



УДК 538.945

Статья

Оптимизация ВТСП кабелей постоянного и переменного тока с учетом эффекта продольного магнитного поля

В.В. Зубко^{1,2,*}, С.Ю. Занегин^{1,2}, С.С. Фетисов¹, В.С. Высоцкий¹, А.А. Носов¹, Э.С. Отабе³,
Т. Акасака³

1 ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» («ВНИИКП»), 111024, Москва, Россия

2 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Россия

3 Kyushu Institute of Technology, 680 – 4, Iizuka, Japan

* e-mail: vasily.zubko@gmail.com

Известно, что в магнитных полях, параллельных транспортному току, у большинства низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников, наблюдается рост критического тока - эффект продольного магнитного поля (ЭПМП). ЭПМП был предсказан теоретически и подтвержден экспериментально во многих работах. В этой статье представлены различные методы оптимизации силовых коаксиальных кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с учетом ЭПМП. Учет ЭПМП позволит получить более высокую токонесущую способность ВТСП кабелей постоянного тока и более высокую стабильность для силовых ВТСП кабелей переменного тока, в том числе более низкие потери при переменном токе. Представлены и обсуждены результаты оптимизации ВТСП кабелей постоянного и переменного тока с учетом ЭПМП. Представлены два метода расчета магнитного поля в коаксиальных ВТСП кабелях: аналитический и с использованием метода конечных элементов. Также представлены результаты измерений и расчетов потерь при переменном токе в ВТСП кабелях.

Ключевые слова: ВТСП-кабели; эффект продольного магнитного поля; численный анализ.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-53-62

1. Введение

При разработке силовых ВТСП-кабелей основной целью является достижение его максимально высокой токонесущей способности при минимальном использовании основных сверхпроводников. Разработано множество методов оптимизации для увеличения критических токов в ВТСП-кабелях. Одной из возможных идей является использование так называемого эффекта продольного магнитного поля [1].

С конца 1960-х годов известно, что в низкотемпературных сверхпроводниках, наблюдается заметное увеличение плотности критического тока в продольном магнитном поле (поле параллельно транспортному току) в несколько раз больше, чем её величина в поперечном магнитном поле (поле перпендикулярно транспортному току) [2, 3]. Такое увеличение критического тока было объяснено бессиловой конфигурацией для магнитного поля и тока в сверхпроводнике в продольном магнитном поле [4, 5]. Это условие предполагает, что магнитное поле и ток практически параллельны друг другу.

ЭПМП для ВТСП-кабелей был теоретически предсказан позднее в работе [6]. Конструкция силового кабеля постоянного тока на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2), использующая ЭПМП была предложена в работе [7].

Недавно были разработаны два коаксиальных кабеля постоянного тока с токонесущими элементами из ВТСП-2 лент с учетом ЭПМП [1, 8]. Эти кабели прошли успешные испытания и продемонстрировали увеличение критического тока и, следовательно, увеличение токонесущей способности за счет ЭПМП. Чтобы добиться увеличения критического тока в этих кабелях, их

конструкция (шаг скрутки в зависимости от диаметра повива) должна обеспечивать параллельное магнитное поле для каждой ВТСП ленты в каждом повиве. В этом случае критический ток лент будет увеличиваться за счет ЭМП с увеличением суммарного критического тока кабеля.

В данной работе мы продолжаем исследования, начатые нами ранее в работе [1], распространяя наш анализ на возможные кабели переменного тока с использованием ЭМП. Для нашего анализа мы также используем данные из работы [8].

Очевидно, что способы оптимизации ВТСП-кабелей постоянного и переменного тока с использованием ЭМП должны быть разными, и это обсуждается в данной статье. Поскольку потери на переменном токе очень важны, мы также оценили потери на переменном токе в оптимизированном кабеле с использованием ЭМП из работы [1].

2. Зависимости критического тока ВТСП-2 лент

Экспериментальные зависимости критических токов современных ВТСП-2 лент от магнитного поля для различных углов (β) между транспортным током и внешним магнитным полем $I_c(B, \beta)$ приведены в работах [1,8]. Зависимости критического тока для ВТСП-2 лент из [1,8] для параллельного $I_c(B, 0^\circ)$ и перпендикулярного $I_c(B, 90^\circ)$ магнитных полей по отношению к току при температуре 77.4 К показаны на рис. 1.

