

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОПОВИВНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

V.S. Vysotsky, Dr. Sc. (Engineering), Director for Research Area – Division Manager, JSC VNIIEP;

S.Yu. Zanegin, Senior Engineer, JSC VNIIEP;

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

L.V. Potanina, Cand. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist, JSC VNIIEP;

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

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»;

Л.В. Потанина, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;

С.С. Фетисов, канд. техн. наук, зам. заведующего отделением по науке, зав. лабораторией ОАО «ВНИИКП»

Аннотация. Создание высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) системы размагничивания позволяет обеспечить значительную экономию веса по сравнению с обычными системами размагничивания на основе медных катушек. Доминирующие затраты в таких системах – это стоимость ВТСП-материалов. Поскольку кабель в системе размагничивания работает в медленно изменяющемся поле, и не требуется оптимизации для снижения потерь на переменном токе, то для повышения его рабочего тока можно воспользоваться эффектом продольного магнитного поля, в силу которого ток ВТСП-ленты в магнитном поле параллельном току может значительно повышаться. Авторами проведена оптимизация ВТСП-кабелей для обмоток систем размагничивания с учётом эффекта продольного магнитного поля. Показано, что такая оптимизация приводит к дополнительному снижению массы сверхпроводника. Для проверки оценки массы ВТСП-обмоток размагничивания в данной работе представлена изготовленная и испытанная модель системы размагничивания для малых объектов.

Ключевые слова: ВТСП-кабель, размагничивание, продольное магнитное поле.

Abstract. The creation of a high-temperature superconducting (HTSC) demagnetization system allows the significant weight savings compared to conventional demagnetization systems based on copper coils. The dominant costs in HTSC systems are the cost of HTSC materials. Since the cable of the demagnetization system works with a slowly changing field and optimization is not required to reduce losses on alternating current, to increase its operating current, you can use the longitudinal magnetic field effect, due to which the current of the HTSC tape in a magnetic field parallel to the current can significantly increase. We carried out optimization of HTSC cables for system windings taking into account the effect of a longitudinal magnetic field. It is shown that this will lead to an additional decrease in the mass of the superconductor. To check the estimates of the mass of the HTSC demagnetization windings, this paper presents the created and tested model of the demagnetization system for small objects.

Key words: HTSC cable, demagnetization, longitudinal magnetic field.



ВВЕДЕНИЕ

Предварительный анализ систем размагничивания с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) приведён в [1]. Обычно размагничивающие системы – это многотонные обмотки или катушки, образованные медными электрическими кабелями. Для размагничивания требуется создать квазипостоянное магнитное поле с амплитудой порядка нескольких сот гаусс (0,01–0,02 Тл). В усовершенствованных системах размагничивания использование ВТСП-кабелей, охлаждённых до криогенных температур, является естественным, поскольку сверхпроводники способны работать при плотностях тока, значительно выше, чем у традиционных проводников, а также наилучшим образом работают при медленно меняющемся токе. Одной из главных задач при создании эффективной системы размагничивания является повышение рабочего тока используемых сверхпроводящих кабелей с целью снижения массогабаритных характеристик обмоток. Для повышения рабочего тока кабелей можно использовать так называемый «эффект продольного магнитного поля». Известно, что во многих сверхпроводниках как в низкотемпературных проводах, так и в высокотемпературных лентах второго поколения, критический

ток повышается в слабом магнитном поле, параллельном поверхности ленты и транспортному току [2, 3]. Целью настоящей работы является оценка возможности оптимизации ВТСП-кабелей для обмоток систем размагничивания с учётом «эффекта продольного магнитного поля». Кроме того, продемонстрирован изготовленный макет системы размагничивания малых объектов и представлены результаты его первых испытаний.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТСП-КАБЕЛЯ ДЛЯ ОБМОТОК РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Для размагничивания крупных объектов необходимо внутри размагничивающего контура создать магнитное поле величиной около 0,012 Тл (120 Гаусс), достаточно равномерное по длине. В [1] была проанализирована ВТСП-обмотка диаметром 29 м и длиной 210 м, предназначенная для размагничивания крупных объектов. Для удобства изготовления и монтажа обмотка размагничивания состоит из 38 секций. Было показано, что для получения магнитного поля 120 Гаусс в каждой секции рабочий ток должен составлять 58,2 кА, что набирается необходимым числом ампер-витков. При расчёте обмотки в [1], мы опирались на параметры разработанного во ВНИИКП компакт-

