

# Сверхпроводниковые кабели: от лабораторных макетов к полупромышленным образцам

*В начале века, когда только началась разработка опытно-промышленных образцов сверхпроводниковых кабелей, трудно было представить, какие же будут итоги к началу 2009 года. По самым оптимистичным прогнозам в 2012 году ожидалось массовое промышленное производство сверхпроводниковых кабелей; по самым пессимистичным — на 2008 год планировался лишь запуск в эксплуатацию первых опытно-промышленных образцов. В настоящей статье описываются различные конструкции сверхпроводниковых кабелей, как реализованные, так и проектируемые, анализируются их преимущества и недостатки.*

## ВВЕДЕНИЕ

Первые попытки создать сверхпроводниковые кабели были предприняты сразу же после начала промышленного производства низкотемпературных сверхпроводников в середине 1960-х годов. Отсутствие активного сопротивления и крайне высокая плотность тока сверхпроводниковых кабелей были чрезвычайно привлекательны для электроэнергетики. Хотя в СССР и в США к середине 1980-х годов был сделан целый ряд относительно успешных устройств, например, кабель на 3 ГВА разработанный во ВНИИКП (рис. 1) или кабель Brookhaven National Laboratory (США) на напряжение 138 кВ и мощность 1 ГВА, дальнейшие работы были свернуты по экономическим соображениям. Криостаты и системы криогенного обеспечения на уровень температур в 4,2 К оказались слишком дорогими и сложными в эксплуатации. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в 1986 г. и появление коммерческих ВТСП проводников к середине 1990-х годов позволило приступить к разработке сверхпроводниковых кабелей на качественно ином уровне. Использование в качестве хладагента жидкого азота при температуре 77 К позволило использовать сравнительно дешевые криостаты, надежные и экономичные системы криогенного обеспечения.

ВТСП кабельные линии электропередачи (КЛЭП) обладают рядом преимуществ над традиционными кабельными линиями: большая пропускная способность (даже при снижении класса напряжения), уменьшенные потери, компактность и легкость (при сравнении кабелей на одинаковую мощность), пожаро- и экологическая безопасность.

Расчеты РНЦ «Курчатовский институт», «ВНИИКП», «ВНИИНМ» и «ВЭИ», проведенные несколько лет назад, показали, что даже при современных высоких

ценах на ВТСП материалы сверхпроводниковые кабели экономически выгодны при уровнях передачи энергии несколько сотен МВА. Падение стоимости ВТСП материалов (а также начало промышленного производства ВТСП материалов 2-го поколения, на которые в перспективе ожидается значительное снижение цен) дают все предпосылки считать, что в 2012 — 2014 годах ВТСП кабели будут экономически выгодны уже при уровнях энергии 20-30 МВА. Следует отметить, что основной экономический эффект от ВТСП кабелей связан с существенным сокращением объема земляных работ необходимых для прокладки кабеля в черте мегаполиса, замена существующего кабеля на ВТСП позволяет поднять в несколько раз передаваемую мощность сведя при этом земляные работы к минимуму. Еще одним преимуществом ВТСП кабелей на базе ВТСП материалов 2-го поколения является их токоограничивающее действие. Во время короткого замыкания происходит переход кабеля из сверхпроводящего состояния в нормальное, у него появляется активное сопротивление, за счет которого и ограничивается ток короткого замыкания. После отключения короткого замыкания ВТСП кабель восстанавливает сверхпроводимость за время меньшее, чем время срабатывания АПВ.

Как наиболее очевидные области применения ВТСП кабелей можно отметить:

- глубокие вводы в мегаполисы и крупные энергоемкие комплексы (возможен отказ от высокового напряжения в пользу среднего при увеличении мощности);
- линии электропередачи постоянного тока малой протяженности (например, на сильнонагруженных участках тяговой сети РЖД);
- сильноточные токопроводы на электростанциях.

На сегодняшний день самых больших успехов в области ВТСП КЛЭП достигли США, где несколько месяцев назад была введена в опытную эксплуа-



Рис. 1. HTSP кабель 3 ГВА, ВНИИКП

тацию ВТСП КЛЭП на 138 кВ и 574 МВА. Заметных успехов достигли и европейские, и японские компании. Россия, к сожалению, начала освоение этого сектора на правительственном уровне довольно поздно. В 2007 году ОАО РАО «ЕЭС России» утвердило программу работ по созданию и применению в электроэнергетике технологий и оборудования на основе сверхпроводимости до 2015 года, в которой предусмотрены следующие проекты касаясь КЛЭП:

- Разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение 10 — 20 кВ из ВТСП материалов 1-го поколения. Сроки исполнения: 2007 — 2010 гг.
- Пилотный проект ВТСП кабеля на напряжение 10 — 20 кВ с передаваемой мощностью 100 — 200 МВА длиной более 1 км на ВТСП материалах 1-го поколения. Сроки исполнения: 2008 — 2012 года.
- Разработка и создание ВТСП кабеля на напряжение от 110 кВ. Сроки исполнения: 2011 — 2015 года.
- Разработка сверхпроводниковых технологий (в том числе кабелей) для передачи электроэнергии постоянным и переменным током. Сроки исполнения: 2008 — 2009 года.

### КОНСТРУКЦИЯ

Для ознакомления с конструкцией ВТСП кабеля рассмотрим в общих чертах два его исполнения, принципиально отличающихся друг от друга, — с «теплым» и «холодным диэлектриком».

