

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst660871>

© И.В. Мартирисян, Д.А. Александров, С.В. Покровский

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(Москва, Россия)

МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ВТСП ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ НЕЗАМКНУТЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБМОТОК

Цель. Сравнение магнитных и транспортных характеристик рейстрек-катушек и незамкнутых ВТСП обмоток.

Методы. Численный анализ выполнен методом конечных элементов в среде моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. Для этих геометрий, характерных в электромагнитных системах ВТСП генератора, выполнен расчет распределений токов, магнитных полей и температур в условиях воздействия постоянного транспортного тока, а также выполнен расчет потерь на переменном токе при различных амплитудах и частотах токовой нагрузки в условиях охлаждения жидким азотом.

Закключение. В условиях охлаждения жидким азотом рейстрек-катушки обладают лучшими магнитными и транспортными характеристиками в сравнении с незамкнутыми кольцевыми ВТСП обмотками, на что решающее влияние оказывает их геометрический фактор. Наиболее выгодной конфигурацией обмотки элементов ВТСП генератора при азотном охлаждении является рейстрек-катушка.

Ключевые слова: незамкнутые сверхпроводящие обмотки; композитные ВТСП-ленты; FEM-моделирование; А-Т-формализм.

Как цитировать:

Мартирисян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В. Магнитные и транспортные характеристики элементов ВТСП генератора на основе незамкнутых сверхпроводящих обмоток // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 43–59. doi: 10.17816/transsyst660871

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, D. A. Aleksandrov, S.V. Pokrovskii

National research nuclear university MEPhI

(Moscow, Russia)

**MAGNETIC AND TRANSPORT CHARACTERISTICS
OF ELEMENTS OF HTS GENERATOR BASED ON OPEN-LOOP
SUPERCONDUCTING COILS**

Aim. Comparison of magnetic and transport characteristics of racetrack model coils and open-loop HTS coils.

Methods. Numerical analysis was performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics simulation environment.

Results. For these configurations, typical in electromagnetic systems of a HTS generator, the distribution of currents, magnetic fields, and temperatures under the influence of direct transport current were calculated, and losses in alternating current at different amplitudes and frequencies of the current load under liquid nitrogen cooling were calculated.

Conclusion. Under liquid nitrogen cooling, racetrack model coils have better magnetic and transport characteristics compared to open-loop HTS coils, due to their configuration which has a dominant impact. The most advantageous configuration of the coil of the elements of the HTS generator with nitrogen cooling is a racetrack model coil.

Keywords: open-loop superconducting coils; composite HTS-ribbons; FEM simulation; A-T-formalism.

To cite this article:

Martirosian IV, Aleksandrov DA, Pokrovskii SV. Magnetic and transport characteristics of elements of HTS generator based on open-loop superconducting coils. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):43–59. doi:10.17816/transsyst660871

ВВЕДЕНИЕ

Вращающиеся машины, в конструкции которых используются высокотемпературные сверхпроводящие ленты, обладают существенными преимуществами в сравнении с устройствами на основе традиционных сверхпроводящих материалов, а именно значительно большей удельной мощностью, меньшим весом, компактными размерами и более высокой эффективностью [1–3]. В настоящий момент сверхпроводниковые генераторы активно применяются в энергетическом секторе [4, 5], при разработке и изготовлении силовых установок для морских судов [6, 7] и в авиационной промышленности [8, 9]. В качестве ВТСП элементов таких генераторов до недавнего времени зачастую выступали ВТСП композиции, представленные в виде объемной ВТСП керамики или стопок композитных ВТСП лент. Основным недостатком объемных ВТСП элементов для применения во вращающихся машинах является их хрупкость. Размеры элементов на основе стопок ВТСП лент, в свою очередь, ограничены в силу особенностей производства промышленных лент, что является существенной помехой для изготовления магнитов захваченного потока применительно к ВТСП машинам.

Наибольшее распространение в конструкциях генераторов на основе ВТСП лент получили панкейк- и рейстрек-катушки, которые демонстрируют высокую надежность и эффективность [10, 11]. Кроме того, ведутся разработка и реализация проектов, в которых применяются аркообразные катушки, способные обеспечить более равномерное распределение магнитного поля [12]. В последнее время также получили распространение устройства для накачки магнитного потока (flux pump devices), которые позволяют создавать и поддерживать магнитный поток без значительных внешних затрат энергии [13, 14]. В совокупности указанные технологии не только расширяют функциональные возможности ВТСП генераторов, но и способствуют их внедрению в новые области, включая высокоскоростной транспорт, системы возобновляемой энергетики и даже перспективные исследования в области термоядерного синтеза. Несмотря на активное использование ВТСП технологий в современных вращающихся машинах, вопрос выбора наиболее эффективной конструкции катушек для реализации маломасштабного прототипа остается недостаточно изученным.

