

УДК 531.383

Роторная система с магнитными опорами на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП)

**О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский,
М.А. Сысоев**

Предложена конструкция магнитной опоры дискового типа на основе объемных монокристаллических ВТСП. Разработан и реализован действующий макет роторной системы с двумя ВТСП-опорами. При выбранной компоновке магнитной системы ВТСП-элементы массой 180 г. обеспечивают устойчивый подвес ротора весом 3,6 кг в рабочем зазоре 0,8 мм. Максимальная нагрузочная способность подвеса в радиальном направлении составляет 220 Н, в осевом — 150 Н. Отношение нагрузочной способности к массе сверхпроводников — 120. Максимальная частота вращения ротора — 14 500 об/мин.

Ключевые слова: опора, высокотемпературные сверхпроводники, ВТСП, постоянный магнит, нагрузочные характеристики, жесткость.

The design of magnetic bearing of disk type on the base of high-temperature superconductors (HTS) has been proposed. The prototype of rotor system with two HTS bearings has been constructed and manufactured. According to the selected arrangement the HTS elements of 180 g in mass provide stable suspension of the rotor of 3,6 kg in mass in operating gap 0,8 mm. The maximal load capability of the bearing in the radial direction amount to 220 N, in axial — 150 N. The ratio of the load capability to the mass of superconductors is more than 120. The maximum rotation frequency is 14500 rpm.

Keywords: superconducting bearing, high-temperature superconductors, HTS, permanent magnet, load capacity, stiffness.

Магнитные опоры, обеспечивающие неконтактный подвес ротора, безусловно, привлекательны в целях обеспечения длительного ресурса работ. Среди магнитных подвесов важное место занимают криогенные подвесы на основе сверхпроводников. Уникальная особенность сверхпроводников при их использовании заключается в пассивной самостабилизирующейся форме левитации. Эффект полной стабилизации ротора в опорах основывается на возникновении в системе «сверхпроводник — постоянный магнит» такой конфигурации магнитного поля, при которой твердое тело находится в состоянии устойчивого равновесия, называемого магнитной потенциальной ямой. В этом случае любое взаимное смещение сверхпроводника и магнита приводит к возникновению силы, стремящейся вернуть систему в исходное состояние. Поэтому при любом относительном



ПОЛУЩЕНКО
Ольга Леонидовна
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)



НИЖЕЛЬСКИЙ
Николай Александрович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник (НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана)



СЫСОЕВ
Михаил Алексеевич
аспирант кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации, навигации» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

смещении сверхпроводящих элементов и магнита жесткость $K_x = -dF_x/dx$ всегда отрицательна, что обеспечивает устойчивость системы. Отсутствие системы автоматического регулирования делает криогенный подвес более надежным, чем электростатический или электромагнитный.

С развитием техники высокотемпературной сверхпроводимости появилась реальная возможность создания бесконтактных пассивных подвесов, работающих при температуре жидкого азота. Благодаря значительным успехам в технологии создания сильноточных ВТСП-материалов с плотностью критического тока порядка $50\ 000\ \text{А/см}^2$ при температуре $77\ \text{К}$ и захваченным магнитным полем свыше $1\ \text{Тл}$, в нашей стране и за рубежом интенсивно ведутся работы по созданию сверхпроводящих магнитных подшипников на основе ВТСП.

Рядом зарубежных фирм созданы конструкции сверхпроводящих подшипников, предназначенных для использования в маховиковых накопителях с большим диаметром ротора, в электромоторах, центрифугах, подвесном транспорте. Изготовлены опытные образцы подшипников и проведены измерения их силовых характеристик [1, 2, 3, 4]. Основная область их применения в энергетике — инерционные накопители энергии. Достигнутый на сегодняшний день диапазон рассматриваемых осевых и радиальных усилий — до $10\ 000\ \text{Н}$ при рабочем зазоре в подшипниках от 1 до $3\ \text{мм}$.

В настоящей публикации предложены принципы построения опор на основе объемных ВТСП для бесконтактного взвешивания и центрирования быстровращающихся роторов гиродинов и инерционных маховиков систем ориентации космических летательных аппаратов. Разработана конструкция, изготовлен действующий макет магнитного подвеса ротора и исследованы его нагрузочные характеристики.

