

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

УДК [UDC] 538.955
<https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

© И.В. Мартиросян, Д.А. Александров,
С.В. Покровский, И.А. Руднев
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПРИ НАРУШЕНИИ СООСНОСТИ РОТОРА И СТАТОРА

Цель. Анализ влияния гармонических возбуждений при несоосности подшипника на силовые и механические характеристики высокооборотного магнитного подшипника на основе ленточных высокотемпературных сверхпроводящих композитов.

Методы. Численный мультифизический анализ сверхпроводящего радиально-упорного магнитного подшипника выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. При отклонении от соосности в расположении магнитных элементов ВТСП подшипника проявляются гармонические возбуждения, вибрации и биения, приводящие к ухудшению нагрузочных характеристик устройства и снижению динамической проницаемости магнитной системы.

Заключение. Разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические и механические характеристики высокооборотных ВТСП подшипников может быть применена для разработки высокоскоростных роторных систем.

Ключевые слова: ВТСП композиты; высокооборотный ВТСП подшипник; транспортные системы; метод конечных элементов.

Как цитировать:

Мартиросян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В., Руднев И.А. Динамические характеристики магнитного подшипника на основе высокотемпературных сверхпроводников при нарушении соосности ротора и статора // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 76–92.
<https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, D.A. Alexandrov, S.V. Pokrovskii, I.A. Rudnev

National research nuclear university MEPhI

(Moscow, Russia)

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MAGNETIC BEARING BASED ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS IN THE EVENT OF ROTOR AND STATOR MISALIGNMENT

Aim: This study aims to analyze the influence of harmonic excitations during bearing misalignment on the power and mechanical characteristics of a high-speed magnetic bearing based on tape high-temperature superconducting composites.

Methods. Numerical multiphysics analysis of a superconducting magnetic bearing was performed using the finite element method in Comsol Multiphysics.

Results. When there is a deviation from coaxiality in the arrangement of the magnetic elements of the HTS bearing, harmonic excitations, vibrations, and beats appear, leading to a deterioration in the load characteristics of the device and a decrease in the dynamic permeability of the magnetic system.

Conclusion. The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic and mechanical characteristics of high-speed HTS bearings and can be used to develop high-speed rotor systems.

Keywords: HTS composites, high-speed HTS bearings, transport systems, finite element method.

To cite this article:

Martirosian IV, Alexandrov DA, Pokrovskii SV, Rudnev AI. Dynamic characteristics of a magnetic bearing based on high temperature superconductors in the event of rotor and stator misalignment. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):76–92. <https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью огромного числа современных вращающихся машин является магнитный подшипник. Перед традиционными механическими подшипниками магнитные подшипники обладают рядом преимуществ, такими как высокий срок эксплуатации, высокий уровень демпфирования механических возбуждений, минимальные затраты на техническое обслуживание [1, 2]. В настоящее время магнитные подшипники на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) всё чаще находят применение в областях аэрокосмической промышленности, транспорта, экологически чистого производства и хранения электроэнергии. Такие ВТСП подшипники не требуют сложного активного управления и способны работать в сложных условиях, таких как вакуум, высокие скорости вращения, экстремальные температурные диапазоны, агрессивные химические среды и т.д. [3–5]. Первый в мире пассажирский поезд на магнитной подушке был разработан на основе ВТСП подшипников в 2002 году [6]. В дальнейшем в Китае, Германии и Бразилии были проведены испытания магнито-левитационного транспорта при транспортировке по вакуумным трубам и построены первые испытательные линии маглева [7–9]. В последние десятилетия интерес к вопросам разработки и оптимизации магнитных ВТСП подшипников продолжает неуклонно расти. В связи с этим, исследования динамических характеристик ВТСП подшипников, напрямую связанные с обеспечением их устойчивости и надежности при длительной работе, привлекают всё больше внимания [10–13].

Преимущественная часть магнитных ВТСП подшипников состоит из двух основных блоков: ВТСП элементов и сборок постоянных магнитов (ПМ) [14]. В более ранних исследованиях в качестве ВТСП элементов в основном применялись объемные сверхпроводники. Однако, в настоящее время для создания ВТСП подшипников всё чаще применяют различные наборы ленточных ВТСП композитов [15, 16]. Композитные ВТСП ленты имеют слоистую структуру, содержащую прочную металлическую подложку, слой сверхпроводника, а также слои меди и серебра с хорошей теплопроводностью [17]. Такие проводники могут быть сложены в стопки лент и обладают хорошими механическими свойствами, имеют высокую термическую стабильность, при этом магнито-силовые характеристики композитных лент сопоставимы с объемными ВТСП, а в ряде случаев превосходят их [18–21].

