕКТА IEE CAS, КИТАЙ (Б)



Рис. 8

## КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЯ (А) И СХЕМА ВНЕДРЕНИЯ ВТСП ЛИНИЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (Б) В ЭНЕРГОСИСТЕМУ ОСТРОВА ЧЕДЖУ

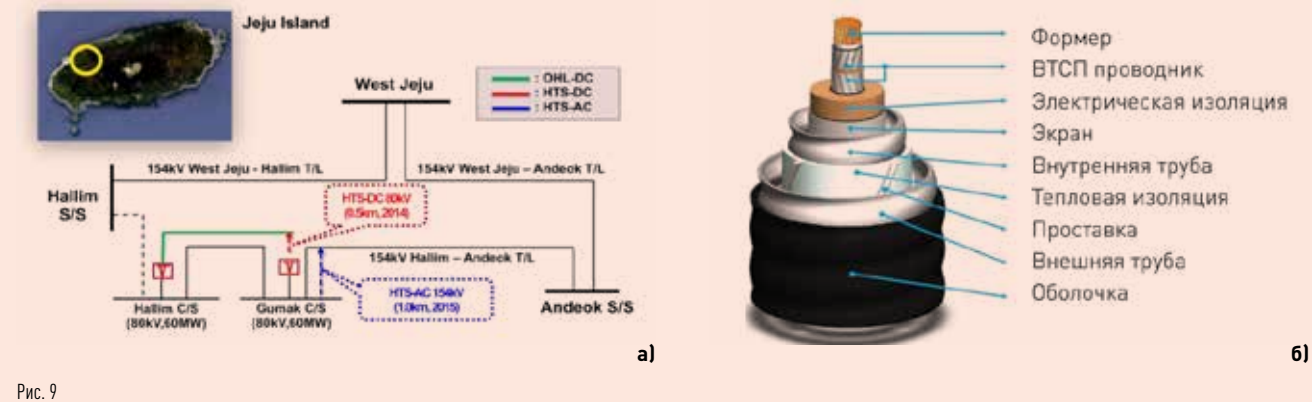


Рис. 9

при температуре 77 К составили 4,0 кВт. Использована криогенная система замкнутого типа Stirling.

### Проект Jeju, Республика Корея.

Биполярная кабельная система постоянного тока с параметрами 80 кВ и 500 МВт длиной 500 м была установлена в энергосистему острова Чеджу, Республика Корея (рис. 9) в октябре 2014 г. после проведения успешных сертификационных испытаний 100-метрового отрезка. Использовано два

монополярных кабеля в криостатах из алюминиевого сплава.

Характеристики кабеля таковы:

- класс напряжения / расчетный ток / мощность — +/- 80 кВ/3,25 кА/500 МВт;
- длина — 500 м;
- внешний диаметр — 149 мм;
- изоляция на 80–200 кВ DC.

При создании преобразовательных подстанций предполагается

использование ВТСП-обмоток сглаживающих реакторов. На более далекую перспективу разрабатываются планы по созданию кабелей постоянного тока на 30, 180, 250 кВ мощностью до 10 ГВт.

### Проект Ishikari, остров Хоккайдо, Япония.

В проекте использованы консольная передача для питания хранилища данных, биполярная передача 10 кВ, 5000 А, ВТСП ленты первого поколения G-1 производства SEI.

