



Статья

## Разработка ВТСП кабельных линий для систем вывода мощности от источников генерации и протяженных линий передачи энергии

О. А. Ковальчук<sup>1</sup>, Г. В. Муравьев<sup>1</sup>, В. И. Никишкин<sup>1</sup>, В. С. Овсянников<sup>1</sup>, И. Ю. Родин<sup>1</sup>, Д. Б. Степанов<sup>1</sup>, М. В. Дубинин<sup>2</sup>, А. В. Кашеев<sup>2</sup>, В. Е. Сытников<sup>2\*</sup>.

1 АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

2 АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, Россия

\* e-mail: vsytnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.04.24, после переработки 30.04.24, принята к публикации 05.07.24.

В статье рассмотрены общие подходы к разработке ВТСП кабельных линий для протяженных линий передачи энергии и систем вывода мощности от источников генерации, как части нового технологического уклада энергетической отрасли. Использование эффекта сверхпроводимости позволяет достичь уровней передаваемой мощности 0.5-2.0 ГВА и более без существенного увеличения массогабаритных характеристик с одновременным снижением потерь энергии. Приведены результаты теоретических оценок, показывающих возможность снижения потерь энергии до уровня не более 3% от передаваемой мощности и создания ВТСП линий энергопередачи длиной до 100 км. Показано, что наработанный опыт позволяет приступить к реализации пилотных проектов, использующих сверхпроводящие кабельные линии, однако подобные разработки потребуют учета множества факторов, включая инфраструктурные технические и экономические аспекты.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник; кабельная линия; криостат; энергопередача; токопровод; генерация; криоагент.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-2-14-30

### 1. Введение

Существенный прогресс в разработке сильноточных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) привел к заметной активизации разработок по созданию сильноточных сверхпроводящих кабельных линий переменного и постоянного тока. Работы по этому направлению включены в программы инновационного развития ведущих организаций энергетической отрасли, таких как ГК «Росатом» и ПАО «Россети».

Использование ВТСП кабелей в системах вывода энергии и линиях электропередачи позволяет достичь уровней передаваемой мощности 0.5-2.0 ГВА без существенного увеличения массогабаритных характеристик с одновременным снижением потерь энергии. Использование эффекта сверхпроводимости позволяет при неизменной мощности снизить габариты кабелей, а также исключить промежуточные ступени трансформации, поскольку мощность, передаваемая по ВТСП кабелю, наращивается за счет увеличения тока кабеля, а не его напряжения.

В США, Японии, Южной Кореи и ряде европейских стран, включая Российскую Федерацию, активно ведутся работы по созданию и внедрению промышленных технологий изготовления и использования ВТСП. Достигнутый уровень линейной критической плотности токов до 40 - 50 А/мм ширины ВТСП ленты при 77 К и постоянная тенденция к снижению стоимости ВТСП открывают новые перспективы в решении вопросов передачи больших потоков энергии как на короткие, так и на дальние расстояния. В настоящее время в США, Японии, Дании, Китае, России и других странах образцы ВТСП кабелей длиной 30-1000 м проходят опытно-промышленную проверку в энергосетях [1-5]. Проектируются кабельные линии длинами в несколько километров и передаваемой мощностью до 1000 МВт.

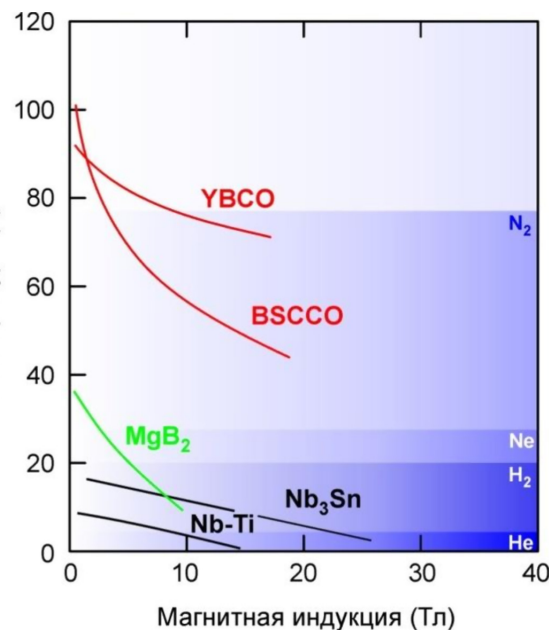
Привлекательность технико-экономических показателей проектов, использующих

ВТСП кабели, определяется возможностью передачи больших мощностей при пониженном напряжении, высокой токонесущей способностью используемых ВТСП, сниженной величиной потерь энергии и экологически безопасной системой электроизоляции. Для магистральных линий электропередачи следует дополнительно упомянуть такие очевидные преимущества сверхпроводящих кабелей, как минимизация площадей землеотвода, снижение требований по прокладке кабельной линии, отсутствие тепловых и электромагнитных полей рассеяния, пожаробезопасность и практическое исключение процессов старения изоляции. Для систем вывода мощности, таких как генераторные токопроводы АЭС, главным становится практическое исключение омических потерь, увеличенный ресурс и упрощение технического обслуживания.

## 2. Сверхпроводящие материалы

Рабочими элементами любого сверхпроводникового устройства являются сверхпроводящие материалы. Более чем 110-летний опыт создания сверхпроводников обеспечил широкую номенклатуру, которая используется при создании сверхпроводниковых устройств и оборудования различного назначения.

На рис. 1 в виде зависимостей критических температур сверхпроводящего перехода от индукции внешнего магнитного поля показаны области существования сверхпроводимости для различных материалов.



**Рис. 1.** Области существования сверхпроводимости в сверхпроводящих материалах, обладающих практическим значением, в зависимости от температуры и индукции магнитного поля [6].

Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) на основе сплава NbTi и интерметаллического соединения Nb<sub>3</sub>Sn используются более 60-ти лет, обеспечив развитие экспериментальной и промышленной базы прикладной сверхпроводимости. Ограниченность применения, связанная с использованием жидкого (4.26 К) или газообразного гелия в качестве основного криоагента, не помешала обеспечить коммерческое применение сверхпроводимости в томографии и других применениях, требующих сильных магнитных полей. Однако активное развитие и прикладное применение эффекта сверхпроводимости для энергопередачи стало возможным только после начала промышленного выпуска сверхпроводников, работающих в среде жидкого азота (77.35 К).

В настоящее время известны десятки ВТСП на базе оксидных соединений, демонстрирующих сверхпроводимость при температурах выше 77 К. Однако, по-

сле многих лет поисков, в ВТСП устройствах применяются лишь два соединения:

- ВТСП-1 (первого поколения) с  $T_c=105-120$  К, формула  $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  или  $(Bi,Pb)_2Sr_2CaCu_2O_x$  условные наименования G-1, BSCCO 2223 или BSCCO 2212;
- ВТСП-2 (второго поколения) с  $T_c=90-92$  К, формула Y(или RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>, условные наименования G-2, YBCO или REBCO.