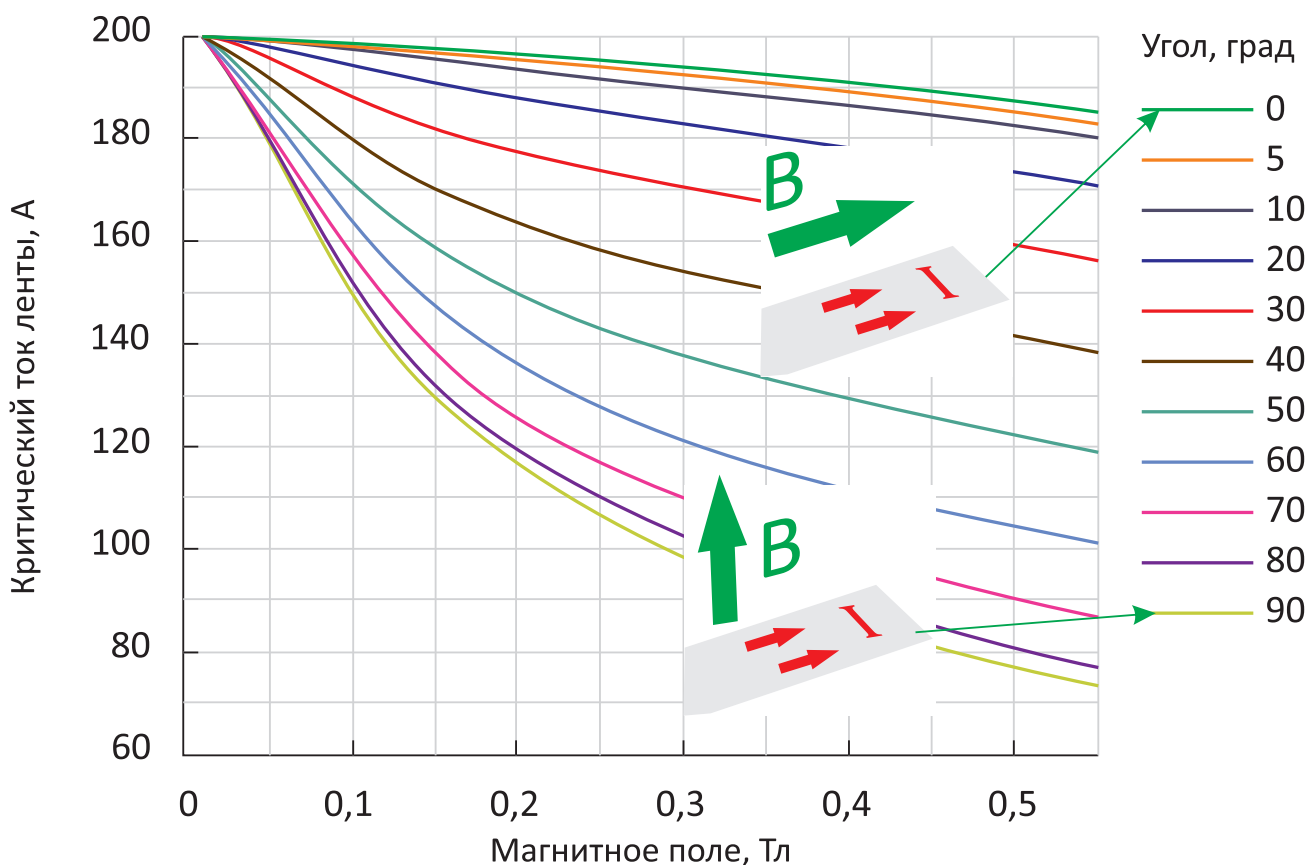


Рис. 1. Зависимость критического тока от величины магнитного поля при разных углах между током в ленте и направлением магнитного поля

