

05; 12

© 1991 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ТЕЛ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОНТУРАХ

*А. А. Буряк, О. И. Горский, В. А. Дзензерский,
Э. А. Зельдина, В. И. Ляшенко*

Экспериментально исследована устойчивость статических магнитных подвесов на низкотемпературных сверхпроводящих токовых контурах. Обнаруженная в опытах «вязкая» левитация теоретически изучена на основе математической модели контуров с сосредоточенными параметрами. Показано, что медная матрица стабилизированного сверхпроводящего провода создает вязкие силы левитации.

Открытие Беднорцем и Мюллером [1] высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) позволило осуществить магнитную левитацию (опору и подвес) без применения криогенной техники. На ВТСП керамиках был реализован подвес постоянными магнитами полезных грузов массой несколько сот грамм. Практическое применение ВТСП материалов ограничено их критическими параметрами. Поэтому представляет интерес исследование возможности применения низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) для магнитной левитации.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое изучение устойчивости статических магнитных подвесов на НТСП контурах.

Известно [2, 3], что устойчивое равновесие при статическом взаимодействии магнитных систем возможно при условии сохранения магнитного потока. Исследование магнитного подвеса проводилось на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1, а.

Установка состоит из опорной рамы 1, на которой жестко закреплен НТСП магнит 2, имеющий в центральной части сквозное отверстие 3. Над рамой установлена балка 4, на которой смонтирован привод 5 с реверсивным электродвигателем 6. К концу троса 7 присоединен динамометр 8, второй вывод которого проходит к магниту 9. На магните 9 укреплен угломер 10. Трос 11 соединен со сторонами чаши 12 для тарированных грузов. Магнит снабжен в нижней части по центру кронштейном 13 для крепления тарированных грузов 14. Привод 5 поднимает или опускает НТСП магнит. С помощью динамометра определяется сила взаимодействия между НТСП магнитами в вертикальном направлении. Измерение боковых усилий и перемещений проводится при нагружении чаши 12.

Сверхпроводящий магнит 9 состоит из НТСП катушки с СП ключом 1 и гелиевой емкости 2 (рис. 1, б). Гелиевая емкость на конических опорах 3 жестко закреплена внутри наружного корпуса 4 (азотный экран). Азотная емкость 5 теплоизолирована слоем 6. Гелиевый экран 7 охлаждается парами гелия, проходящими по змеевику 8 через дренажную трубку 9. Азотная емкость закреплена на наружном корпусе на распорках 10. С внутренней и наружной сторон гелиевого экрана расположены слои алюминизированной пленки и прокладочного материала ЭВТИ-7. Масса сверхпроводящего магнита 16 кг, диаметр катушки 0,3 мм, расстояние от торцов катушки до наружного корпуса 0,01 м, высота криостата 0,130 м, количество опор 9.

Предварительно охлажденный НТСП магнит 2 запитывался от внешнего источника и на протяжении всего времени эксперимента работал в принудитель-

ном режиме. Максимальная магнитодвижущая сила (МДС) магнита 2 составляла 350 кА. В магнит 9, также предварительно приведенный в рабочее состояние, заводился ток силой до 10 А (МДС 2.4 кА) при разомкнутом СП ключе. Ток имел такое же направление, как и ток в магните 2, и по величине был подобран так, чтобы сила взаимного притяжения токов компенсировала вес магнита 9. После прекращения переходных процессов в контурах магнит 9 переводился в короткозамкнутое состояние замыканием СП ключа. При этом происходил захват СП контуром 9 магнитного потока от контура 2, в результате чего магнит 9 левитировал на расстоянии до 0.1 м от магнита 2.

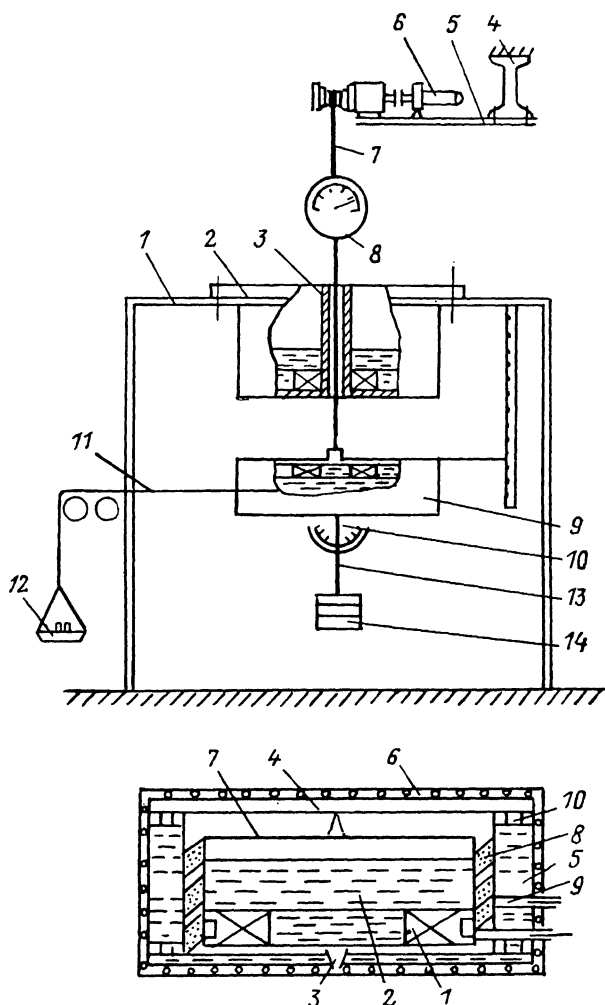


Рис. 1. Экспериментальный стенд.

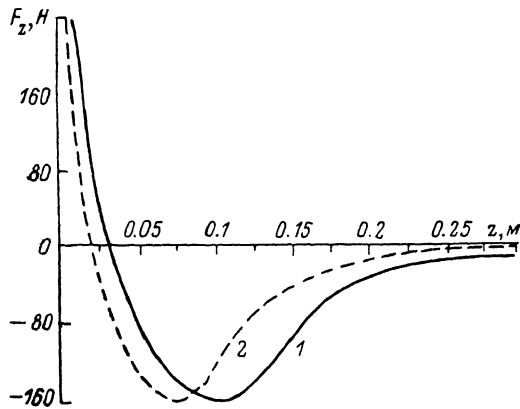
а — схема установки для измерения сил, б — схема криостата сверхпроводящего магнита.

Измеренная в эксперименте сила вертикального взаимодействия между магнитами 2 и 9 представлена кривой 1 на рис. 2. Экспериментальные данные сопоставлены с расчетными (рис. 2, кривая 2), полученными на основе представления о магнитной потенциальной яме [2] в системе с сосредоточенными параметрами. Сила взаимодействия рассчитывалась согласно закону Ампера

$$F_z = I_1 I_2(z) \frac{dM_{12}}{dz},$$

где I_1 — ток в стационарном контуре 2, $I_2(z)$ — текущее значение персистивного тока в левитирующем контуре 9, M_{12} — взаимная индуктивность двух контуров.

Анализ полученных результатов показал, что расхождение экспериментальных и расчетных данных велико. На наш взгляд, расхождение расчетных и экспериментальных данных объясняется особенностями намагничивания сверхпроводника. Величина персистивного тока в левитирующем контуре, как и величина внешнего магнитного поля, создаваемого стационарным магнитом, являются докритическими для данного типа сверхпроводящего провода. Распределение тока, как и распределение магнитного поля в сверхпроводящей обмотке, должно быть, согласно модели Бина, существенно неоднородным [4] и зависит от предыстории перехода в новое токовое и магнитное состояние. В таком случае некорректно использование сосредоточенных электрических параметров взаимодействующих контуров. Этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях. Кроме того, в эксперименте обнаружено, что при отклонении магнита 9 от равновесного положения наблюдается его перемещение, подобное движению тела в вязкой среде. Отметим, что аналогичные эффекты наблюдались на ВТСП керамиках [5]. В ВТСП керамиках это явление объясняется в рамках модели Бина силами пиннинга [5]. Для НТСП магнитов, согласно [6], такое объяснение не имеет места. На наш взгляд, это явление может быть обусловлено потерями энергии в медной матрице Nb—Ti провода, который был использован в экспе-



рименте. Для НТСП магнитов, согласно [6], такое объяснение не имеет места. На наш взгляд, это явление может быть обусловлено потерями энергии в медной матрице Nb—Ti провода, который был использован в экспе-

Рис. 2. Зависимость силы вертикального взаимодействия между магнитами от расстояния.

1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета.

рименте. Масса медной матрицы составляла 95 % от общей массы сверхпроводника. Кроме того, диссипация энергии может также происходить в металлических частях левитирующего магнита 9.

Для анализа обнаруженной в эксперименте «вязкой» левитации НТСП магнита было проведено математическое моделирование происходящих процессов. Расчетная схема включала следующие допущения: НТСП магниты представляются системой контуров с сосредоточенными параметрами, в качестве электрического контура рассматривается квадратная рамка.

Рассчитывались колебания левитирующего магнита в системе из двух и трех магнитовзаимодействующих контуров. Взаимодействие двух контуров моделировало эксперимент при отсутствии вязкой левитации, система из трех контуров учитывала диссипацию энергии в медной матрице сверхпроводника.

Система уравнений, описывающих вертикальное взаимодействие трех контуров, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(L_3 I_3 + M_{23} I_2 + M_{13} I_1) + R I_3 &= 0, \\ L_2 I_2 + M_{12} I_1 + M_{23} I_3 &= L_2 I_{20}, \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} &= mg - I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{dz} + I_2 I_3 \frac{dM_{23}}{dz}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь m — масса левитирующего магнита; z — координата его центра масс; I_{20} — начальное значение персистивного тока в левитирующем контуре; I_3 — ток, наводимый в контуре, имитирующем медную матрицу НТСП магнита; L_2 , L_3 — собственная индуктивность соответственно второго и третьего контуров; R — активное сопротивление контура 3.

Взаимная индуктивность и индуктивность квадратной рамки определялась по формулам [6]

$$M(x) = \frac{2\mu_0}{\pi} \left[a \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + x^2}}{a + \sqrt{2a^2 + x^2}} \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{x} + \sqrt{2a^2 + x^2} - 2\sqrt{a^2 + x^2} + x \right],$$

$$L = 2\mu_0 a + 8\mu_0 a \left[\ln \frac{2a}{\delta(1 + \sqrt{2})} + \sqrt{2} - 2 \right],$$

где x — расстояние между контурами, a — сторона квадрата, δ — диаметр проволоки контура, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Для взаимодействия двух контуров ($I_3 = 0$) система уравнения (1) упрощается. Первое уравнение в системе (1) тождественно равно нулю.

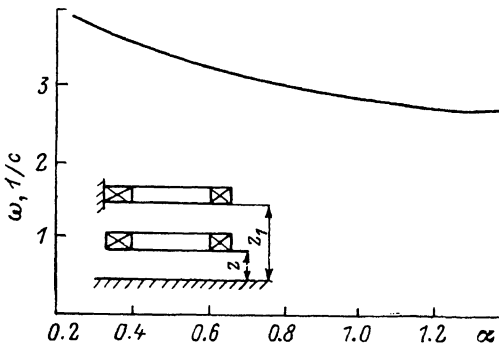


Рис. 3. Зависимость частоты свободных колебаний в двухконтурной системе от α .

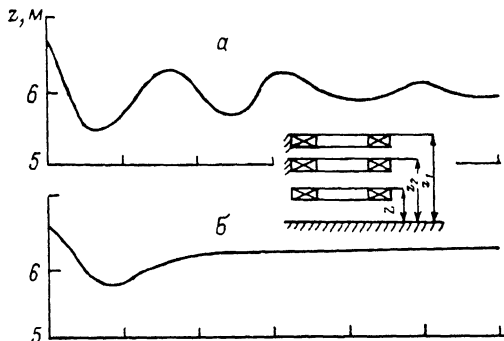
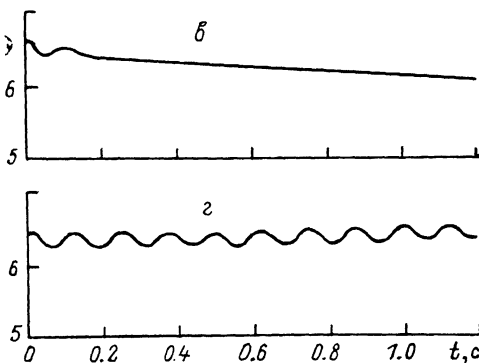


Рис. 4. Изменение амплитуды колебаний от времени при различных значениях сопротивления ($z_1 = z_2 = 0.1$ м).

Рис. 4. Изменение амплитуды колебаний от времени при различных значениях сопротивления ($z_1 = z_2 = 0.1$ м).

R , Ом: $a - 6.3 \cdot 10^{-4}$, $b - 7.9 \cdot 10^{-5}$, $c - 7.6 \cdot 10^{-6}$, $d - 0$.

→



Уравнения (1) дополняются начальными условиями

$$z(t=0) = z_0 + z_{01},$$

$$\frac{dz(t=0)}{dt} = 0,$$

$$I_3(0) = 0. \quad (2)$$

Здесь z_0 — координата равновесного положения левитирующего магнита, определяемая из решения трансцендентного уравнения

$$mg = I_1 \cdot I_2 \frac{dM_{12}(z_1 - z_0)}{dz},$$

z_{01} — отклонение левитирующего магнита от равновесного положения, z_1 — координата стационарного магнита.

Система уравнений (1) была проинтегрирована на ЭЦВМ БЭСМ-6 методом Рунге—Кутты. Координата равновесного положения z_0 определялась методом деления отрезка пополам.

На рис. 3 показана зависимость частоты свободных колебаний в двухконтурной системе от безразмерного параметра $\alpha = (I_1 I_2 \mu_0) / (mg)$. Величина параметра α жестко ограничена условием равновесия левитирующего магнита. В рассмотренном эксперименте $\alpha = 1.5$. Отметим, что частота колебаний в двухконтурной системе слабо зависит от геометрических размеров взаимодействующих контуров

(безразмерный параметр $\beta = (I_1^2 \mu_0 z_1) / (L_2 mg)$) и составляет величину порядка нескольких герц.

Введение в систему контура \mathcal{Z} , жестко закрепленного или совмещенного с левитирующим магнитом, дает возможность демпфировать низкочастотные ко-

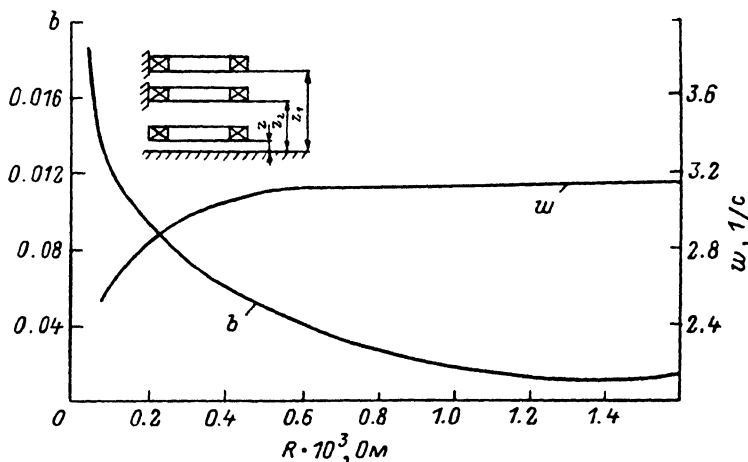


Рис. 5. Зависимость частоты и декремента колебаний от сопротивления.

лебания. Эволюция колебаний левитирующего магнита в зависимости от сопротивления R демпфирующего контура представлена на рис. 4. Эта серия расчетов проводилась при следующих значениях величин: $I_1=80$ А, $I_{20}=10^4$ А, $m=0.1$ мг, $z_1=0.1$ м, $z_2=0.1$ м, $z_{01}=0.005$ м, $a=0.1$ м, $\delta=0.001$ м.

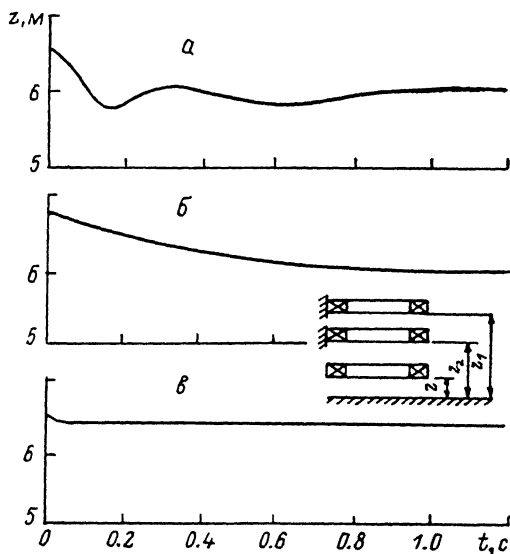


Рис. 6. Изменение амплитуды колебаний от времени при различных значениях сопротивления ($z_1=0.1$ м, $z_2=0.08$ м).

R , Ом: а — $7.9 \cdot 10^{-4}$, б — $7.9 \cdot 10^{-3}$, в — $7.9 \cdot 10^{-2}$

С ростом сопротивления демпфирующего контура декремент затухания уменьшается (рис. 5). В предельном случае ($R=0$) наблюдается изменение характера колебательного процесса. Это связано с тем, что левитирующий магнит переходит в новое положение равновесия, а избыточная потенциальная энергия — в кинетическую. При этом частота колебаний возрастает. Перемещение демпфирующего контура (рис. 6) позволяет уменьшить значение R , с которого начинается демпфирование вследствие увеличения потокоцепления контуров. Рас-

четы, представленные на рис. 6, проведены при тех же значениях параметров I_1 , I_{20} , m , a , δ , z_1 , z_{01} , но при $z_2=0.08$ м. Таким образом, наблюдаемая в эксперименте вязкая левитация может быть обусловлена демпфирующими свойствами медной матрицы сверхпроводящего провода.

Полученные результаты позволяют также оценить возможность использования демпфирующих контуров в области азотных температур, что имеет существенное значение при исследовании левитации на ВТСП керамиках. Медные контуры, сопротивление которых при $T=77$ К уменьшается в 7 раз, согласно полученным оценкам, имеют хорошие демпфирующие свойства.

Список литературы

- [1] *Bedhorz J. G., Muller K. A.* // Zeitschrift Physic. В. 1986. Vol. 64. P. 189—193.
- [2] *Козорез В. В.* Динамические системы магнитовзаимодействующих тел. Киев: Наукова думка, 1981. 140 с.
- [3] *Тортон Д.* // Наземный транспорт 80-х годов. М.: Мир, 1974. С. 98—113.
- [4] *Глебов И. А., Лаврик И., Шахмарин В. Н.* Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Л.: Наука, 1980. 255 с.
- [5] *Davis L. C., Logothetis E. M., Soltis R. E.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64 (8). N 15. P. 4212—4218.
- [6] *Калантаров М. Л., Цейтлин Л. Л.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 487 с.

ИГТМ

Отделение физико-технических проблем транспорта
на сверхпроводящих магнитах «ТРАНСМАГ» АН УССР
Днепропетровск

Поступило в Редакцию
21 марта 1990 г.