

И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, Д.А. АБИН, С.В. ПОКРОВСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## ПРОЦЕССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАБЕЛЕЙ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

В работе представлены результаты комплексного численного моделирования процессов распространения нормальной зоны в сверхпроводящих кабелях, применяемых в системах сверхпроводящего индуктивного накопления энергии, с учётом свойств материалов, геометрии проводников и условий охлаждения. На основе конечно-элементной модели выполнен сравнительный анализ РНЗ в ВТСП ленте REBCO, проводе  $MgB_2$  и многоленточных кабелях архитектур CORC, Рёбель и TSTC, показано существенное влияние материала и архитектуры кабеля на динамику квенча и тепловую устойчивость СПИН.

I.V. MARTIROSIAN, D.A. ALEXANDROV, D.A. ABIN, S.V. POKROVSKII

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## PROCESSES OF PROPAGATION OF THE NORMAL ZONE IN ELEMENTS OF SUPERCONDUCTING CABLES OF INDUCTIVE ENERGY STORAGE

This work presents the results of comprehensive numerical modeling of normal zone propagation in superconducting cables used in superconducting magnetic energy storage systems, taking into account material properties, conductor geometry, and cooling conditions. Based on a finite-element model, a comparative analysis of normal zone propagation in REBCO coated conductors,  $MgB_2$  wires, and multi-tape cables with CORC, Roebel, and TSTC architectures is performed, demonstrating the significant influence of both the superconducting material and cable architecture on quench dynamics and the thermal stability of SMES systems.

Надёжность и устойчивость работы сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии (СПИН) в значительной степени определяются характером развития переходных процессов при возникновении квенча – внезапного локального теплового перехода сверхпроводника в нормальное состояние [1]. В связи с этим разработка численных математических моделей, позволяющих описывать процессы возникновения квенча и динамику последующего распространения нормальной зоны (РНЗ) с учётом свойств материалов, геометрии проводников и условий охлаждения, является одной из ключевых задач при анализе устойчивости работы СПИН.

В настоящей работе представлена численная модель на основе метода конечных элементов, предназначенная для анализа процессов распространения нормальной зоны в элементах сверхпроводниковых кабелей, применяемых в СПИН системах. Модель основана на нестационарном уравнении теплового баланса и учитывает реальные электромагнитные и теплофизические свойства сверхпроводящих материалов, а также геометрию и архитектуру токонесущих элементов. Проведён анализ распространения нормальной зоны в одиночных сверхпроводящих проводниках — высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) ленте на основе соединений типа  $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ , где RE – редкоземельный элемент (далее REBCO) и гомогенизированном проводе на основе  $MgB_2$ . Выполнен сравнительный анализ РНЗ в многоленточных ВТСП кабелях различных архитектур: CORC, кабелях типа Рёбель и твистированной стопке ВТСП лент (TSTC). Рассмотрено влияние геометрии и направления намотки ВТСП лент в CORC кабелях.

Показано, что для  $MgB_2$  характерны на порядок более высокие скорости распространения нормальной зоны по сравнению с REBCO, что связано с различиями в тепловых свойствах материалов и характере температурно-полевой зависимости критической плотности тока. Полученные результаты находятся в согласии с аналитическими оценками и литературными данными. Установлено, что архитектура кабеля существенно влияет на динамику развития нормальной зоны. Кабели типа Рёбель демонстрируют наибольшие скорости РНЗ и повышенные энергетические потери CORC кабели, напротив, характеризуются низкими скоростями РНЗ и повышенной тепловой устойчивостью. Конфигурация TSTC занимает промежуточное положение. Показано, что зависимости скорости распространения нормальной зоны от транспортного тока носят выраженный нелинейный характер и частично коррелируют с величиной потерь на переменном токе (АС-потерь). При этом подчёркивается принципиальное различие физической природы данных процессов: энергетические потери формируются в квазистационарном режиме, тогда как развитие РНЗ представляет собой нестационарный лавинообразный тепловой процесс. Установлено, что встречная намотка ВТСП лент в CORC кабеле приводит к снижению скорости распространения нормальной зоны на 30–100% и более по сравнению с кабелями с параллельной намоткой, что связано с особенностями формирования температурных полей и тепловой стабилизации кабеля.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимальной архитектуры сверхпроводящих кабелей и параметров систем защиты СПИН с учётом компромисса между тепловой устойчивостью и эффективностью детектирования квенча.

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

### *Список литературы*

1. Van Nugteren J. Normal zone propagation in a YBCO superconducting tape // University of Twente: Enschede, The Netherlands. – 2012