

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 538.945.9

НАКАЧКА МАГНИТНОГО ПОТОКА ДИНАМИЧЕСКИ ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2023 г. Е. П. Красноперов^{1,*}, А. В. Прутков¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Krasnoperov_EP@nrcki.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 25.10.2023 г.

Описано устройство с динамическим вращением магнитного поля для питания сверхпроводящих систем. В отличие от устройств с механическим вращением монополярных постоянных магнитов в данном случае вращение поля осуществляется в статоре шагового двигателя, содержащем три пары электромагнитов, на которые подаются полупериоды тока трехфазной сети. В результате на трех соседних магнитах перемещается северный полюс, а на трех противоположных – южный полюс. Вблизи полюсов средних магнитов располагается сверхпроводящая трехслойная катушка. Концы катушки припаяны к обмотке сверхпроводящего рейстрекка. При движении магнитного поля поперек катушки формируются однополярные импульсы напряжения. Поскольку в цепь включены ленточная катушка и сверхпроводящий рейстрек, затухание тока мало, и происходит интегральное увеличение тока или так называемая накачка потока в магнитную систему.

DOI: 10.56304/S2782375X23030063

ВВЕДЕНИЕ

Подвод тока к сверхпроводящим магнитным системам (СМС) обычно осуществляют с помощью проводников (токовводов), изготавливаемых из меди и латуни. Поскольку сверхпроводящие устройства работают при низких температурах (4–70 К) и практически не выделяют тепла, то основные энергетические потери возникают как за счет теплопроводности токовводов, так и за счет тепла, выделяемого в них при пропускании тока. Наиболее радикально снижение тепловыделения достигается с помощью индуктивных методов питания, характеризующихся отсутствием проводов для прямой передачи тока. Индуктивные методы имеют два явных преимущества. Во-первых, нет прямой электрической связи СМС с источником питания и, следовательно, связанных с этим потерь тепла. Во-вторых, хотя СМС может потреблять большой ток, он может производиться без использования сильноточных источников питания, которые являются громоздкими и дорогими.

Метод питания короткозамкнутого сверхпроводящего соленоида путем накачки магнитного потока известен довольно давно. В [1] была предложена накачка потока в соленоид из Nb–Zr-провода. Накачка потока осуществлялась вращением постоянного магнита вблизи сверхпроводящей ниобиевой полосы. Для магнитов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) система с монополярным

магнитным ротором описана в [2]. Основным недостатком устройства с вращающимся ротором являются механические элементы – ротор. Поэтому подобные конструкции проблематично использовать в жидких криогентах (гелий, водород, азот).

Различные методы питания, в том числе индуктивные, изложены в обзоре [3]. Насосы потока актуальны для СМС, изготовленных из ВТСП с неизолированной обмоткой, особенно при так называемом косвенном охлаждении, когда СМС находится в вакууме и охлаждается криокулером. В этом случае источник питания может иметь низкое напряжение, поскольку индуктивность сверхпроводящей обмотки шунтирована межвитковыми контактами меди. Насосы потока позволяют в полной мере реализовать высокую токопроводящую способность ВТСП, дешево и просто создавать легкие и мощные магниты, двигатели и генераторы.

В [4] предложено устройство для накачки потока с динамическим вращением магнитного поля в статоре трехфазного двигателя. В настоящей работе приведены результаты исследований подобного устройства, представлена модель, описывающая его работу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Фотография устройства с динамическим вращением поля показана на рис. 1а. В статоре дина-