Настоящая работа посвящена экспериментальным и численным исследованиям, направленным на анализ магнитных и транспортных характеристик наиболее перспективных ВТСП элементов генератора:

рейстречковых ВТСП катушек и незамкнутых кольцевых ВТСП обмоток. В рамках проведенного численного анализа получены распределения токов, магнитного поля, температур и потерь для рассматриваемых элементов ВТСП генератора. Экспериментально и численно исследовались потери на переменном токе для ВТСП обмоток, охлаждаемых жидким азотом, при различных амплитудах и частотах переменного транспортного тока. На основе результатов проведенных исследований делается вывод о перспективности применения рейстрек-катушек и незамкнутых кольцевых обмоток для реализации маломасштабного ВТСП генератора. Полученные результаты будут также использованы для разработки и оптимизации вращающихся машин на основе ВТСП элементов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

В качестве основного токопроводящего материала для реализации сверхпроводящего генератора выбран ленточный высокотемпературный сверхпроводящий композит на основе соединения типа $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (REBCO, где RE – редкоземельный элемент) производства российской компании С-Инновации. REBCO в виде композитных ВТСП лент обладает высокими прочностными характеристиками, хорошей теплопроводностью, а главное – высокими магнитными и токонесущими характеристиками. В общем случае композитная ВТСП лента представляет собой металлическую ленту, с набором последовательно осажденных функциональных слоев. Толщина некоторых слоев составляет всего несколько нанометров. Наноразмерные слои выполняют различные функции (буферные, защитные, улучшение адгезии к подложке и т.д.), но не играют существенной роли в электродинамических и теплофизических процессах ввиду своей малой толщины, в связи с чем не представляют интереса в рамках математического моделирования и, как правило, не учитываются. Таким образом, в рамках численного моделирования каждая ВТСП лента имеет слоистую структуру, содержащую слои подложки (70 мкм), ВТСП слой (3 мкм), слой серебра (5 мкм), а также двусторонне медное покрытие (10 мкм с каждой стороны). Ширина ВТСП лент составляет 4 мм. Толщина h_{HTS} ВТСП лент REBCO производства С-Инновации, рассматриваемых в представленной работе, составляет 0,1 мм. Согласно спецификации производителя, средний критический ток ВТСП ленты составляет 120 А в собственном поле при температуре кипения жидкого азота. Следует отметить наличие реального разброса

в распределении критического тока вдоль лент, который оценивается на уровне не менее, чем 15%. Это означает, что фрагменты ленты даже из одной партии могут иметь различный критический ток. В связи с этим при моделировании с целью анализа потерь учитывается возможность фрагментарного варьирования критического тока ВТСП лент на 15%. Температура сверхпроводящего перехода для контрольных образцов была измерена экспериментально и составила ~ 92 К.

В рамках настоящей работы исследованы магнитные и транспортные характеристики двух типов ВТСП катушек: рейстрек-катушки и круговые обмотки. Принципиальная схема рейстрек-катушки представлена на Рис. 1. Рейстрек-катушка представляет из себя послойную спиралевидную намотку проводника на формер, содержащий два скругленных участка и два параллельных линейных участка. Длина прямого участка катушки L , внутренний радиус R_1 внешний радиус $R_2 = R_1 + n \cdot h$, где n – число витков обмотки, h – толщина одного слоя обмотки. Круговая ВТСП обмотка с математической точки зрения является идеальной спиралью Архимеда (Рис. 2). Длина L линейного участка рейстрек-катушки составляет 80 мм, малый радиус $R_1 = 20$ мм. Малый радиус кольцевой незамкнутой ВТСП обмотки $R_1 = 30$ мм. Количество n ВТСП слоев обмоток при моделировании варьируется от 1 до 40. Для проведения вычислений использовалась геометрия, дублирующая геометрию катушек, изготовленных для проведения экспериментальных исследований.

