

ТРИАКСИАЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ С ДВУМЯ ПОВИВАМИ НА ФАЗУ

V.S. Vysotsky, Dr. Sc. (Engineering), Director of research area, Division Manager of JSC VNIIEK;

S.Yu. Zanegin, Senior Engineer of JSC VNIIEK;

V.V. Zubko, Dr. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist of JSC VNIIEK;

S.S. Fetisov, Cand. Sc. (Engineering), Deputy Division Manager, Head of Laboratory of JSC VNIIEK;

A.A. Nosov, Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist of JSC VNIIEK

В.С. Высоцкий, д-р техн. наук, директор научного направления, заведующий отделением ОАО «ВНИИКП»;

С.Ю. Занегин, старший инженер ОАО «ВНИИКП»;

В.В. Зубко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;

С.С. Фетисов, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением по науке, заведующей лабораторией ОАО «ВНИИКП»;

А.А. Носов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»

Аннотация. Трехфазные триаксиальные высокотемпературные сверхпроводящие силовые кабели обладают такими преимуществами, как компактность, высокая общая плотность тока и уменьшенное количество сверхпроводящих лент по сравнению с обычными сверхпроводящими кабелями, каждая фаза которых состоит из отдельного коаксиального кабеля. Ранее во ВНИИКП были разработаны и испытаны прототипы сверхпроводящих триаксиальных кабелей с одним повивом на фазу из высокотемпературных сверхпроводящих лент как первого, так и второго поколения. Для увеличения мощности триаксиального высокотемпературного сверхпроводящего кабеля, необходима многоповивная конструкция каждой фазы. Разработан и испытан прототип триаксиального кабеля с двумя повивами высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения в каждой фазе. Оптимальные параметры кабеля были определены с помощью численного моделирования. Проведены испытания кабеля на постоянном токе и переменном токе при частотах от ~ 50 до ~ 400 Гц. В настоящей статье представлены параметры кабеля и результаты его первых испытаний.

Ключевые слова: ВТСП-кабель; триаксиальный ВТСП-кабель.

Abstract. Three-phase triaxial high-temperature superconducting power cables have the advantages of compactness, high overall current density and reduced number of superconducting tapes, compared to conventional superconducting cables, where each phase consists of a separate coaxial cable. Earlier, the prototypes of superconducting triaxial cables were developed and tested at VNIIEK, with one layer of high-temperature superconducting tapes of either the first or the second generation in each phase. To increase the power of a triaxial high-temperature superconducting cable, a multi-layer design of each phase is proposed. We developed and tested the prototype triaxial cable with two layers of second-generation high-temperature superconducting tapes in each phase. Optimized cable parameters were determined using numerical simulation. Cable tests at alternating current were carried out at frequencies from ~ 50 to ~ 400 Hz. The paper presents the parameters of the cable and the results of its first tests.

Key words: HTSC-cable; triaxial HTSC-cable.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые кабели на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в настоящее время являются наиболее продвинутым применением сверхпроводимости в электроэнергетике и рассматриваются как предкоммерческий продукт [1, 2]. Несколько силовых ВТСП-кабелей уже установлены в энергосетях и успешно испытаны [2, 3]. В обычной конструкции ВТСП-кабеля каждая фаза представляет собой коаксиальный кабель со сверхпроводящей жилой и сверхпроводящим экраном, разделёнными изоляцией. Фазы могут быть размещены как в одном, так и в отдельных криостатах [3].

В последние годы большой интерес вызывают силовые ВТСП-кабели так называемой триаксиальной конструкции. Особенность конструкции триаксиальных кабелей заключается в концентрическом расположении трёх фаз вокруг общего центрального стержня (формера), окружённых медным экраном [3–6]. В настоящее время во многих странах разработаны полно-размерные триаксиальные кабели. Например, кабель длиной 200 м, разработанный компанией Ultera, установлен на подстанции Бискби в штате Огайо, (США) [4], а кабель среднего напряжения длиной 1 км мощностью 40 МВА со сверхпроводящим ограничителем тока работает внутри городской застройки в г. Эссен (Германия) [5]. В дополнение к уже реализованным проектам коаксиальных ВТСП-кабелей в настоящее время в Корею осуществляется проект триаксиального кабеля на 23 кВ длиной 3 км [6]. Во всех рассмотренных коаксиальных кабелях каждая фаза имеет один повив.