Кабель с «теплым диэлектриком» (рис. 2) конструктивно сходен с традиционным кабелем. Охлаждение ВТСП жил производится жидким азотом. Диэлектрик накладывается поверх криостата, что позволяет применять обычные изоляционные материалы. Следует отметить, что при производстве и монтаже такого кабеля можно использовать те же технологии, что и для обычных кабелей. Сечение криостата ВТСП кабеля с «теплым диэлектриком» меньше, чем у кабеля с «холодным диэлектриком», следовательно, его гидравлическое сопротивление будет также выше, что усложняет систему криогенного обеспечения и накладывает ограничение на максимальную длину кабельной линии. Конструкция соединительных и тоководных муфт также усложняется по сравнению с ВТСП кабелем с «холодным диэлектриком».

В кабеле с холодным диэлектриком (рис. 3) ВТСП жила кабеля окружена коаксиальным сверхпроводящим экраном (также навитым из ВТСП лент), служащим для экранирования магнитного поля. Диэлектрик, располагается между ВТСП жилой (жилами) и экранирующим слоем. Несомненным плюсом ВТСП кабелей с холодным диэлектриком является возможность размещения всех трех фаз в общем



Рис. 2. Конструкция ВТСП кабеля с «теплым диэлектриком»

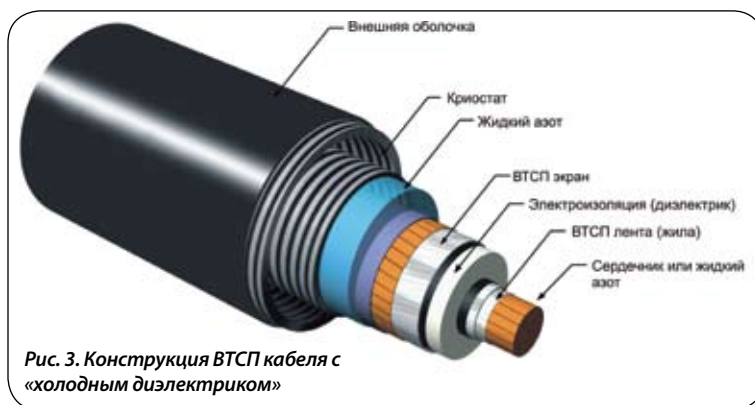


Рис. 3. Конструкция ВТСП кабеля с «холодным диэлектриком»

криостате (для класса напряжений до 35 кВ). Недостатками ВТСП кабеля с «холодным диэлектриком» является сложная технология изготовления и увеличенный расход сверхпроводящих материалов. Минимально допустимый радиус изгиба для кабелей с холодным диэлектриком также выше, чем для кабелей с теплым диэлектриком. Несмотря на это, данная конструкция получила большее распространение среди разработчиков.

В состав ВТСП КЛЭП входит не только кабель, но и система криогенного обеспечения (для охлаждения кабеля жидким азотом), концевые и соединительные муфты (как и для обычных кабелей), система мониторинга. Поэтому в связи со сложностью всех элементов (в том числе в составе самого кабеля), ни одна компания в мире пока не может реализовать проект только своими силами, и каждый существующий образец кабеля выполнялся несколькими фирмами одновременно.

### ПРОЕКТЫ

На сегодняшний день во многих странах мира в опытно-промышленную эксплуатацию запущено несколько коротких ВТСП кабелей, существуют также довольно амбициозные проекты, реализация кото-

рых позволит сделать еще один шаг на пути к массовому применению нового поколения кабелей.

### Pirelli Cables (с 2005 года — Prysmian Cables)

Для начала хотелось бы отметить компанию Pirelli Cables (Италия). Pirelli Cables начала разработки сверхпроводниковых кабелей в середине 1980-х годов и в 1998 году удачно провела испытания прототипа 50-метрового однофазного ВТСП кабеля с теплым диэлектриком (рис. 4) на напряжение 115 кВ и передаваемую мощность 400 МВА с переходной и концевой муфтами, созданный совместно с правительством США и производителем ВТСП провода — компанией American Superconductor (AMSC), США. В этом же году был дан старт проекту по замене трех существующих трехфазных кабелей на один трехфазный ВТСП кабель 24 кВ 100 МВА длиной 120 метров на действующей электростанции в городе Детройт, США. В конце 2002 года была проведена успешная демонстрация работы системы, но дальше возникли проблемы с криостатом (кабель был выполнен по конструкции с теплым диэлектриком), и кабель так и не был подключен к сети.



Рис. 4. Испытательный стенд с ВТСП кабелем компании Pirelli, Милан.

Также компания Pirelli Cables была задействована в разработке однофазного кабеля с холодным диэлектриком 110 кВ на номинальный ток 2100 А при поддержке немецкого правительства (но проект, к сожалению, остановлен) и проектах по созданию кабелей с холодным диэлектриком 132 кВ 680 МВА длиной 30 метров для итальянских энергетических систем Edison и ENEL и 225 кВ 1000 МВА для французской энергетической системы Electricite de France.

### Southwire

Одним из лидеров в области ВТСП кабелей можно назвать компанию Southwire, США. В 2000 году она запустила в эксплуатацию трехфазную кабельную перемычку 30 метров на 12,5 кВ 27 МВА (три однофазных кабеля с холодным диэлектриком), включенную в расщелку воздушной ЛЭП, для питания собственного медеплавильного цеха в городе Карроллтон (рис. 5) и находившуюся в эксплуатации 6 лет.