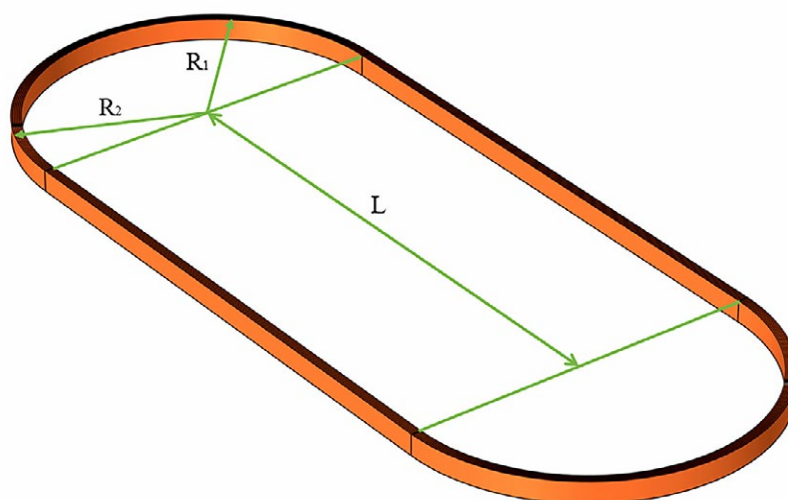


Рис. 1. Принципиальная схема рейстрек-катушки

Fig. 1. Schematic diagram of the racetrack coil

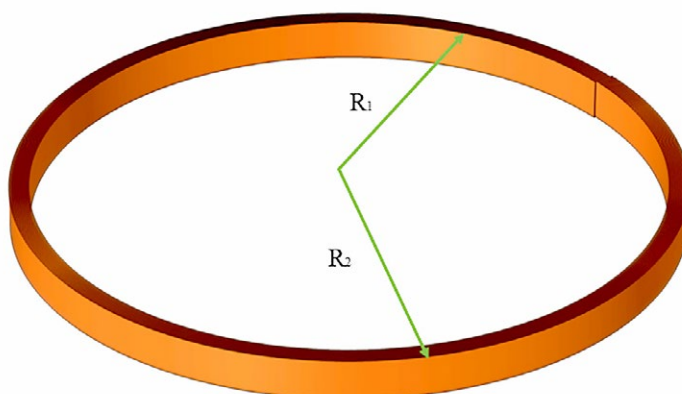


Рис. 2. Принципиальная схема круговой обмотки

Fig. 2. Schematic diagram of a circular winding

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Моделирование элементов сверхпроводящего генератора выполнялось в среде Comsol Multiphysics в А-Т формулировке нестационарных уравнений Максвелла. 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:

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

где $\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$ – вектор нормали. Тогда выражение (1) приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial(Tn_z)}{\partial y} - \frac{\partial(Tn_y)}{\partial z} \\ \frac{\partial(Tn_x)}{\partial z} - \frac{\partial(Tn_z)}{\partial x} \\ \frac{\partial(Tn_y)}{\partial x} - \frac{\partial(Tn_x)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Управляющее уравнение системы для сверхпроводящих доменов представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{J_c(B, T)} \right) = \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\nabla \times \mathbf{T}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\nabla \times \mathbf{T}}{J_c(B, T)} \right) = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (3)$$

Где $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля, E_0 – критерий для критического электрического поля, равный 1 мкВ/см, $J_c(B, T)$ – величина критического тока ВТСП лент в магнитном поле B при локальной температуре T , n – показатель степени, равный для исследуемых образцов 27, $\mathbf{T}$ – токовый векторный потенциал, $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля.

Магнитный потенциал $\mathbf{A}$ выступает в качестве зависимой переменной во всем расчетном пространстве:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4)$$

μ – магнитная проницаемость.

Для определения величины тока I , протекающего через плоский сверхпроводник, используется граничное условие:

$$I = \iint_S \mathbf{J} dS = \iint_S \nabla \times \mathbf{T} dS = \oint_S \mathbf{T} dl \quad (5)$$

где S – поперечное сечение проводящего слоя, l – длина его периметра.

При использовании методов гомогенизации плотность тока сверхпроводящего домена J_s вычисляется как:

$$\mathbf{J}_s = \frac{\delta}{\Lambda} \mathbf{J} \quad (6)$$

где Λ – полная толщина ленты, δ – толщина ВТСП слоя.

Для получения сходимости задачи необходимо применить граничные условия Дирихле к боковым границам гомогенизированного домена, а к верхним и нижним границам – граничные условия Неймана.

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплопередачи в твердых телах:

$$\rho C_p \frac{\partial \tau}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla \tau) = Q + \rho C_p \mathbf{w} \nabla \tau, \quad (7)$$

где в качестве зависимой переменной выступает абсолютная температура τ , C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, w – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические. Подробное описание теплофизической модели при охлаждении жидким азотом представлено в работе [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитные и транспортные характеристики сверхпроводящих элементов генератора исследованы при амплитудах переменного транспортного тока амплитуды от 10% до 90% от величины критического тока J_c в диапазоне частот транспортного тока от 50 Гц до 1033 Гц.

На Рис. 3 представлены распределения магнитного поля незамкнутых ВТСП катушек с 40 слоями обмотки ($J_{c0}=120$ А) при протекании по ним постоянного транспортного тока амплитуды 85 А ($\sim 0,7 J_c$) в условиях охлаждения жидким азотом. Величина магнитного поля, индуцируемого такими катушками приблизительно одинакова (отличие $\sim 6,5\%$). Однако, важно отметить, что для кольцевой конфигурации характерна бóльшая напряженность магнитного поля в центре, что в процессе эксплуатации может привести к подавлению критического тока ВТСП композитов. Для проверки этого предположения были построены распределения индукции магнитного поля в центральном сечении каждой ВТСП катушки (Рис. 4).

