

Базовые технологии изготовления силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения

ФЕТИСОВ С.С., ЗУБКО В.В.
ОАО «ВНИИКП», Москва, Россия

Силовые кабели на основе высокотемпературных сверхпроводников (далее – ВТСП-кабели) считаются наиболее перспективным направлением применения сверхпроводимости в электроэнергетике. Кабели из высокотемпературных сверхпроводников первого поколения уже внедрены в электрические сети ряда стран мира. Силовые ВТСП-кабели второго поколения находятся в активной разработке. Основные принципы конструирования коаксиальных силовых ВТСП-кабелей известны с 1990-х гг. Статья посвящена новым методам разработки компактных силовых ВТСП-кабелей переменного тока второго поколения. Представлены методы оптимизации конструкции кабелей, обеспечивающие равномерное распределение тока между их повивами, и технология производства кабелей такой конструкции. Описаны программа испытаний и стенд для тестирования моделей ВТСП-кабелей. Рассмотрены проблемы разработки силовых ВТСП-кабелей второго поколения малых диаметров. Приведены примеры разработки, изготовления и результатов испытаний двух основных конструкций компактных коаксиальных ВТСП-кабелей: однофазного (жила кабеля и экран) и трехфазного (триаксиальный: с тремя коаксиальными фазами) исполнений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ВТСП-кабель второго поколения, триаксиальный ВТСП-кабель, разработка ВТСП-кабелей, моделирование ВТСП-кабелей

Среди возможных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в электроэнергетике наиболее передовым и перспективным решением является их использование при передаче электроэнергии. Так, в статье [1] представлен обзор силовых ВТСП-кабелей, включающий этапы от их разработки и проектирования до испытания и внедрения в электрические сети. Использование ВТСП-кабелей для электрических сетей обсуждается в [2], некоторые проекты уже считаются коммерческими [3].

До сих пор большинство ВТСП-кабелей, успешно испытанных и установленных в электрических сетях по всему миру, изготовлены из ВТСП-проводов первого поколения (1G) [1]. Силовые кабели из ВТСП-проводов второго поколения (2G или *Coated Conductors*) находятся в активной разработке и тестировании. С 1990-х гг. основным принципам разработки и проектирования силовых ВТСП-кабелей 1G было посвящено много работ (например [4–10]). Наибольшее внимание уделялось вопросам обеспечения равномерного распределения тока между повивами, что важно для достижения полного использования сверхпроводящих свойств в многоповивных кабелях.

Необходимо отметить, что проблема равномерного распределения тока между повивами актуальна для кабелей переменного тока. В кабелях постоянного тока распределение тока определяется сопротивлениями

контактов соединений токовых вводов и не является определяющим. С другой стороны, у кабелей переменного тока, которые более важны для обычных электросетей, распределение тока между повивами определяется полным импедансом, который должен быть одинаковым для всех повивов. Это может быть достигнуто за счет обеспечения необходимого шага и направления скрутки проводников в повивах [4–10].

Использование ВТСП-лент 2G (современные ВТСП-провода изготавливаются в виде лент) в кабелях представляется более перспективным, чем ВТСП-лент 1G, из-за их более высокой плотности тока, меньших потерь на переменном токе и их меньшей ожидаемой стоимости при массовом производстве. ВТСП-ленты 2G более тонкие и гибкие, чем 1G, что позволяет укладывать их на меньший диаметр. Таким образом, можно изготовить ВТСП-кабели меньшего диаметра, что делает силовые ВТСП-кабели 2G более компактными и эффективными. Чтобы транспортный ток оставался достаточно большим и для обеспечения необходимой мощности, в компактных кабелях следует использовать большее количество ВТСП-повивов. Это усложняет задачу конструирования и обеспечения равномерного распределения тока между повивами для кабелей переменного тока.

Была поставлена задача разработать и внедрить новые подходы к моделированию, проектированию

и производству силовых компактных ВТСП-кабелей 2G. Институт ВНИИКП ведет научно-исследовательские работы по максимально возможному уменьшению массы и габаритов ВТСП-кабелей. Это имеет большое значение для электрических летательных аппаратов, судовых двигательных установок и других транспортных приложений. Уменьшение диаметра кабеля снижает допустимый диаметр его изгиба, что важно для транспортных средств с ограниченным пространством.

В статье дан обзор последних разработок в области моделирования, производства и тестирования силовых ВТСП-кабелей 2G. Описаны модели для оптимизации конструкции силовых ВТСП-кабелей 2G переменного тока в том числе и с использованием метода конечных элементов. Эти модели требуются при проектировании компактных кабелей, для оптимизации которых необходимо проводить более точные вычисления, учитывая погрешность изготовления повивов. Рассматривается технология производства для реализации конструкции с минимальными погрешностями изготовления внутренних диаметров повивов и скрутки (шага наложения) ВТСП-лент, необходимыми для обеспечения равномерного распределения тока между повивами. Описываются измерения потерь на переменном токе в ВТСП-кабелях 2G и другие методы испытаний. Предложенные подходы проиллюстрированы и подтверждены примерами разработанных и испытанных компактных ВТСП-кабелей малого диаметра. Рассмотрены две конструкции ВТСП-кабелей 2G: 1) однофазный коаксиальный кабель с четырехповивной жилой (токонесущим элементом – ТНЭ) и двухповивным экраном; 2) трехфазный триаксиальный кабель с двумя повивами ВТСП-лент 2G в каждой фазе.

Модели оптимизации конструкции ВТСП-кабелей на переменном токе. Ранее обсуждались различные методы расчета оптимальной конструкции ВТСП-кабелей переменного тока (например в [4–10]). Использование ВТСП-лент 2G требует более точных расчетов, особенно для кабелей малого диаметра. Авторами разработаны два подхода к оптимизации конструкций ВТСП-кабелей: на основе эквивалентной электрической схемы и на основе метода конечных элементов.

Модель оптимизации коаксиальных ВТСП-кабелей на основе эквивалентной электрической схемы. Первый подход заключается в использовании моделей на основе эквивалентной электрической схемы кабеля с источниками тока или напряжения на основе законов Кирхгофа, в которых учтено, что повивы в ВТСП-кабеле электрически изолированы. Ниже представлены уравнения Кирхгофа для электрической схемы кабеля с источником тока:

$$\begin{pmatrix} M_1 & \dots & M_{1,m} & M_{1,m+1} & \dots & M_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m,1} & \dots & M_m & M_{m,m+1} & \dots & M_{m,N} \\ M_{m+1,1} & \dots & M_{m+1,m} & M_{m+1} & \dots & M_{m+1,N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N,1} & \dots & M_{N,m} & M_{N,m+1} & \dots & M_N \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI_1 / dt \\ \vdots \\ dI_m / dt \\ dI_{m+1} / dt \\ \vdots \\ dI_N / dt \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{add} \cdot I_{add} \\ \vdots \\ R_{add} \cdot I_{add} \\ R_{addSc,1} \cdot I_{addSc,1} \\ \vdots \\ R_{addSc,n} \cdot I_{addSc,n} \end{pmatrix} = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m I_i(t) + I_{add} = I_{total}(t); \quad (2)$$

$$I_{m+1}(t) + I_{addSc1} = 0; \quad I_N(t) + I_{addScn} = 0, \quad (3)$$

где t – время, с; m, n – количество повивов в жиле и экране; $N = m + n$; ΔI_i – изменение тока в i -м повиве, А; M_k и M_{kj} – коэффициенты собственной и взаимной индуктивности повивов, Гн; $I_{total}(t)$ – полный ток в кабеле, А; $R_{add} \cdot I_{add}$ – дополнительное сопротивление для всех повивов в токонесущем элементе, Ом, и соответствующий ток, А; $R_{addSc,i} \cdot I_{addSc,i}$ – дополнительные сопротивления для каждого повива в экране, Ом, и соответствующие токи, А.

Эта модель реализуется путем добавления очень большого сопротивления R_{add} параллельно всем повивам [10] и добавления очень малого сопротивления $R_{addSc,i}$ параллельно каждому повиву экрана.

