Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика

https://doi.org/10.17816/transsyst683380

332

© И.В. Мартиросян, А.С. Стариковский, М.В. Балакина, С.В. Покровский

Национальный Исследовательский Ядерный Университет (Москва, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ СТОПОК КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ

Цель. Определение оптимальной конфигурации магнитного поля, обеспечивающей масштабируемость и высокие нагрузочные характеристики опорного ВТСП подшипника

Материалы и методы. Численный анализ ВТСП подшипников выполнен в среде моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. Получены распределения магнитного поля для различных конфигураций магнитных сборок ВТСП подшипника, рассмотрены кольцевой магнит, кубические магниты и секториальные постоянные магниты. Для различных геометрий ВТСП подшипников получены вертикальные и латеральные нагрузочные кривые.

Заключение. Установлено, что для достижения наиболее высокой стабильности и несущей способности сверхпроводящего подшипника при сохранении возможности масштабирования оптимальным является использование секториальных постоянных магнитов с магнитопроводом.

Ключевые слова: сверхпроводящий опорный подшипник; ВТСП композиты; численное моделирование.

Как цитировать:

Мартиросян И.В., Стариковский А.С., Балакина М.В., Покровский С.В. Моделирование магнито-левитационных характеристик опорного магнитного подшипника на основе стопок композитных ВТСП лент // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 332–347. doi: 10.17816/transsyst683380

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, A.S. Starikovskii, M.V. Balakina, S.V. Pokrovskii National research nuclear university (Moscow, Russia)

MAGNETIC LEVITATION MODELING OF SUPPORT MAGNETIC BEARING BASED ON STACKS OF COMPOSITE HTS TAPES

AIM. To determine the optimal magnetic field configuration ensuring scalability and high load on the support HTS bearing.

MATERIALS AND METHODS. Numerical analysis of HTS bearings was performed in Comsol Multiphysics modeling environment.

RESULTS. The authors determined magnetic field distributions for various configurations of magnetic HTS bearing assemblies, including a ring magnet, cubic magnets, and sectorial permanent magnets. The authors determined vertical and lateral load curves for different shapes of HTS bearings.

CONCLUSION. It was found that sectorial permanent magnets with a magnetic circuit is the optimal solution to achieve the highest stability and load-bearing capacity of a superconducting bearing while maintaining the scalability.

Keywords: superconducting support bearing; HTS composites; numerical modeling.

To cite this paper:

Martirosian IV, Starikovskii AS, Balakina MV, Pokrovskii SV. Magnetic Levitation Modeling of Support Magnetic Bearing Based on Stacks of Composite HTS Tapes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):332–347. doi: 10.17816/transsyst683380

введение

Сверхпроводящие магнитные подшипники (СМП), работающие на основе явления магнитной левитации, находят широкое применение в различных областях науки и техники, таких как кинетические накопители энергии [1, 2], транспортные системы [3, 4] и высокоточные прецизионные механизмы [5-7]. Уникальные преимущества СМП заключаются в хороших нагрузочных характеристиках, высокой устойчивости и стабильности, долговечности, способности обеспечивать бесконтактное вращение, а, следовательно, и в полном отсутствии потерь на трение. В настоящее время такие системы наиболее часто реализуются с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые благодаря своим высоким критическим характеристикам в магнитных полях позволяют создавать эффективные магнитные системы, не требующие активного управления [8-10]. Одним из перспективных конструкционных материалов, выступающих в качестве ВТСП элемента опорных ВТСП подшипников, является сверхпроводник на основе соединения YBa₂Cu₃O_{7-х} (далее YBCO), наиболее часто представленный в виде объемной ВТСП керамики [11-13] или композитных ВТСП лент [14, 15]. Последние обладают хорошими механическими свойствами, гибкостью и высокой термостабильностью в сравнении с традиционными сверхпроводящими материалами [16, 17], что обусловило релевантность их применения в высокоскоростных наземных транспортных системах высокооборотных магнитных подшипниках, И подверженных механическим нагрузкам.