В обоих случаях максимальное магнитное поле приходится на внутренние края обмоток, в случае рейстрек-катушки магнитное поле на скругленных участках кабеля выше, чем на прямых участках. Следует заметить, что величина максимального магнитного поля на обмотках для рейстрек-конфигурации почти на 10% ниже, чем для кольцевой, что может оказаться значимым, особенно при пониженных температурах.

Некоторые различия были также выявлены и в тепловом поведении этих двух видов обмоток. На Рис. 5 и 6 соответственно приведены распределения температур в центральном сечении и на поверхности для рейстрек-катушки и кольцевой обмотки, содержащих 40 слоев ВТСП ленты и охлаждаемых жидким азотом при пропускании транспортного тока величиной 85 А. В обоих случаях максимальному нагреву подвержены средние слои обмоток, контактирующие с хладагентом только с торцов и окруженные, к тому же, другими токонесущими греющимися ВТСП

лентами. Однако максимальный нагрев лент в рейстрек-катушке составил $\sim 0,6$ К, а ВТСП элементы кольцевой обмотки изменили температуру на 1,7 К.

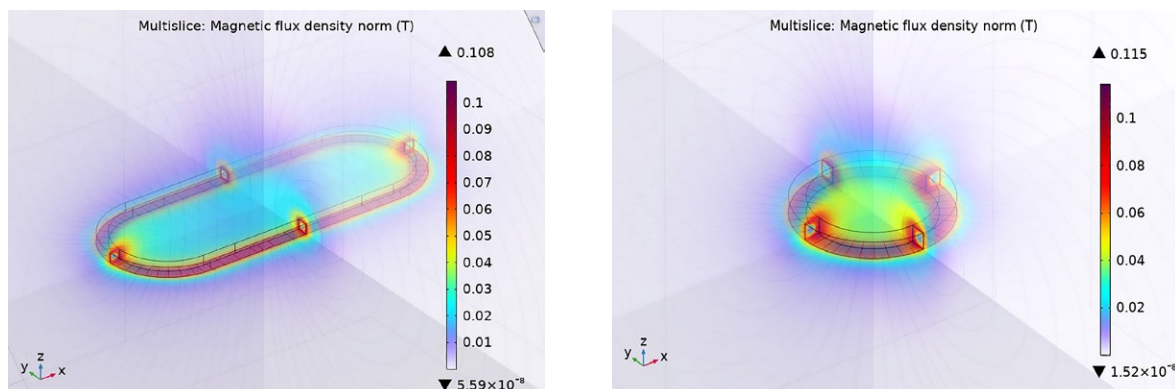


Рис. 3. Расчетные распределения магнитного поля (Тл) рейстрек-катушки (слева) и кольцевой обмотки (справа) при амплитуде постоянного транспортного тока 85 А. Количество обмоток в каждой из катушек составляет 40. Критический ток лент 120 А

Fig. 3. Calculated magnetic field distributions (T) of the racetrack coil (left) and the ring winding (right) at a constant transport current amplitude of 85 A. The number of windings in each coil is 40. The critical current of the tapes is 120 A

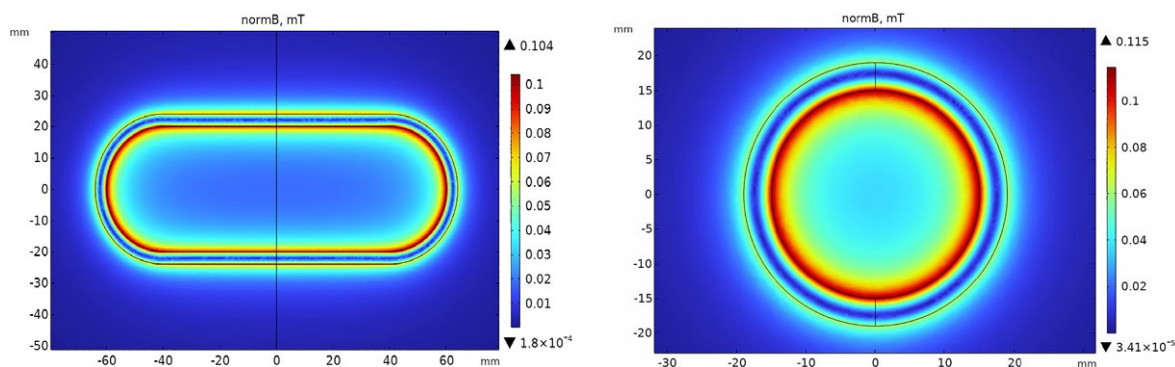


Рис. 4. Распределения магнитного поля (Тл) в центральном сечении незамкнутых ВТСП катушек при транспортном токе 85 А ($\sim 0,7 J_c$). Количество обмоток в каждой из катушек составляет 40. Критический ток лент 120 А