Триаксиальная конструкция позволяет в два раза сократить расход ВТСП-ленты, достичь рекордной общей плотности тока, а также уменьшить охлаждаемую поверхность, что снижает требования к системе охлаждения. Преимуществом этого варианта кабеля по сравнению с коаксиальным является ещё и то, что на все три фазы требуется один общий экран и все фазы находятся в едином криостате. В триаксиальном кабеле токи фаз должны быть сбалансированы, при этом ток в экране будет равен нулю. Экран в таком кабеле может быть медным, что позволяет значительно уменьшить расход ВТСП-лент. Медный экран в триаксиальном кабеле используется не только в случае разбалансировки фаз, но и для стабилизации в случае перехода ВТСП-лент в нормальное состояние.

К недостаткам такой конструкции следует отнести ограничение напряжения кабелей до ~30 кВ из-за невозможности бесконечно наращивать толщину изоляции. Таким образом, триаксиальные кабели – это устройства для низкого или среднего напряжения. Наращивать мощность, передаваемую триаксиальным

кабелем с одноповивными фазами, можно только за счёт повышения тока в фазах путем увеличения количества лент в каждой фазе. Однако для этого придётся увеличивать диаметр кабеля, что не всегда приемлемо на практике. При сохранении диаметра кабеля следует использовать многоповивную конструкцию в каждой фазе.

Ранее во ВНИИ кабельной промышленности (ВНИИКП) были разработаны и испытаны прототипы триаксиальных кабелей, изготовленных из ВТСП-лент как первого, так и второго поколений, в которых каждая фаза имела один повив [7]. Оба кабеля показали высокую эффективность такого решения для передачи переменного тока, при этом кабель на основе ВТСП второго поколения демонстрировал существенно меньшие потери на переменном токе.

Помимо передачи электроэнергии в мегаполисах триаксиальные кабели могут быть использованы и в транспортных системах, например, для судов и самолётов, где неприемлемо повышение напряжения для увеличения мощности. В этом случае снижение габаритов кабеля при сохранении заданной передаваемой мощности является особенно важным. Исследования, направленные на максимально возможное снижение массы и габаритов как коаксиальных [8, 9], так и триаксиальных ВТСП-кабелей также проводятся во ВНИИКП. Как уже упоминалось выше, для увеличения мощности триаксиального ВТСП-кабеля, необходимо увеличивать ток в каждой фазе, то есть количество ВТСП-лент в повиве. При этом для сохранения компактности необходимо создать многоповивную структуру в каждой фазе кабеля.

В этой статье представлено исследование триаксиального ВТСП-кабеля для случая, когда каждая фаза состоит из двух повивов. Основной целью работы являлась разработка и обоснование методов оптимизации, а также создание технологии производства, обеспечивающей требования по однородному распределению тока между повивами фаз кабеля и получению низких потерь на переменном токе в триаксиальном кабеле с двухповивными фазами. Была разработана оптимизированная конструкция компактного кабеля на основе ВТСП-лент второго поколения, состоящего из двух повивов в каждой фазе. Оптимизация распределения тока между повивами фаз кабеля проведена при помощи двух численных моделей. Первая модель использует электрическую схему кабеля с источниками тока. Вторая, подробная трехмерная (3D) модель, использует метод конечных элементов (ANSYS Emag). Был изготовлен образец кабеля длиной 4 м и проведены его электрические испытания. В результате было продемонстрировано возможность получения однородного распределения тока в триаксиальном кабеле, каждая фаза которого состоит из двух повивов.



МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПОВИВНОГО ТРИАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Так же, как и для коаксиального кабеля [7, 8], для оптимизации распределения токов между повивами триаксиального кабеля разработаны численные модели на основе эквивалентной электрической схемы и трехмерная 3D-модель, которая использует метод конечных элементов (МКЭ).

