

## **Магнитный подшипник на высокотемпературных сверхпроводниках с пассивной стабилизацией ротора**

# 05, май 2013

DOI: 10.7463/0513.0547989

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

УДК 531.383

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[olga@ihome.ru](mailto:olga@ihome.ru)

[ujkolp@bk.ru](mailto:ujkolp@bk.ru)

### **Введение**

Создание сверхпроводниковых магнитных подшипников (СМП), основанных на взаимодействии объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с магнитным полем, является одним из перспективных направлений в развитии современной техники. Сверхпроводниковый магнитный подшипник осуществляет устойчивую стабилизацию ротора и не требует сложной электронной аппаратуры и смазывающих веществ, что заметно упрощает их эксплуатацию и повышает время безотказной работы. Исследования в этой области интенсивно развиваются благодаря значительным успехам технологии получения ВТСП материалов. К настоящему моменту в научных центрах Германии, США, Японии разработан ряд конструкций магнитных опор, предназначенных для использования в маховиковых накопителях с большим диаметром ротора с нагрузочной способностью до 10000 Н, в электромоторах, электрогенераторах, центрифугах [1-3].

На настоящий момент разработано несколько конструкций СМП, отличающихся конфигурацией магнитного поля, взаимным расположением постоянных магнитов (ПМ) и ВТСП элементов, а также способом активации сверхпроводниковых элементов – при наличии (FC) или при отсутствии магнитного поля (ZFC). Общим же для них является наличие одного взаимодействия, обеспечивающего стабилизацию ротора взаимодействие ПМ-ВТСП [4-6].

В отличие от известных технических решений, в предлагаемой конструкции СМП центрирование и стабилизация ротора по пяти степеням свободы обеспечивается комбинацией двух силовых взаимодействий: радиальная стабилизация и самоцентрирование ротора осуществляются взаимодействием постоянный магнит - постоянный магнит (ПМ); осевая стабилизация - взаимодействием постоянного магнита со сверхпроводником, активируемым в

отсутствии магнитного поля. Комбинированная система стабилизации ротора обеспечивает его самоцентрирование и радиальную стабилизацию без предварительной выставки, что улучшает технологичность сборки и упрощает эксплуатацию, так как ротор расположен вне зоны охлаждения и не подвержен воздействию низких температур. Известно также, что охлаждение на первоначальном этапе активации ВТСП элементов вне магнитного поля по сравнению с их охлаждением в магнитном поле способствует значительному повышению силы левитации при последующем взаимодействии ВТСП элементов с ПМ.

## **1. Конструкция подшипника**

Конструктивная схема подшипника со схемой распределения сил, действующих на ротор, приведена на рисунке 1. Подшипник включает ротор с кольцевыми центральными и периферийными магнитами и две пластины статора с центральными кольцевыми магнитами и периферийными сверхпроводниковыми элементами. Направление намагничивания центральных магнитов статора и ротора направлено в одну сторону и они, следовательно, притягиваются друг к другу – осевые силы  $F_{ос}$ . При смещении ротора в радиальном направлении на величину  $\Delta S$  под действием силы  $F$  на него действует возвращающая сила  $F_{рад}$ , которая является компонентой сил  $F_1$  и  $F_3$ . Она осуществляет радиальную стабилизацию и самоцентрирование ротора. Периферийные магниты ротора и ВТСП элементы статора при сближении взаимно отталкиваются (силы  $F_2$  и  $F_4$ , уравнивают взаимное притяжение центральных магнитов ротора и статора и, таким образом, реализуют осевую стабилизацию ротора). Реализация отдельных систем стабилизации позволяет гибко регулировать соотношение радиальных и осевых нагрузочных и жесткостных характеристик подшипника в зависимости от требований эксплуатации.