Рис. 5. ВТСП кабельная установка Southwire в г. Карроллтон, США

Образовав с NKT Cables, Дания, совместное предприятие Ultera, эти компании разработали «триаксиальный» (коаксиальный трехфазный) кабель (рис. 6). Особенность конструкции данного кабеля заключается в концентрическом расположении трех фаз вокруг общего центрального стержня (формера), окруженных медным экраном. Данная конструкция позволяет сократить расход ВТСП провода в два раза, достичь рекордной плотности тока, а также уменьшить охлаждаемую поверхность, таким образом, снижая требования к системе охлаждения.

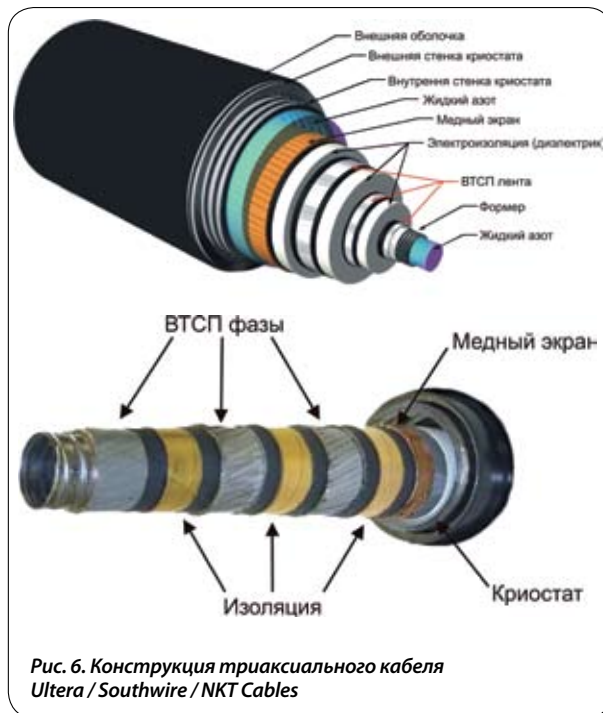


Рис. 6. Конструкция триаксиального кабеля Ultera / Southwire / NKT Cables

В августе 2006 года на подстанции в городе Колумбус, США, 200-метровый отрезок кабеля 13,2 кВ 69МВА данной конструкции был включен в потребительскую сеть, питающую более 8000 жилых домов и предприятий (рис. 7, 8). Примечательно, что номи-



Рис. 7. Монтаж ВТСП кабеля Ultera на подстанции Биксби, США



Рис. 8. Подключение ВТСП кабеля *Ultera* к сети (концевая муфта, ввод кабеля под землю) на подстанции Биксби, США

нальный ток кабеля 3000А является самым максимальным для ВТСП кабелей, находящихся сейчас в эксплуатации. Кабель был испытан на перегрузку в 16,4 кА при номинальном токе.

Компания Southwire задействована в программе «Проект Гидра», направленной на разработку и внедрение новой технологии безопасных энергосистем, основанных на ВТСП кабелях и токоограничителях, в сеть центра города Нью-Йорк, США. ВТСП ленту 2-го поколения для данного проекта производит компания AMSC. К 2010 году Southwire изготовит из нее триаксиальный кабель на 13,5 кВ и 4000А длиной 240 метров, кабель будет обладать токоограничивающим действием и эффективно снижать ударный ток короткого замыкания. Его установка будет осуществлена на участке энергосети Con Edison в Нью-Йорке.

Кроме отмеченных проектов *Ultera* планирует к 2011 году изготовить триаксиальный кабель с рабочим напряжением 13,8 кВ и передаваемой мощностью 60 МВА длиной уже в 1780 метров, который соединит две подстанции в районе центра города Нью-Орлеан, США, для решения проблем перегрузки. ВТСП кабель заменит собой существующий кабель на напряжение 230 кВ. КЛЭП выполнят в виде трех секциях с установкой соединительных муфт.

### NKT Cables

Ранее отмеченная компания NKT Cables известна не только по СП *Ultera*, но и по своим собственным объектам. Первый был реализован в мае 2001 года пуском в эксплуатацию ВТСП кабеля (с теплым диэлектриком) с рабочим напряжением 36 кВ, номинальным током 2000А и длиной 30 метров в действующей сети на подстанции в городе Копенгаген, Дания, питающего порядка 50000 потребителей (рис. 9 и 10). Кабель был отключен в 2003 году.

Последний проект компании выделяется длиной линии более чем в 4 километра, что уже приближается к промышленным образцам. В 2012 году NKT Cables планирует реализовать проект по замене трех существующих трехфазных газонаполненных линий 150 кВ в деловой части города Амстердам, Голландия, между двумя подстанциями. Две линии будут заменены кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, а одна линия будет заменена триаксиальным кабелем на рабочее напряжение 50 кВ с номинальным током 2900 А. Передаваемая мощность достигнет 250 МВА. Несмотря на длину линии, охлаждение кабеля будет осуществляться только на его концах, что связано с дефицита свободного пространства в существующей инфраструктуре, это усложнит работу над проектом, но в итоге позволит получить техническое решение в дальнейшем приемлемое для городских условий.

