

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst632274>

© Д.А. Александров, И.В. Мартиросян, С.В. Покровский,
В.В. Залеткина, И.А. Руднев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ

Цель. сравнение характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии, на основе ВТСП CORC® и рейстрек-катушек.

Методы. численный мультифизический анализ СПИН выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. исходя из полученных результатов для реализации индуктивного накопителя энергии было выбрано использование CORC® кабеля в конфигурации соленоида с отношением плотности транспортного тока к критическому равным 0.7 при температуре кипения жидкого азота.

Заключение. разработанная численная модель позволяет производить расчет энергоемкости и энергетических потерь для СПИН в соленоидальной и тороидальной конфигурациях и может быть применена для разработки индуктивных накопителей на основе ВТСП композитов.

Ключевые слова: ВТСП композиты; СПИН; транспортные системы; метод конечных элементов.

Как цитировать:

Александров Д.А., Мартиросян И.В., Покровский С.В., Залеткина В.В., Руднев И.А. Энергоемкость и энергетические потери индуктивного накопителя энергии на основе композитных ВТСП лент // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© **D.A. Alexandrov, I.V. Martirosian, S.V. Pokrovskii, V.V. Zaletkina, I.A. Rudnev**National research nuclear university MEPhI
(Moscow, Russia)**ENERGY CAPACITY AND ENERGY LOSSES
OF INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICE BASED
ON COMPOSITE HTS TAPES**

Aim. The aim of this study is to compare the performance of toroidal and solenoidal configurations of a superconducting inductive energy storage device using CORC® and racetrack cables made from high-temperature superconducting tapes.

Methods. A numerical multiphysics analysis of inductive energy storage device was performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics engineering modeling environment.

Results. The analysis revealed that the CORC® cable in a solenoid configuration, with a transport current density to critical current density ratio of 0.7 at the boiling point of liquid nitrogen, was the most suitable for inductive energy storage.

Conclusion. The developed numerical model allows to calculate energy capacity and energy losses in superconducting inductive energy storage devices configured as solenoids or toroids. This model can be applied to the development of inductive storage devices made from HTS composites.

Keywords: HTS composites; superconducting inductive energy storage device; transportation systems; finite element method.

To cite this article:

Alexandrov DA, Martirosian IV, Pokrovskii SV, Zaletkina VV, Rudnev IA. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

ВВЕДЕНИЕ

Использование возобновляемых источников электроэнергии в последнее время вызывает интерес во всем мире [1, 2]. Однако, из-за прерывистого характера энергопроизводства большинства существующих возобновляемых источников энергии, таких как ветряные генераторы и солнечные батареи, накопители энергии являются важным компонентом любой устойчивой и надежной электросистемы. Наиболее широко исследованные системы накопления энергии включают в себя кинетические накопители энергии, индуктивные накопители энергии, гидроаккумулирующие системы, и суперконденсаторы [3, 4]. Они используются для обеспечения стабильности электросетей, благодаря их высокой способности к передаче и накоплению энергии [5–7]. Одними из перспективных устройств для накопления электроэнергии являются индуктивные накопители энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [8].

Устройство СПИН представляет собой комбинацию трех технологий, а именно сверхпроводимости, криогеники и силовой электроники. Сверхпроводящая катушка – сердце СПИН. Электрически это чистый индуктор (без внутреннего сопротивления), и постоянный ток может течь через него без каких-либо омических потерь [9]. В результате сверхпроводящая катушка может сохранять ток или энергию в течение многих лет с плотностью энергии до 100 МДж/м³.

Накопленная энергия передается в электросеть в режиме разрядки. Индуктивные накопители способны быстро срабатывать и могут переходить из режима зарядки в режим разрядки за времена порядка нескольких микросекунд. Дополнительными преимуществами таких систем являются отсутствие движущихся компонентов и высокая циклическая эффективность [10]. Наиболее распространенными конструкциями катушек СПИН являются соленоид и тороид. При изготовлении катушек индуктивных ВТСП накопителей энергии используются такие технологии как CORC® кабель и рейстрек-катушки [11, 12].

Чтобы провод оставался в сверхпроводящем состоянии, ВТСП элементы индуктивного накопителя энергии всегда должны поддерживаться при температурах, плотностях тока и магнитном поле ниже критических значений. Для достижения и поддержания рабочей температуры используется криокулерная техника, а также жидкие хладагенты, такие как жидкий азот, гелий, неон и водород [13]. Критический ток в сверхпроводнике и, как следствие, энергоемкость

СПИН зависят от температуры. Целью представленной работы является выбор оптимальной конфигурации индуктивного накопителя энергии, а также исследование зависимости максимально возможной накопленной энергии и потерь СПИН от температуры.