В настоящей работе приводятся результаты моделирования динамических характеристик ВТСП подшипника на основе ленточных ВТСП композитов. Рассматриваются два случая: система с идеальным центрированием подшипника, а также система со смещенным ротором. Численный анализ магнито-силовых, механических и динамических характеристик выполняется с использованием метода конечных элементов.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Общий вид моделируемой системы представлен на рис. 1. На стальном валу диаметра 40 мм (см. рис. 1А) закреплены два идентичных ВТСП подшипника так, что расстояние между центрами подшипников составляет 30 см. Общая длина вала составляет 40 см. Каждый ВТСП подшипник представляет собой три незамкнутые ВТСП обмотки, расположенные на валу и три сборки постоянных магнитов, расположенные напротив ВТСП обмоток.

Рассмотрим подробнее конструкцию подшипника (см. рис. 1Б). В основе статора лежат три обмотки по 10 слоев в каждой из промышленной ВТСП-ленты ширины 12 мм. В качестве прототипов моделируемых лент выступали промышленные ВТСП ленты производства фирмы SuperOx [22]. Критический ток сверхпроводника в собственном поле при температуре кипения жидкого азота составляет 500 А. Критическая температура – 92 К. Наиболее важные характеристики композита, использующиеся при проведении численного анализа, представлены в табл. 1. Подробная спецификация характеристик ВТСП лент представлена на сайте производителя.

Ротор собран из постоянных NdFeB магнитов марки N42, расположенных вокруг сверхпроводника. В каждом из 3 колец находится по 16 постоянных магнитов. Остаточная индукция магнитного поля на поверхности каждого магнита составляет $\sim 0,25$ Тл. Вес каждого магнита составляет 7,5 г. В каждом кольце магнитное поле ПМ ориентировано одинаково по отношению к центральной оси ротора. Магнитные поля соседних колец ПМ – встречно-ориентированы.

Охлаждение ВТСП элементов до температуры 77 К в рамках модели осуществляется посредством теплопроводности твердого тела от массивного стального вала, имитируя таким образом режим криокулерного охлаждения сверхпроводника. Система находится в вакууме. Предполагается, что в начальный момент времени температура в системе превышает критическую температуру ВТСП лент, и после центрирования