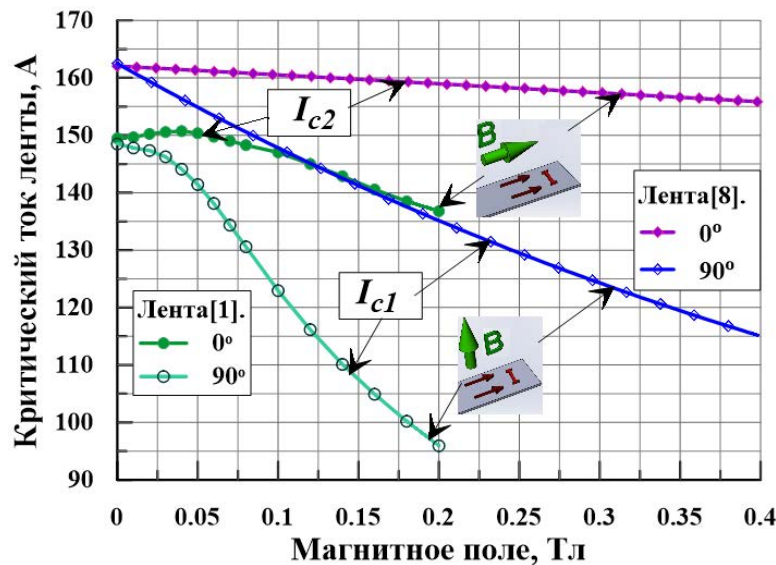


Рис. 1. (а) Экспериментальная зависимость критического тока от магнитного поля для ВТСП-2 лент из [1] и [8] для углов $\beta = 0^\circ$ (продольное магнитное поле (B_{\parallel})) и $\beta = 90^\circ$ (поперечное магнитное поле).

Зависимости $I_c(B, \beta)$ представленные в работах [1,8] могут быть аппроксимированы следующим уравнением:

$$I_c(B, \beta) = 0.5 (I_c(B, 0) + I_c(B, 90)) + 0.5 (I_c(B, 0) - I_c(B, 90)) \cos(2\beta), \quad (1)$$

I_{c1} , приведенную на рис. 1, можно рассматривать как зависимость критического тока от магнитного поля при отсутствии ЭМП ($I_c(B, 90^\circ)$), а I_{c2} — при наличии максимального ЭМП ($I_c(B, 0^\circ)$). Из рис. 1 видно I_c (собственное поле) = 150 А для лент, представленных в [1], и I_c

(собственное поле) = 162 А, для лент, представленных в [8]. На рис. 1 также показаны направления магнитного поля и тока.

3. Оптимизация коаксиальных ВТСП-кабелей постоянного тока с учетом эффекта продольного магнитного поля

Токонесущая способность ВТСП кабеля постоянного тока равна сумме критического тока каждого повива проводника (жилы) кабеля:

$$I_{c,tot} = \sum_{i=1}^m I_{c,i} \quad (2)$$

где m количество повивов в проводнике.

Для кабеля постоянного тока задачей оптимизации является разработка конструкции кабеля с максимальной токонесущей способностью, т.е. целевая функция — это максимум $I_{c,tot}$. Для оптимизации кабеля постоянного тока (с точки зрения получения максимума $I_{c,tot}$ с учетом ЭМП) был использован итерационный алгоритм:

$$I_{c,i}^{k+1} = f(I_{c,i}^k), \quad (3)$$

сначала для каждого (i) повива ВТСП-кабеля задавалось начальное значение тока $I_{c,i}^0 = I_c(B_i = 0)$, далее вычислялось магнитное поле (B_i) и угол (β_i) в каждом повиве кабеля, затем вычислялось $I_{c,i}^1 = I_c(B_i, \beta_i)$. Затем на каждом новом шаге ток в каждом повиве изменяется до тех пор, пока ток в каждом повиве будет удовлетворять условию:

$$\frac{I_{c,i}^{k+1} - I_{c,i}^k}{I_{c,i}^k} < \zeta, \quad (4)$$

где $\zeta = 10^{-4}$ - остановочный критерий.