ТЕОРИЯ Н-ФОРМАЛИЗМА

Построение и расчет модели проводились в программной среде COMSOL Multiphysics®. В модели решается управляющее уравнение Фарадея методом конечных элементов:

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E + \frac{d(\mu_0 H)}{dt} = 0 \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля, B – индукция магнитного поля, H – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная. Вольт-амперная характеристика сверхпроводника задается в виде степенного закона для нелинейной зависимости сопротивления от тока:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^n, \quad (2)$$

где E_c – критерий, принятый равным 1 мкВ/см, J_c – критическая плотность тока, n – показатель степени, характеризующий крутизну ВАХ сверхпроводника. Для корректного расчета в выражение (2) вводится зависимость критической плотности тока от величины приложенного магнитного поля $J_c(B)$. Компоненты тока $J = [J_x, J_y, J_z]$ вычисляются с помощью уравнений Максвелла:

$$J = \nabla \times H = \begin{cases} \frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz} \\ -\frac{dH_z}{dx} + \frac{dH_x}{dz} \\ \frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \end{cases} \quad (3)$$

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВТСП

Тепловые процессы в ВТСП описываются управляющим уравнением теплопередачи, в котором температура T является зависимой переменной:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(T)\nabla T) = Q + \rho(T)C_p(T)w\nabla T, \quad (4)$$

где ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, Q – все источники тепла, C_p – теплоемкость при постоянном давлении, w – поле скорости температур. Термоэлектрический локальный источник тепла Q определяется выражением:

$$Q = \|E\| \cdot \|J\|, \quad (5)$$

где E и J определяются из уравнений (1)–(3). В выражении (2) в присутствии магнитного поля зависимость плотности критического тока J_c от температуры T и индукции магнитного поля B в ВТСП описывается экспериментальной интерполированной критической поверхностью, изображенной на Рис. 1 [14].

В рамках данной работы рассматривались два способа охлаждения: охлаждение жидким хладагентом (жидким азотом) и охлаждение посредством теплопроводности твердого тела. В последнем случае

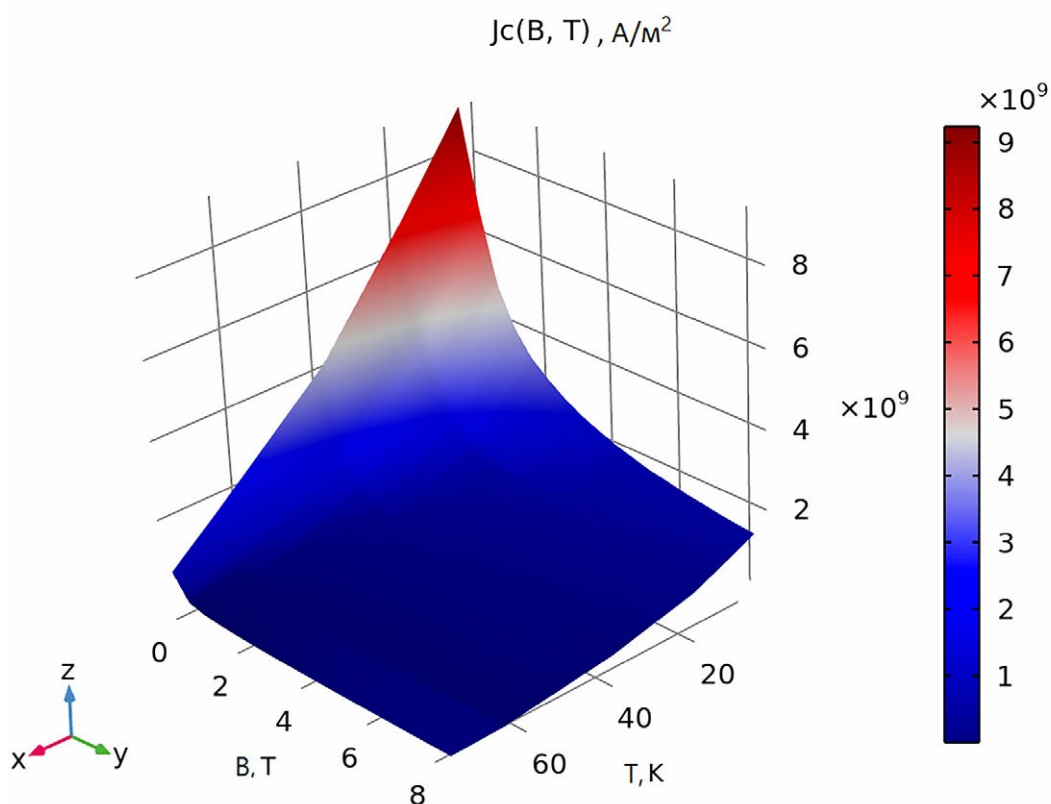


Рис. 1. Экспериментальная критическая поверхность $J_c(B, T)$

Fig. 1. Experimental critical surface $J_c(B, T)$

мощность теплоотвода и температура холодного пальца соответствует параметрам реальной криокулерной установки.