Fig. 4. Magnetic field distributions (T) in the central cross-section of the non-closed HTS coils at a transport current of 85 A ($\sim 0.7 J_c$). The number of windings in each coil is 40. The critical current of the ribbons is 120 A

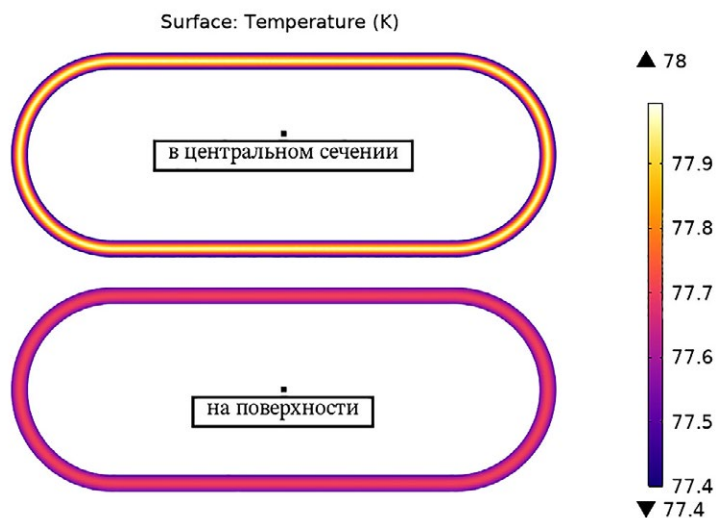


Рис. 5. Распределения температур в центральном сечении и на поверхности 40-слойной рейстрек-катушки при пропускании через нее постоянного транспортного тока амплитуды 85 А

Fig. 5. Temperature distribution in the central section and on the surface of a 40-layer racetrack coil with a constant transport current of 85 A amplitude being transmitted

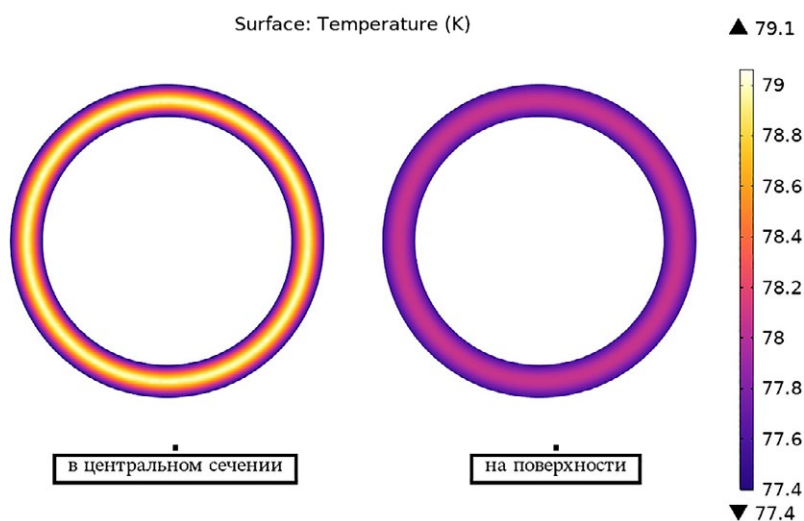


Рис. 6. Распределения температур в центральном сечении и на поверхности 40-слойной кольцевой обмотки при пропускании через нее постоянного транспортного тока амплитуды 85 А

Fig. 6. Temperature distribution in the central section and on the surface of a 40-layer ring winding with a constant transport current of 85 A amplitude being transmitted

Такие различия в тепловом поведении рассматриваемых обмоток, по всей видимости, обусловлены различной площадью поверхности контакта кабелей с хладагентом. Увеличение температуры системы почти

на два градуса при азотном охлаждении, на самом деле, является очень значимым, ведь, согласно экспериментальной критической поверхности, это изменение температуры приводит к снижению критического тока ВТСП лент на ~20%.

Моделирование с учетом возможности варьирования критического тока по длине образцов на 15% (Рис. 7) показывает, что для кольцевой ВТСП обмотки из 40 слоев напряжение начинает превышать критерий 1 мкВ/см уже при величине транспортного тока ~75 А, то есть критический ток ВТСП кабеля снизился почти на 38% в сравнении с исходной ВТСП лентой. Критический ток рейстрек-катушки при заданных условиях охлаждения составил немногим более 89 А – порядка 74% процентов от начального критического тока композита. Отдельная же ВТСП лента при наличии неоднородности критического тока сохраняет номинальное значение J_c , но демонстрирует небольшие скачки напряжения при токах ниже критического. Отличие напряжения на одиночной ВТСП ленте от строгого нуля при токах меньших, чем J_c , обусловлено именно неоднородностью критического тока, вследствие которой происходят