### Sumitomo Electric

Еще одной из ведущих компаний в области ВТСП кабеля является Sumitomo Electric Industry (SEI), Япония. В июне 2002 года совместно с токийской электроэнергетической компанией TEPSCO она закончила испытания первого трехфазного кабеля с размещением всех фаз в одном криостате с номинальным напряжением 66 кВ, номинальным током 1000 А и длиной 100 метров (рис. 11).

В 2005 году она поставила 100-метровый кабель 22,9 кВ 1250А этой конструкции корейскому исследовательскому институту электроэнергетики для



Рис. 9. Монтаж концевых муфт ВТСП кабеля NKT Cables на подстанции АМК, Дания



Рис. 10. Монтаж ВТСП кабеля NKT Cables длиной 30 метров на подстанции АМК, Дания



Рис. 11. Испытания ВТСП кабеля SEI, Япония

установки на испытательном полигоне, а в июле 2006 года совместно с компанией SuperPower (США) запустила в эксплуатацию кабель 34,5 кВ 800А длиной 350 м в городе Олбани, США, внутри городской застройки (рис. 12), состоящий из двух частей (320 метров и 30 метров).

Рис. 12. ВТСП КЛЭП 34,5 кВ (длиной 350 м) SEI в г. Олбани, США



В 2007 году отрезок кабеля длиной 30 метров был заменен на аналогичный, но изготовленный из ВТСП ленты 2-го поколения. Отметим, что этот проект стал первым ВТСП кабелем с соединительной муфтой (рис. 13). Конструкция концевой муфты представлена на рисунке 14.

Рис. 13. Соединительная муфта (до покрытия водонепроницаемыми лентами) ВТСП кабеля 34,5 кВ в г. Олбани



Выполненная конструкция (названная SEI «3-в-одном») весьма перспективна с точки зрения замены традиционных КЛЭП на ВТСП без прокладки новых туннелей, так как диаметр ВТСП кабеля близок диаметру обычных кабелей, что и было продемонстрировано на объекте в Олбани, где новая линия была проложена в существующем кабельном коллекторе (рис. 15) под автомобильной магистралью.

ВТСП кабель типа «3-в-одном» (см. рис. 16) состоит из:  
- центрального несущего элемента (формера) из пучка медных проволок;

Рис. 14. Концевая муфта для ВТСП кабеля 34,5 кВ SEI в г. Олбани

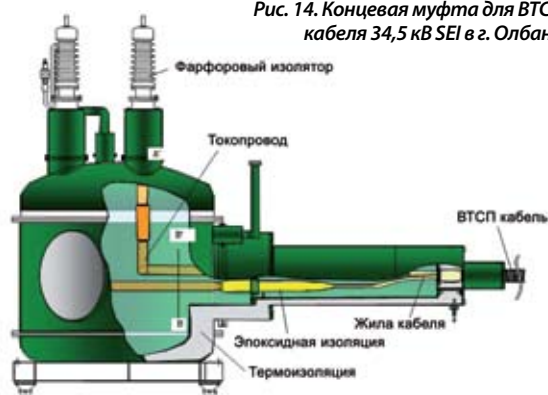


Рис. 15. Вход ВТСП кабеля SEI в коллектор в г. Олбани



- жилы из ВТСП лент;
- изоляции из полипропилена;
- сверхпроводящего экрана;
- наружного медного экрана.

Три фазы кабеля размещены в криостате с некоторой свободой для компенсации теплового расширения. Помимо обеспечения механической прочности ВТСП кабеля медный формер защищает ВТСП жилу от перегорания при переходе кабеля в нормальное (резистивное) состояние во время короткого замыкания. Гибкий криостат состоит из двух коаксиальных нержавеющей гофрированных труб пространство между которыми вакууммировано, и в нем располагается экранно-вакуумная теплоизоляция.

В состав системы криогенного охлаждения (рис. 17) входят азотный резервуар, насосы и термосифон, допускающий охлаждение азота как от двух микрофридженаторов (основной вариант), так и переохлажденным жидким азотом (резервный вариант).

После монтажа кабель подвергался высоковольтным испытаниям, заключающимся в постепенном увеличении напряжения, прикладываемому к каждому участку кабеля, до 100 кВ с шагом 10 кВ.

Управление всей системой выполняется дистанционно из эксплуатационного центра фирмы ВОО Group, изготовителя самой криогенной системы (рис. 18) расположенного за 1000 км от объекта. В процессе эксплуатации произошло одно короткое замыкание с током 7,5 кА, которое кабель выдержал без повреждений.

### Nexans

Совместно с AMSC компания Nexans (Германия), один из мировых лидеров кабельной промышленности, реализует проект по созданию трехфазной ВТСП кабельной линии на 138 кВ в сети Лонг Айленд (LIPA), Нью-Йорк, США. Линия имеет длину 660 метров и рассчитана на передачу мощности 574 МВА, что сравнимо с ЛЭП на 330 кВ. 28 июня 2008 года ознаменовалось торжественным пуском в эксплуатацию в коммерческой сети самой мощной на сегодняшний день ВТСП кабельной линии (рис. 19), включенной на нагрузку еще весной.

Каждая фаза линии (рис. 20) выполнена в отдельном криостате (кабель выполнен с по схеме с «холодным диэлектриком»). ВТСП материал изготавливался AMSC, скрутка кабеля проводилась на заводе Nexans в Норвегии (рис. 21).