В случае охлаждения жидким азотом учитывались два режима кипения хладагента: пузырьковое кипение и конвективное кипение. Коэффициент теплоотдачи для конвективного кипения определяется следующим выражением:

$$\alpha_{conv} = C_{conv} \Delta T^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где C_{conv} – коэффициент, определяемый размером образца, ΔT – разность температур на границе между ВТСП композитом и жидким азотом [15]. Для пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи задается следующим образом:

$$\alpha_{boil} = C_h q^{0.624} (\rho C_p k)^{0.117}, \quad (7)$$

где C_h – коэффициент, зависящий от материала поверхности ВТСП композита (в нашем случае медь) и параметров жидкого хладагента, C_p – теплоемкость, k – теплопроводность жидкого азота, ρ – плотность, q – тепловой поток. Выбор того или иного коэффициента теплоотдачи определяется, используя гистерезисную зависимость теплового потока q от разности температур [15].

ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Для создания замкнутых элементов в форме рейстрек и CORC® кабеля использовались композитные ВТСП-ленты REBa₂Cu₃O_{7-x} 2G фирмы SuperOx. На Рис. 2 приведена архитектура ВТСП-ленты. Такие ленты обладают высокими токонесущими характеристиками: критический ток) в собственном поле при температуре кипения жидкого азота (77 К составляет 550 А. Толщина сверхпроводящего слоя составляет 1–3 мкм.

На Рис. 3 представлена принципиальная схема CORC® кабеля. Конструкция каждого провода соответствует одной и той же базовой архитектуре: сверхпроводящие ленты наматываются спиральными слоями вокруг цилиндрического сердечника из мельхиорового сплава. На Рис. 4 представлена принципиальная схема рейстрек-катушки, в которой ВТСП ленты наматываются на former послойно.