Для вычисления магнитного поля B_i , аксиальной $B_{z,i}$ и азимутальной $B_{\theta,i}$ составляющих магнитного поля в повиве коаксиального ВТСП кабеля можно использовать аналитические уравнение [7]:

$$\begin{aligned} B_{z,i} &= \sum_{k=i+1}^m \frac{\mu_0 I_k \sin^2(\theta_k)}{2\pi R_k \cos(\theta_k)} + B_{ext}, \\ B_{\theta,i} &= \sum_{k=i+1}^m \frac{\mu_0 I_k \cos(\theta_k)}{2\pi R_k}, \\ B_i &= \left(B_{z,i}^2 + B_{\theta,i}^2 \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где I_k — ток в повиве, R_k — внутренний радиус повива, θ_k — угол скрутки (угол наложения) ВТСП лент в повиве, B_{ext} — внешнее магнитное поле, создаваемое повивами экрана кабеля.

Кроме того, мы можем использовать 3D-модель на основе метода конечных элементов (МКЭ) для определения B_i , $B_{z,i}$ и $B_{\theta,i}$. Данная модель с использованием ANSYS (EMAG software) [9] подробно представлена в [10,11]. В этой модели каждый повив проводника и экрана моделируются тонким цилиндром, имеющим толщину ВТСП слоя ВТСП-2 ленты. Угол скрутки

ВТСП лент в повиве моделируется анизотропией электропроводности каждого цилиндра. Электропроводность анизотропного тонкого проводника представляет собой тензор 2-го порядка, где все недиагональные элементы равны нулю, данный тензор имеет вид:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z'} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\sigma_{x'} = \sigma_{y'} \neq \sigma_{z'}$ — электропроводность в соответствующих координатах, z' — координата, параллельная направлению катушки ВТСП ленты в повиве.

После определения B_i , $B_{z,i}$ и $B_{\theta,i}$, магнитное поле параллельное току в лентах ($B_{\parallel,i}$), и угол β_i для каждого повива определяется уравнениями:

$$B_{\parallel,i} = B_{z,i} \cdot \cos(\theta_i) + B_{\theta,i} \cdot \sin(\theta_i), \quad (7)$$

$$\beta_i = \cos^{-1}\left(\frac{B_{\parallel,i}}{B_i}\right) = \theta_i - \tan^{-1}\left(\frac{B_{\theta,i}}{B_{z,i}}\right). \quad (8)$$

Далее был проведен новый анализ ВТСП кабелей постоянного тока разработанных с учетом ЭПМП: компактного кабеля с четырьмя ВТСП-повивами в жиле и двумя повивами в экране [1] и кабеля класса 10 кА с четырьмя повивами в жиле и четырьмя повивами в экране [8].

На рис. 2 показаны расчетные значения критического тока кабелей с учетом и без учета ЭПМП в зависимости от угла скрутки ВТСП лент в крайнем повиве (θ_{\max}) проводника, остальные углы определялись уравнением $\theta_1 = 5^\circ$, $\theta_i = \frac{\theta_{\max} - \theta_1}{m}i$. Угол скрутки ВТСП-лент в повивах экрана одинаковы и равны 30° . Расчеты проводились для кабелей, когда ВТСП ленты в жиле скручены в одну сторону, а ленты экрана — в противоположную; например, направление катушки кабеля [1] $a = [1, 1, 1, 1, -1, -1]$. Внутренние радиусы (R_i) повивов кабелей взяты из [1,8]. Из рис. 2 видно, что увеличение критического тока кабеля (около 1 кА) можно получить, учитывая ЭПМП. Расчет ограничен $\theta_{\max} < 35^\circ$, поскольку общая длина ВТСП ленты увеличивается по мере увеличения, и использование большого количества сверхпроводника нецелесообразно. Согласно [7], максимальный критический ток кабеля получается при значениях угла ниже 50° .

Рис. 2. Токонесущая способность ВТСП кабеля ($I_{c,tot}$) в зависимости от θ_{\max} .

