

Потери на переменном токе в элементах генератора на основе композитных ВТСП лентС.В. Веселова^{1,2,*}, И.В. Мартиросян¹, К.А. Бородако¹, М.А. Осипов¹, А.С. Стариковский¹,Д.А. Абин¹, А.Ю. Малявина¹, Д.А. Александров, А.Н. Мороз^{1,2}, С.В. Покровский^{1,2}¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 01.07.2024)

Для оценки потерь на переменном токе было проведено моделирование с различной частотой (от 50 Гц до 1033 ГЦ) и амплитудой транспортного тока от 10% до 90% от критической плотности тока J_c . В ходе исследования были получены расчетные данные, позволяющие сделать вывод о том, что потери замкнутых ВТСП обмоток выше, чем потери на рейстрекковых катушках.

PACS: 74.25.Vt

УДК: 538.9

Ключевые слова: сверхпроводящий генератор, ВТСП лента, энергетические потери.

ВВЕДЕНИЕ

Генераторы энергии повсеместно используются для питания энергетических установок и различных транспортных систем. Важными параметрами генераторов является их мощность, эффективность, большое значение также имеют размеры и вес оборудования. Одним из возможных способов улучшения всех этих показателей генераторов является замена традиционных медных обмоток на сверхпроводящие (СП) элементы [1–3]. В качестве объектов исследования были выбраны такие конфигурации обмоток на основе композитной ВТСП ленты, как рейстрек (намотанный методом двойной галеты), кольцевая обмотка и катушка замкнутой ВТСП обмотки [4–6]. В процессе работы этих элементов в условиях переменного тока возникают энергетические потери и джоулев нагрев сверхпроводника [7–11], что в конечном итоге может привести к перегревам и снижению токонесущей способности элемента [12, 13].

1. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчет потерь на переменном токе выполнен при различных частотах и амплитудах токовой нагрузки. В качестве исследуемых элементов были выбраны такие катушки как: рейстрек-обмотка, кольцевая незамкнутая обмотка и замкнутая кольцевая обмотка.

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:

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

где \mathbf{T} — токовый векторный потенциал, T — локальная температура.

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.

Для сверхпроводника, расположенного в плоскости x - y , когда вектор нормали к поверхности может быть

представлен в виде $\mathbf{n} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, выражение 5 может

быть представлено в виде:

$$I = (T_1 - T_2) \delta, \quad (6)$$

* i@svveselova.ru

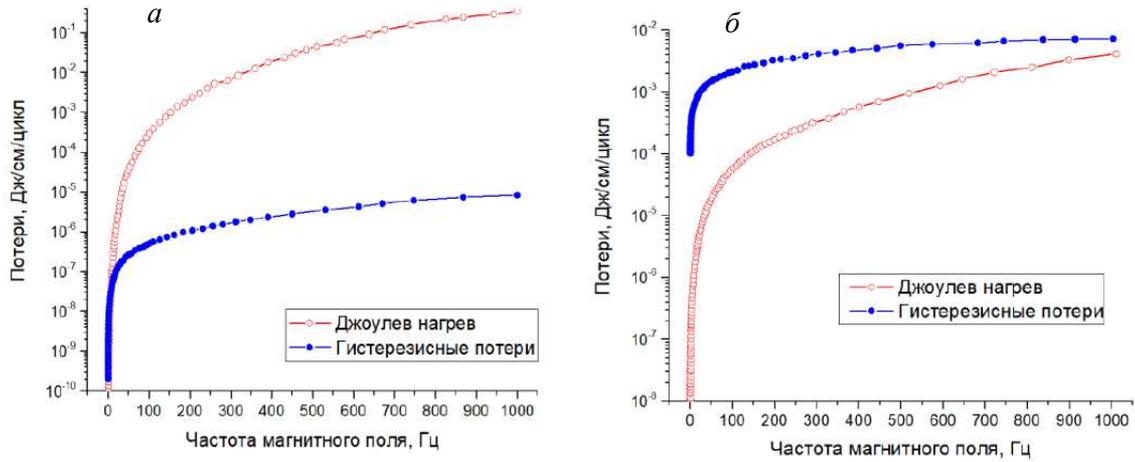


Рис. 1. Логарифмические зависимости потерь от частоты внешнего магнитного поля. Температура 77.4 К. *а* — для рейстрек-катушки, *б* — для кольцевой обмотки

где δ — толщина сверхпроводящего слоя.