Коэффициенты собственной и взаимной индуктивности повивов определяются выражениями [11]:

$$M_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_k} + \mu_0 \pi r_k^2 \left(\frac{1}{L_k^2} \right); \quad (4)$$

$$M_{k,i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_k} + a_i a_k \mu_0 \pi r_i^2 \left(\frac{1}{L_i} \right) \left(\frac{1}{L_k} \right), \quad (5)$$

где L_k – шаг скрутки (или шаг наложения) ВТСП-лент в повиве, м; r_i – внутренний радиус повива, м; r_s – константа; a_j и a_k – направления наложения ВТСП-лент в повиве (1 или – 1); μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м.

Задача решения любой системы уравнений может быть сформулирована как задача минимизации целевой функции. В нашем случае задача определения равномерного распределения тока по повивам токонесущего элемента и экрана может быть сформулирована как задача минимизации следующей целевой функции:

$$F(X) = \min f(X) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m |I_i(X) - I_j(X)| + \sum_{i=m+1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N |I_i(X) - I_j(X)|, \quad (6)$$

где I_i – максимальные значения тока в повивах, получаемые из уравнений (1–3); $X = [r_1, \beta_1, a_1, r_2, \beta_2, a_2, \dots, r_N, \beta_N, a_N]$ – вектор управляющих переменных; r_i – внутренний радиус повива, м; a_i – направления наложения ВТСП-лент в повиве (1 или -1); β_i – угол наложения ВТСП-лент в повиве, рад.

Ограничением на параметры оптимизации (r_i, a_i, β_i) является условие сохранения сверхпроводящих свойств ВТСП-лент.

Модели оптимизации коаксиальных ВТСП-кабелей на основе метода конечных элементов. Во втором подходе к комплексному исследованию ВТСП-кабелей 2G решается нестационарная электромагнитная задача методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программного модуля *ANSYS Emag* [12]. В рамках подхода разработаны две трехмерные (3D) МКЭ-модели.

Подробная 3D-модель при расчете распределения дает возможность моделировать спиральную структуру жилы и экрана кабеля и получить распределение магнитного поля внутри кабеля. Однако задача является трудоемкой и требует много вычислительного времени, поэтому МКЭ-модель может использоваться только для тестирования оптимизированных параметров кабеля.

На рис. 1 показаны элементы ВТСП-лент в подробной трехмерной модели для концевой части компактного ВТСП-кабеля 2G. Кабель состоит из четырех повивов в жиле и двух повивов в экране.

Для сокращения времени расчетов была разработана более простая 3D МКЭ-модель.

В данной модели многоповивная жила и многоповивный экран ВТСП-кабеля моделируются системой тонких концентрических слоев (цилиндров), в которой все сверхпроводящие слои изолированы (рис. 2). В сверхпроводящих тонкослойных цилиндрах направление и шаг наложения ВТСП-лент в повиве моделируются анизотропией электрической проводимости. Электрическая проводимость тонкослойной среды мо-

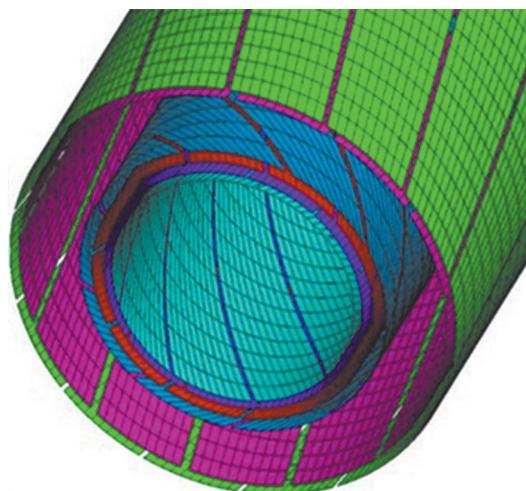


Рис. 1. Элементы ВТСП-лент концевой части кабеля (4-повивная жила и 2-повивный экран) в детальной 3D МКЭ-модели

Fig. 1. The mesh elements in detailed 3D FEM model of the layers of HTS tapes on the end part of the cable (4-layers in the core and 2-layers in the shield)

жет быть описана диагональным тензором в системе координат x', y', z , который имеет вид:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z'} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\sigma_{x'} = \sigma_{y'} \neq \sigma_{z'}$ – электрическая проводимость в указанных направлениях, См.

В данном случае задача получения равномерного распределения тока по повивам токнесущего элемента (ТНЭ) и экрана может быть сформулирована так же, как задача минимизации целевой функции (6), в которой максимальные значения токов в повивах рассчитываются МКЭ-моделью, а переменными управления будут значения электрической проводимости ($\sigma_{x'} = \sigma_{y'} \neq \sigma_{z'}$) для каждого цилиндра.

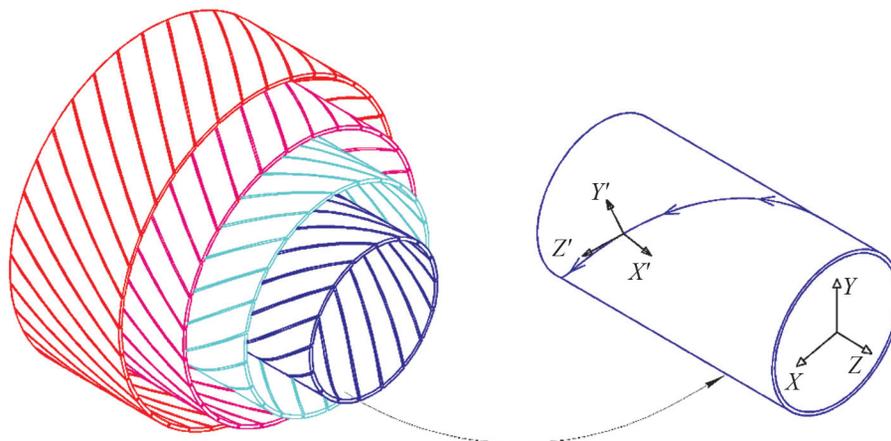


Рис. 2. Моделирование ВТСП-повивов тонкослойными цилиндрами

Fig. 2. Modeling of HTS layers with thin cylinders

Модели оптимизации триаксиальных ВТСП-кабелей на переменном токе. Триаксиальный силовой ВТСП-кабель переменного тока с тремя фазами, намотанными вокруг одного формера, является оптимальным решением для низких и средних напряжений. Такая конструкция позволяет сэкономить дорогостоящие ВТСП-провода и увеличить передаваемую мощность. Преимущества триаксиальных ВТСП-кабелей уже доказаны масштабными проектами *Vixby* и *AmpaCity* [13, 14]. В этих кабелях использовался один ВТСП-повив из 1G лент (*Bi-2223*) на каждую фазу. Также во ВНИИ КП разработан и испытан ранее повив из ВТСП-проводов 2G на каждую фазу [15]. Кабель успешно прошел испытания и продемонстрировал примерно в 20 раз меньшие потери переменного тока, чем силовой кабель с такими же параметрами, сделанный из ВТСП-проводов 1G [15].

Увеличить пропускную способность триаксиального кабеля за счет повышения его рабочего напряжения и, следовательно, толщины изоляции между фазами сложно. Другим способом увеличения рабочего тока является применение многоповивной структуры фаз кабеля. Эта задача требует сложной оптимизации. Чтобы обеспечить правильное распределение тока между фазами и повивами лент в каждой фазе решение задачи требует сложной оптимизации.

Как и для коаксиального кабеля, для оптимизации распределения токов между повивами в фазах триаксиального кабеля также были разработаны численные модели на основе эквивалентной электрической схемы и трехмерные модели, использующие метод конечных элементов.

При оптимизации на основе эквивалентной электрической схемы токоведущего элемента триаксиального трехфазного ВТСП-кабеля для расчета токов и напряжений в фазах использованы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_k(t, z)}{\partial z} &= R_k(I_k)I_k(t) + \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{dI_{k,i}}{dt} (M_{k,i}) \right\}; \\ \frac{\partial I_k(t, z)}{\partial z} &= \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{dU_{k,i}}{dt} (C_{k,i}) \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\kappa = N_p$ – число повивов всех фаз; M_k и M_{ki} – коэффициенты собственной и взаимной индуктивности повивов, Гн; I_k , U_k и dI_k/dt – ток, А, напряжение, В, и скорость изменения тока в каждом повиве, А/с; $R(I_k)$ – сопротивление повива, зависящее от тока, Ом; C_{ki} – емкость между повивами, Ф.

