

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.3.013.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>



А.Г. Калимов ✉, С. Баган, В.М. Говор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ alexanderkalimov@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК В ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматривается новый метод определения критических токов в катушках, выполненных из сверхпроводниковых лент второго поколения, которые предлагается использовать для создания индуктивных накопителей энергии. Предлагаемый подход основан на совместном решении интегрального уравнения электромагнитного поля и уравнения состояния материала сверхпроводника, критическая плотность тока в котором определяется на основе модифицированной анизотропной модели Кима. Дискретизация полученной системы проведена с использованием метода коллокаций. Разработан алгоритм решения сформированной системы уравнений, который был применен для определения критического тока в катушках, входящих в состав индуктивных накопителей энергии. Серия численных экспериментов выявила эффект значительной деградации критического тока в катушках по сравнению с декларируемыми параметрами, полученными для коротких образцов сверхпроводниковой ленты.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, сверхпроводниковые накопители энергии, критический ток, модель критического состояния, сверхпроводники второго поколения.

Для цитирования:

Калимов А.Г., Баган С., Говор В.М. Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>



A.G. Kalimov ✉, S. Bagan, V.M. Govor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ alexanderkalimov@gmail.com

MODELING OF THE SUPERCONDUCTING COIL CRITICAL STATE IN THE INDUCTIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS

Abstract. A new method for determining critical currents in coils made of second-generation superconducting tapes is considered in the paper. The proposed approach is based on the joint solution of the integral equation of the electromagnetic field and the equation of state of the superconductor material, the critical current density in which is determined on the basis of the modified anisotropic Kim–Anderson model. Discretization of the equation system has been done by the collocation method. By means of the developed algorithm for solving the derived equations system, we calculated the critical current in coils used in inductive energy storage systems. A series of numerical experiments revealed the effect of significant degradation of the critical current in the coils compared to the declared parameters obtained for short samples of a superconducting tape.

Keywords: renewable energy sources, superconducting energy storage, critical current, critical state model, second generation superconductors.

Citation:

A.G. Kalimov, S. Bagan, V.M. Govor, Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 7–17, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>

Введение. Значительное негативное влияние традиционных источников энергии [1, 2] на окружающую среду привело к тому, что в последнее время повышенное внимание уделяется развитию и практическому использованию возобновляемых источников энергии. Существенная особенность практического использования этих источников энергии и их интеграции в электрические сети заключается в их нестабильности: изменения скорости ветра для ветровых электростанций и изменения освещенности на солнечных электростанциях создают значительные колебания вырабатываемой электрической мощности, что во многих случаях требует применения специальных решений для сглаживания этих колебаний [3, 4]. С этой целью в общую структуру системы генерации электроэнергии вводятся накопители, использующие различные технические решения. Одним из наиболее перспективных способов решения этой проблемы является использование накопителей энергии магнитного поля в сверхпроводниковых системах [5–13]. Наибольший интерес в настоящее время вызывает применение высокотемпературных сверхпроводниковых лент второго поколения для создания таких установок. Серьезной проблемой, возникающей при решении этой задачи, является сложность определения критического тока обмотки, поскольку распределение плотности тока по сечению сверхпроводниковой ленты существенно неоднородно и зависит от многих факторов.

На практике для решения этой задачи используется целый ряд математических моделей, основанных на совместном решении уравнений электромагнитного поля и уравнений состояния сверхпроводникового материала. В частности, применение нашли модели, основанные на решении системы дифференциальных уравнений состояния: формулировка A-V [14], формулировка

Н [15, 16], формулировка Т-А [17]. Значительным недостатком этих моделей является необходимость моделирования процессов в так называемом пограничном слое – узкой области перехода материала из нормального в сверхпроводящее состояние. Надежная экспериментальная информация о свойствах такого слоя отсутствует, а используемые аппроксимации проводимости сверхпроводника в виде полиномов высокой степени от плотности тока в целом противоречат общим представлениям о свойствах подобных материалов. В настоящей статье представлен новый альтернативный метод моделирования сверхпроводников 2-го поколения, основанный на совместном решении интегральных уравнений электромагнитного поля и уравнения состояния сверхпроводникового объекта.