## КОНСТРУКЦИЯ ВТСП КАБЕЛЯ В КРИОСТАТЕ (Б) И ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЯ 500 М (А)

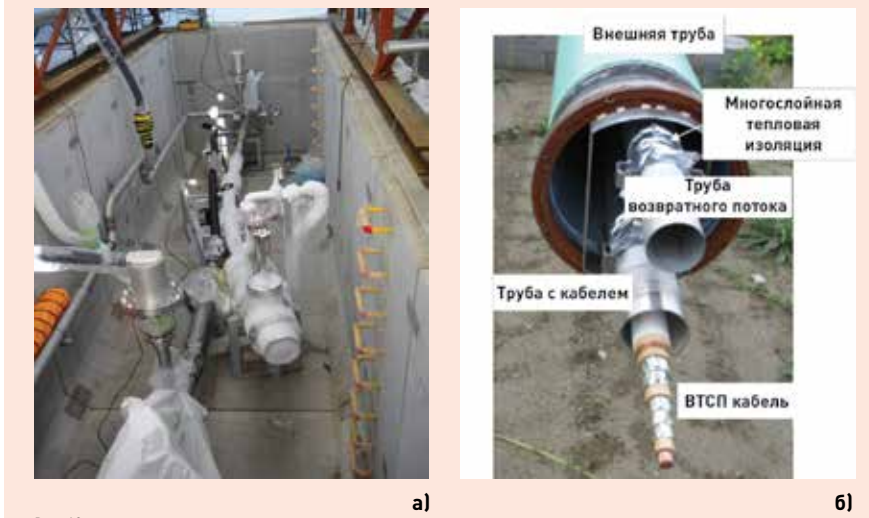


Рис. 10

В первой фазе проекта установлен кабель 500 м, класс напряжения / расчетный ток / мощность составили 10 кВ/5 кА/100 МВт.

Испытания линии (рис. 10а) проведены в мае — июне 2015 г. Линия в 500 м будет питать базу данных крупной интернет-компании. При снижении затрат компании на питание на 10% за счет ВТСП DC кабеля ее прибыль возрастет вдвое.

Во второй фазе проекта использовался кабель длиной 1000 м, класс напряжения / расчетный ток / мощность составили 10 кВ/2,5 кА/50 МВт.

Кабель был смонтирован в июне 2016 г. Основная цель второй фазы проекта — проведение исследований и получение базовых знаний для разработки более длинных линий. К концу 2016 г. проведены успешные испытания криогенной системы 1000-метровой линии. Исследованы три варианта конструкции криостатов, показано, что внешний теплоприток в «холодную зону» может быть снижен до величины, не превышающей 1 Вт/м [10]. Это крайне важно при проектировании линий большой протяженности. В перспективе рассматривается размещение на Хоккайдо еще одной линии длиной 10 км.

### Санкт-Петербургский проект, Россия.

Первый российский проект ВТСП КЛ постоянного тока предназначен для установки в энергосистему Санкт-Петербурга для соединения подстанций ПС 330 кВ «Центральная» и ПС 220 кВ «РП-9». Длина кабеля составляет 2,5 км, а петля прокладки жидким азотом — 5,0 км. Эти параметры являются рекордными среди существующих кабельных проектов ВТСП в мире.

Характеристики кабеля таковы:

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

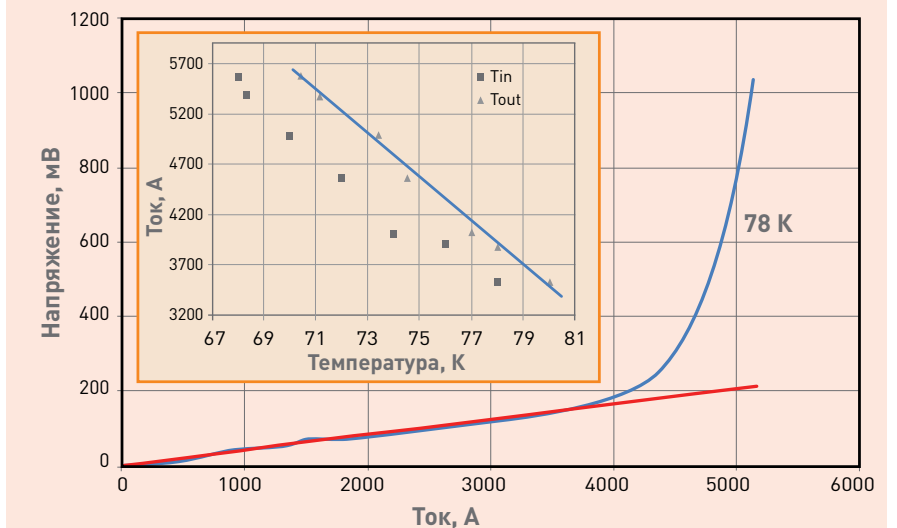


Рис. 11

## ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ ПО ВТСП ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (В МВт)

| Напряжение передачи, кВ | Монополярная передача |           | Биполярная передача |           |
|-------------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|
|                         | Одна линия            | Две линии | Одна линия          | Две линии |
| 50                      | 750                   | 1500      | 1500                | 3000      |
| 100                     | 1500                  | 3000      | 3000                | 6000      |
| 200                     | 3000                  | 6000      | 6000                | 12 000    |