Основными компонентами сверхпроводящих подшипников являются постоянные магниты и объемные ВТСП-элементы. Высокая нагрузочная способность и жесткость опоры при взаимном смещении ротора и статора может быть достигнута созданием сильного высо-

коградиентного магнитного поля, генерируемого системой постоянных магнитов. Для создания магнитных полей в зазоре используются постоянные магниты с максимальной магнитной энергией, в качестве которых предпочтительно применять магниты системы Nd-Fe-B, имеющие высокие магнитные свойства (коэрцитивная сила $750\text{...}950\ \text{кА/м}$, остаточная индукция $1,0\text{...}1,2\ \text{Тл}$). В качестве ВТСП-элементов используются объемные квазиоднокристаллические (монокристаллические) сверхпроводники на основе иттрий-бариевой керамики, которая обладает наиболее высокими критическими параметрами.

Для получения устойчивого вращения ВТСП-элементы монтируются в статоре, а магниты в виде колец — на роторе. Это позволяет исключить биение при возможной несоосности ротора и статора или при остаточном смещении ротора, вызванном гистерезисным характером намагничивания ВТСП. Кроме того, магнитная система, установленная на роторе, может быть использована в качестве маховиков, имеющих достаточно большой момент инерции, который можно регулировать путем изменения толщины и диаметра магнитопроводов и магнитов.

При разработке конструкции магнитной системы стремятся создать многополюсные высокоградиентные противоположно направленные магнитные поля с целью получения максимальной жесткости подшипника. Число полюсов определяется количеством магнитных колец, их оптимальное количество зависит в основном от размеров ВТСП-элементов. Увеличение количества полюсов приводит к разбиению объема сверхпроводника на несколько областей с кольцевыми токами, что, в свою очередь, увеличит и количество градиентных областей в системе «ВТСП — постоянный магнит». Суммирование силового взаимодействия от каждой градиентной области приведет к существенному увеличению жесткости магнитной системы.

Возможны два способа перехода объемных ВТСП-элементов в сверхпроводящее состояние: охлаждение в нулевом магнитном поле (zero field cooling process — zfc-process) и охлаж-

дение в магнитном поле (field cooling process — fc-process). В режиме «zfc-process» внешние магнитные поля, создаваемые постоянным магнитом, полностью вытесняются из ВТСП-элемента, что обеспечивает высокие значения сил левитации, но стабилизируют ротор лишь в одном направлении и, следовательно, требуют дополнительной активной стабилизации в других направлениях. В режиме «fc-process» магнитные силовые линии оказываются «вмороженными» в ВТСП-элемент и силы левитации в магнитном ВТСП-подвесе определяются возмущениями магнитного поля на поверхности ВТСП-элемента при его смещении от положения равновесия. Подшипники, работающие в режиме «fc-process», создают меньшую левитационную силу, но обеспечивают пассивную стабилизацию ротора по пяти степеням свободы. Разработанные варианты ВТСП-опор [1, 2, 3, 4, 5] функционируют в режиме «fc».

В известных схемах построения ВТСП-подшипников пространство взаимодействия между сверхпроводником и постоянными магнитами преимущественно образовано внешней цилиндрической поверхностью кольцевых ПМ ротора и внутренней цилиндрической поверхностью статора с ВТСП-элементами (цилиндрическая модель подшипника) [1, 2, 3]. В данной разработке выбрана двухполюсная конструкция дискового типа (рис. 1, а) [5]. В ней ВТСП-элементы 5 вмонтированы в диск статора 4 и расположены между двумя парами кольцевых постоянных магнитов 2, 3, концентрически закрепленных на магнитопроводе ротора 1. Внешние и внутренние магниты намагничены перпендикулярно торцевой плоскости в противоположных направлениях. ВТСП-элементы активируются в режиме «fc». Верхние и нижние магниты, объединенные попарно по потоку магнитной индукции двумя кольцевыми магнитопроводами, индуцируют в зоне размещения ВТСП-элементов знакопеременное градиентное поле, которое после охлаждения «замораживается» в них (рис. 1, б). Предлагаемая конструкция дискового типа при одинаковом с цилиндрической конструкцией диаметре позволяет увеличить площадь магнитного взаи-