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

$$\frac{\partial (T_y \cdot n_y + T_z \cdot n_z)}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (7)$$

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных расчетов были построены зависимости потерь от частоты внешнего переменного магнитного поля в ВТСП катушках. Здесь и далее величина потерь за цикл нагрузки отнормирована на единицу длины ВТСП композита. В рамках модельного эксперимента ВТСП катушки, содержащие 10 слоев ленты, помещаются внутрь резистивной катушки, которая генерирует переменное магнитное поле магнитуды 0.1 Тл с различной частотой. Охлаждение системы выполняется при помощи жидкого азота. Результаты численных исследований представлены на рис. 1, *а* для рейстрек-обмотки и на рис. 1, *б* для незамкнутой кольцевой обмотки.

На рис. 2, *а* приведены расчетные зависимости общих потерь на переменном токе в рейстрек-катушке за цикл нагрузки от частоты и величины токовой нагрузки соответственно. На рис. 2, *б, в* приведены аналогичные зависимости для незамкнутой кольцевой ВТСП обмотки.

Для сравнения энергетических потерь, возникающих в ВТСП обмотках различного вида, на рис. 3 приведены зависимости потерь от амплитуды переменного тока частоты 50 Гц, отнесенной к величине критического тока. Стоит отметить, что максимальные потери возникают в системе из замкнутых ВТСП колец, что обусловлено нагревом на местах перетекания токов.

При амплитуде тока $0.9J_c$ в условиях охлаждения жидким азотом потери в замкнутых ВТСП обмотках превышают потери рейстрек-катушки на величину $\sim 43\%$. При понижении начальной температуры в системе ситуация несколько отличается (рис. 3, *б*). Рейстрек-катушки и незамкнутые ВТСП обмотки демонстрируют возникновение практически похожих энергетических потерь, а замкнутые ВТСП обмотки при низких амплитудах тока имеют потери меньше. Так, при амплитуде переменного тока $0.1J_c$ замкнутые ВТСП обмотки имеют на $\sim 28\%$ потери ниже, чем рейстрек-катушка, тогда как при токах порядка $0.9J_c$ замкнутые обмотки уступают рейстрекам по величине потерь на 30%. Таким образом, наиболее универсальным элементом в процессе реализации катушек ВТСП генератора можно считать рейстрек-геометрию обмотки, однако при низких транспортных токах при правильном выборе условий охлаждения возможно применение замкнутых ВТСП обмоток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для геометрий, характерных в электромагнитных системах ВТСП генератора выполнен расчет воздействия переменного электрического тока при различных температурах. При сравнении свойств незамкнутых ВТСП катушек установлено, что наибольшему нагреву подвержены внутренние слои обмоток, напрямую контактирующие с хладагентом только с торцов и окруженные, другими токонесящими греющимися ВТСП витками. При этом наибольший нагрев характерен для кольцевых незамкнутых ВТСП катушек. Установлено, что в условиях охлаждения жидким азотом наибольшие потери характерны для замкнутых кольцевых ВТСП элементов, на что решающее влияние оказывает их геометрический фактор. Наиболее выгодной конфигурацией обмотки элементов ВТСП генератора