Таблица 2

- конструкция — монополярная передача с обратным проводником в конструкции одного кабеля;
- класс напряжения / расчетный ток / мощность — 20 кВ/2,5 кА/50 МВт;
- сверхпроводник — G-1;
- длина — 2500 м с пятью соединительными муфтами;
- внешний диаметр криостата — 110 мм.

Использована криогенная система замкнутого типа производительностью 12 кВт при температуре 67 К.

Испытаны два 30-метровых отрезка в сборе с соединительной муфтой и токовыми вводами, два отрезка длиной 430 м с соединительной муфтой (рис. 11). Все проектные характеристики достигнуты.

Изготовленный комплекс оборудования включает:

- шесть строительных длин кабеля общей длиной 2500 м;
- комплект соединительных и концевых муфт;
- два выпрямителя/инвертора с фильтрующими R-С-устройствами и системой СУРЗА;
- замкнутая криогенная система производительностью 12 кВт холода.

В 2017 г. будут проведены ресурсные испытания кабельной линии длиной более 2,0 км в сборе со штатной криогенной системой и преобразовательной подстанцией. Работы проводятся на площадке АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в г. Москве.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ БОЛЬШИХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ПО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ КАБЕЛЬНЫМ ЛИНИЯМ

Специфика размещения источников электроэнергии (АЭС, ГЭС, ветропарки) на больших расстояниях от крупных городов и потребителей электроэнергии приводит к необходимости транспортировки

больших потоков энергии на значительные расстояния. При этом схема выдачи мощности предполагает использование высоковольтных воздушных линий передачи (220–750 кВ), что обусловлено стремлением минимизировать потери энергии при ее транспортировке. Это приводит к необходимости создания высоковольтных повышающих подстанций, заметным потерям энергии (6–8%) при ее транспортировке и отчуждению значительных площадей земли. При оценке длинных линий будем рассматривать линии постоянного тока, так как любые кабельные линии переменного тока имеют ограничение по длине вследствие возникновения зарядных токов, которые приводят к снижению мощности на дальнем конце линии. В результате этого длина кабельных линий переменного тока не превышает нескольких десятков километров.

### ВОЗМОЖНЫЕ УРОВНИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ПО ВТСП КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Оценим возможный уровень передаваемой мощности при различных напряжениях, исходя из достигнутых характеристик сверхпроводящих материалов. При величине конструктивной критической плотности тока, равной 200 А/мм<sup>2</sup>, реальным является создание кабелей постоянного тока

## ДЛИНА ВТСП ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В КОТОРОЙ РАВНЫ 3% ОТ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

| Мощность, МВт | 100 | 300 | 500 | 1000 | 3000 | 6000 |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| Длина, км     | 50  | 150 | 250 | 500  | 1500 | 3000 |

Таблица 3

с номинальным током 10,0–20,0 кА. Кабели с рабочим током в 10,0 кА уже созданы. Примем для нижеприведенных оценок, сведенных в табл. 2, рабочий ток равным 15,0 кА.

Как видно из таблицы, мощность любой действующей электростанции может быть передана в сеть уже при напряжении 50–200 кВ, а передача энергии от одного энергоблока возможна на генераторном напряжении. Для увеличения надежности передачи целесообразно рассматривать передачу по двум параллельным линиям.

### ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ЛИНИИ

Потери энергии в ВТСП линии постоянного тока складываются из:

1. потерь энергии в преобразователях около 2% от мощности линии;
2. потерь, связанных с теплопритоками через токовводы (единицы кВт);
3. потерь, связанных с теплопритоками в холодную зону через криостат, умноженных на коэффициент рефрижерации.