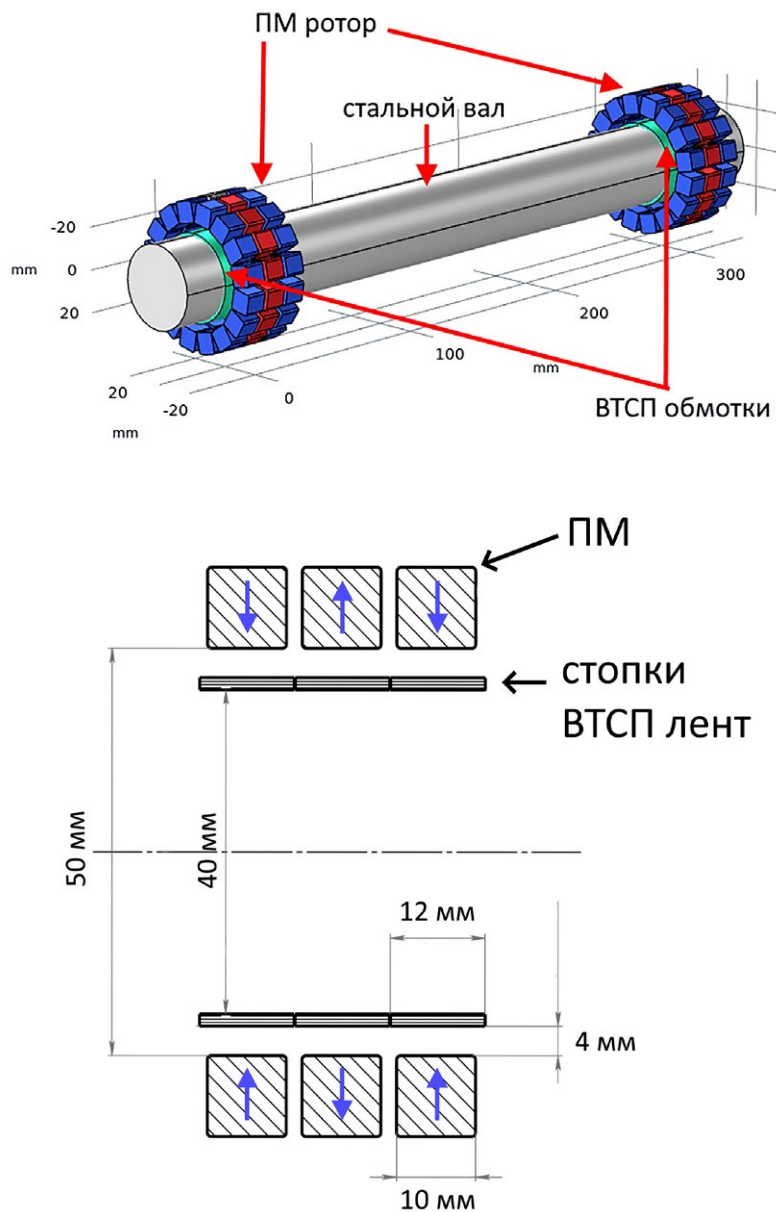


Рис. 1. Геометрия моделируемой системы:

А – общая конфигурация расчетной системы; Б – схема магнитной системы одного подшипника

Fig. 1. Geometry of the simulated system:

А – general configuration of the settlement system; Б – diagram of the magnetic system of one bearing

роторов система охлаждается. Таким образом осуществляется режим намагничивания при охлаждении в присутствии внешнего магнитного поля (FC – field cooling).

В рамках представленной работы рассматриваются динамические характеристики системы для двух случаев: в первом случае оба ротора

подшипника соосны и правильно центрированы относительно вала, во втором случае – один из роторов смещен относительно центральной оси на 1 мм. Результаты для двух случаев сравниваются для того, чтобы исследовать влияние несоосности в системе на ее динамические характеристики.

Таблица 1. Характеристики ВТСП лент

Table 1. Characteristics of HTSC tapes

Параметр	SuperOx
Толщина сверхпроводящего слоя REBCO (где RE-редкоземельный элемент)	1–3 мкм
Подложка	Hastelloy C276 50 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм
Толщина двустороннего медного покрытия	20 мкм (с каждой стороны)
Средний критический ток для ленты шириной 12 мм, А	500
Показатель степени ВАХ (используется при расчетах)	~27

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Появление композитных ВТСП лент способствовало активному развитию средне и крупномасштабных сверхпроводниковых систем. Математические модели, пригодные для оценки тепловых и электромагнитных полей в сверхпроводниках, из простых аналитических превратились в сложные вычислительные модели. Конечно-элементное моделирование сложных магнито-левитационных систем с использованием Н-формулировки уравнений Максвелла [23, 24] хотя и является одним из самых перспективных и точных методов расчета таких систем, но его использование требует больших затрат вычислительных ресурсов и времени. Используемый на данном этапе Т-А формализм является одним из самых новых сеточных методов, основная идея которого заключается в использовании формулировок токового векторного потенциала (ТВП) для сверхпроводящей области, и магнитного векторного потенциала (МВП) для непроводящих областей.

Управляющее уравнение А-Т формулировки:

$$\nabla \times \rho \nabla \times T = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial (\mu_0 \vec{H})}{\partial t}, \quad (1)$$

где ρ – сопротивление, \mathbf{B} – индукция магнитного поля, t – время, μ_0 – магнитная постоянная. В качестве зависимой переменной T выступает токовый векторный потенциал (ТВП):

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \bullet T, \quad (2)$$

T – величина токового потенциала, $\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$ – вектор нормали.

Распределение токов в сверхпроводящей области определяется как:

$$\vec{J} = \nabla \times \vec{T}. \quad (3)$$

В остальных областях решается задача для магнитного векторного потенциала. Управляющее уравнение А-формализма выглядит следующим образом:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad (4)$$

где μ – магнитная проницаемость.

Вольтамперная характеристика $E = \rho \bullet J$ задается в виде степенного закона для сопротивления ВТСП слоя

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1}, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля, ρ – сопротивление, E_c – критерий, равный 1 мкВ/см, J_c – плотность критического тока, n – показатель степени ВАХ. Величина критического тока, так же, как и величина показателя степени n , являются одними из основных характеристик ВТСП материала и были представлены в табл. 1.

Стоит отметить, что основное преимущество А-Т формулировки заключается в аппроксимации тонких слоев сверхпроводника двумерными, что позволяет с учетом поправочного коэффициента на тепловые потери в объеме существенно сократить расчетное время без потери в точности.

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплопередачи в твердых телах:

$$dC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-kT) = Q + dC_p u \nabla T, \quad (5)$$

где d – плотность; C_p – теплоемкость; T – температура; k – теплопроводность; Q – все источники тепла, включая термоэлектрические; u – поле скоростей температур.

