

04

Левитирующие состояния сверхпроводящих колец в поле закрепленного кольца с постоянным током

© А.М. Бишаев,¹ А.А. Буш,¹ М.Б. Гавриков,² А.И. Денисюк,¹
К.Е. Каменцев,¹ М.В. Козинцева,¹ В.В. Савельев,² А.С. Сигов¹

¹Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, 119454 Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047 Москва, Россия
e-mail: kozintseva@mirea.ru

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2013 г.)

Рассмотрена возможность создания плазменной ловушки, магнитная система которой образована сверхпроводящими катушками-кольцами, левитирующими в поле коаксиальной с ними закрепленной катушки-кольца с постоянным током. В однородном поле силы тяжести в приближении тонких колец получена аналитическая зависимость потенциальной энергии такой системы для одного либо двух левитирующих сверхпроводящих колец, захвативших заданные магнитные потоки, от их координат. Расчеты в системе Mathcad показали, что при определенных значениях параметров равновесные состояния такой системы существуют. Экспериментально наблюдались устойчивые к смещению вдоль общей оси левитирующие состояния одного сверхпроводящего кольца и двух сверхпроводящих колец в поле катушки-кольца с постоянным током в положениях, соответствующих расчетным значениям.

Для магнитных систем мультипольных ловушек-галадей [1] в [2] был осуществлен поиск состояний равновесия сверхпроводящих катушек-колец, которые левитируют в поле закрепленной сверхпроводящей катушки-кольца, устойчивых к смещению вдоль общей оси. Настоящая работа посвящена поиску состояний равновесия сверхпроводящих катушек-колец, которые левитируют в поле закрепленной несверхпроводящей катушки-кольца, устойчивых к смещению вдоль общей оси. Использование несверхпроводящей катушки позволяет осуществить управление и регулировку положениями равновесия левитирующих сверхпроводящих катушек за счет изменения силы тока в ней. Следует отметить, что в существующих экспериментальных установках по удержанию плазмы магнитным полем левитирующего диполя он левитирует либо в поле закрепленной сверху сверхпроводящей катушки (США, установка LDX [3]), либо в поле закрепленной сверху несверхпроводящей катушки (Япония, установка RT-1 [4]).

Следуя [2], теоретически была рассмотрена задача о равновесии в однородном поле силы тяжести одного либо двух сверхпроводящих колец в поле закрепленной катушки-кольца с постоянным током. Предполагалось, что радиус сечения каждого из колец (a_k) много меньше среднего радиуса соответствующего кольца (R_k). Рассматриваемая система состоит из двух или трех коаксиальных колец, лежащих в параллельных горизонтальных плоскостях, причем закрепленное кольцо является несверхпроводящим кольцом с током, а свободные кольца являются сверхпроводящими (рис. 1). Координаты отсчитываются от закрепленного кольца. Кольца нумеруются сверху вниз.

Для системы, изображенной на рис. 1, полагая, что магнитные потоки, захваченные сверхпроводящими кольцами (№ 2 и 3), остаются постоянными, а в

несверхпроводящем кольце (№ 1) ток поддерживается постоянным, имеем [5]

$$J_1 = \text{const},$$

$$L_{21}J_1 + L_{22}J_2 + L_{23}J_3 = \Phi_2 = \text{const}, \quad L_{ik} = L_{ki},$$

$$L_{31}J_1 + L_{32}J_2 + L_{33}J_3 = \Phi_3 = \text{const}, \quad (1)$$

где Φ_i — магнитный поток, захваченный i -м кольцом, L_{ik} — коэффициенты индукции, J_k — токи в кольцах. Используя формулы для коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции колец (при $a_k \ll R_k$) [2,5] и решив систему (1) относительно токов J_2 и J_3 , мы получаем для них выражения $J_k(x_2, x_3)$ как функции координат x_2 и x_3 свободных колец. Тогда выражение для потенциальной энергии системы $U(x_2, x_3)$ в однородном поле силы

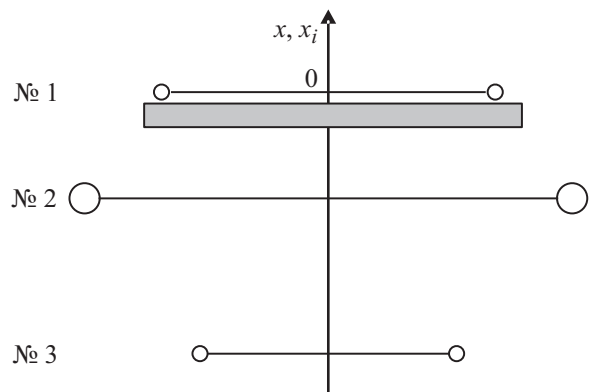


Рис. 1. Расположение колец: № 1 — закрепленное несверхпроводящее кольцо с током, № 2 и 3 — левитирующие сверхпроводящие кольца.

