

В.С. Высоцкий, д-р техн. наук, директор научного направления – заведующий отделением;

С.Ю. Занегин, старший инженер;

В.В. Зубко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник;

Л.В. Потанина, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник;

С.С. Фетисов, канд. техн. наук,

заместитель заведующего отделением по науке – заведующий лабораторией;

ОАО «ВНИИКП»



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ КРУПНЫХ МАСС

Аннотация. Интерес к использованию высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) кабелей, охлаждённых до криогенных температур в усовершенствованных системах размагничивания, является естественным, поскольку сверхпроводники могут работать при значительно более высоких плотностях тока, чем традиционные проводники, а также наилучшим образом работают на квази-постоянном токе, который используется в размагничивающих устройствах. Потенциальными преимуществами использования ВТСП-кабелей являются уменьшенные потери, существенно меньший размер и масса кабелей. Однако использование ВТСП-кабелей требует дополнительного вспомогательного оборудования (криостаты, криокулеры). В данной работе представлена оценка преимуществ, получаемых в результате применения ВТСП-кабелей в обмотках для размагничивания крупных масс.

Ключевые слова: ВТСП-кабель; ВТСП-обмотка; размагничивание; безобмоточное размагничивание.

Abstract. Using of high temperature superconducting (HTS) cables, cooled to cryogenic temperatures in advanced demagnetization systems is absolutely natural. This is because superconductors are able to work at much higher current density than conventional conductors. They are better adapted to work at quasi-constant currents that is usually used in demagnetization systems. The advantages of HTS cables are reduced losses, considerably smaller sizes and mass of cables. Nevertheless, HTS cables are demanding extra auxiliary equipment (cryostats, cryocoolers). In the paper presented we evaluated advantages in using HTS cables for demagnetization of large ferromagnetic masses.

Key words: HTS cable; HTS winding; demagnetization; deperming.

Материал поступил в редакцию 30.01.2019
Зубко В.В. E-mail: vasily.zubko@gmail.com

Введение

Проблема магнитной совместимости технических средств связана с воздействием магнитно-активных изделий на магнитно-восприимчивые части в составе одного объекта, что приводит к опасным отклонениям в его функционировании. Например, электролиз алюминия сопровождается сверхсильными токами и столь же сверхсильными магнитными полями, которые способны привести к ложному срабатыванию даже сильноточного электрооборудования, например, кранового. Поэтому ко всему оборудованию цехов электролиза алюминия предъявляются требования по магнитной совместимости, то есть требование по нормальному функционированию оборудования в магнитном поле соответствующей напряжённости [1]. В целом ряде технических и технологических процессов и в самых разных областях науки и техники может потребоваться размагничивание крупных ферромагнитных масс.

Наиболее широко известным примером такого размагничивания является размагничивание боевых кораблей [2, 3]. Необходимость более полного контроля магнитного поля на крупных кораблях привела к разработке и внедрению усовершенствованных систем размагничивания. Размагни-

чивающие системы – это многотонные петли размагничивания, образованные медными электрическими кабелями. Для размагничивания требуется создание кратковременного квази-постоянного магнитного поля. Использование ВТСП-кабелей, охлаждённых до криогенных температур в усовершенствованных системах размагничивания, является естественным, поскольку сверхпроводники могут работать на плотностях тока, которые значительно выше, чем у традиционных проводников, и работают наилучшим образом при медленно меняющемся токе.

Размагничивание кораблей, обычно осуществляется двумя способами. Первый способ – это обмоточное размагничивание, когда обмотки монтируют внутри корабля стационарно, они создают магнитное поле, компенсирующее магнитное поле корабля, их включают на время следования по опасным районам [2, 3]. В этом случае системы компенсации магнитного поля кораблей базируются на двух основных принципах: использование общекорабельных обмоток с питанием от единого мощного источника тока и настройкой посредством переключения дробных витков, либо разбивка обмотки на секции с питанием каждой от отдельных маломощных преобразователей и настройкой посредством индивидуальных

управляющих воздействий. Система, построенная по посекционному принципу, выигрывает в весе по сравнению с общекорабельной системой в основном за счёт уменьшения веса кабеля, но общий вес системы уменьшается незначительно из-за увеличения числа и номенклатуры оборудования. Основным вариантом снижения веса корабельной системы размагничивания также может стать применение в ней ВТСП-кабелей.