Плотности, теплоемкости и теплопроводности всех слоев ленты заложены в виде интерполяции экспериментальных данных [25]. Локальное тепловыделение в системе $Q = E \cdot J$ связывает электродинамическую и теплофизическую задачи. Зависимость критического тока лент от температуры задается выражением:

$$J_c = \alpha \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^{1,5}, \quad (6)$$

где T_c – критическая температура, равная 92 К; α – фитирующий параметр.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены расчетные нагрузочные кривые при горизонтальном смещении роторов (смещение вдоль центральной оси) для полностью соосной системы и для системы с радиальным смещением одного из роторов на 1 мм. Хорошо видно, что при малых горизонтальных смещениях сила магнито-левитационного взаимодействия для случая асимметричного положения одного из подшипников немного превышает силу левитации для центрированной системы. Это обусловлено более высокой силой сцепки для отдельных ПМ, наиболее приближенных к ВТСП обмоткам. При равномерном давлении на ротор в условиях неравномерного распределения магнитных сил, при малых смещениях положение несоосного ротора становится перекошенным, и некоторое время для смещения роторов приходится прикладывать большее усилие. После этого ход нагрузочных кривых практически не отличается для двух рассмотренных случаев вплоть до смещений величины ~ 8 мм. Однако, для случая соосной системы максимальная сила взаимодействия составляет 130,4 Н при смещении на 9,2 мм, а для несимметричной системы – 117,4 Н при смещении на 8,7 мм, что говорит о меньшей осевой устойчивости

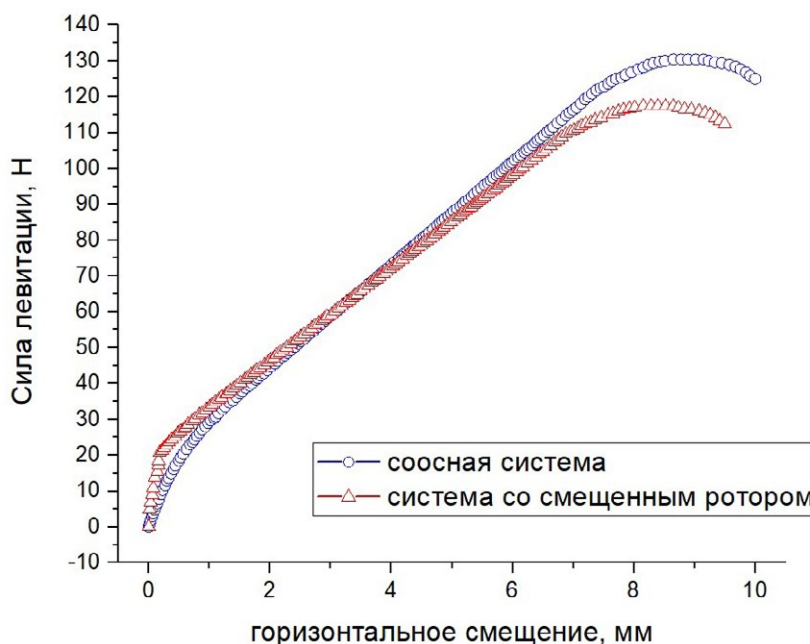


Рис. 2. Нагрузочные характеристики системы ВТСП подшипников при горизонтальном смещении: зависимости силы левитации от величины смещения роторов вдоль центральной оси системы

Fig. 2. Load characteristics of the HTSC bearing system with horizontal displacement: dependence of the levitation force on the magnitude of the rotor displacement along the central axis of the system

несимметричной системы и снижении упорной функции подшипников при отклонении от соосности.

При радиальных смещениях ситуация несколько отличается. В силу того, что один из роторов смещен в радиальном направлении, то радиальное смещение сперва затрагивает лишь один из двух роторов, и сила левитации при смещениях до 1 мм определяется лишь одним ротором (см. рис. 3). При своих максимальных смещениях обе системы характеризуются приблизительно одинаковыми значениями левитационной силы. Однако, для несоосной системы нагрузочная кривая имеет скачок характеристики, что, вероятно, скажется на динамических и механических свойствах системы при высокооборотном вращении.

Действительно, в то время как симметричные ВТСП подшипники обладают равномерной скоростью вращения, система со смещенным ротором испытывает вибрации и биения (см. рис. 4).