Созданные технологии позволяют производить ВТСП ленты толщиной 0.05–0.5 мм и величиной критического тока при температуре жидкого азота 25–50 А/мм ширины. Данные рисунка 1 наглядно демонстрируют, что использование ВТСП, охлаждаемого жидким азотом, способно обеспечить существенное повышение энергетической и экономической эффективности кабелей. При этом следует отметить, что жидкий азот, используемый для охлаждения ВТСП, является прекрасным диэлектриком, что позволит говорить о возможности создания систем изоляции, способных обеспечить импортозамещение существующих решений, использующих элегаз.

### 3. Системы вывода мощности АЭС с использованием сверхпроводимости

Обязательность условия размещения АЭС на больших расстояниях от крупных городов и потребителей электроэнергии приводит к необходимости решения задачи вывода больших потоков энергии с территории станции. Традиционная схема выдачи мощности АЭС предполагает использование токопроводов на генераторном напряжении, трансформаторов и высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) на напряжение 220-750 кВ, обеспечивающих оптимизацию капитальных затрат и минимизацию потерь энергии при её транспортировке. Необходимость строительства в составе АЭС высоковольтных повышающих подстанций кабельных ЛЭП, часто с элегазовой изоляцией, ведет к отчуждению значительных земельных участков и существенным (6-8 %) потерям энергии при транспортировке.

На рис. 2 в качестве примера показана блок-схема АЭС и отмечены участки, где возможно эффективное использование ВТСП кабельных линий. Это генераторные токопроводы (1), обеспечивающие передачу мощности от шин генератора до повышающего трансформатора, и линия электропередачи (2) от трансформатора к распределительному устройству.

#### 3.1. ВТСП генераторные токопроводы

Возможность использования ВТСП кабелей переменного тока позволяет говорить о разработке и внедрении в практику нового поколения генераторных токопроводов (ГТ) – электрического соединения шин турбогенератора с первичной обмоткой повышающего трансформатора (поз. 1 на рис. 2).

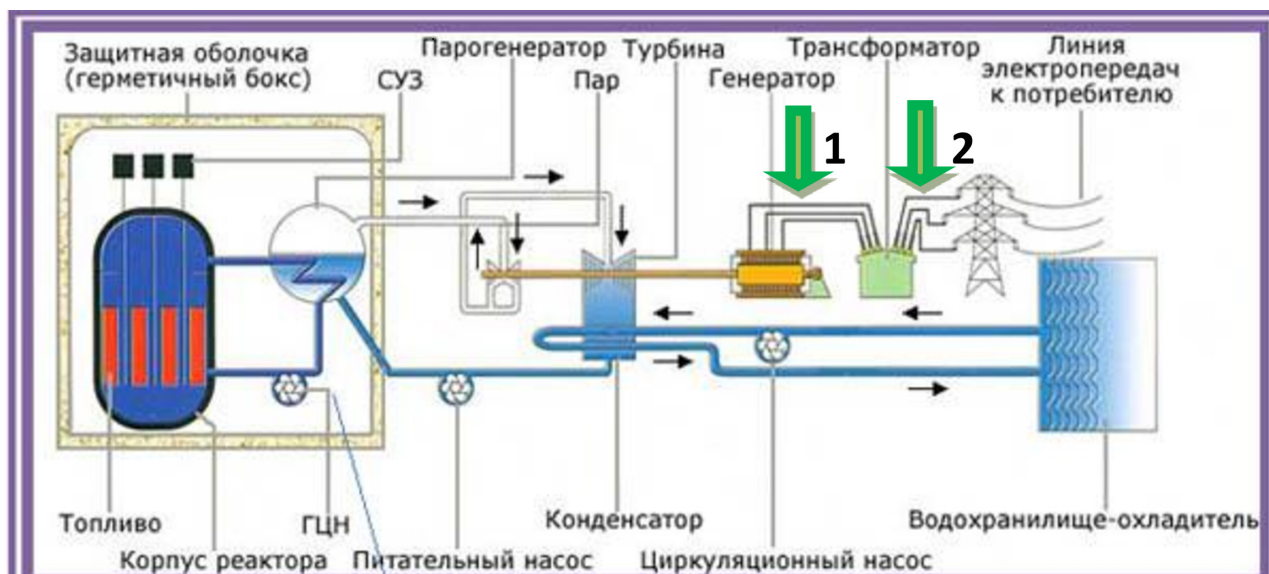
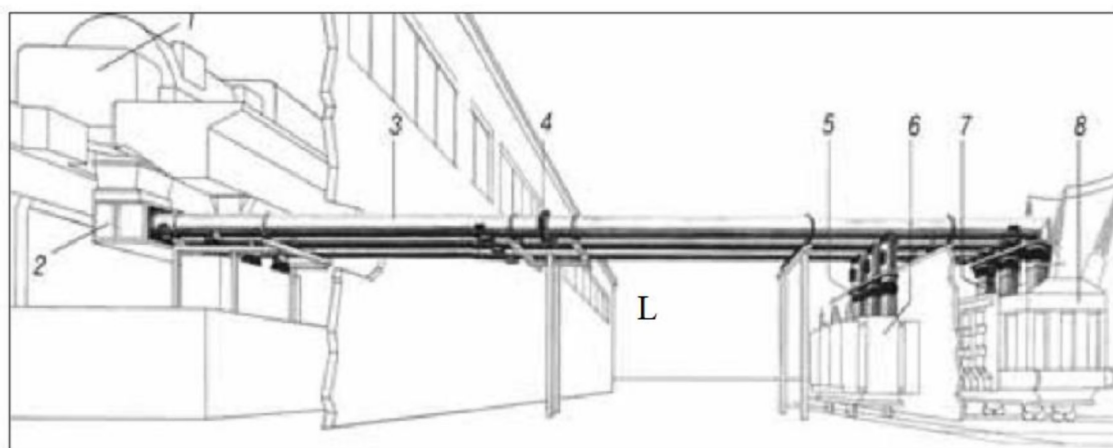


Рис. 2. Блок-схема АЭС и участки возможного использования ВТСП кабельных линий

При этом следует иметь в виду, что выходные характеристики турбогенераторов мощностью 200–1200 МВА составляют по напряжению от 10 до 35.0 кВ, а по току от 1.6 до 33 кА. Указанные значения напряжений не критичны для ВТСП кабелей, но высокие значения токов могут потребовать создания двухцепных или даже трёхцепных линий переменного тока. Это связано с тем, что потери энергии (тепловыделения) в ВТСП кабеле переменного тока резко возрастают с увеличением связанной с током напряжённости собственного магнитного поля на поверхности ВТСП лент.

В случае автономных АЭС сверхпроводящие кабели могут использоваться для выдачи мощности в собственную сеть на генераторном напряжении. Для этого в составе АЭС необходимо предусмотреть генераторное распределительное устройство. В ряде случаев в автономных сетях на базе ВТСП кабелей могут создаваться кольцевые схемы, существенно повышающие надёжность электроснабжения.

Длина  $L$  для ГТ действующих АЭС не превышает нескольких сотен метров (рис. 3), однако возможность снижения на порядки удельных потерь энергии позволяет говорить о перспективах внедрения ВТСП ГТ.



**Рис. 3.** Пример размещения ГТ на АЭС: 1 – турбогенератор, 2 – узел подсоединения ГТ к генератору, включая блок нуля генератора, 3 – главный токопровод, 4 – компенсатор линейных расширений, 5 – токопровод ответвлений на трансформатор СН, 6 – трансформатор СН, 7 – узел подсоединения ГТ к силовому трансформатору, 8 – трансформатор повышающий.

