

в контрольной цепи, О4 – короткому замыканию VD1, R3, О5 – отсутствию питания ПХКС – ОХКС, О6 – короткому замыканию элементов С1, R1 (разные проявления СТ  $C_5$ ,  $C_6$ ). При этом ДО не пересекаются, что позволяет обеспечить надежное распознавание различных ТС и СТ.

ТС и СТ схемы с использованием ДО на рис. 5 анализируются по алгоритму, приведенному на рис. 1, при этом формула (1) будет иметь вид:

$$r = \sqrt{(A_0 - A_x)^2 + (S_0 - S_x)^2}. \quad (5)$$

### Заключение

Предложенный метод позволяет определять ТС и СТ СЖАТ и может применяться в различных СТДМ, что подтверждается не только расчетами и результатами моделирования, но и практическими экспериментами.

В дальнейшем способ может совершенствоваться для ситуаций, когда расстояние до различных ДО одинаково и требуется дополнительный анализ для определения ТС и СТ, основанный, например, на вероятности возникновения того или иного состояния.

### Библиографический список

1. **Техническая** эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, Л. И. Борисенко, А. А. Прокофьев ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2003. – 336 с.

2. **Надежность** систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вл. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шамапов. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.

3. **Понятие** предотказного состояния / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 12. – С. 6–8.

УДК 537

**А. Д. Корчагин**

Центр инновационного развития ОАО РЖД, Москва, Россия

**А. А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов**

Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия

### «ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ» НАМАГНИЧИВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Выполнен сопоставительный анализ стационарных и импульсного способов намагничивания сверхпроводников. Представлено физическое обоснование метода «топологического» намагничивания, достоинством которого является применение внешнего источника магнитного поля с относительно малой индукцией. Показано, что «топологический» метод «накачивания» магнитного потока позволяет намагничивать объемные высокотемпературные сверхпроводники по месту их штатной установки.

высокотемпературный сверхпроводник, топология, намагничивание.

## Введение

Объемные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) находят все более широкое применение в системах возбуждения электрических машин и устройствах магнитной левитации. По своим магнитным параметрам они превосходят постоянные магниты. Перспективным направлением в создании систем возбуждения линейных синхронных двигателей, систем левитации и боковой стабилизации является применение объемных ВТСП, в том числе в комбинации с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Скорость и грузоподъемность магнитолевитационного транспорта зависят от типа левитации. Использование статической магнитной левитации с помощью расположенных на борту транспортного средства намагниченных объемных ВТСП позволяет отказаться от системы электродинамической левитации, реализуемой в настоящее время только при движении на больших скоростях. ВТСП-левитация позволяет увеличить рабочий зазор между транспортным средством и путевым полотном. В настоящее время магнитолевитационный транспорт имеет конкурентные преимущества в сфере внутригородских и пригородных сообщений.

«Вмороженное» магнитное поле в объемных ВТСП-образцах, выполненных из керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (критическая температура  $T_c = 92$  К), при температуре жидкого азота 77,4 К может достигать 1,5 Тл. Вместе с тем второе (верхнее) критическое магнитное поле монокристаллического ВТСП из керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на порядок и более превышает «вмороженное» магнитное поле. Практика показывает, что намагниченные объемные ВТСП являются недоиспользованными, ибо теоретически не существует значительных ограничений повышения энергоэффективности намагниченных объемных ВТСП.

Анализ способов и технических средств намагничивания ВТСП в электрических машинах и устройствах показывает, что данная технологическая проблема ждет своего приемлемого для практики решения. Как и постоянные магниты, ВТСП-узлы в про-

цессе эксплуатации требуют периодического намагничивания. Во время эксплуатации электрической машины и устройства ВТСП-узлы подвергаются воздействию переменных магнитных полей различной природы и интенсивности. В результате происходит их частичное размагничивание. При потере криоагента они полностью утрачивают магнитные свойства. Ситуация осложняется тем, что намагниченность имеет место только у криостатированных ВТСП, находящихся в сверхпроводящем состоянии. Таким образом, технология намагничивания объемных ВТСП должна быть усовершенствована с привязкой к конкретным условиям монтажа и эксплуатации электрической машины или устройства.