Примечательным является тот факт, что скорость вращения в течение первого цикла прокручивания подшипника снижается и растет на ~ 40 % от своего равновесного значения. Во время второго оборота максимальное

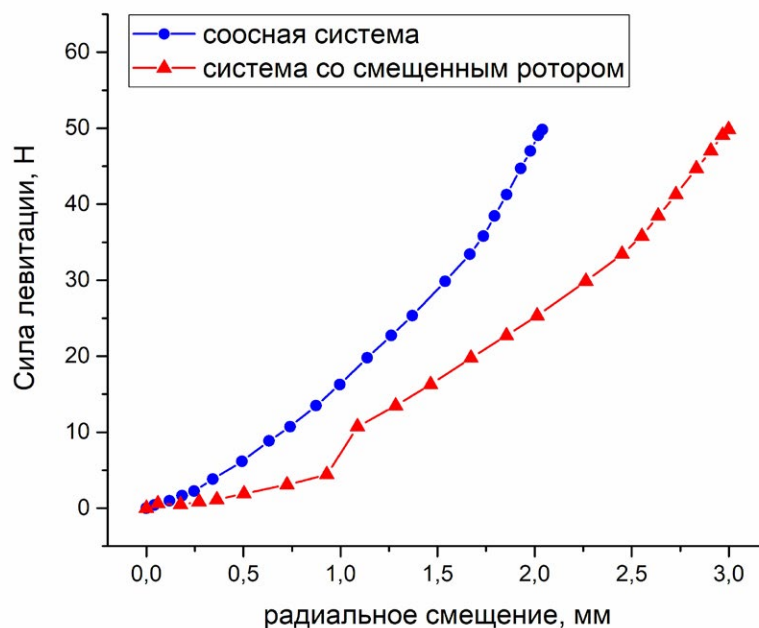


Рис. 3. Нагрузочные характеристики системы ВТСП подшипников при радиальном смещении: зависимости силы левитации от величины смещения роторов перпендикулярно центральной оси системы

Fig. 3. Load characteristics of the HTSC bearing system with radial displacement: dependence of the levitation force on the magnitude of the rotor displacement perpendicular to the central axis of the system

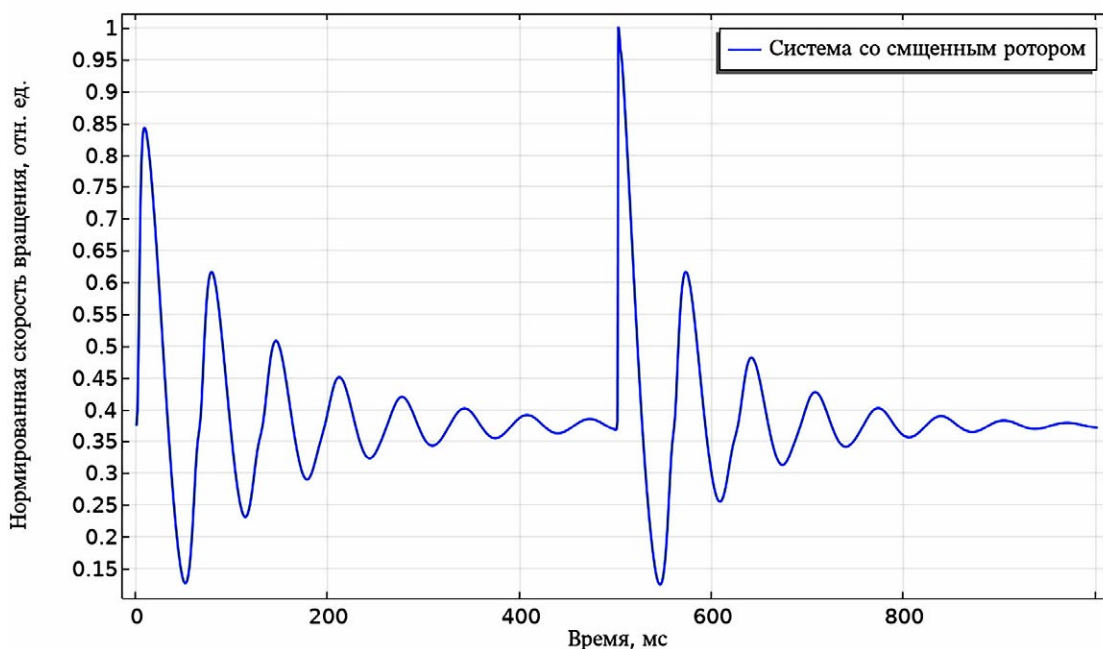


Рис. 4. Зависимость скорости вращения несимметричного ротора от времени для двух полных оборота подшипника

Fig. 4. Dependence of rotation speed of an asymmetrical rotor from time for two full revolutions of the bearing

снижение скорости составляет $\sim 42\%$, а максимальный прирост $\sim 65\%$. Таким образом, наблюдается «раскачка» подшипника при несоосном вращении.