Промышленные ВТСП композиты в виде лент на гибкой подложке широко используются в качестве активного элемента в конструкциях магнитных подшипников, где их часто комбинируют с постоянными магнитами (ПМ) для создания стабильного и однородного магнитного поля в выделенном направлении. В качестве источника магнитного поля эффективно применяются цилиндрические или кольцевые постоянные магниты. Однако, масштабирование систем на основе таких ПМ ограничено технологическими сложностями изготовления и высокой стоимостью производства крупных кольцевых магнитов. В связи с этим возникает необходимость исследования альтернативных конфигураций внешнего магнитного поля, которые могли бы обеспечить сравнимые или улучшенные характеристики опорного ВТСП подшипника.

Целью настоящего исследования является анализ магнитосиловых, левитационных и энергетических характеристик различных конфигураций магнитных подшипников с использованием ВТСП лент и постоянных магнитов. В качестве источников внешнего магнитного поля рассматриваются кольцевые магниты, кубические магниты и секториальные магниты, а также конфигурации с магнитопроводом. Особое внимание уделено численному моделированию и сравнению различных геометрий ВТСП подшипников, что позволяет не только прогнозировать и анализировать различия в магнитных и энергетических характеристиках для конфигураций магнитного основания СМП, но и оценить потенциал применимости тех или иных конфигураций в масштабируемых сверхпроводящих системах.

КОНФИГУРАЦИИ ОПОРНОГО ВТСП ПОДШИПНИКА

Базовая геометрия опорного сверхпроводящего подшипника с кольцевым постоянным магнитом приведена на Рис. 1. В данной конфигурации магнитный подшипник представляет собой систему, состоящую из статора в виде кольцевого постоянного магнита внутреннего радиуса 25 мм, ширины и высоты 10 мм и ротора в виде стопок композитных ВТСП лент, уложенных в форме многоугольника над поверхностью постоянного магнита. В качестве прототипа сверхпроводящих элементов ротора использованы промышленные ВТСП ленты ҮВСО ширины 12 мм и толщины 0,1 мм производства российской компании SuperOx [18]. Длинномерная ВТСП лента для реализации ротора разрезается на фрагменты трапецевидной формы, которые укладываются друг на друга, формируя стопки ВТСП лент. Полученные таким образом стопки лент выкладываются над кольцевым постоянным магнитом так, что центр вписанной в полученный многоугольник окружности и центр кольцевого ПМ лежат на оси вращения. Количество ВТСП лент в каждой стопке ротора опорного подшипника составляет 20, так что суммарная толщина ВТСП элемента составляет 2 мм. Минимальная величина левитационного зазора между стопками ВТСП лент и магнитным основанием составляет 7 мм. В каждом из рассмотренных случаев ПМ намагничены вдоль вертикальной оси z.

Преимущество базовой конфигурации опорного ВТСП подшипника заключается в высокой однородности магнитного поля при изменении углового положения сверхпроводящих элементов. Основным недостатком данной системы является сложность ее масштабирования в связи с технологическими трудностями, связанными, в частности, с изготовлением крупных кольцевых постоянных магнитов. Этот факт 336



Рис. 1. Базовая геометрия опорного ВТСП подшипника с кольцевым постоянным магнитом (слева) и сечение магнитной системы с геометрическими размерами (справа)

Fig. 1. Basic geometry of a support HTS bearing with a ring permanent magnet (left) and a cross-section of the magnetic system with geometric dimensions (right)

ограничивает возможности применения данного типа подшипников в крупномасштабных магнитных системах и делает необходимым поиск альтернативных магнитных конфигураций, обеспечивающих сопоставимые характеристики подшипника при меньших технологических затратах.