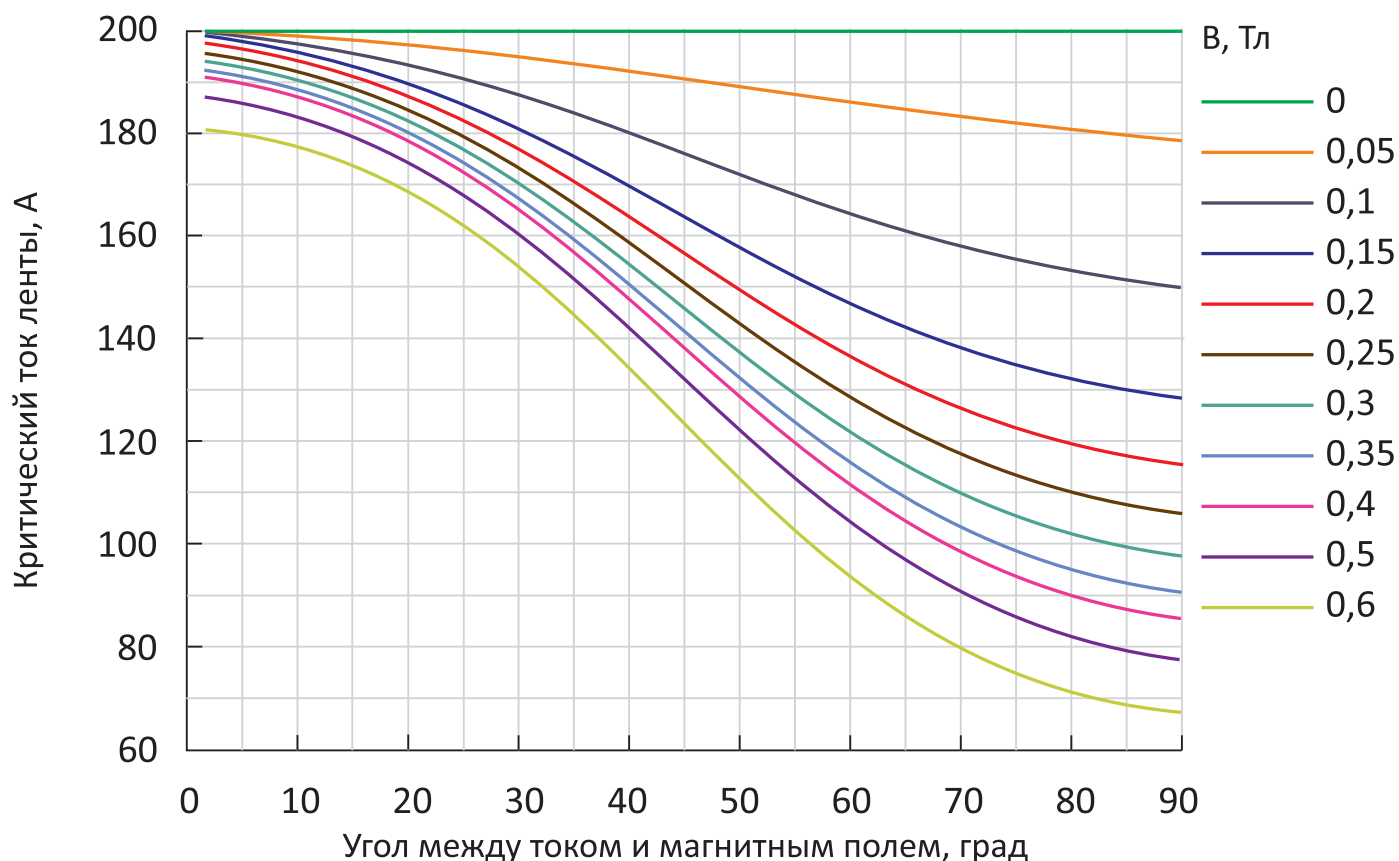


Рис. 2. Зависимость критического тока от угла между током в ленте и направлением магнитного поля при разных величинах магнитного поля

ного ВТСП-кабеля [4], способного нести постоянный ток 6 кА (6 повивов ВТСП-лент), а также переменный ток 3 кА (4-повивный токонесущий элемент и 2-повивный экран). Согласно расчётам, представленным в [1], для каждой секции в обмотке размагничивания достаточно 10 витков компактного 6-повивного кабеля (полное количество ВТСП-лент равно 57).

В силу коаксиальной конструкции ВТСП-кабелей, на ВТСП-лентах кабелей всегда имеется составляющая магнитного поля от других повивов, параллельная току в ленте. Для повышения токонесущей способности ВТСП-кабелей можно учесть тот факт, что критический ток в ленточных сверхпроводниках во внешнем магнитном поле, параллельном току в ленте, заметно выше [2, 3], чем в магнитном поле перпендикулярном току в ленте. Это позволяет уменьшить количество ВТСП-лент в секции и снизить затраты на сверхпроводящие материалы.

Эффект значительного увеличения критического тока в низкотемпературных сверхпроводниках в продольном внешнем магнитном поле был установлен ещё в самом начале использования технических сверхпроводников в 60–70-х годах прошлого века [2]. В наше время этот эффект был обнаружен и в ленточных сверхпроводниках второго поколения [3]. На рис. 1 показана зависимость критического тока от магнит-

ного поля для разных углов между током и магнитным полем [3]. Для нашего анализа данный эффект пересчитан для ВТСП-лент второго поколения с критическим током 200 А в нулевом поле. Во вставках на рис. 1 показана взаимная ориентация поля, тока и поверхности ленты для крайних случаев в нашем анализе. На рис. 2 показана зависимость критического тока от угла между током в ленте и направлением магнитного поля при разных величинах магнитного поля (взаимная ориентация такая же, как на рис. 1).

Проведённые нами расчёты показали, что чем больше количество повивов в ВТСП-кабеле, тем более полно можно использовать данный эффект.