В первом случае на основе электрической схемы кабеля для расчёта токов и напряжений в фазах кабеля использовалась математическая модель, в которой учтено, что повивы в ВТСП-кабеле электрически изолированы:

$$\frac{\partial U_k(t, z)}{\partial z} = R_k(I_k)I_k(t) + \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{dI_{k,i}}{dt} (M_{k,i}) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial I_k(t, z)}{\partial z} = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{dU_{k,i}}{dt} (C_{k,i}) \right\}$$

где $\kappa = 1 \dots N_p$ – число повивов всех фаз;
 M_k и M_{ki} – коэффициенты собственной и взаимной индуктивности повивов;
 I_k, U_k и dI_k/dt – ток, напряжение и скорость изменения тока в каждом повиве;
 $R(I_k)$ – сопротивление повива, зависящее от тока;
 C_{ki} – ёмкость между повивами.
 Коэффициент собственной индуктивности повива в фазе определяется выражением:

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

где r_k – внутренний радиус каждого повива;
 r_s – внутренний радиус экрана;
 μ_0 – магнитная проницаемость;
 L_k – шаг скрутки лент в каждом повиве фазы.
 Коэффициенты взаимной индуктивности повивов определяются выражением:

$$M_{k,i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_k} + a_i a_k \mu_0 \pi \cdot r_i^2 \cdot \left(\frac{1}{L_i} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_k} \right), \quad (3)$$

в котром a_k и a_j определяют направление наложения ВТСП-лент в повиве каждой фазы.

Для расчёта разбалансирования токов в фазах вдоль длины кабеля необходимо знать емкость между фазами, которая определяется выражением:

$$C_{i,k} = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \left(\frac{r_k}{r_i} \right)}, \quad (4)$$

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

Трёхмерная 3D-модель (3D МКЭ), которая использует метод конечных элементов, реализована с помощью ANSYS Emag [10]. Эта модель даёт возможность подробно моделировать любую конструкцию ВТСП-кабеля. Трёхмерная модель позволяет рассмотреть спиральную структуру токонесущего элементов (ТНЭ) и экрана кабеля. Авторами также разработана упрощенная 3D модель для тестирования подробной 3D МКЭ модели, в которой повивы фаз кабеля моделируются системой тонких концентрических слоев (цилиндров), где все сверхпроводящие слои изолированы. В сверхпроводящих тонкослойных цилиндрах направление и шаг наложения ВТСП-лент в повиве моделируются анизотропией электрической проводимости. Поскольку 3D модель содержит большое число конечных элементов, и вычисления занимают много времени, то в этой работе применяется 3D модель для проверки параметров, оптимизированных с использованием модели, основанной на эквивалентной электрической схеме кабеля.

На рис. 1 показан фрагмент 3D модели и обозначены фазы разработанного кабеля.

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

$$I_A = \sum_{i=1}^N I_{A,i}, \quad I_{A,i} = I_{A,i+1} = \frac{I_A}{N}, \quad (5)$$

где N – число повивов в фазе.

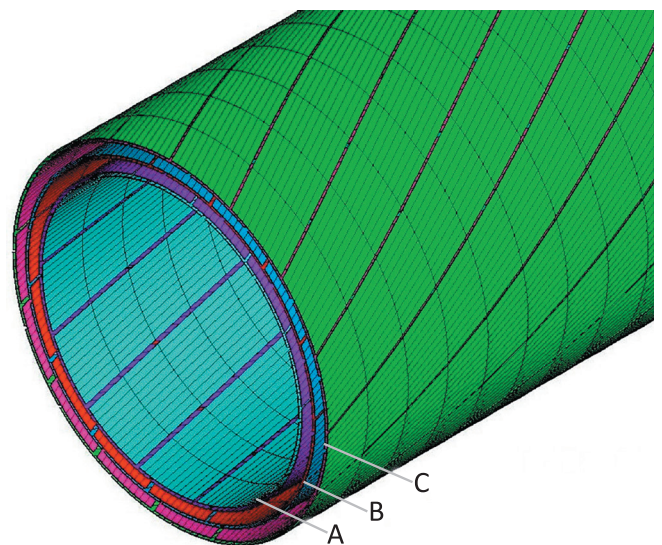


Рис. 1. Элементы ВТСП-лент конечной части в 3D-модели трехфазного кабеля, каждая фаза которого состоит из двух повивов. Буквами А,В,С обозначены фазы разработанного кабеля

В разработанных численных моделях задача определения равномерного распределения тока по повивам каждой фазы 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 токов в повивах фазы;

$X = [r_1, \beta_1, a_1, r_2, \beta_2, a_2, \dots, r_N, \beta_N, a_N]$ – вектор управляющих переменных;

r_i – внутренний радиус повива;

a_p – направления наложения ВТСП лент в повиве;

β_i – угол наложения ВТСП-лент в повиве.