Для примера, на рис. 3 показано распределение магнитного поля для $\theta_{\max} = 34^\circ$ при критическом токе в кабеле [8]. Видно, что максимальное магнитное поле получается в сверхпроводящем повиве и составляет около 0.18 Тл. Для кабеля из [1] рассчитанные значения магнитных полей примерно такие же.

Таким образом, нам удалось разработать метод оптимизации для кабеля постоянного тока с ЭППП.

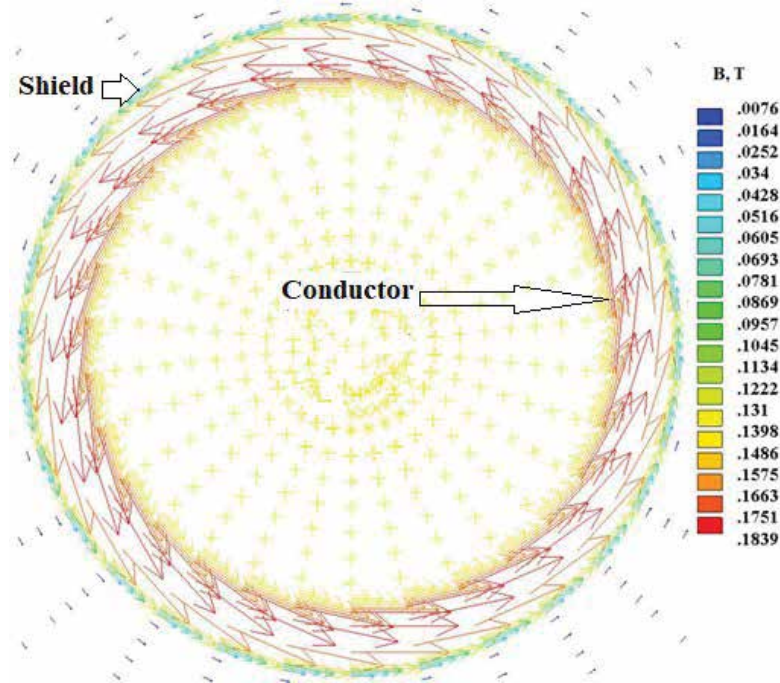


Рис. 3. Распределение плотности магнитного потока при критическом токе в кабеле с 4 повивами в проводнике и 4 повивами в экране ($\theta_{\max} = 34^\circ$).

4. Оптимизация коаксиальных ВТСП-кабелей переменного тока с учетом эффекта продольного магнитного поля

Для ВТСП кабелей переменного тока задача оптимизации состоит в обеспечении равномерного распределения токов между повивами проводника и между повивами экрана кабеля и может быть описана как задача минимизации целевой функции:

$$F(X) = \min f(X) = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{i=k+1}^m |I_i(X) - I_k(X)| + \sum_{k=m+1}^{N-1} \sum_{i=k+1}^N |I_i(X) - I_k(X)|, \quad (9)$$

где $I_i(X)$ и $I_k(X)$ – значение тока в i -м и k -м повиве, m – количество повивов в проводнике, N – общее количество повивов (включая проводник и экран) в кабеле.

Вектор управляющих переменных:

$$X = [R_1, \theta_1, a_1, \dots, R_i, \theta_i, a_i, \dots, R_N, \theta_N, a_N], \quad (10)$$

где R_i – внутренний радиус i -го повива, a_i and θ_i – направление и угол скрутки ВТСП-лент в i -м повиве.

Для расчета токов I_i в каждом i -м повиве мы можем использовать уравнения Кирхгофа [10].

Кроме того, для полученного токов в каждом повиве мы можем использовать 3D-МКЭ модель, как описано в разделе 3, см. также [10, 11], где управляющими переменными являются направление электропроводности каждого цилиндра (повива) (см. уравнение (6)).

Ограничением на управляющие переменные является условие сохранения сверхпроводящих свойств ВТСП лент в повиве.

Для надежности ВТСП кабелей переменного тока необходим запас по току, для этого отношение $I_i / I_{c,i}$ выбирается около 0.7–0.8. На практике при заданных максимальных токах в повивах проводника запас по току рассчитывается без учета ЭПМП и, следовательно, это значение оказывается завышенным. Для более точного расчета запаса по току следует учитывать ЭПМП.

Если заданы максимальные токи в повивах проводника, то можно увеличить запас по току (или увеличить $I_{c,i}$) повивов проводника с помощью ЭПМП. Для этого на значения переменных θ_i для каждого повива экрана необходимо добавить ограничения, которое должно быть $> 30^\circ$, что обеспечит максимальное продольное магнитное поле, создаваемое повивами экрана в повивах проводника.

5. Расчет и измерение потерь на переменном токе в коаксиальном ВТСП кабеле

Проверка влияния ЭПМП на потери на переменном токе проведена на ВТСП кабеле из работы [1], который оптимизирован с учетом ЭПМП.

Измерения потерь на переменном токе проводились электрическим методом, который основан на расчете активной мощности (потери переменного тока) для каждого периода тока для проводника по формуле:

$$P = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u \cdot i dt \quad (11)$$

где u, i – мгновенные значения напряжения и тока, t_m — время измерения нескольких периодов сигнала для повышения точности.

Измеренные потери в жиле ВТСП кабеля и в каждом повиве в отдельности показаны на рис. 4 [1]. На рис. 4 повивы отсчитываются от внутреннего повива, в каждом повиве имеется по 14 лент [1]. Измеренные потери в проводнике превышают измеренные потери в каждом повиве в отдельности, поскольку в проводнике наблюдается незначительная неравномерность распределения тока между повивами проводника, поскольку проводник не был оптимизирован для использования на переменном токе [1], также повивы проводника имеют разные критические токи [1].

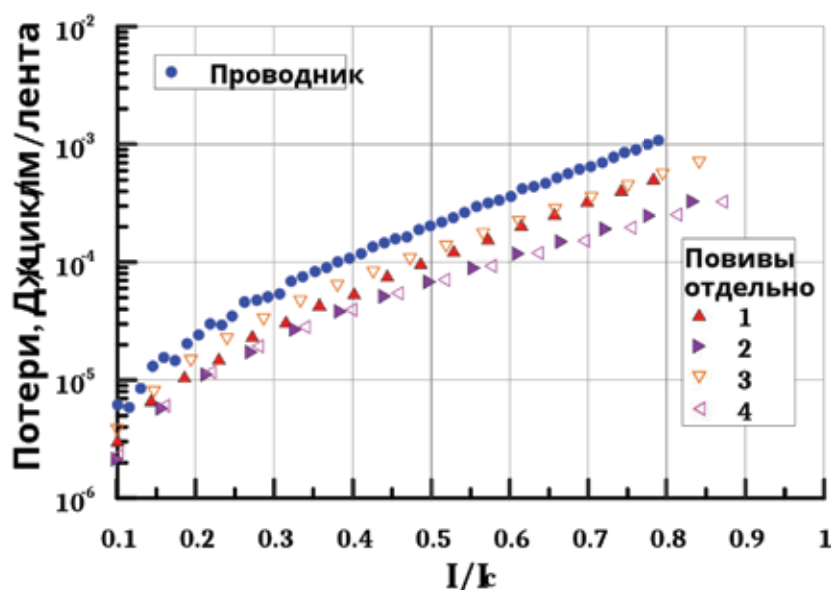


Рис. 4. Измеренные потери на переменном токе не ленту в зависимости от относительного тока в проводнике и в каждом повиве отдельно.

На рис. 5 показано сравнение измеренных и рассчитанных МКЭ моделью потерь в проводнике. В расчете учитывалось распределение измеренного тока между повивами и измеренный критический ток каждого повива [1].

Для расчета потерь в ВТСП-2 кабелях на переменном токе была разработана 2D МКЭ модель (ANSYS EMAG software, A/A-V формулировка) [9, 11, 12]. В модели рассматривается полное сечение кабеля, учитывая его полигональную структуру и зазоры между лентами, рассчитываются только радиальная и азимутальная составляющие магнитного поля в кабеле. Поэтому мы попытались смоделировать влияние ЭМП на потери следующим образом, расчет проводился для критических токов ВТСП-2 ленты, представленных на рис. 1. I_{c1} (без ЭМП) и I_{c2} (максимальное ЭМП).