Гибкие криостаты были произведены Nexans в Германии (рис. 22), между внутренними и внешними

Рис. 16. Конструкция кабель «3-в-Одном» компании SEI

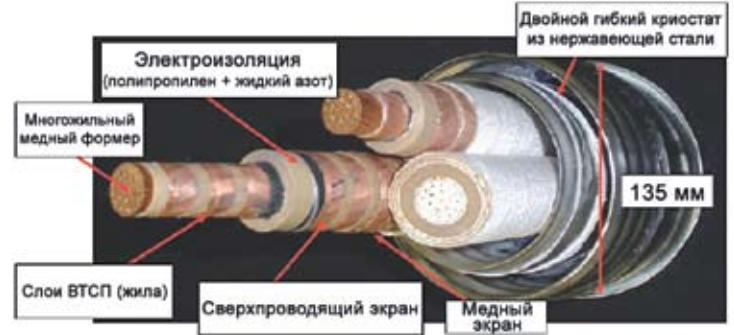


Рис. 17. Система криогенного обеспечения

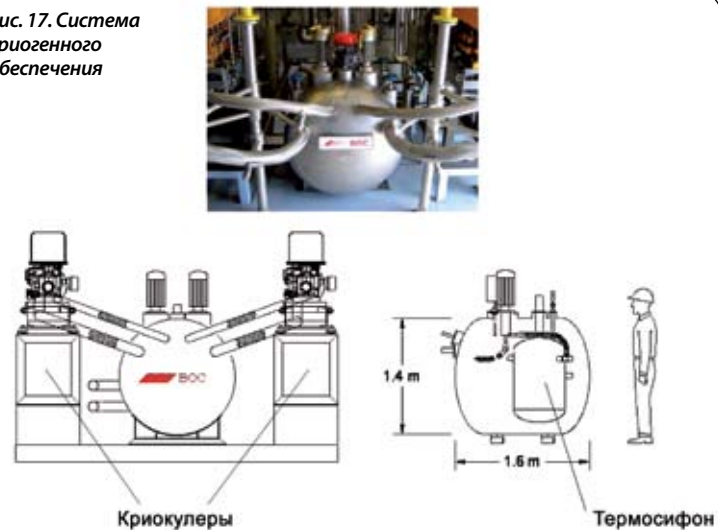


Рис. 18. Удаленный мониторинг системы криогенного обеспечения ВТСП КЛЭП в г. Олбани



оболочками которых наносилось несколько слоев отражающей алюминиевой фольги с прокладкой из стекло-волокна (т.н. экранно-вакуумной изоляции). Концевые муфты (рис. 23) были изготовлены на заводе Nexans во Франции. После доставки кабеля на объект проводилась протяжка фаз через криостаты,



Рис. 19. Терминал ВТСП кабеля 138 кВ Nexans в сети LIPA, США



Рис. 20. Конструкция 138 кВ ВТСП кабеля Nexans по проекту LIPA



Рис. 21. Этапы изготовления кабеля Nexans на напряжение 138 кВ



Рис. 22. Этапы изготовления гибкого криостата

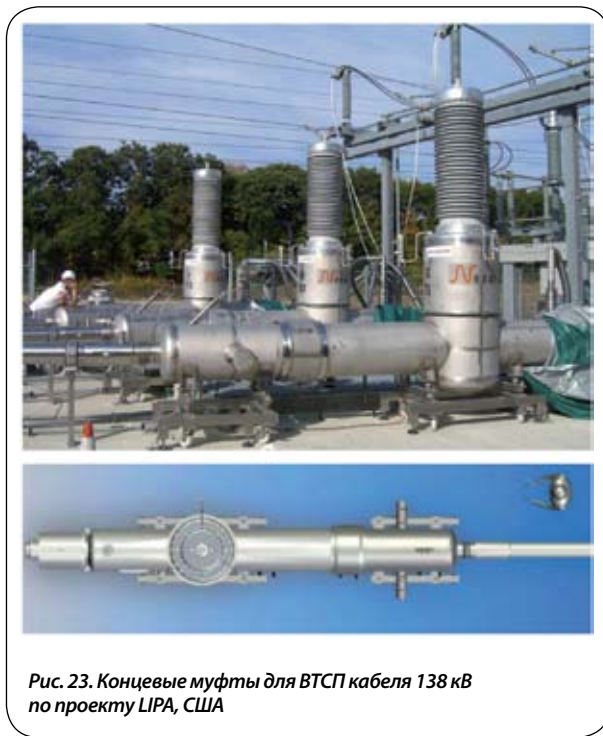


Рис. 23. Концевые муфты для ВТСП кабеля 138 кВ по проекту LIPA, США

после которой были выполнены монтаж муфт и криогенной системы обеспечения (рис. 24), соединение всех узлов между собой, вакуумная откачка и установка измерительной техники.

В начале 2008 года Nexans представила доклад, в котором приводились интересные данные по теплопритокам и тепловыделениям в ВТСП кабеле (рис. 25): основным источником тепла является теплоприток по гибкому криостату, затем следуют

потери в диэлектрике и гистерезисные потери в сверхпроводнике. Чем выше величина теплопритоков и тепловыделений в ВТСП кабеле, тем более мощной (а значит дорогой и энергопотребляющей) должна быть его система криогенного обеспечения.