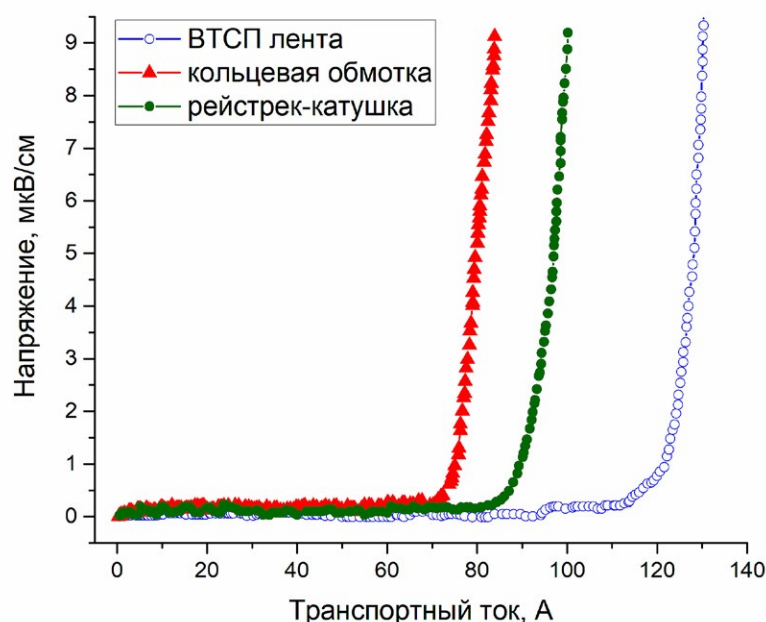


Рис. 7. Расчетные вольтамперные характеристики исходной ВТСП ленты, кольцевой обмотки и рейстрек-катушки с учетом варьирования критического тока лент по длине на величину 15%

Fig. 7. Calculated voltampere characteristics of the initial HTS tape, ring winding and racetrack coil taking into account the variation of the critical current of the tapes along their length by the value of 15%

локальные всплески тепловыделения, которые быстро отводятся хладагентом, контактирующим с ВТСП лентой по всему периметру.

Расчет потерь на переменном токе выполнен для различных частот и амплитуд токовой нагрузки. Частота переменного тока соответствует условиям проведения экспериментальных исследований, в рамках которого во избежание дополнительных наводок от электрических сетей, помимо частоты 50 Гц, исследовались частоты, не кратные 50. На Рис. 8 и Рис. 9 приведены расчетные и экспериментальные зависимости потерь на переменном токе соответственно в рейстрек-катушке и кольцевой обмотке за цикл нагрузки от величины токовой нагрузки для различных частот переменного транспортного тока. Результаты численного моделирования с хорошей точностью согласуются с экспериментальными данными. Потери в круговой обмотке превышают потери в рейстрек-катушках на величину от 7% до 28%, причем это различие увеличивается с ростом частоты переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований, направленных на анализ магнитных

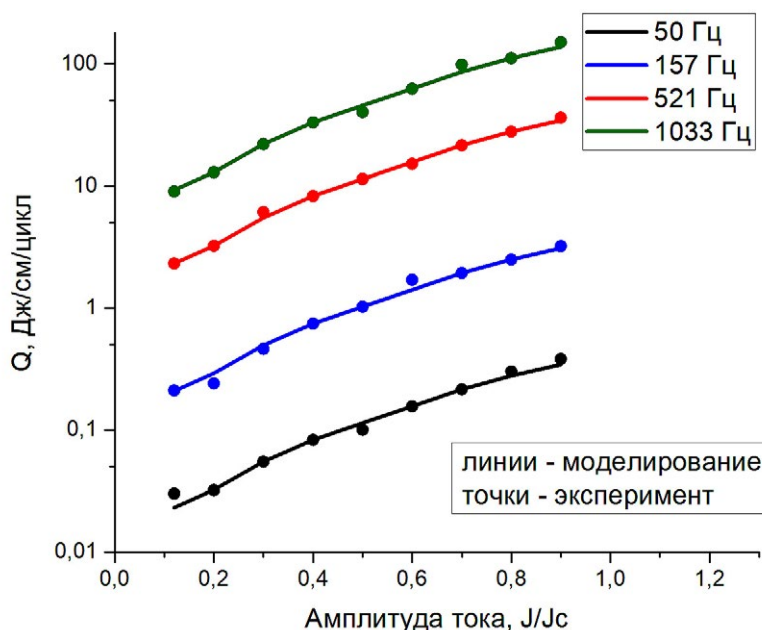


Рис. 8. Расчетные логарифмические зависимости потерь на цикл от амплитуды переменного тока для рейстрек-катушки, охлаждаемой жидким азотом

Fig. 8. Calculated logarithmic dependences of the cycle losses on the AC amplitude for a racetrack coil cooled with liquid nitrogen

