

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

531.383

МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС С ДИСКОВЫМИ МОНОДОМЕННЫМИ ВТСП ЭЛЕМЕНТАМИ НА РОТОРЕ*

Канд. техн. наук, доц. О.Л. ПОЛУЩЕНКО, д-р техн. наук, проф. В.А. МАТВЕЕВ,
канд. техн. наук, Н.А. НИЖЕЛЬСКИЙ

На основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) сконструирован и изготовлен макет магнитного подвеса, обеспечивающий центрирование ротора в аксиальном и радиальном направлениях. Магнитная система содержит 7 монодоменных ВТСП дисков общей массой 90 г и статор с кольцевыми постоянными NdFeB-магнитами. Измерены нагрузочные и жесткостные характеристики подвеса. Максимальная нагрузочная способность подвеса в аксиальном направлении — 85 Н, в радиальном — 190 Н, аксиальная жесткость — 102 Н/мм, радиальная жесткость — 165 Н/мм, рабочий магнитный зазор — 1 мм. Габаритные размеры подвеса: диаметр — 130 мм, толщина 30 мм, масса — 1,8 кг

The radial-axial superconducting bearing prototype was designed, fabricated and tested. The presented HTS bearing design provides stable suspension of the rotor in axial and radial directions. Magnet bearing system contains the rotor with 7 HTS disks of total mass 90 g and stator with annular permanent NdFeB magnets. Load and stiffness characteristics are measured. Maximal load capacity, in axial direction — 85 N, in radial — 190 N, axial stiffness — 102 N/mm, radial stiffness — 165 N/mm, magnet air gap — 1 mm. Overall bearing dimensions: diameter is 130 mm, thickness — 30 mm, and mass — 1,8 kg.

Магнитные подвесы на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), используемые в качестве бесконтактных опор в механизмах с высокой скоростью вращения, имеют значительные преимущества по сравнению с традиционными опорами: нет механического контакта, релаксационных явлений, нулевые затраты энергии на функционирование, высокая надежность и долговечность, обусловленные отсутствием системы управления.

Основой применения ВТСП в магнитных подвесах является особенность их взаимодействия с полем постоянных магнитов (ПМ), которая заключается в возникновении магнитной потенциальной ямы при охлаждении помещенного в магнитное поле высокотемпературного сверхпроводника до температуры ниже критической (~90 К), обычно до температуры жидкого азота (~77 К) (режим охлаждения FC). Охлажденный в поле постоянных магнитов сверхпроводник образует с магнитами систему, связанную воедино магнитным полем, и любое смещение сверхпроводника или магнита, приводящее к изменению величины вектора магнитного потока через объем сверхпроводника, вызывает силу сопротивления смещению, которая стремится вернуть систему в исходное состояние, что и обеспечивает ее устойчивость. Сверхпроводники являются эффективным сред-

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и программой Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006—2008 г.)», проект № РНП.2.1.2.2481.

ством пассивной стабилизации магнитных систем и позволяют реализовать устойчивый магнитный подвес твердого тела [1—5].

Ниже приводятся результаты исследования силового взаимодействия монодоменных ВТСП элементов с градиентным магнитным полем с целью оптимизации магнитной системы подвеса. Представлена конструктивная схема макета ВТСП магнитного подвеса, работающего в режиме FC, и исследованы его нагрузочные и жесткостные характеристики.

1. ВТСП-элементы

ВТСП-элементы изготавливали из квазимонокристаллической (монодоменной) иттрий-бариевой керамики. В качестве исходного материала выбран порошок состава $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x} + 25\% \text{ мол. } Y_2O_3 + 1\% \text{ вес. } CeO_2 + 0,066\% \text{ вес } ZnO$. Синтез порошка проводили из оксидов: Y_2O_3 — 99,9%, CuO — 99%, $BaCO_3$ — 99,5% и CeO_2 — 99,98%. Из синтезированного порошка прессовали цилиндрические заготовки диаметром 35 мм и высотой 24 мм, а затем спекали и подвергали изотермической направленной кристаллизации с использованием затравок. Направленную кристаллизацию заготовок осуществляли в камерной печи (размер рабочего пространства $230 \times 230 \times 150 \text{ мм}^3$) с однородным температурным полем в рабочей зоне, отклонение температурного профиля не превышало $0,5^\circ\text{C}$. В качестве затравки использовали кристалл из $SmBa_2Cu_3O_7$ размером $3 \times 4 \times 2 \text{ мм}^3$, который размещали на верхней поверхности заготовки по плоскости 001. Полученные квазимонокристаллы после механической обработки имели размеры: диаметр 30 мм и высота до 16 мм. Для использования в подвесе из них вырезали диски диаметром 28 мм и высотой 4 мм.