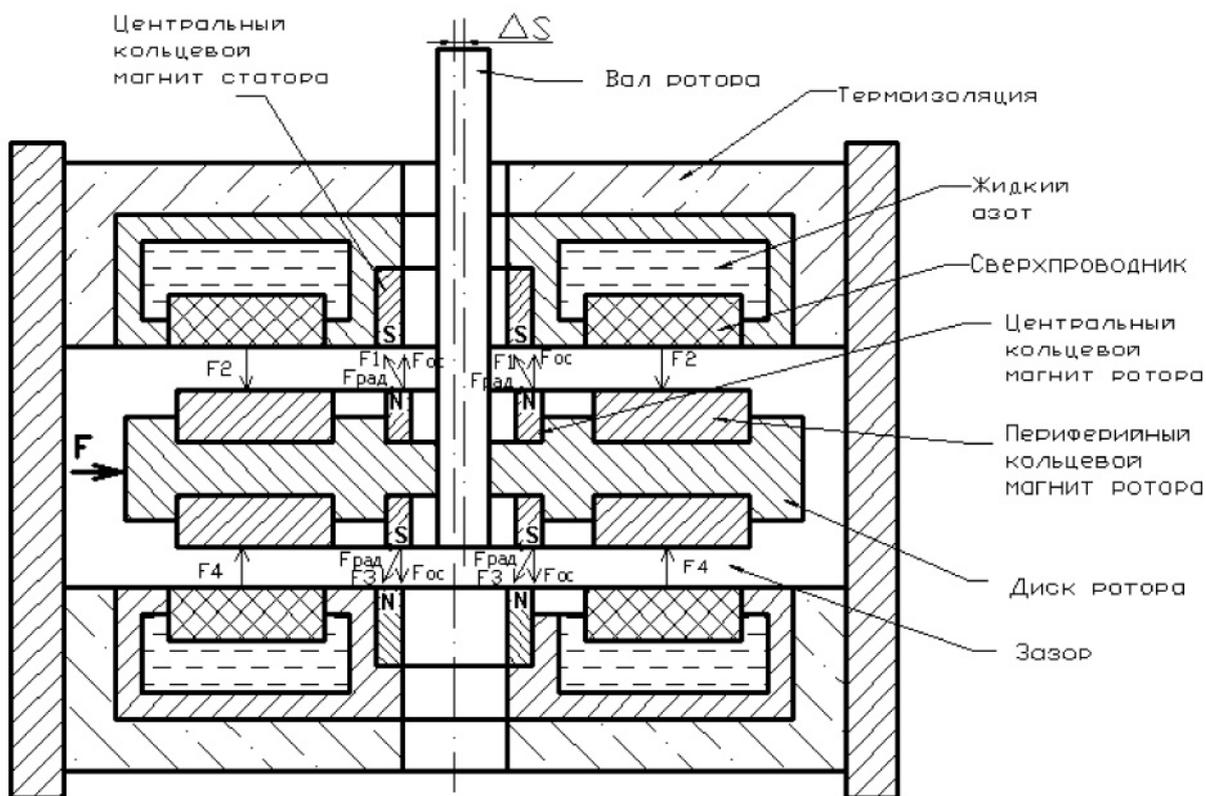


Рис. 1. Конструктивная схема подшипника с комбинированной системой стабилизации и схема сил взаимодействия между ротором и статором

Сборка подшипника отличается хорошей технологичностью. Вначале ВТСП элементы статорных пластин охлаждаются до рабочей температуры посредством жидкого азота или криокулера, затем над нижней охлажденной пластиной статора размещают ротор, который левитирует и самоцентрируется без дополнительных приспособлений на высоте 7-10 мм. Далее над ротором размещается вторая охлажденная половина статора, которая также левитирует над ротором и самоцентрируется. После чего нижняя и верхняя половины статора жестко соединяются шпильками и стягиваются, задавая некоторое начальное расстояние между поверхностями ротора и статора (начальный зазор). Он необходим в силу того, что при больших зазорах (более 3 мм) крутизна изменения силы отталкивания между ВТСП и магнитами (жесткость) заметно меньше, чем при малых зазорах (менее 2 – 3 мм), и радиальная жесткость также возрастает при уменьшении зазора. После проведения данных операций подшипник готов к работе. Существенным положительным моментом является то, что ротор находится вне зоны охлаждения ВТСП. Подшипник может эксплуатироваться, как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

В случае, если по условиям эксплуатации ось подшипника расположена вертикально и он нагружается в основном в осевом направлении, то есть находится под воздействием массы ротора,

возможен вариант конструкции, когда сверхпроводники на верхней части статора подшипника отсутствуют. В этом случае осевые силы притяжения между центральными магнитами ротора и нижней и верхней половин статора будут в основном компенсироваться и нагрузочная способность будет определяться только силой отталкивания между периферийными магнитами ротора и сверхпроводниками нижней части статора. Она будет больше, чем в обычном варианте, так как взаимодействие между верхними периферийными магнитами ротора и сверхпроводниками статора (сила  $F_2$ ) будет отсутствовать. В то же время радиальная нагрузочная характеристика, определяемая взаимодействием только центральных кольцевых магнитов, останется прежней. Таким способом можно заметно увеличить нагрузочную способность подшипника работающего в качестве опорного.

## **2. Расчет нагрузочных характеристик ВТСП подшипников с различными конфигурациями магнитной системы**

Нагрузочные и жесткостные характеристики подшипника определяются конфигурацией и размерами его магнитной системы, состоящей из центральных кольцевых магнитов, периферийных кольцевых магнитов и сверхпроводниковых элементов.

С целью определения оптимальной конструкции подшипника проведены расчеты силовых и жесткостных характеристик различных вариантов, отличающихся конфигурацией магнитной системы, размерами кольцевых постоянных магнитов (ПМ), направлением их намагничивания и количеством полюсов (число колец постоянных магнитов).

Разработан метод расчета магнитных систем, включающих элементы высокотемпературных сверхпроводников, постоянные магниты и магнитную арматуру, выполненную из магнитомягкого материала. Расчет строится относительно формальных источников поля, анализируемых на макроскопическом уровне. Совокупность таких источников, заключенных в объеме элемента системы, составляет основу его математической модели. Для расчетов электромагнитного поля в магнитных системах применен метод пространственных интегральных уравнений для источников поля: объемной плотности токов  $\mathbf{J}$ , плотностей зарядов  $\xi$  и векторов намагниченности ферромагнитных деталей  $\mathbf{M}$ . Высокотемпературный сверхпроводящий материал представлен нелинейной анизотропной электропроводящей средой. Для численного расчета непрерывные распределения в пространстве намагниченности, токов и зарядов представлены их кусочно-постоянными аппроксимациями по малым элементарным объемам. При построении метода расчета использованы наиболее развитые модели нелинейных электрофизических свойств ВТСП материала [7]. На основе предложенного метода разработан алгоритм расчета, компьютерные программы для расчета распределения напряженности магнитного поля в рабочем зазоре

подшипника и его нагрузочных характеристик.

Расчеты проведены для четырех вариантов подшипника.

Магнитная система варианта № 1 (рисунок 2) имеет единичные центральные кольцевые магниты на статоре и единичные периферийные кольцевые магниты на роторе (однополюсная система).

Вариант № 2 (рисунок 3) отличается от варианта № 1, увеличенными размерами центральных и периферийных магнитов.

Вариант № 3 (рисунок 4) содержит парные концентрически расположенные центральные и периферийные магниты.

Вариант № 4 (рисунок 5) имеет компоновку аналогичную варианту № 3, но отличающийся увеличенными размерами магнитов.

Для всех предложенных вариантов рассчитаны возвращающие силы от осевых и радиальных нагрузок при начальных зазорах между ротором и статором 2, 1,5, 1,0 и 0,5 мм и определены значения жесткости. Радиальные и осевые нагрузочные характеристики представлены на рисунках 6-13. Нагрузочные характеристики имеют в основном линейный характер, за исключением варианта № 2 при зазоре 0,5 мм, где наблюдается преобладание силы притяжения центральных магнитов над силой отталкивания между периферийными магнитами и сверхпроводниками.

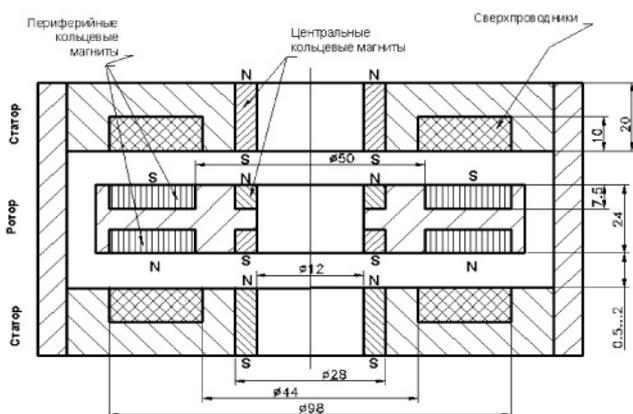


Рис. 2 – Вариант №1 подшипника. Единичные центральные и периферийные кольцевые магниты

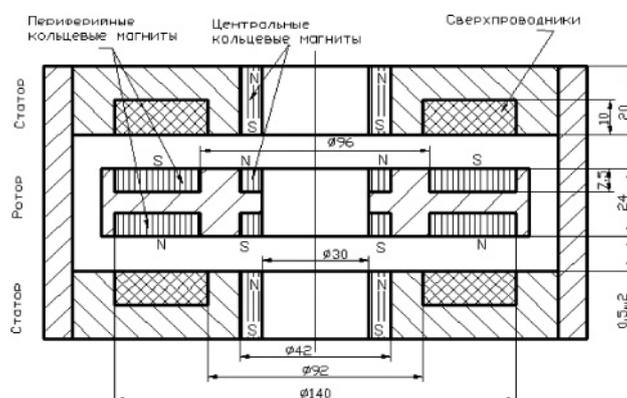


Рисунок 3 – Вариант №2 подшипника. Вариант аналогичен варианту №1, но с увеличенными размерами магнитов

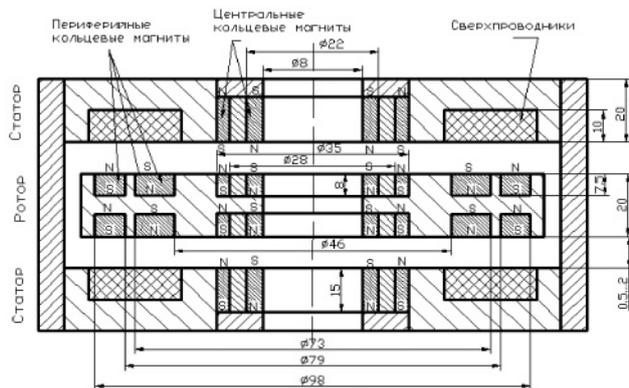


Рисунок 4 – Вариант №3 подшипника. Парные центральные и периферийные кольцевые магниты