В процессе работы находится проект LIPA-2 по замене одной фазы существующего ВТСП кабеля на кабель с ВТСП проводом 2-го поколения (выполне-

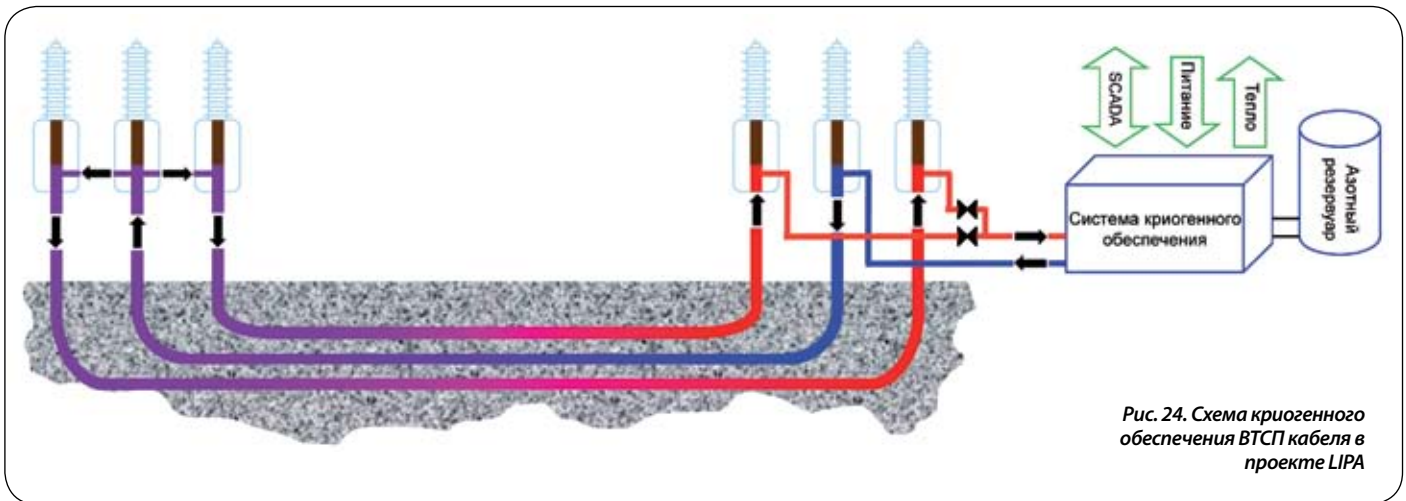


Рис. 24. Схема криогенного обеспечения ВТСП кабеля в проекте LIPA

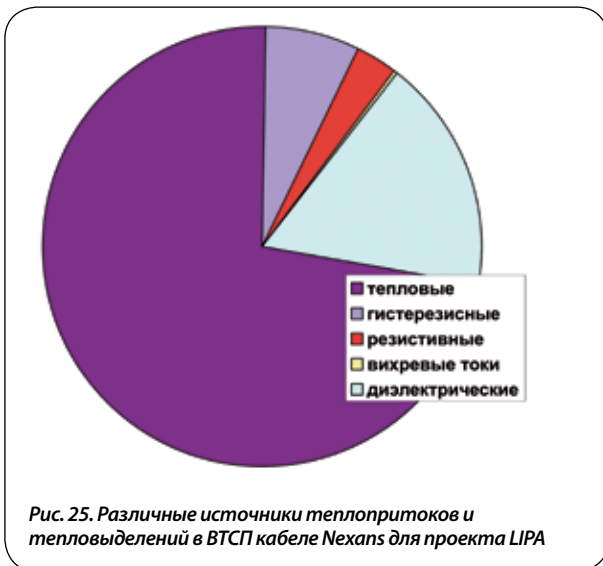


Рис. 25. Различные источники тепловыделений и тепловыделений в ВТСП кабеле Nexans для проекта LIPA

марту 2008 года были выполнены все поставленные к этому сроку задачи: был подготовлен испытательный полигон для испытаний ВТСП оборудования на напряжение до 110 кВ (в том числе ВТСП кабелей длиной до 200 метров), изготовлены кабель длиной 30 метров на номинальное напряжение 20 кВ и вводные муфты. В 2009 году предусматривается ввод в опытно-промышленную эксплуатацию ВТСП кабеля длиной от 200 до 500 метров, а к 2011 году ввод в эксплуатацию кабель длиной более 1 км в схемах электроснабжения Москвы.

Целью проекта кабеля 30 метров является отработка технических решений для создания опытно-промышленного образца ВТСП кабеля. Конструкция кабеля (рис. 26), подразумевает трехфазное исполнение с расположением каждой фазы в отдельном криостате, разрабатывалась в соответствии со следующими техническими требованиями:

ние всех работ планируется завершить в первой декаде 2010 года). Основными отличиями от проекта LIPA будут:

- возможность ограничения тока короткого замыкания самим кабелем (при повышении током критического значения у ВТСП проводника практически мгновенно появляется высокое удельное сопротивление);
- установка соединительной муфты 138 кВ;
- легко-разборный криостат, позволяющий проводить ремонт фазы без ее полного демонтажа;
- более эффективная и менее дорогая система криогенного обеспечения.