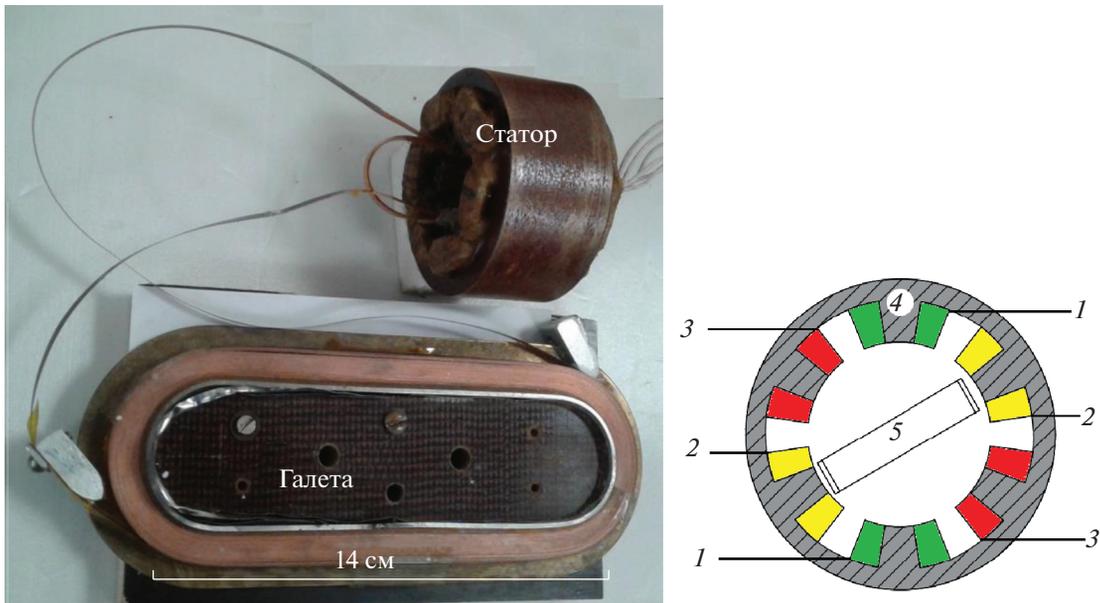


Рис. 1. Сверхпроводящая рейтрековая галета со статором динамического поля (а), разрез статора: 1–1, 2–2, 3–3 – обмотки магнитов М1, М2 и М3, 4 – корпус статора, 5 – сверхпроводящая катушка (три слоя) из ленты ВТСП.

мического поля (СДП) установлена трехслойная сверхпроводящая катушка из ленты ВТСП шириной 4 мм, имеющей изоляцию из каптона. Концы катушки припаяны к обмотке двойной рейтрековой галеты, которая выполнена из сверхпроводящей ленты, изготовленной в НИЦ “Курчатовский институт”. Обмотка галеты в отличие от катушки не имеет изоляции. В устройстве используется статор от шестиполюсного шагового двигателя ШД-5Д. Схематический чертеж статора показан на рис. 1б. Корпус статора (4) представляет собой толстостенный полый цилиндр из трансформаторной стали. Внутри цилиндра симметрично расположены три пары электромагнитов: 1–1 – обмотка магнита М1, 2–2 – обмотка магнита М2, 3–3 – обмотка магнита М3. Угол между осями магнитов 60°. Обмотки каждой пары магнитов включены последовательно так, чтобы при протекании тока они намагничивались в одном направлении. Обмотки магнитов присоединены через диоды к трехфазной сети по схеме “звезда”. Фазное напряжение составляло 5 В, частота 50 Гц. Фазы токов в катушках сдвинуты на 120°, что вызывает периодическое движение максимума поля от одного магнита к другому. Поскольку токи в обмотках текут только в одном направлении, то у трех магнитов периодически движется один полюс (северный), а у трех противоположных магнитов движется другой полюс (южный).

У полюсов среднего магнита М2 закреплена сверхпроводящая катушка (5), которая имеет три слоя изолированной сверхпроводящей ленты шириной 4 мм. Катушка (5) припаяна к ленточной неизолированной обмотке сверхпроводящей

рейтрековой галеты. Движение магнитного поля поперек оси катушки вызывает небольшую постоянную составляющую напряжения $\langle \epsilon \rangle$ на ее концах [3, 5]. Поскольку на противоположных частях магнитов всегда движутся разные полюса, напряжение на концах катушки (5) удваивается. Возникшее напряжение в замкнутой сверхпроводящей цепи вызывает рост постоянного тока в магните. Устройство накачки поля и рейстрек помещались в ванну с жидким азотом при $T = 77$ К, что обеспечивало сверхпроводимость катушки и рейстрека.