Две первые величины не зависят от длины. Для длинных линий теплопритоками через токовводы можно пренебречь. Примем в расчете не зависящую от длины составляющую потерь энергии, равной 2% от передаваемой мощности.

Теплопритоки через оболочку современных криостатов составляют 1,0–1,5 Вт/м. При коэффициенте рефрижерации 12–18 приведенные потери мощности на метр длины линии составят 12–27 Вт/м. Примем среднюю величину как 20 Вт/м. Ограничим общие потери при передаче энергии 3%, т.е. потери в сверхпроводящей линии с учетом

затрат энергии на охлаждение не должны превышать 1%. Результаты расчета максимальной длины ВТСП линии, потери в которой будут составлять не более 3% от ее мощности, представлены в табл. 3.

Из вышеприведенной таблицы следует, что использование ВТСП-линии позволит существенно сократить потери энергии при ее транспортировке на большие расстояния.

### ОХЛАЖДЕНИЕ ЛИНИИ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ МАКСИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КРИОГЕННЫМИ СТАНЦИЯМИ

При расчете охлаждения линии используются следующие исходные данные:

- максимальная температура сверхпроводящего кабеля, охлаждаемого жидким азотом, не должна превышать 78 К, что приводит к допустимому перепаду температур по длине порядка 10 К;
- допустимый перепад давлений по длине определяется характеристиками криостата и для гибких криостатов на основе гофрированных труб составляет 10–15 атмосфер;
- минимальное давление азота и максимальная температура азота в зоне приложения высокого напряжения должны обеспечивать отсутствие возможности образования газовых пузырьков, существенно снижающих электрическую прочность, что соответствует условиям: давление не менее 1,0 атм., а температура не выше 78 К.

Первое условие является следствием того, что диапазон существования жидкой фазы азота ограничен снизу температурой

замерзания, а сверху температурой кипения, и составляет всего 77,4 К – 63,2 К = 14,2 К при давлении 1 атм. Хотя он и может быть расширен путем повышения давления в системе (составляя, например, 20,6 К при 2 атм.), но при этом нижний температурный предел (температура замерзания) остается практически неизменным. Следовательно, расширение диапазона ведет к повышению температуры на выходе из криостата и, значит, к снижению критического тока сверхпроводящего материала.

Для того чтобы обеспечить заданный перепад температур по длине кабельной линии, необходимо прокачать определенный объем хладагента для отвода поступившего в криостат тепла. Если пренебречь сосредоточенной тепловой нагрузкой на концах линии (токовводах), то массовый расход жидкого азота, необходимого для удаления входящего тепла и тепла, генерируемого трением, составит:

$$\dot{m} = \frac{L(q + q_f)}{C_p \Delta T},$$

где  $\dot{m}$  — расход жидкого азота, кг/с;  $L$  — длина криостата, м;  $q$  — удельная тепловая нагрузка через теплоизоляцию, Вт/м;  $q_f$  — удельное тепловыделение от трения, Вт/м;  $C_p$  — удельная теплоемкость жидкого азота, Дж/кг·К.

Массовый расход связан со скоростью потока выражением:

$$\dot{m} = \rho v A,$$

где  $\rho$  — плотность жидкого азота, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — скорость потока, м/с;  $A$  — площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>.

В системах передачи постоянного тока тепловыделение в ВТСП-кабеле отсутствует. Если также не рассматривать тепловыделение, обусловленное трением

в криогенном канале, которое в рабочих режимах обычно значительно меньше, чем теплопритоки через оболочку криостата, тогда перепад давления может быть оценен по модифицированной формуле Дарси–Вейсбаха:

$$\Delta p = f \frac{L^3}{2D_h \rho} \left( \frac{q}{C_p \Delta T A} \right)^2,$$

где  $\Delta p$  — падение давления, Па;  $f$  — коэффициент потерь на трение;  $D_h$  — гидравлический диаметр, м.