## 1 Проникновение магнитного поля в сверхпроводник

Фундаментальным свойством сверхпроводника любого рода является независимое от предыстории выталкивание магнитного поля из его объема – эффект Мейсснера – Оксенфельда. Механизмом данного эффекта служат экранирующие токи. Стремление магнитного поля проникнуть в сверхпроводник вызывает появление ЭДС, которая наводит ток, экранирующий внутреннюю область сверхпроводника от магнитного поля. Похожий, но не аналогичный скин-эффект наблюдается в обычных проводниках в высокочастотном магнитном поле. Отличие заключается в том, что в сверхпроводнике нет омического сопротивления и наведенный сверхпроводящий ток может течь сколь угодно долго, пока существует приложенное магнитное поле. Причем это поле является стационарным, а не высокочастотным. Однако проникновение поля дальше поверхностного слоя в глубь сверхпроводника не имеет аналога в традиционной электротехнике.

Проникновение магнитного поля в глубь сверхпроводника 1-го рода происходит скачкообразно. Как только магнитная индукция  $B$  внешнего магнитного поля превы-

сит критическое значение  $B_c$ , перестает действовать эффект Мейсснера – Оксенфельда, весь объем сверхпроводника одновременно переходит в нормальное состояние и заполняется магнитным полем.

Проникновение внешнего магнитного поля в глубь идеального (без дефектов) сверхпроводника 2-го рода происходит иначе. До того, как магнитная индукция  $B$  внешнего магнитного становится ниже индукции первого критического поля  $B_{c1}$ , действует эффект Мейсснера – Оксенфельда. Сверхпроводящие экранирующие токи текут в поверхностном слое толщиной, равной глубине проникновения  $\lambda_L$ . При  $B > B_{c1}$  внешнее поле начинает проникать в сверхпроводник, который приобретает состояние квантованных нитей магнитного потока (синонимы: сверхпроводящие вихри, вихри Абрикосова, флюксоиды). Это происходит потому, что в идеальном сверхпроводнике 2-го рода нет удерживающих квантованные нити центров пиннинга (дефектов). С увеличением внешнего поля плотность квантованных нитей возрастает и, наконец, в поле с магнитной индукцией, превышающей магнитную индукцию второго критического поля  $B_{c2}$ , весь сверхпроводник оказывается заполнен магнитным полем. Отметим, что при  $B > B_{c1}$  и  $B > B_{c2}$  скачкообразного перехода сверхпроводника не происходит, соответственно не происходит и перехода в смешанное и нормальное состояния.

Иной процесс проникновения внешнего магнитного поля происходит в жестких (с дефектами) сверхпроводниках 2-го рода. Отличие состоит в том, что внешнее магнитное поле  $B > B_{c1}$  инициирует появление квантованных нитей магнитного потока не во всем объеме сверхпроводника, как это имеет место в предыдущем случае, а в поверхностном слое. Толщина этого поверхностного слоя не эквивалентна глубине проникновения  $\lambda_L$  и во многом, но не во всем, зависит от эффективности центров пиннинга. Последние препятствуют тому, чтобы квантованные нити равномерно распределились по всему объему сверхпроводника.

Высокотемпературные сверхпроводники относятся к сверхпроводникам 2-го рода. Для их намагничивания используются те же методы, которые применяются в установках по намагничиванию низкотемпературных сверхпроводниковых материалов [1]. Наиболее известны и широко используются два способа: в присутствии магнитного поля – режим *field cooling process* ( $f_{cp}$ ) и в нулевом магнитном поле – режим *zero field cooling process* ( $z_{f_{cp}}$ ) [2, 3].

Первый способ осуществляется путем охлаждения криоагентом объемного ВТСП, предварительно помещенного во внешнее стационарное магнитное поле. ВТСП, находящийся при «комнатной» температуре ( $\sim 300$  К) в нормальном, т. е. несверхпроводящем, состоянии, размещается на штатном месте в установке для намагничивания. После включения источника внешнего стационарного магнитного поля, которым может служить, например, соленоид, намагничиваемый ВТСП охлаждается вплоть до достижения температуры значения ниже критической  $T_c$ , свойственной данному ВТСП. В диапазоне температур от «комнатной» ( $\sim 300$  К) до критической  $T_c$  намагничиваемый ВТСП находится в нормальном состоянии. Благодаря этому он пронизывается магнитным потоком от источника внешнего стационарного магнитного поля. Когда температура  $T$  намагничиваемого ВТСП становится ниже критической  $T_c$ , ВТСП переходит в сверхпроводящее состояние. Поскольку все ВТСП, благодаря гранульной структуре и дефектам, являются жесткими сверхпроводниками 2-го рода, полного выталкивания магнитного поля из объема ВТСП, вследствие эффекта Мейсснера – Оксенфельда, не происходит. При выключении источника внешнего стационарного магнитного поля часть магнитного потока остается в объеме ВТСП, закрепляясь на центрах пиннинга и обеспечивая его остаточную положительную намагниченность.