В качестве примера в таблице 1 приведены оценочные значения снижения удельных потерь Руд на фазу при номинальном токе в случае использования ВТСП ГТ на Ленинградской АЭС.

**Таблица 1.** Оценочные значения снижения удельных потерь на фазу при номинальном токе в случае разработки ВТСП ГТ для Ленинградской АЭС.

Тип токопровода	Удельные потери на фазу при номинальном токе, Руд, Вт/пог. м
ТЭНЕ-24-24000(25 кА, 24 кВ)	1330
ВТСП ГТ (25 кА, 24 кВ)	30
ВТСП ГТ (50 кА, 24 кВ)	60

Для усредненных данных энергоблока ЛАЭС-2 (1250 МВА, 24 кВ, 300 м) подобное снижение удельных потерь означает экономию нескольких десятков миллионов рублей в год.

Большая часть технических характеристики ВТСП ГТ, включая требования к узлам

подсоединения, аналогичны характеристикам нормальнопроводящего варианта. Ряд общих и специфических требований к ВТСП ГТ могут быть сформулированы следующим образом:

- возможность работы в режиме КЗ и в режиме ограничения токов КЗ;
- наличие в конструкции используемого сверхпроводящего ВТСП-2 кабеля тепловой вакуумной изоляции, при этом электрическая прочность данной конструкции должна соответствовать номинальному напряжению сети;
- обязательное оснащение сверхпроводящего ВТСП-2 кабеля выводом заземления из азотной ванны и присоединением к главному контуру заземления станции;
- в случае перехода сверхпроводника в нормальное состояние конструкция ВТСП ГТ должна обеспечивать вывод номинального тока из ВТСП-2 кабеля в нормальнопроводящий токопровод;

Блок схема системы генерации АЭС с ВТСП ГТ приведена на рис. 4.

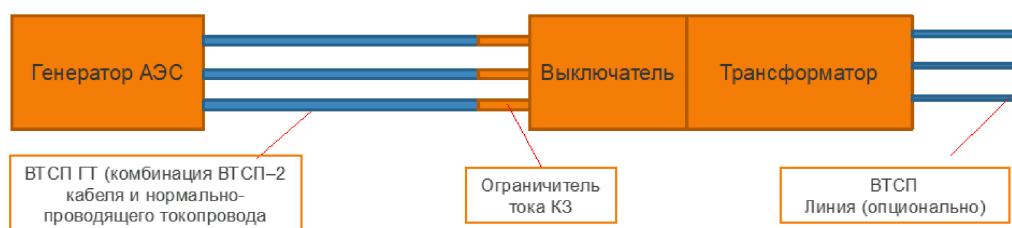


Рис. 4. Блок схема системы генерации АЭС с ВТСП ГТ.

Следует отметить, что для ограничения тока КЗ возможно использование сверхпроводящего токоограничивающего устройства (СТОУ) резистивного или индуктивного типа. Данное устройство опционально и может быть предметом отдельной разработки.

Предлагаемая конструкция ВТСП ГТ приведена на рис. 5. Ряд элементов, включая элементы подсоединения нормально- и сверхпроводящей частей к фазной шине генератора, показаны условно.

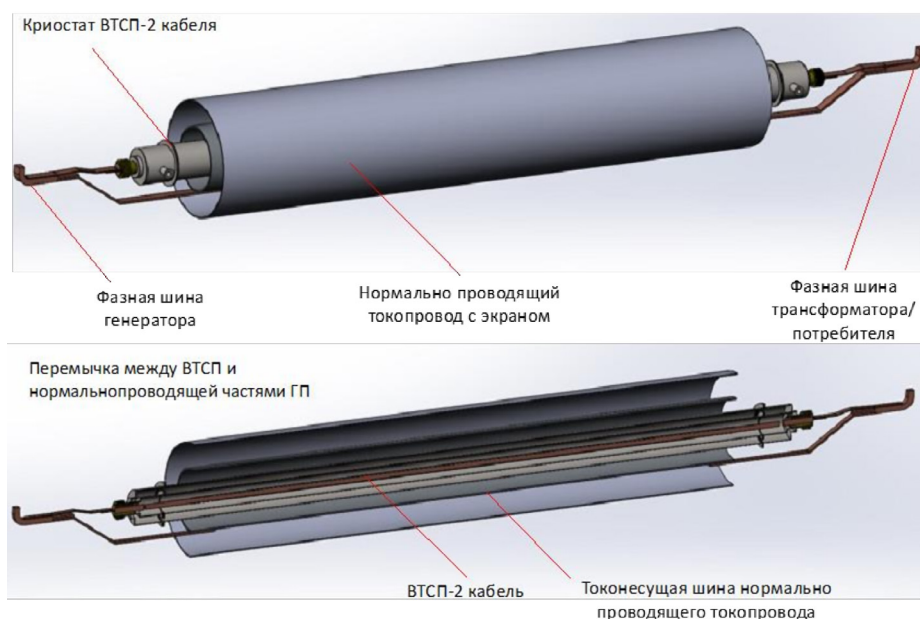


Рис. 5. Один из вариантов конструкции ВТСП ГТ.

### 3.2. Экспериментальный образец сверхпроводящей фазы токопровода

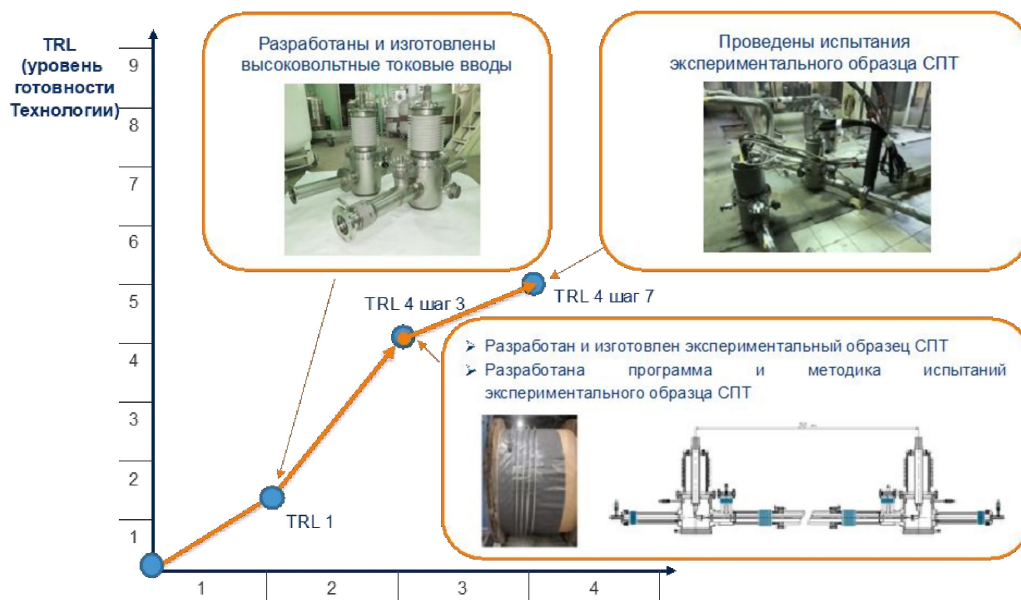
В целях подтверждения возможности разработки полномасштабных ВТСП ГТ в АО «НИИЭФА» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в 2019-2021 годах была реализован проект «Разработка высокотемпературных сверхпроводящих систем вывода энергии энергоблоков электростанций. В рамках НИОКР был разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец сверхпроводящей фазы токопровода (прообраза ВТСП ГТ).