На рис. 3 представлен критический ток ВТСП-кабеля (в котором число повивов N равно 12) в зависимости от угла наложения ВТСП-лент во внешнем повиве. Учтено возможное внешнее магнитное поле параллельное ленте. На рис. 3 также показано сечение кабеля, в котором внутренний радиус первого повива равен 11 мм. Для наглядного представления эффективности использованного подхода на рис. 4 представлено отношение критического тока ВТСП-кабеля при разных углах наложения ВТСП-лент во внешнем повиве к критическому току кабеля с одинаковым углом наложения ВТСП-лент. Видно, что возможное повышение критического тока в оптимизированном

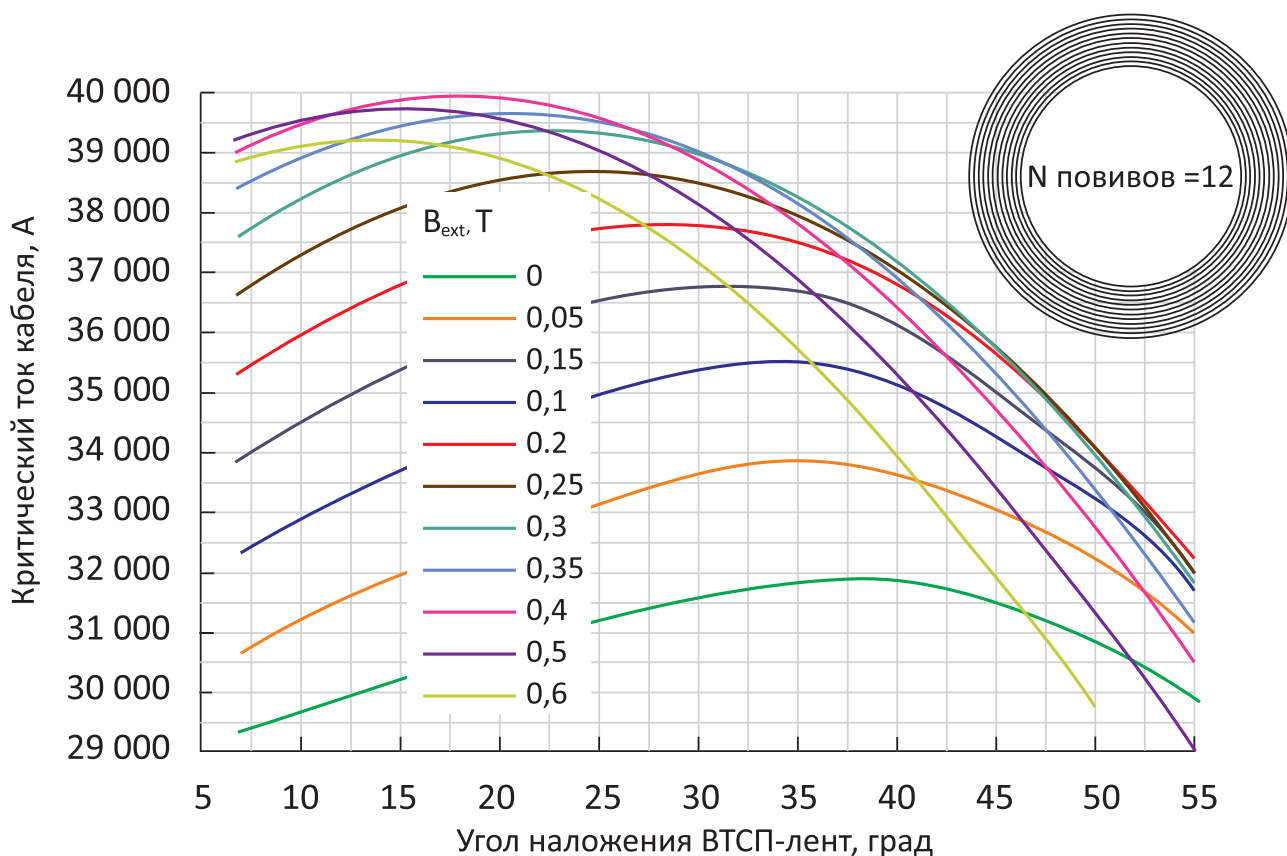


Рис. 3. Критический ток кабеля в зависимости от угла наложения ВТСП-лент во внешнем повиве