Второй способ намагничивания реализуется в аналогичной установке. Он отличается от первого чередованием этапов намагничивания. Намагничиваемый ВТСП охлажда-

ется в отсутствие внешнего стационарного магнитного поля. По достижении температуры ВТСП значения ниже критического,  $T < T_c$  источник внешнего стационарного магнитного поля включается. Для проникновения магнитного поля в ВТСП необходимо, чтобы индукция  $B$  внешнего стационарного магнитного поля превышала магнитную индукцию поля проникновения, которая близка по значению к первому (нижнему) критическому  $B_{c1}$ , присущему ВТСП. Проникновение магнитного поля в глубь ВТСП происходит в соответствии с моделью критического состояния (рис. 1). Согласно этой модели, в объеме сверхпроводника существует два токовых состояния: нулевой ток в той части сверхпроводника, где нет магнитного поля, и ток с критической плотностью  $\pm J_c$  в остальной его части. В простейшем случае принимается  $J_c = \text{const}$ .

Пусть на первом этапе амплитуда индукции  $B$  приложенного стационарного магнитного поля изменяется на величину  $\Delta B = B^*/2$  (рис. 1, а). Такое изменение может происходить за любое время, в том числе бесконечно долгое. Вследствие закона электромагнитной индукции в поверхностном слое ВТСП индуцируется ЭДС, которая наводит экранирующий ток, препятствующий

проникновению поля внутрь ВТСП (рис. 1, б). На это затрачивается поступающая извне энергия, частично выделяющаяся в виде омических потерь от протекания превышающего критическое значение экранирующего тока, свойственного данному ВТСП. После того как экранирующий ток снизится до критического значения, он будет течь без сопротивления, обеспечивая экранирование от поля внутренней области ВТСП. В поверхностном слое с левой стороны ВТСП (рис. 1, б) ток течет от наблюдателя, с правой стороны – в противоположном направлении. Толщина  $p$  поверхностного слоя, в который проникает поле, зависит от индукции  $B$  внешнего стационарного магнитного поля и плотности  $J_c$  критического тока ВТСП. Имеем  $p = B^*/2\mu_0 J_c$ .

Предположим, что на втором этапе внешнее стационарное магнитное поле увеличено в два раза. Сопутствующие этому росту поля эффекты аналогичны предыдущему рассмотрению. Получим  $p = B^*/\mu_0 J_c$ .

После ряда этапов (в рассматриваемом случае после двух этапов) увеличения внешнего стационарного магнитного поля возникает состояние, когда поле занимает весь объем ВТСП. На рис. 1 это случай, когда  $B = B^*$ . При этом во всем объеме ВТСП ток

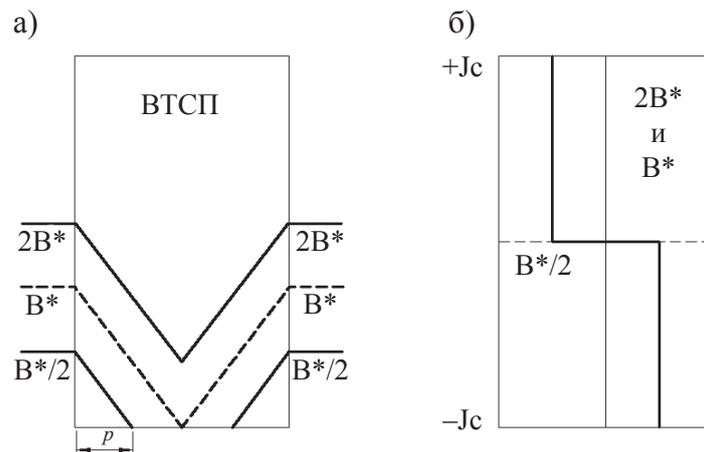


Рис. 1. Модель критического состояния на примере пространственно протяженной ВТСП пластины в стационарном магнитном поле, параллельном ее плоской стороне:  
 а – профили магнитной индукции  $B$  внутри сверхпроводника;  
 б – профили критической плотности экранирующего тока  $\pm J_c$