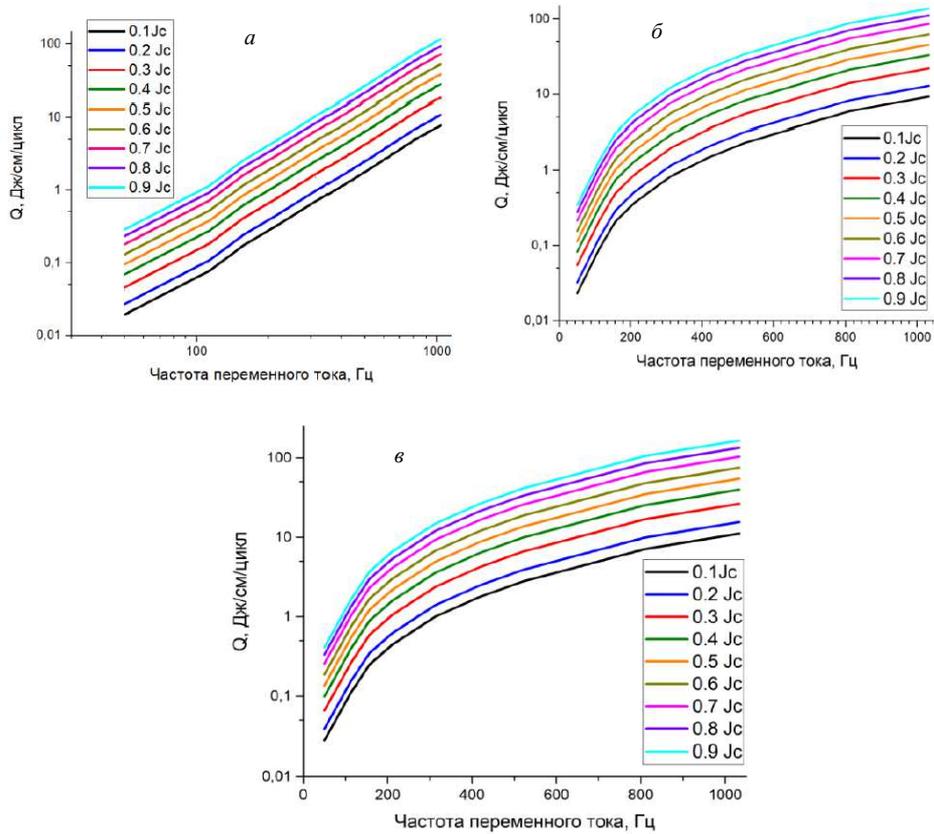


Рис. 2. Расчетные зависимости потерь на цикл от частоты переменного тока: а — для рейстрек-катушки, б — для незамкнутой кольцевой обмотки, в — для замкнутой кольцевой обмотки

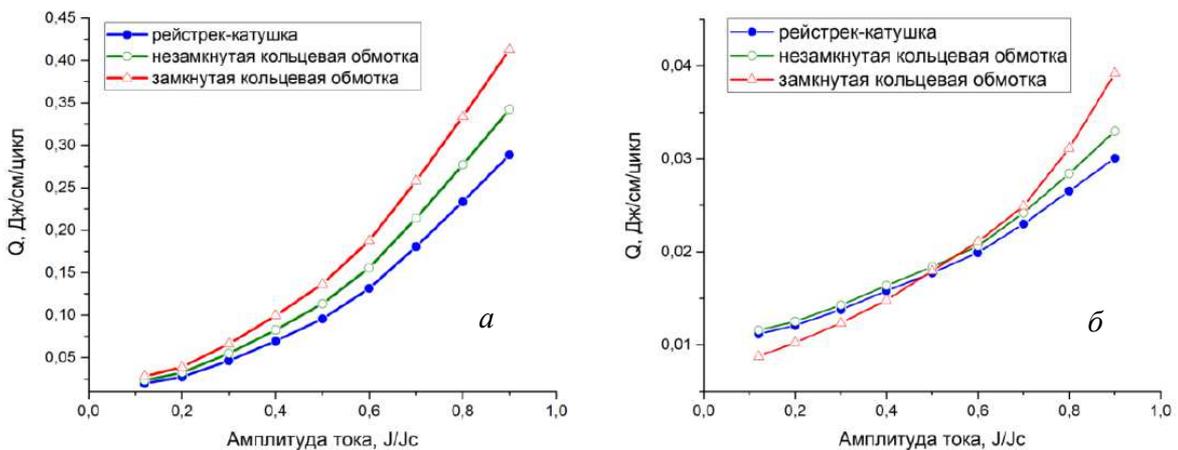


Рис. 3. Расчетные зависимости потерь в ВТСП обмотках от амплитуды токовой нагрузки при частоте переменного тока 50 Гц: а — при охлаждении жидким азотом, б — при охлаждении до температуры 20 К

при азотном охлаждении является рейстрек-катушка. Однако при понижении температуры и низких амплитудах переменного тока замкнутые ВТСП обмотки демонстрируют меньшие потери в сравнении с другими рассмотренными элементами.