Собственные индуктивности повивов и взаимные индуктивности между повивами на единицу длины были найдены из выражений (4), (5).

Емкость C_{ki} между повивами кабеля:

$$C_{i,k} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{r_k}{r_i}\right)}. \quad (9)$$

где r_i – радиус внутреннего повива, м; r_k – радиус внешнего повива или экрана, м; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции.

В оптимизированном кабеле максимальные значения токов в повивах каждой фазы должны быть равны между собой, например, для фазы A :

$$I_A = \sum_{i=1}^N I_{A,i}; \quad I_{A,i} = I_{A,i+1} = \frac{I_A}{N}. \quad (10)$$

Кроме того, чтобы токи и напряжения в фазах кабеля были сбалансированы, их значения должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} I_B &= \beta^2 I_A; \quad I_C = \beta I_A; \\ V_B &= \beta^2 V_A; \quad V_C = \beta V_A; \quad \beta = \exp(j2\pi/3), \end{aligned} \quad (11)$$

где j – мнимая единица.

Также для оптимизации и комплексного исследования триаксиального ВТСП-кабеля 2G были разработаны две МКЭ-модели с использованием *ANSYS Emag*: подробная 3D-модель и 3D-модель с геометрической конфигурацией для ускоренного расчета. В 3D-модели с геометрической конфигурацией повивы в фазах кабеля моделируются системой тонких концентрических слоев (цилиндров), где все повивы изолированы друг от друга. В сверхпроводящих тонких цилиндрах оптимизированные переменные (направление намотки и шаг закрутки ВТСП-лент) моделируются анизотропией электропроводности каждого цилиндра.

Подробная 3D МКЭ-модель, позволяющая представить любую топологию ВТСП-кабеля, также использовалась для проверки результатов оптимизации. Модель учитывает спиральную структуру повивов и дает возможность получить детальное распределение магнитного поля внутри кабеля.

На рис. 3 показаны элементы сетки в подробной трехмерной модели повивов ВТСП-ленты для конца трехфазного кабеля. Кабель состоит из двух повивов в каждой фазе.

Влияние неточности изготовления на распределение тока между повивами. Как было сказано выше, уменьшение диаметра кабеля при сохранении передаваемой мощности потребует увеличения количества сверхпроводящих повивов как в жиле кабеля, так и в его экране. В [16] продемонстрирована достаточная неоднородность распределения тока между повивами в компактном кабеле (внутренний диаметр 11,3 мм, внешний диаметр 19,6 мм) из-за небольшой погрешности изготовления. Обеспечение равномерного распределения тока между повивами жилы, а также между повивами экрана в многоповивном кабеле, имеющем малый диаметр, является сложной задачей. Необходимы высокоточные методы как для оптимизации, так и для производства компактных кабелей [16]. Описанные выше методы численной оптимизации позволяют проанализировать влияние точности изготовления применительно к компактным кабелям.

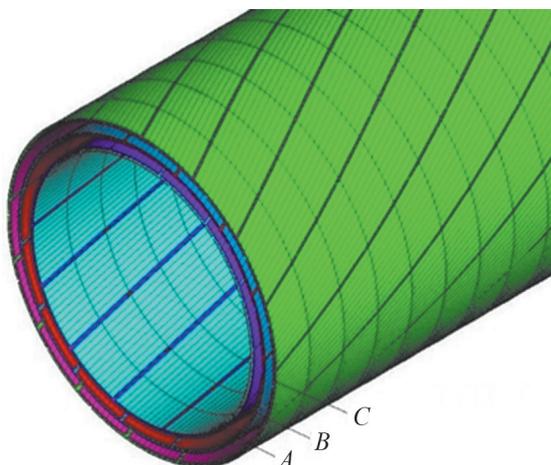


Рис. 3. Элементы ВТСП-ленты в 3D-модели трехфазного кабеля, каждая фаза которого состоит из двух повивов: *A, B, C* – фазы кабеля

Fig. 3. The mesh elements in detailed 3D FEM model of the layers of HTS tapes on the end part of the triaxial cable: *A, B, C* are the phases of the cable

Анализ чувствительности распределения тока к погрешности изготовления повивов кабеля с внутренним диаметром первого повива ~ 10 мм выполнен в [17, 18]. Было установлено, как отклонение внутреннего диаметра повива или шага наложения ВТСП-лент в повиве от оптимизированных значений может изменить распределение тока. На рис. 4 показаны относительные изменения тока, рассчитанные для 10 случаев, когда радиус повива был незначительно изменен от оптимизированного значения на толщину ВТСП-ленты

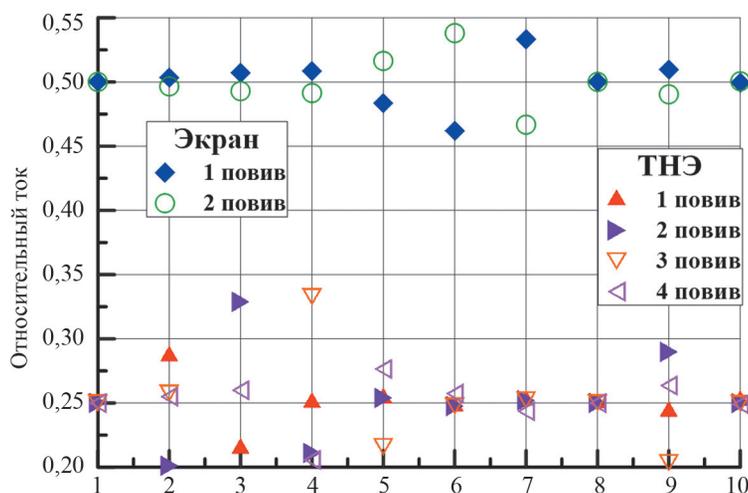


Рис. 4. Относительные токи в повивах при различных ошибках изготовления диаметра повивов. По оси *x*: 1 – нет ошибок; 2–7 – диаметр одного из повивов увеличивается на толщину ленты (2 – первый повив и т. д., 6 и 7 – внутренний и внешний повивы экрана); 8 – диаметр первого и второго повивов увеличен на толщину ленты; 9 – диаметр третьего и четвертого повивов увеличен на толщину ленты; 10 – все диаметры повивов увеличены на толщину ленты

Fig. 4. Cost of manufacturing imprecision in diameters. 1 – optimized diameter of all layers; 2–7 – diameter of each layer is increased by the thickness of the tape (2 – first layer, 3 – second layer, etc., 6 and 7 – inner and outer layers of the shield correspondingly); 8 – diameters of first and second layers are increased by the thickness of the tape; 9 – diameters of third and fourth layers are increased by the thickness of the tape; 10 – diameters of all layers in the core are increased by the thickness of the tape

(0,105 мм). На рис. 5 показаны относительные изменения тока, рассчитанные для 10 случаев, когда шаг наложения ВТСП-лент был изменен на 2 мм от оптимизированного значения шага.

Видно, что неточность изготовления по диаметру оказывает гораздо большее влияние на распределение тока, чем по шагу скрутки. Также нужно сказать, что неточность диаметра экрана не влияет на распределение тока в жиле. Из рис. 4 и 5 можно узнать, в каком повиве ошибка в диаметре или шаге скрутки больше влияет на окончательное распределение тока.

Эти результаты демонстрируют, что помимо точных методов расчета и оптимизации должны быть реализованы специальные меры для обеспечения точного изготовления повивов при производстве ВТСП-кабеля 2G.

Изготовление ВТСП-кабелей. Стандартный однофазный коаксиальный ВТСП-кабель состоит из следующих частей (рис. 6,а):

центральный несущий элемент (формер) из стальных или медных проволок, который может иметь трубку для потока криогенного газа и немного меди для защиты жилы кабеля в аварийных режимах работы, также играет роль основного силового элемента при установке (затягивании) кабеля в криостат;

несколько повивов ВТСП-лент жилы, каждому из которых необходимо обеспечить точный внутренний диаметр и шаг скрутки, рассчитанные при оптимизации;

изоляционный слой необходимой толщины;

сверхпроводящий экран, который также может иметь несколько повивов;

наружный защитный медный слой, выполняющий роль электрического шунта в аварийных режимах работы ВТСП-кабеля.