Типичные значения внешних теплопритоков для современных гофрированных криостатов составляют 1,0–1,5 Вт/м. Используя приведенные соотношения, оценим характеристики теплообмена для ВТСП-кабеля с внешним диаметром 39–40 мм, размещенном в криостатах с внутренним диаметром 60, 66 и 84 мм. Результаты расчетов сведены в табл. 4, из которой следует, что перепад давлений может легко регулироваться за счет увеличения диаметра криостата.

Другим путем снижения перепада давления (не менее чем в 2 раза) является использование гладких труб с сильфонными развязками. При этом также могут быть

снижены внешние теплопритоки, но тогда существенно усложняется монтаж в связи с необходимостью выполнения большого объема сварочных работ по трассе прокладки кабельной линии.

Основным лимитирующим фактором увеличения плеча прокладки является перепад температур по длине кабеля. Однако, как видно из табл. 4, для криостата с внутренним диаметром 84 мм плечо прокладки может составлять 10 км, а при увеличении расхода — и 20 км. К сожалению, расход нельзя увеличивать неограниченно, так как при больших расходах появляется дополнительное тепловыделение из-за диссипации энергии при трении хладагента в канале охлаждения. Способом снижения перепада температур является снижение теплопритоков в «холодную» зону. Это может осуществляться как за счет совершенствования теплоизоляции криостата, так и путем понижения разницы температур между внешней и внутренней оболочками криостата. Последнее может быть достигнуто при помощи охлаждения внешней оболочки азотного канала обратным потоком азота

в криостате, состоящем из трех оболочек.

На рис. 12 представлены некоторые возможные схемы организации охлаждения криогенных кабельных линий.

На рис. 12а и 12б показаны простейшие схемы организации охлаждения одноцепной и двухцепной кабельной передачи. Как следует из табл. 4, расстояние между криогенными станциями может достигать 10–15 км. При увеличении диаметра криостата и переходе на гладкие трубы плечо прокладки может быть увеличено до 20–30 км. При дальнейшем совершенствовании тепловой изоляции криостатов плечо прокладки может достигать 50 км. Длинные линии создаются путем тиражирования участков, как это показано на рис. 12в.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения ВТСП кабельных линий в реальную электроэнергетику. В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения и в конечном итоге выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

При современном уровне развития сверхпроводниковой и криогенной техники возможно создание длинных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока для передачи энергии на расстояния в десятки и сотни километров. При этом мощность единичной линии может достигать нескольких гигаватт, а потери энергии в ней будут существенно ниже, чем в воздушных ЛЭП. Электрическое напряжение на ли-

нии и преобразовательной подстанции может быть снижено до 200 кВ и менее, однако его уровень должен быть оптимизирован с точки зрения эффективности работы и кабеля и преобразовательной установки. Криогенные станции для охлаждения линии могут располагаться на ее концах при длине линии до 30 км (в перспективе до 60 км). При создании линий большей длины криогенные станции должны размещаться вдоль трассы с шагом 20–60 км. Максимальная длина линии при таком подходе не имеет технических ограничений.

Успешная опытная эксплуатация первых линий постоянного и переменного токов может стать существенным ускорителем процессов внедрения ВТСП-устройств в электроэнергетику.

Основными сдерживающими факторами широкого внедрения ВТСП-кабельных линий являются:

- высокая стоимость сверхпроводников (за один кАм) и криогенной техники;
- высокая стоимость НИОКР;
- низкая эффективность криогенного оборудования и тепловой изоляции;
- отсутствие стандартов по производству и испытаниям ВТСП-кабелей;
- отсутствие реального длительного опыта эксплуатации;
- консерватизм энергетических компаний.