Эквивалентная схема динамической накачки потока изображена на рис. 2. СДП возбуждает ток в рейстрек с индуктивностью L . Из-за отсутствия изоляции индуктивность L определена только в сверхпроводящем состоянии, когда преобладают аксиальные токи. Обмотка рейстрека припаяна к катушке L_k в СДП, R_1 и R_2 – сопротивление контактов пайки, R_r – межвитковое сопротивление обмотки рейстрека. Последнее существенно при быстрых изменениях тока в цепи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры рейтрековой галеты с неизолированной обмоткой, которые трудно рассчитать, были предварительно измерены. Это индуктивность L и межвитковое сопротивление R_r , необходимые для анализа работы устройства. Измерения, проведенные при температуре азота $T = 77$ К по алгоритму [6], дали следующие результаты: индуктивность (в сверхпроводящем состоянии) $L = 5.9$ мГн. Поскольку обмотка рейстрека не

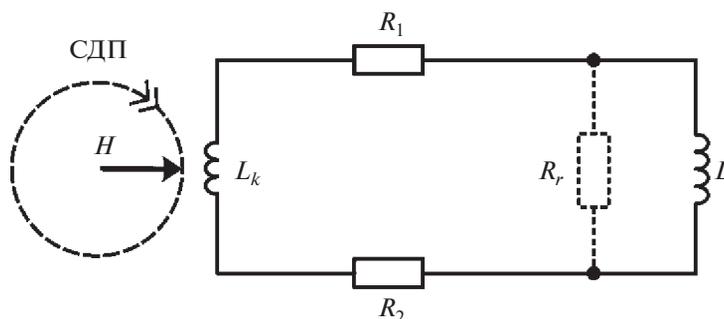


Рис. 2. Эквивалентная схема устройства динамической накачки потока: L – индуктивность рейстрекса, L_k – индуктивность катушки в СДП, R_1 и R_2 – сопротивление контактов пайки, R_r – межвитковое сопротивление обмотки рейстрекса.

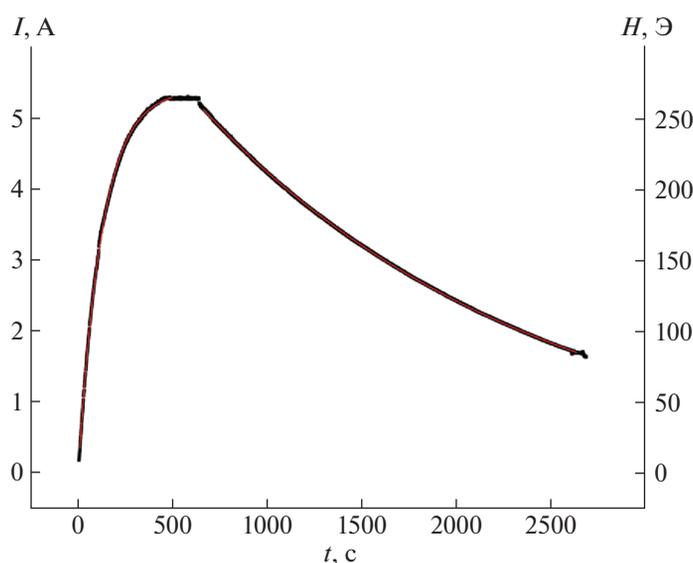


Рис. 3. Изменение тока в двойной рейстрексовой галете при накачке магнитного потока и релаксации после остановки накачки. Правая ось – магнитное поле у края рейстрекса.

имеет изоляции, то его осевое магнитное поле, создаваемое аксиальным током, устанавливается за конечное время $\tau = 34.7$ с. Это соответствует межвитковому сопротивлению $R_r = 0.170$ мОм. Фиксируя положение датчика Холла и измеряя установившийся в рейстрексе ток (при $t \gg \tau$), можно точно определить соотношение показаний датчика Холла к величине аксиального тока, текущего по сверхпроводящему слою обмотки.