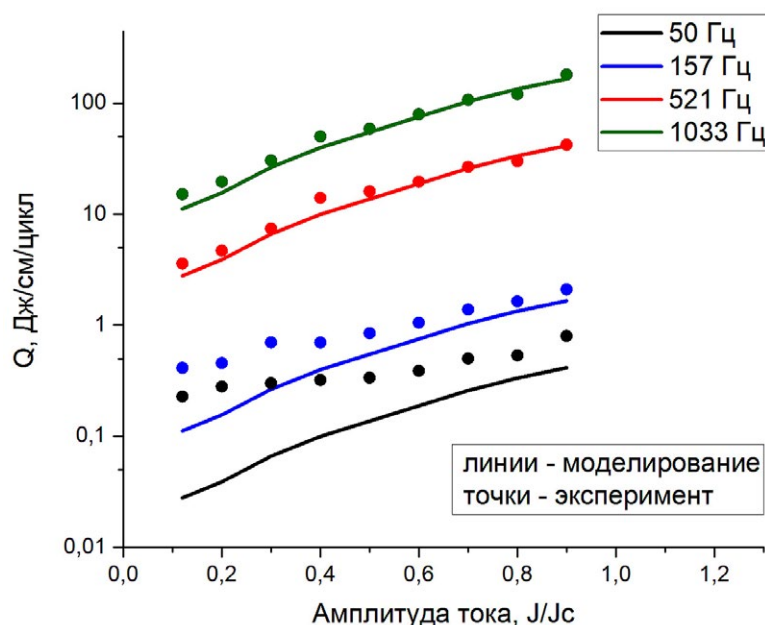


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные логарифмические зависимости потерь на цикл от амплитуды переменного тока для незамкнутой кольцевой обмотки при охлаждении жидким азотом

Fig. 9. Experimental and calculated logarithmic dependences of the cycle losses on the AC current amplitude for a non-closed ring winding under liquid nitrogen cooling

и транспортных характеристик наиболее перспективных ВТСП элементов генератора: рейстрек-катушек и незамкнутых круговых обмоток. Для этих геометрий, характерных для электромагнитных систем ВТСП генератора, выполнен расчет распределений токов, магнитных полей и температур в условиях воздействия постоянного транспортного тока, а также выполнен расчет потерь на переменном токе при различных амплитудах и частотах токовой нагрузки в условиях охлаждения жидким азотом.

При сравнении свойств незамкнутых ВТСП катушек в виде рейстрека и кольцевой обмотки установлено, что в обоих случаях наибольшему нагреву подвержены внутренние слои обмоток, напрямую контактирующие с хладагентом только с торцов и окруженные, к тому же, другими токонесущими греющимися ВТСП лентами. При этом наибольший нагрев характерен для кольцевых незамкнутых ВТСП катушек. Кроме того, кольцевым катушкам в сравнении с вытянутыми токонесущими элементами свойственны и более высокие магнитные поля на краях обмотки. Наличие вышеуказанных недостатков приводит к тому, что критический ток кольцевой обмотки при охлаждении жидким азотом деградирует на величину порядка 38% от первоначального тока композита,

тогда как рейстрек-катушка демонстрирует снижение токонесущей способности лишь на 26%. В диапазоне частот от 50 до 1033 Гц для амплитуд транспортного тока от 0,1 до 0,9 от величины критического тока ВТСП лент проведено исследование потерь на переменном токе рассматриваемых конфигураций ВТСП обмоток. Результаты численного анализа находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Анализ потерь на переменном токе для незамкнутых ВТСП катушек показал, что наиболее высокий уровень тепловых потерь наблюдается для кольцевой обмотки.

Таким образом, установлено, что в условиях охлаждения жидким азотом рейстрек-катушки обладают более высокими магнитными и транспортными характеристиками в сравнении с замкнутыми кольцевыми ВТСП элементами, на что решающее влияние оказывает их геометрический фактор. Наиболее выгодной конфигурацией обмотки элементов ВТСП генератора при азотном охлаждении является рейстрековая катушка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barnes P.N., Sumption M.D., Rhoads G.L. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings // *Cryogenics*. 2005. Vol. 45, N 10. P. 670–86. doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.09.001
2. Haran K.S., Kalsi S., Arndt T., et al. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap // *Superconductor Science and Technology*. 2017. Vol. 30, N 12. P. 123002. doi: 10.1088/1361-6668/aa833e
3. Kalsi S.S., Weeber K., Takesue H., et al. Development status of rotating machines employing superconducting field windings // *Proceedings of the IEEE*. 2004. Vol. 92, N 10. P. 1688–704. doi: 10.1109/JPROC.2004.833676