достигает критического значения  $J_c$ . Любое дальнейшее увеличение поля происходит без его экранирования. На рис. 1 это иллюстрируется обозначением  $2B^*$ . Обусловленный дополнительным ростом внешнего стационарного магнитного поля экранирующий ток затухает с выделением потерь, так как его носителями являются нормально проводящие электроны. Этот ток не создает положительную намагниченность ВТСП. Тепловые потери компенсируются за счет источника питания внешнего стационарного магнитного поля.

Обратный процесс уменьшения внешнего стационарного магнитного поля происходит по сценарию прямого процесса, с той разницей, что центры пиннинга препятствуют выходу квантованных нитей магнитного потока из объема ВТСП. При нулевом значении внешнего стационарного магнитного поля ВТСП имеет положительную намагниченность.

Повторное намагничивание ВТСП или использование для этой цели более мощного источника внешнего стационарного магнитного поля принципиально не может увеличить положительную намагниченность. Она зависит только от критического тока  $J_c$  и (полу)толщины намагничиваемого образца. При этом значение магнитной индукции второго критического поля ВТСП не влияет ни на распределение магнитного поля в объеме образца, ни на его максимальную амплитуду.

Наряду со стационарными способами на практике получил распространение импульсный способ намагничивания объемных ВТСП. Для его реализации в установке для намагничивания, рассмотренной выше, требуется замена источника внешнего стационарного магнитного поля на источник внешнего импульсного магнитного поля. Способ импульсного намагничивания по технологии близок ко второму способу намагничивания. Однако для его осуществления требуется применять более мощный источник внешнего магнитного поля.

Общим недостатком трех вышеописанных способов намагничивания является невозможность получения равномерно распре-

деленного в объеме ВТСП магнитного поля. Это обусловлено тем, что намагничивание описанными выше способами осуществляется согласно «модели критического состояния», которая предопределяет возникновение пирамидальной формы остаточного магнитного поля в ВТСП (рис. 1, *a*). Из-за близкой к пирамидальной форме распределения остаточного магнитного поля средняя индукция захваченного центрами пиннинга магнитного потока существенно снижается, что ухудшает энергетические характеристики ВТСП. Кроме этого, источник внешнего стационарного или импульсного магнитного поля в установке для намагничивания должен создавать магнитный поток с существенно более высокой индукцией, чем индукция магнитного поля положительной намагниченности, достигаемой в ВТСП.

Следует отметить, что «модель критического состояния» разрабатывалась для низкотемпературных сверхпроводников. Критическая плотность тока  $J_c$  определяется значением магнитной индукции  $B$  в микроструктуре образца и не зависит от условий эксперимента. Она линейно зависит от температуры  $T$ . Согласно модели Бина положительная остаточная намагниченность образца зависит лишь от структуры (являющейся производной физических свойств и технологии) сверхпроводника, выражающейся через критическую плотность тока  $J_c$  и размеров образца (в случае пластины – толщины  $d$ ).

Если положительная остаточная намагниченность в образце мала по сравнению с приложенным магнитным полем  $B$ , то пространственные изменения магнитной индукции в объеме образца незначительны и поэтому практически не влияют на изменение критической плотности тока  $J_c$ .

## 2 Технологии намагничивания

Системы левитации, боковой стабилизации и возбуждения тягового линейного синхронного двигателя, выполненные на базе объемных ВТСП, используемых в качестве постоянных магнитов, можно активизиро-

вать в заводских условиях на специализированном стенде. Для этого необходимо произвести разборку магнитной системы, намагнитить ВТСП-элементы и снова собрать магнитную систему, не нарушая при этом криостатирование ВТСП-узлов. Такая технология намагничивания довольно трудоемка.