Математическая модель сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии

Высокотемпературный сверхпроводник 2-го поколения представляет собой тонкую медно-никелевую ленту, на поверхность которой нанесены несколько слоев различных материалов, включая сверхпроводниковую керамику. Ширина сверхпроводниковой ленты составляет обычно величину порядка 4 – 12 мм, в то время, как толщина слоя, по которому протекает ток не превышает нескольких микрометров. В таких условиях возникает существенная неоднородность распределения плотности электрического тока по ширине ленты, что, с одной стороны, вызвано специфическими свойствами сверхпроводниковых материалов, и, с другой стороны, оказывает существенное влияние на максимально возможный (критический) ток, проходящий по проводнику.

Расчет распределения магнитного поля в рамках разработанной математической модели осуществляется на основе закона Био-Савара (1):

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV. \quad (1)$$

Интегрирование проводится по области, занятой материалом проводника.

Состояние сверхпроводникового материала определяется на основе теории критического состояния Кима-Андерсена [18]. Она построена на предположении о том, что плотность тока в сверхпроводнике может принимать только два значения. Одно из них – нулевое, другое – критическое, то есть максимально возможное при заданном значении индукции магнитного поля. Сама зависимость критического тока от интенсивности магнитного поля определяется выбранной моделью критического состояния. В настоящей работе используется один из вариантов так называемой модели Кима [18–19]. В общем случае она задает зависимость критической плотности тока от напряженности магнитного поля в виде соотношения:

$$J(B) = \frac{J_{c0}}{(1 + |B|/B_0)^\alpha}, \quad (2)$$

где J_{c0} , B_0 и α – параметры, зависящие от свойств материала и определяемые эмпирически. Изначально эта модель была сформирована для изотропных низкотемпературных сверхпроводников. Однако, в сверхпроводниковых лентах 2-го поколения критическая плотность тока существенно зависит не только от величины индукции магнитного поля, но и от ее направления. Экспериментальные исследования показывают, что в первую очередь сверхпроводимость разрушается составляющей магнитного поля, перпендикулярной боковой поверхности сверхпроводниковой ленты [20, 21]. Этот эффект учитывается в модифицированной модели Кима:

$$J(B_{\perp}, B_{\parallel}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{B_{\perp}^2 + k^2 B_{\parallel}^2}}{B_0}\right)^{\alpha}}. \quad (3)$$

Параметр k обычно намного меньше единицы. Более того, во многих случаях он может быть принят равным нулю без существенной потери точности моделирования состояния сверхпроводниковой системы [20].

Объединение двух вышеуказанных моделей приводит к формированию нелинейного интегрального уравнения с неизвестной плотностью тока. В связи с тем, что ток протекает по тонкому слою, фактически эта величина является скалярной переменной, а направление соответствующего вектора определяется структурой и расположением витков обмотки.

Для численного решения системы уравнений (1) – (3), прежде всего, проводится дискретизация расчетной области. В дальнейшем в качестве объекта исследования будет рассматриваться многослойная цилиндрическая катушка. Такая задача обладает цилиндрической симметрией, соответственно расчетная область может быть сведена к поперечному сечению обмотки. На практике ток в катушке протекает только в тонких сверхпроводниковых слоях, однако при формировании расчетной модели оказывается удобным предположение о его равномерном распределении по толщине всей композитной ленты. Такое преобразование расчетной области практически не влияет на окончательные результаты моделирования [17].

При создании математической модели поперечное сечение каждого витка сверхпроводникового накопителя разбивается на некоторое число прямоугольных элементов, в пределах каждого из которых плотность тока предполагается постоянной и определяется интенсивностью магнитного поля в центре элемента. В результате такого представления уравнения (1) – (3) могут быть заменены системой нелинейных алгебраических уравнений.

Теория критического состояния сверхпроводников 2-го рода показывает, что проникновение магнитного поля (а соответственно и токов) в сверхпроводящие объекты может происходить только через их поверхности. Применительно к используемой процедуре дискретизации обмотки этот принцип приводит к трем возможным состояниям каждого отдельно взятого элемента:

- а) внутри элемента протекает критический ток, величина которого определяется значением индукции магнитного поля в центре этого элемента;
- б) ток внутри элемента равен нулю;
- в) ток в элементе имеет промежуточное значение, не превышающее критическую величину.