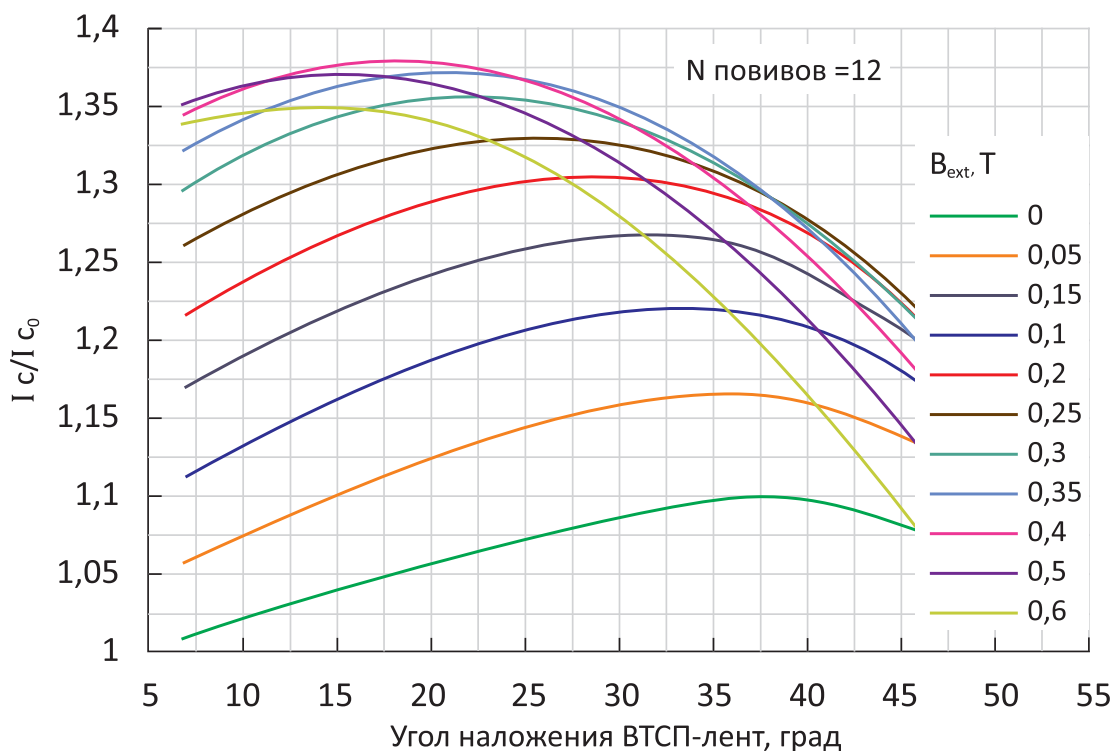


Рис. 4. Отношение критического тока кабеля при разных углах наложения ВТСП-лент во внешнем повиве к критическому току кабеля с одинаковым углом наложения ВТСП-лент

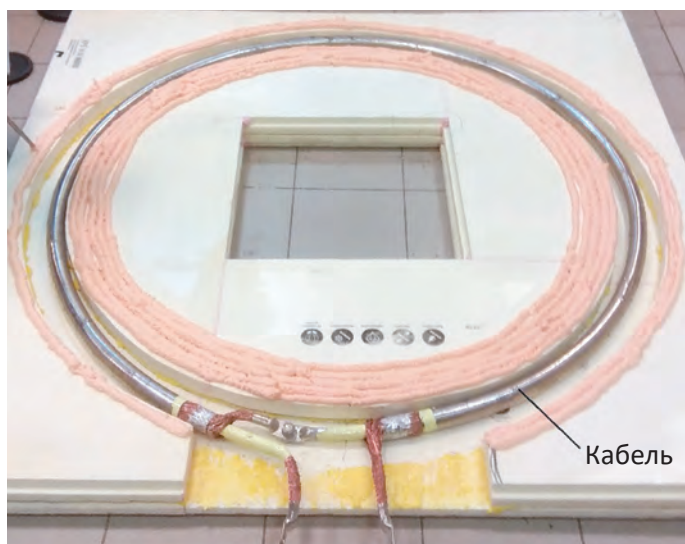


Рис. 5. Процесс укладки кабеля в криостат

кабеле может достигать 37,5 % по сравнению с током неоптимизированного кабеля.

Из рис. 3 следует, что при отсутствии внешнего магнитного поля оптимальный угол наложения ВТСП-лент во внешнем повороте θ_{max} составляет 35 градусов, при этом угол наложения ВТСП-лент во внутреннем повороте θ_0 составляет 5

градусов, а угол наложения ВТСП-лент в i -повиве определяется выражением $\theta_i = i \times (\theta_{max} - \theta_0) / (N_i - 1)$.

В предложенном 12-повивном кабеле полное количество ВТСП-лент составляет 234. Согласно расчётам, достаточно 2 витков такого кабеля для каждой секции в обмотке размагничивания, что уменьшает полную массу ВТСП-кабелей в секции и, следовательно, сокращает затраты на сверхпроводники и криостатирование. В работе [1] показано, что, если использовать разработанный обычный силовой ВТСП-кабель (как, например, из [5]), то это, как минимум, в 50 раз уменьшит вес секции системы размагничивания по сравнению с весом секции, изготовленной из медного кабеля. Использование оптимизированного 12-повивного ВТСП-кабеля позволит ещё в два раза уменьшить массу требуемого кабеля.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Для проверки выводов [1] об эффективности использования ВТСП-кабелей был изготовлен и испытан макет системы размагничивания, состоящий из 6 секций. Диаметр обмотки в секции составляет 1,5 м, расстояние между секциями равно 0,75 м. Для

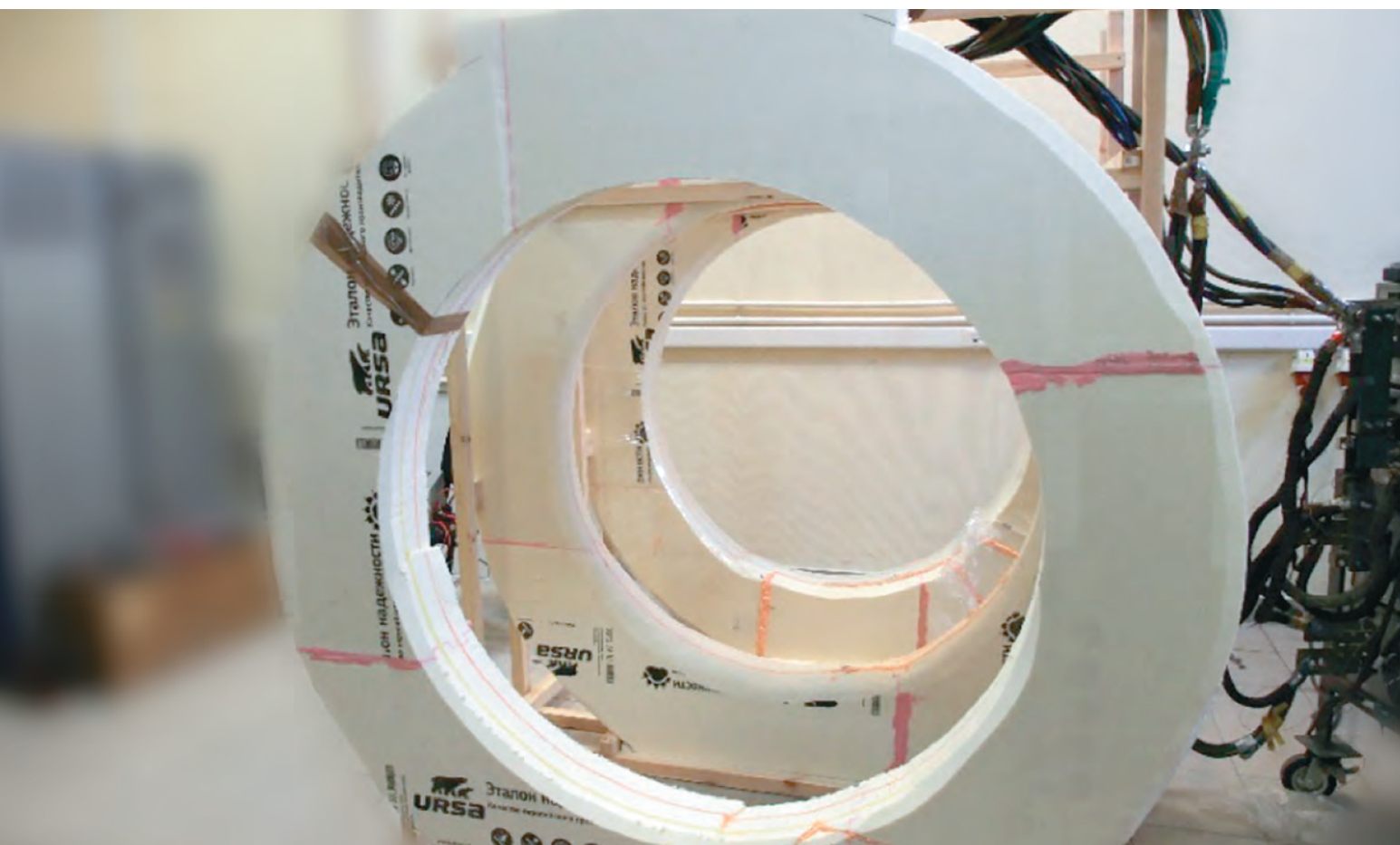


Рис. 6. Секции макета системы размагничивания после их сборки

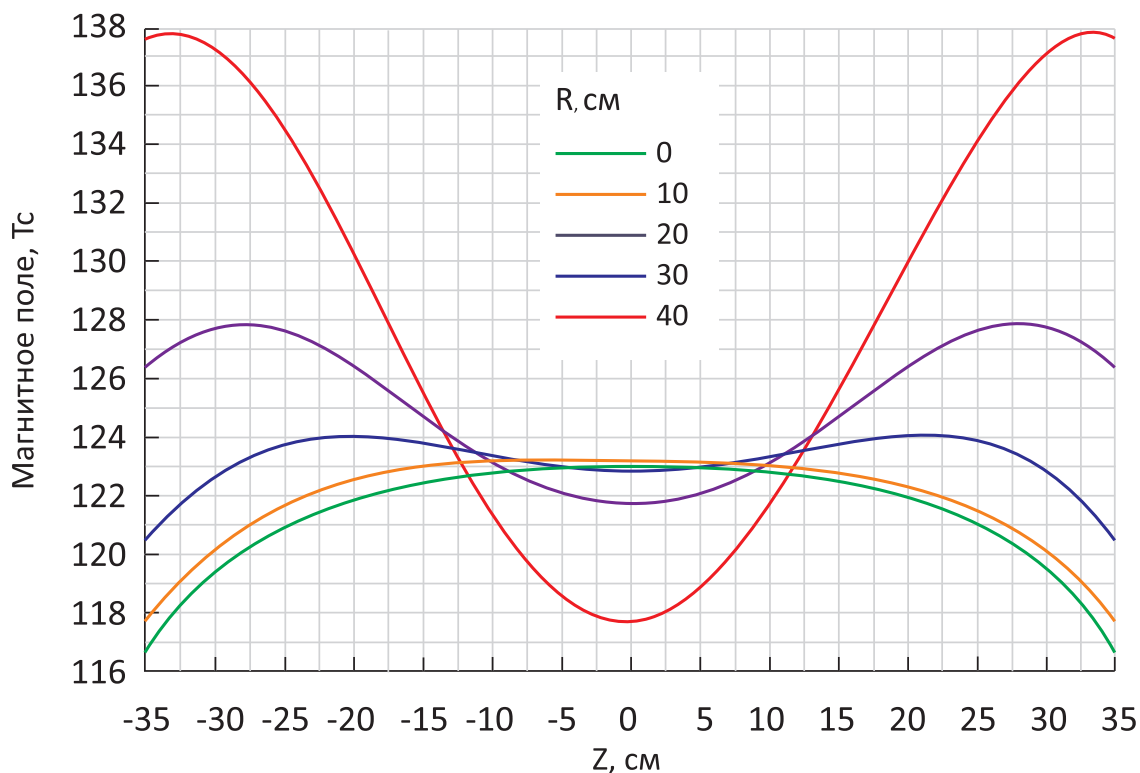


Рис. 7. Распределение индукции магнитного поля в апертуре радиусом 40 см (для различных R) между двумя секциями вдоль оси Z от центра (расстояние между секциями 75 см)

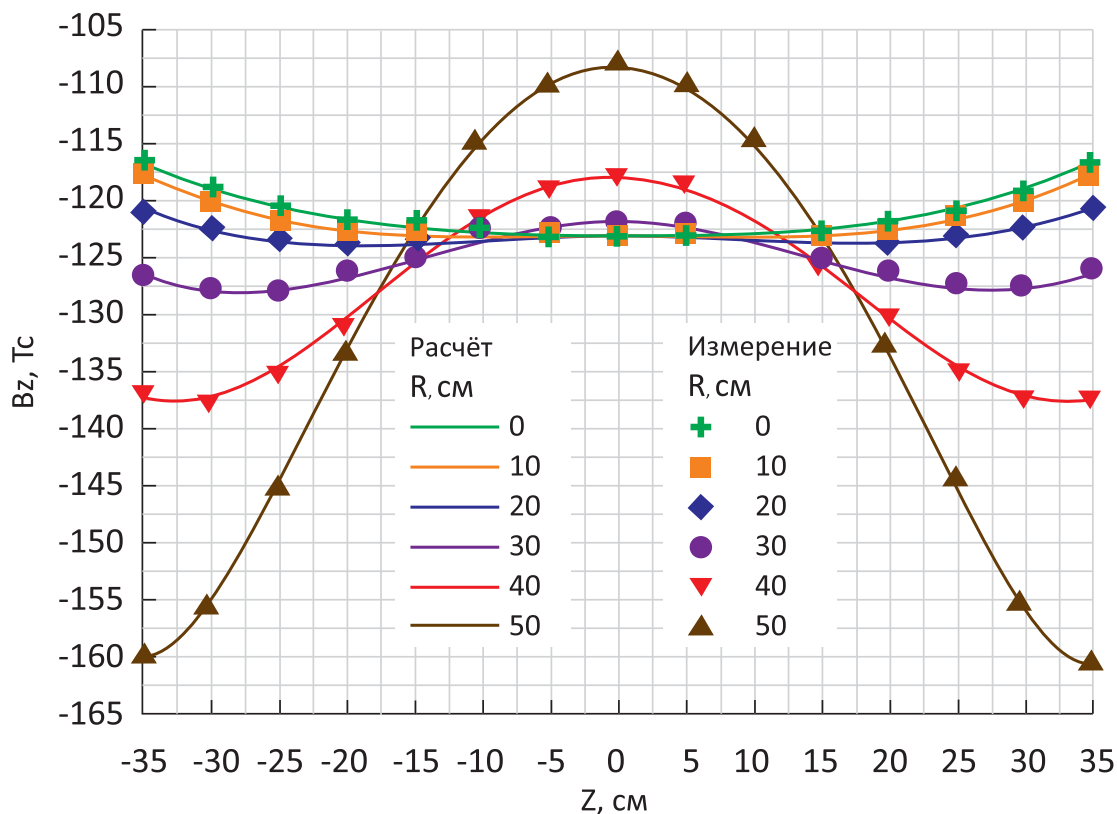


Рис. 8. Измеренное и расчётное распределение осевой составляющей индукции магнитного поля между двумя секциями вдоль оси Z

получения магнитного поля 120 Гс внутри такого размагничивающего контура необходимо, чтобы рабочий ток в секции составил 10 кА. Для тока 10 кА разработанный оптимизированный 12-повивный кабель представляется избыточным, а его изготовление потребует применения достаточно большого формера (центрального опорного элемента кабеля, на который накладываются ВТСП-ленты первого повива), что приведёт к повышенному расходу ВТСП-лент. Поэтому в изготовленном макете системы размагничивания для получения расчётного уровня тока использован 3-повивный кабель, полное количество ВТСП-лент в котором равно 56.

На рис. 5 показан процесс укладки ВТСП-кабеля в пенопластовый криостат, а на рис. 6 – секции макета системы размагничивания в криостате.

Для вычисления пространственного распределения магнитной индукции B и его компонент в системе размагничивания была разработана численная модель [1], основанная на решении уравнений Максвелла для магнитостатики:

$$\nabla H = J, \quad \nabla B = 0, \quad (1)$$

где H – напряжённость магнитного поля;

B – магнитная индукция;

J – плотность электрического тока.

При этом уравнение связи:

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

μ – магнитная проницаемость.

На рис. 7 показано расчётное распределение индукции магнитного поля в апертуре радиусом 40 см (для различных значений радиуса от центра апертуры) между двумя секциями вдоль оси Z от центра (расстояние между секциями 75 см) при рабочем токе 10 кА.

Для проверки расчётов калиброванным датчиком Холла были проведены измерения магнитного поля, измерялась осевая составляющая индукции магнитного поля между секциями. Измеренное и расчётное распределения осевой составляющей индукции магнитного поля между секциями вдоль оси Z показаны на рис. 8. Как следует из данных, представленных на рис. 8, измеренные и расчётные значения индукции магнитного поля практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оптимизация ВТСП-кабелей для стационарных обмоток систем размагничивания с учётом эффекта продольного магнитного поля, направленная на повышение их эффективности. В результате предло-

жена конструкция 12-повивного ВТСП-кабеля с оптимальными углами наложения ВТСП-лент на каждом повиве, что обеспечивает повышение критического тока в оптимизированном кабеле на 37,5 %, по сравнению с током неоптимизированного кабеля.

Каждая секция системы размагничивания крупных объектов может состоять из двух таких оптимизированных кабелей, что уменьшит количество ВТСП-лент и сократит затраты на сверхпроводящий материал по сравнению с ранее разработанными ВТСП-кабелями. При этом масса ВТСП-системы размагничивания крупных объектов по сравнению с системой, использующей медный кабель, снизится в десятки раз.

Для проведения экспериментов по размагничиванию малых объектов изготовлен макет системы размагничивания, состоящий из шести секций. Первые испытания макета показали, что измеренные и расчётные значения индукции магнитного поля в созданной системе практически совпадают. Масса одной секции сверхпроводящей обмотки (не оптимизированной по эффекту продольного поля) составляет около 10 кг при средней плотности тока около 2500 А/мм². Это как минимум в 20 раз меньше, чем масса медной секции, генерирующей такое же магнитное поле при стандартной плотности тока 2 А/мм². Использование эффекта продольного поля при разработке ВТСП-кабелей для таких систем, позволит ещё больше увеличить эффективность обмотки размагничивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-29-10011.

Список литературы

1. **Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Потанина Л.В., Фетисов С.С.** Использование высокотемпературных сверхпроводящих кабелей для размагничивания крупных масс // Кабели и провода. – 2019. – № 1. – С. 4–7.
2. **Karasik V.R., Vereshchagin V.G.** Investigation of Longitudinal Critical Currents in Superconducting Alloys Based on Ti and Zr // JETP. – 1971. – Vol. 32, N 1. – P. 20–26.
3. **Vyatkin V.S., Kiuchi M., Otabe E.S., Ohya M., Matsushita T.** Design of Practical Superconducting DC Power Cable With REBCO Coated Conductors // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2015. – Vol. 25, N 4. – P. 6606207.
4. **Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Vysotsky V.** Cold test and numerical analysis of the compact 2G HTS power cable // Conf. Ser.: Mat. Sc. and Engin. – 2019. – Vol. 502, N 1.
5. **Высоцкий В.С., Носов А.А., Рычагов А.В., Сытников В.Е., Фетисов С.С., Шутов К.А.** Создание силового сверхпроводящего кабеля на базе ВТСП-технологий // Кабели и провода. – 2010. – № 2. – С. 3–10.