Расчетные потери на ленту ниже измеренных потерь, если относительный ток (I/I_c) в проводнике меньше 0.4. По мере увеличения I/I_c измеренные потери лучше совпадают с расчетными если в расчетах учитывать ЭМП. Как видно из рис. 5, вследствие ЭМП потери в кабеле переменного тока незначительно снижаются. Причиной малого влияния на потери ЭМП в данном кабеле является неравномерность распределения тока между повивами проводника и небольшое изменение распределения поля в кабеле с ЭМП по сравнению с кабелем без ЭМП. Для проверки этого эффекта предполагается изготовить более подходящий (оптимизированный с учетом ЭМП) кабель переменного тока.

Следует отметить, что существуют две модели, объясняющие структуру внутри сверхпроводника в продольном магнитном поле: первая модель представлена в работе [13], а вторая модель представлена в работе [14]. И вокруг этого вопроса ведется очень много дискуссий. Расчеты МКЭ моделью не учитывают структуру сверхпроводника. В расчетах мы использовали экспериментальные результаты, приведенные на рис. 1 с помощью которых оценили величину потерь на переменном токе.

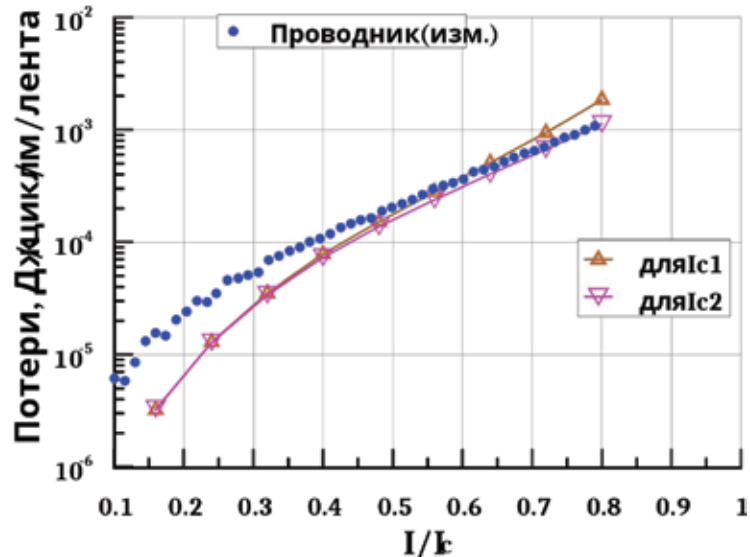


Рис. 5. Измеренные потери на переменном токе на ленту в зависимости от относительного тока в жиле кабеля по сравнению с расчетными потерями в проводнике.

5. Выводы

Разработаны различные методы оптимизации с учетом ЭПМП коаксиальных ВТСП кабелей постоянного и переменного тока. Учет ЭПМП позволяет: для кабелей постоянного тока увеличить критический ток (токонесущую способность), для кабелей переменного тока при заданных максимальных токах в повивах проводника повысить его надежность за счет увеличения критического тока повивов проводника. Анализ экспериментальных данных с помощью МКЭ модели показал, что, вследствие ЭПМП потери в кабеле на переменном токе незначительно снижаются.

Сделан вывод, что 10% увеличение общего критического тока ВТСП кабеля может быть достигнуто, если при оптимизации учитывать ЭПМП в современных ВТСП-2 лентах.