В различных странах, прежде всего США, ведутся интенсивные работы по созданию на кораблях ВТСП-систем для размагничивания. Первоначальные испытания такая система проходила на десантных кораблях типа LPD-17, судах снабжения типа Т-АКЕ [4], а затем, 11 июля 2008 года ВТСП-обмотки размагничивающего устройства были смонтированы взамен традиционных на борту эсминца типа «Арли Бёрк» в рамках двухлетней программы морских испытаний [5]. ВТСП-катушка размагничивания общей длиной 40 метров по своим параметрам соответствует традиционной размагничивающей системе с 4100 ампер-витками. При этом падение напряжения на катушке составило менее 0,5 В, что на три порядка меньше, чем в медных обмотках. Согласно оценкам экспертов фирмы AMSC, производящей ВТСП-ленты, использование ВТСП-обмотки вместо традиционных, выполненных из меди, уменьшает для системы размагничивания: массу – на 50–80 % и энергопотребление – на 25 % [5].

Наряду с обмоточным размагничиванием, корабли и подводные лодки периодически подвергаются так называемому безобмоточному размагничиванию, то есть без использования обмоток внутри корабля. Принцип безобмоточного размагничивания заключается в том, что корабль подвергается кратковременному воздействию внешних магнитных полей, уменьшающих магнитное поле корабля до нормированных значений. Безобмоточное размагничивание осуществляется с помощью временно накладываемых на корабль электрических витков, где размещение вокруг корпуса тяжёлых многожильных кабелей связано с большими затратами времени и физического труда [6] или с помощью стационарных станций безобмоточного размагничивания кораблей.

Измерение намагниченности судов до и после процесса размагничивания может проводиться при помощи набора трёхосевых датчиков, расположенных на морском дне [7] в виде креста или сетки. Количество датчиков, в зависимости от требуемой точности, может составлять от нескольких десятков до ста и более. Глубина дна в месте установки датчиков должна быть минимальной с точки зрения максимальной точности измерений, но в то же время достаточной для безопасного прохождения судна.

Целью настоящей работы является предварительная оценка преимуществ использования ВТСП-кабелей в обмотках стационарных систем размагничивания крупных масс с точки зрения снижения массы, габаритных размеров и энергопотребления.

Использование ВТСП-кабелей в станциях безобмоточного размагничивания кораблей

Основной задачей при создании ВТСП-обмотки для стационарного размагничивания крупных масс является получение магнитного поля внутри размагничивающего

контура, как правило, величиной около 0,012 Тл (120 Гаусс), достаточно равномерного по длине.

В настоящей статье рассмотрены три варианта стационарных обмоток для размагничивания:

1. Диаметр 29 м, длина 210 м (для особо крупных объектов).
2. Диаметр 6 м, длина 40 м (для средних объектов).
3. Диаметр 2,5 м, длина 20 м (для малых объектов, таких как, например, силовые дизельные установки и т.п.).

Моделирование магнитного поля в обмотке станции размагничивания

Как отмечалось выше, размагничивание кораблей имеет статический характер. Поэтому для получения магнитных характеристик обмотки можно использовать уравнения Максвелла для магнитостатики, которые записываются в системе СИ в дифференциальной форме:

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

где H – напряжённость магнитного поля;

B – магнитная индукция;

J – плотность электрического тока.

С уравнением связи $B = \mu_0 \mu H$, где μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость.