Намагничивание объемных ВТСП-систем левитации, боковой стабилизации и возбуждения тягового линейного синхронного двигателя без разборки можно производить непосредственно на месте штатной установки объемных ВТСП (метод *in-situ*). В зависимости от конструкции рассматриваемых систем метод *in-situ* реализуется тремя способами с помощью: (А) дополнительной намагничивающей обмотки, монтируемой на массивных ВТСП, (Б) путевой обмотки статора линейного синхронного двигателя или (В) специальных обмоток, размещенных на путевом полотне, например в депо.

Достоинствами способа (А) являются его универсальность и эффективность. Способ применим для любой конструкции систем левитации, боковой стабилизации и тяги. Процесс намагничивания кратковременен. Дополнительная намагничивающая обмотка может секционироваться таким образом, чтобы соответствовать напряжению источника постоянного тока. Намагничивание может быть всеобщим и избирательным. Недостаток способа – необходимость размещения дополнительной намагничивающей обмотки на ВТСП-полюсах.

Достоинством способа (Б) является возможность производить намагничивание с помощью штатной путевой статорной обмотки, соединяя ее по схеме, представленной на рис. 2. Для этого необходимо установить полюса по оси магнитного поля, создаваемого обмоткой статора. При этом в обмотке статора две любые фазы соединяются

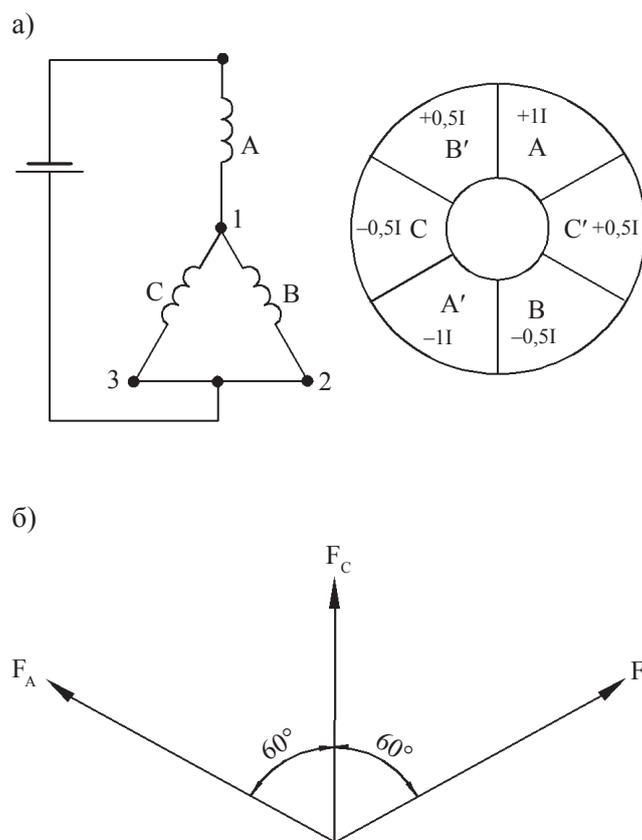


Рис. 2. Электрическая схема для намагничивания способом (Б) с помощью путевой обмотки статора

параллельно, а третья включается встречно. Подобное соединение обмотки статора с фазной зоной  $60^\circ$  создает суммарную намагничивающую силу, равную удвоенной намагничивающей силе обмотки статора (рис. 2, б):

$$F_p = F_c + (F_A + F_B) \cos 60^\circ.$$

Если  $F_A = F_B = F_c$ , то  $F_p = 2F_c$ .

Вектор суммарной намагничивающей силы  $F_p$  совпадает с осью фазы обратной последовательности (фаза С на рис. 2). Поскольку первоначальное положение ротора-бегуна произвольное и в общем случае ось полюсов не совпадает с вектором намагничивающей силы обмотки статора, то перед полным намагничиванием производится так называемое «установочное» намагничивание небольшим током для последующей точной установки полюсов ротора-бегуна относительно обмотки статора. При этом ток «установочного» намагничивания должен обеспечить превышение электромагнитного момента над маховым моментом тягового линейного синхронного двигателя.

Процесс намагничивания постоянным током, подающимся в обмотку статора, состоит, как правило, из трех циклов с интервалами, которые требуются для охлаждения обмотки статора. Длительность цикла намагничивания составляет 0,2–1 с. Полярность напряжения на зажимах обмотки статора должна оставаться неизменной.