Определяющим свойством сверхпроводников при конструировании большинства устройств и механизмов, функционирование которых основано на эффектах сверхпроводимости, является их способность захватывать (замораживать) магнитный поток и удерживать его в сильных магнитных полях. Измерения индукции захваченного магнитного потока над поверхностью образцов, охлажденных в магнитном поле 1,5 Тл до температуры 77 К, проводили методом картографирования и автоматической регистрации с помощью датчика Холла осевой компоненты замороженного магнитного поля после снятия намагничивающего внешнего поля. Максимальная индукция замороженного магнитного поля при измерениях на верхней и нижней плоскостях образцов составила 1 Тл (рис. 1) при суммарном зазоре 0,8 мм между шлифованной поверхностью образца и активной зоной датчика Холла (с учетом толщины датчика 0,5 мм). Видно, что распределение поля над поверхностью образца диаметром 30 мм и высотой 15 мм осесимметрично, непрерывно и не имеет провалов, что указывает на однородность, отсутствие трещин, слабых связей и его квазимонокристаллическую структуру.

С целью оптимизации магнитной системы подвеса изучали взаимодействие сверхпроводниковых элементов с магнитным полем на стенде, моделирующем в ней силовые процессы. Схема измерения приведена на рис. 2. Четыре постоянных магнита размером $40 \times 8 \times 7 \text{ мм}^3$ закреплены на магнитопроводах и формируют высокоградиентное знакопеременное магнитное поле в зазоре (градиент $0,132 \text{ Тл/мм}$, высота зазора $H = 6 \text{ мм}$). Максимальные значения индукции по абсолютной величине находятся на расстоянии $\pm 7,5 \text{ мм}$ от центра ВТСП-диска и составляют $0,65 \text{ Тл}$ для $H = 6 \text{ мм}$. В центр магнитного зазора поочередно помещали ВТСП-диски толщиной 4...10 мм и охлаждали жидким азотом. Зазор между поверхностями магнитов и ВТСП-элементов равен 1 мм. Нагрузка прикладывалась к диску в радиальном (P1) и аксиальном (P2) направлениях. Смещение регистрировалось на экране посредством

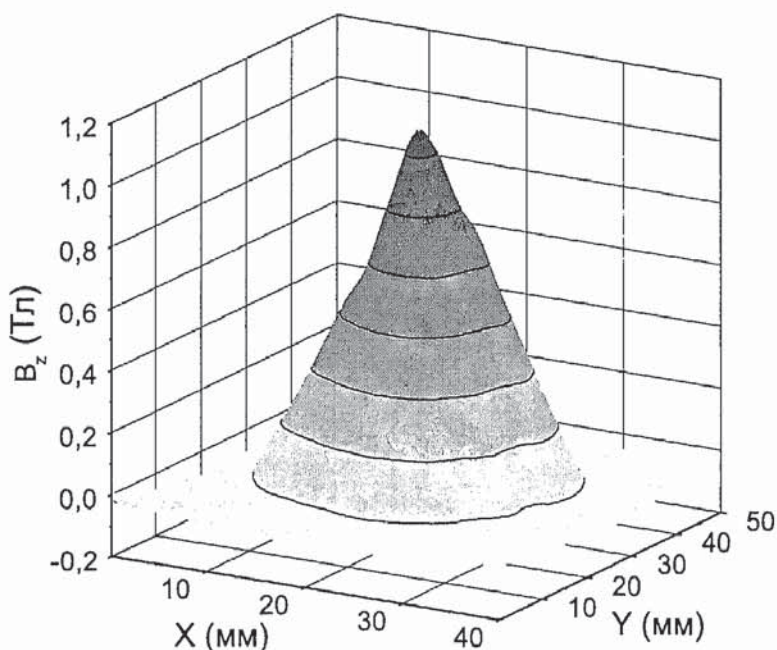


Рис.1. Распределение индукции захваченного магнитного поля над поверхностью ВТСП-цилиндра диаметром 30 мм и высотой 15 мм при температуре 77 К

отраженного лазерного луча. Типичная силовая зависимость для ВТСП диска (рис. 3) имеет гистерезисный характер, причем нагрузочная способность в радиальном направлении выше, чем в осевом — 15 Н и 7 Н соответственно. Зависимость жесткости $K = dP/dx$ в радиальном и аксиальном направлении от толщины ВТСП дисков показана на рис. 4. С увеличением толщины дисков жесткость в радиальном направлении уменьшается, а в осевом увеличивается и имеет равные значения при толщине диска 9,5 мм.