Наиболее доступным способом разработки масштабируемого опорного ВТСП подшипника является использование в качестве магнитного основания широко распространенных и коммерчески доступных кубических постоянных магнитов. Другой перспективной альтернативой является использование секторов постоянных магнитов, из которых можно выложить кольцевую структуру. На Рис. 2 приведены альтернативные конфигурации магнитного основания опорного ВТСП подшипника, рассматриваемые в настоящей работе. В случае кубических и секториальных магнитов радиус центра окружности, вписанной в магнитное основание, аналогично кольцевому ПМ, составляет 25 мм, а высота магнитов – 10 мм. В рамках исследования дополнительно рассматривается оптимизированная конфигурация магнитной системы, где кольцевой магнитопровод, расположенный под массивом кубических или секториальных магнитов, обеспечивает замыкание магнитного потока снизу и перераспределение его плотности. Ширина кольца магнитопровода соответствует ширине магнитов, а его толщина рассматривается как варьируемый параметр и изменяется при моделировании от нуля

337

(отсутствие магнитопровода) до 20 мм, что позволяет исследовать эффекты влияния геометрии магнитопровода на левитационные характеристики системы.



Рис. 2. Конфигурации магнитного основания опорного ВТСП подшипника: слева – кубические постоянные магниты; справа – секториальные постоянные магниты; красными стрелками обозначено направление намагниченности ПМ

Fig. 2. Configurations of the magnetic base of the HTS bearing: on the left – cubic permanent magnets; on the right – sectorial permanent magnets; the red arrows indicate the direction of magnetization of the PM

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Моделирование магнито-силовых характеристик опорного ВТСП подшипника выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Решение задачи выполняется с использованием формулировки нестационарных уравнений Максвелла в терминах компонент напряженности магнитного поля (Н-формализм). Разработанная модель ранее применялась для численного анализа простой левитационной системы на основе стопок ВТСП лент, подробное описание численной модели приведено в работе [19]. В качестве основного материального уравнения системы используется степенной закон для нелинейной вольтамперной характеристики сверхпроводника:

$$\boldsymbol{E} = E_c \left(\frac{\boldsymbol{J}}{\boldsymbol{J}_c} \right)^n, \tag{1}$$

где E – напряженность электрического поля, E_c – критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J – плотность тока, J_c – величина критической плотности тока YBCO, n – показатель степени, равный для используемых образцов 26.

Плотность тока J в сверхпроводнике определяется на основе решения нестационарных уравнений Максвелла, а критическая плотность тока J_c зависит от величины магнитного поля B и температуры T, как:

$$J_{c}(B,T) = L(B,T) \cdot J_{c0}$$
⁽²⁾

где L(B,T) – лифт-фактор критического тока, J_{c0} – плотность критического тока ВТСП лент в собственном поле при температуре кипения жидкого азота 77,4 К. Экспериментально измеренное значение критического тока для контрольных образцов ВТСП лент SuperOx составило 500 А. Поверхность для лифт-фактора L(B,T) критического тока образцов в диапазоне температур от 15 К до 92 К во внешнем магнитном поле амплитуды до 8 Тл вводится в виде интерполяции экспериментальных данных для точного учета температурной и полевой зависимости критического тока ВТСП элементов [18].

В качестве прототипа постоянных магнитов для реализации магнитного основания статора в каждом случае использованы NdFeB магниты марки N42. В качестве материала магнитопровода применяется магнитомягкое железо с индукцией насыщения 2,3 Тл. При моделировании сверхпроводящих лент используется метод гомогенизации, позволяющий избежать явного учета слоистой архитектуры ВТСП композитов без существенной потери точности вычислений [20]. Намагничивание ВТСП элементов в составе опорного магнитного подшипника выполняется в режиме охлаждения в нулевом внешнем магнитном поле (ZFC). При этом ВТСП элементы, предварительно охлажденные до температуры 77,4 К, приближаются с высоты 60 мм до высоты 7 мм от поверхности магнитного основания, после чего ротор приводится во вращение с частотой 2 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование магнито-силовых характеристик опорного ВТСП подшипника было выполнено для различных конфигураций блока магнитного основания, а именно для кольцевого ПМ, кольцевых сборок кубических и секториальных ПМ (Рис. 1), а также сборок кубических и секториальных ПМ, уложенных на кольцо магнитопровода. При этом ширина магнитопровода равняется ширине постоянных магнитов, а его высота варьировалась от 1 мм до 20 мм. В процессе проведения численного анализа было установлено, что при использовании магнитопровода максимальный прирост силы левитации в опорном