Эксперимент по накачке потока представлен на рис. 3. Показано изменение во времени тока в рейстрексе (левая ось Y) и поля у рейстрекса (правая ось Y). На начальном участке (до 630 с) включена динамическая накачка (трехфазная сеть), и наблюдается рост тока. Затем сеть выключается, и ток снижается (релаксирует) из-за конечного сопротивления спаянных контактов. Затухание тока в замкнутой цепи L_k и L (правая ветвь на рис. 3)

хорошо описывается экспонентой $I = I_0 \exp(-\lambda t)$, где затухание $\lambda = (R_1 + R_2)/L = 5.63 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Соответственно $R_1 + R_2 = 3.3$ мкОм. Индуктивность L_k не учитывается в силу ее малости ($L_k \ll L$). Снижение тока происходит не только за счет потерь в R_1 и R_2 , но и из-за межвиткового сопротивления R_r и крипа [7]. Однако их влияние невелико и быстро исчезает, поскольку $R_1 + R_2 \ll R_r$.

В случае полной сверхпроводимости цепи очевидно, что максимальный ток в I_m ограничен критическим током сверхпроводящего слоя ленты. В цепи с сопротивлением паяных контактов (R_1 и R_2 как на рис. 2) скорость роста тока будет снижаться по мере увеличения тока. В начальный момент времени скорость роста тока V_0 пропорциональна вводимому за цикл потоку или усредненному ЭДС $dI/dt = V_0 \sim \langle \epsilon \rangle$. Рост тока в цепи вызывает падение

напряжения U на сопротивлениях спаев. Оно действует против ЭДС $\langle \epsilon \rangle$ и снижает скорость накачки. Когда напряжение достигнет $U = \langle \epsilon \rangle$, рост тока прекратится, имея максимальное значение $I_m = \langle \epsilon \rangle / (R_1 + R_2)$. В линейном приближении можно принять, что прирост тока будет $dI/dt = \alpha(I_m - I)$, где $\alpha = V_0/I_m$.

С учетом релаксации тока общее уравнение тока в цепи на рис. 2 можно записать в виде

$$\frac{dI}{dt} = \alpha(I_m - I) - \lambda \cdot I, \quad (1)$$

где $\alpha = V_0/I_m$ характеризует скорость накачки (роста тока), а λ – скорость релаксации (снижение тока). Межвитковое сопротивление R_r не влияет на величину тока в сверхпроводнике, а лишь задерживает его втекание, и им можно пренебречь. Учитывая, что в начальный момент $I = 0$, решение уравнения (1) имеет вид

$$I = \frac{\alpha}{\alpha + \lambda} \cdot I_m \cdot \{1 - \exp(-(\alpha + \lambda) \cdot t)\}. \quad (2)$$

Аппроксимируя восходящую (левую) ветвь зависимости на рис. 3 функцией (2), получили значение $\lambda^* = \alpha + \lambda = 79.3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Вычитая измеренную выше скорость релаксации λ , получаем значение скорости накачки тока $\alpha = 73.7 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

ВЫВОДЫ

Индуктивные, в том числе динамические, методы открывают возможность радикально снизить электрические потери, связанные с электрическими вводами. Описанный эксперимент демонстрирует применение динамически вращающегося трехфазного магнитного поля для питания сверхпроводящих систем с неизолированной обмоткой.

Авторы выражают благодарность Ю.Д. Куродову и Д.С. Яшкину за техническую помощь.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Beelen H., Viss A.J., Arnold P.N. et al.* // Phys. Lett. 1963. V. 7. № 3. P. 176.
2. *Mataira R., Ainslie M.D., Badcock R., Bumby C.W.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2020. V. 30. №. 4.
3. *Coombs T. A.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. P. 230902. <https://doi.org/10.1063/1.5098384>
4. *Красноперов Е.П., Никонов А.А.*, Устройство с динамическим вращением поля для питания сверхпроводящих систем. // Заявка на изобретение № 2023106836. 22.03.2023.
5. *Fu L., Matsuda K., Leclerc T. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2016. V. 29. №. 4. Art №. 04LT01.
6. *Красноперов Е., Гурьев В., Сычугов В. и др.* // Измерительная техника. 2021. №. 9. С. 41.
7. *Vinokur V.V., Feigel'man M.V., Geshkenbein V.B.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 915.