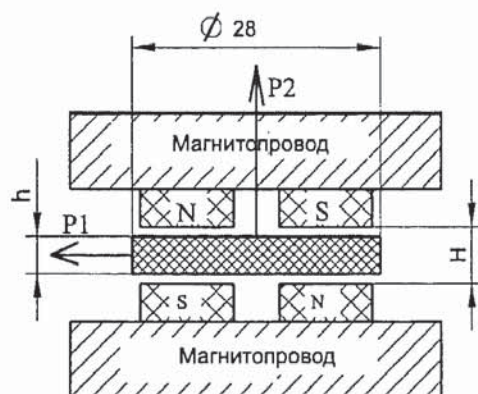


Рис. 2. Схема измерения силовых характеристик ВТСП-элементов

2. Конструктивная схема подвеса

Конструктивная схема макета магнитного подвеса и фотография его компонентов представлены на рис.5 и 6. На валу ротора, изготовленного из алюминиевого сплава, закреплен диск диаметром 90 мм и толщиной 4 мм, в котором смонтировано 7 дисковых ВТСП-элементов диаметром 28 мм и толщиной 4 мм (общая масса 90 г), концентрически расположенных вокруг его оси. Статор состоит из двух пар постоянных магнитов,

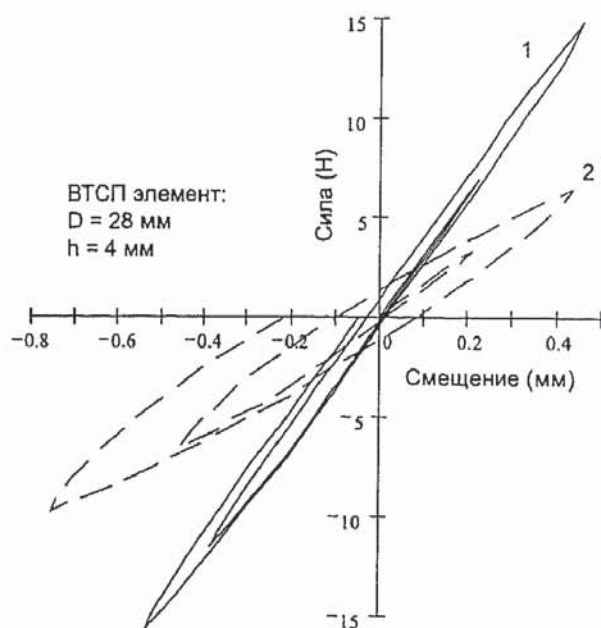


Рис. 3. Зависимость радиальной (1) и осевой (2) силы от смещения ВТСП-элемента в градиентном магнитном поле. Высота магнитного зазора 6 мм, максимальное поле 0,65 Тл, максимальный градиент 0,132 Тл/мм, $T = 77$ К

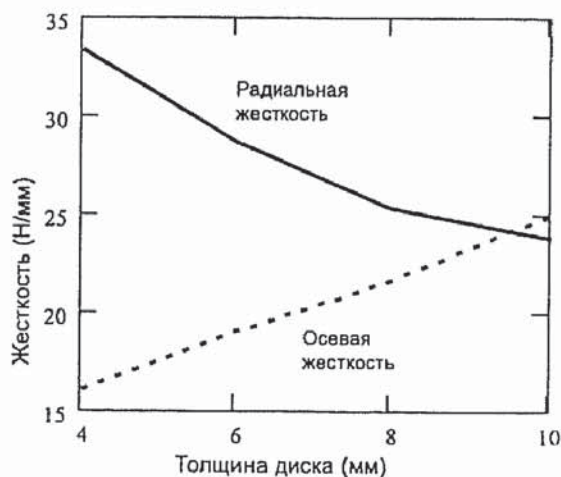


Рис. 4. Зависимость жесткости от толщины ВТСП-дисков. Размеры дисков: диаметр 28 мм, толщина 4 мм, магнитная индукция в зазоре $B_{\max} = 0,65$ Тл.

разделенных между собой концентрическими кольцевыми зазорами и установленных на пластинах, закрепленных в корпусе подвеса. Пластины выполнены из электротехнической стали и выполняют роль магнитопроводов. Кольцевые постоянные магниты ($D \ddot{=} 92$ мм, $d = 68$ мм, $h = 7$ мм и $D = 64$ мм, $d = 44$ мм, $h = 7$ мм) из сплава Nd-Fe-B с индукцией на поверхности 0,4 Тл формируют в зазоре осесимметричное знакопеременное поле. Конфигурация магнитного поля в радиальном направлении описывается уравнением $B = -0,69 \sin(0,205x)$. Максимальное абсолютное значение поля 0,69 Тл и соответствующий ему градиент $\Delta B / \Delta r = 0,136$ Тл/мм создается в зазоре высотой 6 мм и формируется между плоскостями внутренних и внешних колец на расстоянии $x = \pm 7,8$ мм (рис. 7). Точка 0 на графике соответствует средней линии кольцевого зазора между постоянными магнитами. Для получения наибольшей жесткости подвеса ВТСП-диски размещаются в зазоре в области максимального градиента. Следует отметить, что при сме-

щении ротора в осевом направлении взаимодействуют с магнитным полем все 7 ВТСП-элементов, в то время как при радиальном смещении те элементы, которые смещаются вдоль градиента магнитного зазора, не участвуют в силовом взаимодействии. Поэтому в конструкции использованы диски толщиной 4 мм, обладающие наибольшей жесткостью 33,3 Н/м в радиальном направлении.

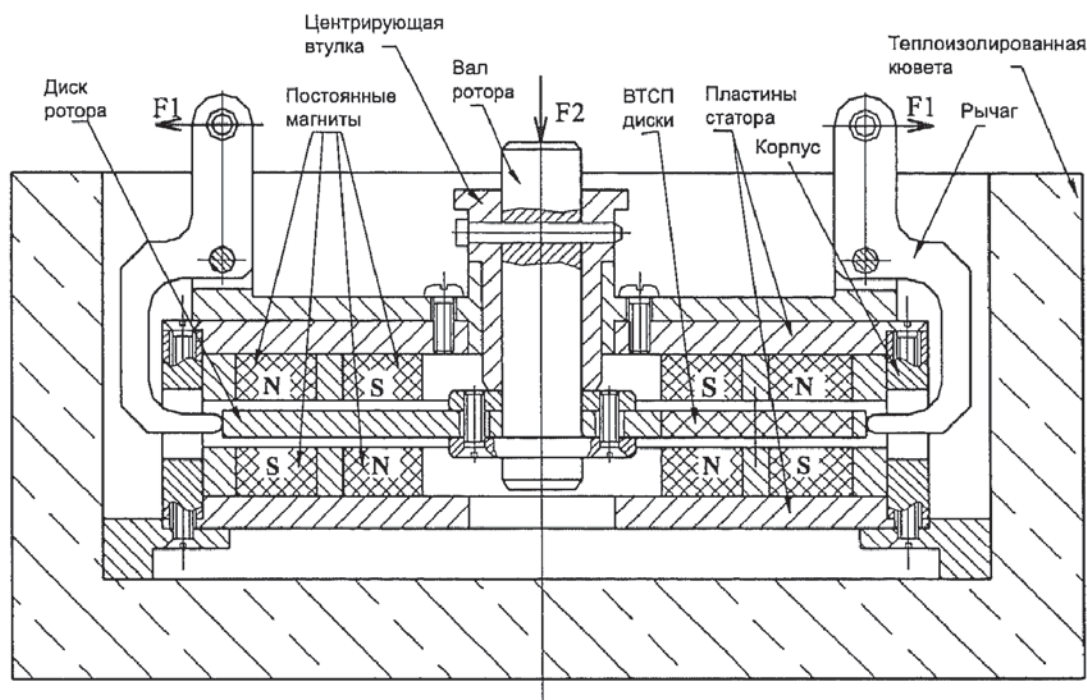


Рис. 5. Конструктивная схема магнитного ВТСП-подвеса, установленного в теплоизолированную кювету

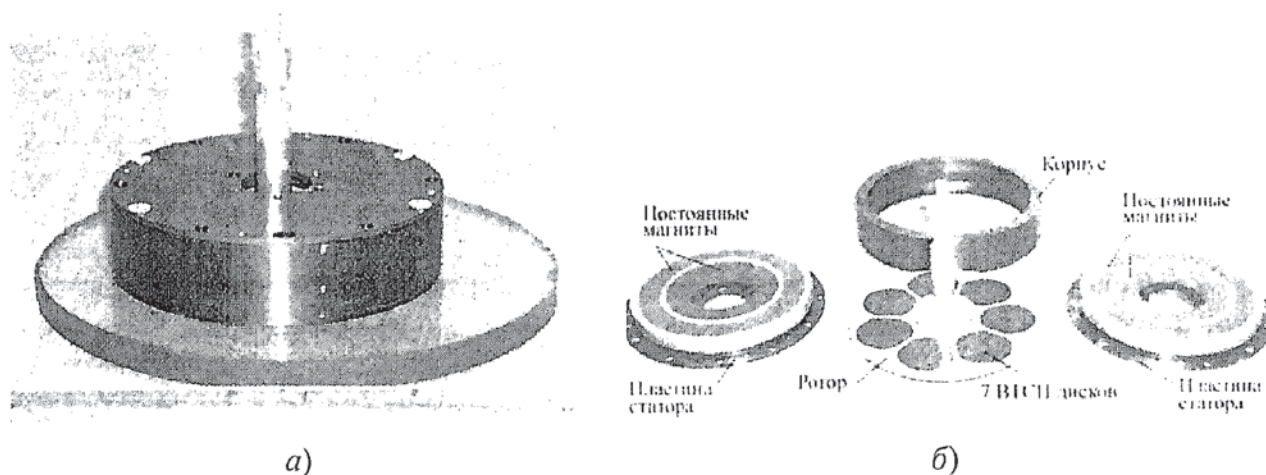


Рис. 6. Общий вид магнитной опоры на ВТСП (а) и компоненты опоры (б)

Первоначальная выставка ротора по отношению к статору до охлаждения подвеса осуществляется с помощью установочной втулки. После охлаждения сверхпроводников до рабочей температуры втулка удаляется и ротор начинает левитировать. Подвес помещается в теплоизолированную кювету и жестко закрепляется в ней. Габаритные размеры подвеса: диаметр 130 мм, высота 30 мм, масса 1,8 кг, в том числе масса ротора 160 г.

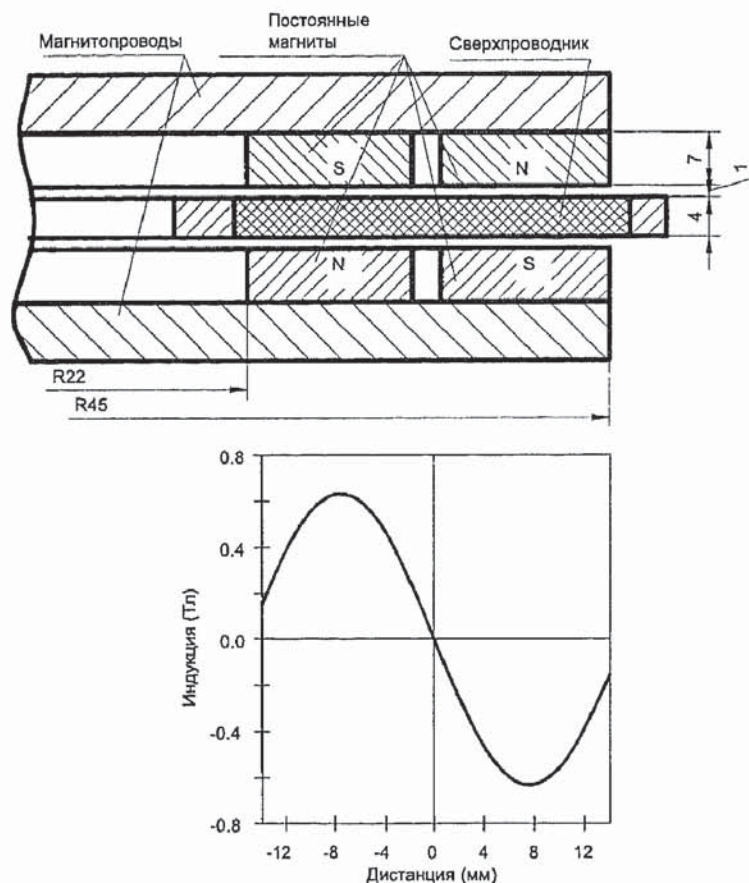


Рис. 7. Распределение магнитного поля в середине зазора между постоянными кольцевыми магнитами. Высота зазора 6 мм

3. Нагрузочные характеристики подвеса

Нагрузочную способность подвеса исследовали при статических нагрузениях в радиальном и осевом направлениях. Радиальную нагрузку прикладывали в двух противоположных направлениях с помощью рычажной системы. На начальном этапе ротор дискретно нагружали, а затем разгружали, постепенно увеличивая нагрузку на заданную величину. Смещение ротора измеряли под нагрузкой и после ее снятия. Такое циклическое нагружение с постепенным увеличением нагрузки осуществляли до появления остаточного смещения ротора. В результате определяли максимальную нагрузку, после снятия которой ротор возвращается в нулевое положение. Далее увеличивали нагрузку и по достижении 70 Н следовало постепенное разгружение до нуля, затем — постепенное нагружение в обратном направлении и повторно в прямом.

На графиках, отражающих зависимость радиальной силы от смещения, можно выделить три характерных участка (рис. 8). Участок, обозначенный цифрой 1, наблюдается при очень малых отклонениях ротора от положения равновесия, характеризуется высокой жесткостью (560 Н/мм) и имеет место на всех кривых нагружения. Второй участок выявляется при смещениях до 0,25 мм от начального положения ротора и ему соответствует нагрузка 52 Н. При нагружении менее этой величины ротор возвращается в исходное состояние без остаточного смещения. Жесткость на этом участке составляет 190 Н/мм. Таким образом, нагрузка 52 Н определяет границу безгистерезисного (упругого) взаимодействия сверхпроводников и постоянных магнитов. При больших нагрузках (участок 3) появляется

остаточное смещение ротора после снятия нагрузки. Так, после нагружения до 70 Н ротор смещается на 0,39 мм и после разгрузки его отклонение от исходного положения составляет 0,022 мм. После нагружения до 100 Н и смещения 0,64 мм, остаточное отклонение — 0,092 мм. При этом жесткость подвеса снижается до 150 Н/мм.

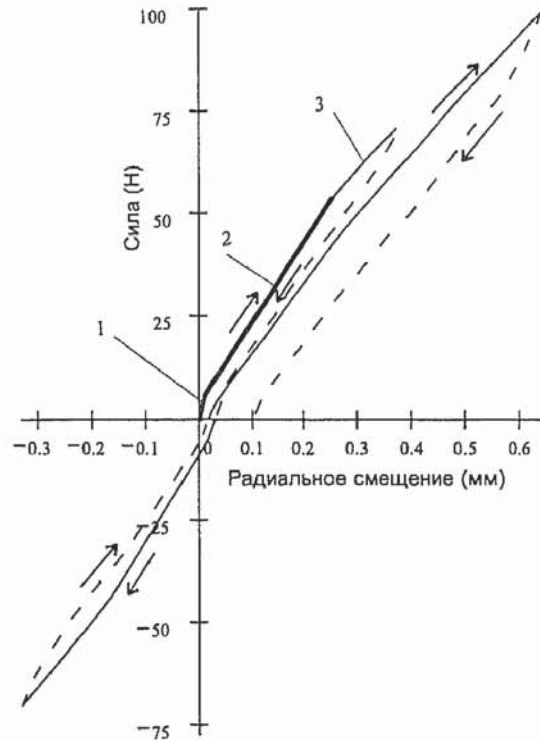


Рис.8 Зависимость силы от смещения ротора в радиальном направлении

Осевую нагрузку прикладывали непосредственно к валу ротора (рис. 5). Ротор дискретно нагружали до 20, 40 и 60 Н с последующим ступенчатым снижением нагрузки до нуля. Полученные нагрузочные характеристики имеют также начальный участок высокой жесткости (около 500 Н/мм) при нагрузке до 6 Н с безгистерезисным взаимодействием ВТСП и ПМ (участок 1, рис. 9). При более высоких нагрузках наблюдается остаточное смещение ротора. Жесткость подвеса в этой области составляет 140 Н/мм.

Таким образом, при радиальном и осевом нагружениях ротора на силовых характеристиках подвеса обнаруживаются участки с безгистерезисным характером зависимости силы от смещения с высокими и примерно равными значениями жесткости. Нагружение в радиальном направлении имеет значительную линейную зону (до 52 Н при 0,27 мм смещения — участок 2, рис. 8), в то время как при осевом нагружении зона упругости практически ограничивается участком 1 при смещении 0,01...0,02 мм. Причем, средняя жесткость в радиальном направлении в 1,3 раза выше, чем в осевом. Для повышения аксиальной жесткости необходимо увеличивать толщину дисков, что следует из данных рис. 4.

Изготовленный макет подвеса с ВТСП-элементами на роторе обеспечивает его центрирование и имеет нагрузочную способность 190 Н в радиальном и 85 Н в осевом направлениях при зазоре 1 мм и среднюю жесткость 165 Н/мм и 102 Н/мм соответственно. Отношение нагрузочной способности к весу сверхпроводника — 200.

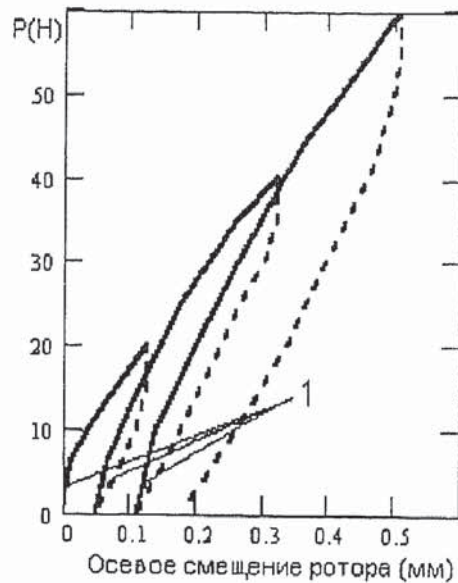


Рис. 9. Зависимость силы от смещения ротора в аксиальном направлении

Выводы

1. Предложена конструктивная схема и изготовлен макет магнитного подвеса с объемными ВТСП элементами на роторе, обеспечивающего его стабилизацию в осевом и радиальном направлениях. Технические характеристики: максимальная нагрузочная способность подвеса в аксиальном направлении — 85 Н, в радиальном направлении — 190 Н, аксиальная жесткость — 102 Н/мм, радиальная жесткость — 165 Н/мм, рабочий магнитный зазор — 1 мм. Габаритные размеры подвеса: диаметр — 113 мм, высота — 30 мм, масса подвеса — 1,8 кг.

2. Обнаруженное на силовых характеристиках подвеса существование безгистерезисного взаимодействия ВТСП-элементов с постоянными магнитами и высокая жесткость на начальных участках нагружения являются следствием использования сверхжестких ВТСП с высоким пиннингом, который гарантирует замораживание в них магнитных полей 1 Тл. Применение ВТСП с улучшенными магнитными свойствами обеспечит значительное увеличение жесткости и несущей способности, что позволит повысить точность позиционирования ротора и создать электромеханические устройства нового типа на основе ВТСП с высокими эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filatov V., Polushenko O.L., Shln S-Ch. A new approach to the design of passive magnetic bearings using high-temperature superconductors // *Cryogenics*. — 1998. — № 38. — P. 595—600.
2. Hull J.R. Superconducting bearings // *Supercond. Sci. Technol.* — 2000. — № 13. — P. 1—15.
3. Магнитная бесконтактная опора на основе короткозамкнутых высокотемпературных сверхпроводящих контуров / В.А. Матвеев, А.В. Филатов, О.Л. Полущенко и др. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. — 2002. — № 1. — С. 26—33.
4. Development and characterization of magnetic HTS bearing for a 400 kW synchronous HTS motor / P. Kummeth, G. Ries, W. Nick a.o. // *Supercond. Sci. Technol.* — 2004. — № 17. — P. 259—263.
5. Siems S., Candlers W-R. Advances in the design of superconducting magnetic bearings for static and dynamic applications // *Supercond. Sci. Technol.* — 2005. — № 18. — P. 86—89.