Тем не менее, есть все основания надеяться, что в обозримом будущем мощные сверхпроводящие кабельные линии позволят оптимизировать электрические сети мегаполисов и сформировать глобальную энергетическую сеть с передачей электроэнергии на сверхдальние расстояния, выполнять межсистемные связи, соединять несинхронизированные энергосистемы, строить

## ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИОГЕННОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С РАЗМЕЩЕНИЕМ КРИОГЕННОЙ СТАНЦИИ С ОДНОГО КОНЦА ЛИНИИ (А), ОБОИХ КОНЦОВ ЛИНИИ (Б) И С РАЗМЕЩЕНИЕМ КРИОГЕННЫХ СТАНЦИЙ ВДОЛЬ КАБЕЛЬНОЙ ТРАССЫ (В)

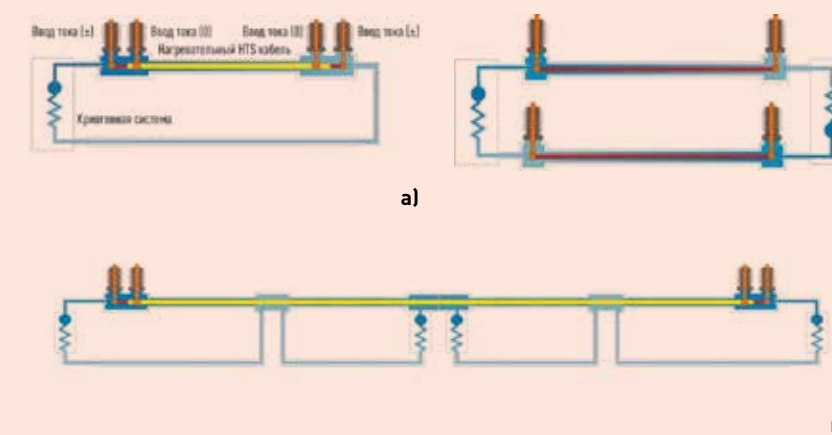


Рис. 12

длинные подводные линии и пр. Все это позволит существенно увеличить эффективность и надежность электрических сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

- И.А. Глебов, Н.А. Черноплеков, В.А. Альтов. Сверхпроводниковые технологии — новый этап в развитии электротехники и энергетики // Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2002, № 11.
- В.Е. Сытников. Сверхпроводящие кабели и перспективы их использования в энергетических системах XXI века. // Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2011, № 15, с. 65–74.
- EPRI. Superconducting Power Equipment Technology Watch 2012. Palo Alto, CA, USA, 2012.
- M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe. Physics Procedia 36 (2012), p. 884.
- V.E. Sytnikov, S.E. Bemert, S.I. Kopylov et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 06/2015, v. 25, issue 3, part 2, article 5400904.
- J. Maguire et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no 3, (2009), p. 1740.
- M. Stemmler et al. Proc. IEEE Int. Conf. on Appl. Supercond. and Electromagnetic Devices, Beijing, China, October, 2013, ID 3122.
- S. Kopylov, V. Sytnikov, S. Bemert, Yu. Ivanov, I. Krivetskiy, M. Romashov, Yu. Shakaryan, V. Keilin, A. Shikov, V. Patrikeev, V. Lobytsev, V.J. Shcherbakov. Phys.: Conf. Ser. 2014, v. 507, p. 03204.
- E.P. Volkov, V.S. Vysotsky, V.P. Firsov. First Russian long length HTS power cable, Physica C, 2012, v. 482 p. 87–91.
- H. Watanabe, Yu. Ivanov, N. Chikumoto, H. Takano et al. Cooling and Liquid Nitrogen Circulation of the 1000 m Class Superconducting DC Power Transmission System in Ishikari. IEEE Transactions on Applied Superconductivity DOI 10.1109/TASC.2016.2642578.

## ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ ПО ДЛИНЕ ВТСП ЛИНИИ

| Внутренний диаметр криостата, мм | Длина кабеля, км | Расход жидкого азота, л/мин | Перепад температур, К | Перепад давления, атм. |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 60                               | 2,5              | 40                          | 4,0                   | 4,8                    |
|                                  | 5,0              | 40                          | 7,5                   | 14,0                   |
| 66                               | 2,5              | 40                          | 4,0                   | 3,0                    |
|                                  | 2,5              | 40                          | 4,0                   | 0,4                    |
| 84                               | 5,0              | 40                          | 8,0                   | 1,1                    |
|                                  | 10,0             | 60                          | 11,0                  | 4,5                    |
|                                  |                  | 80                          | 8,4                   | 8,0                    |

Таблица 4