тяжести запишется в виде

$$U(x_2, x_3) = \frac{1}{2} (L_{22}J_2^2 + 2L_{23}J_2J_3 + L_{33}J_3^2) + m_2gx_2 + m_3gx_3, \quad (2)$$

где m_2 и m_3 — масса второго и третьего кольца соответственно.

Аналогично запишутся выражения для $U(x_i, x_k)$ для других вариантов конфигураций сверхпроводящих катушек-колец, левитирующих в поле закрепленной катушки-кольца с постоянным током.

Потенциальная энергия U данной конфигурации является многопараметрической зависимостью. В предварительных исследованиях с помощью вычислений, выполненных в системе Mathcad на нескольких конкретных примерах, было показано, что при определенных значениях этих параметров локальный минимум потенциальной энергии существует и для случаев, когда одно либо два сверхпроводящих кольца, захвативших заданные магнитные потоки, левитируют в поле закрепленной сверху катушки с постоянным током для магнитных потоков в них одного знака, и для случая, когда два сверхпроводящих кольца левитируют в поле расположенной между ними закрепленной катушки с током для магнитных потоков в них разного знака.

Для экспериментов по левитации было изготовлено несколько короткозамкнутых катушек-колец различного диаметра из ВТСП провода типа SCS4050-i-AP 2G HTS (фирма-изготовитель SUPER POWER) по специально разработанной технологической процедуре. Их постоянные времена, измеренные по кривой спада магнитного поля от времени, лежат в интервале 18–20 min. Дополнительно использовалось описанное в [2] ВТСП кольцо, изготовленное из предварительно синтезированного порошка ВТСП фазы $YBa_2Cu_3O_y$ с помощью метода MTG (melt textured growth) [6,7], с внешним и внутренним диаметром 31 и 15 mm соответственно, толщиной 3 mm и массой 9.7 g.

Поиск левитирующих состояний сверхпроводящих катушек-колец по соотношениям (1), (2) предполагает, что известны значения магнитных потоков, которые способны захватить эти ВТСП кольца. Захват потока ВТСП кольцом и катушками-кольцами из ВТСП ленты осуществлялся путем их охлаждения в магнитном поле соленоида до температуры жидкого азота. Затем поле выключалось, а захватившее магнитный поток кольцо (либо катушка-кольцо) перемещалось в экспериментальную ячейку для измерения магнитной индукции. По значениям магнитной индукции, измеренным на высоте 1 mm от поверхности колец, были рассчитаны магнитные потоки, захваченные ВТСП катушками-кольцами при различных токах в витках намагничивающего соленоида. Максимальное значение потока, захваченного катушкой-кольцом из ВТСП ленты со средним диаметром 60 mm, имеющей 20 витков, равно $1.18 \cdot 10^{-3}$ Wb, а катушкой-кольцом из ВТСП ленты со

средним диаметром 80 mm, имеющей 19 витков, — $1.28 \cdot 10^{-3}$ Wb. Заметим, что каждое из приведенных выше значений потока является заниженным, поскольку часть силовых линий замыкается вне области интегрирования. Несверхпроводящая катушка с постоянным током имела следующие параметры: средний радиус — 4.75 cm, средний радиус намотки — 0.6 cm, число витков — 400.

Расчеты в системе Mathcad потенциальной энергии магнитных систем из катушек-колец, отобранных для проведения эксперимента, в однородном поле силы тяжести позволили определить значения захваченных ВТСП кольцами потоков (в пределах экспериментально измеренного интервала их значений) и силу тока в закрепленной катушке-кольце, при которых левитирует либо одно, либо два ВТСП кольца. На рис. 2, а показана зависимость потенциальной энергии системы, состоящей из закрепленной обычной катушки-кольца с током и свободного ВТСП кольца для магнитных потоков в них одного знака, минимум которой соответствует равновесному левитирующему состоянию ВТСП кольца. Распределение эквипотенциалей на рис. 3, а соответствует случаю, когда два ВТСП кольца левитируют в поле расположенной сверху, закрепленной катушки с

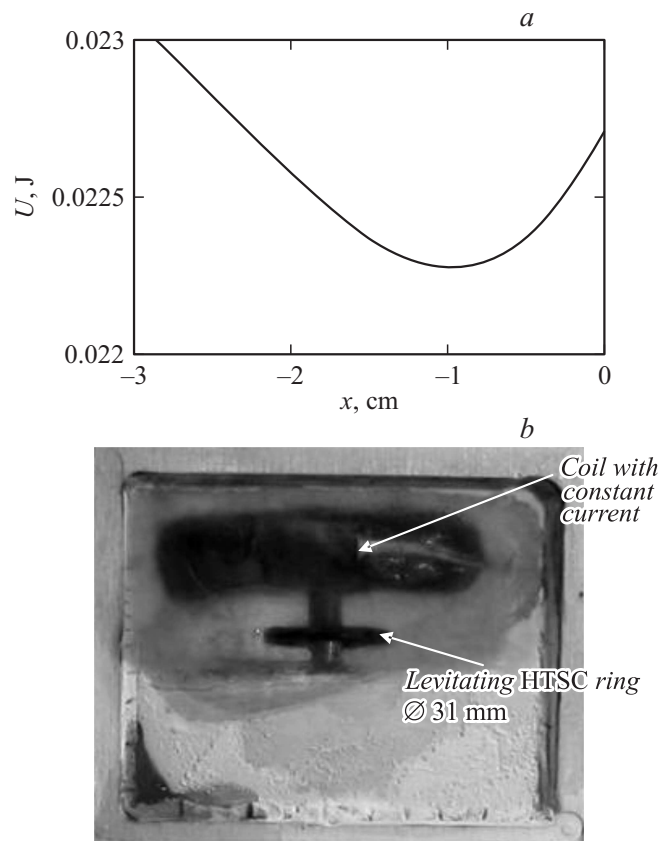


Рис. 2. а) — зависимость потенциальной энергии системы от координаты свободного ВТСП кольца, захватившего поток $3.18 \cdot 10^{-5}$ Wb, при токе 800 А в закрепленном кольце, минимум которой достигается при $x = -0.9$ cm; б) — фотография устойчивого левитирующего состояния ВТСП кольца в поле катушки с постоянным током, соответствующего расчетной кривой на рис. 2 а.

постоянным током для магнитных потоков в них одного знака. Распределение эквипотенциалей на рис. 4 дано для случая, когда два ВТСП кольца левитируют в поле расположенной между ними, закрепленной катушки с током для магнитных потоков в них разного знака.

Заметим, что размеры реальных ВТСП колец и катушек из ВТСП ленты, использованных при проведении экспериментов, не строго удовлетворяли предположению $a_k \ll R_k$, сделанному при выводе формул для коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции колец. Поэтому найденные из расчетов координаты их равновесных состояний могут отличаться от тех, которые реализуются экспериментально.

Для проведения экспериментов по левитации использовалось демонстрационное устройство, описанное в [2]. Существование равновесных состояний, найденных с по-

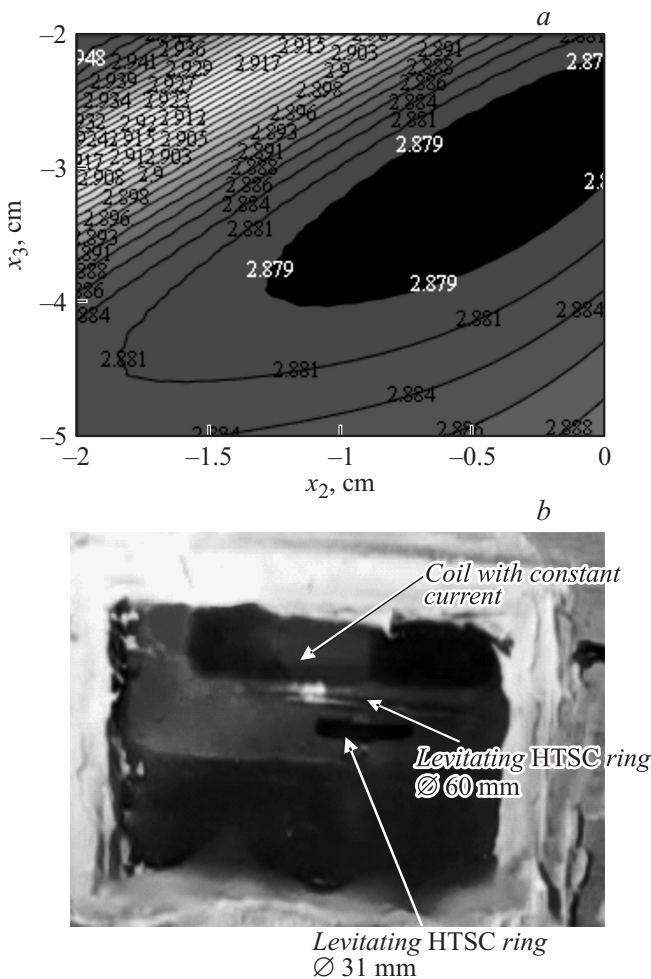


Рис. 3. а) распределение эквипотенциалей системы в зависимости от координаты x_2 левитирующего кольца из ВТСП ленты $\varnothing 60$ mm и от координаты x_3 левитирующего ВТСП кольца $\varnothing 31$ mm, захвативших потоки $7.0 \cdot 10^{-4}$ Wb и $3.18 \cdot 10^{-5}$ Wb соответственно, при токе 100 А в закрепленном кольце, минимум которого достигается при $x_2 = -0.4$ cm и $x_3 = -3.0$ cm; б) фотография устойчивого левитирующего состояния системы из ВТСП кольца $\varnothing 31$ mm и катушки из ВТСП ленты $\varnothing 60$ mm в поле катушки с постоянным током, соответствующего расчетному распределению на рис. 3, а.

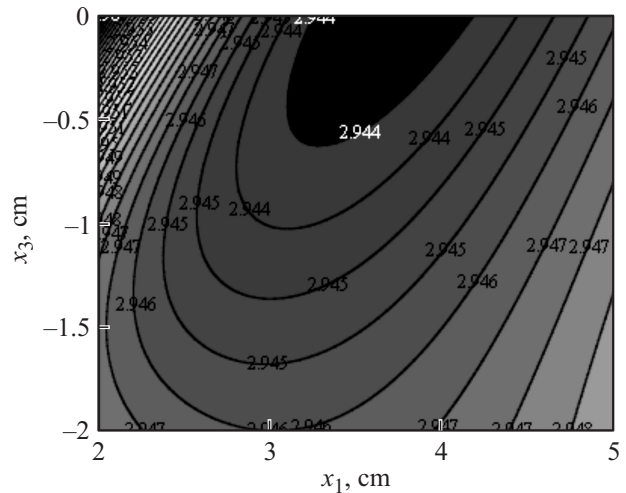


Рис. 4. Распределение эквипотенциалей системы в зависимости от координаты x_1 левитирующего кольца из ВТСП ленты $\varnothing 60$ mm и от координаты x_3 левитирующего ВТСП кольца $\varnothing 31$ mm, захвативших потоки $(-7.0 \cdot 10^{-4})$ Wb и $(-2.0 \cdot 10^{-5})$ Wb соответственно, при токе 100 А в закрепленном кольце с током, минимум которого достигается при $x_1 = 3.6$ cm и $x_3 = -0.2$ cm.

мощью расчетов, было подтверждено экспериментально. На рис. 2, б, 3, б приводятся фотографии левитирующих состояний, которые соответствуют распределениям потенциальной энергии на рис. 2, а, 3, а. При совпадающих по знаку потоках левитирующие состояния и одного, и двух колец были устойчивы как к смещению их плоскости в радиальном направлении, так и к повороту их плоскости вокруг произвольной горизонтальной оси. Такого типа устойчивость для двух левитирующих колец наблюдалась впервые и особенно важна для создания плазменных ловушек.

Экспериментально осуществленные левитирующие состояния сверхпроводящих колец, соответствующие расчетному распределению на рис. 4 (ток в закрепленном кольце противоположен по знаку току в левитирующих кольцах), характеризовались неустойчивостью по отношению к их смещениям в горизонтальной плоскости и к их повороту вокруг произвольной горизонтальной оси.

Таким образом, эксперименты показали, что для всех указанных выше случаев наблюдались устойчивые к смещению вдоль общей оси левитирующие состояния одного сверхпроводящего кольца и двух сверхпроводящих колец в поле катушки-кольца с постоянным током в положениях, соответствующих расчетным значениям.

Полученные результаты экспериментально и теоретически подтверждают возможность создания магнитной системы плазменной ловушки баллонного типа на основе квадрупольа, левитирующего в поле катушки-кольца с постоянным током.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и при частичной финансовой поддержке РФФИ, гранты № 13-08-00717 и 12-01-00071.

Список литературы

- [1] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Гавриков М.Б., Козинцева М.В., Липатов А.С., Савельев В.В., Сигов А.С., Смирнов П.Г., Тарелкин И.А., Храмов П.П. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 34–40.
- [2] Бишаев А.М., Буш А.А., Гавриков М.Б., Козинцева М.В., Каменцев К.Е., Савельев В.В., Сигов А.С., Денисюк А.И., Гордеев И.С. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 5. С. 61–68.
- [3] Boxer A.C., Bergmann R., Ellsworth J.L., Garnier D.T., Kesner J. et al. // Nature Physics. 2010. Vol. 6. P. 207–212.
- [4] Saitoh H., Yoshida Z., Morikawa J., Yano Y., Mizushima T., Kobayashi M. // J. Fusion Energy. 2010. Vol. 29. N 6. P. 553–557.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 171, 257.
- [6] Vanderbemden Ph., Cloots R., Ausloos M. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. N 02. P. 2308–2311.
- [7] Полуценко О.Л., Матвеев В.А., Нижельский Н.А. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1. С. 77–82.