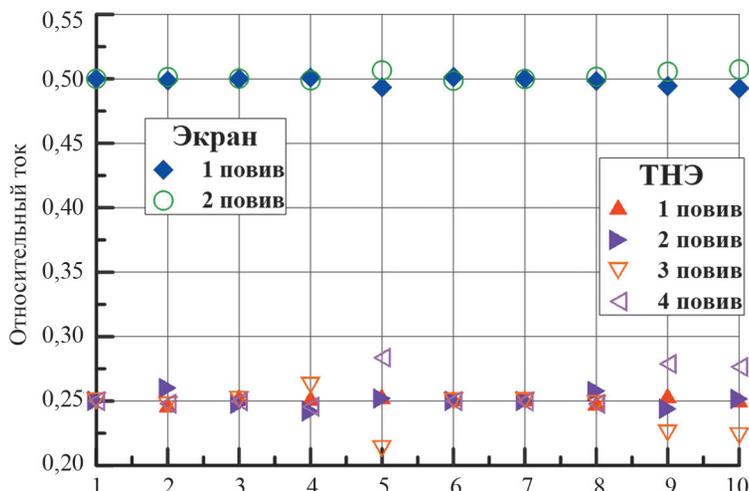


Рис. 5. Относительные токи в повивах при различных ошибках изготовления шага наложения ВТСП-лент в повиве. По оси x: 1 – нет ошибок; 2–7 – шаг наложения ВТСП-лент одного из повивов увеличивается на 2 мм; 8 – шаг наложения ВТСП-лент в первом и втором повивах увеличен на 2 мм; 9 – шаг наложения ВТСП-лент в третьем и четвертом повивах увеличен на 2 мм; 10 – шаг наложения ВТСП-лент во всех повивах увеличен на 2 мм

Fig. 5. Cost of manufacturing imprecision in twist pitch. 1 – optimized twist pitch in all layers; 2–7 – twist pitch of one of each layer is increased by 2 mm (2 – first layer, 3 – second layer, etc., 6 and 7 inner and outer layers of the shield correspondingly); 8 – first- and second- layers twist pitches are increased by 2 mm; 9 – third- and fourth- layers twist pitches are increased by 2 mm; 10 – twist pitches of all layers of the core only are increased by 2 mm



Рис. 6. Общий вид силовых ВТСП-кабелей: а – стандартный коаксиальный кабель с экраном [16]; б – триаксиальный кабель с тремя коаксиальными фазами [15]

Fig. 6. General view of HTS power cables: а – single phase of a standard coaxial cable with a shield [16]; б – a triaxial cable with three coaxial phases [15]

В случае триаксиального кабеля каждая фаза, разделенная несколькими слоями изоляции, размещается коаксиально (рис. 6,б). Внешний экран не требуется, поскольку фазы триаксиального кабеля должны быть сбалансированы и не должны создавать внешнего магнитного поля.

Примеры процесса производства кабеля показаны на рис. 7,а и б. Чтобы обеспечить необходимый диаметр

для внутреннего повива кабеля, формер был изолирован крепированной кабельной бумагой (рис. 7,а). Затем необходимое количество ВТСП-лент было размещено в повиве, как показано на рис. 7,б. После укладки каждый повив также был изолирован несколькими слоями крепированной кабельной бумаги, чтобы точно обеспечить необходимый внутренний диаметр для следующего повива кабеля.

Как было упомянуто выше, важно соблюдать точный внутренний диаметр и шаг скрутки лент для каждого повива компактного кабеля. Несмотря на предпринятые усилия по обеспечению требуемого внутреннего диаметра повивов, имеется небольшая погрешность изготовления. Чтобы обеспечить правильное распределение тока в многоповивных кабелях в процессе производства после изготовления формера, а затем повивов и выравнивания внешней поверхности измерялся их фактический внешний диаметр (который является внутренним для следующего повива). Затем уточнялся требуемый шаг скрутки следующего повива, для чего проводилась новая оптимизация с учетом измеренных значений шага скрутки и диаметра изготовленных повивов. Такой подход позволил получить равномерное распределение тока между повивами компактных кабелей. Также важно иметь достаточно жесткий каркас и изоляцию, которые при прокладке кабеля не изменяют свой диаметр.

Испытание ВТСП-кабелей. Стандартная разработанная программа испытаний кабелей в Институте ВНИИКП включает следующие основные этапы:

испытание на постоянном токе для определения критических токов в каждом повиве или фазе;

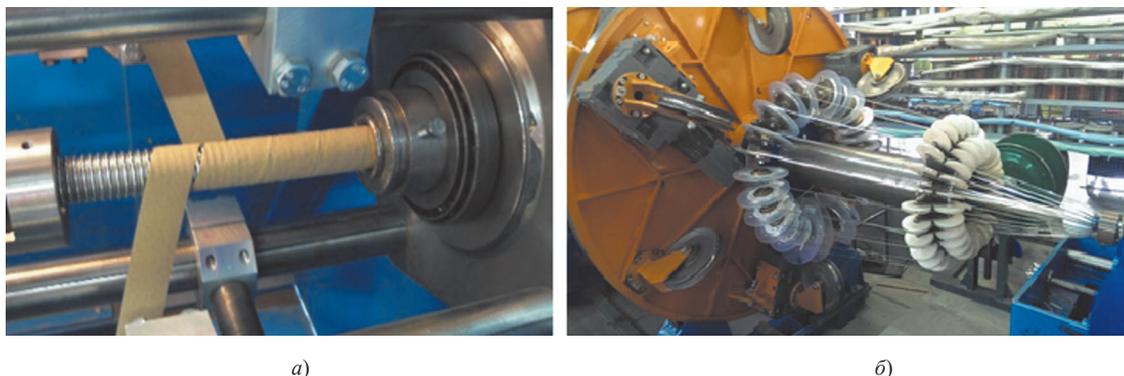


Рис. 7. Пример процесса производства триаксиального ВТСП-кабеля: *а* – подготовка поверхности для внутреннего повива триаксиального кабеля (см. рис. 6); *б* – укладка ВТСП-лент на кабелеукладчик

Fig. 7. Example of a triaxial HTS cable production process: *a* – preparation of a former for the inner layer of a triaxial cable (see Fig. 6); *b* – placing of HTS tapes to a cable layer

испытание на переменном токе для определения распределения тока между повивами;

измерение потерь на переменном токе.

Стенд для тестирования моделей ВТСП-кабелей показан на рис. 8. Методы испытаний подробно описаны в [17–23]. Критические токи определялись путем измерения вольт-амперных характеристик (критерий 1 мкВ/см). Распределение тока между повивами определялось по сигналам катушек Роговского, установленных на повивах. Измерение потерь на переменном токе проводилось электрическим методом, при этом напряжение V и ток I измерялись с высоким разрешением. По определению, потери $P(t)$ в однофазном проводе с переменным током $I(t)$ и напряжением $V(t)$ описываются как

$$P(t) = \int_0^t V(t)I(t)dt. \quad (12)$$

Использование системы сбора данных с высоким разрешением, показанной на рис. 8, для измерений $V(t)$ и $I(t)$ позволило выполнить точное цифровое интегрирование произведений напряжений на токи и получить достоверные данные о потерях на переменном токе [21].

Примеры разработки ВТСП-кабелей 2G. В качестве примеров рассмотрена разработка и приведены результаты экспериментального исследования двух модельных ВТСП-кабелей малого диаметра, изготовленных из ВТСП-лент 2G: 1) однофазного коаксиального кабеля с четырьмя повивами в жиле и двумя повивами в экране; 2) многоповивного триаксиального кабеля.

Однофазный коаксиальный кабель с четырьмя повивами в жиле и двумя повивами в экране. При разработке кабеля использовались 2G ВТСП-ленты производства компании *SuperOx* [24] с общей толщиной лент $\sim 0,105$ мм. Для уменьшения полигональности повивов жилы использовались ВТСП-ленты шириной 3 мм. Средний критический ток этих лент в собственном поле при 77,4 К составляет ~ 80 А. В качестве экрана использовались 2G ВТСП-ленты шириной 4 мм. Их средний критический ток в собственном поле при 77,4 К составляет ~ 120 А.