Основные технические характеристики экспериментального образца приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Основные технические характеристики экспериментального образца сверхпроводящей фазы токопровода (прообраза ВТСП ГТ).

<b>Номинальный ток, А</b>	4 200 (Амплитудное - 5940)
<b>Номинальное напряжение, кВ</b>	24
<b>Масса, кг/пог. м</b>	~12, на одну фазу
<b>Потери, Вт/пог. м</b>	~15, на одну фазу

На рис. 6. в виде диаграммы приведены основные результаты НИОКР по годам реализации.



**Рис. 6.** Результаты НИОКР в подтверждение концепции ВТСП ГТ

Завершающие испытания на максимальные параметры были выполнены в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» на специализированном полигоне для испытаний сверхпроводящего оборудования для электроэнергетики.

Заявленные технические характеристики экспериментального образца сверхпроводя-

щей фазы токопровода были полностью подтверждены. Дополнительно были исследованы режимы захлаживания/отогрева образца и получены данные для последующего ОКР по созданию опытного образца.

### 3.3. ВТСП линия электропередачи от трансформатора к распределительному устройству

На современных атомных станциях линии электропередачи от трансформатора к распределительному устройству представляют собой сложные электротехнические сооружения, в конструкции которых применяются самые современные разработки в области токопроводящих систем для электроэнергетики.

Примером может служить использование газоизолированных линий (ГИЛ), использующих в качестве изоляции элегаз (гексафторид серы  $SF_6$ ). Токопроводы ГИЛ предназначены для передачи электрической энергии на напряжения от 110 кВ до 1200 кВ, с номинальным значением тока до 8000 А. На рис. 7 приведена фотография части элегазовых токопроводов длиной более одного километра, которые соединяют здания турбин первого и второго энергоблоков ЛАЭС с комплексным распределительным устройством (КРУЭ) 330 кВ.

С элегазом, который обеспечивает конкурентные преимущества токопроводов ГИЛ, связаны и недостатки подобных систем, главными из которых являются сложность эксплуатации и обслуживания из-за высокой текучести  $SF_6$ , а также потенциальная опасность для обслуживающего персонала и окружающей среды от веществ, возникающих в результате возможных электрохимических реакций.



Рис. 7. Участок токопроводов ГИЛ на напряжение 330 кВ, используемых на ЛАЭС.

ВТСП линии электропередачи, основным изолятором которых является инертный азот  $N_2$  в жидкой и газовой фазах, могут стать очередным шагом развития систем вывода мощности как АЭС, так и других энергопроизводящих объектов. Безопасность, практическое отсутствие омических потерь, изменение в сторону упрощения условий эксплуатации и обслуживания и, главное, возможность почти полного импортозамещения - очевидные конкурентные преимущества, которые, при прочих равных, делают возможным и выгодным внедрение ВТСП линий электропередач в практику проектантов и строителей АЭС в качестве замены элегазовых токопроводов. Одновременно появится возможность разработки и внедрения сопутствующего

оборудования, например, отечественных размыкателей с аналогичными решениями в части замены элегаза на азот.

#### 4. Сверхпроводящие магистральные линии электропередачи

В настоящее время сверхпроводниковые технологии достигли уровня, позволяющего создавать и использовать в реальных электросетях системы передачи энергии длиной в несколько километров. В таблице 3 представлен перечень реализованных и реализуемых в настоящее время проектов, а также перечень рассматриваемых перспективных проектов дальних передач с использованием сверхпроводящих кабелей.

Полная длина российской ВТСП линии была испытана на криогенном полигоне АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в г. Москва. В 2023 году закончился монтаж линии в Санкт-Петербурге. Измеренный критический ток прямого и обратного провода линии составил не менее 3500 А при проектном номинальном токе 2500 А.

**Таблица 3.** Реализованные/реализуемые проекты дальних передач с использованием сверхпроводящих кабелей.

Проект	Длина, м	Мощность, МВА
Реализованные и реализуемые проекты		
AmpaCity (Эссен, Германия)	1000	40
Ishikari (Япония)	1000	50
LIPA (США)	600	69
Yokohama (Япония)	250	200
JoJu (Южная Корея)	500	60
Shanghai (Китай)	1200	130
Санкт-Петербург (Россия)	2500	50
Перспективные проекты (км)		
Best Paths (Европа)	до 1000	до 3200
Scarlet (Европа)	20-50	500-1000
Superlink (Германия)	12	500
Университет Чубу (Япония)	50-100	500

Следует отметить, что среди реализуемых проектов Российский проект ВТСП кабельной линии имеет рекордную на сегодняшний день протяженность [7]. Характеристики линии приведены в таблице 4.

**Таблица 4.** Характеристики ВТСП линии постоянного тока.

Используемый сверхпроводник		ВТСП	
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 метров	Расход жидкого азота	0.1 ÷ 0.6 кг / сек

Ниже представлены оценки возможных характеристик будущих ВТСП магистральных линий на основе результатов исследований, полученных в рамках данного и других проектов [6].



При оценке возможной максимальной длины будем рассматривать только линии постоянного тока, так как любые кабельные линии переменного тока имеют ограничение по длине вследствие возникновения зарядных токов, которые приводят к снижению активной мощности на дальнем конце линии. Известно, что:

$$I_3 = U\omega CoL, \quad (1)$$

где  $I_3$  – зарядный ток,  $U$  – фазное напряжение,  $\omega$  – круговая частота,  $Co$  – ёмкость на единицу длины,  $L$  – длина линии.

Примем за условную критическую длину линии расстояние, на котором рабочий ток линии уменьшится в два раза. Тогда критическая длина линии будет равна:

$$L_K = \frac{I_H}{2U\omega Co}, \quad (2)$$

где  $L_K$  – критическая длина линии,  $I_H$  – номинальный ток.

Подставляя известные параметры существующих и будущих проектов, приходим к выводу о том, что возможная максимальная длина используемых на практике кабельных линий переменного тока не должна превышать нескольких десятков километров.

Структура ВТСП кабельной линии постоянного тока представлена на рис. 8. Кроме ранее упомянутого отсутствия ограничений на длину электромагнитной природы, стоит упомянуть и другие существенные преимущества по сравнению с линиями переменного тока, а именно:

- отсутствие потерь энергии в сверхпроводнике;
- отсутствие необходимости синхронизации работы генератора с сетью;
- уменьшенная нагрузка на криогенную систему;
- уменьшенный расход сверхпроводящих материалов, следовательно, меньшая стоимость кабельной системы;
- отсутствие падения напряжения по длине ВТСП линии;
- отсутствие нежелательных воздействий на турбогенератор со стороны сети.