К недостаткам способа можно отнести использование источника постоянного тока со сравнительно высоким напряжением – более 500 В.

Способ намагничивания (В) имеет сходство со способом размагничивания кораблей. Транспортное средство перемещается на специальный стенд намагничивания в депо. Стенд оборудуется стационарными обмотками различного назначения, которые обеспечивают намагничивание объемных ВТСП трех функциональных систем – левитации, боковой стабилизации и тяги.

Данный способ имеет недостаток, присутствующий способу (Б).

Общим недостатком всех вышеперечисленных способов является необходимость в мощном источнике питания и магнитной системе, с помощью которой намагничивается объемный ВТСП. При этом профиль магнитной индукции положительной остаточной намагниченности имеет пирамидальный вид, что значительно уменьшает полный магнитный поток, создаваемый намагниченным объемным ВТСП.

### 3 Метод «топологического» намагничивания

Проблема намагничивания стоит особенно остро для магнитолевитационных транспортных средств, где объемные ВТСП используются как постоянные магниты. Она связана с тем, что, во-первых, объемные ВТСП потенциально могут намагничиваться до полей с индукцией 10 Тл и более. Во-вторых, ВТСП-узлы в процессе эксплуатации требуют периодического намагничивания. Немалые технологические трудности вызывает сборка магнитных систем левитации, боковой стабилизации и тяги, так как намагниченность имеет место только у криостатированных ВТСП, находящихся в сверхпроводящем состоянии.

Излагаемая ниже технология намагничивания объемных ВТСП, теоретическим основанием которой служит «топологическая» модель, может применяться в процессе сборки бортовых магнитных систем «по месту» штатной установки. Потребность в такой технологии очевидна. Во время эксплуатации транспортного средства ВТСП-узлы размагничиваются из-за крипа магнитного потока, изменяющегося внешнего магнитного поля, прежде всего, перпендикулярного ВТСП узлу, а также по причине потери криогенного охлаждения, вследствие чего возникает необходимость производить разборку и сборку магнитных систем левитации, боковой стабилизации и тяги.

Топологический метод намагничивания состоит в непрерывном воздействии на

объемный ВТСП внешнего стационарного магнитного поля с малой индукцией в присутствии небольшого транспортного тока (несколько ампер). Магнитный поток «накачивается» в объем ВТСП вплоть до достижения в нем заданного значения магнитной индукции, которое зависит от его электрофизических свойств.

Схема «топологического» намагничивания ВТСП представлена на рис. 3. Она состоит из источника внешнего стационарного магнитного поля 8, источника постоянного тока с переключателем (клеммы 1–4) и намагничиваемого объемного ВТСП 9.

«Топологическое» намагничивание объемного ВТСП 9 осуществляется следующим образом. После подачи питания от источника постоянного тока плотность квантованных нитей магнитного потока 7 на нижнем крае объемного ВТСП 9 возрастает и возникает градиент магнитного поля, направленный к противоположному краю массивного ВТСП 9. Вследствие этого изменяется топо-

логия объемного ВТСП 9 и часть квантованных нитей магнитного потока 7, преодолевая пиннинг, перемещается в направлении, противоположном градиенту. Действительно, транспортный сверхпроводящий ток в объемном ВТСП 9 течет от электрода к электроду, расположенных на противоположных торцах объемного ВТСП 9. Взаимодействуя с квантованными нитями магнитного потока 7, этот ток создает силу Лоренца, которая перемещает квантованные нити магнитного потока 7 от нижнего края к верхнему. Движение квантованных нитей магнитного потока 7 происходит до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между силами пиннинга и Лоренца. После выключения источника питания, магнитный поток в объемном ВТСП 9 остается захваченным центрами пиннинга. Несмотря на то что центры пиннинга расположены в объеме ВТСП 9 хаотически, плотность магнитного потока в массивном ВТСП 9 будет более равномерной, чем в вышеописанных случаях намагничивания.