На основе разработанных численных моделей был рассчитан коэффициент динамической проницаемости системы при различных скоростях вращения подшипника. Результаты расчетов представлены на рис. 5 для центрированной системы и систем с различными смещениями одного из роторов. Хорошо видно, что центрированная система выдерживает нагрузки до 2000 оборотов в секунду без существенного снижения динамической проницаемости и лишь при частотах вращения $\sim 20\,000$ Гц проницаемость системы обращается в ноль. Чем сильнее отклонение от соосности, тем раньше начинает снижаться коэффициент динамической проницаемости. Возникновение дополнительных вибраций и биений приводит к нарушению ее стабильности и устойчивости. Так, для системы со смещенным ротором на 1 мм нестабильность работы начинает проявляться уже при частотах вращения порядка 100 об./сек. Для системы со смещенным ротором на 0,5 мм система находится в устойчивом состоянии до частот порядка 300 об./сек.

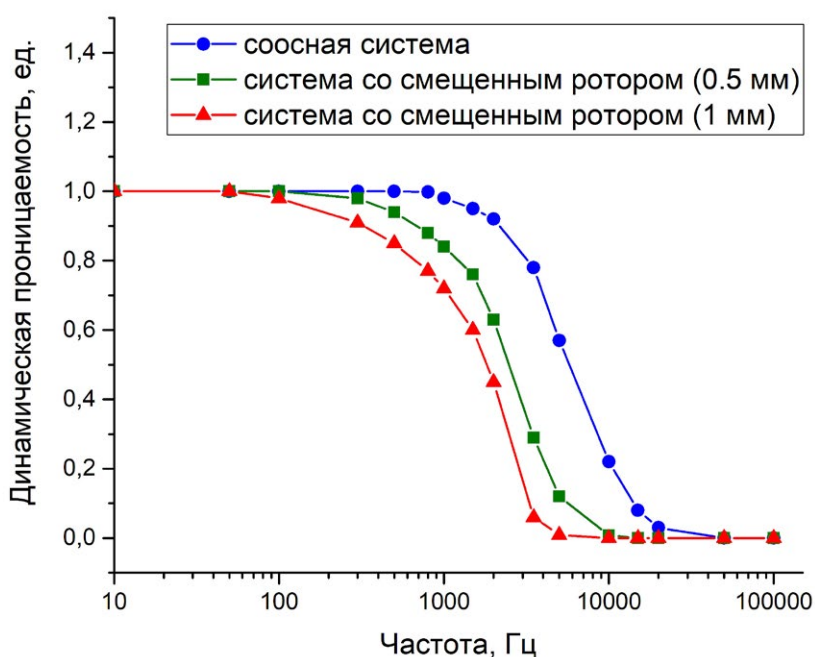


Рис. 5. Зависимости коэффициента динамической проницаемости системы от частоты вращения подшипников

Fig. 5. Dependencies of the coefficient of dynamic permeability of the system on bearing rotation speed

Таким образом, с использованием методов численного анализа показаны возможности прогнозирования динамических и магнито-силовых характеристик высокооборотных радиально-упорных подшипников на основе ВТСП композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработана комплексная мультифизическая модель радиально-упорного магнитного подшипника на основе ленточных ВТСП композитов. Модель на основе А-Т формализма позволяет за сравнительно короткое время выполнять совместный электродинамический и тепловой расчет параметров магнитной системы при движении ВТСП элементов в градиентном магнитном поле.

Система, состоящая из двух вращающихся подшипников исследована на предмет влияния отклонения одного из подшипников от соосного симметричного положения. Показано, что при радиальном отклонении одного из роторов на 1 мм наблюдается снижение левитационной силы при смещении роторов вдоль центральной оси на 17 %. При этом максимальная радиальная сила магнито-левитационного взаимодействия остается неизменной, но нагрузочная характеристика при радиальных смещениях испытывает скачок, что приводит к возникновению биений и вибраций в процессе работы подшипника. Динамическая проницаемость системы исследована при различных скоростях вращения как для центрированной системы, так и для систем с различным отклонением ротора. Показано, что соосная система способна сохранять свои динамические свойства при работе на частоте до 2000 Гц, при этом полная потеря динамической стабильности наблюдается лишь при скоростях вращения $\sim 20\,000$ об./сек. Системы с радиальным отклонением ротора демонстрируют на порядок худшие динамические характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 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