Ограничением на значения r_p, a_p, β_i является условие сохранения сверхпроводящих свойств ВТСП-лент.

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

$$\begin{aligned} I_B &= \beta^2 I_A, & I_C &= \beta I_A, \\ V_B &= \beta^2 V_A, & V_C &= \beta V_A, & \beta &= \exp(j2\pi/3), \end{aligned} \quad (7)$$

где j – мнимая единица.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МНОГОПОВИВНОГО ТРИАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Для изготовления кабеля была использована ВТСП-лента второго поколения производства компании SuperOx /11/ с общей толщиной $\sim 0,105$ мм, шириной 4 мм. Критический ток этих лент в собственном поле при температуре 77,4 К составляет $\sim 130-150$ А.

Прежде всего, авторами выполнена оптимизация с использованием эквивалентной электрической схемы кабеля, а затем результаты оптимизации срав-

нивали с расчетами 3D МКЭ моделью. Центральный несущий элемент (формер) состоящий из медных проволок, здесь наряду с обеспечением пространства для укладки ВТСП-лент в повивы играет роль основного силового элемента при установке (затягивании) кабеля в криостат, а также выполняет функцию электрического шунта в аварийных режимах работы ВТСП-кабеля. Формер покрывается полиимидной лентой для его изоляции, а также для выравнивания поверхности. Окончательные оптимизированные параметры кабеля перечислены в таблице. Знак в колонке «Шаг наложения» указывает направление скрутки лент. Чтобы обеспечить минимальные потери на переменном токе, необходимо иметь минимально возможные зазоры между лентами в повивах кабеля.

На рис. 2 приведён пример расчёта токов в повивах фаз кабеля с оптимальными параметрами. Суммарный максимальный ток в каждой фазе кабеля составляет 3000 А (в повиве 1500 А).

В качестве примера на рис. 3 показаны магнитные поля в кабеле, рассчитанные МКЭ моделью для двух моментов времени, представленных на рис. 2 (0,005 сек и 0,01 сек). Видно, что магнитное поле практически не проникает за токонесущий элемент триаксиального кабеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МНОГОПОВИВНОГО ТРИАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Испытательный стенд ВНИИ КП и используемые контрольно-измерительные приборы представлены в наших предыдущих работах [7, 12]. Основными элементами стенда являются: криостат, программируемые источники постоянного тока и переменного тока, бесконтактные датчики тока LEM LT4000, трехфазный источник питания АМТЕК ВРS45, трансформатор трехфазный ТСУ-63, система сбора данных Yokogawa DL-850.

Для проведения испытаний (в том числе, для снятия вольт-амперных характеристик) в процес-

Таблица
Параметры изготовленного макетного кабеля

Фаза	Номер повива	Внутр. диаметр повива, мм	Шаг наложения, мм	Ширина ленты, мм	Количество лент	Зазор между лентами, мм
А	1	19,3	324	4	14	0,26
	2	19,8	- 171	4	14	0,19
В	3	21,4	200	4	15	0,26
	4	21,8	- 161	4	15	0,22
С	5	23,35	191	4	16	0,3
	6	23,75	- 146	4	16	0,2

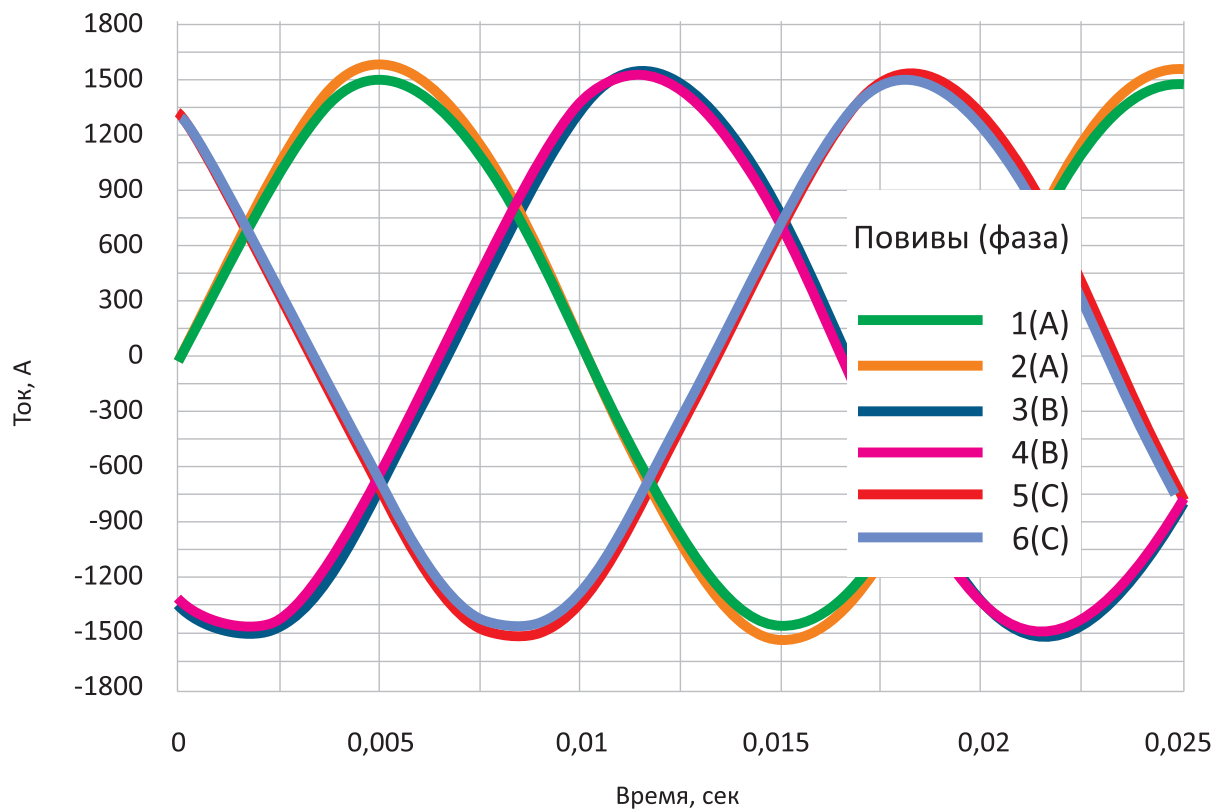
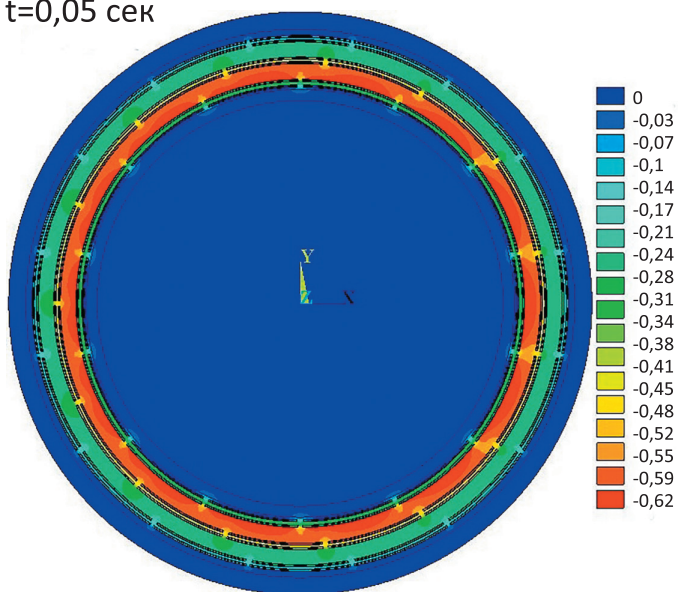


Рис. 2. Расчётная зависимость тока в фазах от времени. Расчёт проведен МКЭ моделью после оптимизации моделью эквивалентной электрической схемы

t=0,05 сек



t=0,01 сек

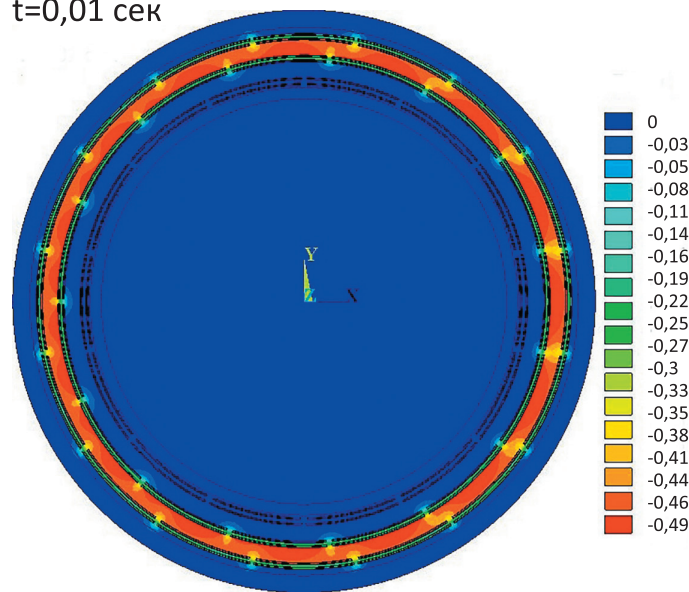


Рис. 3. Магнитное поле в кабеле, рассчитанное МКЭ моделью для двух моментов времени (0,005 сек и 0,01 сек)

се изготовления кабеля на каждой из фаз (каждом повиве) были заложены потенциальные контакты, равноудаленные от концов кабеля на расстояние, достаточное для нивелирования краевых эффектов. Сигналы с потенциальных контактов, а также сигналы с бесконтактных датчиков тока сводились в систему сбора данных. Эксперимент проводился в открытом прямом криостате при температуре кипящего жидкого азота с теплоизолированными стенками.

Стандартная программа испытаний для любой модели ВТСП-кабеля обычно включает:

- испытания на постоянном токе для определения критических токов в каждом повиве;
- испытания на переменном токе для определения распределения тока между повивами в условиях переменного тока на частотах 50-400 Гц.

На рис. 4 показан изготовленный макет триаксиального ВТСП-кабеля перед установкой в криостат, а на рис. 5 представлен элемент испытательной установки - система сбора данных Yokogawa DL-850 и часть кабеля в криостате.

А. ИСПЫТАНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Критические токи (I_c) определяли путём измерения вольтамперной 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 -



Рис. 4. Макет триаксиального ВТСП-кабеля перед установкой в криостат



Рис. 5. Система сбора данных Yokogawa DL-850 и макет кабеля

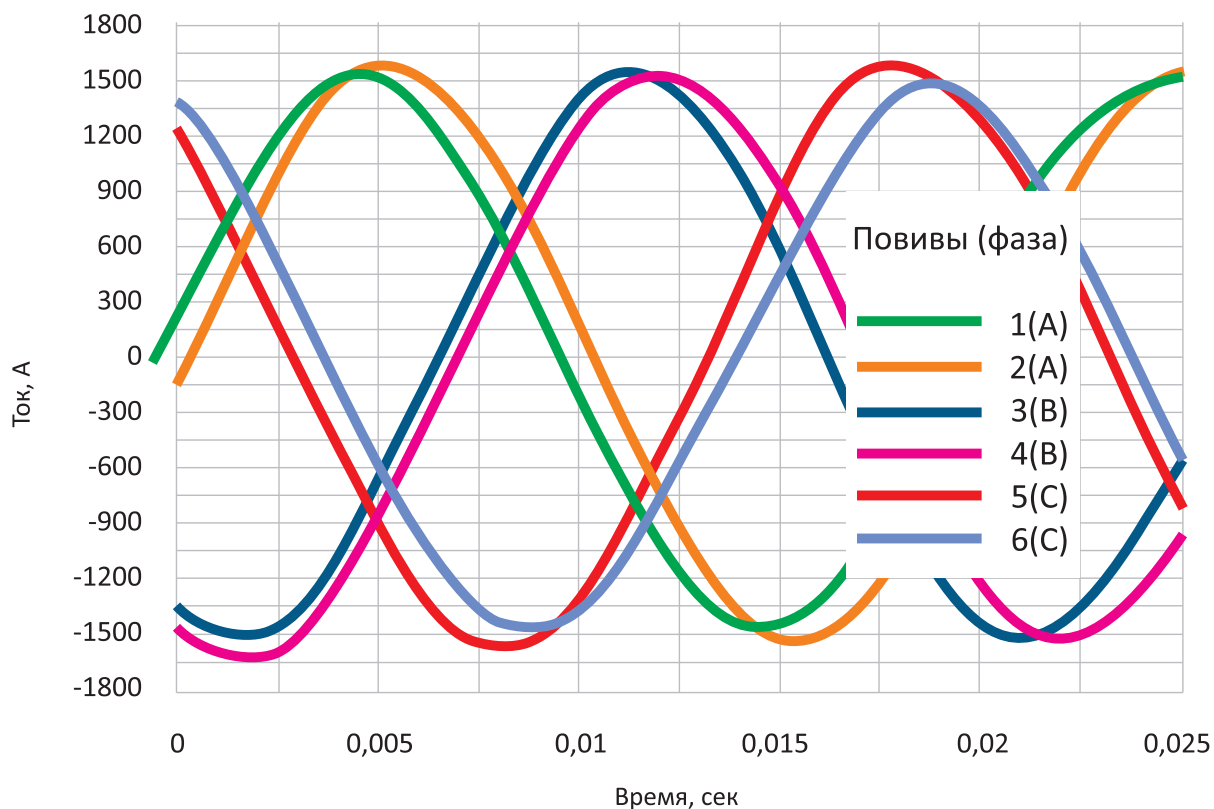


Рис. 6. Измеренная зависимость тока в фазах прототипа кабеля от времени при частоте переменного тока 50 Гц