Присутствие элементов последнего типа означает, что в некоторой их части протекает ток с критической плотностью, а в оставшемся пространстве ток либо равен нулю, либо направлен в противоположную сторону. Промежуточные элементы могут располагаться только в определенных местах:

1. На границах расчетной области при очень малых значениях транспортного тока в сверхпроводниковых лентах;
2. На стыке групп элементов с критической и нулевой плотностей тока;
3. На стыке групп элементов с противоположными направлениями плотности тока.

Указанные особенности распределения плотности тока в сверхпроводниковых лентах были интегрированы в алгоритм решения системы уравнений (1) – (3). Следствием указанных особенностей является то, что распределение плотности тока в витках обмотки при фиксированном полном токе в общем случае не определено однозначно и зависит от предыстории, от того каким именно образом был индуцирован рассматриваемый транспортный ток. Исключением является состояние обмотки, соответствующее критическому току.

Для определения критического тока в обмотке в рамках предлагаемого метода моделирования производится постепенное наращивание тока в катушке, начиная с нулевого уровня. Критическим считается состояние, при котором все элементы хотя бы одного из витков переходят в критическую группу при дополнительном условии протекания всех токов в одном направлении.

Основные результаты расчета распределения плотности тока в сверхпроводниковой катушке

Рассмотрим цилиндрическую катушку, состоящую из некоторого числа витков, намотанных сверхпроводниковой лентой (см. рис. 1а). Поперечное сечение этой катушки показано на рис. 1б. Основной целью моделирования состояния катушки на рассматриваемом этапе исследования является определение ее критического тока.

При проведении описываемых численных экспериментов мы использовали модифицированную модель Кима с параметрами $\alpha = 1$, $k = 0$, $J_{c0} = 28 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$, $B_0 = 42,65 \text{ мТ}$ [20].

Для пояснения процедуры применения разработанной математической модели рассмотрим отдельный виток сверхпроводниковой катушки. Для формирования системы алгебраических уравнений разобьем ленту по ширине на m конечных элементов (см. рис. 2).

Здесь J_i – усредненная плотность тока в i – ой ячейке. Сумма токов во всех ячейках равна транспортному току:

$$I = \sum_{i=1}^m J_i \cdot S_i,$$

где S_i – площадь соответствующей ячейки. В рассматриваемой здесь математической модели эта площадь одинакова для всех ячеек. На первом итерационном шаге моделирования распределения токов принималось условие тока $J_i = 0$ для всех ячеек, что соответствует нулевому транспортному току. Как только ток в ленте изменяется на малую величину ΔI , он распределяется таким образом, что $J_i = 0$ при $i = 2, 3, \dots, m - 1$. При этом усредненная плотность тока в ячейках с номерами 1 и m определяется соотношением

$$J_1 = J_m = \frac{\Delta I}{2S}.$$

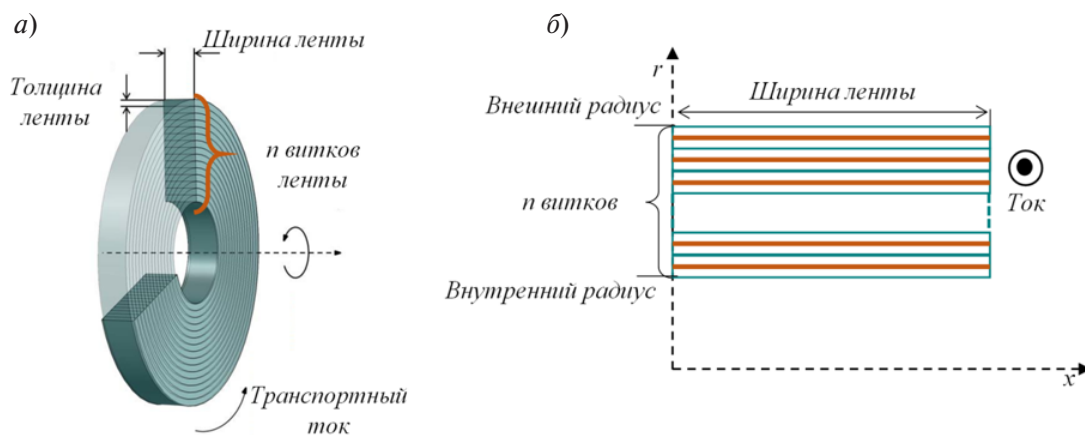


Рис. 1. Структура сверхпроводниковой катушки: а) общий вид, б) поперечное сечение обмотки

Fig. 1. Structure of the superconducting coil: a) general view, b) the cross section of the coil



Рис. 2. Распределение плотности тока по ширине ленты
 Fig. 2. Distribution of the current density over the width of the superconducting bend

При дальнейшем увеличении транспортного тока он достигает критического уровня в приграничных ячейках и проникает в соседние. Причем момент перехода тока из ячеек с номерами i и m может происходить при различном уровне транспортного тока, а также зависит от положения витка в катушке.