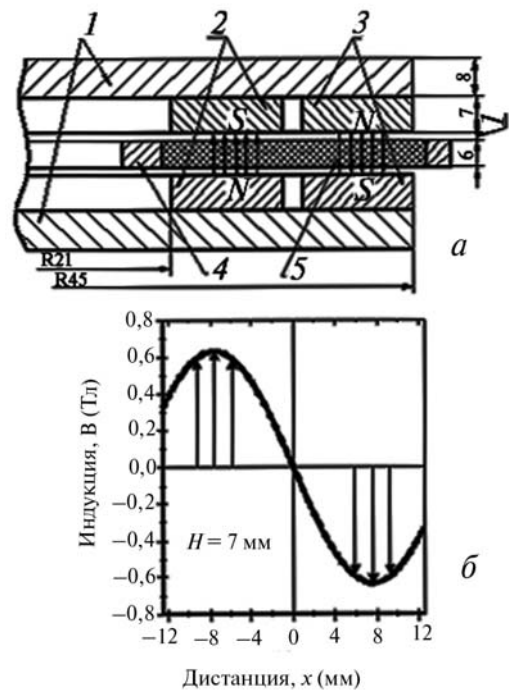


Рис. 1. Схема магнитной системы подшипника (а) и соответствующее ей распределение магнитного поля в зоне расположения ВТСП элементов (б):

1 — магнитопровод ротора; 2 — внутренние кольцевые магниты; 3 — внешние кольцевые магниты; 4 — диск статора; 5 — ВТСП-элемент

модействия между сверхпроводником и постоянными магнитами и соответственно повысить удельные нагрузочные характеристики опор. К тому же конструкция дискового типа позволяет реализовать модульный принцип построения опор, благодаря чему возможно легко увеличивать несущую способность подшипника путем наращивания модулей и создавать на основе унифицированных элементов опоры в широком диапазоне нагрузок, жесткости и габаритных размеров.

На рис. 2 представлен сборочный чертеж конструкции макета двухопорного бесконтактного подвеса ротора, на рис. 3—5 — фотографии изготовленного подвеса ротора в сборе, его компонентов и макет в теплоизолирующей рубашке, закрепленный на стойке для проведения силовых измерений. Размеры макета подвеса с теплоизоляцией: диаметр 230 мм, длина 230 мм. Масса ротора 3,6 кг. Магнитный подвес включает корпус, ротор с постоянными магнитами, статор с ВТСП-элементами, систему охлаждения.