1. Sun X.D., Chen L., Yang Z.B. Overview of bearingless permanent-magnet synchronous motors // *IEEE T Ind Electron*. 2013. Vol. 60. P. 5528–5538. doi: 10.1109/tie.2012.2232253
2. Samanta P., Hirani H. Magnetic bearing configurations: theoretical and experimental studies // *IEEE Trans Magn*. 2008. Vol. 44. P. 292–300. doi: 10.1109/tmag.2007.912854
3. Andriollo M., Fanton E., Tortella A. A review of innovative electromagnetic technologies for a totally artificial heart // *Appl Sci*. 2023. Vol. 13. P. 1870. doi:10.3390/app13031870
4. Rogers J.G., Pagani F.D., Tatooles A.J., et.al. Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure // *N Engl J Med*. 2017. Vol. 376. P. 451–460. doi: 10.1056/NEJMoa1602954
5. Li X.J., Palazzolo A., Wang Z.Y. A combination 5-DOF active magnetic bearing for energy storage flywheels // *IEEE Trans Transp Electrification*. 2021. Vol. 7. P. 2344–2355. doi: 10.1109/tte.2021.3079402
6. Wang J.S., Zeng Y., Huang H., et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world // *Physica C*. 2002. Vol. 378–381. N. 1. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2017. Vol. 27. N. 6. P. 3602008. doi: 10.1109/TASC.2017.2716842
8. Kuhn L., de Haas O., Berger D. Supratrans II–Test drive facility for a superconductor based maglev train. *Elekt. Bahnen*. 2012. Vol. 8. P. 461–469. doi: 10.1109/TASC.2005.849636
9. Sotelo G.G., Oliveira R.A.H., Costa F.S., et.al. A full scale superconducting magnetic levitation vehicle operational line // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2015. Vol. 23. N. 3. P. 3601005. doi: 10.1109/TASC.2014.2371432
10. Hikihara T., Moon F.C. Chaotic levitated motion of a magnet supported by superconductor // *Phys. Lett. A*. 1994. Vol. 191. N. 3/4. P. 279–284. doi: 10.1016/0375-9601(94)90140-6
11. Hikihara T., Fujinami T., Moon F.C. Bifurcation and multifractal vibration in dynamics of a high-T_c superconducting levitation system // *Phys. Lett. A*. 1997. Vol. 231. N. 3/4. P. 217–223. doi: 10.1016/S0375-9601(97)00305-8
12. Coombs T.A., Campbel A.M. Gap decay in superconducting magnetic bearings under the influence of vibrations // *Physica C*. 1996. Vol. 256. N. 3. P. 298–302. doi: 10.1016/0921-4534(95)00670-2

13. Hull R. Superconducting bearings // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. Vol. 13. N. 2. P. R1-R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
14. Wang J., Wang S., Zeng Y., et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world // *Physica C.* 2002. Vol. 378–381. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
15. Jha A.K., Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy // *Frontiers in Physics, Review.* 2019. Vol. 7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082
16. Barth C., Mondonico G., Senatore C. Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T // *Supercond. Sci. Technol.* 2015. Vol. 28. N. 4. P. 045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
17. MacManus-Driscoll J.L., Wimbush S.C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors // *Nature Reviews Materials.* 2021. Vol. 6. N. 7. P. 587–604. doi:10.1038/s41578-021-00290-3
18. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., et al. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. Vol. 27. P. 044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
19. Tomków Ł., Mineev N., Smara A., et al. Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20 K // *Cryogenics.* 2020. Vol. 105. P. 103017. doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017
20. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. In: *High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy.* 2012. P. 34–68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
21. Patel A., Baskys A., Mitchell-Williams T., et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape // *Supercond. Sci. Technol.* 2018. Vol. 31. N. 9. P. 09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
22. SuperOx [Internet]. [cited 2023 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
23. Мартиросян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А. и др. Моделирование динамических характеристик магнитолевитационной транспортной платформы в процессе движения, разгона и торможения // *Инновационные транспортные системы и технологии.* 2022. Т. 8. № 3. С. 63–77. EDN: FRVRIA doi: 10.17816/transsyst20228363-77
24. Osipov M., Anishenko I., Starikovskii A., et al. Scalable Superconductive Magnetic Bearing Based on Non-Closed CC Tapes Windings // *Supercond. Sci. Technol.* 2021. P. SUST-104182.R1. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
25. Anischenko I.V., Osipov M.A., Pokrovskii S.V., et al. Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures // *Physics of Atomic Nuclei.* 2021. Vol. 4. N. 12. P. 1982–1990. doi: 10.1134/S1063778821100045