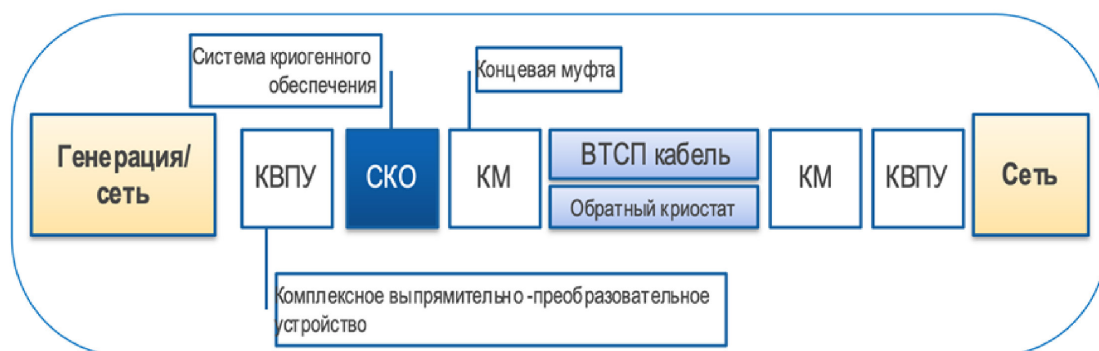


Рис. 8. Структура линии постоянного тока

В передаче постоянного тока появляется дополнительный элемент – комплексная вентиляционная преобразовательная установка (КВПУ), выполняющая функции выпрямителя со стороны генерации и инвертора со стороны сети. Производство таких установок хорошо освоено отечественной и мировой промышленностью, и они являются достаточно надёжными.

В каждом конкретном случае выбор между сверхпроводящими линиями постоянного и переменного тока будет определяться: длиной линии, передаваемой мощностью, инфраструктурой примыкающих сетей и экономическими соображениями.

#### 4.1. Возможные уровни передаваемой мощности по ВТСП кабельной линии постоянного тока

Проведём техническую оценку современных возможностей создания протяжённых линий передачи на основе охлаждаемых жидким азотом сверхпроводящих кабельных линий по следующим параметрам:

- возможные уровни передаваемой мощности при различных классах напряжения;
- потери энергии в линии как функция передаваемой мощности и длины;
- охлаждение линии с определением максимального расстояния между криогенными станциями по длине линии.

Возможный уровень передаваемой мощности при различных напряжениях оценим, исходя из характеристик современных сверхпроводящих материалов. При величине конструктивной критической плотности тока равной 200 - 400 А/мм<sup>2</sup> [8] реально создание кабелей постоянного тока с номинальным током 10.0 – 20.0 кА. Кабели с рабочим током в 10.0 кА уже созданы [2, 9].

Примем для приведенных в таблице 5 оценок рабочий ток равным 15.0 кА.

**Таблица 5.** Мощность, передаваемая по ВТСП линии постоянного тока

Напряжение передачи, кВ	Монополярная передача, МВт		Биполярная передача, МВт	
	Одна линия	Две линии	Одна линия	Две линии
50	750	1500	1500	3000
70	1050	2100	2100	4200
100	1500	3000	3000	6000

Для увеличения надёжности передачи целесообразно рассматривать передачу по двум параллельным линиям, т.е. в двухцепном исполнении. Как видно из таблицы 5, мощность порядка 6000 МВт может быть передана в сеть уже при напряжении 100 кВ при биполярной передаче. При этом для осуществления передачи потребуется только 2 - 4 кабеля. Высокая плотность тока в сверхпроводнике и высокие электрические характеристики изоляции в жидком азоте позволяют разместить в одном кабеле прямой и обратный проводники, что сводит к нулю поля рассеяния в зоне кабельной линии.

#### 4.2. Потери энергии в сверхпроводящей линии

Потери энергии в ВТСП линии постоянного тока складываются из:

- потерь энергии в преобразователях около 2% от мощности линии;
- теплопритоков через токовводы (единицы кВт);
- 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 расчёте составляющую потерь энергии, не зависящую от длины, равной 2 % от передаваемой мощности.

Теплопритоки через оболочку современных криостатов составляют 1.0 – 1.5 Вт/м [10], коэффициент рефрижерации 12 – 18, отсюда потери мощности на метр длины линии составят 12 – 27 Вт/м. Используя близкое к среднему значение 20 Вт/м и ограничивая 3 % общие потери энергии, можем заключить, что потери энергии в сверхпроводящей линии с учётом затрат на охлаждение не будут превышать 1 %.

Результаты расчёта максимальной длины ВТСП линии, общие потери в которой будут не более 3 % от её номинальной мощности, представлены в таблице 6.

**Таблица 6.** Длина ВТСП линии постоянного тока, общие 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

Из вышеприведенной таблицы следует, что использование ВТСП линий позволит существенно сократить потери энергии при её транспортировке на большие расстояния.

#### 4.3. Охлаждение ВТСП линии: определение максимально возможного расстояния между криогенными станциями

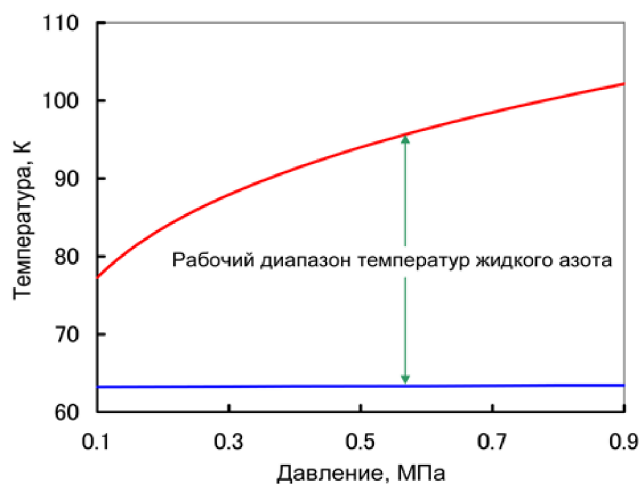
При расчёте охлаждения линии исходим из следующих исходных данных:

- 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 атм.;

- 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 значениям давления не менее 1.0 атм. и температуры не выше 78 К.

Первое условие является следствием того, что диапазон существования жидкой фазы азота, ограниченный снизу температурой замерзания, а сверху температурой кипения, составляет всего  $77.4 - 63.2 = 14.2$  К при 1 атм. (рис. 9).



**Рис. 9.** Рабочий диапазон температур жидкого азота в зависимости от давления

Температурный диапазон может быть расширен путем повышения давления в системе, 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, что неприемлемо.

Типичные значения внешних теплопритоков для современных гофрированных криостатов составляют 1.0–1.5 Вт/м. Результаты расчета характеристик теплообмена для ВТСП кабеля с внешним диаметром 39-40 мм, размещённом в криостатах с внутренним диаметром 60 и 84 мм сведены в таблице 7. Из нее следует, что перепад давления может легко регулироваться за счёт увеличения диаметра криостата. Однако, при увеличении диаметра криостата

одновременно увеличивается внешний теплоприток в холодную зону.

Таблица 7. Перепад температур и давлений по длине ВТСП линии.

Внутренний диаметр криостата, мм	Длина кабеля, км	Расход ж. азота, л/мин.	Перепад температур, К	Перепад давления, атм.
60	2.5	40	4.0	4.8
	5.0	40	7.5	14.0
84	5.0	40	8.0	1.1
	10.0	60	11.0	4.5
			8.4	8.0

Другим путём снижения перепада давления в два и более раз является использование в качестве внутренней трубы криостата гладких труб с сильфонными развязками, как показано на рис. 10.

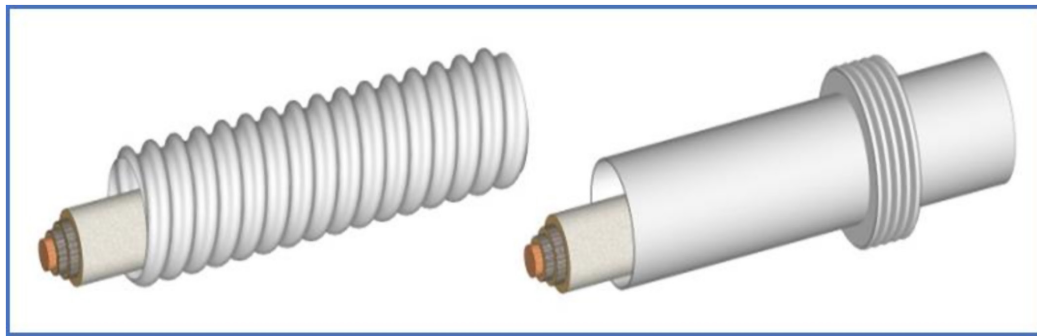


Рис. 10. Схемы размещения кабеля в криостате с гофрированной и гладкой внутренней трубой

Вариант гладких труб позволяет снизить и внешние теплопритоки, однако при этом существенно усложняется монтаж, связанный с выполнением большого объёма сварочных работ по трассе прокладки кабельной линии.

Основным лимитирующим фактором для увеличения плеча прокачки является перепад температур по длине кабеля. Однако, как видно из табл. 7, для криостата с внутренним диаметром 84 мм плечо прокачки может составлять до 10 км, а при увеличении расхода и использовании гладких труб 15-20 км. К сожалению, расход нельзя увеличивать неограниченно, так как при больших расходах появляются дополнительные тепловыделения из-за диссипации энергии в результате трения криоагента в канале охлаждения.

Основным путём снижения перепада температур является снижение теплопритоков в «холодную» зону. Это может осуществляться, как за счёт совершенствования теплоизоляции криостата, так и путём понижения разницы температур между внешней и внутренней оболочками криостата. Последнее реализуется оснащением криостата дополнительной внешней тепловой изоляцией или, для криостатов из трёх оболочек -охлаждением внутренней и промежуточной оболочек криостата обратным потоком азота.

На рис. 11 представлены конструктивные схемы криостатов. Очевидно, что в конструкции из трех оболочек обратный поток хладагента существенно снижает теплоприток в зону размещения сверхпроводящего кабеля, а значит кардинально уменьшает перепад температуры

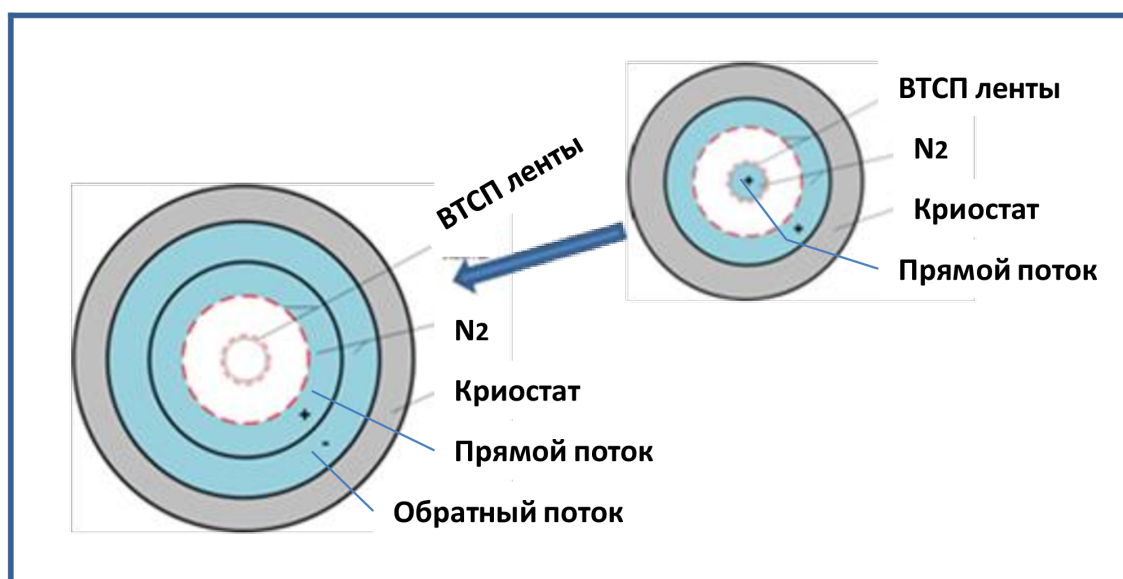


Рис. 11. Схемы криостата с одним и двумя потоками хладагента

Вариацией схемы криостата с тремя оболочками может служить вариант использования радиационного экрана, охлаждаемого обратным потоком азота (рис. 12).

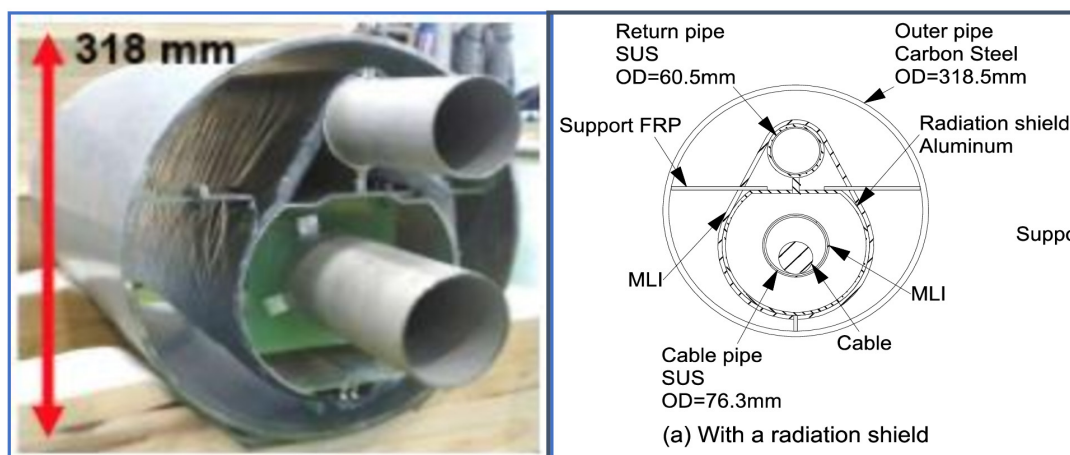


Рис. 12. Внешний вид и схема криостата с радиационным экраном

Такие криостаты были исследованы в рамках проекта Ishikari в Японии [11]. Разработчикам удалось существенно снизить теплоприток в холодную зону с 0.82 Вт/м до 0.034 Вт/м за счёт использования криостата из гладких труб и радиационного экрана, охлаждаемого возвратным потоком хладагента. Эти результаты позволяют увеличить расстояние между криогенными станциями до 100 км [12]. Принципиальная схема подобной линии приведена на рис. 13.

На рисунках 14 (а-в) приведены некоторые возможные схемы организации охлаждения криогенных кабельных линий.

На рис. 14а и 14б показаны простейшие схемы организации охлаждения одноцепной и двухцепной кабельной передачи. Как следует из таблицы 5, расстояние между криогенными станциями может достигать 10–15 км. При увеличении диаметра криостата и переходе на гладкие трубы плечо прокачки может быть увеличено до 20-30 км. При дальнейшем совершенствовании тепловой изоляции криостатов плечо прокачки может достигать 50-100 км. Подобные

«длинные» линии создаются путём тиражирования участков 14а) или 14б) как это показано на рисунке 14в). При периодическом расположении криогенных станций длина линии практически не имеет технических ограничений.

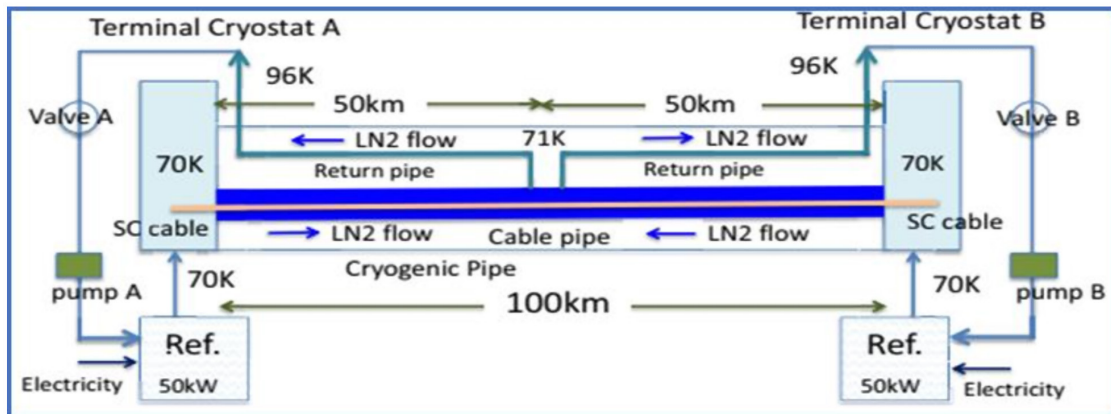


Рис. 13. Принципиальная схема линии с расстоянием между криогенными станциями до 100 км.

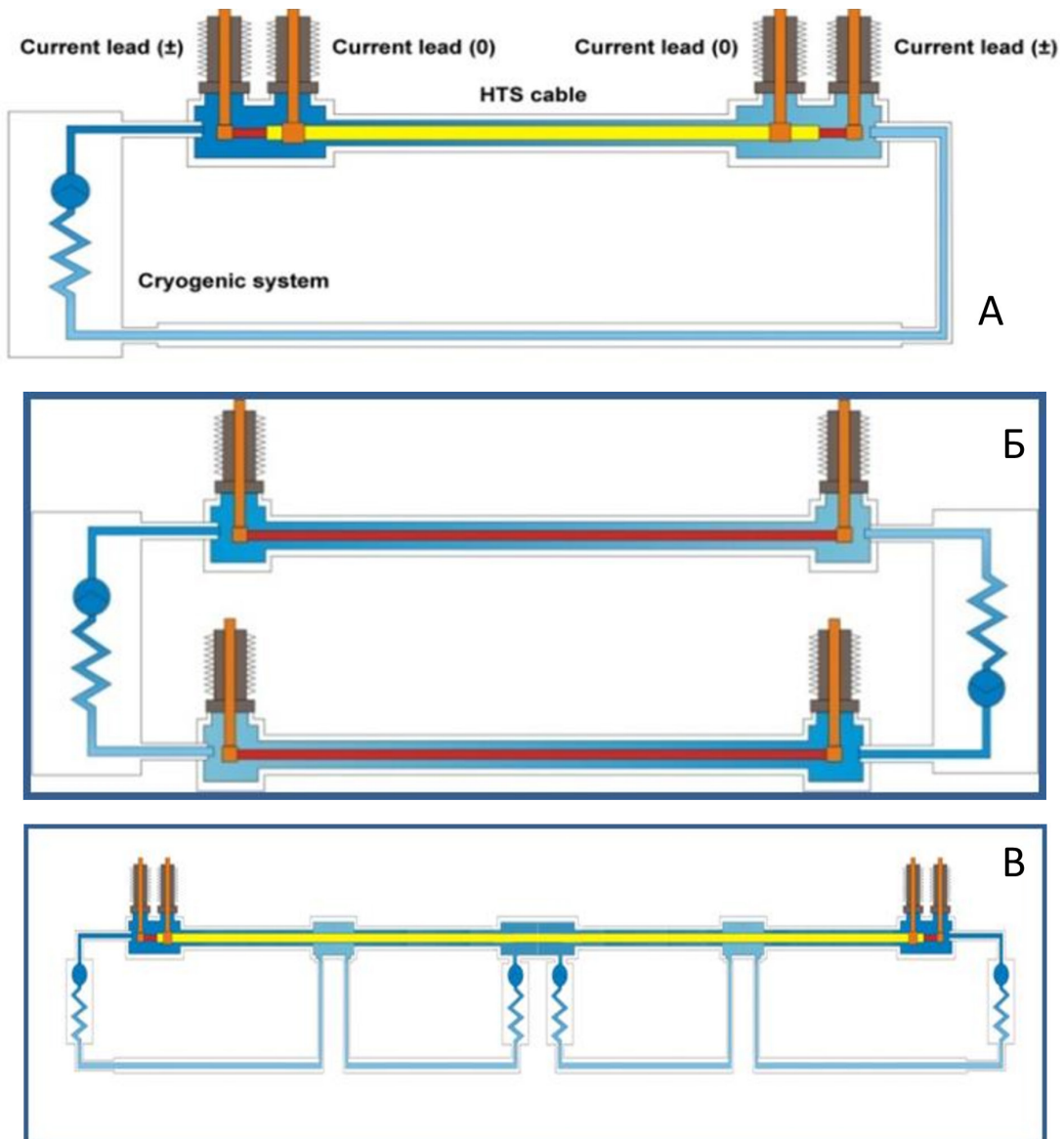


Рис. 14. Организации охлаждения а) одноцепной кабельной передачи б) двухцепной кабельной передачи в) тиражирование участков одноцепной и двухцепной кабельной передачи

## 5. Выводы

Достигнутый уровень характеристик ВТСП материалов и криогенной техники позволяет приступить к предметному рассмотрению возможности создания мощных ВТСП генераторных токопроводов и кабельных линий переменного тока гигаватного класса для вывода энергии от объектов генерации, а также мощных линий постоянного тока для дальней на расстоянии в десятки и сотни километров передачи энергии.

В России разработан комплекс базовых технологий. При этом мощность единичной линии может достигать нескольких гигаватт, а потери энергии в ней будут в 2–4 раза ниже, чем в аналогичных линиях традиционного исполнения. Электрическое напряжение на линии и преобразовательной подстанции может быть снижено до 100 кВ и менее, однако его уровень должен быть оптимизирован с точки зрения эффективности работы как кабеля, так и преобразовательной установки. Охлаждение линии длиной до 30 км может осуществляться криогенными станциями на её концах. При создании линий большей длины криогенные станции должны размещаться по длине с шагом 30–100 км. Максимальная длина линии при таком подходе не имеет технических ограничений.

В части ВТСП ГТ заслуживает внимания подход, когда в целях увеличения надежности и безопасности сверхпроводящая часть ГТ, обеспечивающая близкие к нулевым потери в номинальном режиме, защищается нормальнопроводящим токопроводом. Кроме того, в конструкции систем вывода могут быть применены СТОУ, позволяющие обеспечить «обработку» аварийных режимов КЗ с недоступной на сегодняшний день скоростью.

Наработанный опыт позволяет приступить как к разработке высокоэффективных ВТСП систем вывода энергии от мощных генерирующих объектов (АЭС, ГЭС, ВИЭ), так и к разработке ВТСП систем питания энергоёмких потребителей, таких как установки мегасайнс (ТРТ, СКИФ, СИЛА) и другие энергоёмкие объекты.

При выборе пилотных проектов, использующих сверхпроводящие кабельные линии необходимо учитывать множество факторов, включая инфраструктурные технические и экономические аспекты.

## Литература

- [1] D.I. Doukas, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **29**, (2023). DOI: 10.1109/TASC.2019.2895395
- [2] S. Dai, L. Xiao, H. Zhang, M. et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **24**, 5400104 (2014). DOI: 10.1109/TASC.2013.2295845
- [3] B. Yang, J. Kang, S. Lee et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 5402705 (2015). DOI: 10.1109/TASC.2015.2396683
- [4] S. Eckroad. Program on technology innovation: Transient response of a superconducting DC long length cable system using voltage source converters// EPRI, Palo Alto, CA, USA, Dec. 2009, 1020339.
- [5] Сытников В.Е., Бемерт С.Е., Бердников Р.Н. и др. Энергия единой сети **4**, 24 (2012).
- [6] Сытников В.Е. Энергия единой сети **1**, 14 (2017).
- [7] Сытников В.Е., Кащеев А.В., Дубинин. Энергия единой сети **4**, 21 (2021).
- [8] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee et al. Superconducting Science Technology **29**, 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001
- [9] V.E. Sytnikov, P.I. Dolgosheev, M.G. Soloviev et al. IEEE Transaction on Applied Superconductivity **13**, 1964 (2003). DOI: 10.1109/TASC.2003.812950
- [10] Y. Ivanov, M. Romashov, S. Bemert, et al. Transaction of the CEC **1573** (2014)
- [11] H. Watanabe, Yu. Ivanov, N. Chikumoto, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity **27**, 5400205 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2016.2642578
- [12] S. Yamaguchi, T. Yamada, T. Iitsuka, et al. Journal of Physics: Conf. Series **1293**, 012067 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1293/1/012067

## Development of HTS cable lines for power output systems from generation sources and long power transmission lines

O. A. Kovalchuk<sup>1</sup>, G. V. Muravyov<sup>1</sup>, V. I. Nikishkin<sup>1</sup>, V. S. Ovsyannikov<sup>1</sup>, I. Yu. Rodin<sup>1</sup>, D. B. Stepanov<sup>1</sup>, M. V. Dubinin<sup>2</sup>, A. V. Kashcheev<sup>2</sup>, V. E. Sytnikov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> JSC «NIIЕFA», 196641, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> R&D CENTER @ FGC UES, 115201 Moscow, Russia

\* e-mail: vsytnikov@gmail.com

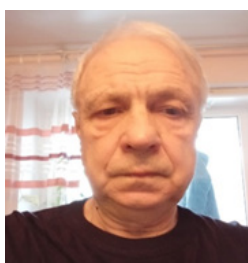
The article discusses general approaches to the development of HTS cable lines for long energy transmission lines and power output systems from generation sources, as part of a new technological structure of the energy industry. The use of the superconductivity effect makes it possible to achieve power transmission levels of 0.5-2.0 GVA or more without significantly increasing weight and size characteristics while simultaneously reducing energy losses. The results of theoretical estimates are presented, showing the possibility of reducing energy losses to a level of no more than 3% of the transmitted power and creating HTS power transmission lines up to 100 km long. It is shown that the accumulated experience makes it possible to start implementing pilot projects using superconducting cable lines, however, such developments will require taking into account many factors, including infrastructural technical and economic aspects.

Keywords: high temperature superconductor; cable line; cryostat; energy transmission; conductor; generation; cryoagent.



Олег Анатольевич Ковальчук - Начальник научно-исследовательского отделения «Криогенная техника и прикладная сверхпроводимость», АО «НИИЭФА»

Oleg Anatolevich Kovalchuk, head of research division for cryogenics and applied superconductivity, JSC “NIIЕFA”



Геннадий Васильевич Муравьев – ведущий инженер-конструктор, расчетно-конструкторская группа систем накопления энергии и радиационных технологий, АО «НИИЭФА»

Gennadii Vasilevich Muravyev, leading design engineer, design group for energy storage systems and radiation technologies, JSC “NIIЕFA”



Владимир Иосифович Никишкин – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, расчетно-конструкторская группа систем накопления энергии и радиационных технологий, АО «НИИЭФА»

Vladimir Iosifovich Nikishkin, PhD in technical science, leading researcher, design group for energy storage systems and radiation technologies, JSC “NIIЕFA”



Вячеслав Сергеевич Овсянников - главный специалист, научно-исследовательской группы прикладных применений сверхпроводников, АО «НИИЭФА»

Viacheslav Sergeyeovich Ovsyannikov, chief specialist, research group for superconductor applications, JSC “NIIЕFA”





Игорь Юрьевич Родин – кандидат технических наук, советник генерального директора по термоядерным и магнитным технологиям, АО «НИИЭФА»

Igor Yurevich Rodin, PhD in technical science, Adviser to Director General for fusion and magnet technologies, JSC “NIIIEFA”



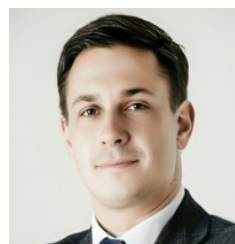
Дмитрий Борисович Степанов - начальник расчетно-конструкторского отдела лазерных комплексов и технологий, АО «НИИЭФА»

Dmitrii Borisovich Stepanov, head of design department for laser systems and technologies, JSC “NIIIEFA”



Михаил Владимирович Дубинин – начальник управления инновационных технологий в области сверхпроводимости АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Mikhail Dubinin – Head of Innovative Technologies in the field of Superconductivity Department at ROSSETI R&D CENTER



Андрей Владимирович Кашеев – кандидат экономических наук заместитель генерального директора по инновационной деятельности АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Andrey Vladimirovich Kashcheev – acting deputy general director on innovation activities at ROSSETI R&D CENTER



Виктор Евгеньевич Сытников – доктор технических наук, заместитель научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Victor Sytnikov – Ph.D., Dr. of Sci. Deputy Chief Research Officer at ROSSETI R&D CENTER