Рассматриваемая процедура моделирования плотности тока предполагает проведение последовательности итераций, во время которых ток изменяется на некоторую малую величину ΔI , в этот момент производится перерасчет распределения магнитного поля, что в свою очередь приводит к изменению распределения токов по элементам дискретизации. На последнем шаге итерационной процедуры ток протекает во всех элементах хотя бы одного витка катушки. В результате происходит определение критического тока рассматриваемой сверхпроводниковой катушки.

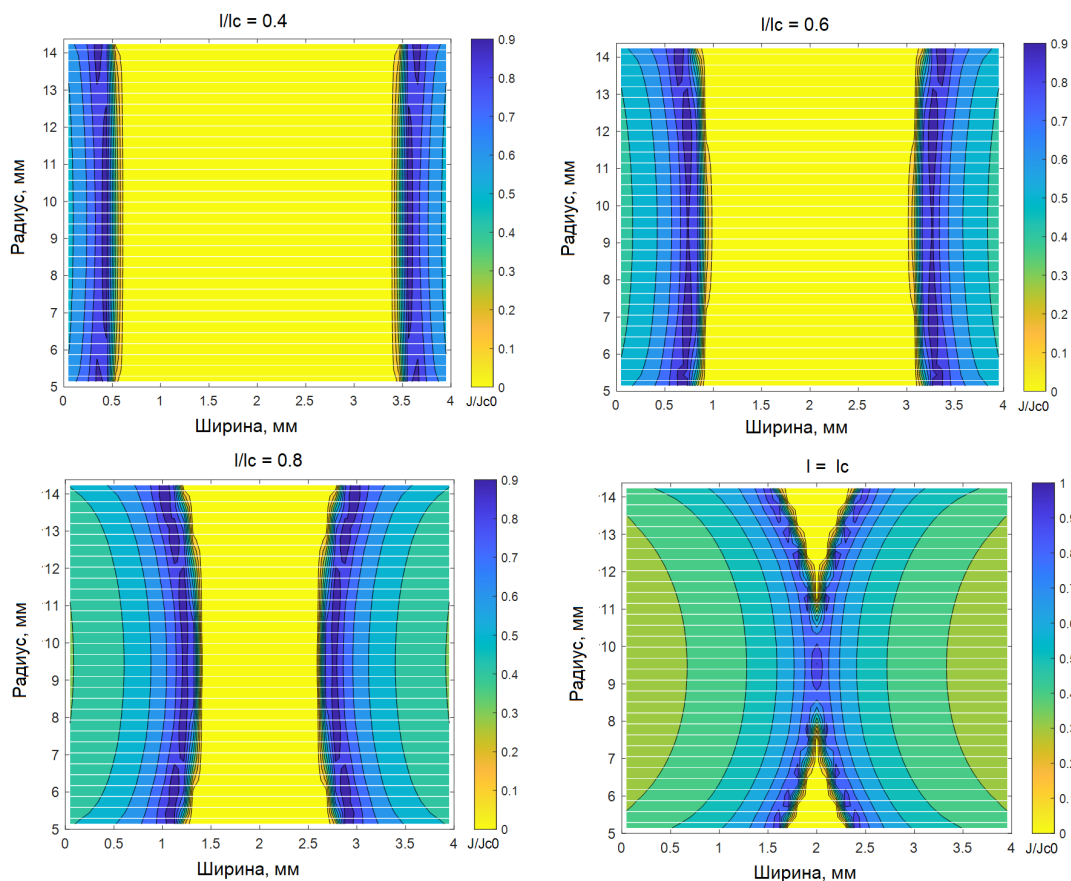


Рис. 3. Распределение плотности тока в сверхпроводниковых лентах.
 Число витков в катушке $N = 32$, внутренний радиус $R = 40$ мм
 Fig. 3. Distribution of the current density inside superconducting bends.
 The number of turns in the coil is $N = 32$, the inner radius is $R = 40$ mm