подшипнике (как для кубической, так и для секториальной конфигураций) наблюдается для высоты магнитопровода 10 мм, т.е. высоты, равной высоте одного постоянного магнита. При уменьшении толщины магнитопровода наблюдается ухудшение опорной функции подшипника, тогда как увеличение толщины не приводит к значимому приросту силы левитации.

На Рис. 3 приведены зависимости силы магнито-левитационного взаимодействия от величины левитационного зазора для ВТСП подшипников с различными видами блока магнитного основания.

Наименьшие нагрузочные характеристики СМП достигаются при использовании кубических магнитов (на 12% ниже, чем для кольцевого ПМ). Однако при дополнении конструкции магнитопроводом опорная способность такого подшипника становится сопоставима с СМП на основе секториальной сборки ПМ. Наибольшая величина силы магнитной



Рис. 3. Зависимости силы левитации от величины магнитолевитационного зазора между стопками ВТСП лент и магнитным основанием подшипника для различных конфигураций блока магнитного основаня; высота кольца магнитопровода составляет 10 мм
 Fig. 3. Dependences of the levitation force on the size of the magnetic levitation gap between the stacks of HTSC tapes and the magnetic base of the bearing for various configurations of the magnetic base block; the height of the magnetic

левитации была достигнута при использовании в качестве магнитного основания секториальной сборки ПМ с магнитопроводом. Максимальная сила левитации в такой геометрии оказалась на ~8% выше, чем в эталонной конфигурации СМП с кольцевым магнитом. Более того, использование магнитопровода в комбинации с секториальными постоянными магнитами приводит к тому, что вертикальная составляющая силы левитации такого СМП при любой из исследованных толщин магнитопровода (от 1 мм до 20 мм) выше, чем для эталонной конфигурации с кольцевым магнитом.

Для оценки потенциала использования различных конфигураций магнитного основания в масштабируемых сверхпроводящих системах был проведен расчет энергетических потерь в ВТСП элементе подшипника при вращении ротора с частотой 2 Гц (Рис. 4). Использование альтернативных конфигураций блока магнитного основания приводит к росту энергетических потерь на порядок в сравнении с геометрией на основе кольцевого ПМ. Кроме того, хорошо видно, что применение конфигураций с магнитопроводом приводит к значительному росту потерь в системе, что связано не только с увеличением внешнего магнитного поля, но и наблюдаемым ростом неоднородности магнитного поля и его влиянием на эффекты перемагничивания в ВТСП материале. Например, количество потерь на цикл для секториальной геометрии магнитного основания оказалось в ~2,5 раза ниже, нежели в аналогичной конфигурации с магнитопроводом высоты 10 мм. Вместе с тем, прирост силы левитации при использовании магнитопровода в этой конфигурации составил всего 14% (Рис. 3). Полученный результат свидетельствует о том, что релевантность применения секториальных ПМ с магнитопроводом может быть достигнута при масштабировании ВТСП подшипника путем увеличения его радиуса вместе с количеством ПМ или же добавления количества ВТСП лент в стопках (Рис. 5). При этом при увеличении радиуса СМП и количества ПМ сила левитации в системе возрастает линейно при том же количестве ВТСП лент в стопке.

Стоит также отметить, что величины энергетических потерь при использовании секториальных ПМ с магнитопроводом сопоставимы с величиной потерь при использовании кубических постоянных магнитов без магнитопровода. В связи с этим, применение кубических магнитов может быть рекомендовано для сравнительно простых магнитных систем, поскольку такие магниты широко распространены, коммерчески доступны и обеспечивают упрощение производства и сборки за счет стандартных размеров и форм.



- **Рис. 4.** Гистограма энергетических потерь в ВТСП элементе подшипника для различных конфигураций блока магнитного основания
- Fig. 4. Histogram of energy losses in the HTSC bearing element for different configurations of the magnetic base block





Fig. 5. Dependences of the levitation force on the radius of the SMP at a constant number of HTSC tapes in a stack (20 HTSC tapes) and dependences of the levitation force on the number of HTSC tapes in a stack at a constant radius of the SMP (radius 25 mm)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты численного анализа магнито-силовых и левитационных характеристик магнитных подшипников с использованием 2G ВТСП лент и различных конфигураций постоянных магнитов (кольцевые, кубические, секториальные, а также конфигурации с магнитопроводом). Особый акцент делается на масштабируемость систем и компенсацию недостатков магнитного поля отдельных конфигураций.

Установлено, что при масштабировании ВТСП подшипников кольцевые ПМ в магнитном основании могут быть заменены секториальные большей эффективностью на с в сравнении с использованием конфигурации из кубических постоянных магнитов. Секториальная конфигурация магнитного основания СМП позволяет частично сохранить преимущества кольцевого основания, обеспечивая более сильное и однородное магнитное поле. Сравнительно высокая однородность магнитного поля обеспечивает меньшие изменения магнитного взаимодействия между ВТСП элементами и постоянными магнитами при вращении, что, в свою очередь, способствует более плавному скольжению подшипника. Это не только улучшает его опорные функции, но и снижает потери энергии на перемагничивание. Это подтверждается результатами моделирования нагрузочных характеристик подшипника и расчетом энергетических потерь в подшипнике. Тем не менее подход использования секториальных ПМ при масштабировании является более сложным, поскольку требует изготовления магнитных секторов по индивидуальной схеме и с высокой точностью. Это приводит к увеличению стоимости и сложности производства, но может быть оправдано в случаях, когда требуется точная настройка магнитных характеристик. В то же время для более простых магнитных систем применение конфигурации кубических ПМ позволяет значительно снизить затраты на изготовление магнитного основания и повысить адаптируемость системы для различных приложений.

При дополнении магнитной системы магнитопроводом для улучшения концентрации и однородности магнитного поля может быть добавлен слой магнитомягкого железа. Установлено, что оптимальная высота магнитопровода для достижения наибольших левитационных сил составляет 10 мм, что равняется высоте одного постоянного магнита. Применение магнитопровода приводит к приросту максимальной силы левитации на 7% и 14% для кубической и секториальной конфигураций соответственно в сравнении с аналогичными геометриями СМП

без магнитопровода. Применение магнитопровода позволяет эффективно перенаправлять магнитные потоки, улучшая силовые характеристики подшипника. Однако релевантность масштабирования ВТСП систем в этом случае должна выполняться с учетом возрастающих потерь на перемагничивание при вращении ВТСП элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, https://rscf.ru/project/23-19-00394/

Авторы заявляют что:

- 1. У них нет конфликта интересов;
- 2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

- 1. They have no conflict of interest;
- 2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Mukoyama S., Nakao K., Sakamoto H., et al. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Vol. 27, N. 4. P. 1-4. doi: 10.1109/TASC.2017.2652327
- Miyazaki Y., Mizuno K., Yamashita T., et al. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system // Cryogenics. 2016. Vol. 80. P. 234-237. doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.05.011
- Oliveira R., Zeng X., Pei X., Burke R. HTS-tape magnetic bearing for ultra highspeed turbo motor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2023. Vol. 33, N. 5. P. 1-5. doi: 10.1109/TASC.2023.3253064
- Kummeth P., Ries G., Nick W., Neumüller H.W. Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronousHTS motor // Superconductor Science and Technology. 2004. Vol. 17, N 5. P. S259. doi: 10.1088/0953-2048/17/5/032
- 5. Yang W., Ji Y., Yu L., et al. Low frequency rotational loss in a high-temperature superconducting bearing and its application in micro-thrust measurement for space propulsion // Superconductor Science and Technology. 2019. Vol. 33, N. 1. doi: 10.1088/1361-6668/ab58b9
- Sakurai Y., Ashton P., Kusaka A., et al. Half-meter scale superconducting magnetic bearing for cosmic microwave background polarization experiments // J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1590. N. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012060

344

- Ye M., Yang W., Wang Y., et al. Effect of temperature on rotation loss in a superconducting device for microthrust measurement of electric propulsion system // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2015. Vol. 25, N 3. P. 1-4. doi: 10.1109/TASC.2015.2393555
- Ruiz-Ponce G., Arjona M.A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission // Energies. 2023. Vol. 16, N. 4. P. 1721. doi: 10.3390/en16041721
- Strasik M., Hull J.R., Mittleider J.A., et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperaturesuperconducting bearings // Superconductor science and technology. 2010. Vol. 23, N 3. P. 034021. doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034021
- Hull J.R. Superconducting bearings // Superconductor Science and Technology. 2000. Vol. 13, N. 2. P. R1. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
- Namburi D.K., Shi Y., Cardwell D.A. The processing and properties of bulk (RE) BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives // Superconductor Science and Technology. 2021. Vol. 34, N. 5. P. 053002. doi: 10.1088/1361-6668/abde88
- Hussein A.A.A., Hussein A.M.A., Hasan N.A. Study of the properties of YBCO superconductor compound in various preparation methods: a short review // Journal of Applied Sciences and Nanotechnology. 2023. Vol. 3, N. 1. P. 65-79. doi: 10.53293/jasn.2022.4867.1156
- Ogawa N., Hirabayashi I., Tanaka S. Preparation of a high-Jc YBCO bulk superconductor by the platinum doped melt growth method // Physica C: Superconductivity. 1991. Vol. 177, N. 1. P. 101-5. doi: https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90304-H
- Sass F., Dias D.H.N., Sotelo G.G., de Andrade Junior R. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements // Superconductor Science and Technology. 2018. Vol. 31, N. 2. P. 025006. doi: 10.1088/1361-6668/aa9dc1
- Osipov M., Anishenko I., Starikovskii A., et al. Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings // Superconductor Science and Technology. 2021. Vol. 34, N. 3. P. 035033. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
- Coombs T.A., Wang Q., Shah A., et al. High-temperature superconductors and their large-scale applications // Nature Reviews Electrical Engineering. 2024. Vol. 1, N. 2. P. 788-801. doi: 10.1038/s44287-024-00112-y
- Kurbatova E., Kurbatov P., Kuschenko E., et al. Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1559, N. 1. P. 012049. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012049
- Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A., et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa2Cu3O7 superconducting wires for fusion // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, N. 1. P. 2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
- 19. Martirosian I.V. Osipov .M.A., Starikovskii A.S., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving

maglev system // Modern Transportation Systems and Technologies. 2022. Vol. 8, N. 4. P. 46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57

 Shen B., Grilli F., Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications // IEEE access. 2020. Vol. 8. P. 100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177