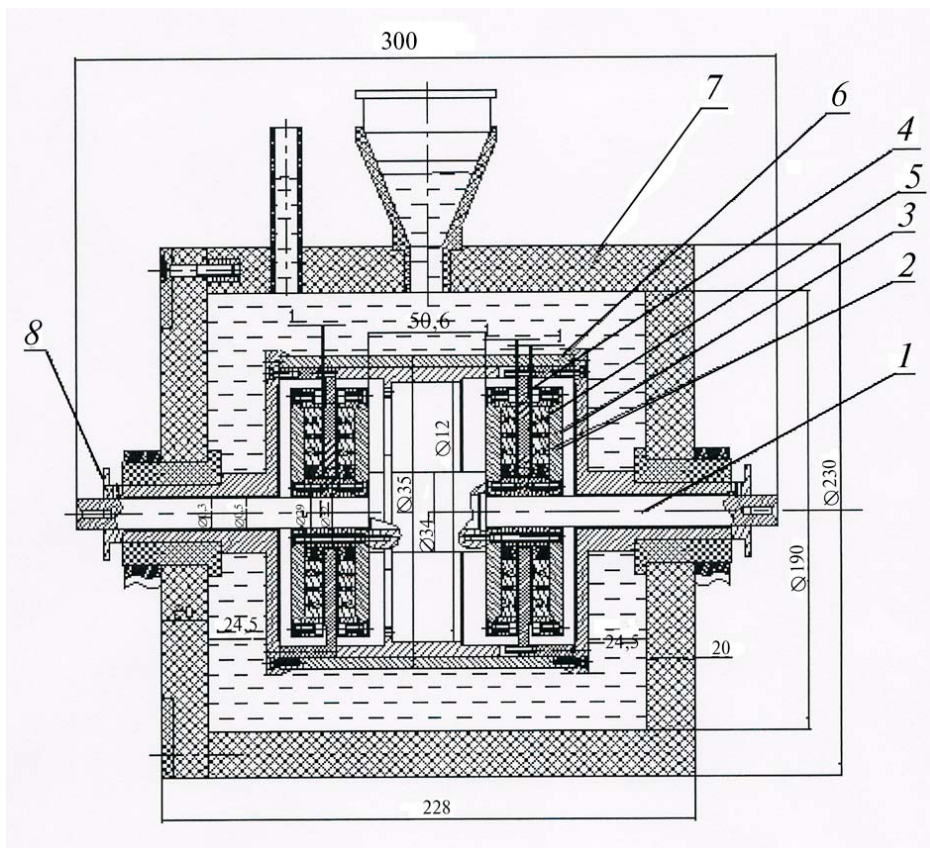


Рис. 2. Сборочный чертеж роторной системы на ВТСП-опорах:

1 — вал; 2 — кольцевые постоянные магниты; 3 — магнитопроводы; 4 — статоры; 5 — ВТСП-элементы; 6 — корпус; 7 — теплоизолирующая рубашка; 8 — центрирующие втулки

Ротор (рис. 2—4) содержит вал 1 и закрепленные на нем два комплекта кольцевых постоянных магнитов 2, установленных на магнитопроводах 3. Каждый комплект включает две пары концентрически расположенных кольцевых постоянных магнитов (рис. 3, б). Статор 4 изготовлен из алюминиевого сплава Д16 в виде цилиндра с наружным диаметром 125 мм. В торцевые поверхности цилиндров вмонтированы ВТСП-элементы 5 (рис. 2, рис. 3, б). Изготовлены два статора — по одному на каждый комплект магнитов. Статоры закреплены на внутренней поверхности корпуса и расположены в зазоре между парами концентрических магнитов.

Корпус 6 изготовлен в виде цилиндра из нержавеющей стали 1Х18Н10Т диаметром 135 мм и длиной 127 мм (рис. 3, а, б). На торцах корпуса закреплены крышки с отверстиями для выхода вала ротора. Диаметр выходного отверстия крышек корпуса 15 мм, диаметр концов вала 13 мм, и, следовательно, величина смеще-

ния ротора в радиальном направлении не превышает 1 мм. Подвес имеет две двухполюсные магнитные системы (см. рис. 1). Магнитный зазор в опорных узлах (расстояние между торцевыми поверхностями кольцевых магнитов) составляет 7 мм и формируется двумя парами кольцевых постоянных магнитов с индукцией на поверхности 0,4 Тл. В каждой системе внешние магниты размером $D = 92$ мм, $d = 68$ мм и внутренние размером $D = 64$ мм, $d = 44$ мм, $h = 8$ мм, изготовленные из сплава Nd-Fe-B, разделены между собой кольцами шириной 2 мм из алюминиевого сплава Д16 и установлены на магнитопроводы, которые выполнены из электротехнической стали толщиной 8 мм. Ширина магнитных колец выбрана из условия равенства магнитного потока через торцевую поверхность внешнего и внутреннего кольца, чтобы обеспечить максимальную индукцию магнитного поля в рабочем зазоре. Распределение индукции магнитного поля в середине зазора между постоянными кольцевыми магнитами в ра-

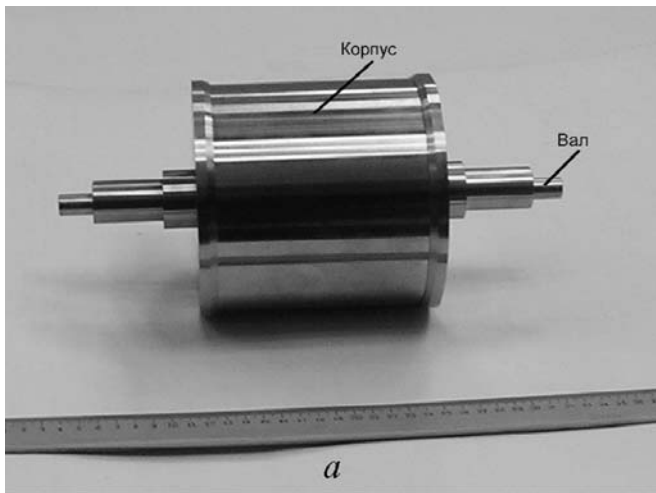


Рис. 3. Фотографии магнитного подвеса ротора гиromотора: а — в сборе; б — элементы подвеса

диальном направлении представлено на рис. 1, б. Как видно из рисунка, в зазоре создаются осесимметричные противоположно направленные высокоградиентные магнитные поля. Конфигурация магнитного поля в радиальном направлении описывается уравнением $B = -0,69\sin(0,205x)$. Точка 0 на графике соответствует средней линии магнитного зазора и находится в промежутке между внутренними и внешними кольцевыми магнитами. Максимальное абсолютное значение поля составляет 0,69 Тл и находится между плоскостями внутренних и внешних колец ($x = \pm 7,8$ мм).

ВТСП-элементы изготовлены из керамических квазинокристаллов состава $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x} + 25\%$ мол. $Y_2O_3 + 1\%$ вес. $CeO_2 + 0,06\%$ вес. ZnO , которые получены методом ориентированной кристаллизации с затравками [6]. ВТСП-элементы имеют форму дисков диаметром 28 мм и высотой $h = 5$ мм, количество — 14 шт. Общая площадь ВТСП-дисков 80 см², масса — 170 г. Отдельный ВТСП-элемент способен захватить магнитное поле вели-

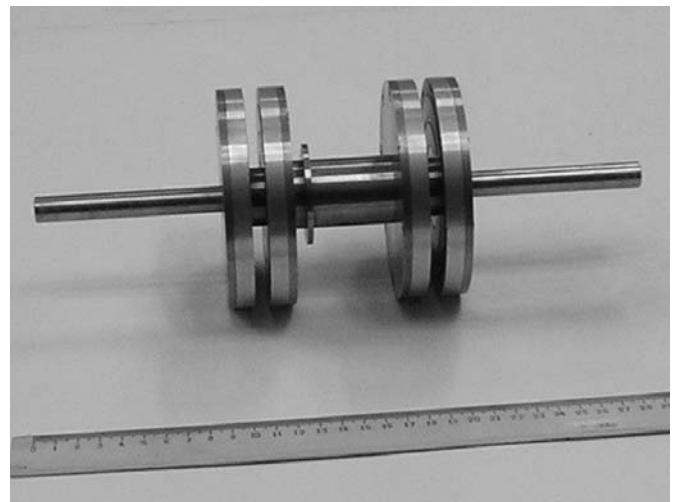


Рис. 4. Ротор в сборе

чиной 1 Тл. Чтобы обеспечить высокое значение захваченного магнитного поля и магнитного градиента во всем объеме, ВТСП-диски размещены в зазоре в области максимального градиента и их токнесущие кристаллографические плоскости ab параллельны торцевым плоскостям магнитов.

Для охлаждения ВТСП-элементов до температуры жидкого азота корпус подвеса гиromотора помещен в теплоизолирующую, изготовленную из плотного пенопласта рубашку 7, в которую заливается жидкий азот (рис. 2, рис. 5).



Рис. 5. Двухопорный ВТСП-подвес с теплоизоляцией, закрепленный на стойке для проведения силовых измерений

Перед охлаждением системы ротор выставляется в центральное положение двумя съемными втулками δ (см. рис. 2). Затем охлаждается до температуры 77 К путем заливки жидкого азота через отверстие в теплоизолирующей рубашке. После охлаждения втулки удаляют и ротор начинает левитировать в опорных узлах. Последующее его центрирование и стабилизация осуществляются магнитным полем, захваченным сверхпроводниками, охлажденными в градиентном магнитном поле зазора. Создается единая, связанная магнитным полем самостабилизирующаяся система, которая и обеспечивает жесткую стабилизацию ротора в рабочем положении по трем линейным и двум угловым координатам и не препятствует его осевому вращению. Это означает, что любые взаимные перемещения, приводящие к изменению магнитного потока через сверхпроводник, вызывают возникновение в ВТСП-элементах противодействующих электромагнитных сил, стремящихся вернуть ротор в начальное положение.

Для определения силовых и динамических характеристик роторной системы сконструирован и изготовлен испытательный стенд. Статические силовые и жесткостные характеристики подвеса измерены в радиальном и осевом направлениях. При нагружении в радиальном направлении при очень малых смещениях ротора (до 0,001 мм) и нагрузках до 12 Н начальная жесткость имеет большую величину — 1200 Н/мм (табл. 1, рис. 6). С увеличением нагрузки до 100 Н (смещение 0,21 мм) она уменьшается до 476 Н/мм и при циклических нагружениях в пределах 10...100 Н ротор возвращается в начальное положение.

Таблица 1

Нагрузочные характеристики подвеса при радиальном смещении ротора

| Величина нагрузки, Н | Смещение ротора, мм | Средняя жесткость, Н/мм |
|----------------------|---------------------|-------------------------|
| 0...12 | 0,001 | 1200 |
| 0...25 | 0,028 | 892 |
| 0...50 | 0,090 | 556 |
| 0...100 | 0,210 | 476 |
| 0...140 | 0,354 | 406 |
| 0...180 | 0,630 | 290 |
| 0...220 | 0,865 | 270 |

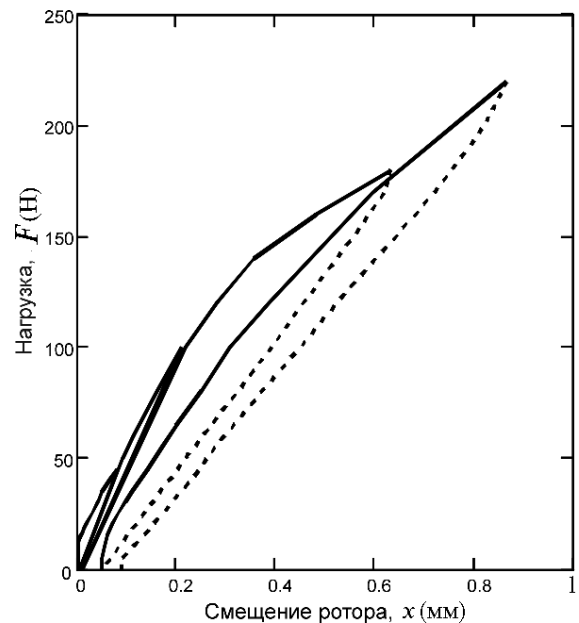


Рис. 6. Нагрузочная характеристика подвеса при радиальном смещении ротора

При нагружении ротора свыше 100 Н ротор не возвращается в нулевое положение после разгрузки и наблюдается остаточное смещение, которое составляет 0,089 мм после максимального нагружения до 220 Н. Таким образом, при циклическом характере работы подвеса радиальная нагрузка ротора 100 Н будет являться предельной величиной, обеспечивающей устойчивую стабилизацию ротора в радиальном направлении.

Жесткость в осевом направлении значительно ниже радиальной (табл. 2, рис. 7), в особенности на начальном участке: 373 Н/мм.

Наблюдаются значительные остаточные смещения ротора после его разгрузки. Так, при нагружении до 150 Н и последующем разгрузении остаточное смещение составило 0,25 мм, что значительно превышает величины смещения, наблюдаемые при радиальном нагружении. Для повышения осевой жесткости и нагрузочной способности в осевом направлении необходимо увеличить толщину дисков, что следует из данных работы [4].

Следует отметить, что при повторном нагружении жесткость в осевом направлении заметно увеличивается: от 224 Н/мм до 345 Н/мм, что связано с ранее наблюдаемым эффектом дополнительного закрепления вихрей при циклических нагружениях. Данное явление можно

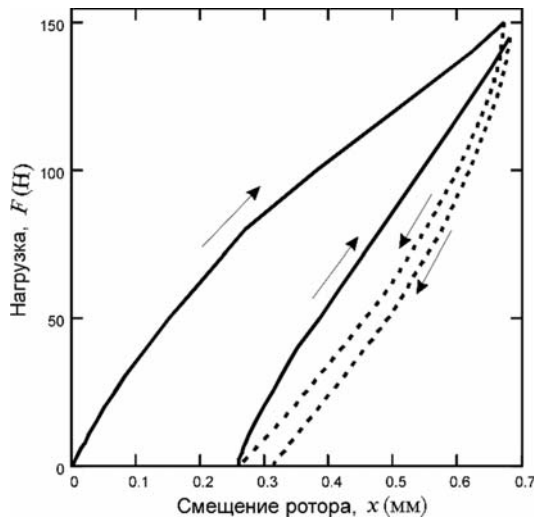


Рис. 7. Нагрузочная характеристика подшипника при осевом смещении ротора

использовать при эксплуатации подвеса, задавая определенное смещение ротора перед охлаждением сверхпроводников.

Вращение ротора до 14 500 об/мин осуществляли внешним двигателем постоянного тока мощностью 60 Вт, соединенным с одним из концов вала. Скорость вращения ротора измеряли стробоскопом с точностью $\pm 0,5\%$. Момент сопротивления вращению определяли с точностью $\pm 1\%$. При частоте вращения ротора 10 000 об/мин момент сопротивления вращению составляет 675 г·см (рис. 8).

Таблица 2

Нагрузочные характеристики подвеса при осевом смещении ротора

| Первое нагружение | | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|
| Величина нагрузки, Н | Смещение ротора, мм | Средняя жесткость, Н/мм |
| 0...25 | 0,067 | 373 |
| 0...80 | 0,270 | 296 |
| 0...150 | 0,670 | 224 |
| Второе нагружение | | |
| Величина нагрузки, Н | Смещение ротора, мм | Средняя жесткость, Н/мм |
| 0...25 | 0,06 | 500 |
| 0...80 | 0,22 | 362 |
| 0...145 | 0,42 | 345 |

Зависимость 1 показывает потери ротора с магнитной системой, вращающегося в воздушной среде во взвешенном состоянии в магнитном поле статора, охлажденного до темпе-

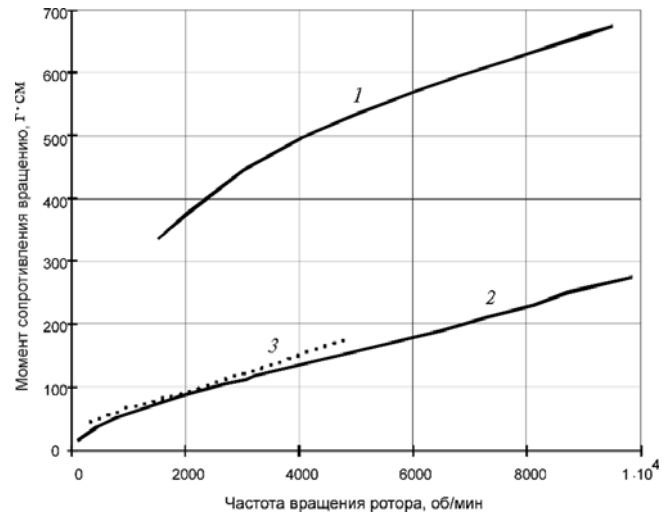


Рис. 8. Зависимость момента сопротивления вращению ротора от частоты его вращения:

- 1 — вращение ротора, левитирующего в воздушной среде ($T = 77\text{ К}$);
- 2 — вращение ротора, левитирующего в атмосфере гелия ($T = 77\text{ К}$);
- 3 — вращение ротора в воздушной среде в шарикоподшипниках ($T = 293\text{ К}$)

ратуры 77 К. В данном случае вклад в общие потери вносят потери на вихревые токи, аэродинамические потери и потери от намораживания влаги и конденсации воздуха, в связи с чем при этих условиях вращения ротора потери максимальны. Резкое снижение потерь наблюдается при замене атмосферы воздуха внутри подвеса на гелий (кривая 2). При вращении ротора с магнитной системой в атмосфере гелия потери практически оказались равными потерям на трение при вращении ротора в шарикоподшипниках (кривая 3)

Таким образом, основной вклад в потери данной конструкции подвеса вносят намораживание влаги и конденсация воздуха на роторе и статоре. При вращении ротора в воздушной среде момент сопротивления вращению M достигает 0,067 Н·м при 10 000 об/мин, что соответствует потерям $P = 11,2$ Вт. При замене газовой среды на гелиевую момент сопротивления вращению и соответственно потери снижаются более чем в два раза: $M = 0,0297$ Н·м, $P = 4,95$ Вт. Для устранения эффектов намораживания необходимо прежде всего исключить воздушную газовую среду из объема ВТСП магнитного подвеса. Момент инерции ротора с закрепленными на нем постоянными магнитами

составляет $0,0043 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ и обеспечивает при вращении с угловой скоростью 1047 рад/с ($10\,000 \text{ об/мин}$) кинетический момент $4,53 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. Полученные значения сопоставимы с величинами кинетических моментов роторов традиционных гироскопов и инерционных маховиков.

Выводы

Предложена конструкция магнитной опоры дискового типа на основе объемных монодоменных ВТСП, функционирующая в режиме «fc». Дисковая конструкция опоры позволяет увеличить площадь магнитного взаимодействия между сверхпроводниками и постоянными магнитами и реализовать модульный принцип их построения. Разработан и изготовлен действующий макет роторной системы с двумя ВТСП-опорами. При выбранной компоновке магнитной системы ВТСП-элементы массой 180 г обеспечивают устойчивый подвес ротора массой $3,6 \text{ кг}$ с рабочим зазором $0,8 \text{ мм}$. Максимальная нагрузочная способность подвеса в радиальном направлении составляет 220 Н , в осевом направлении — 150 Н ; радиальная жесткость — 270 Н/мм , осевая жесткость —

224 Н/мм при температуре 77 К . Отношение нагрузочной способности к массе сверхпроводников — 120 . Максимальная частота вращения ротора — $14\,500 \text{ об/мин}$, кинетический момент инерции ротора с закрепленными на нем постоянными магнитами — $4,53 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ при вращении с угловой скоростью 1047 рад/с .

Литература

1. *Siems S. O., Candors W-R, Walter H and Bock J.* Superconducting magnetic bearings for a 2 MW/10 kWh class energy storage flywheel system // *Supercond. Sci. Technol.* 2004. № 17. P. 229–233.
2. *Kummeth P., Ries G., Nick W. and Neumueller H-W.* Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronous HTS motor // *Supercond. Sci. Technol.* 2004. № 17. S. 259–S263.
3. *Walter H., Bock J., Frohne Ch., Schipp K., May H., Candors W.R., Kummeth P. and Neumueller H-W.* First Heavy Load Bearing for Industrial Application with Shaft Loads up to 10 kN // *Journal of Physics: Conference Series.* 2006. № 43. P. 995–998.
4. *Matveev V., Nizhelskiy N., Poluschenko O.* Force and stiffness characteristics of superconducting bearing prototype // *Physica C: Superconductivity.* 2004. № 416. P. 17–24.
5. *Нижельский Н.А., Матвеев В.А., Полущенко О.Л., Герди В.Н.* Патент на изобретение № 2270940 от 27.02.2006. Бесконтактная радиально-упорная опора на высокотемпературных сверхпроводниках.
6. *Nizhelskiy N.A., Poluschenko O.L. and Matveev V.A.* Employment of Gd—Ba—Cu—O elongated seeds in top-seeded melt-growth processing of Y—Ba—Cu—O superconductors // *Supercond. Sci. Technol.* 2007. № 20. P. 81–86.

Статья поступила в редакцию 27.12.2010 г.