Для вычисления пространственного распределения магнитного поля B и его компонент в стационарных обмотках для размагничивания разработана численная модель, в которой для решения уравнений (1) применяется метод конечных элементов, модель реализована с помощью программного комплекса ANSYS [8].

Стационарная станция размагничивания особо крупных объектов на основе ВТСП

Прежде всего проведём расчёты для обмотки, состоящей из медного кабеля, изготовленного из сборных шин (методика выбора сечения системы сборных шин представлена в работе [9]). Плотность тока в медных шинах составляет около 1,5–2 А/мм². Для удобства изготовления и монтажа такая обмотка размагничивания должна состоять из нескольких секций, собираемых в длинную обмотку. Вид обмотки, состоящей из нескольких секций, показан на рис. 1, где количество секций составляет 38.

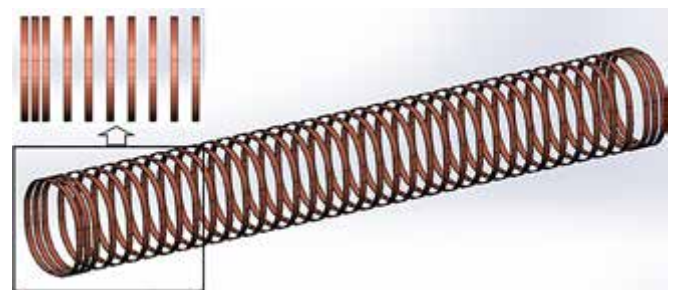


Рис. 1. Вид обмотки для размагничивания, состоящей из 38 секций. Слева сверху отдельно показано несколько секций обмотки

Из расчётов следует, что для получения внутри обмотки магнитного поля 0,012 Тл необходим рабочий ток в каждой секции, равный 58,2 кА, который должен набираться необходимым числом Ампервитков. Учитывая это, вес медного кабеля в одной секции размагничивающей обмотки составит около 50 т.

Для расчётов обмотки, состоящей из ВТСП-кабеля, мы опирались на параметры разработанного во ВНИИКП компактного ВТСП-кабеля [10], способного нести постоянный ток, равный 6 кА, а переменный ток, равный 3 кА. Этот кабель имеет самые высокие параметры по средней плотности тока в сверхпроводящем силовом кабеле в мире.

Согласно расчётам, достаточно 10 витков компактного ВТСП-кабеля для каждой секции в обмотке размагничивания. Вес одного метра данного кабеля без криостата составляет 0,7 кг. Если использовать общий криостат для секции, вес которого составляет около 5 кг/м, тогда вес секции (ВТСП-кабель и криостат) составит около одной тонны, что, как минимум, в 50 раз меньше массы секции, состоящей из медного кабеля.

Общая экономия массы обмотки при замене медной на ВТСП составит более полутора тысяч тонн массы.

На рис. 2 показано расчётное распределение индукции магнитного поля внутри обмотки при рабочем токе для случая использования ВТСП-кабелей в секциях обмотки; при этом запасённая энергия в обмотке составляет 9,5 МДж.

На рис. 3 показана продольная (вдоль оси Z от центра до 90 м) зависимость индукции магнитного поля (B) для различных радиусов (R) (от центра до 10 м) при рабочем токе. Индукция магнитного поля внутри данной области составляет около 0,012 Тл.

На рис. 4 показана неоднородность магнитного поля в данной области $(B_{max} - B_{min})/B_{avg}$ в зависимости от R , где B_{max} , B_{min} и B_{avg} – максимальное, минимальное и среднее значение индукции магнитного поля B при фиксированном радиусе R . Видно, что неоднородность величины B в этой области не превышает 4 %, что и требуется для эффективного размагничивания.

Станция безобмоточного размагничивания средних объектов на основе ВТСП

Для данного случая выбранное количество секций также составляет 38, рабочий ток в каждой секции равен 21,5 кА, запасённая энергия в обмотке равна 171 кДж.

Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля в обмотке для размагничивания при рабочем токе (вследствие симметрии показана катушка от её середины)

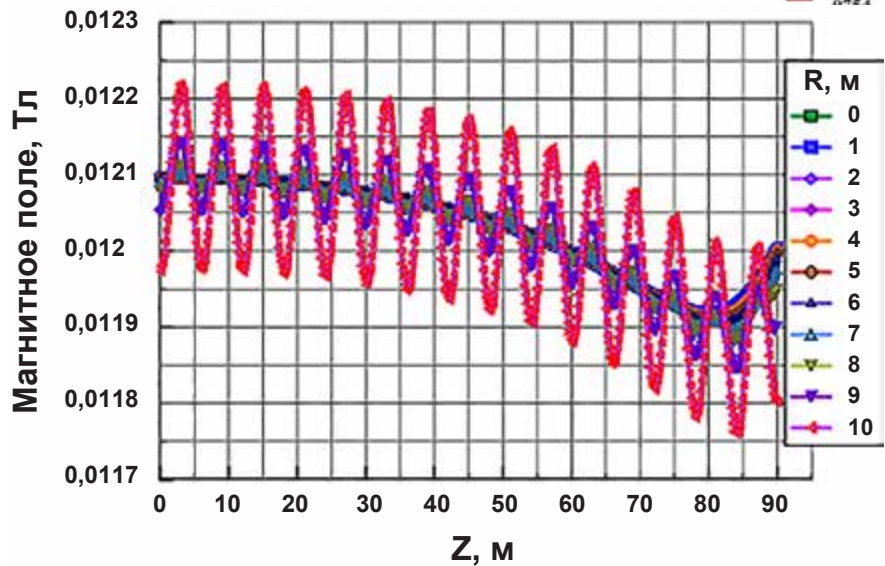
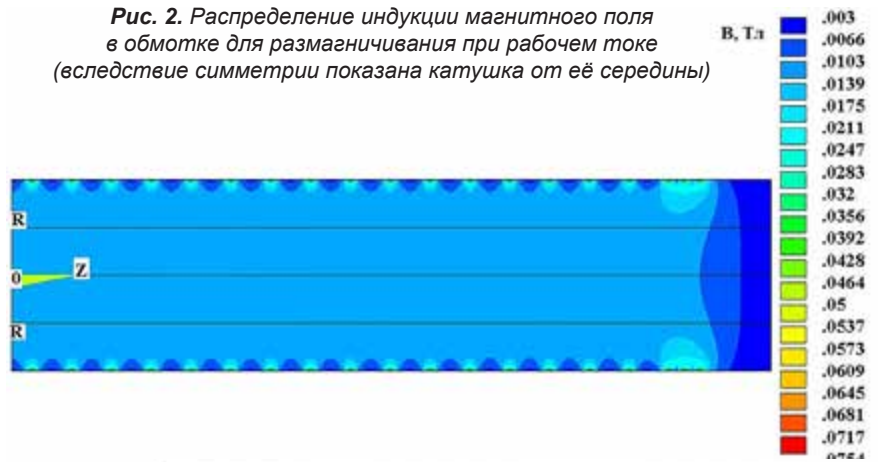


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля в апертуре вдоль оси Z от центра до 90 м (для различных R)

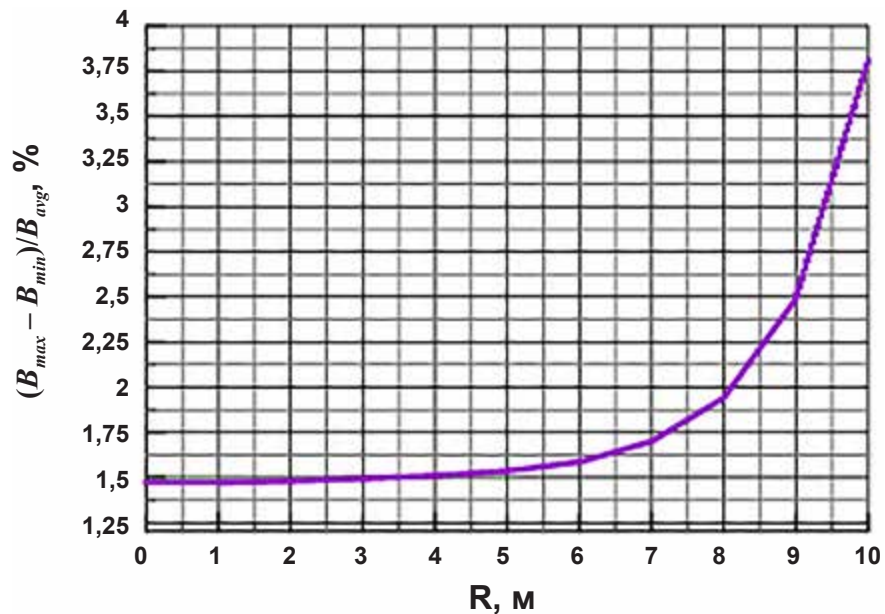


Рис. 4. Неоднородность магнитного поля в апертуре $(B_{max} - B_{min})/B_{avg}$ в зависимости от R

На рис. 5 показана продольная (вдоль оси Z от центра до 30 м) зависимость индукции магнитного поля для различных радиусов (от центра до 1,5 м) при рабочем

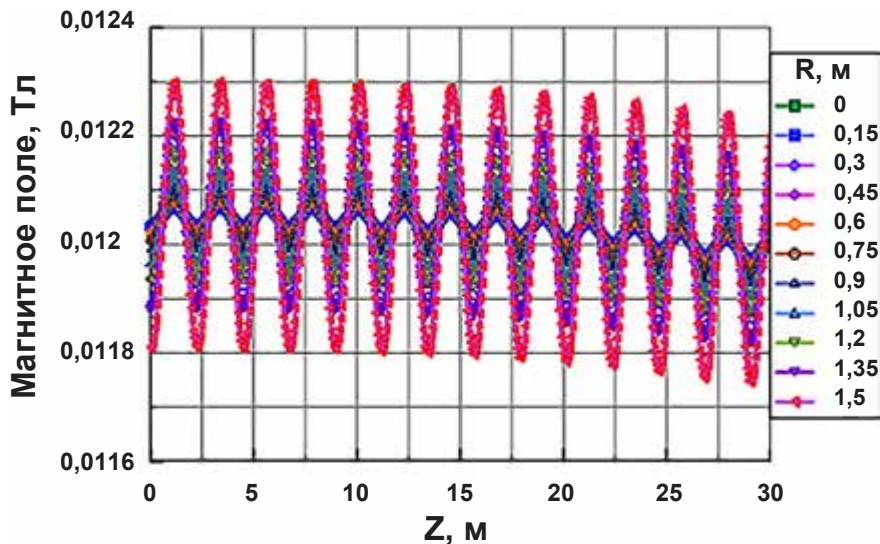


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля в апертуре (для различных R)

токе. Индукция магнитного поля внутри данной области составляет около 0,012 Тл.

Вес секции в случае использования ВТСП-кабеля, с учётом криостата составит около 100 кг, а в случае использования медного кабеля вес одной секции составит около 3 т. Общая экономия массы составит около 110 т.

Система размагничивания для малых объектов

Для данного случая выбранное количество секций также составляет 38, рабочий ток в каждой секции равен 10,5 кА, запасённая энергия обмотки равна 13,7 кДж.

На рис. 6 показана продольная (вдоль оси Z от центра до 15 м) зависимость индукции магнитного поля для различных радиусов (от центра до 0,75 м) при рабочем токе. Индукция магнитного поля внутри данной области составляет около 0,012 Тл.

Вес секции в случае использования ВТСП-кабеля, с учётом криостата составит около 20 кг, а в случае

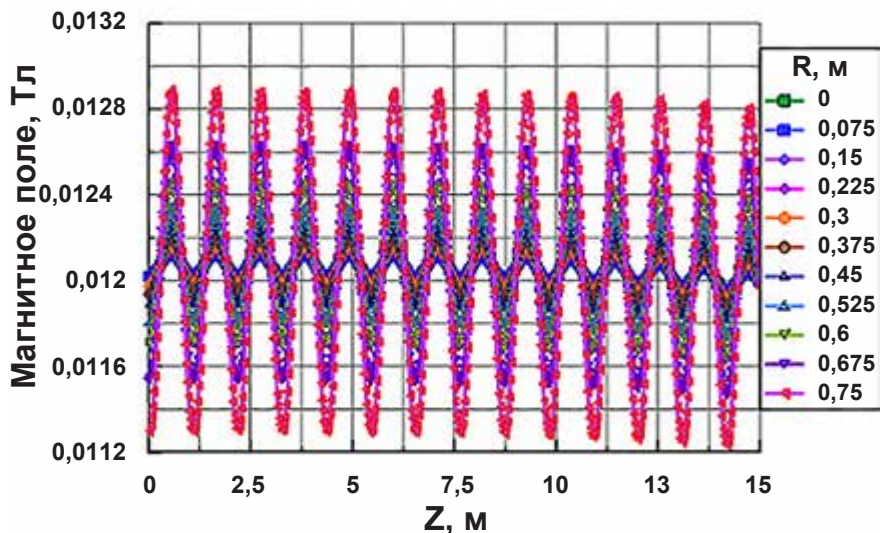


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля в апертуре (для различных R)

использования медного кабеля вес одной секции составит около 0,7 т. Общая экономия массы составит около 20 т.

Заключение

Усовершенствование систем размагничивания крупных масс, является необходимым условием для увеличения их эффективности. Это может быть выполнено с использованием сверхпроводящих кабелей.

В настоящей работе выполнена предварительная оценка массы обмоток с полем 120 Гаусс из высокотемпературного сверхпроводящего кабеля, необходимых для крупных систем размагничивания. Показано, что использование ВТСП-кабелей в системах размагничивания позволяет в десятки раз снизить массу их обмоток.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Розов В.Ю., Пилюгина О.Ю., Добродеев П.Н., Гетьман А.В., Волохов С.А. Введение в демагнетизацию технических объектов // Электротехника и Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 55–59.
2. Ткаченко Б.А. История размагничивания кораблей Советского Военно-Морского Флота. – Л.: Наука, 1981. – 223 с.
3. Панченко Б.Д. Размагничивание кораблей Черноморского флота в годы Великой Отечественной войны. – М.: Наука, 1990. – С. 188.
4. ONR trials superconducting degaussing system // Warship Technology, October 2008.
5. Никонов А.А., Чернышева А.К. ВТСП катушки для размагничивания кораблей // Сверхпроводники для электроэнергетики. – М.: НИЦ Курчатовский институт. – 2008. – Т. 5, № 5. – С. 9–10.
6. Зингер М.А., Захаров И.В. Применение инновационных технологий в военном кораблестроении // Актуальные вопросы технических наук: материалы IV Международ. науч. конф. – Краснодар: Новация, 2017. – С. 13–17.
7. Birsan M. Measurement of the extremely low frequency (ELF) magnetic field emission from a ship // Measurement Science and Technology. – 2011. – N 22. – P. 085709.
8. ANSYS Multiphysics. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения 24.01.2019).
9. Ведешенков Н.А и др. Методика выбора сборных шин для низковольтных комплектных устройств // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 6. – С. 35–41.
10. Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Vysotsky V. Cold test and analysis AC losses in compact 2G HTS power cables // Международная конференция ICEC27-ICMC 2018. – September 3–7 2018 Oxford England.