**ВНИИКП**

ОАО «ВНИИКП» и ОАО «НТЦ электроэнергетики» (Россия) участвуют в разработке, испытаниях и производстве ВТСП кабеля согласно упоминавшейся в начале статьи программе ОАО РАО «ЕЭС России». К



Рис. 26. Конструкция ВТСП кабеля ОАО «ВНИИКП»: 1,2,3 — формер; 4, 5, 6, 7 — ВТСП жила (два повода); 8, 9, 10 — изоляция; 11 — экран; 12, 13, 14, 15, 16 — криостат (внутренняя гофрированная труба, тепловая изоляция, внешняя гофрированная труба); 17 — защитная оболочка

- номинальный ток — 1500 А
- допустимая перегрузка по току в течение 6 часов — 30%
- установившееся значение тока трехфазного короткого замыкания в кабеле — от 12,5 до 31,5 кА.

При изготовлении кабеля применялись ВТСП ленты производства AMSC и SEI (для исследования технологичности различных лент). Для изучения теплопритоков в гибких криостатах с различной толщиной экранно-вакуумной изоляции были использованы криостаты Nexans с различными внешними диаметрами (110 мм и 92 мм). Для изучения различных подходов к конструированию концевых муфт и определения оптимального варианта их конструкции были изготовлены два варианта: разработки РНЦ «Курчатовский институт» (рис. 27) и НИИЭФА им. Д. Ф. Ефремова (рис. 28). Согласно техническому заданию, муфты должны выдерживать перегрузки по току до 4 кА, их электрическая изоляция должна выдерживать перенапряжения до 70 кВ в течение 1 минуты.

ВТСП кабель был изготовлен с использованием производственных мощностей «ВНИИКП». Вначале

был изготовлен формер, представляющий собой нержавеющую спираль с наложенными пучками медных проводов и обмотанных медной лентой. Поверх формера наматывалось два повива ВТСП лент (рис. 29), после чего кабель был отправлен на завод «Камкабель», где было произведено его изолирование (рис. 30) и наложение медного экрана. После изолирования кабель был возвращен во ВНИИКП, где были напаяны наконечники для соединений с концевыми муфтами, после чего фазы кабеля были затянuty в криостаты и подготовлены к монтажу на полигоне.

Рис. 27. ВТСП кабельная концевая муфта производства РНЦ «Курчатовский институт»



Рис. 28. ВТСП кабельная концевая муфта производства НИИЭФА им. Д. Ф. Ефремова



Рис. 29. Укладка повивов ВТСП лент

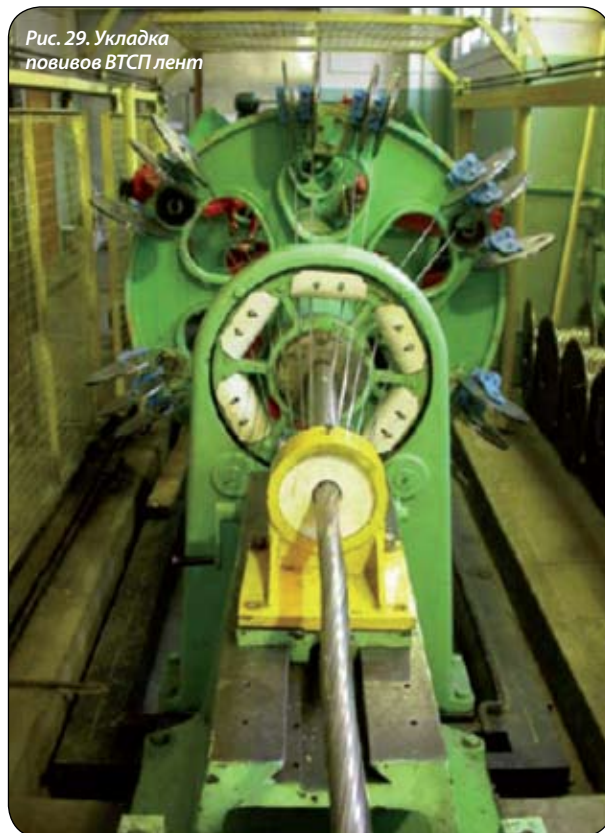


Рис. 30. Изолирование ВТСП кабелей



Приятно отметить, что испытательный стенд в «НТЦ электроэнергетики» будет обладать уникальными возможностями для испытания ВТСП кабелей и другого оборудования под полной нагрузкой, чего нет ни в одной зарубежной испытательной лаборатории.

Сейчас ВТСП кабель уже смонтирован на испытательном стенде, проведены измерения его критического тока и криогенные испытания. Затем последуют нагрузочные испытания, в ходе которых будет исследоваться длительная работа кабеля с номинальным током и напряжением, изучено поведение кабеля при коротких замыканиях, а также исследована работа кабеля при кратковременных перегрузках по току и работа кабеля при отключении криогенной системы.

### Китай — InnoPower и «Электротехнический институт китайской академии наук»

Совместно с Nexans, предоставившей гибкие криостаты, компания InnoPower (Китай) изготовила трехфазный ВТСП кабель с теплым диэлектриком 35 кВ 121 МВА с длиной 30 метров. Кабель (рис. 31) состоит из нержавеющей стальной оболочки, через которую прокачивается жидкий азот. На оболочку намотаны для слоя ВТСП ленты.