REFERENCES

- 1. Mukoyama S, Nakao K, Sakamoto H, et al. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):1-4. doi: 10.1109/TASC.2017.2652327
- 2. Miyazaki Y, Mizuno K, Yamashita T, et al. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system. *Cryogenics*. 2016;80:234-237. doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.05.011
- 3. Oliveira R, Zeng X, Pei X, Burke R. HTS-tape magnetic bearing for ultra highspeed turbo motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2023;33(5):1-5. doi: 10.1109/TASC.2023.3253064
- 4. Kummeth P, Ries G, Nick W, Neumüller HW. Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronousHTS motor. *Superconductor Science and Technology*. 2004;17(5):S259. doi: 10.1088/0953-2048/17/5/032
- 5. Yang W, Ji Y, Yu L, et al. Low frequency rotational loss in a high-temperature superconducting bearing and its application in micro-thrust measurement for space propulsion. *Superconductor Science and Technology*. 2019;33(1). doi: 10.1088/1361-6668/ab58b9
- 6. Sakurai Y, Ashton P, Kusaka A, et al. Half-meter scale superconducting magnetic bearing for cosmic microwave background polarization experiments. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1590. doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012060
- Ye M, Yang W, Wang Y, et al. Effect of temperature on rotation loss in a superconducting device for microthrust measurement of electric propulsion system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015;25(3):1-4. doi: 10.1109/TASC.2015.2393555
- Ruiz-Ponce G, Arjona MA, Hernandez C, Escarela-Perez R. A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission. *Energies*. 2023;16(4):1721. doi: 10.3390/en16041721
- 9. Strasik M, Hull JR, Mittleider JA, et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperaturesuperconducting bearings. *Superconductor science and technology*. 2010;23(3). doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034021
- 10. Hull JR. Superconducting bearings. *Superconductor Science and Technology*. 2000;13(2):R1. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
- Namburi DK, Shi Y, Cardwell DA. The processing and properties of bulk (RE) BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives. *Superconductor Science and Technology*. 2021;34(5). doi: 10.1088/1361-6668/abde88
- 12. Hussein AAA, Hussein AMA, Hasan NA. Study of the properties of YBCO superconductor compound in various preparation methods: a short review.

Journal of Applied Sciences and Nanotechnology. 2023;3(1):65-79. doi: 10.53293/jasn.2022.4867.1156

- 13. Ogawa N, Hirabayashi I, Tanaka S. Preparation of a high-Jc YBCO bulk superconductor by the platinum doped melt growth method. *Physica C: Superconductivity*. 1991;177(1):101-5. doi: https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90304-H
- Sass F, Dias DHN, Sotelo GG, de Andrade Junior R. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(2):025006. doi: 10.1088/1361-6668/aa9dc1
- 15. Osipov M, Anishenko I, Starikovskii A, et al. Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings. *Superconductor Science and Technology*. 2021;34(3):035033. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
- Coombs TA, Wang Q, Shah A, et al. High-temperature superconductors and their large-scale applications. *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024;1(12):788-801. doi: 10.1038/s44287-024-00112-y
- Kurbatova E, Kurbatov P, Kuschenko E, et al. Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC. J. Phys.: Conf. Ser. 2020;1559(1). doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012049
- 18. Molodyk A, Samoilenkov S, Markelov A, et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa2Cu3O7 superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*. 2021;11(1). doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
- Martirosian IV. Osipov MA, Starikovskii AS, Pokrovskii SV, Rudnev IA. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving maglev system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57
- Shen B, Grilli F, Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications. *IEEE access*. 2020;8:100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177

Сведения об авторах:

Мартиросян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук, инженерисследователь;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Стариковский Александр Сергеевич, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID: 0000-0002-7605-7578;

E-mail: sannyok1995@gmail.com

Балакина Мария Вадимовна, студент;

ORCID: 0009-0006-3831-8171;

E-mail: masha.ball.8530@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,

заведующий научно-исследовательской лаборатории;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Cand. Sci. (Phys.-Math.), research engineer; eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768; E-mail: mephizic@gmail.com Aleksandr S. Starikovskii, research engineer; eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID: 0000-0002-7605-7578; E-mail: sannyok1995@gmail.com Maria V. Balakina, student; ORCID: 0009-0006-3831-8171; E-mail: masha.ball.8530@gmail.com Sergey V. Pokrovskii, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory; eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289; E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com