

УДК 538.955.35

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЯХ ДЛЯ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

И.В. Мартиросян, Д.А. Александров, С.В. Покровский

*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,*

*Каширское шоссе, 31, Москва, Россия;*

*e-mail: mephizic@gmail.com*

*Представлены результаты численного анализа энергетических потерь и процессов распространения нормальной зоны процессов в многослойных ВТСП кабелях для различных геометрических конфигураций: CORC кабель, кабель типа Ребель и твистированная стопка ВТСП лент. Получены зависимости энергетических потерь от частоты переменного транспортного тока, а также зависимости скорости распространения нормальной зоны от амплитуды постоянной токовой нагрузки.*

**Ключевые слова:** ленточные ВТСП композиты, CORC кабель, кабель типа Ребель, твистированная стопка ВТСП лент, распространение нормальной зоны.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН или англ. SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) рассматриваются как перспективные устройства для электрических сетей и высокоэнергетических систем благодаря своей высокой эффективности, практически мгновенному отклику и возможности многократных циклов зарядки/разрядки без деградации рабочих характеристик [1]. Принцип работы СПИН заключается в накоплении энергии магнитного поля, создаваемого катушкой из сверхпроводящего материала, по которой ток циркулирует без потерь. В последние годы особое внимание уделяется исследованиям возможности внедрения в такие установки кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [1-3], и в частности, ленточных ВТСП на основе соединения  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (REBCO, где RE – редкоземельный элемент) [2, 4]. Особенностью проводников REBCO по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками является значительно меньшая скорость распространения нормальной

зоны (РНЗ). Как правило, скорости РНЗ в ленточных ВТСП композитах не превышают нескольких сантиметров в секунду [5], что на порядок или несколько порядков ниже, чем для низкотемпературных сверхпроводников, таких как NbTi или Nb<sub>3</sub>Sn [6]. С одной стороны, это говорит о лучшей устойчивости ВТСП к тепловым возмущениям, с другой стороны – усложняет задачу защиты: рост напряжения вдоль кабеля происходит более медленно, и температура горячей точки может достичь опасных значений до того, как система защиты успеет сработать [7]. Поэтому детальное понимание процессов РНЗ в различных архитектурах кабелей REBCO имеет ключевое значение для разработки эффективных СПИН-систем.

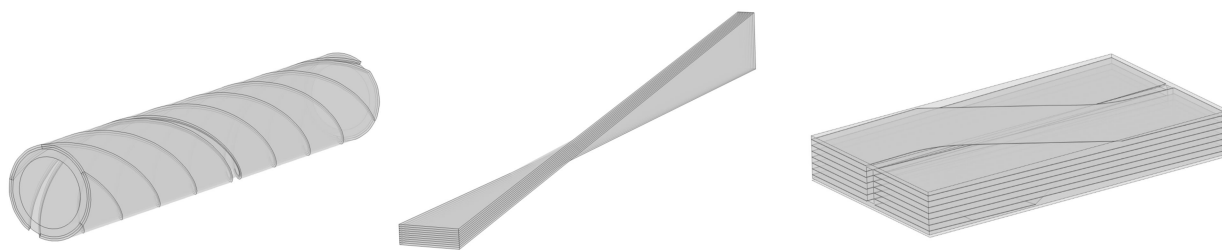
Среди возможных конфигураций ВТСП кабелей для индуктивных накопителей энергии особый интерес представляют три конструкции: CORC (Conductor on Round Core) [8], кабель типа Ребель (Roebel) [9] и твистированная (скрученная) стопка лент (TSTC, twisted stacked-tape cable) [10]. Каждая из этих архитектур обладает своими преимуществами и особенностями теплового и электрического поведения. В настоящей работе представлены результаты численного анализа энергетических потерь и скорости распространения нормальной зоны в кабелях CORC, Ребель и TSTC, ориентированные на их применение в индуктивных накопителях энергии. Рассматривается режим охлаждения ВТСП кабелей путем полного погружения в жидкий азот. Полученные результаты позволяют выявить ключевые механизмы, определяющие динамику квенча в разных типах кабелей, и формируют основу для разработки надежных систем защиты и повышения эффективности сверхпроводящих накопителей энергии.

## 2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

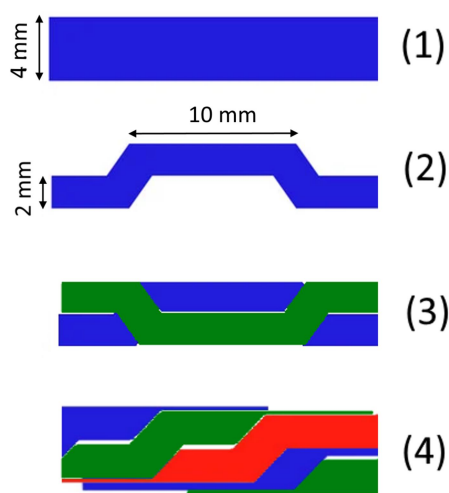
Для проведения сравнительного анализа процессов распространения нормальной зоны были смоделированы три фрагмента сверхпроводящих кабелей на основе REBCO-проводников: CORC кабель, кабель типа Ребель и твистированная стопка ВТСП лент. Принципиальные схемы рассматриваемых ВТСП кабелей представлены на рис. 1.

В конструкции CORC-кабеля ВТСП ленты укладываются в несколько слоев (обычно от 2 до 5 слоев) и в несколько рядов (количество рядов ВТСП лент определяется требуемым диаметром кабеля), после чего ВТСП ленты наматываются на формер, представляющий из себя полую трубку с высокой теплопроводностью, например, из мельхиора. В настоящей работе рассматривается геометрия CORC кабеля из 10 ВТСП лент ширины 4 мм (5 рядов в 2 слоя), геликоидально намотанных под углом 45 градусов на мельхиоровую трубку внешнего диаметра 5 мм и толщины 1 мм. Аналогичные ВТСП кабели производятся в ОИЯИ (г. Дубна) для реализации СПИН накопителя для ускорителя NICA [11]. Кабель из твистированной

стопки ВТСП лент представляет собой структуру, в которой стопка уложенных друг на друга 10 ВТСП лент скручивается в спиралевидной форме вдоль своей оси с шагом скручивания 20 мм. Кабель Ребеля состоит из 10 ВТСП лент ширины 4 мм, разрезанных на фрагменты ширины 2 мм и уложенных в 10 слоев в 2 ряда, как показано на рис. 2. Таким образом, фрагменты каждого из рассматриваемых ВТСП кабелей уложены из одинакового количества ВТСП ленты: 10 слоев ленты ширины 4 мм для кабелей CORC и TSTC и 20 слоев ВТСП ленты ширины 2 мм для кабеля Ребель.



**Рисунок 1.** Принципиальная геометрия ВТСП кабелей: А – CORC кабель, Б – твистированная стопка ВТСП лент (TSTC), В – кабель типа Ребель.



**Рисунок 2.** Схема реализации кабеля типа Ребель.

В качестве характеристик ВТСП лент для модельной реализации различных типов токонесущих элементов СПИН рассматривались параметры неизолированных ВТСП лент промышленного производства российской компании СуперОкс [12, 13]. В рамках моделирования учитывается слоистая архитектура ВТСП лент, содержащих слои подложки сплава Hastelloy толщины 100 мкм, ВТСП слой YBCO толщины 2 мкм, слой серебра толщины 3 мкм, а также двустороннее медное покрытие, толщина которого составляет 10 мкм с каждой стороны. Критический ток каждой ВТСП ленты в собственном магнитном

поле при температуре кипения жидкого азота (77.4 К) составляет 200 А. Для учета зависимости критического тока лент  $J_c(B, T)$  от температуры  $T$  и амплитуды магнитного поля  $B$  используется интерполяционная экспериментальная поверхность для лифт-фактора критического тока лент [12].

В настоящей работе для корректного сопоставления энергетических характеристик трёх типов ВТСП-кабелей – CORC, TSTC и кабеля Ребель – принята единая токовая нагрузка, равная 1600 А. Каждый кабель в исследуемых конфигурациях состоит из 10 REBCO-лент с критическим током 200 А каждая, что даёт номинальную суммарную токонесущую способность порядка 2000 А. Однако известно [14], что в реальных многоленточных кабелях эффективный критический ток зачастую оказывается ниже простой суммы критических токов отдельных лент вследствие ряда факторов: неоднородного распределения тока, угловой зависимости  $J_c(B, \theta)$ , локальных перенапряжений при скручивании или намотке, механических деформаций, а также межленточных взаимодействий. Чтобы избежать режима близкого к переходу в сверхкритическое состояние и обеспечить сопоставимость условий для трёх геометрически различных конструкций, при моделировании потерь на переменном токе (АС-потерь) используется пониженная токовая нагрузка с амплитудой переменного тока 1600 А, соответствующая примерно 0.8  $I_c$  от оценочной максимальной пропускной способности каждого кабеля. Такой выбор позволяет сравнивать энергетические потери кабелей в схожих рабочих условиях, исключая влияние различий в критических токах и фокусируясь на эффекте геометрии и расположения лент. При этом в обеспечение эквивалентности сравнения характеристик кабелей результаты должны быть нормированы на длину исходной ВТСП ленты.

Моделирование ВТСП кабелей выполнено методом конечных элементов с использованием неизотермической А-Т формулировки нестационарных уравнений Максвелла [15]. При решении задач в А-Т формулировке решатель использует две переменные состояния: компоненты токового векторного потенциала  $\mathbf{T}$  и компоненты магнитного векторного потенциала  $\mathbf{A}$ . Токовый потенциал применяется к сверхпроводящим областям для решения задачи о распределении плотности тока  $\mathbf{J}$  в сверхпроводнике:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (1)$$

Управляющее уравнение системы для сверхпроводящих доменов представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \left( E_0 \left( \frac{|\mathbf{J}|}{J_c(B, Q)} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{J_c(B, Q)} \right) = \nabla \times \left( E_0 \left( \frac{|\nabla \times \mathbf{T}|}{J_c(B, Q)} \right)^n \frac{\nabla \times \mathbf{T}}{J_c(B, Q)} \right) = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

где  $\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J}$  – напряжённость электрического поля,  $E_0$  – критерий, равный 1 мкВ/см,  $\mathbf{T}$  – токовый векторный потенциал,  $Q$  – абсолютная температура,  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного

поля,  $t$  – время. Сопротивление  $\rho$  сверхпроводника рассчитывается согласно степенному закону для нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника [16] с показателем степени  $n = 30$ .

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплового баланса:

$$\rho C_p \frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla Q) = W + \rho C_p \mathbf{u} \nabla Q, \quad (3)$$

где в качестве зависимой переменной выступает абсолютная температура  $Q$ ,  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $\rho$  – плотность,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $\mathbf{u}$  – скорость теплопереноса,  $W$  – все источники тепла, включая термоэлектрические. Для каждого из моделируемых слоев учитываются экспериментально измеренные зависимости теплопроводностей  $k$  и теплоемкостей  $C_p$  от температуры  $T$ , а также температурные зависимости сопротивлений для несверхпроводящих слоев [17]. В рамках проведенного исследования каждый ВТСП кабель охлаждается путем погружения в жидкий азот [18].

Для моделирования кабелей CORC и Ребель в рамках электродинамического и теплофизического расчетов применяются периодические граничные условия. Для кабеля TSTC, имеющего чередующуюся ориентацию лент при скручивании, используются периодические условия с антисимметрией, позволяющие корректно учесть поворот стека и обеспечить физически корректное распределение токов и полей на шаге скручивания.

Помимо полной электромагнитно-тепловой модели, основанной на нестационарных уравнениях Максвелла в А–Т формализме с двусторонней тепловой связкой для расчёта АС-потерь, в работе используется отдельная тепловая модель с управляющим уравнением 5, предназначенная исключительно для анализа процессов распространения нормальной зоны [19]. В этой модели электрические эффекты не рассчитываются напрямую: по сечению ВТСП кабеля задаётся постоянная величина тока (1600 А), а объёмный источник тепла определяется через эффективное сопротивление ВТСП слоя  $\rho_{HTS}$ , которое задается в виде кусочно-непрерывной функции:

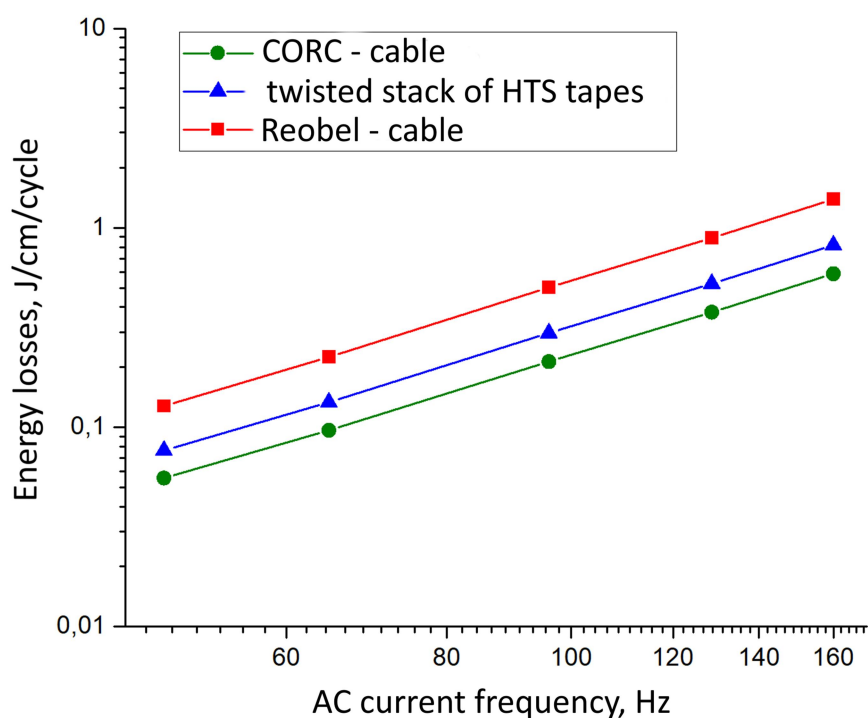
$$\rho_{HTS}(T) = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \rho_{sh}(T, J), & T_s \leq T < T_c \\ \rho_n(T), & T \geq T_c \end{cases}, \quad (4)$$

где  $T_s$  – температура начала сверхпроводящего перехода,  $T_c$  – критическая температура ВТСП лент,  $J$  – плотность тока. Когда  $T < T_s$  сопротивление ВТСП слоя пренебрежимо мало, и весь ток протекает в сверхпроводнике [20]. При возникновении напряжения, превышающего критерий  $E_c = 1$  мкВ/см, или же возникновении горячей точки с температурой в диапазоне  $T_s \leq T < T_c$ , сопротивление  $\rho_{sh}(T, J)$  рассчитывается согласно степенному закону для нелинейной ВАХ сверхпроводника [16]. При этом между  $T_s$  и  $T_c$  токи

могут перераспределяться между слоями ВТСП композита. При температурах выше или равной  $T_c$  сверхпроводник находится в нормальном состоянии, и все токи протекают в несверхпроводящих слоях с сопротивлением  $\rho_n(T)$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численный анализ энергетических потерь для трех видов ВТСП кабелей (CORC кабель, кабель типа Ребель и скрученная стопка ВТСП лент) был выполнен для режима нагрузки переменным током максимальной амплитуды 1.6 кА и частоты от 0 до 160 Гц в условиях полного погружения кабелей в жидкий азот (Рис. 3). Подобные режимы работы ВТСП накопителей энергии могут наблюдаться в процессе зарядки/разрядки [21].



**Рисунок 3.** Зависимости потерь в ВТСП кабелях, нормированные на единицу длины ВТСП ленты, за цикл нагрузки переменным током амплитуды 1.6 кА, от частоты. Охлаждение жидким азотом.

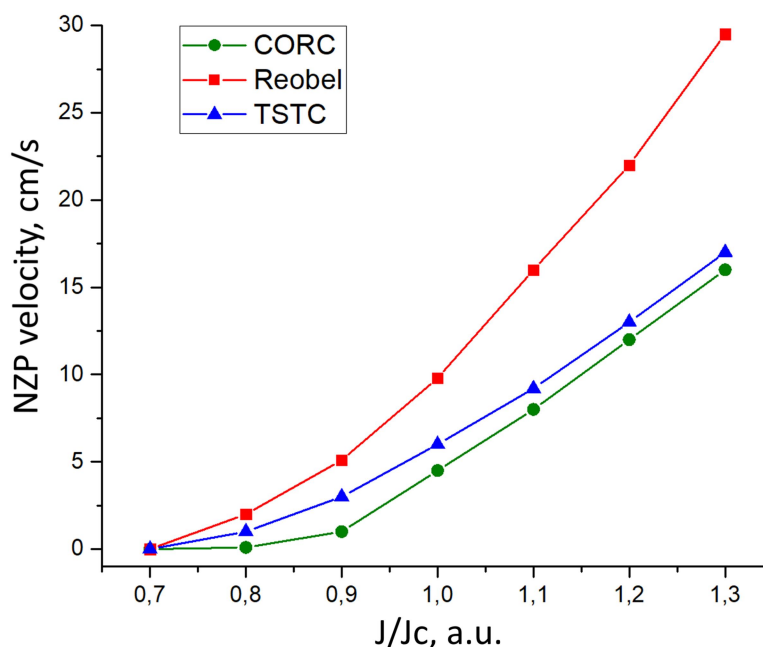
Для всех трех конструкций ВТСП кабелей наблюдаются тенденции роста энергетических потерь с увеличением частоты тока. Качественно аналогичные результаты наблюдались также в работах [21]. Для используемых геометрических параметров ВТСП кабелей в рассмотренных условиях охлаждения и нагрузки кабель типа Ребель демонстрирует наибольшие суммарные потери во всем диапазоне частот. Для заданной конфигурации кабеля Ребеля это может объясняться геометрическим фактором – широкая транспозиция и наличие углов в отдельных фрагментах ленты приводят к локальному

нагреву при перетекании токов к росту потерь на переменном токе. Преобладающие энергетические потери характерны для данного типа кабелей при низких частотах переменного тока [22], тогда как при высоких частотах и в условиях наличия внешних магнитных полей кабель Ребеля обладает выраженными преимуществами по энергетическим характеристикам [23, 24]. В то же время CORC кабель продемонстрировал наиболее низкие энергетические потери в заданных режимах нагрузки и охлаждения, что также было получено в работе [25].

Моделирование процессов распространения нормальной зоны в ВТСП кабелях различного типа было выполнено с использованием отдельной численной модели, предполагающей протекание по кабелям постоянного транспортного тока. Инициация переходного процесса для ВТСП кабелей происходит следующим образом: изначально ВТСП обмотка переносит постоянный транспортный ток, равный от 0.7 до 1.3 от величины критического тока лент при начальной температуре  $T_0 = 77.4$  К. В одном из десяти слоев ВТСП обмотки, не контактирующем напрямую с жидким азотом, определяется объемный источник тепла, представляющий собой область ВТСП слоя длины 10 мкм, ширины 4 мм толщины 2 мкм. Для CORC кабеля объемный источник тепла расположен в нижней ВТСП ленте, прижатой к мельхиоровой трубке, в 3-ем из 5-и ряду, для TSTC - в центре 5-го слоя на месте кручения. Для Ребеля нагреватель размещается в 5 слое ВТСП лент и перекрывает два фрагмента ленты (ширина объемного источника тепла – 4 мм, ширина фрагмента ленты – 2 мм). В заданной области ВТСП слоя задается прямоугольный импульс тепла длительности 50 мс и мощности  $5 \cdot 10^{13}$  Вт/м<sup>3</sup>, так что количество выделившейся энергии в локальной области составляет 200 мДж. Точечные виртуальные датчики считывания температур установлены с шагом 5 мм от нагревателя по всей длине ВТСП кабелей. Критическая температура  $T_c$  контрольных образцов ВТСП лент была измерена экспериментально и согласно данным транспортных измерений составила 92 К, а ширина сверхпроводящего перехода по температуре не превышает 0.3 К, в связи с чем нормальная зона определяется по концу теплового перехода.

На рис. 4 представлены зависимости скорости распространения нормальной зоны в ВТСП кабелях от величины начального транспортного тока, отнесенной к величине критического тока лент. Зависимости носят нелинейный характер и частично коррелируют с результатами анализа энергетических потерь – для ВТСП кабелей с более высокими потерями характерны также и более высокие скорости распространения нормальной зоны. Такое поведение хорошо согласуется с общей картиной электромагнитно-тепловой устойчивости многоленточных ВТСП-кабелей. Это связано с тем, что механизмы, определяющие величину АС-потерь, одновременно определяют и способность кабеля

генерировать тепловой поток при переходе в нормальное состояние, а значит — влияют на скорость РНЗ. При этом форма кривых для АС-потерь и для скорости распространения нормальной зоны может быть принципиально разной, даже если общая тенденция (кабель с большими потерями → более быстрая РНЗ) сохраняется. Причина в том, что характерные физические процессы в этих двух задачах нелинейны различным образом — тогда как механизмы возникновения АС-потерь являются квазистационарными, переход ВТСП кабеля в нормальное состояние — динамический лавинообразный процесс. При малых (при  $J/J_c < 0.8$ ) токах скорость РНЗ практически равна нулю для CORC и очень мала для кабелей Ребеля и TSTC, что соответствует режиму самовосстановления или стационарной зоны — локальное тепловое возмущение не развивается в полноценный квенч. По мере приближения к  $J_c$  темпы роста скорости РНЗ возрастают, демонстрируя практически экспоненциальный рост.



**Рисунок 4.** Зависимости скорости РНЗ в ВТСП кабелях от величины начального транспортного тока. Охлаждение жидким азотом.

Кабель Ребеля обладает наибольшей скоростью распространения нормальной зоны, что упрощает её обнаружение (сигналы напряжения появляются быстрее). CORC-кабель — самый «инерционный»: низкие скорости РНЗ затрудняют обнаружение квенча, что требует более чувствительной системы мониторинга (например, оптоволоконных датчиков). Полученный результат обусловлен также геометрией рассматриваемой системы: CORC кабель имеет всего два слоя ВТСП ленты, уложенных друг на друга и 5 рядов, тогда как две другие конфигурации обладают архитектурой из 10 ВТСП слоев, сложенных в стопки и омываемых хладагентом лишь по периметру. Поскольку тепловые процессы начинают



развиваться в толще многослойных кабелей, то именно они демонстрируют более высокие скорости РНЗ вследствие меньшей эффективности охлаждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработана численная модель, позволяющая выполнять анализ электродинамических и теплофизических процессов в ВТСП системах. На основе разработанной модели проведен анализ энергетических потерь и процессов распространения нормальной зоны процессов в многослойных ВТСП кабелях для индуктивного накопителя энергии. Рассмотрены различные геометрические конфигурации: CORC кабель, кабель типа Ребель и твистированная стопка ВТСП лент.

Проведённое численное моделирование показало, что архитектура ВТСП кабеля существенно влияет на энергетические характеристики и динамику развития нормальной зоны. Наибольшие потери и скорость РНЗ демонстрирует кабель типа Roebel, что облегчает возможности обнаружения квенча для данного типа кабелей, тогда как CORC-кабель, напротив, обладает минимальными потерями на переменном токе и скоростями распространения нормальной зоны, что требует применения более чувствительных методов мониторинга, однако обеспечивает более мягкое тепловое поведение. Установлено, что нелинейная зависимость скорости распространения нормальной зоны от величины транспортного тока частично согласуется с характером энергетических потерь: кабели, для которых рассчитаны более высокие АС-потери, демонстрируют и более высокие скорости РНЗ. Однако несмотря на это, формы соответствующих зависимостей отличаются, поскольку АС-потери формируются в квазистационарном режиме периодического возбуждения, тогда как развитие нормальной зоны представляет собой динамический тепловой процесс, что приводит к его ярко выраженному нелинейному, зачастую лавинообразному характеру. Конфигурация TSTC занимает промежуточное положение по величине энергетических потерь и скорости РНЗ и может рассматриваться как компромиссный вариант. При этом следует подчеркнуть, что представленные результаты носят предварительный характер и являются релевантными лишь для рассмотренных условий охлаждения и нагрузки. Для окончательного выбора оптимальной архитектуры кабеля для применения в индуктивных накопителях энергии необходимо учитывать не только аспекты их теплового поведения, но и комплекс дополнительных факторов: условия работы в сильных магнитных полях, механическую прочность, допустимые режимы охлаждения и нагрузки, а также технологические ограничения. Дальнейшие исследования в этих направлениях позволят сформировать целостную основу для проектирования надёжных и эффективных СПИН-систем на основе ВТСП кабелей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2025-0008) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Z. Zhao, Y. Wang, Y. Gao, Z. Yang, Z. Li, W. Pi. Mechanical characterization of a 10-MJ HTS SMES magnet wound by quasi-isotropic strands and directly stacked tape conductors. *Superconductivity*. Vol. 5, p. 100042 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2023.100042>
- [2] A.H.K. Asadi, A. Jahangiri, M. Zand, M. Eskandari, M.A. Nasab, H. Meyar-Naimi. Optimal Design of High Density HTS-SMES Step-Shaped Cross- Sectional Solenoid to mechanical stress reduction. 2022 International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS). Vol. 16, pp. 1-6 (2022). DOI: 10.1109/IPAPS55380.2022.9763198
- [3] S.S. Kalsi, D. Aized, B. Conner, G. Snitchier, J. Campbell, R.E. Schwall, J. Kellers, T. Stephanblome, A. Tromm, P. Winn. HTS SMES magnet design and test results. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 7, No. 2, pp. 971-6 (1997). DOI: 10.1109/77.614667
- [4] S.S. Peng, J. Zheng, W.Y. Li, Y.J. Dai. AC Loss Analysis of a Single-Solenoid HTS SMES Based on H-formulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 233, No. 2, p. 022018 (2019). DOI: 10.1088/1755-1315/233/2/022018
- [5] H. Song, M.W. Davidson, J. Schwartz. Dynamic magneto-optical imaging of transport current redistribution and normal zone propagation in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>- $\delta$  coated conductor. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 22, No. 6, p. 062001 (2009). DOI: 10.1088/0953-2048/22/6/062001
- [6] J.R. Hull, M.N. Wilson, L. Bottura, L. Rossi, M.A. Green, Y. Iwasa, S. Hahn, J.-L. Duchateau, S.S. Kalsi. *Superconducting Magnets*. *Applied Superconductivity* 2015. p. 403-602.
- [7] D. Park, J. Bascuñán, Y. Li, W. Lee, Y. Choi, Y. Iwasa. Design Overview of the MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet with a New REBCO Insert. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 31, No. 5, pp. 1-6 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3064006
- [8] G.L. Ma, Y.S. Wang, J.H. Zhu, Z.M. Li, W. Liu, M. Qiu. Mechanical properties of HTS Magnet for a 5MJ SMES using coated conductor on round core. 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). pp. 492-3 (2015). DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453674
- [9] P. Song, J. Zhu, T. Qu, P. Chen, F. Feng, M. Qiu. Design and Test of a Double Pancake Coil for SMES Application Wound by HTS Roebel Cable. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 28, No. 4, pp. 1-5 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2828019
- [10] M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg, J. Minervini. HTS twisted stacked-tape cable conductor. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 25, p. 014011 (2011). DOI: 10.1088/0953-2048/25/1/014011

- [11] M. Li, J. Zheng, H. Khodzhibagiyev, T. Ma, X. Huang, M. Novikov, Y. Cheng. Engineering Design of Forced-Flow Cooling HTS Cable for SMES System With High Current Capacity. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 34, No. 5, pp. 1-5 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2023.3346831
- [12] A. Molodyk, S. Samoilnikov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abrahimov, A. Vasiliev. Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion. *Sci. Rep.* Vol. 11, (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z
- [13] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilnikov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, S. Fetisov. Development and production of second generation high T<sub>c</sub> superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 27, No. 4, p. 044022 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
- [14] Y. Chen, X. Chen, S. Jiang, L. Fu, B. Shen. Modeling of HTS high-current stacked conductors with defective tapes in different locations. *Physica C Supercond.* Vol. 606, p. 1354224 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354224>
- [15] F. Huber, W. Song, M. Zhang, F. Grilli. The T-A formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 35, No. 4, p. 043003 (2022). DOI: 10.1088/1361-6668/ac5163
- [16] S.V. Pokrovskii, I.V. Martirosian, D.A. Aleksandrov. Numerical 3D modeling of magnetic systems based on closed superconducting rings. *Modern Transportation Systems and Technologies.* Vol. 10, No. 4, pp. 537-55 (2024). DOI: 10.17816/transsyst637429
- [17] J. Van Nugteren. Normal zone propagation in a YBCO superconducting tape. University of Twente: Enschede, The Netherlands. (2012). DOI:
- [18] V.V. Zubko, S.M. Ryabov, S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky. Heat Transfer Simulation to Liquid Nitrogen from HTS Tapes at the Overload Currents. *Phys. Procedia.* Vol. 67, pp. 619-24 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.105>
- [19] I.V. Martirosian, D.A. Aleksandrov, S.V. Pokrovskii, V.V. Anishchenko. Modelling of normal zone propagation processes in current-carrying windings based on high-temperature superconductors. *SUPERCONDUCTIVITY: FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH.* Vol. 1, No. 6, pp. 34-45 (2025). DOI: 10.62539/2949-5644-2025-6-1-34-45
- [20] H. Chen, K.S. Wang, K. Hua, Y.N. Liu, H.J. Liu, F. Liu, P. Gao, C. Zhou, Y. Shi. Experiment and Simulation for Normal Zone Propagation Insert Set-up for YBCO Superconducting Tape Cooled by Liquid Helium on Quasi-Adiabatic Condition. 2023 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). pp. 1-2 (2023). DOI: 10.1109/ASEMD59061.2023.10368804
- [21] G. Vyas, R.S. Dondapati, P.R. Usurumarti. Parametric Evaluation of AC Losses in 500 MVA/1.1 kA High Temperature Superconducting (HTS) Cable for Efficient Power Transmission: Self Field Analysis. 2014 European Modelling Symposium. pp. 315-9 (2014). DOI: 10.1109/EMS.2014.95

- [22] K. Yagotintsev, A. V A, P. Gao, M. Dhalle, T. Haugan, D. Laan, J. Weiss, S. Hossain, A. Nijhuis. AC loss and contact resistance in REBCO CORC, Roebel, and stacked tape cables. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 33, (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab97ff
- [23] S. Otten, A. Kario, E. Demencik, R. Nast, F. Grilli. Anisotropic monoblock model for computing AC loss in partially coupled Roebel cables. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 33, (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab9939
- [24] W. Goldacker, F. Grilli, E. Pardo, A. Kario, S.I. Schlachter, M. Vojenčiak. Roebel cables from REBCO coated conductors: a one-century-old concept for the superconductivity of the future. *Supercon. Sci. Technol.* Vol. 27, No. 9, p. 093001 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/9/093001
- [25] S. Fu, M. Qiu, J. Zhu, H. Zhang, J. Gong, X. Zhao, W. Yuan, J. Guo. Numerical Study on AC Loss Properties of HTS Cable Consisting of YBCO Coated Conductor for HTS Power Devices. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 28, No. 4, pp. 1-5 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2816819

Поступила в редакцию 23 октября 2025 г.

После доработки 10 декабря 2025 г.

Принята к публикации 10 декабря 2025 г.