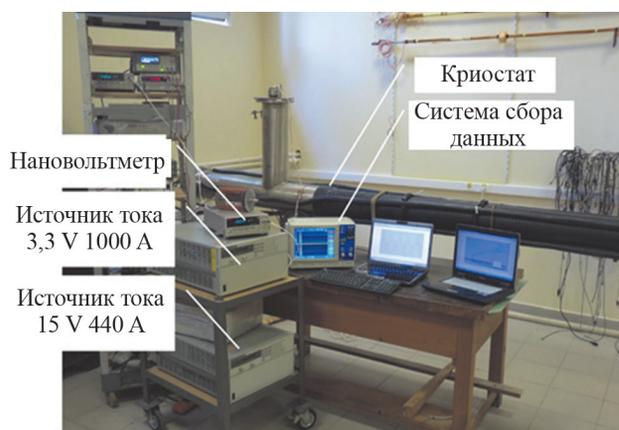


Рис. 8. Общий вид установки для испытаний кабелей в ВНИИКП. Испытательный стенд включает в себя: гибкий криостат длиной 5 м; источники питания постоянного тока до 4–6,5 кА; систему сбора данных (DAS) с возможностью измерения до 20000 образцов за циклы 50 Гц, обеспечивающую высокоточные цифровые измерения; усилители; расходомеры; неиндуктивные шунты, и т.д.

Fig. 8. General view of the facility for testing the cables in Russian Scientific R&D Cable Institute. The test facility includes: 5 m flexible cryostat; DC power supplies up to 4–6.5 kA; Data Acquisition System (DAS) with up to 20000 samples per 50 Hz cycles providing high accuracy digital measurements; amplifiers; flow meters; non-inductive shunts, etc.

Результаты оптимизации. Оптимизация была проведена с использованием модели на основе эквивалентной электрической схемы. Результаты оптимизации сравнивались с расчетами по 3D МКЭ-модели. На рис. 9 приведено сравнение отношения тока в каждом повиве к общему току в кабеле, рассчитанных 3D МКЭ-моделью (справа) и моделью на основе эквивалентной электрической схемы (слева). Видно хорошее совпадение расчетов обоими методами, что позволяет использовать для оптимизации модель на основе эквивалентной электрической схемы. Затем был проведен анализ чувствительности распределения тока к неточности изготовления, что позволило определить, как изменение диаметра повива или шага скрутки ВТСП-лент влияет на распределение тока.

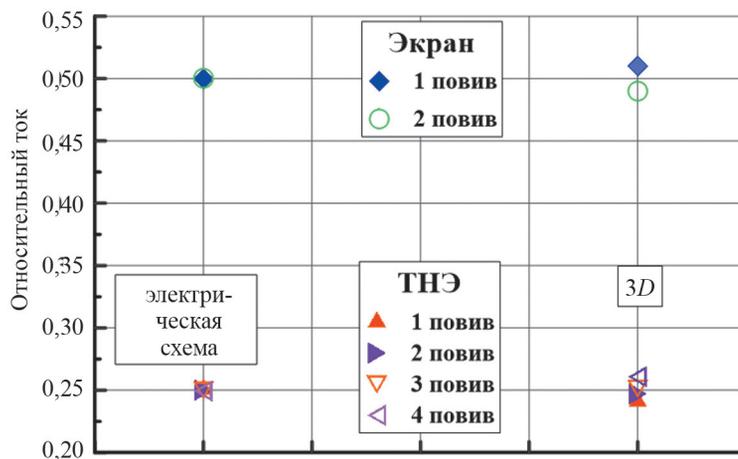


Рис. 9. Результаты оптимизации. Сравнение расчетов методом 3D МКЭ и методом электрических цепей
 Fig. 9. Results of optimization. Comparison of calculations by the 3D FEM method and by the electrical circuit method

Оптимизированные параметры кабеля сведены в табл. 1. Знак в третьей колонке указывает направление укладки лент в повиве. Для обеспечения минимальных электрических потерь в кабеле, зазоры между лентами в повивах кабеля должны быть как можно меньше [17, 18]. Чтобы достичь этого, ко второму и третьему повиву ТНЭ были добавлены по две ленты, а одна лента была добавлена к внешнему повиву экрана.

Магнитное поле в кабеле, рассчитанное 3D МКЭ-моделью, показано в качестве примера на рис. 10. Суммарный ток в ТНЭ кабеля составляет 2000 А.

Результаты испытаний. Критические токи I_c определялись по критерию 1 мкВ/см для каждого повива при температуре 77,4 К. В ТНЭ были получены следующие значения I_c : первый повив – 729 А; второй повив – 891 А; третий повив – 895 А; четвертый повив – 735 А, всего в ТНЭ – 3250 А, что соответствует ожидаемому ~ 3200 А, а в экране: внутренний повив – 1560 А; внешний повив – 1660, всего 3220 А, что также очень близко к ожидаемому ~ 3240 А.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом кабеле нет ухудшения критического тока в ВТСП-лентах из-за механической деформации в процессе изготовления (скручивания лент при их наложении на малый диаметр в повивах).

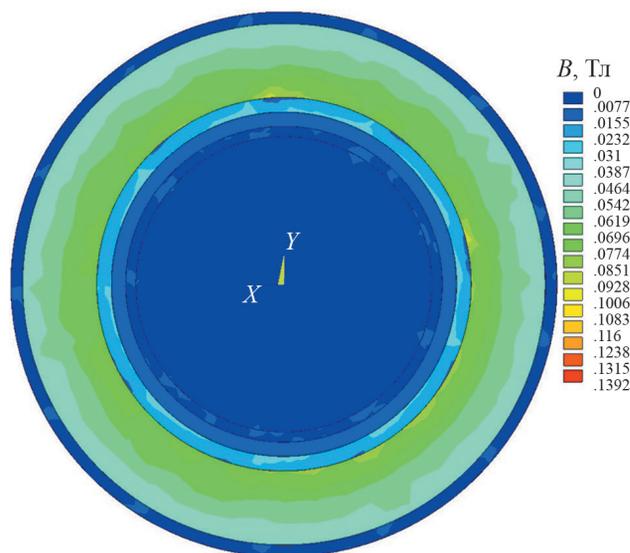


Рис. 10. Магнитное поле в кабеле, рассчитанное 3D МКЭ-моделью, суммарный ток в кабеле 2000 А

Fig. 10. Calculated magnetic field distribution at the 2000 A total current in the cable

Таблица 1

Параметры изготовленного макетного кабеля
 Parameters of the breadboard cable

Номер повива	Внутренний диаметр повива, мм	Шаг наложения лент, мм	Ширина ленты, мм	Количество лент	Зазор между лентами, мм
1	10,32	-56,2	3	9	0,15
2	11,03	-193,6	3	11	0,12
3	12,03	94,3	3	11	0,21
4	13,06	40,7	3	9	0,32
5	18,25	349,4	4	13	0,36
6	19,06	-317,4	4	14	0,22

Значения относительного тока (ток в повиве к общему току), полученные в результате измерения, показаны на рис. 11 [17, 18]. Можно видеть, что в результате многократной оптимизации и использованной технологии производства удалось добиться практически равномерного распределения тока между повивами кабеля. Равномерность токов в жиле кабеля меньше 10%, а в экране – меньше 5%. Небольшое отклонение от однородности, скорее всего, связано с влиянием токовводов.

На рис. 12 показаны потери мощности в жиле и экране кабеля в пересчете на одну ленту, измеренные электрическим методом. Для сравнения, измеренные потери показаны в экране 2G ВТСП-кабеля, изготовленного и испытанного нами ранее [16]. Потери в экране практически такие же, как в первом компактном кабеле, описанном в [16], в то время как потери в жиле в

этом кабеле меньше. В любом случае, потери на переменном токе в 2G ВТСП-кабелях значительно меньше, чем, например, в 1G кабелях.