4. Kim C., Sung H.J., Go B.S., et al. Design, Fabrication, and Testing of a Full-Scale HTS Coil for a 10 MW HTS Wind Power Generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 31, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2021.3059223
5. Song X., Mijatovic N., Kellers J., et al. A Pole Pair Segment of a 2-MW High-Temperature Superconducting Wind Turbine Generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017. Vol. 27, N 4. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2017.2656778
6. Gamble B., Snitchler G., MacDonald T. Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21, N 3. P. 1083–8. doi: 10.1109/TASC.2010.2093854
7. Moon H., Kim Y.-C., Park H.-J., et al. An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application // *Superconductor Science and Technology*. 2016. Vol. 29, N 3. P. 034009. doi: 10.1088/0953-2048/29/3/034009
8. Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwalla M., et al. Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2009. Vol. 19, N 3. P. 1656–61. doi: 10.1109/TASC.2009.2017758
9. Terao Y., Seta A., Ohsaki H., et al. Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2902323
10. Hahn S., Park D.K., Bascunan J., Iwasa Y. HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21, N 3. P. 1592–5. doi: 10.1109/TASC.2010.2093492
11. Zaneagin S.Y., Ivanov N.S., Shishov D.M., et al. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1559, N 1. P. 012142. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012142
12. Zhang G., Chen B., Song F., et al. Optimal Design of an Innovative High Temperature Superconducting Generator With the Evaporative Cooling Stator and the Magnetic Flux Oriented Rotor // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2007. Vol. 17, N 2. P. 1545–8. doi: 10.1109/TASC.2007.898197
13. Gao Y., Wang W., Wang X., et al. Design and Study of a 2G HTS Synchronous Motor With Brushless HTS Flux Pump Exciters // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2898505
14. Jeon H., Lee J., Han S., et al. PID Control of an Electromagnet-Based Rotary HTS Flux Pump for Maintaining Constant Field in HTS Synchronous Motors // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Vol. 28, N 4. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2018.2822704
15. Alexandrov D.A., Martirosian I.V., Pokrovskii S.V., et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes // *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024. Vol. 10, N 2. P. 215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

REFERENCES

1. Barnes PN, Sumption MD, Rhoads GL. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. *Cryogenics*. 2005;45(10):670–86. doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.09.001
2. Haran KS, Kalsi S, Arndt T, et al. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap. *Superconductor Science and Technology*. 2017;30(12):123002. doi: 10.1088/1361-6668/aa833e
3. Kalsi SS, Weeber K, Takesue H, et al. Development status of rotating machines employing superconducting field windings. *Proceedings of the IEEE*. 2004;92(10):1688–704. doi: 10.1109/JPROC.2004.833676
4. Kim C, Sung HJ, Go BS, et al. Design, Fabrication, and Testing of a Full-Scale HTS Coil for a 10 MW HTS Wind Power Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021;31(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2021.3059223
5. Song X, Mijatovic N, Kellers J, et al. A Pole Pair Segment of a 2-MW High-Temperature Superconducting Wind Turbine Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):1–5. doi: 10.1109/TASC.2017.2656778
6. Gamble B, Snitchler G, MacDonald T. Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011;21(3):1083–8. doi: 10.1109/TASC.2010.2093854
7. Moon H, Kim Y-C, Park H-J, et al. An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application. *Superconductor Science and Technology*. 2016;29(3):034009. doi: 10.1088/0953-2048/29/3/034009
8. Sivasubramaniam K, Zhang T, Lokhandwalla M, et al. Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2009;19(3):1656–61. doi: 10.1109/TASC.2009.2017758
9. Terao Y, Seta A, Ohsaki H, et al. Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2902323
10. Hahn S, Park DK, Bascunan J, Iwasa Y. HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011;21(3):1592–5. doi: 10.1109/TASC.2010.2093492
11. Zaneagin SY, Ivanov NS, Shishov DM, et al. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1559(1):012142. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012142
12. Zhang G, Chen B, Song F, et al. Optimal Design of an Innovative High Temperature Superconducting Generator With the Evaporative Cooling Stator and the Magnetic Flux Oriented Rotor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2007;17(2):1545–8. doi: 10.1109/TASC.2007.898197
13. Gao Y, Wang W, Wang X, et al. Design and Study of a 2G HTS Synchronous Motor With Brushless HTS Flux Pump Exciters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2898505

14. Jeon H, Lee J, Han S, et al. PID Control of an Electromagnet-Based Rotary HTS Flux Pump for Maintaining Constant Field in HTS Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(4):1–5. doi: 10.1109/TASC.2018.2822704
15. Alexandrov DA, Martirosian IV, Pokrovskii SV, et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes *MTST*. 2024;10(2):215–30. doi: 10.17816/transsyst632274

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук,

инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,

заведующий научно-исследовательской лабораторией;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,

research engineer;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Dmitrii A. Aleksandrov, research engineer;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,

Head of the Laboratory;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com