Литература

- [1] S. S. Fetisov, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 4 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2021.3137763
- [2] Yu. F. Bychkov, et al, JETP Lett. **9**, 12, 652 (1969).
- [3] B. ten Haken, et al, IEEE Trans. Magn. **28**, 755 (1992). DOI: 10.1109/20.119989
- [4] C.J. Bergeron, Appl. Phys. Lett. **3**, 171 (1963). DOI: 10.1063/1.1753920
- [5] T. Matsushita Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 010111 (2012). DOI 10.1143/JJAP.51.010111
- [6] T. Matsushita, et al, Supercond. Sci. Technol., **25**, 125009 (2012). DOI 10.1088/0953-2048/25/12/125009
- [7] V.S. Vyatkin, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., **25**, 4, 6606207 (2015). DOI: 10.1109/TASC.2015.2427357
- [8] Y. Kinoshita, et al, J. Phys., Conf. Ser. 1975, 012037 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1975/1/012037
- [9] Ansys Multiphysics, www.ansys.com
- [10] S.S. Fetisov, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 4, 5400905 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2821708
- [11] V.V. Zubko, et al, J. Phys., Conf. Ser. 2043, 012004 (2021). DOI 10.1088/1742-6596/2043/1/012004
- [12] V.V. Zubko, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 3, 8202005 (2016). DOI: 10.1109/TASC.2016.2535151
- [13] J.R. Cave, et al, J. Phys. Colloques, **39** (1978). DOI: 10.1051/jphyscol:19786276
- [14] T. Matsushita, J. Phys. Soc. Jpn, **54**, 3, 1066 (1985). DOI: 10.1143/JPSJ.54.1066

Optimization of HTS DC and AC cables with take account longitudinal magnetic field effect

V.V. Zubko^{1,2,*}, S.Yu. Zanegin^{1,2}, S.S. Fetisov¹, V.S. Vysotsky¹, A.A. Nosov^{1,2}, E.S. Otabe³, T. Akasaka³

1 All-Russian scientific research and development cable institute («ВНИИКП»), 111024, Moscow, Russia

2 Moscow Aviation Institute (MAI), 125993, Moscow, Russia

3 Kyushu Institute of Technology, 680 – 4, Iizuka, Japan

* e-mail: vasily.zubko@gmail.com

It is known that in magnetic fields parallel to the transport current, an increase of the critical current is observed in most low-temperature and high-temperature superconductors — the effect of a longitudinal magnetic field (LMFE). LMFE has been theoretically predicted and experimentally confirmed in many studies. This article presents various methods for optimizing power coaxial cables based on high-temperature superconductors (HTS), considering LMFE. LMFE provides a higher current-carrying capacity of HTS DC cables and higher stability for HTS power AC cables, including lower AC losses. The results of optimization of HTS cables for both DC and AC applications with consideration of LMFE are presented and discussed. Two methods for calculating the magnetic field in coaxial HTS cables are presented: analytical and using the finite element method. The results of AC loss calculations and measurements for HTS cables are also presented.

Keywords: HTS cables, longitudinal magnetic field effect, numerical analysis.



Зубко Василий Васильевич — доктор техн. наук, главный научный сотрудник ОАО «ВНИИКП», Москва, Россия, ведущий научный сотрудник МАИ (НИУ), Москва, Россия.

Dr. Vasily Zubko — Chief Researcher «ВНИИКП», MAI.



Занегин Сергей Юрьевич — кандидат техн. наук, научный сотрудник ОАО «ВНИИКП», Москва, Россия, научный сотрудник МАИ (НИУ), Москва, Россия.

Dr. Sergey Zanegin — Researcher, «ВНИИКП», MAI.



Фетисов Сергей Сергеевич — доктор техн. наук, заведующий отделением, ОАО «ВНИИКП», Москва, Россия.

Dr. Sergey Fetisov — Head of Department, «ВНИИКП».

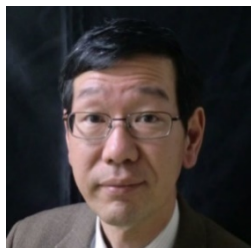


Высоцкий Виталий Сергеевич — доктор техн. наук, заместитель заведующего, научный руководитель отделения сверхпроводящих и криорезистивных кабелей, ОАО. «ВНИИКП», Москва, Россия.

Dr. Vitaly Vysotsky — Ph.D; Dr. of Sci. (habil.) Deputy head of Department, «ВНИИКП».



Носов Александр Анатольевич — кандидат техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИКП», Москва, Россия.
Dr. Aleksandr Nosov — Senior Researcher «VNIIPK»



Эдмунд Соджи Отабе, профессор, Кюсю Технологический Институт, Иизука. Япония.
Dr. Edmund Soji Otabe — Professor, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Japan.



Томоюки Акасака — научный сотрудник, Кюсю Технологический Институт, Иизука. Япония.
Tomoyuki Akasaka — Researcher, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Japan.