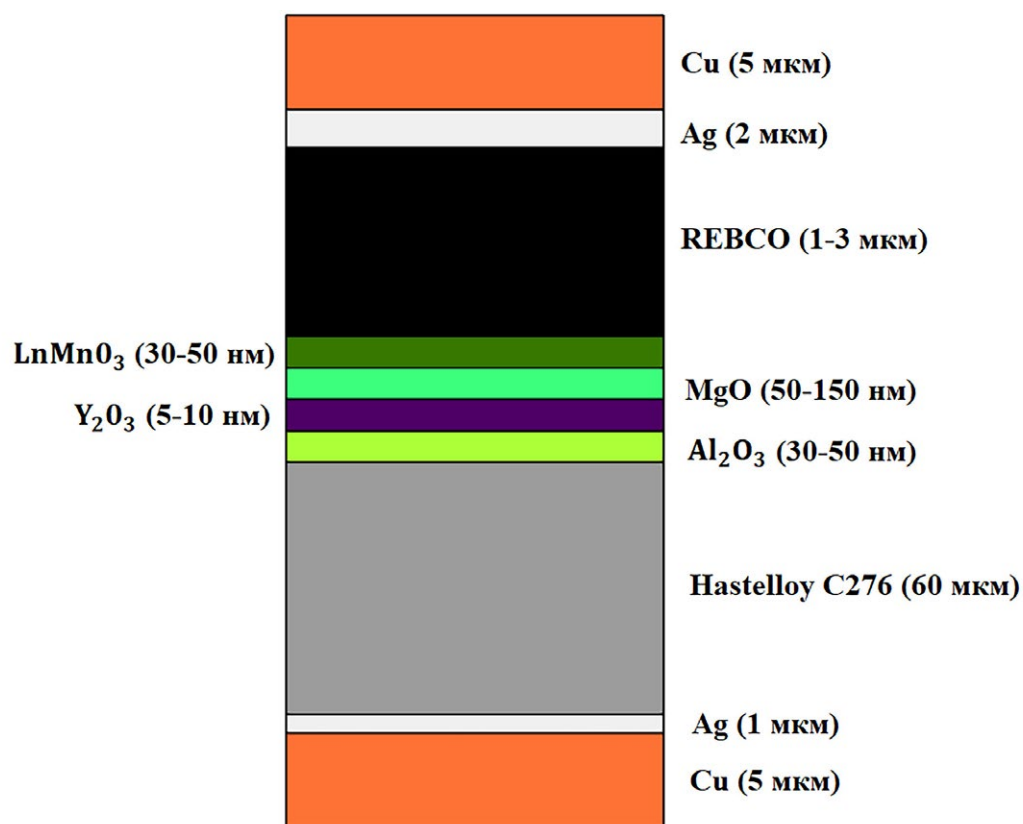


Рис. 2. Архитектура ВТСП-ленты SuperOx

Fig. 2. Architecture of HTSC tape SuperOx

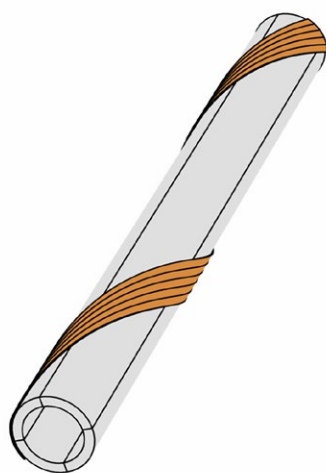


Рис. 3. Принципиальная схема CORC® кабеля

Fig. 3. Cable schematic diagram CORC®

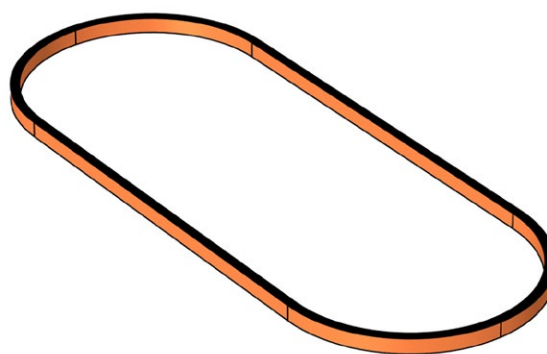


Рис. 4. Принципиальная схема рейстрек-катушки

Fig. 4. Schematic diagram of a racetrack coil

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций

Чтобы сконструировать магнит СПИН, необходимо получить следующие предварительные данные: количество энергии, запасенной в катушке, рабочий ток, рабочая температура, методы охлаждения и максимально доступная длина сверхпроводящей ленты, необходимая для намотки ВТСП катушки.

При конструировании СПИН, наибольшее распространение получили соленоидальные и тороидальные конструкции сверхпроводящего магнита. Обычно сегментированное тороидальное расположение является предпочтительным с точки зрения технического обслуживания и проектирования, поэтому винтовая конфигурация тороида в рамках представленной работы не рассматривается. Для реализации прототипа индуктивного ВТСП накопителя энергии рассматриваются тороидальная конструкция СПИН, состоящая из 12 секций, а также соленоидальная конструкция, состоящая из 12 витков ВТСП провода (см. Рис. 5).

В обоих случаях сверхпроводящие катушки обладают следующими параметрами: диаметр провода – 5 мм, радиус кольца – 100 мм, рабочий ток – 5 кА. Длина ВТСП кабеля, необходимого для намотки: 7.34 м – для тороидальной конфигурации, 7.43 м – для соленоидальной конфигурации.

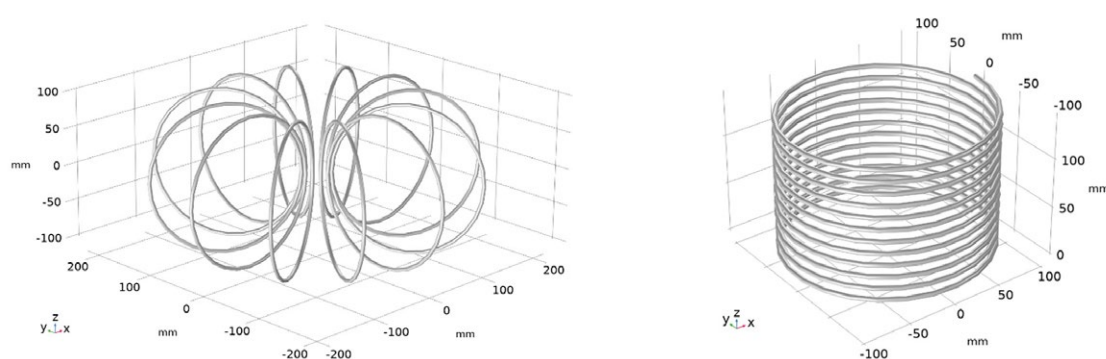


Рис. 5. Геометрия анализируемых конфигураций.

Слева – СПИН с тороидальной геометрией;
Справа – СПИН с соленоидальной геометрией

Fig. 5. Geometry of analyzed configurations.

Left: SPIN with toroidal geometry;
Right – SPIN with solenoidal geometry

На Рис. 6 и 7 представлены распределения величины индукции магнитного поля и линии магнитного поля в центральном сечении для обеих конструкций. Количество уровней для магнитных линий в обоих случаях одинаково. Охлаждение здесь производилось жидким азотом при температуре кипения 77 К.