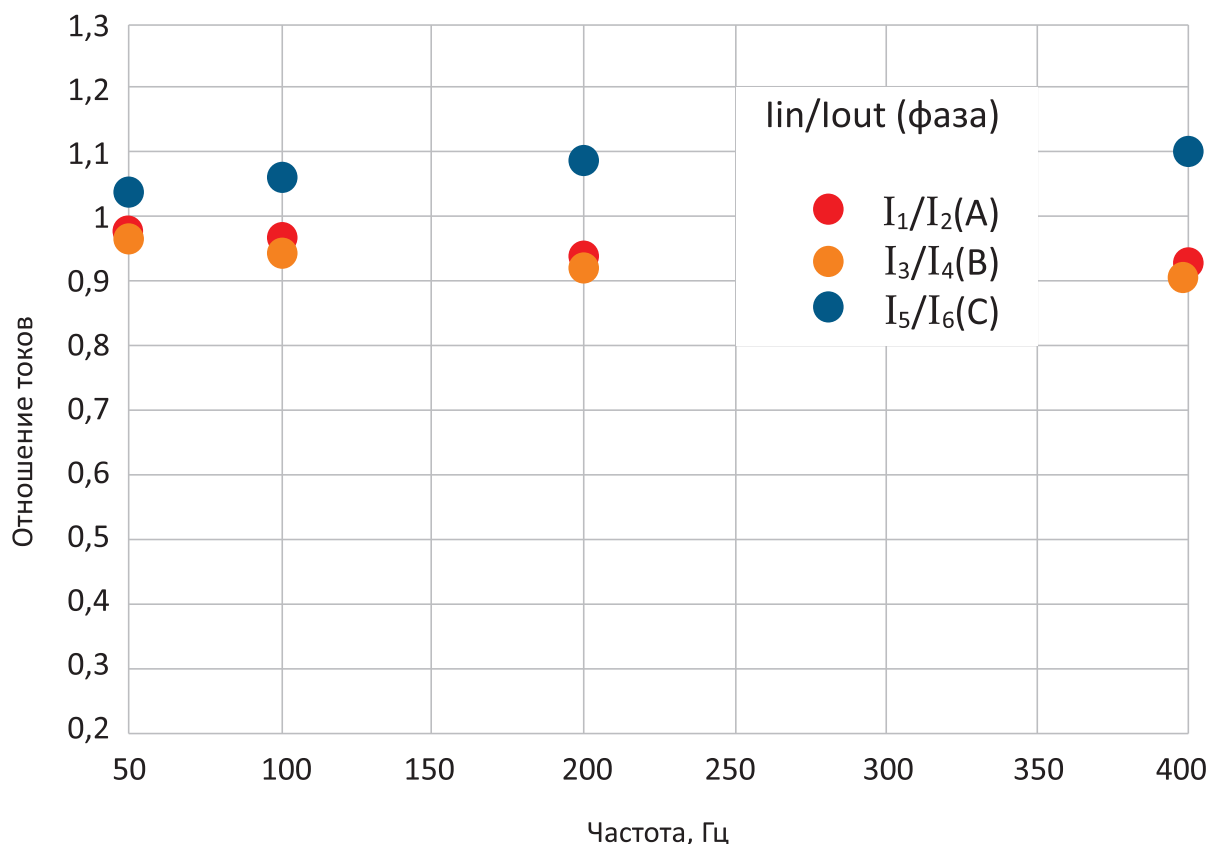


Рис. 7. Отношение максимального тока во внешнем повиве фазы к току во внутреннем повиве фазы в зависимости от частоты

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 прототипа кабеля (скрутки лент при их наложении в повивах) не произошло снижения критического тока в ВТСП-лентах вследствие механической деформации.

Б. ИСПЫТАНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

В качестве примера на рис. 6 показаны результаты измерения токов в повивах фаз прототипа 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. 7 показано отношение максимального тока во внешнем повиве фазы к току во внутреннем повиве фазы в зависимости от частоты. Видно, что в результате оптимизации конструкции и технологии изготовления нам удалось добиться практически расчётного равномерного распределения тока между повивами фаз кабеля. Небольшие отклонения от однородности в максимальных токах ($\leq \pm 10\%$) и сдвиги фаз, скорее всего, связаны с влиянием токоподводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана оптимизированная конструкция и технология изготовления компактного триаксиального кабеля на основе ВТСП-лент второго поколения, содержащего два повива в каждой фазе.

Оптимизация распределения тока между повивами фаз кабеля проведена с помощью двух численных моделей. Первая модель использует электрическую схему кабеля с источниками тока. Вторая, подробная трёхмерная модель, использует метод конечных элементов.

Изготовлен прототип кабеля длиной 4 м и проведены его электрические испытания, как на постоянном, так и на переменном токе. В результате работы продемонстрирована возможность получения однородного распределения тока в триаксиальном кабеле, каждая фаза которого состоит из двух повивов.

При внешнем диаметре ~ 24 мм, это самый компактный триаксиальный силовой ВТСП-кабель с токами до 4 кА в фазе, изготовленный и испытанный на данный момент.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-29-10014.

Список литературы

1. **Chulhyu Lee, Hyukchan Son, Youngjin Won, et al.** Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPSCO in Korea // *Supercond. Sci. Technol.* 33 (2020) 044006.
2. **Dimitrios I. Doukas.** Superconducting Transmission Systems: Review, Classification and Technology Readiness Assessment // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 29, NO. 5, AUGUST 2019, 5401205
3. **Фетисов С.С.** Сверхпроводящие Кабели для Электроэнергетики – Состояние работ в мире и России // *Кабели и провода.* – 2014. – № 3 (346). – С. 26–32.
4. **Demko J.A., Sauers I., James D.R. et al.** Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2007. – Vol. 17, N 2, Part 2, P. 2047-2050.
5. **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. – P. 1–5.
6. **Lee C., Iwakuma M., Lee H.Y., Park M., Choi J., Choi J., Yang H.** Economic Evaluation of 23 kV Tri-Axial HTS Cable Application to Power System // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2019. – Vol. 29, No 5-2. – P. 5402507
7. **Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Nosov A., Ryabov S., Vysotsky V.** Study of the first Russian triaxial HTS cables prototypes // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2017. – Vol. 27, No 4. – P. 5400305.
8. **Высоцкий В., Занегин С., Зубко В., Фетисов С.** Оптимизация конструкции компактных силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводящих проводников // *Кабели и провода.* – 2018. – № 6. – С. 32–37.
9. **Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Nosov A., Vysotsky V.** Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2018. – Vol. 28, No 4. – P. 5400905.
10. **Fetisov S., Nosov A., Zubko V., Bykovsky N., Zanegin S., Vysotsky V., Svalov G., Lee S., Petrykin V., Kalitka V.** First Model Power Cables Made of Russian 2G HTS Wires and their Test Results // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2014. – Vol. 507, No 3. – P. 032063.
11. ANSYS Multiphysics, <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 17.04.2020).
12. Компания СуперОкс. - Текст.: электронный// Официальный сайт. - URL: <https://www.superox.ru/> (дата обращения: 17.04.2020).