REFERENCES

1. Sun XD, Chen L, Yang ZB. Overview of bearingless permanent-magnet synchronous motors. *IEEE T Ind Electron.* 2013;60:5528–5538. doi: 10.1109/tie.2012.2232253
2. Samanta P, Hirani H. Magnetic bearing configurations: theoretical and experimental studies. *IEEE Trans Magn.* 2008;44:292–300. doi: 10.1109/tmag.2007.912854
3. Andriollo M, Fanton E, Tortella A. A review of innovative electromagnetic technologies for a totally artificial heart. *Appl Sci.* 2023;13:1870. doi:10.3390/app13031870
4. Rogers JG, Pagani FD, Tatoes AJ, et.al. Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure. *N Engl J Med.* 2017;376:451–460. doi: 10.1056/NEJMoa1602954
5. Li XJ, Palazzolo A, Wang ZY. A combination 5-DOF active magnetic bearing for energy storage flywheels. *IEEE Trans Transp Electrification.* 2021;7:2344–2355. doi: 10.1109/tte.2021.3079402
6. Wang JS, Zeng Y, Huang H, et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C.* 2002;378–381(1): 809-814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017;27(6):3602008. doi: 10.1109/TASC.2017.2716842
8. Kuhn L, de Haas O, Berger D. Supratrans II–Test drive facility for a superconductor based maglev train. *Elekt. Bahnen.* 2012;8:461–469. doi: 10.1109/TASC.2005.849636
9. Sotelo GG, Oliveira RAH, Costa FS, et.al. A full scale superconducting magnetic levitation vehicle operational line. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015;23(3):3601005. doi: 10.1109/TASC.2014.2371432
10. Hikihara T, Moon FC. Chaotic levitated motion of a magnet supported by superconductor. *Phys. Lett. A.* 1994;191(3/4):279–284. doi: 10.1016/0375-9601(94)90140-6
11. Hikihara T, Fujinami T, Moon FC. Bifurcation and multifractal vibration in dynamics of a high-Tc superconducting levitation system. *Phys. Lett. A.* 1997;231(3/4): 217–223. doi: 10.1016/S0375-9601(97)00305-8
12. Coombs TA, Campbel AM. Gap decay in superconducting magnetic bearings under the influence of vibrations. *Physica C.* 1996;256(3):298–302. doi: 10.1016/0921-4534(95)00670-2
13. Hull R. Superconducting bearings. *Supercond. Sci. Technol.* 2000;13(2):R1–R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
14. Wang J, Wang S, Zeng Y, et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world. *Physica C.* 2002;378–381:809-14. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
15. Jha AK, Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy. *Frontiers in Physics, Review.* 2019;7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082

16. Barth C, Mondonico G, Senatore C. Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T. *Supercond. Sci. Technol.* 2015;28(4):045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
17. MacManus-Driscoll JL, Wimbush SC. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors. *Nature Reviews Materials.* 2021;6(7):587–604. doi:10.1038/s41578-021-00290-3
18. Lee S, Petrykin V, Molodyk A, et al. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Supercond. Sci. Technol.* 2014;27:044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
19. Tomków Ł, Mineev N, Smara A, et al. Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20 K. *Cryogenics.* 2020;105:103017. doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017
20. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. 2012. pp. 34–68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
21. Patel A, Baskys A, Mitchell-Williams T, et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Supercond. Sci. Technol.* 2018;31(9):09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
22. SuperOx [Internet]. [cited 2023 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
23. Martirosian IV, Pokrovskii SV, Osipov MA, et al. Simulation of the maglev suspension dynamic characteristics during movement, acceleration and deceleration. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;8(3):63–77. (In Russ.) EDN: FRVRIA doi: 10.17816/transsyst20228363-77
24. Osipov M, Anishenko I, Starikovskii A, et al. Scalable Superconductive Magnetic Bearing Based on Non-Closed CC Tapes Windings. *Supercond. Sci. Technol.* 2021;SUST-104182.R1. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
25. Anischenko IV, Osipov MA, Pokrovskii SV, et al. Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures. *Physics of Atomic Nuclei.* 2021;4(12):1982–1990. doi: 10.1134/S1063778821100045

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук;

инженер-исследователь;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,

заведующий научно-исследовательской лабораторией;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), research engineer;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

Dmitry A. Alexandrov, research engineer;
ORCID: 0009-0001-7383-0094;
E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory;
eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Igor A. Rudnev, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Lead Research Fellow;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru