DOI 10.52350/2072215X_2021_4_7

# РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМОЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ КАБЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

## DEMAGNETIZATION OF FERROMAGNETIC OBJECTS BY A SYSTEM USING CABLES BASED ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

**V.S. Vysotsky,** *Dr. Sc. (Engineering), Director of Superconducting Cable and Wire Division, OJSC "VNIIKP";*
**S.Yu. Zanegin,** *Senior Engineer, OJSC "VNIIKP";*
**V.V. Zubko,** *Dr. Sc. (Engineering), Chief Research Scientist, OJSC "VNIIKP";*
**L.V. Potanina,** *Cand. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist, OJSC "VNIIKP";*
**S.S. Fetisov,** *Cand. Sc. (Engineering), Deputy Division Manager for Science, Head of Laboratory, OJSC "VNIIKP"*

**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, главный научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;*
**Л.В. Потанина,** *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИКП»;*
**С.С. Фетисов,** *канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением по науке, заведующий лабораторией ОАО «ВНИИКП»*

**Аннотация.** Размагничивание – это процесс уменьшения намагниченности ферромагнитной массы путём наложения внешнего магнитного поля, попеременно меняющего знак. Во многих случаях требуется снижение намагниченности объекта до величин магнитного поля Земли. Максимальное создаваемое размагничивающее поле может составлять всего несколько мТл (100–200 Гс), но из-за больших размеров объекта (например корпуса корабля) для создания достаточного магнитного поля в требуемой области потребуется применить высокий электрический ток. Поэтому существующие в настоящее время системы размагничивания представляют собой многотонные катушки из тяжёлых медных электрических кабелей. Использование в системах размагничивания кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволяет обеспечить значительную экономию веса по сравнению с системами размагничивания на основе медных катушек. Предложенная нами конструкция ВТСП-кабеля, учитывающая «эффект продольного магнитного поля», позволяет дополнительно сократить затраты на ВТСП-материал. В настоящей работе приведены результаты дальнейшей оптимизации конструкции такого кабеля для систем размагничивания с учётом реальных зависимостей критического тока ВТСП-лент второго поколения. Кроме того, представлены результаты эксперимента по размагничиванию модельного стального объекта в макете системы на основе ВТСП-кабелей, предназначенной для размагничивания малых объектов.

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

**Abstract.** Demagnetization is the process of decreasing the magnetization of a ferromagnetic mass by applying an external magnetic field that alternately changes its sign. In many cases, it is required to reduce the magnetization of an object to the values of the Earth's magnetic field. The maximum demagnetizing field generated can be only a few mT (100–200 Gs), but due to the large size of the object (for example, the hull of a ship), a high electric current will need to be applied to create a sufficient magnetic field in the required area. Therefore, currently existing demagnetization systems are multi-ton coils of heavy copper electrical cables. The use of cables based on high-temperature superconductors (HTSC) in demagnetization systems allows significant weight savings compared to demagnetization systems based on copper coils. Our proposed design of the HTSC cable, which takes into account the "effect of the longitudinal magnetic field", makes it possible to further reduce the cost of the HTSC material. This paper presents the results of further optimization of such a cable for demagnetization systems, taking into account the real dependences of the critical current of second-generation HTSC tapes. In addition, the results of an experiment on demagnetizing a model steel object in a model of a system based on HTSC cables designed for demagnetizing small objects are presented.

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

*Материал поступил в редакцию 11.05.2021*
*E-mail: v.vysotsky@vniikp.ru*

## ВВЕДЕНИЕ

Предварительный анализ систем размагничивания с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) приведён в [1, 2]. Обычно размагничивающие системы – это многотонные обмотки или катушки, образованные медными электрическими кабелями. Для размагничивания требуется создать квазипостоянное магнитное поле с амплитудой порядка 0,01–0,02 Тл. Основными преимуществами систем размагничивания, катушки которых изготовлены из ВТСП-кабелей, являются значительное уменьшение веса и повышенная эффективность. С целью дальнейшего снижения массогабаритных характеристик обмоток при создании эффективных систем размагничивания необходимо максимально повысить рабочий электрический ток в используемых ВТСП-кабелях. Для повышения рабочего тока кабелей можно использовать так называемый «эффект продольного магнитного поля». Известно, что во многих сверхпроводниках как низкотемпературных проводах, так и в ВТСП-лентах второго поколения критический ток повышается в слабом магнитном поле, параллельном поверхности ленты и транспортному току [2, 3]. Целью настоящей работы является возможность оптимизации ВТСП-кабелей для обмоток систем размагничивания на основе «эффекта продольного магнитного поля», с учётом реальных характеристик ВТСП-лент. Кроме того, продемонстрирован изготовленный макет системы размагничивания малых объектов и представлены результаты размагничивания изделия, имитирующего ферромагнитную массу.

## 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, 2] была проанализирована предназначенная для размагничивания крупных объектов ВТСП-обмотка диаметром 29 м и длиной 210 м, состоящая из 38 секций. Было показано, что для получения магнитного поля 120 Гаусс рабочий ток в каждой секции должен составлять 58,2 кА, что обеспечивается необходимым числом Ампер-витков.

В [2] была проанализирована возможная конструкция ВТСП-кабеля, использующего «эффект продольного внешнего магнитного поля», поскольку в силу коаксиальной конструкции кабелей, на ВТСП-лентах всегда имеется составляющая магнитного поля от других повивов, параллельная току в ленте. Однако в [2] использованы литературные данные, а именно, представленные в зарубежных исследованиях зависимости критического тока от угла между током в ленте и направлением магнитного поля при разных величинах магнитного поля после пересчёта для ВТСП-лент второго поколения, имеющих критический ток в собственном поле 200 А [2]. В дальнейших расчётах использованы измеренные авторами зависимости критического тока в ВТСП-лентах второго поколения производства компании SuperOx (Россия), приведённые в [3].

Проведённые авторами расчёты показали, что чем больше количество повивов в ВТСП-кабеле, тем

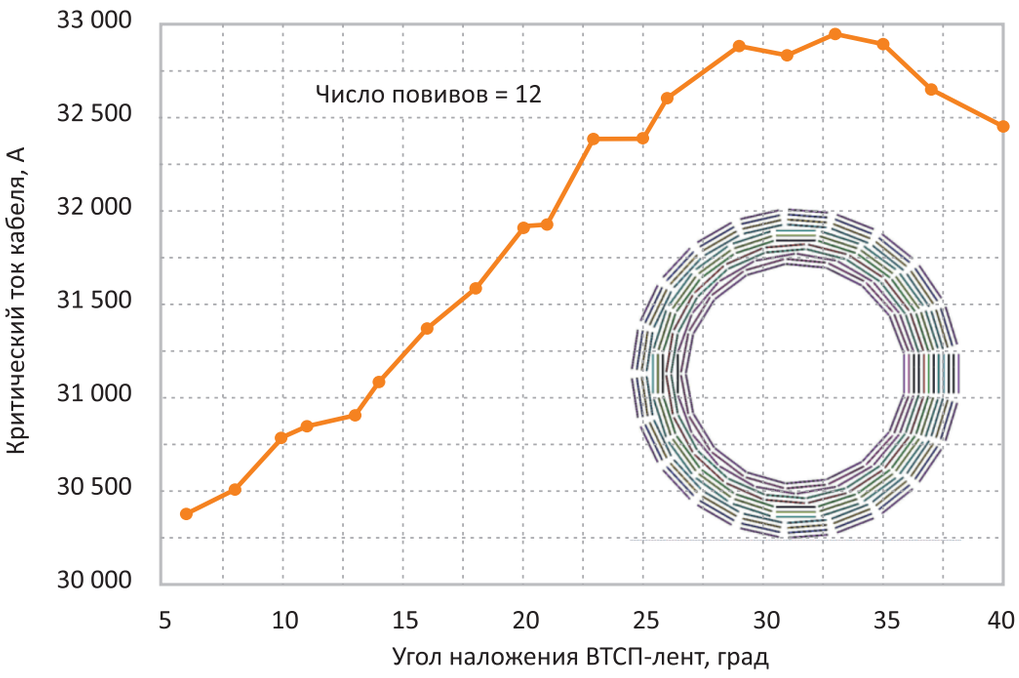


*Рис. 1. Критический ток кабеля в зависимости от угла наложения ВТСП-лент во внешнем повиве*

сильнее проявляется «эффект продольного внешнего магнитного поля».

На рис. 1 представлен критический ток ВТСП-кабеля (в котором число повивов N равно 12) в зависимости от угла наложения ВТСП-лент во внешнем повиве. В расчётах рассмотрено только магнитное поле, создаваемое повивами кабеля. Возможное внешнее магнитное поле, параллельное лентам в повивах кабеля (как в [2]), не учитывается, так как его сложно создать. На рис. 1 также показано сечение кабеля, в котором внутренний радиус первого повива равен 12 мм. Видно, что возможное повышение критического тока в оптимизированном кабеле по сравнению с током неоптимизированного кабеля только в собственном поле может достигать 10 %.

Из рис. 1 следует, что в отсутствии внешнего магнитного поля оптимальный угол наложения ВТСП-лент во внешнем повиве $\theta_{max}$ составляет 32 градуса, при этом угол наложения ВТСП-лент во внутреннем повиве $\theta_1$ составляет 2 градуса, во втором повиве $\theta_2 = 15$ градусов, а угол наложения ВТСП-лент в остальных повивах определяется выражением $\theta_i = i \times (\theta_{max} - \theta_2)/(N_l\text{-}2)$.

В предложенном 12-повивном кабеле полное количество ВТСП-лент составляет 239. Согласно расчётам достаточно двух витков такого кабеля для каждой катушки секции размагничивания, что уменьшает полную массу ВТСП-кабелей в секции и, следовательно, сокращает затраты на сверхпроводник и криостатирование. В [1] показано, что, если использовать разработанный силовой ВТСП-кабель, то это как минимум в 50 раз уменьшает вес секции системы размагничивания по сравнению с весом секции, изготовленной из медного кабеля. Использование оптимизированного 12-повивного ВТСП-кабеля позволит дополнительно снизить массу требуемого кабеля.

## МАКЕТ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТСП-КАБЕЛЕЙ

Для проведения экспериментов по размагничиванию малых объектов с помощью ВТСП-кабелей изготовлен макет системы размагничивания, состоящий из шести секций. Диаметр обмотки в секции составляет 1,5 м, расстояние между секциями равно 0,75 м. Для получения магнитного поля 120 Гс внутри такого размагничивающего контура, необходимо, чтобы рабочий ток в секции составлял 10 кА. Для тока 10 кА разработанный оптимизированный 12-повивный ВТСП-кабель представляется избыточным, а его изготовление потребует применения достаточно большого формера и 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. Катушка в секции состоит из 1 витка такого ВТСП-кабеля. Подробно макет системы размагничивания описан в [2]. Испытания макета без изделия для размагничивания

показали, что измеренные и расчётные значения индукции магнитного поля в созданной системе практически совпадают [2].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ МАЛОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВТСП-КАБЕЛЕЙ

Для имитации объекта размагничивания необходимых размеров изготовлено изделие из стального уголка размерами 50×50 мм и толщиной 2 мм (рис. 2). Размеры изделия 1100×600×500 мм, масса 48 кг. На рис. 3 показан внешний вид секций макета системы размагничивания (видны только криостаты) после сборки, а также установленный внутрь объект размагничивания. Процесс укладки ВТСП-кабелей в криостат был описан ранее в [2]. На рис. 3 справа показана система сбора данных. Объект размагничивания внутри системы должен размещаться так, чтобы его продольная ось симметрии совпадала с осью ВТСП-катушек, а поперечная плоскость симметрии объекта находилась между средними ВТСП-катушками. Таким образом, объект размагничивания располагается в зоне с наиболее равномерным распределением магнитного поля.

Намагниченность объекта размагничивания измерялась в нескольких направлениях трёхосевым датчиком магнитного поля при помощи ска-

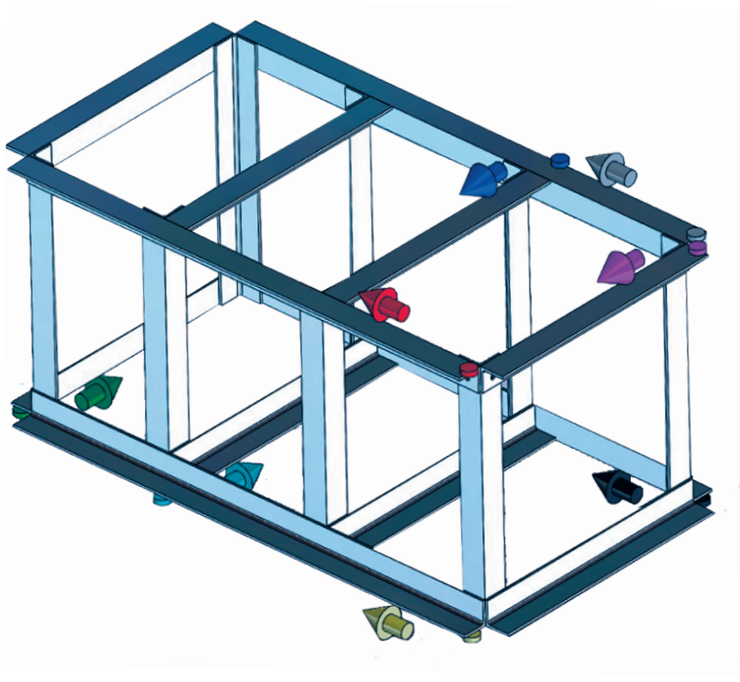

*Рис. 2. Общий вид объекта размагничивания и направления, по которым измерялась намагниченность. Чёрная, серая, красная и жёлтая стрелки – направления A,B,C,D; фиолетовая и зелёная – направления E,H; синяя и голубая – направления F,G*

*Рис. 3. Секции системы размагничивания после сборки с объектом размагничивания изнутри. Справа видна система сбора данных*

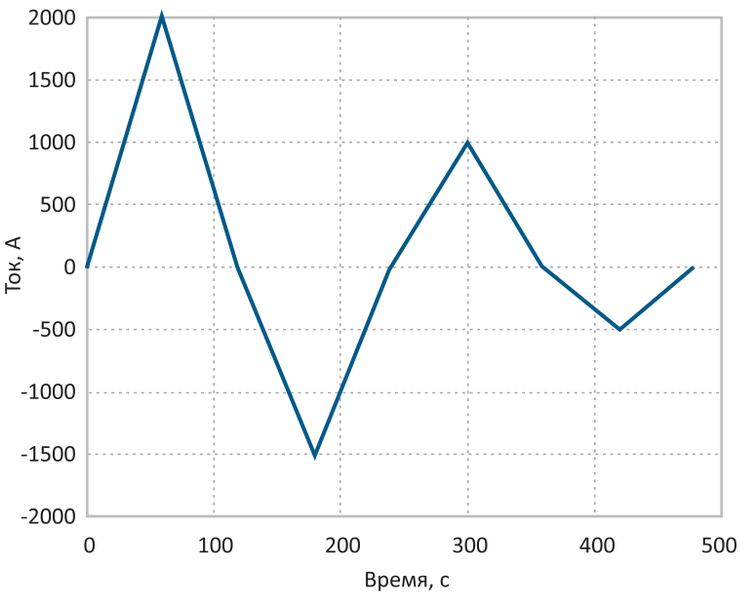


*Рис. 4. Профиль тока в ВТСП-катушках макета системы размагничивания*

нирующей методики. Схема измерения намагниченности приведена на рис. 2, при этом датчик перемещается вдоль характерных размеров объекта. Выбрано четыре направления: вдоль длинных рёбер объекта (A,B,C,D), вдоль двух коротких рёбер по краям (E,H) и двух – в середине объекта (F,G). При измерении намагниченности в систему сбора данных поступают сигналы с трёх осей датчика, а также координата, соответствующая положению датчика вдоль измеряемой длины объекта. Чувствительность датчика составляет 5 мВ/Гс.

Далее ВСТП-катушки в криостатах захолаживали до температуры жидкого азота и производили ввод тока в них по заданному алгоритму. Ток вводили с линейной развёрткой по времени до некоторого значения в течение 1 мин, затем уменьшали до нуля по такому же закону. При достижении нуля направление тока в катушке менялось на противоположное, ток изменялся по линейному закону за 1 мин до отрицательного значения, которое меньше начального на 20 %, после чего по такому же закону ток возвращался к нулевому значению. Процесс повторялся, при этом на каждом цикле максимальное значение тока уменьшалось на 20 % от начального. Таким образом, за 5 циклов ток спадал до нуля (рис. 4).

Также в процессе размагничивания было проведено промежуточное измерение намагниченности объекта. Для этого при переходе тока через нулевое значение была измерена намагниченность объекта по направлению «А». На рис. 5 представлены профили намагниченности по направлению «А» до размагничивания, на промежуточном этапе и в конце измерений.

На рис. 6 представлены профили намагниченности по направлению «Е» до и после размагничивания.

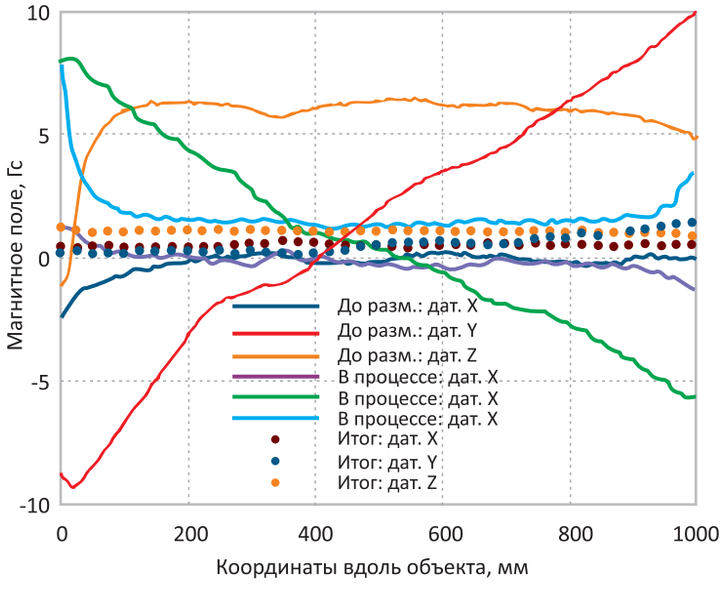


*Рис. 5. Профили намагниченности по направлению «А» до, в процессе и после размагничивания*

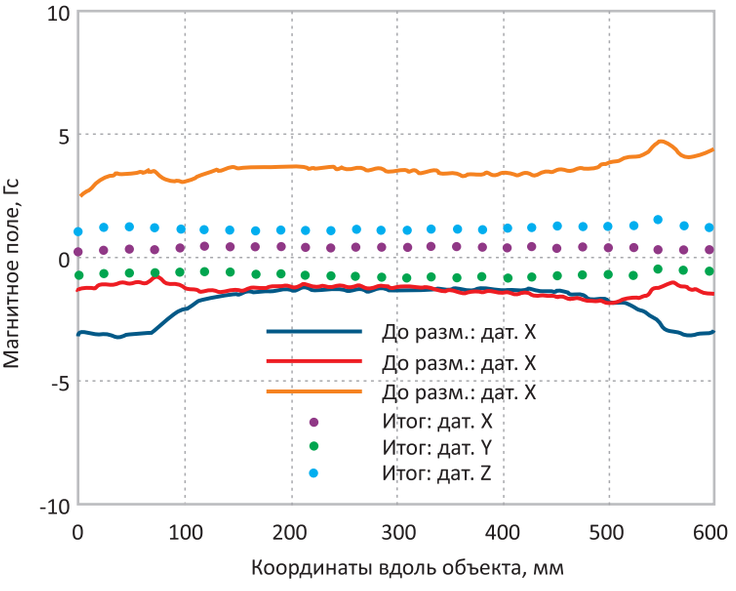


*Рис. 6. Профили намагниченности по направлению «Е» до и после размагничивания*

Из приведённых на рис. 5 и 6 графиков видно, что система размагничивания работает эффективно, намагниченность объекта снизилась в несколько раз, как в продольном, так и в поперечном направлении. Величина намагниченности составляет 0,5–1 Гс, то есть сравнимо с магнитным полем Земли (~0,3–0,7 Гс), что и требовалось.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учётом «эффекта продольного магнитного поля», проведена дальнейшая оптимизация 12-повивного ВТСП-кабеля для стационарных обмоток систем размагничивания, направленная на повышение их эффективности. Использование «эффекта продольного поля» при разработке ВТСП-кабелей для таких систем позволяет ещё больше увеличить эффективность обмотки размагничивания.

Каждая катушка в секции системы размагничивания крупных объектов может состоять из двух 12-повивных ВТСП-кабелей. В этом случае масса ВТСП-системы размагничивания крупных объектов по сравнению с системой, использующей медный кабель, снижается в десятки раз.

Для проведения экспериментов по размагничиванию малых объектов изготовлен макет системы размагничивания, состоящий из шести секций. Катушка в каждой секции состоит из 1 витка 3-повивного ВТСП-кабеля, что достаточно для достижения рабочего тока 10 кА, обеспечивающего генерацию магнитного поля 120 Гс внутри размагничивающего контура макета. 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/мм$^2$. Это как минимум в 20 раз меньше, чем масса медной секции, создающей такое же магнитное поле при стандартной плотности тока 2 А/мм$^2$.

Изготовленная система размагничивания работает эффективно. Намагниченность изготовленного изделия для размагничивания была снижена как в продольном, так и в поперечном направлении до значений, сравнимых с магнитным полем Земли.

*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 (375). – С. 4–7.

2. **Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Потанина Л.В., Фетисов С.С.** Оптимизация многоповивных высокотемпературных сверхпроводящих кабелей для систем размагничивания // Кабели и провода. – 2020. – № 2 (382). – С. 12–18.

3. **Занегин С.Ю., Зубко В.В., Носов А.А., Фетисов С.С., Отабе Э., Киношита Ю., Акасака Т.** Возможность увеличения постоянного тока высокотемпературных сверхпроводящих кабелей за счёт эффекта продольного магнитного поля // Кабели и провода. – 2021. – № 1 (387). – С. 19–24.

## List of references

1. **Vysotsky V.S., Zanegin S.Yu., Zubko V.V., Potanina L.V., Fetisov S.S.** Use of high temperature superconductors for the demagnetization of large masses // Cables and Wires. – 2019. – № 1 (375). – P. 4–7.

2. **Vysotsky V.S., Zanegin S.Yu., Zubko V.V., Potanina L.V., Fetisov S.S.** Optimization of multilayer high temperature superconducting cables for demagnetization // Cables and Wires. – 2020. – № 2 (382). – P. 12–18.

3. **Zanegin S.Yu., Zubko V.V., Nosov A.A., Fetisov S.S., Otabe E.S., Kinoshita Yu., Akasaka T.** Potential increase of HTSC cable current carrying capacity due to the longitudinal magnetic field effect // Cables and Wires. – 2021. – № 1 (387). – P. 19–24.