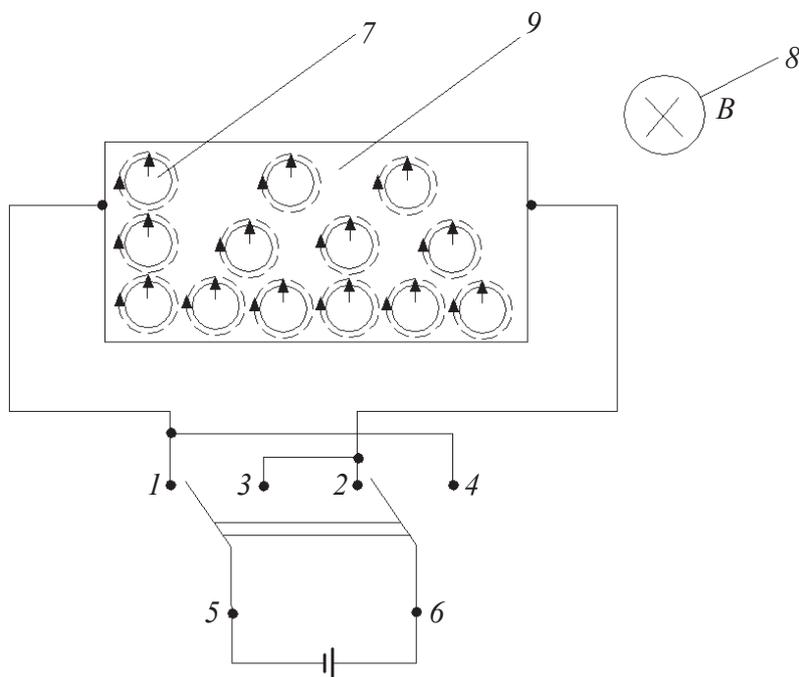


Рис. 3. Схема «топологического» намагничивания объемных ВТСП. 1, 2, 3, 4 – клеммы переключателя; 5, 6 – выводные клеммы внешнего источника постоянного тока; 7 – квантованная нить магнитного потока; 8 – источник внешнего стационарного магнитного поля; 9 – ВТСП. Все элементы схемы, кроме 9, располагаются вне криогенной зоны

Для более эффективного намагничивания объемного ВТСП в схеме на рис. 3 предусмотрена возможность периодического изменения тока с помощью переключателя (клеммы 1 и 2, 3 и 4). Поскольку градиент магнитного поля зависит от направления транспортного тока, квантованные нити магнитного потока, поочередно двигаясь от нижнего края к верхнему и наоборот, обеспечивают более равномерное распределение в объеме ВТСП остаточного магнитного поля.

Запасаемая в намагничиваемом ВТСП 9 электромагнитная энергия и возникающие в режиме вязкостного движения квантованных нитей магнитного потока 7 потери компенсируются источником постоянного тока. Таким образом, в процессе намагничивания объемного ВТСП 9 происходит преобразование электрической энергии источника постоянного тока, отвечающей за движение квантованных нитей магнитного потока 7, в электромагнитную, отвечающую за наличие положительной остаточной намагниченности ВТСП 9.

Ниже представлены основные данные объемных высокотемпературных сверхпро-

водников, намагниченных топологическим методом.

*Образец № 1:* керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , синтез в печи, воздушная среда,  $930 \div 950$  °С,  $2 \div 3$  ч.  $T_K = 90$  К,  $\rho(300\text{ К}) \approx 10^{-5}$  Ом·м. Параллелепипед  $50 \times 10 \times 4$  мм<sup>3</sup>.

*Образец № 2:* керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , легированная переходными металлами Nb, Ni, Eu.  $T_K = 92$  К. Параллелепипед  $50 \times 10 \times 4$  мм<sup>3</sup>.

*Образец № 3:* керамика  $Y_{0,9}Ca_{0,1}Ba_2Cu_4O_8$ .  $T_K = 102$  К. Критическая плотность тока  $J_C(4,2\text{ К}) = (1 \div 2) 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Полый цилиндр  $\varnothing_H = 86$  мм,  $\varnothing_B = 76$  мм, толщина  $d \approx 5$  мм.

*Образец № 4:*  $Nb_3Sn$ . Лента шириной  $b = 30$  мм, толщиной  $d \approx 30$  мкм с двусторонним медным покрытием толщиной  $\delta = 3$  мкм на сторону.

Для измерений остаточной намагниченности сверхпроводников использовались преобразователи Холла производства НПВ «Сенсор» (см. табл.). На рис. 4 сопоставлены графики намагниченности объемного ВТСП образца № 1. Они свидетельствуют о возможности достижения большего магнитного насыщения в объемных ВТСП, намагничиваемых топологическим методом.

ТАБЛИЦА. Параметры преобразователей Холла

Порядковый номер преобразователя Холла	1	2	3	4
Размеры преобразователя, мм	1×1×0,6	1×1×0,6	3×3×0,6	3×3×0,6
Размеры чувствительной зоны, мм	0,4×0,12	0,4×0,12	2×0,5	2×0,5
Входное сопротивление, Ом	4,3	3,4	9,6	8,4
Выходное сопротивление, Ом	6,4	5,6	6,1	6,5
Номинальный управляющий ток, А	0,1	0,1	0,1	0,1
Магнитная чувствительность при $B = 0,1$ Тл, мкВ/мТл	76,0	83,2	535,6	492,3
Диапазон измерений магнитной индукции, Тл	12	12	10	10
Диапазон температуры окружающей среды, К	1,5÷373	1,5÷373	50÷373	50÷373
Температурный коэффициент остаточного напряжения, мкВ/К	0,2	0,3	0,7	0,9
Остаточное напряжение, мВ	50	55	46	40

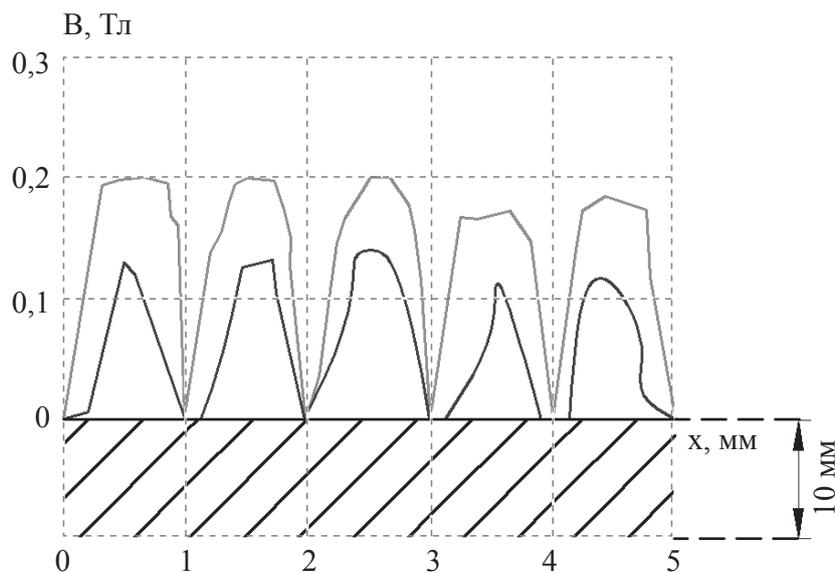


Рис. 4. Остаточное магнитное поле в объемном высокотемпературном сверхпроводнике (нижний график – результат намагничивания стандартным методом; верхний график – топологическим методом)

## Заключение

Главным достоинством технологии намагничивания объемных высокотемпературных сверхпроводников, теоретическим основанием которой служит «топологическая» модель, является возможность ее применения в процессе сборки и эксплуатации электротехнического устройства «по месту» (*in-situ*) штатной установки сверхпроводниковых узлов. Синтезированные объемные высокотемпературные сверхпроводники, будучи востребованными для систем возбуждения электрических машин, левитации кинетических накопителей энергии и высокоскоростного транспорта, являются коммерчески привлекательным продуктом. Топологический метод намагничивания и устройство для его реализации являются уникальным товаром,

в котором имеют потребность физические лаборатории и электротехнические производства сверхпроводниковых электрических машин.

## Библиографический список

1. **Электрофизические** проблемы использования сверхпроводимости / И. А. Глебов, Ч. Лаврик, В. Н. Шахтарин. – Л.: Наука, 1980. – 256 с.
2. **Исследования** намагничивания иттриевой ВТСП керамики / Н. Ю. Вандюк, М. В. Манзук // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. – Вып. 7. – СПб., 2006. – С. 139–143.
3. **Bulk** high temperature superconductors for magnet applications. M. Campbell, D. A. Cardwell. Cryogenics. 1995. N 37. P. 567–575.