Каждая фаза размещена в собственном криостате. Азот также пропускается между ВТСП кабелем и внутренней стенкой криостата. Электрическая изоляция выполнена из сшитого полиэтилена. Внешний диаметр кабеля составляет 112 мм. Кабель установлен на подстанции в сети China Southern Power Grid, провинция Юннань (рис. 32) и находится в работе с 2004 года. В процессе эксплуатации происходило несколько аварий системы криогенного обеспечения.

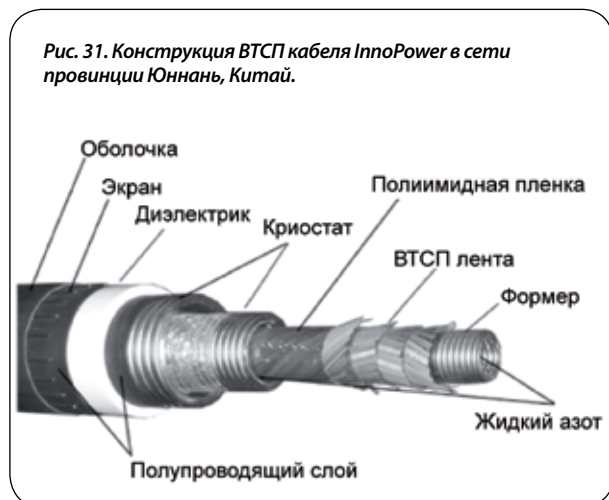


Рис. 31. Конструкция ВТСП кабеля InnoPower в сети провинции Юннань, Китай.



Рис. 32. ВТСП кабель 35 кВ InnoPower в сети China Southern Power Grid, Китай

С декабря 2004 года в опытно-промышленной эксплуатации находится ВТСП кабель, изготовленный «Электротехническим институтом китайской академии наук» совместно с AMSC. Конструкция данного кабеля также выполнена с теплым диэлектриком. Номинальное напряжение кабеля 6,6 кВ, длина — 75 метров. Кабель питает завод компании Changtong Power Cable в городе Байин.

### Прочие

Помимо вышеуказанных реализованных и предстоящих проектов есть и ряд других:

- однофазный ВТСП кабель (рис. 33, 34) производства Furukawa Electric, Япония, на напряжение 77 кВ и передаваемую мощность 77 МВА, длиной 500 метров.
- трехфазный кабель 22,9 кВ 50 МВА длиной 30 метров и 100 метров, выполненный компанией LS Cable, Корея. Конструкция кабеля аналогична разработкам Sumitomo Electric. Следующим шагом компания видит изготовление 100-метрового отрезка кабеля на 154 кВ и 1000 МВА.
- Condumex, Мексика, завершает изготовление трехфазной кабельной линии 15 кВ с теплым диэ-



Рис. 33. Конструкция ВТСП кабеля 77 кВ Furukawa Electric



Рис. 34. Испытательный полигон для ВТСП кабеля Furukawa Electric

лектриком (длиной 33 метра) для установки на подстанции в г. Мехико.

### КОНЦЕПЦИИ ВТСП кабель постоянного тока

ВТСП кабель постоянного тока пока мало рассматривается разработчиками. До сих пор еще не был изготовлен ни один опытно-промышленный образец КЛЭП постоянного тока, пока существуют лишь несколько лабораторных макетов, самым пред-

Рис. 35. Конструкция ВТСП кабеля постоянного тока 20 кВ Chubu University



ставительным из которых можно назвать кабель Chubu University, Японии, созданный в 2006 году. Номинальное напряжение кабеля составляет 20 кВ, номинальный ток 2200 А.

Конструкция кабеля схожа с конструкцией ВТСП кабелей переменного тока (рис. 35). В центре расположен скрученный из медных проводов формер, принимающий механические нагрузки, которые испытывает кабель при изготовлении и прокладке. Поверх формера нанесен слой электрической изоляции, на которую намотан первый повив ВТСП лент. Далее наложены изоляция, диэлектрическая прочность которой составляет 30 кВ, медный экран и защитная оплетка. Внешний диаметр кабеля составляет 40 мм.

По оценкам разработчиков Chubu University, применение ВТСП кабелей постоянного тока с номинальным напряжением 20 — 30 кВ несет ощутимые выгоды, т.к. стоимость преобразовательных агрегатов данного класса напряжения существенно ниже, чем для высоковольтных устройств, кабель на постоянном токе компактнее. Кроме того, в ВТСП кабелях постоянного тока отсутствуют потери на переменном токе, которые являются одним из основных источников теплопритоков, что снижает габариты криогенной системы.

В России работы над ВТСП кабелем постоянного тока ведутся в ГУАП (Санкт Петербург), однако, они находятся еще на начальной стадии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, просмотрев настоящие проекты ВТСП КЛЭП, можно с уверенностью сказать, что новая технология шаг за шагом приближается к промышленному применению. Радует, что все больше разработчиков и потребителей подключаются к выполнению этих проектов. Будем надеяться, что ничто не помешает реализовать планы по внедрению ВТСП линий в энергетику.

Для заинтересовавшихся вышеописанными разработками приглашаем посетить сайт информационного бюллетеня «Сверхпроводники для электроэнергетики», лучшего русскоязычного информационного ресурса по сверхпроводниковым технологиям (материалы, кабели, генераторы, накопители энергии, трансформаторы, токоограничители): <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/>

Елагин Павел Вячеславович — инженер, ООО «Росполь-Электро»;  
Щербаков Владимир Игоревич — редактор бюллетеня «Сверхпроводники в энергетике»