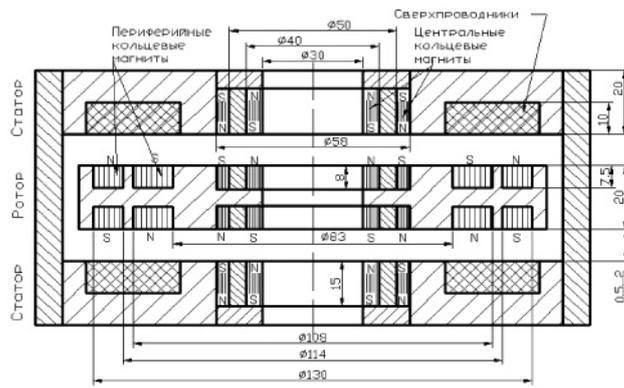


Рисунок 5 – Вариант №4 подшипника. Вариант аналогичен варианту №3, но с увеличенными размерами магнитов

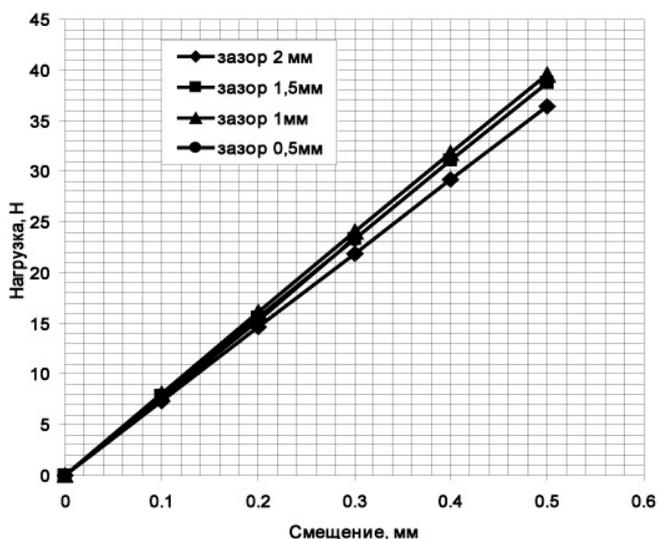


Рисунок 6 - Осевая нагрузочная характеристика для варианта № 1

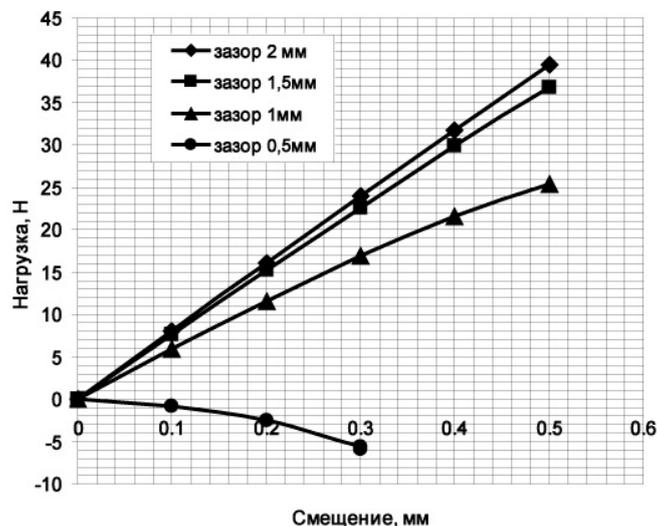


Рисунок 7 - Осевая нагрузочная характеристика для варианта № 2

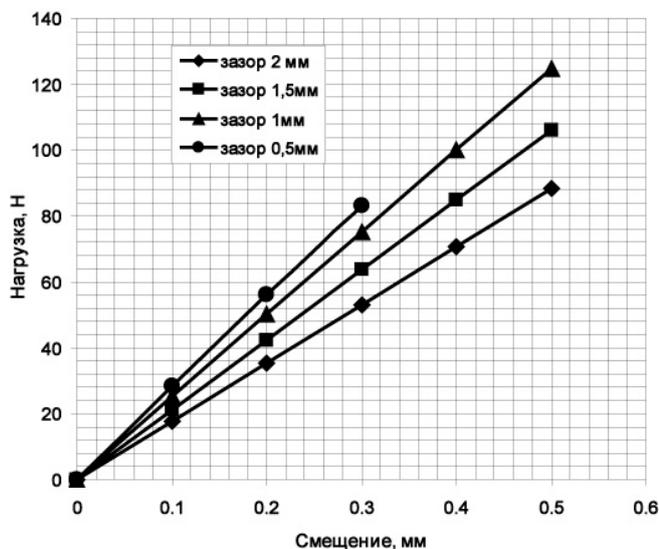


Рисунок 8 - Осевая нагрузочная характеристика для варианта № 3

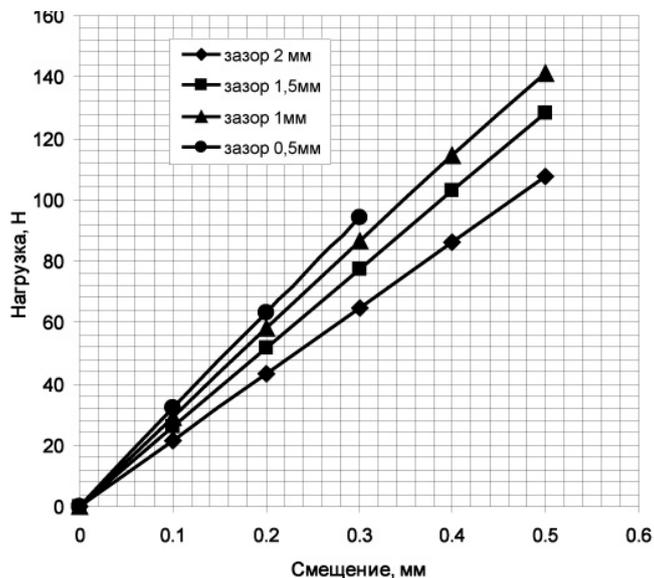


Рисунок 9 - Осевая нагрузочная характеристика для варианта № 4

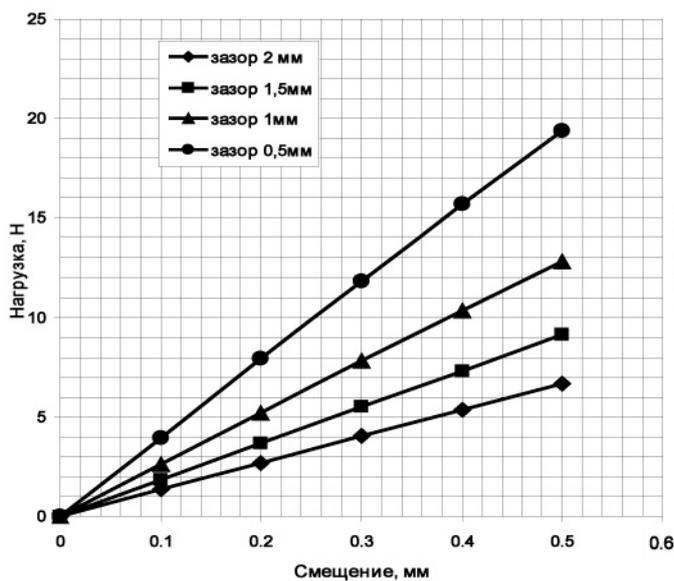


Рисунок 10 - Радиальная нагрузочная характеристика для варианта №1

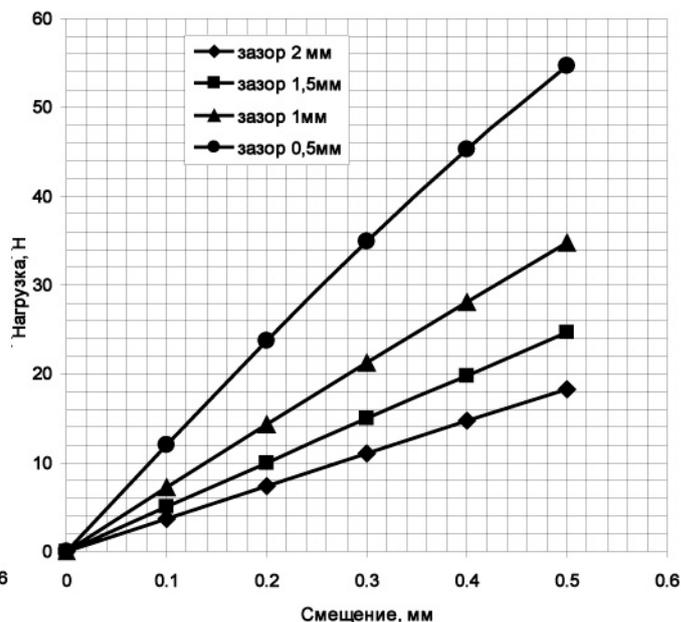


Рисунок 11 - Радиальная нагрузочная характеристика для варианта №2

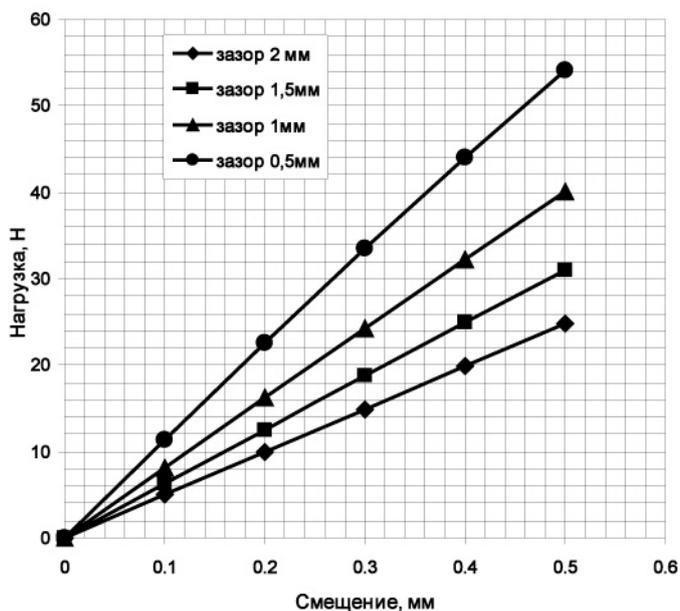


Рисунок 12 - Радиальная нагрузочная характеристика для варианта №3

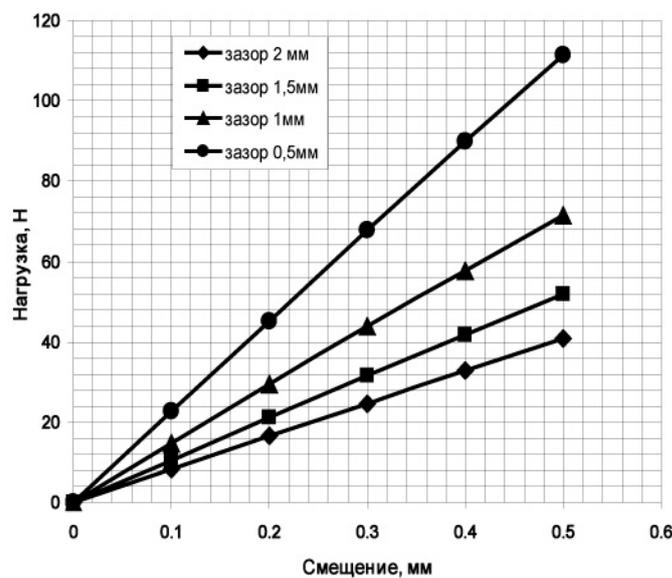


Рисунок 13 - Радиальная нагрузочная характеристика для варианта №4

Вариант конструкции № 1 с единичными центральными и периферийными магнитами имеет низкие нагрузочные характеристики: осевая нагрузочная способность 40 Н, радиальная – 20 Н при смещении ротора на 0,5 мм. Увеличение размеров магнитов в варианте № 2 приводит к увеличению радиальной характеристики в 2,8 раза до 56 Н, но практически не влияет на осевую. Варианты конструкции № 3 и № 4 имеют наилучшие характеристики, что достигается использованием двухполюсных центральных и периферийных магнитов. В этом случае