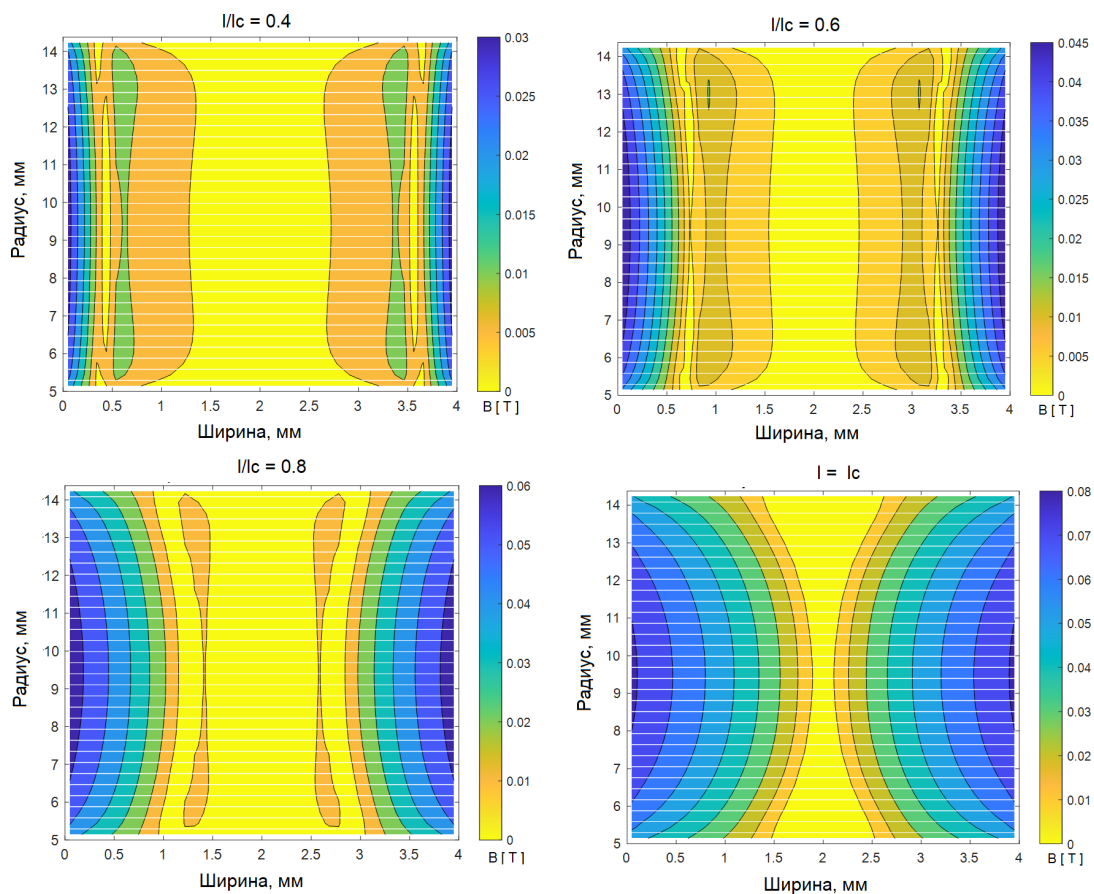


Рис. 4. Распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля в сверхпроводниковых лентах.
Число витков в катушке $N = 32$, внутренний радиус $R = 40$ мм

Fig. 4. Distribution of the flux density normal component inside superconducting bends.
The number of turns in the coil is $N = 32$, the inner radius is $R = 40$ mm

В качестве примера применения разработанного метода мы рассмотрели многovitковую катушку, намотанную сверхпроводниковой лентой шириной 4 мм. Толщина ленты вместе со слоем изоляции равно 0.15 мм. Количество витков варьировалось в пределах от 1 до 200. Для иллюстрации итерационной процедуры определения критического тока ниже приведены распределения плотности тока для катушки, состоящей из 32 витков при различных значениях транспортного тока – 40%, 60%, 80%, и 100% от критического уровня (см. рис. 3). Полученный в конечном итоге критический ток составил $I_c = 54,3$ А. Соответствующие распределения нормальной к поверхности лент компоненты индукции магнитного поля приведены на рис. 4.

Как видно из приведенных диаграмм в критическом режиме находится только лента, располагающаяся в центральной части катушки. Именно она полностью находится в токовом состоянии и, таким образом, ограничивает максимально возможный ток в катушке.

Интерес представляет, также, случай одновитковой катушки. Проведенные расчеты показали, что величина критического тока составила в этом случае почти вдвое большее значение $I_c = 96$ А.

Обсуждение результатов расчета критического тока

В результате применения разработанной модели расчета распределения плотности тока в сверхпроводниковых системах второго поколения была исследована зависимость критического тока в катушке от ее структуры. Критический ток в одновитковой катушке практически совпал

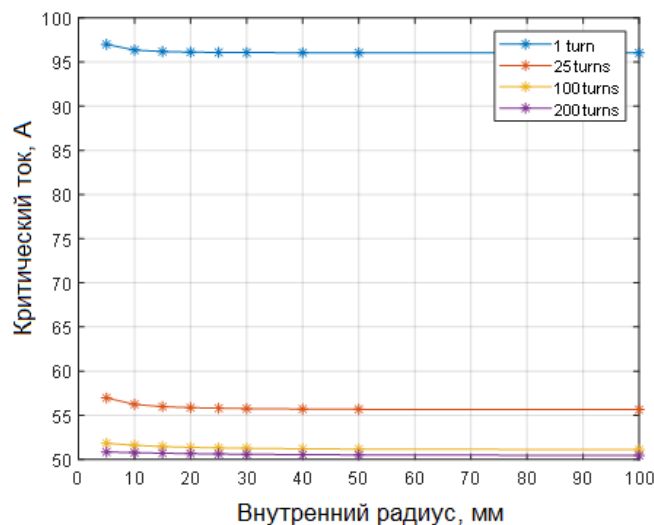


Рис. 5. Критический ток в зависимости от внутреннего радиуса для катушек с различным числом витков
 Fig. 5. Dependence of the critical current on the inner radius for the coils with different number of turns

с паспортным значением ленты, выпускаемой компанией SuperPower [20]: $I_c = 100$ А – экспериментально измеренный ток; $I_c = 96$ А – расчетное значение. Данное обстоятельство подтверждает корректность и достаточную для практического применения точность результатов, получаемых с использованием разработанной математической модели. При исследовании многovitковых систем отмечена значительная деградация критического тока при увеличении числа витков в катушке вплоть до значения $I_c = 50$ А (см. рис. 5). Этот результат показывает особую важность оптимального выбора характеристик индуктивного накопителя на этапе его проектирования.

Исследование зависимости критического тока от внутреннего радиуса катушки показали, что этот параметр не является столь же существенным. Он уменьшается всего лишь на несколько процентов при изменении внутреннего радиуса катушки в пределах от 5 до 100 мм, причем это изменение более существенно для многovitковых катушек.

Заключение

Разработан новый метод расчета распределения плотности тока в высокотемпературных сверхпроводниковых магнитных системах второго поколения. Основной идеей этого метода является объединение уравнений электромагнитного поля в интегральной форме с уравнением критического состояния сверхпроводникового материала. Разработан алгоритм решения получающейся системы нелинейных уравнений. Созданная математическая модель и ее численная реализация применены для исследования свойств сверхпроводниковой катушки. На примере одновитковой катушки подтверждена корректность результатов моделирования критического состояния сверхпроводниковой системы. В результате проведения серии расчетов выявлен эффект значительной деградации критического тока в многovitковых катушках, что представляет собой важный практический результат. Учет этого эффекта окажет существенное влияние на характеристики разрабатываемых сверхпроводниковых накопительных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сидоренко В.Ф., Дудников В.В. Улучшение качества городской среды путем использования локальных ветровых источников энергии // Социология города. 2018. №. 2. С. 5–17.

- [2] **Yu M.** Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 680 (1) (2021). DOI: 10.1088/1755-1315/680/1/012002
- [3] **Watson S.** Quantifying the variability of wind energy, Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ, 3 (4), (2014) 330–342, DOI: 10.1002/wene.95
- [4] **Anvari M., Lohmann G., Wächter M., Milan P., Lorenz E., Heinemann D.** Short term fluctuations of wind and solar power systems, New J. Phys., 18 (063027) (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/6/063027
- [5] **Rahman O., Muttaqi K.M., Sutanto D.** High temperature superconducting devices and renewable energy resources in future power grids: A case study, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (2) (2019) 10–13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2895677
- [6] **Zhou X., Li S., Shi J., Zhang C., Tang Y.** Capacity-Control Optimization of SMES in Distribution Networks with Renewable Energy, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2906660
- [7] **Yunus A.M.S., Abu-Siada A., Masoum M.A.S., El-Naggar M.F., Jin J.X.** Enhancement of DFIG LVRT capability during extreme short-wind gust events using SMES technology, IEEE Access, 8 (2020) 47264–47271, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978909
- [8] **Hoffmann E., Alcorn J., Chen W., Hsu Y.H., Purcell J.** Design of the BPA superconducting 30 MJ energy storage coil, IEEE Trans. Magn., 17 (1) (1981) 521–524. DOI: 10.1109/mc.2020.2974641
- [9] **Nagaya S., Hirano N., Kondo M., Tanaka T., Nakabayashi H.** Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips, IEEE Trans. Appl. Supercond., 14 (2) (2004) 699–704, DOI: 10.1109/TASC.2004.830076
- [10] **Zhu J., Chen P., Qiu M., Liu C., Liu J., Zhang H.** Experimental investigation of a high temperature superconducting pancake consisted of the REBCO composite cable for superconducting magnetic energy storage system, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019) 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2019.2897574
- [11] **Xu Y., Li Y., Ren L., Xu C., Tang Y.** Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in the Wind Power Generation System for Smoothing Wind Power Fluctuations, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (5) (2021) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2021.3064520
- [12] **Zimmermann A.W., Sharkh S.M.** Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, Energy Reports, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023
- [13] **Al Zaman M.A., Islam M.R., Maruf H.M.A.R.** Study on conceptual designs of superconducting coil for energy storage in SMES, East Eur. J. Phys., 1 (2020) 111–120. DOI: 10.26565/2312-4334-2020-1-10
- [14] **Musso A., Breschi M., Ribani P.L., Grilli F.** Analysis of AC Loss Contributions from Different Layers of HTS Tapes Using the A-V Formulation Model, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (2) (2021). DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [15] **Shen B., Grilli F., Coombs T.I.M., Member S.** Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications, IEEE Access, 8 (2020) 100403–100414. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
- [16] **Sotelo G.G., Carrera M., Lopez-Lopez J., Granados X.** H-Formulation FEM Modeling of the Current Distribution in 2G HTS Tapes and Its Experimental Validation Using Hall Probe Mapping, IEEE Trans. Appl. Supercond., 26 (8) (2016) 1–10. DOI: 10.1109/TASC.2016.2591825
- [17] **Xu X., Huang Z., Li W., Huang X., Wang M.** 3D finite element modelling on racetrack coils using the homogeneous T-A formulation, Cryogenics, 119 (2021). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103366
- [18] **Уилсон М.** Сверхпроводящие магниты: М.: Мир, 1985. 405 с.
- [19] **Robert B.C., Fareed M.U., Ruiz H.S.** How to choose the superconducting material law for the modelling of 2G-HTS coils, Materials, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [20] **Yuan W.** Second-Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage, University of Cambridge, 2011.
- [21] **Pan V.M., Kasatkin A.L., Svetchnikov V.L., Komashko V.A., Popov A.G.** Critical current density in highly biaxially-oriented YBCO films: Can we control $J_C(77K)$ and optimize up to more than 10^6 Amp/cm²?, IEEE Trans. Appl. Supercond., 9 (2) (1999) 1535–1538. DOI: 10.1109/77.784686

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛИМОВ Александр Гелиевич — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

БАГАН Стив — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: bagan307@yahoo.fr

ГОВОР Владислав Михайлович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: pwnway@gmail.com

REFERENCES

- [1] **V.F. Sidorenko, V.V. Dudnikov**, Uluchsheniye kachestva gorodskoy sredy putem ispolzovaniya lokalnykh vetrovykh istochnikov energii // Sotsiologiya goroda. 2018. №. 2. s. 5–17. V.F. Sidorenko, V.V. Dudnikov. Improving the quality of the urban environment through the use of local wind energy sources // Sotsiologiya goroda. 2018. №. 2. p. 5–17.
- [2] **M. Yu**, Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 680 (1) (2021). DOI: 10.1088/1755-1315/680/1/012002
- [3] **S. Watson**, Quantifying the variability of wind energy, Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ, 3 (4) (2014) 330–342. DOI: 10.1002/wene.95
- [4] **M. Anvari, G. Lohmann, M. Wächter, P. Milan, E. Lorenz, D. Heinemann**, Short term fluctuations of wind and solar power systems, New J. Phys., 18 (063027) (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/6/063027
- [5] **O. Rahman, K.M. Muttaqi, D. Sutanto**, High temperature superconducting devices and renewable energy resources in future power grids: A case study, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (2) (2019) 10–13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2895677
- [6] **X. Zhou, S. Li, J. Shi, C. Zhang, Y. Tang**, Capacity-Control Optimization of SMES in Distribution Networks with Renewable Energy, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2906660
- [7] **A.M.S. Yunus, A. Abu-Siada, M.A.S. Masoum, M.F. El-Naggar, J.X. Jin**, Enhancement of DFIG LVRT capability during extreme short-wind gust events using SMES technology, IEEE Access, 8 (2020) 47264–47271. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978909
- [8] **E. Hoffmann, J. Alcorn, W. Chen, Y.H. Hsu, J. Purcell**, Design of the BPA superconducting 30 MJ energy storage coil, IEEE Trans. Magn., 17 (1) (1981) 521–524. DOI: 10.1109/mc.2020.2974641
- [9] **S. Nagaya, N. Hirano, M. Kondo, T. Tanaka, H. Nakabayashi**, Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips, IEEE Trans. Appl. Supercond., 14 (2) (2004) 699–704. DOI: 10.1109/TASC.2004.830076
- [10] **J. Zhu, P. Chen, M. Qiu, C. Liu, J. Liu, H. Zhang**, Experimental investigation of a high temperature superconducting pancake consisted of the REBCO composite cable for superconducting magnetic energy storage system, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2019.2897574
- [11] **Y. Xu, Y. Li, L. Ren, C. Xu, Y. Tang**, Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in the Wind Power Generation System for Smoothing Wind Power Fluctuations, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (5) (2021) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2021.3064520
- [12] **A.W. Zimmermann, S.M. Sharkh**, Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, Energy Reports, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023

- [13] **M.A. Al Zaman, M.R. Islam, H.M.A.R. Maruf**, Study on conceptual designs of superconducting coil for energy storage in SMES, *East Eur. J. Phys.*, 1 (2020) 111–120. DOI: 10.26565/2312-4334-2020-1-10
- [14] **A. Musso, M. Breschi, P.L. Ribani, F. Grilli**, Analysis of AC Loss Contributions from Different Layers of HTS Tapes Using the A-V Formulation Model, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021). DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [15] **B. Shen, F. Grilli, T.I.M. Coombs, S. Member**, Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications, *IEEE Access*, 8 (2020) 100403–100414. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
- [16] **G.G. Sotelo, M. Carrera, J. Lopez-Lopez, X. Granados**, H-Formulation FEM Modeling of the Current Distribution in 2G HTS Tapes and Its Experimental Validation Using Hall Probe Mapping, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (8) (2016) 1–10. DOI: 10.1109/TASC.2016.2591825
- [17] **X. Xu, Z. Huang, W. Li, X. Huang, M. Wang**, 3D finite element modelling on racetrack coils using the homogeneous T-A formulation, *Cryogenics*, 119 (2021). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103366
- [18] **M. Wilson**, *Sverkhprovodyastchie magnity: M.: Mir*, 1985. 405 s. M. Wilson. Superconducting magnets: M.: Mir, 1985. 405 p.
- [19] **B.C. Robert, M.U. Fareed, H.S. Ruiz**, How to choose the superconducting material law for the modeling of 2G-HTS coils, *Materials*, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [20] **W. Yuan**, *Second-Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage*, University of Cambridge, 2011.
- [21] **V.M. Pan, A.L. Kasatkin, V.L. Svetchnikov, V.A. Komashko, A.G. Popov**, Critical current density in highly biaxially-oriented YBCO films: Can we control $J_C(77K)$ and optimize up to more than 10^6 Amp/cm²?, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9 (2) (1999) 1535–1538. DOI: 10.1109/77.784686

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander G. KALIMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

Steve BAGAN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: bagan307@yahoo.fr

Vladislav M. GOVOR – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: pwnway@gmail.com

Поступила: 21.07.2022; Одобрена: 05.09.2022; Принята: 21.09.2022.
Submitted: 21.07.2022; Approved: 05.09.2022; Accepted: 21.09.2022.