Многоповивный триаксиальный кабель. Для изготовления кабеля была использована 2G ВТСП-лента производства компании *SuperOx* [24] с общей толщиной $\sim 0,105$ мм, шириной 4 мм. Критический ток этих лент в собственном поле при температуре 77,4 К составляет ~ 130 –150 А.

Результаты оптимизации. Первоначально оптимизация была выполнена с использованием эквивалентной электрической схемы кабеля. Затем было проведено сравнение результатов оптимизации с расчетами 3D МКЭ-моделью. Центральный несущий элемент состоит из медных проволок, так как только он в данном ВТСП-кабеле выполняет функцию электрического шунта в аварийных режимах работы. В этом кабе-

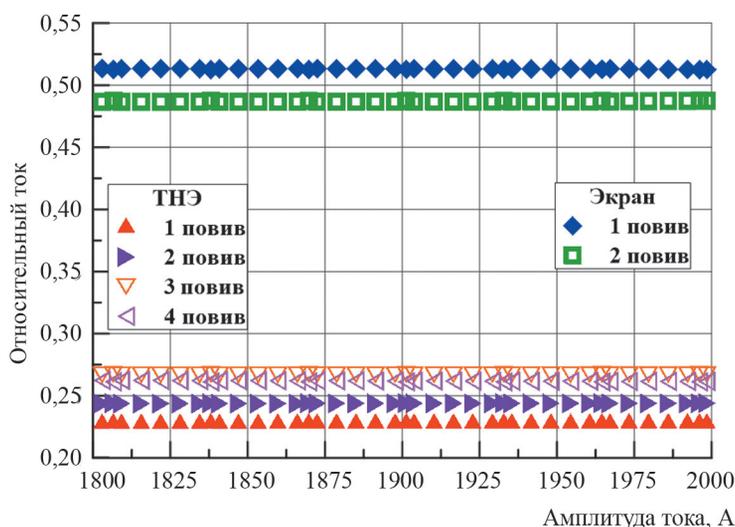


Рис. 11. Измеренный относительный ток в каждом повиве жилы и экране ВТСП-кабеля в зависимости от амплитуды тока

Fig. 11. Measured relative current distribution in layers of the cable core and the shield of the HTS cable versus amplitude of the total current

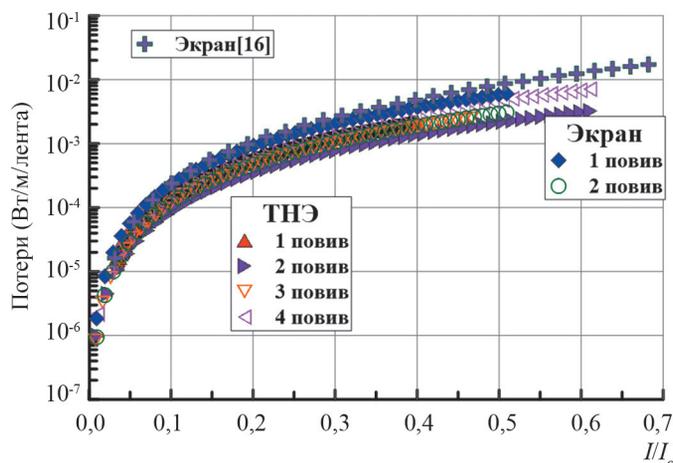


Рис. 12. Сравнение потерь на переменном токе на ленту в зависимости от относительного тока в повивах однофазного компактного кабеля и потерь в экране компактного кабеля, изготовленного и испытанного ранее в ВНИИКП [16]

Fig. 12. Comparison of AC losses per tape versus relative current in layers of the single-phase compact model cable and AC losses per tape in the shield of compact cables produced and tested in the Russian Cable Institute earlier [16]

ле формер покрывается полиимидной лентой для его изоляции, а также для выравнивания поверхности. Оптимизированные параметры кабеля сведены в табл. 2. Знак в третьей колонке указывает направление укладки лент. Чтобы обеспечить минимальные потери на переменном токе, необходимо иметь минимально возможные зазоры между лентами в повивах кабеля.

В качестве примера на рис. 13 показаны магнитные поля в кабеле, рассчитанные МКЭ-моделью для двух моментов времени (0,005 и 0,01 с). Как видно, магнитное поле практически не проникает за токонесущий элемент триаксиального кабеля.

Результаты испытаний. Критические токи I_c были определены путём измерения вольт-амперной характеристики для каждого повива по критерию 1 мкВ/см при температуре 77,4 К. Были получены следующие значения I_c : первый повив – 1969 А; второй повив – 2070 А, всего в фазе А – 4039 А; третий повив – 2192 А; четвертый повив – 2011 А, всего в фазе В – 4203 А; пятый повив – 2003 А, шестой повив – 2016, всего в фазе С – 4019 А. Полученные значения критических токов в повивах близки к ожидаемым. Отсюда следует, что

в процессе изготовления образца кабеля (скручивания лент при их наложении в повивах) не произошло снижения критического тока в ВТСП-лентах вследствие механической деформации.

В качестве примера на рис. 14 [25, 26] показаны результаты измерения токов в повивах фаз образца кабеля при частоте 50 Гц. Максимальные токи в повивах фаз практически совпадают, однако имеется небольшой сдвиг между токами повивов каждой фазы (около 5–8 градусов относительно оптимальных значений).

Измерения были проведены при разных частотах. На рис. 15 показана зависимость отношения максимального тока во внешнем повиве фазы к току во внутреннем повиве фазы от частоты. Как видно, в результате оптимизации конструкции и технологии изготовления удалось добиться практически равномерного распределения расчетного тока между повивами фаз кабеля. Небольшие отклонения от однородности в максимальных токах и сдвиги фаз, скорее всего, связаны с влиянием токоподводов.

Выводы. Представлены последние разработки Института ВНИИКП в области моделирования,

Таблица 2

Параметры изготовленного макетного кабеля
Parameters of the breadboard cable

Фаза	Номер повива	Внутренний диаметр повива, мм	Шаг наложения лент, мм	Ширина ленты, мм	Количество лент	Зазор между лентами, мм
А	1	19,30	324	4	14	0,26
	2	19,80	-171	4	14	0,19
В	3	21,40	200	4	15	0,26
	4	21,80	-161	4	15	0,22
С	5	23,35	191	4	16	0,30
	6	23,75	-146	4	16	0,20

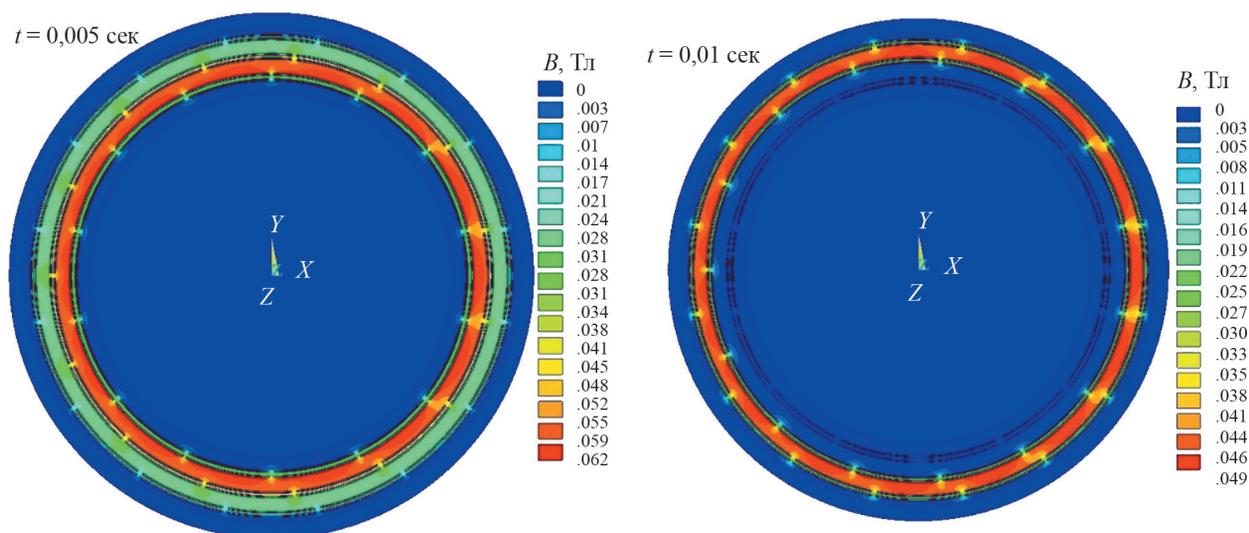


Рис. 13. Магнитное поле в кабеле, рассчитанное МКЭ-моделью для двух моментов времени (0,005 с и 0,01 с)