радиальная сила возрастает, как за счет увеличения количества магнитов, так и за счет отталкивания соседних кольцевых магнитов. Осевая сила возрастает за счет уменьшения рассеяния магнитного поля периферийных магнитов. Осевая и радиальная нагрузочная способность и жесткость возрастают в 2-3 раза в сравнении с вариантами № 1 и № 2 и составляют 140 Н и 111 Н соответственно, при высоких значениях жесткости – 313 Н/мм в осевом направлении и 227 Н/мм в радиальном. Расчетные значения жесткости для всех вариантов конструкции приведены на рисунках 14 и 15. Видно, что их наиболее оптимальные значения имеют конструкции № 3 и № 4.

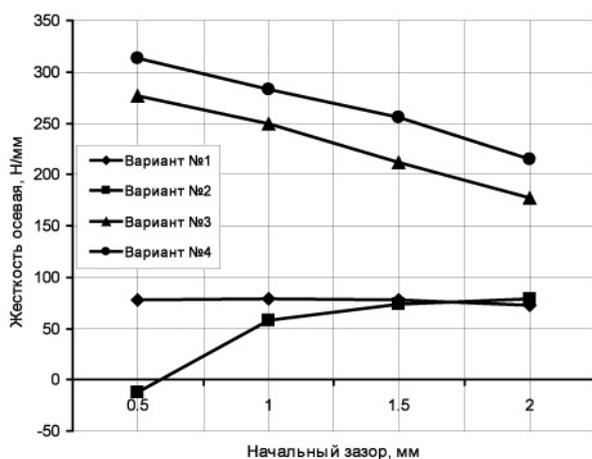


Рисунок 14 – Осевая жесткость в зависимости от начального зазора для различных вариантов подшипника

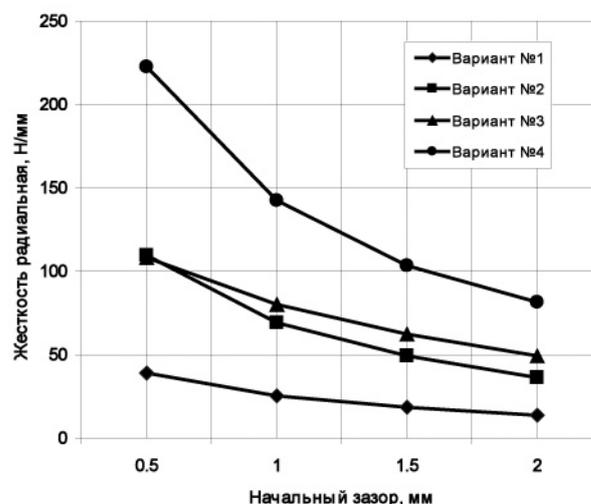


Рисунок 15 – Радиальная жесткость в зависимости от начального зазора для различных вариантов подшипника

Таким образом, данные расчета силовых и жесткостных характеристик показывают, что из рассчитанных наиболее оптимальными конструкциями являются многополюсные магнитные системы, отличающиеся максимальными значениями нагрузочных и жесткостных характеристик. Предлагаемая конструкция подшипника с комбинированной стабилизацией ротора и активацией ВТСП в режиме ZFC при сопоставимых размерах и одинаковых смещениях ротора, позволяет увеличить характеристики практически в два раза: нагрузочную способность – со 110 Н до 140 Н и жесткость с 270 Н/мм до 313 Н/мм, по сравнению с разработанным нами подшипником с активацией ВТСП в режиме FC, имеющем нагрузочные характеристики 60...75 Н, и жесткость – 140...190 Н/мм.

Анализируя полученные расчетные данные можно сделать вывод, что повышение нагрузочных характеристик можно достичь, увеличивая размеры и число полюсов магнитов. При этом необходимо также увеличивать размер сверхпроводниковых элементов. Такой подход

коррелирует с данными работы [3], в которой исследовалось силовое взаимодействие между диском с четырьмя concentрическими кольцевыми магнитами, максимальный диаметр которых составлял 620 мм, а минимальный – 320 мм, и десятью ВТСП дисками диаметром 150 мм, имеющих крупнокристаллическую структуру. Температура охлаждения ВТСП при этом составляла 65 К. Диск левитировал под нагрузкой 10000 Н при зазоре 7,5 мм, однако, не обладал нагрузочной способностью в радиальном направлении, в отличие от разработанного нами. Кроме того, используемые нами ВТСП элементы представляют собой квазиоднокристаллы, которые по своим магнитным характеристикам значительно превосходят использованные в упомянутой работе крупнокристаллические материалы. Таким образом, нагрузочные характеристики в несколько десятков тысяч ньютонов для данного типа подшипника являются вполне достижимыми.

### 3. Экспериментальная апробация

Для подтверждения работоспособности концепции предлагаемой конструкции подшипника изготовлена модель элемента подшипника с двухполюсными периферийными магнитами. Сверхпроводниковые элементы изготовлены на основе разработанной нами ранее технологии, представленной в работе [8]. Проведен предварительный эксперимент. После охлаждения ВТСП элементов статора в режиме ZFC наблюдалось самоцентрирование и устойчивая левитация вращающегося ротора на высоте 6 мм над статором (рисунок 16).



### Заключение

Предложена новая конструкция бесконтактного магнитного подшипника с использованием высокотемпературных объемных сверхпроводников. В ее основе лежат два силовых взаимодействия: (1) сила притяжения между кольцевыми центральными магнитами статора и ротора, обеспечивающая радиальную стабилизацию и самоцентрирование ротора, и (2) сила отталкивания между периферийными кольцевыми магнитами ротора и сверхпроводниковыми элементами, расположенными на статоре. Проведен расчет силового взаимодействия ротора и

статора для различных конструктивных вариантов магнитной системы подшипника. Лучшие характеристики соответствуют многополюсным вариантам магнитной системы подшипника, когда она включает два и более кольцевых и периферийных магнитов. Проведена экспериментальная апробация принципа действия данной конструкции подшипника, подтверждающая ее работоспособность.

### Список литературы

1. Matveev V., Nizhelskiy N., Poluschenko O. Force and stiffness characteristics of superconducting bearing prototype // *Physica C: Superconductivity*. 2004. Vol. 416, no. 1-2. P. 17-24.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2004.09.001>
2. Матвеев В.А. и др. Бесконтактная радиально-упорная опора на высокотемпературных сверхпроводниках: пат. № 2270940 РФ. 2006.
3. Walter H., Bock J., Frohne Ch., Schippl K., May H., Canders W.R., Kummeth P., Nick W., Neumueller H.-W. First Heavy Load Bearing for Industrial Application with Shaft Loads up to 10 kN // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol. 43. P. 995-998. [doi:10.1088/1742-6596/43/1/243](https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/243)
4. Полущенко О.Л., Нижельский Н.А., Сысоев М.А. Роторная система с опорами на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) // *Известия ВУЗов. Машиностроение*. 2011. № 3. С. 59-66.
5. Polushchenko O.L., Nizhelskiy N.A., Matveev V.A., Gerdi V.N. Prototype of a Disc-Type HTS Bearing // *Physics Procedia*. 2012. Vol. 36. P. 1014-1019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.098>
6. Магнитные бесконтактные подшипники с использованием объемных ВТСП элементов / О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, В.А. Матвеев, В.А. Маевский, М.М. Сухарев, В.А. Лыхин // Сборник трудов 3-й международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости». 2008. С. 280-281.
7. Грибанов С.В., Кулаев Ю.В., Курбатов П.А., Матвеев В.А., Нижельский Н.А., Полущенко О.Л. Расчет магнитных систем с элементами из высокотемпературных сверхпроводящих материалов // *Электричество*. 2009. № 2 .С. 51-57.
8. Nizhelskiy N.A., Poluschenko O.L., Matveev V.A. Employment of Gd–Ba–Cu–O elongated seeds in top-seeded melt-growth processing of Y–Ba–Cu–O superconductors // *Superconductor Science and Technology*. 2007. Vol. 20, no. 1. P. 81-86. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/20/1/015>

**Magnetic bearing on high-temperature superconductors with passive rotor stabilization**

# 05, May 2013

DOI: 10.7463/0513.0547989

Poluschenko O.L., Nijel'skii N.A., Sysoev M.A.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[olga@ihome.ru](mailto:olga@ihome.ru)[ujikolp@bk.ru](mailto:ujikolp@bk.ru)

The authors present a design of a magnetic bearing including ring permanent magnets and high-temperature superconductor (HTS) elements which ensure passive rotor stabilization. Various options of the bearing's construction were considered; their power and stiffness properties were calculated. The bearing design with bipolar magnetic systems of central and peripheral ring permanent magnets with an opposite magnetization has a maximum load capability. The prototype of the bearing element confirming working-capacity of the proposed bearing construction was manufactured and tested.

---

**Publications with keywords:** [permanent magnet](#), [bearing](#), [high-temperature superconductors](#), [HTS](#), [load capacity](#), [force and stiffness characteristics](#)

**Publications with words:** [permanent magnet](#), [bearing](#), [high-temperature superconductors](#), [HTS](#), [load capacity](#), [force and stiffness characteristics](#)

---

**References**

1. Matveev V., Nizhelskiy N., Poluschenko O. Force and stiffness characteristics of supeconducting bearing prototype. *Physica C: Superconductivity*, 2004, vol. 416, no. 1-2, pp. 17-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2004.09.001>
2. Matveev V.A., et al. *Beskontaktnaia radial'no-upornaia opora na vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikakh* [Touchless angular-contact support with the use of high-temperature superconductors]. Patent RF, no. 2270940. 2006.
3. Walter H., Bock J., Frohne Ch., Schipl K., May H., Canders W.R., Kummeth P., Nick W., Neumueller H.-W. First Heavy Load Bearing for Industrial Application with Shaft Loads up to 10 kN. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, vol. 43, pp. 995-998. [doi:10.1088/1742-6596/43/1/243](https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/243)
4. Polushchenko O.L., Nizhel'skii N.A., Sysoev M.A. Rotornaia sistema s oporami na osnove ob'emnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov (VTSP) [The rotor system with magnetic bearings based on high-temperature superconductors (HTS)]. *Izvestiia VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 3, pp. 59-66.

5. Polushchenko O.L., Nizhelskiy N.A., Matveev V.A., Gerdi V.N. Prototype of a Disc-Type HTS Bearing. *Physics Procedia*, 2012, vol. 36, pp. 1014-1019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.098>
6. Polushchenko O.L., Nizhel'skii N.A., Matveev V.A., Maevskii V.A., Sukharev M.M., Lykhin V.A. Magnitnye beskontaktnye podshipniki s ispol'zovaniem ob'emnykh VTSP elementov [Non-contact magnetic bearings with the use of volumetric HTSC elements]. *Sbornik trudov 3-i mezhdunarodnoi konferentsii «Fundamental'nye problemy vysokotemperaturnoi sverkhprovodimosti»* [Proc. of the 3<sup>rd</sup> international conference «Fundamental problems of high-temperature superconductivity»]. 2008, pp. 280-281.
7. Griбанov S.V., Kulaev Iu.V., Kurbatov P.A., Matveev V.A., Nizhel'skii N.A., Polushchenko O.L. Raschet magnitnykh sistem s elementami iz vysokotemperaturnykh sverkhprovodiashchikh materialov [Calculation of Magnetic Systems Containing Elements Made of High-Temperature Superconducting Materials]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 2, pp. 51-57.
8. Nizhelskiy N.A., Polushchenko O.L., Matveev V.A. Employment of Gd–Ba–Cu–O elongated seeds in top-seeded melt-growth processing of Y–Ba–Cu–O superconductors. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, no. 1, pp. 81-86. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/20/1/015>