Другим преимуществом замкнутых ВТСП колец является тот факт, что для конструирования катушки

на их основе могут быть набраны фрагменты композитной ленты с наиболее однородным критическим током, тогда как незамкнутые обмотки неизбежно будут сформированы из длиномерных образцов. На практике критический ток фрагментов ВТСП ленты большой длины варьируется в пределах 15%, что приводит к росту тепловых потерь и потерь на перематнива-

ние. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что для разработки среднemasштабного генератора оптимальным является использование в качестве ВТСП элементов рейстрекковых катушек. Для конструирования маломасштабного ВТСП генератора, функционирующего при пониженных температурах, при сравнительно низких (до $0.5J_c$) рабочих токах допускается использование замкнутых кольцевых ВТСП обмоток.

Благодарности

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

-
- [1] Haran K. S. et al. // Superconductor Science and Technology. **30**, N 12. 123002. (2017).
[2] Sivasubramaniam K. et al. //IEEE Transactions on applied superconductivity. **19**, N 3. 1656 (2009).
[3] Dezhin D. S. et al. //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, **87**, N 3. 032007. (2017).
[4] Kozub S., Bogdanov I., Kashtanov E. et al. // Refrigeration Science and Technology 283 (2014).
[5] Hahn S., Park D. K., Bascunan J., Iwasa Y. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **21**, N 3. 1592 (2011).
[6] Zhang G., Chen B., Song F. et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **17**, N 2. 1545 (2007).
[7] Barnes P.N., Sumpston M.D., Rhoads G.L. // Cryogenics. **45**, N 10. 670 (2005).
[8] Kalsi S.S., Weeber K., Takesue H. et al. // Proceedings of the IEEE. **92**, N 10. 1688 (2004).
[9] Kim C., Sung H.J., Go B.S., Sim K., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **31**, N 5. 1 (2021).
[10] Song X., Mijatovic N., Kellers J. et al. A // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **27**, N 4. 1 (2017).
[11] Moon H., Kim Y.-C., Park H.-J. et al. // Superconductor Science and Technology. **29**, N 3. 034009. (2016).
[12] Gamble B., Snitchler G., MacDonald T. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **21**, N 3. 1083 (2011).
[13] Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwalla M. et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. **19**, N 3. 1656(2009).

AC losses in generator elements based on composite HTSC tapes

S.V. Veselova^{1,2}, I.V. Martirosyan¹, M.A. Osipov¹, A.S. Starikovskii¹, D.A. Abin¹, K.A. Borodako¹,
D.A. Aleksandrov, A.Y. Malyavina¹, A.N. Moroz^{1,2}, S.V. Pokrovskii^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI. Moscow 119991, Russia

²Kazan (Volga region) Federal University. Kazan, 420008, Russia

E-mail: ^ai@svveselova.ru

To estimate AC losses, simulations were carried out with different frequencies (from 50 Hz to 1033 Hz) and transport current amplitude from 10of the critical current density J_c . During the study, calculated data were obtained allowing us to conclude that the losses of closed-circuit HTSC windings are higher than the losses on racetrack coils.

PACS: 74.25.Bt

Keywords: superconducting generator, energy losses, HTS tapes.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Веселова Светлана Владимировна — инженер-исследователь; e-mail: svveselova@mephi.ru.
2. Мартиросян Ирина Валерьевна — доцент, канд. физ.-мат. наук.
3. Осипов Максим Андреевич — инженер-исследователь, ассистент; e-mail: max.vfk@gmail.com.
4. Стариковский Александр Сергеевич — инженер-исследователь; e-mail: sannoyok1995@gmail.com.
5. Абин Дмитрий Александрович — инженер-исследователь; e-mail: Dima_abin@mail.ru.
6. Бородако Кирилл Анатольевич — инженер-исследователь; e-mail: borodako_kir@mail.ru.
7. Александров Дмитрий Александрович — инженер-исследователь; e-mail: dimax.2001@mail.ru.
8. Мalyavina Александра Юрьевна — инженер-исследователь; e-mail: ayu.malyavina@gmail.com.
9. Мороз Анна Николаевна, доцент — канд. физ.-мат. наук; e-mail: anna.n.moroz@yandex.ru.
10. Покровский Сергей Владимирович — доцент, зав. НИЛ СЭС; e-mail: sergeypokrovskii@gmail.com.