Fig. 13. The calculated magnetic fields in the cable calculated by the FEM model for two times: left - 0.005 s., right - 0.01 s

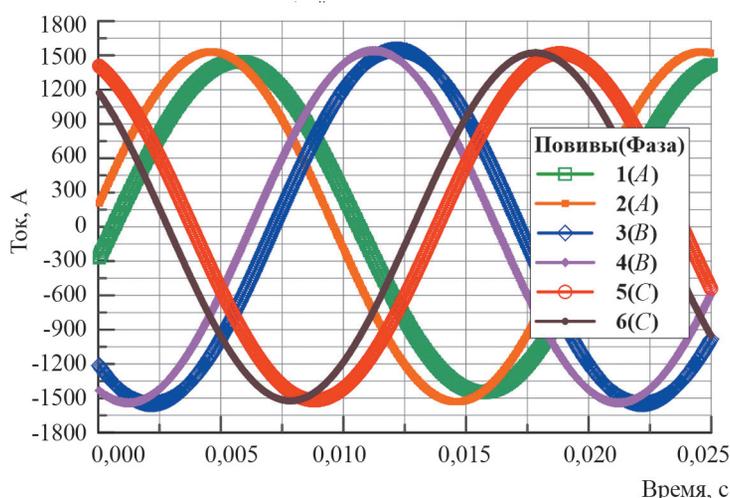


Рис. 14. Измеренная зависимость тока в фазах прототипа кабеля от времени при частоте 50 Гц

Fig. 14. The measured currents in the phases of the triaxial cable at 50 Hz frequency

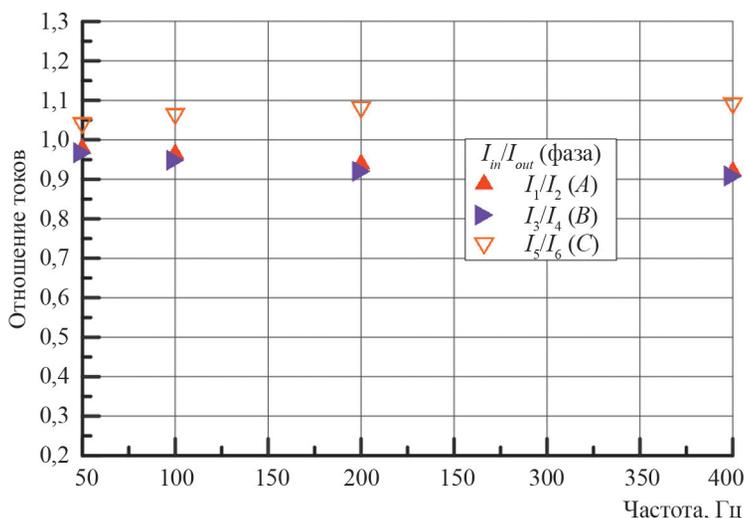


Рис. 15. Отношение максимального тока во внешнем повиве фазы к току во внутреннем повиве фазы в зависимости от частоты

Fig. 15. The ratio of the maximum current in the inner layer of each phase to the current in the outer layer depending on the frequency

производства и тестирования компактных силовых ВТСП-кабелей 2G для переменного тока. Разработаны модели для оптимизации конструкции ВТСП-кабелей 2G на основе эквивалентной электрической схемы и на основе метода конечных элементов. Модели оптимизации позволили рассчитать геометрические параметры кабеля, обеспечивающие равномерное распределение тока между повивами.

Создан экспериментальный стенд и разработаны методики для проведения всесторонних испытаний ВТСП-кабелей. Для компактных кабелей была доработана технология производства, позволившая обеспечить жесткие требования к точности изготовления. Для этого в процессе производства после изготовления каждого повива учитывались их реальные параметры и с помощью новой оптимизации проводилась корректировка геометрических параметров последующих повивов кабеля.

Разработанные модели для оптимизации конструкции ВТСП-кабелей были экспериментально проверены и подтверждены испытаниями компактных силовых ВТСП-кабелей 2G. Были изготовлены две конструкции ВТСП-кабелей 2G: однофазный коаксиальный кабель, имеющий четырехповивную жилу и двухповивный экран, а также трехфазный триаксиальный кабель с двумя повивами в каждой фазе. Триаксиальный кабель, изготовленный из ВТСП-лент 2G, является первым известным триаксиальным кабелем с двумя повивами на фазу. Результаты экспериментов хорошо совпадают с расчетами и полностью подтвердили адекватность используемых методов оптимизации и производства.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №17-29-10014 и №17-29-10011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Doukas D.I.** Superconducting Transmission Systems: Review, Classification and Technology Readiness Assessment. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, p. 5401205.
2. **Malozemoff A.P., Yuan J., Rey C.M.** High-temperature superconducting (HTS) AC cables for power grid applications. – Superconductors in the power grid: Materials and Applications. ed. by C. Rey, 2015, No. 65, pp. 133–188, doi:10.1016/B978-1-78242-029-3.00005-4.
3. **Lee C., Son H., Won Y., et al.** Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea. – Superconductor Science and Technology, 2020, vol. 33, No. 4, p. 044006.
4. **Sytnikov V.E., Dolgosheev P.I., Svalov G.G., Polyakova N.V., Belij D.I.** Influence of the multilayer HTS-cable conductor design on the current distribution. – Physica C, 1998, vol. 310, pp. 387–391.
5. **Sytnikov V.E., Svalov G.G., Peshkov I.B.** Studies of current distribution in large-scale superconducting cables influenced by internal and external magnetic fields. – Cryogenics, 1989, vol. 29, No. 10, pp. 971–974.
6. **Hamajima T., Alamgir A., Harada N., Tsuda M., Ono M., Takano H.** Analysis of current distribution in a large superconductor. – Cryogenics, 2000, vol. 40, No. 11, pp. 729–736.
7. **Daumling M.** A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables. – Cryogenics, 1999, vol. 39, pp. 759–767.
8. **Zhu J., Bao X., Guo L., Xia Z., Qiu M., Yuan W.** Optimal design of current sharing in transmission conductors of a 110 kV/3 kA cold dielectric superconducting cable consisted of YBCO tapes. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2013, vol. 23, No. 3, p. 5402505.
9. **Sytnikov V.E., Polyakova N.V., Vysotsky V.S.** Current distribution and voltage-current relation in multi-layered LTS and HTS power cable core: A review. – Physica C, 2004, vol. 401, pp. 47–56.
10. **Sjostrom M., Dutoit B., Duron J.** Equivalent Circuit Model for Superconductors. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2003, vol. 13, No. 2, 1890–1893.
11. **Kruger Olsen S., Tricholt C., et al.** Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 1999, vol. 9, No. 2, pp. 833–836.
12. **Официальный сайт ANSYS Multiphysics** [Электрон. ресурс] <http://www.ansys.com/> (дата обращения 21.03.2021).
13. **Demko J.A., Sauer I., James D.R., et al.** Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 2047–2050.
14. **Stemmler M., Merschel F., Noe M., Hobl A.** AmpaCity-Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply. – Proc. IEEE PES T&D Conf. Exp., 2014, pp. 1–5.
15. **Fetisov S., Zubko V., Zanev S., Nosov A., Ryabov S., Vysotsky V.** Study of the first Russian triaxial HTS cables prototypes. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, p. 5400305.
16. **Fetisov S., Zubko V., Zanev S., Nosov A., Vysotsky V.** Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, p. 5400905.
17. **Fetisov S., Zubko V., Zanev S., Vysotsky V.** Cold test and numerical analysis of the compact 2G HTS power cable. – IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng., 2019, vol. 502, p. 012179.
18. **Высоцкий В.В., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Фетисов С.С.** Оптимизация конструкции компактных силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводящих проводников. – Кабели и провода, 2018, № 6, с. 32–37.
19. **Volkov E.P., Vysotsky V.S., Firsov V.P.** First Russian long length HTS power cable. – Physica C, 2012, vol. 482, pp. 87–91.
20. **Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Rychagov A.V., et al.** 30 m HTS Power Cable Development and Witness Sample Test. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1702–1705.
21. **Vysotsky V., Nosov A., Fetisov S. et al.** AC Loss and Other Researches with 5 m HTS Model Cables. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1001–1004.
22. **Zubko V., Nosov A., Polyakova N., Fetisov S., Vysotsky V.** Hysteresis Loss in Power Cables Made of 2G HTS Wires with NiW Alloy Substrate. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 988–990.
23. **Fetisov S., Nosov A., Zubko V., et al.** First Model Power Cables Made of Russian 2G HTS Wires and their Test Results. – J. Phys: Conf. Ser., 2014, vol. 507, No. 3, p. 03206305.
24. **Официальный сайт SuperOx** [Электрон. ресурс] <http://www.superox.ru/> (дата обращения 01.04.2021).
25. **Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Фетисов С.С., Носов А.А.** Триахсальный кабель на основе высокотемпературных сверхпроводников с двумя повивами на фазу. – Кабели и провода, 2020, № 3, с. 3–10.
26. **Fetisov S., Zubko V., Zanev S., Nosov A., Vysotsky V.** Optimization and Cold Test of a Triaxial 2G HTS Power Cable with High Current Capacity. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 5, p. 5400104.

[27.03.2021]



Авторы: Фетисов Сергей Сергеевич – кандидат техн. наук, зам. зав. отделения по науке, зав. лабораторией ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности».



Зубко Василий Васильевич – доктор техн. наук, главный научный сотрудник ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности».

Basic Principles of Design of 2G HTS Power Cables

FETISOV Sergey S. (*JSC "All-Russian Scientific, Design, Development and Research Institute of Technology for Cable Industry", Moscow, Russia*) – Deputy Head of the Department, Chief of Laboratory, Cand. Sci. (Eng.).

ZUBKO Vasily V. (*JSC "All-Russian Scientific, Design, Development and Research Institute of Technology for Cable Industry", Moscow, Russia*) – Chief Researcher, Dr. Sci. (Eng.).

Power cables made of high temperature superconductors (HTS) are considered to be the most advanced application field of superconductivity in the electric power industry. Cables made of the first-generation (1G) HTS wires have already been put in use in electrical grids in a number of countries around the world. Active efforts are presently being taken to develop power cables made of second-generation HTS wires (2G or Coated Conductors). The basic principles for designing coaxial HTS power cables have been known since 1990s. New methods for developing compact 2G HTS AC power cables are considered. Methods to optimize the design of these cable aimed to ensure uniform distribution of the current among the cable layers and the technology for manufacturing such cables are presented. The test program and a setup for testing HTS cable models are described. Some problems pertinent to the development of small-diameter 2G HTS power cables are discussed. Examples of the development, manufacture, and test results of two basic designs of compact coaxial HTS cables, namely, a single-phase (a cable core and a shield) and a three-phase (so-called triaxial with three coaxial phases) versions, are given.

Key words: *second-generation HTS cable, triaxial HTS cable, development of HTS cables, HTS cable modeling*

REFERENCES

1. **Doukas D.I.** Superconducting Transmission Systems: Review, Classification and Technology Readiness Assessment. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, p. 5401205.
2. **Malozemoff A.P., Yuan J., Rey C.M.** High-temperature superconducting (HTS) AC cables for power grid applications. – Superconductors in the power grid: Materials and Applications. ed. by C. Rey, 2015, No. 65, pp. 133–188, doi:10.1016/B978-1-78242-029-3.00005-4.
3. **Lee C., Son H., Won Y., et al.** Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea. – Superconductor Science and Technology, 2020, vol. 33, No. 4, p. 044006.
4. **Sytnikov V.E., Dolgosheev P.I., Svalov G.G., Polyakova N.V., Belij D.I.** Influence of the multilayer HTS-cable conductor design on the current distribution. – Physica C, 1998, vol. 310, pp. 387–391.
5. **Sytnikov V.E., Svalov G.G., Peshkov I.B.** Studies of current distribution in large-scale superconducting cables influenced by internal and external magnetic fields. – Cryogenics, 1989, vol. 29, No. 10, pp. 971–974.
6. **Hamajima T., Alamgir A., Harada N., Tsuda M., Ono M., Takano H.** Analysis of current distribution in a large superconductor. – Cryogenics, 2000, vol. 40, No. 11, pp. 729–736.
7. **Daumling M.** A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables. – Cryogenics, 1999, vol. 39, pp. 759–767.
8. **Zhu J., Bao X., Guo L., Xia Z., Qiu M., Yuan W.** Optimal design of current sharing in transmission conductors of a 110 kV/3 kA cold dielectric superconducting cable consisted of YBCO tapes. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2013, vol. 23, No. 3, p. 5402505.
9. **Sytnikov V.E., Polyakova N.V., Vysotsky V.S.** Current distribution and voltage-current relation in multi-layered LTS and HTS power cable core: A review. – Physica C, 2004, vol. 401, pp. 47–56.
10. **Sjostrom M., Dutoit B., Duron J.** Equivalent Circuit Model for Superconductors. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2003, vol.13, No. 2, 1890–1893.
11. **Kruger Olsen S., Tricholt C., et al.** Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 1999, vol. 9, No. 2, pp. 833–836.
12. **ANSYS Multiphysics** [Electron Resource] <http://www.ansys.com/> (Date of appeal 21.03.2021).
13. **Demko J.A., Sauers I., James D.R., et al.** Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2007, vol. 17, No. 2, pp. 2047–2050.
14. **Stemme M., Merschel F., Noe M., Hobl A.** AmpaCity-Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply. – Proc. IEEE PES T&D Conf. Exp., 2014, pp. 1–5.
15. **Fetisov S., Zubko V., Zanezin S., Nosov A., Ryabov S., Vysotsky V.** Study of the first Russian triaxial HTS cables prototypes. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, p. 5400305.
16. **Fetisov S., Zubko V., Zanezin S., Nosov A., Vysotsky V.** Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, p. 5400905.
17. **Fetisov S., Zubko V., Zanezin S., Vysotsky V.** Cold test and numerical analysis of the compact 2G HTS power cable. – IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng., 2019, vol. 502, p. 012179.
18. **Vysotsky V.V., Zanezin S.Yu., Zubko V.V., Fetisov S.S.** *Kabeli i provoda – in Russ. (Cables and wires)*, 2018, No. 6, pp. 32–37.
19. **Volkov E.P., Vysotsky V.S., Firsov V.P.** First Russian long length HTS power cable. – Physica C, 2012, vol. 482, pp. 87–91.
20. **Sytnikov V.E., Vysotsky V.S., Rychagov A.V., et al.** 30 m HTS Power Cable Development and Witness Sample Test. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2009, vol.19, No. 3, pp.1702–1705.
21. **Vysotsky V., Nosov A., Fetisov S. et al.** AC Loss and Other Researches with 5 m HTS Model Cables. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1001–1004.
22. **Zubko V., Nosov A., Polyakova N., Fetisov S., Vysotsky V.** Hysteresis Loss in Power Cables Made of 2G HTS Wires with NiW Alloy Substrate. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 988–990.
23. **Fetisov S., Nosov A., Zubko V., et al.** First Model Power Cables Made of Russian 2G HTS Wires and their Test Results. – J. Phys: Conf. Ser., 2014, vol. 507, No. 3, p. 03206305.
24. **SuperOx** [Electron Resource] <http://www.superox.ru/> (Date of appeal 01.04.2021).
25. **Vysotsky V.V., Zanezin S.Yu., Zubko V.V., Fetisov S.S., Nosov A.A.** *Kabeli i provoda – in Russ. (Cables and wires)*, 2020, № 3, c. 3–10.
26. **Fetisov S., Zubko V., Zanezin S., Nosov A., Vysotsky V.** Optimization and Cold Test of a Triaxial 2G HTS Power Cable with High Current Capacity. – IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 5, p. 5400104.

[27.03.2021]