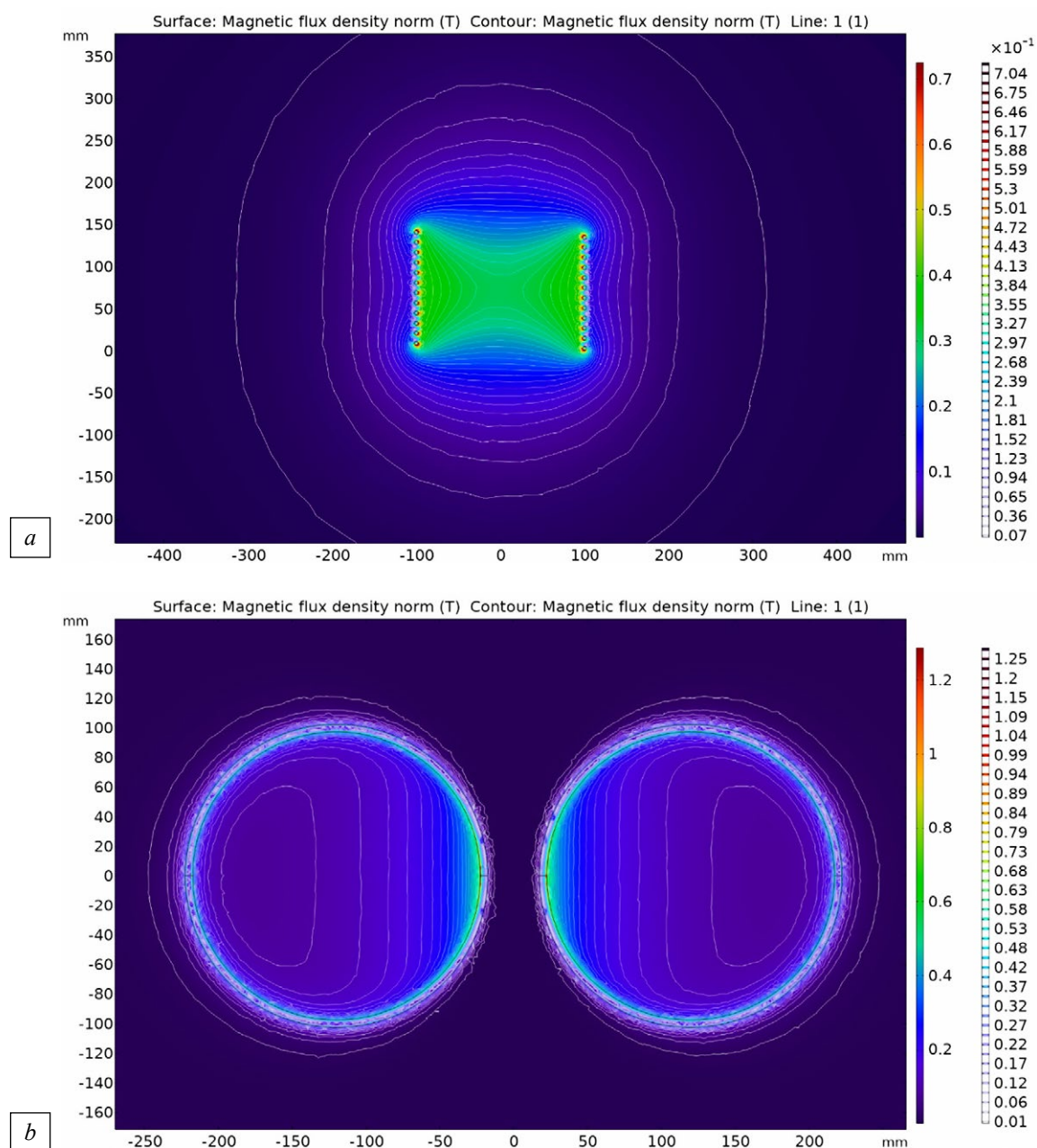


Рис. 6. Нормы индукции магнитного поля и магнитные линии: а – в соленоидальном СПИН; б – в тороидальном СПИН при рабочем токе 5 кА

Fig. 6. Magnetic field induction rate and magnetic lines: a – in solenoidal SPIN; b – in toroidal SPIN at an operating current of 5 kA

Анализ Рис. 6 и 7 показал, что для соленоида рассеянное магнитное поле значительно больше, чем для тора (линии уровней в 1 случае отстоят от границы сверхпроводника максимум на 200 мм, а во 2 случае на 50 мм). Максимальное поле больше в торе почти на 60%. При этом максимум индукции магнитного поля в обеих конфигурациях приходится на сами ВТСП обмотки. Указанное обстоятельство может привести к ухудшению критических характеристик сверхпроводящей ленты в соответствии с Рис. 1 и к дополнительным потерям, при этом чем выше напряженность магнитного поля на обмотках ВТСП кабеля, тем выше будут гистерезисные потери. При разработке СПИН необходимо использовать высокополевою ВТСП ленту, способную сохранять критические характеристики в сильных магнитных полях.

На основе разработанных численных моделей был проведен расчет энергоемкости, механических напряжения и индуктивности тороидальной и соленоидальной конфигураций катушек СПИН. В Табл. 1 представлены основные расчетные характеристики индуктивных ВТСП накопителей энергии. Для секционной тороидальной конфигурации энергоемкость практически в 2 раза меньше, чем в соленоидальной конфигурации. Такая значительная разница в этом показателе объясняется более высокими гистерезисными потерями в случае использования тороида.

Таблица. Расчетные характеристики

Table. Design characteristics

	Тороид	Соленоид
Энергоемкость, Дж	157	301
Растягивающая нагрузка, кПа	221	198
Индуктивность, Гн	0,3	0,8

Полученные результаты позволяют заключить, что конфигурация соленоидной катушки СПИН выбирается для малого и среднего масштаба, поскольку она подвержена более низким механическим напряжениям и имеет большую энергоемкость. Для крупномасштабных СПИН критически важным является показатель рассеянного магнитного поля, поэтому для реализации такого устройства, несмотря на более высокие механические нагрузки, тороидальная конструкция катушки предпочтительнее в сравнении с соленоидом. Кроме того, разница в полной длине ВТСП ленты, использованной в этих конфигурациях оказывается

значительной только на крупномасштабных системах, где тороидальная конфигурация оказывается более экономически выгодной [16]. В нашем случае длина сверхпроводящей ленты отличается незначительно. Таким образом, для реализации маломасштабного прототипа спин выбирается соленоидальная конфигурация ВТСП катушки, и дальнейшие расчеты энергоемкости и потерь в системе выполняются для нее.

Сравнение потерь в CORC® кабеле и рейстрек кабеле

Для ВТСП CORC® кабеля и рейстрек катушек в соленоидальной конфигурации ВТСП накопителя был проведен расчет общих потерь при температуре кипения жидкого азота. Результаты расчетов представлены на Рис. 7.

Видно, что при малых плотностях тока ($J/J_c < 0,5$) потери для обеих конфигураций катушек слабо отличаются (менее чем на 10%). При более высоких токах крутизна зависимости потерь от плотности тока увеличивается и CORC® кабель становится значительно более выгодным.

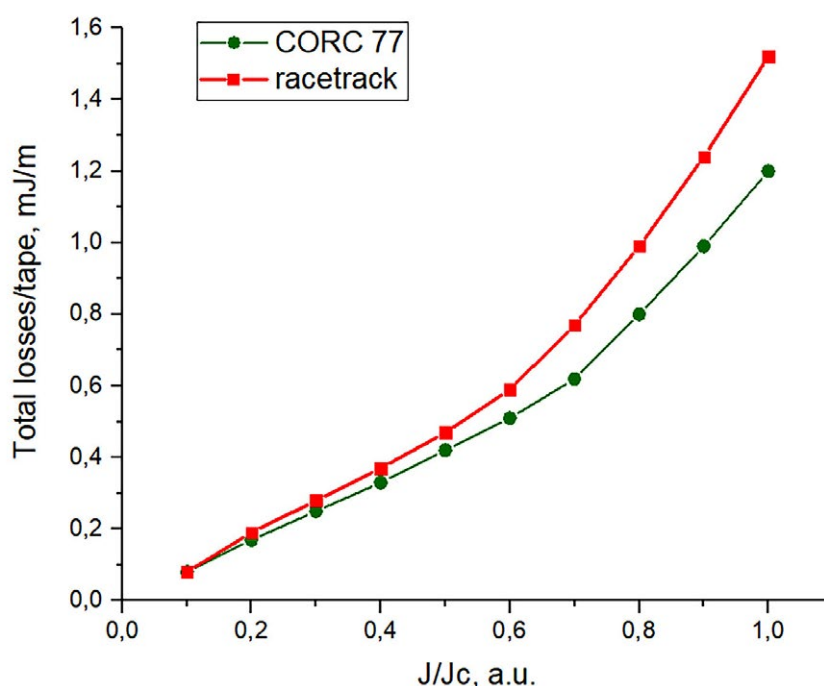


Рис. 7. Полные потери в рейстрек и CORC® кабеле в зависимости от плотности тока при 77 К

Fig. 7. Total loss in racetrack and CORC® cable as a function of current density at 77 K

Этот факт объясняется тем, что рейстрек кабель из-за своей слоистости греется изнутри, что приводит к большим потерям. Более того, в случае рейстрек кабеля рост потерь усиливается начиная с $J/J_c = 0,6$, а у CORC® кабелей с 0,7.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: для реализации прототипа индуктивного ВТСП накопителя энергии оптимальным является выбор CORC® кабеля в конфигурации соленоида. Оптимальное отношение J/J_c при охлаждении жидким азотом составляет 0,7.

На Рис. 8 представлены результаты расчетов потерь для случая CORC® кабеля в соленоидальной геометрии при различных температурах. Как и ожидалось, потери снижаются уменьшением температуры. При этом следует отметить, что для 77 К при $J/J_c > 0,5$ параметры теплоотвода жидким азотом ухудшаются и криокулер в данном случае лучше подходит для охлаждения. Однако, в то же самое время, криокулер тратит запасенную в СПИН энергию на охлаждение. Учет этой связи станет предметом последующих исследований.

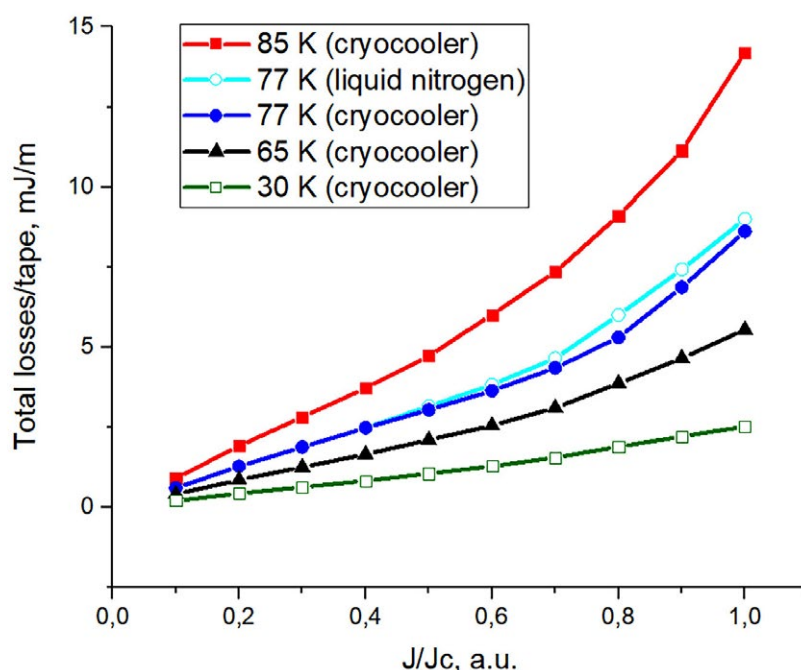


Рис. 8. Полные потери в CORC® кабеле в зависимости от плотности тока при различных температурах

Fig. 8. Total loss in a CORC® cable as a function of current density at different temperatures

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработана численная модель индуктивного ВТСП накопителя энергии в тороидальной и соленоидальной геометрии. Рассмотрены случаи конструирования ВТСП обмоток на основе рейстрек катушек и CORC кабеля. Проведена сравнительная оценка характеристик тороидальной и соленоидальной конфигураций СПИН с использованием CORC® и рейстрек кабелей, в результате которой, была выбрана оптимальная с точки зрения минимизации потерь соленоидальная конструкция маломасштабного индуктивного накопителя с проводом из CORC® кабеля. В случае охлаждения жидким азотом для выбранной конфигурации было получено оптимальное, с точки зрения энергоэффективности, отношение плотности тока к плотности критического тока, равное 0.7. Проведены расчеты потерь в геометрии соленоида, охлаждаемого при помощи криокулерной установки, при различных температурах.

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. Adetokun B.B., Muriithi C.M., Ojo J.O. Voltage stability analysis and improvement of power system with increased SCIG-based wind system integration // IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2020. Vol. 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219803
2. Adetokun B.B., Ojo J.O., Muriithi C.M. Reactive power-voltage-based voltage instability sensitivity indices for power grid with increasing renewable energy penetration // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 85401–85410. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992194
3. Amiryar M.E., Pullen K.R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, N. 2. P. 286. doi: 10.3390/app7030286

4. Saikia B.K. A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials // *Fuel*. 2020. Vol. 282. P. 118796. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796
5. Connolly D. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage // *Renewable energy*. 2012. Vol. 43. P. 47–60.
6. Wang J.S., Zeng Y., Huang H., et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world // *Physica C*. 2002. Vol. 378–381, N. 1. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Song M. 100 kJ/50 kW HTS SMES for micro-grid // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 25, N. 3. P. 1–6. doi: 10.1109/TASC.2014.2386345
8. Mukherjee P., Rao V.V. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications-A review // *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2019. Vol. 563. P. 67–73. doi: 10.1016/j.physc.2019.05.001
9. Ali M.H., Wu B., Dougal R.A. An overview of SMES applications in power and energy systems // *IEEE transactions on sustainable energy*. 2010. Vol. 1, N. 1. P. 38–47. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
10. Adetokun B.B., Oghorada O., Abubakar S.J. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. P. 105663. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
11. Yagotintsev K., Anvar V.A., Gao P., et al. AC loss and contact resistance in REBCO CORC®, Roebel, and stacked tape cables // *Superconductor science and technology*. 2020. Vol. 33, N. 8. P. 085009. doi: 10.1088/1361-6668/ab97ff
12. Cardozo N.J.L., ten Kate H.J.J., Dudarev M.A. Development of the First ReBCO-CORC Based Racetrack Model Coil. [Student thesis: Master] Eindhoven, 2018.
13. Yeom H.K. Study of cryogenic conduction cooling systems for an HTS SMES // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007. Vol. 17, N. 2. P. 1955–1958. doi: 10.1109/TASC.2007.898491
14. Molodyk A. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, N. 1. P. 2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
15. Zubko V.V. Heat transfer simulation to liquid nitrogen from HTS tapes at the overload currents. *Physics Procedia*. 2015;67:619–624. doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
16. Saichi Y., Miyagi D., Tsuda M.A. Suitable design method of SMES coil for reducing superconducting wire usage considering maximum magnetic flux density // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2013. Vol. 24, N. 3. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2013.2290279

REFERENCES

1. Adetokun BB, Muriithi CM, Ojo JO. Voltage stability analysis and improvement of power system with increased SCIG-based wind system integration. *IEEE PES/IAS PowerAfrica*. 2020;2020:1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219803

2. Adetokun BB, Ojo JO, Muriithi CM. Reactive power-voltage-based voltage instability sensitivity indices for power grid with increasing renewable energy penetration. *IEEE Access*. 2020;8:85401–85410. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992194
3. Amiryar ME, Pullen KR. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*. 2017;7(2):286. doi: 10.3390/app7030286
4. Saikia BK. A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Fuel*. 2020;282:118796. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796
5. Connolly D. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage. *Renewable energy*. 2012;43:47–60.
6. Wang JS, Zeng Y, Huang H, et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C*. 2002;378–381(1):809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Song M. 100 kJ/50 kW HTS SMES for micro-grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014;25(3):1–6. doi: 10.1109/TASC.2014.2386345
8. Mukherjee P, Rao VV. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications-A review. *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2019;563:67–73. doi: 10.1016/j.physc.2019.05.001
9. Ali MH, Wu B, Dougal RA. An overview of SMES applications in power and energy systems. *IEEE transactions on sustainable energy*. 2010;1(1):38–47. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
10. Adetokun BB, Oghorada O, Abubakar SJ. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*. 2022;55:105663. doi: 10.1109/TSTE.2010.2044901
11. Yagotintsev K, Anvar VA, Gao P, et al. AC loss and contact resistance in REBCO CORC®, Roebel, and stacked tape cables. *Superconductor science and technology*. 2020;33(8):085009. doi: 10.1088/1361-6668/ab97ff
12. Cardozo NJL, ten Kate HJJ, Dudarev MA. Development of the First ReBCO-CORC Based Racetrack Model Coil. [Student thesis: Master] Eindhoven, 2018.
13. Yeom HK. Study of cryogenic conduction cooling systems for an HTS SMES. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007;17(2):1955–1958. doi: 10.1109/TASC.2007.898491
14. Molodyk A. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion. *Scientific reports*. 2021;11(1):2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
15. Zubko VV. Heat transfer simulation to liquid nitrogen from HTS tapes at the overload currents. *Physics Procedia*. 2015;67:619–624. doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
16. Saichi Y, Miyagi D, Tsuda MA. Suitable design method of SMES coil for reducing superconducting wire usage considering maximum magnetic flux density. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2013;24(3):1–5. doi: 10.1109/TASC.2013.2290279

Сведения об авторах:

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

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

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук; инженер-исследователь;

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

E-mail: mephizic@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

Залеткина Виктория Витальевна, инженер-исследователь;

ORCID: 0009-0009-9854-5028

E-mail: viktoriazalatkina@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru

Information about the authors:

Dmitry A. Alexandrov, research engineer;

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

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Irina V. Martirosian, PhD in Physics and Mathematics, PhD, research engineer;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Victoria V. Zalatkina, research engineer;

ORCID: 0009-0009-9854-5028

E-mail: viktoriazalatkina@gmail.com

Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lead Research Fellow;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru