

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 538.955

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ

© 2025 г. А. С. Стариковский<sup>а</sup>, \*, М. А. Осипов<sup>а</sup>, И. А. Руднев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: ASStarikovskii@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.11.2024 г.

После доработки 02.12.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

Разработана и испытана методика измерения нагрузочных характеристик аксиального и радиального подшипников. Проведено исследование нагрузочных характеристик подшипников разной геометрии на основе современных сверхпроводящих лент. Получены и проанализированы зависимости вертикальных и латеральных сил от величины соответствующего смещения, проведено сравнение устойчивости подшипников. Методика подходит для измерений в режиме охлаждения в нулевом поле (ZFC) и в поле (FC) при температуре кипения жидкого азота.

**Ключевые слова:** ВТСП ленты, критический ток, магнитный подшипник, сила левитации

**DOI:** 10.56304/S2079562925060326

### 1. ВВЕДЕНИЕ

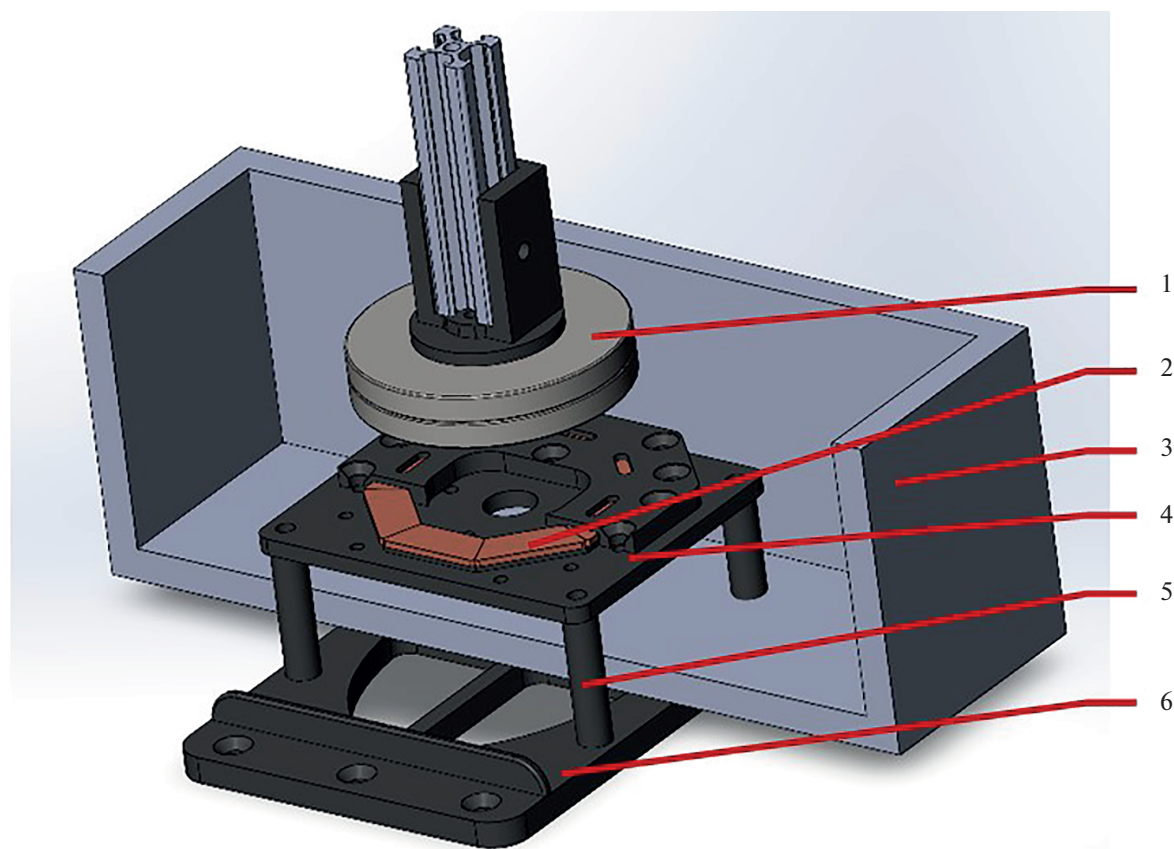
Одним из важнейших элементов кинетических накопителей энергии являются подшипники. Основные потери накопленной энергии в процессе хранения происходят из-за сил трения, что делает использование бесконтактных подшипников различных типов в данной области незаменимым [1–4]. Одним из перспективных вариантов таких устройств являются сверхпроводящие подшипники [5], которые можно разделить на два типа: планарные или аксиальные подшипники (ВТСП статор и ротор из постоянных магнитов расположены друг над другом) и цилиндрические или радиальные подшипники (цилиндрический ротор находится внутри полого цилиндра статора). В качестве материала для изготовления сверхпроводящих подшипников в последние годы все чаще применяются обмотки из ВТСП лент второго поколения [6–9], которые обладают рядом преимуществ перед объемными высокотемпературными сверхпроводниками. В таких системах сверхпроводник удобно использовать в виде кольцевых обмоток радиального подшипника. В отличие от объемных ВТСП, радиус сверхпроводящего кольца можно увеличивать без ограничений, легко получая конфигурации нужного размера, а медные стабилизирующие слои позволяют эффективно и равномерно охлаждать сверхпроводник и избегать его перегрева в переменных магнитных полях. Таким образом, ВТСП ленты име-

ют большой потенциал для использования в кинетических накопителях энергии, и в большинстве исследований в этой области они используются в виде незамкнутых кольцевых обмоток [9–11]. Вариантом исполнения сверхпроводящих подшипников в аксиальной геометрии являются опорные подшипники. В исследованиях нагрузочных характеристик и устойчивости подшипников этого типа в качестве статора в основном используются объемные сверхпроводники [12, 13]. В системах на основе ленточных сверхпроводников статор собирается из стопок ВТСП лент [14], что осложняет процесс его изготовления. Исследований данного типа подшипников на основе ВТСП лент в литературе еще меньше, а исследований по прямому сравнению аксиальных и радиальных подшипников не было обнаружено, что делает эту задачу актуальной.

Целью настоящей работы является разработка и испытание методики измерений, позволяющей провести прямое сравнение нагрузочных характеристик подшипников аксиального и радиального типов.

### 2. КОНСТРУКЦИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ПОДШИПНИКОВ

В целях прямого сравнения характеристик подшипников разной геометрии их статоры и роторы должны быть собраны из одинакового количества материалов одного типа. Схема прототипа

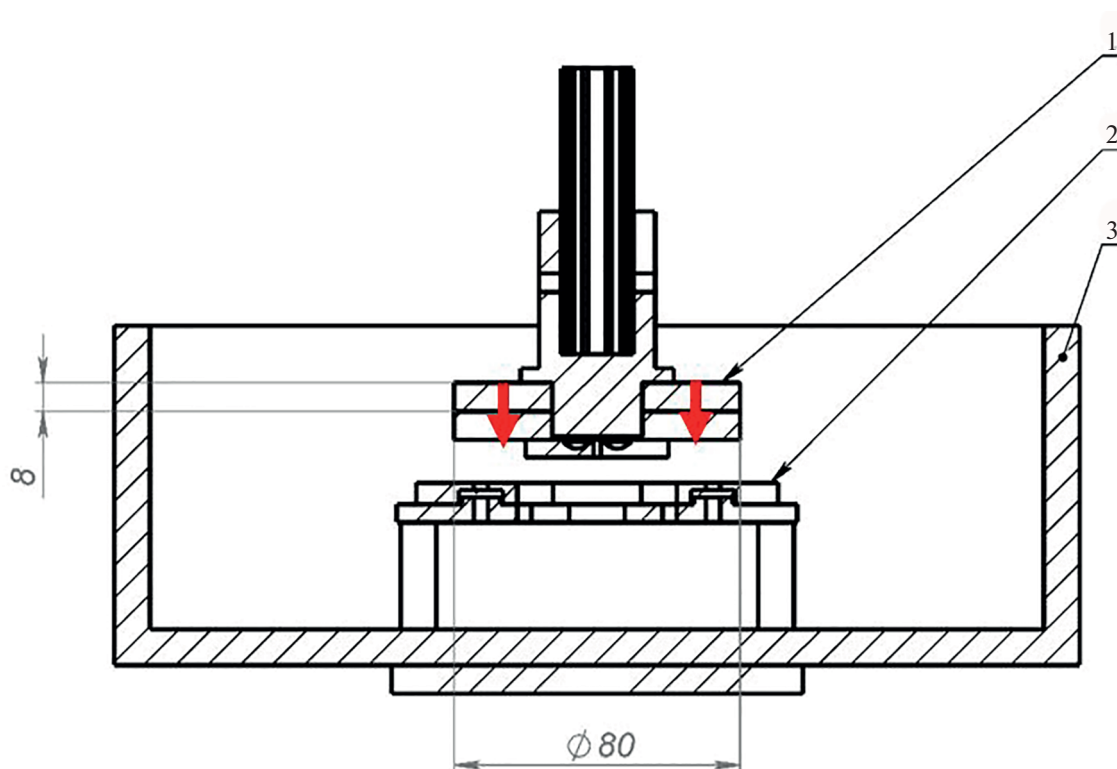


**Рис. 1.** Схема прототипа аксиального подшипника. 1 — постоянные магниты, 2 — стопки ВТСП-лент, 3 — криостат, 4 — держатель сверхпроводника, 5 — текстолитовые столбики, 6 — подставка.

аксиального подшипника и основные размеры системы представлены на рис. 1 и 2. Подшипник состоит из ротора, собранного из постоянных магнитов с одинаковым направлением намагничивания (1 на рис. 1 и 2), и статора из стопок ВТСП лент (2 на рис. 1 и 2). Охлаждение сверхпроводника осуществляется с помощью жидкого азота, заливаемого в криостат (3 на рис. 1 и 2). Стопки ВТСП лент помещаются в держатель образца (4 на рис. 1), расположенного на столбиках (5 на рис. 1), вклеенных в криостат и соединенных с подставкой (6 на рис. 1), которая прикручивается к столу. Статор аксиального подшипника был изготовлен из ВТСП ленты производства С-инновации, 12 мм шириной, с медным покрытием и критическим током в собственном поле 550 А. Лента нарезалась на фрагменты трапецевидной формы, которые потом складывались в 8 стопок по 10 фрагментов, после чего укладывались в держатель образца в виде восьмиугольника. Размеры подбирались таким образом, чтобы диаметр описанной окружности многоугольника совпадал с диаметром постоянных магнитов — 80 мм. Суммарная длина ВТСП-ленты, потраченной на создание подшип-

ника, составила 2.15 м. Держатель образца собирался и прикручивался к текстолитовым столбикам, вклеенным в криостат. В держателе образца предусмотрены прорезы для доступа жидкого азота к сверхпроводнику. Ротор собирался из двух постоянных кольцевых магнитов, установленных на держатель, который крепится на алюминиевый шток. Внешний диаметр магнитов 80 мм, толщина 8 мм, материал — NdFeB, марка N38. Направления намагниченности магнитов совпадают, что позволяет создавать вертикальное магнитное поле, перпендикулярное поверхности ВТСП ленты.

Схема прототипа радиального подшипника и основные размеры системы представлены на рис. 3 и 4. Подшипник состоит из ротора, собранного из двух постоянных магнитов противоположного направления намагничивания, соединенных магнитопроводом (1 на рис. 3 и 4), и статора из незамкнутых обмоток на основе ВТСП лент (2 на рис. 3 и 4). Охлаждение сверхпроводника осуществляется с помощью жидкого азота, заливаемого в криостат (3 на рис. 3 и 4). Сверхпроводник намотан на держатель (4 на рис. 3), расположенный на столбиках (5 на рис. 3), вклеенных в криостат и соеди-



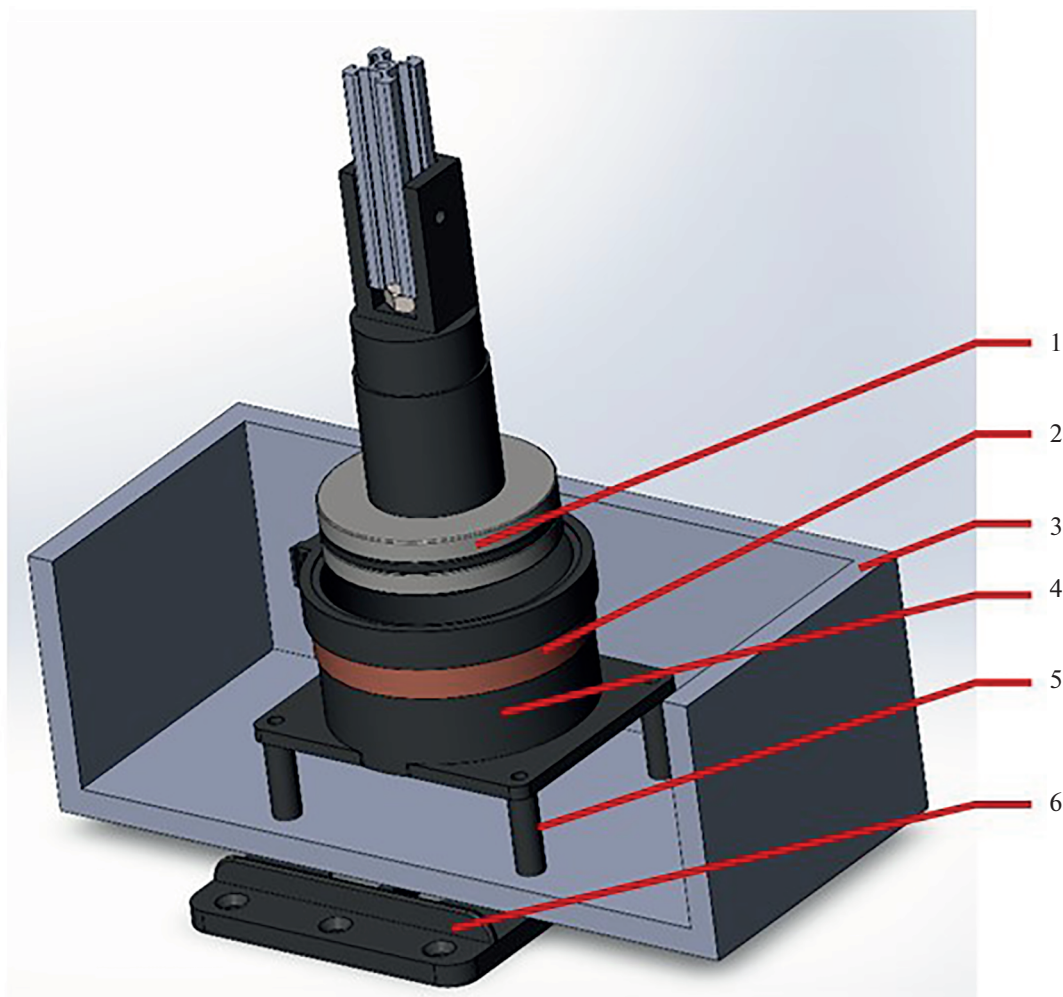
**Рис. 2.** Схема прототипа опорного подшипника в разрезе. 1 — постоянные магниты, 2 — стопки ВТСП-лент, 3 — криостат. Стрелками указано направление намагниченности постоянных магнитов, размеры указаны в миллиметрах.

ненных с подставкой (6 на рис. 3), которая прикручивается к столу. Статор радиального подшипника также был изготовлен из ВТСП ленты производства С-инновации с указанными выше параметрами, а суммарная длина ВТСП-ленты, потраченной на создание радиального подшипника, была равна длине, потраченной на создание аксиального подшипника. Держатель изготовлен таким образом, что при заливке жидкого азота в криостат, сверхпроводник находится в жидком азоте, который не попадает во внутреннюю область держателя. Поэтому ротор подшипника может опускаться в центральное отверстие и не испытывать влияния жидкого азота, который за счет кипения и силы Архимеда мог бы вносить погрешности в измеряемую силу взаимодействия. Ротор собирался из двух постоянных кольцевых магнитов, аналогичных используемым в аксиальном подшипнике, однако в данной сборке магниты имеют противоположное друг другу направление намагничивания и соединены магнитопроводом. Такая конфигурация магнитов позволяет создавать радиальное магнитное поле, перпендикулярное плоскости ВТСП лент, что оптимально для радиального подшипника. Магнитопровод изготовлен из пластин трансформаторной стали, сложенных в стопку, и располагается между магнитами. Держатель маг-

нитов крепится на алюминиевый шток, который, в свою очередь, будет крепиться к тензодатчику системы измерения.

### 3. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ

Для исследования нагрузочных характеристик собранного аксиального подшипника используется установка, схема которой изображена на рис. 5. Стопки ВТСП лент помещаются в держатель, прикрепленный ко дну криостата, и охлаждаются при помощи жидкого азота. При помощи системы позиционирования происходит перемещение магнитов, прикрепленных к тензодатчику, относительно стопок ВТСП лент и одновременно измерение силы их взаимодействия. Система позиционирования способна двигаться в вертикальном и горизонтальном направлении с минимальным шагом 2 мкм. Во время процедуры измерения смещение образца останавливается на 0.5 с после каждого шага и в течение этого периода времени проводятся измерения силы левитации. Методика позволяет измерить нагрузочные характеристики в разных режимах охлаждения. При измерении в режиме



**Рис. 3.** Схема прототипа радиального подшипника. 1 – сборка постоянных магнитов, 2 – замкнутые обмотки из ВТСП лент, 3 – криостат, 4 – держатель сверхпроводника, 5 – текстолитовые столбики, 6 – подставка.

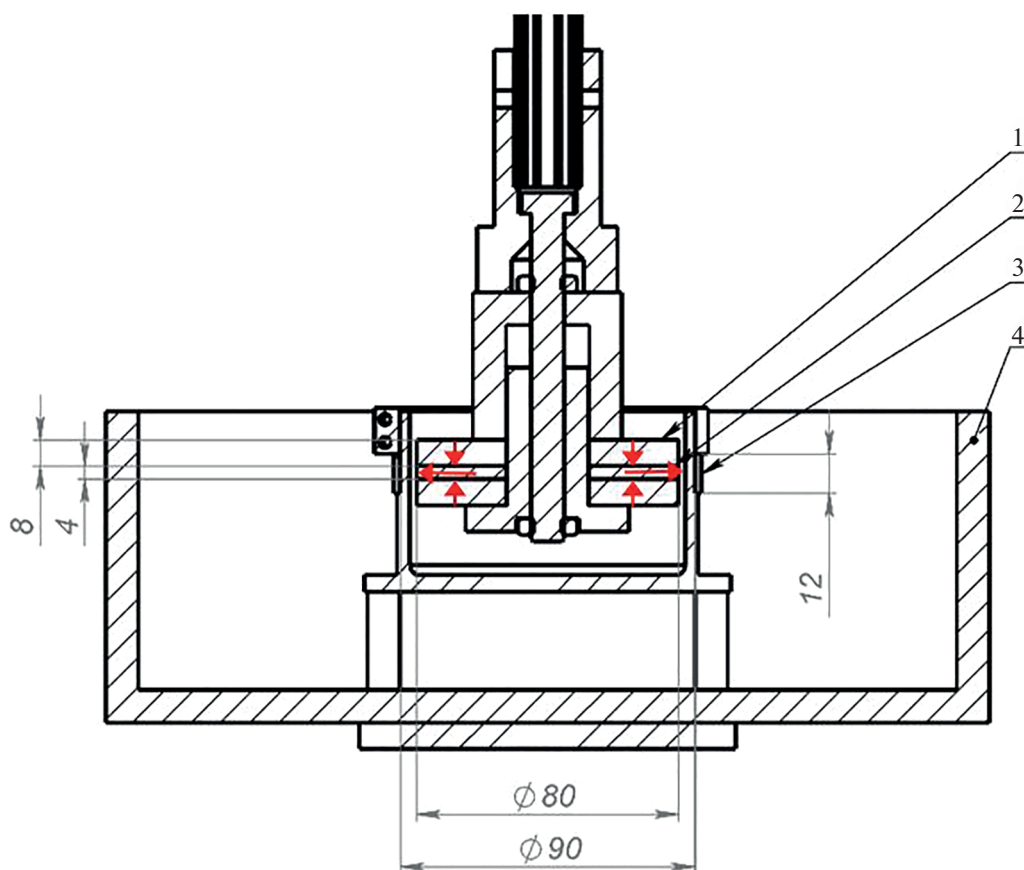
охлаждения в нулевом поле (ZFC режим) ленты охлаждаются азотом в момент, когда магниты находятся на большом расстоянии над поверхностью лент ( $z = 93$  мм), где влиянием магнитного поля на сверхпроводник можно пренебречь, после чего их опускают к ВТСП лентам до минимально возможной высоты ( $z = 3$  мм). В режиме охлаждения в поле (FC режим) азот наливается в криостат при изначальном расположении магнитов в нижней точке, после чего начинается их перемещение. В зависимости от ориентации тензодатчика возможно измерение вертикальных и латеральных сил как для вертикального, так и для горизонтального перемещения магнитов.

Для измерений нагрузочных характеристик радиального подшипника измерительная установка модифицируется, и ее схема приобретает вид, изображенный на рис. 6. Измерения проис-

ходят аналогичным образом, но в данном случае вместо стопок из ВТСП лент в качестве статора используется незамкнутая ВТСП обмотка.

Для прямого сравнения характеристик подшипников разного типа для их создания использовалось одинаковое количество ВТСП ленты и магнитов, а также соблюдалось условие перпендикулярности направления магнитного поля по отношению к поверхности сверхпроводника. Схематическое изображение геометрии эксперимента представлено на рис. 7. В аксиальном подшипнике магниты располагались так, что направление их намагниченности совпадало и было перпендикулярно поверхности лент в стопках, в то время как для создания нужной конфигурации магнитного поля в радиальном подшипнике ротор был собран из двух постоянных магнитов с противоположным направлением намагниченности, проло-





**Рис. 4.** Схема прототипа радиального подшипника в разрезе. 1 — постоянные магниты, 2 — стопки ВТСП лент, 3 — криостат. Стрелками указано направление намагниченности магнитов и магнитопровода, размеры указаны в миллиметрах.

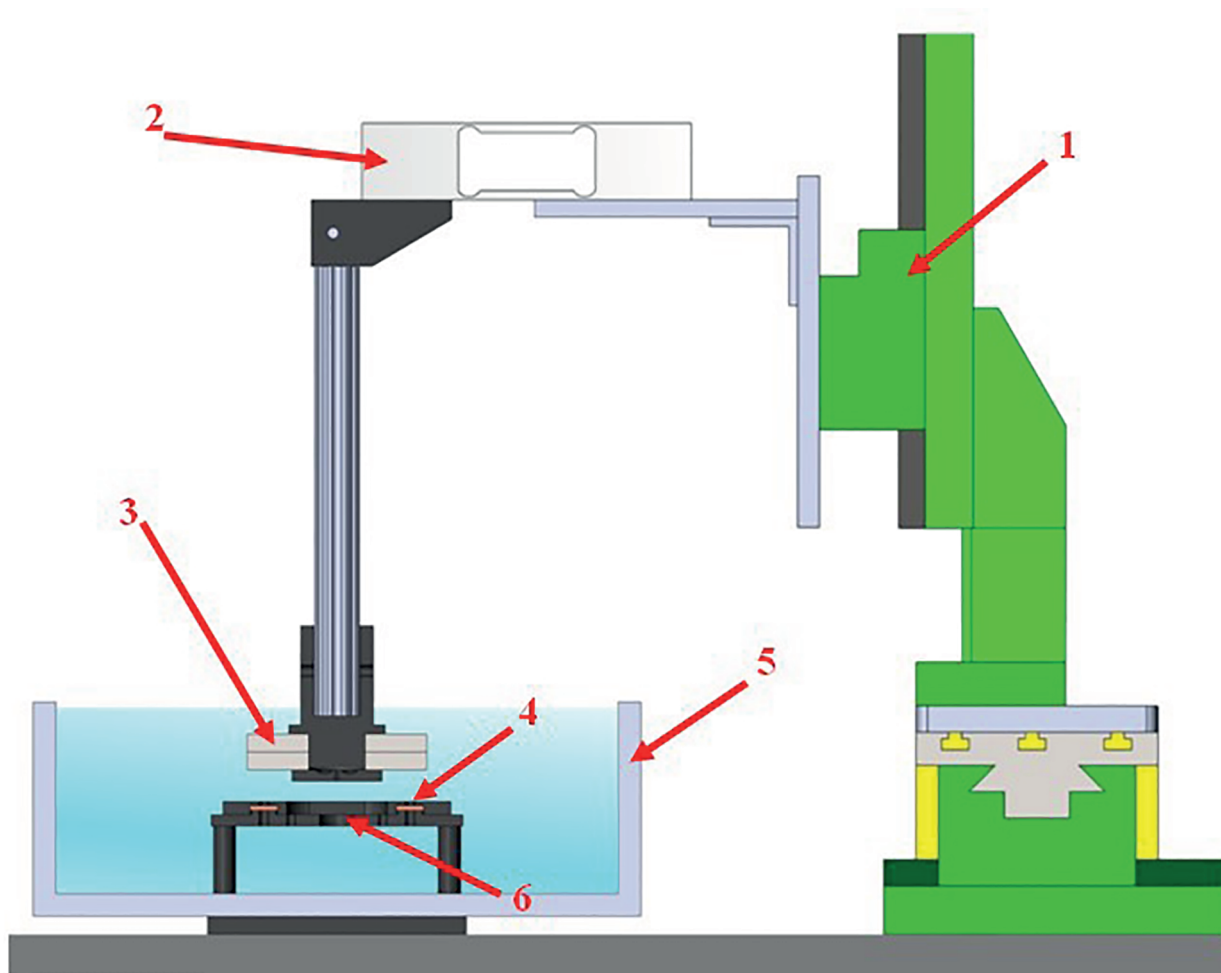
женных магнитопроводом, что позволяет создавать в сборке намагниченность в горизонтальном направлении. Представленная на рис. 7 геометрия соответствует нижней позиции при измерении в ZFC режиме и точке охлаждения в режиме FC. Для сравнения аксиальной устойчивости подшипников после охлаждения лент в поле измерялись нагрузочные кривые: зависимости вертикальной силы, действующей на магнит при его вертикальном сдвиге. После каждого цикла перемещений амплитуда сдвига увеличивалась на 1 мм, вплоть до 9 мм относительно начального положения. Таким образом можно получить данные не только по величине возвращающей силы в зависимости от величины смещения, но и по зависимости смещения положения равновесия подшипника от амплитуды вертикального сдвига, а также данные по жесткости системы вблизи положения равновесия, что позволит сделать выводы об устойчивости подшипников разного типа.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате измерений по описанной выше методике был получен набор экспериментальных данных. На рис. 8 изображены примеры получаемых зависимостей вертикальной силы, действующей на магниты, от величины вертикального смещения относительно стопок лент для аксиального подшипника.

Для режима охлаждения в нулевом поле максимальная сила отталкивания достигает 22 Н и превышает максимальную силу взаимодействия магнита с ВТСП для случая охлаждения в поле более чем в 2 раза, что может представлять интерес в отдельных системах, не нуждающихся в латеральной устойчивости. Для режима охлаждения в поле максимум возвращающей силы достигается при смещении от положения охлаждения на 4 мм и достигает величины порядка 10 Н, а при дальнейших смещениях сила начинает падать.

Для радиального подшипника были проведены аналогичные измерения, результаты которых представлены на рис. 9.

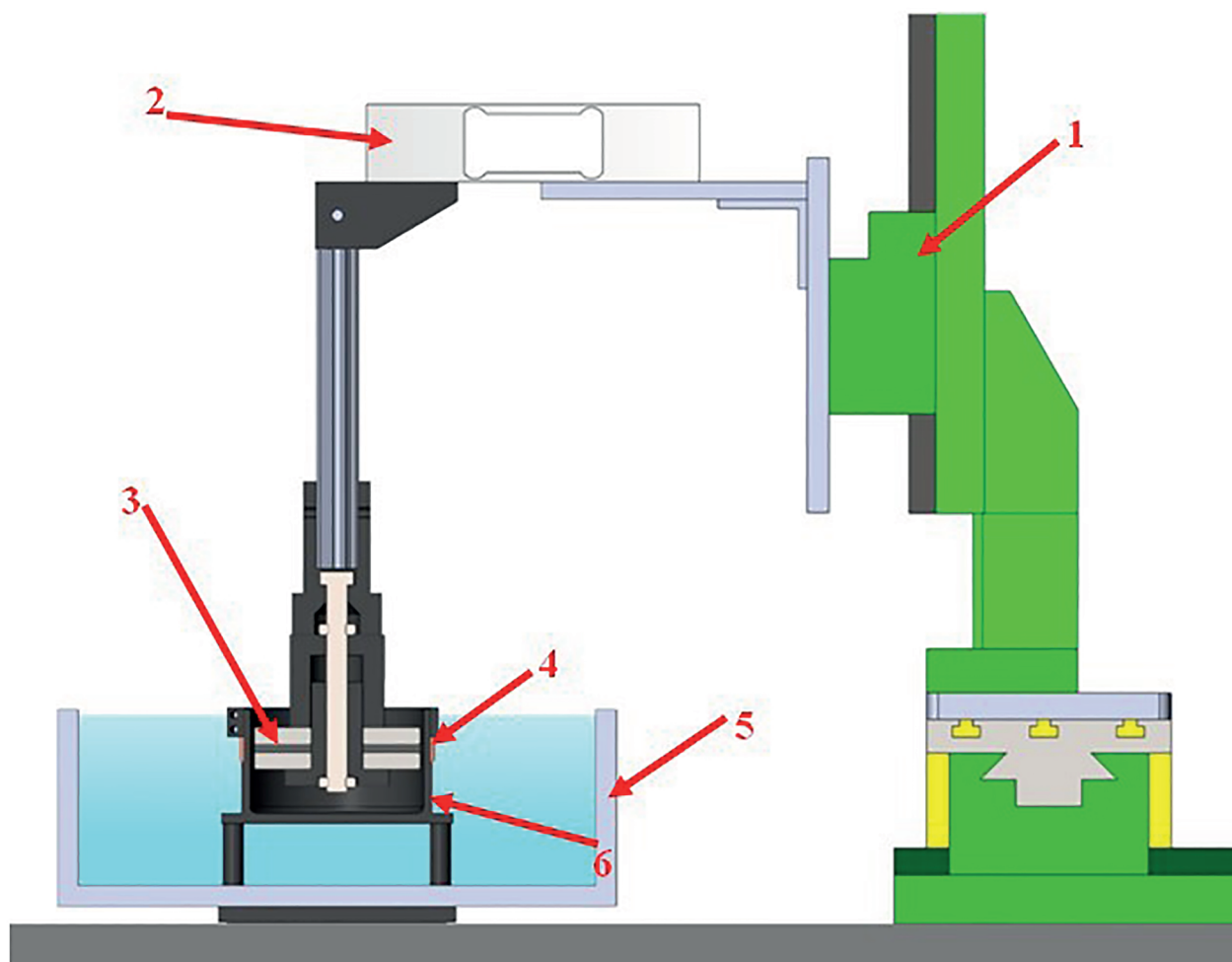


**Рис. 5.** Схема установки для измерения нагрузочных характеристик аксиального подшипника на основе стопок ВТСП лент. 1 — система позиционирования, 2 — тензодатчик, 3 — постоянные магниты, 4 — стопки ВТСП лент, 5 — криостат с жидким азотом, 6 — держатель сверхпроводника.

При сравнении полученных зависимостей видно, что в режиме ZFC максимальная сила отталкивания радиального подшипника превышает силу аксиального более чем в два раза, однако на дистанции в 10–20 мм аксиальный подшипник обладает преимуществом. В FC режиме вертикальная возвращающая сила при смещении на 8 мм для радиального подшипника превышает силу аксиальной в семь раз. При этом после каждого цикла перемещения происходит сдвиг положения равновесия (точки с силой взаимодействия равной нулю), причем этот сдвиг больше для радиального подшипника. Для более подробного рассмотрения обратимся к рис. 10, на котором изображены зависимости сдвига положения равновесия подшипника от амплитуды вертикального смещения для обоих подшипников.

При смещении на большие значения положение равновесия начинает сдвигаться сильнее, чем при малых отклонениях. Так, для аксиального подшипника при смещении магнитов на 4 мм происходит сдвиг точки равновесия менее чем на 1 мм, но при смещении на 8 мм эта величина составляет уже 2.6 мм. При сравнении зависимостей подшипников между собой, можно заметить, что при смещении на 5 мм у радиального подшипника происходит сдвиг положения равновесия, по величине схожий с происходящим у аксиального подшипника при смещении на 8 мм, что говорит о меньшей подверженности к перемagnetиванию у последнего.

Для оценки латеральной устойчивости подшипников после охлаждения в поле были проведены измерения латеральной компоненты силы взаимодействия магнитов со сверхпроводником



**Рис. 6.** Схема установки для измерения нагрузочных характеристик радиального подшипника. 1 — система позиционирования, 2 — тензодатчик, 3 — постоянные магниты, 4 — обмотка из ВТСП лент, 5 — криостат с жидким азотом, 6 — держатель сверхпроводника.

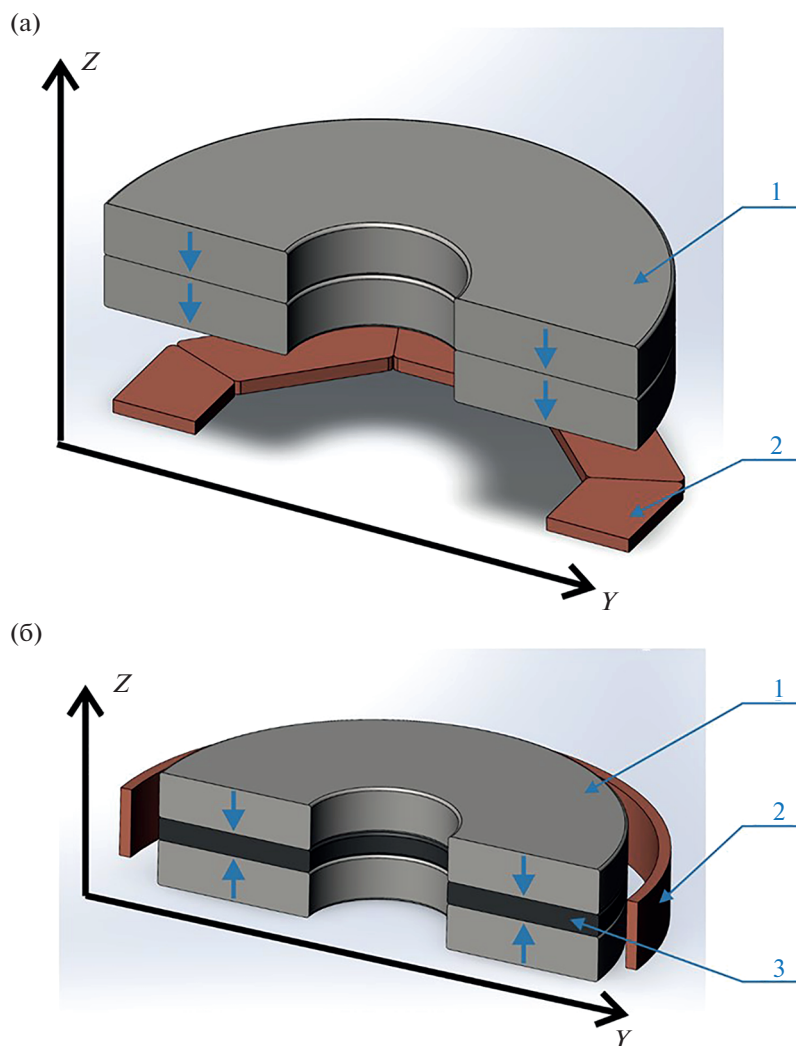
при горизонтальных смещениях. Результаты приведены на рис. 11. Латеральная компонента возвращающей силы при малых боковых смещениях у радиального подшипника превышает компоненту подшипника с аксиальной геометрией в 6 раз.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

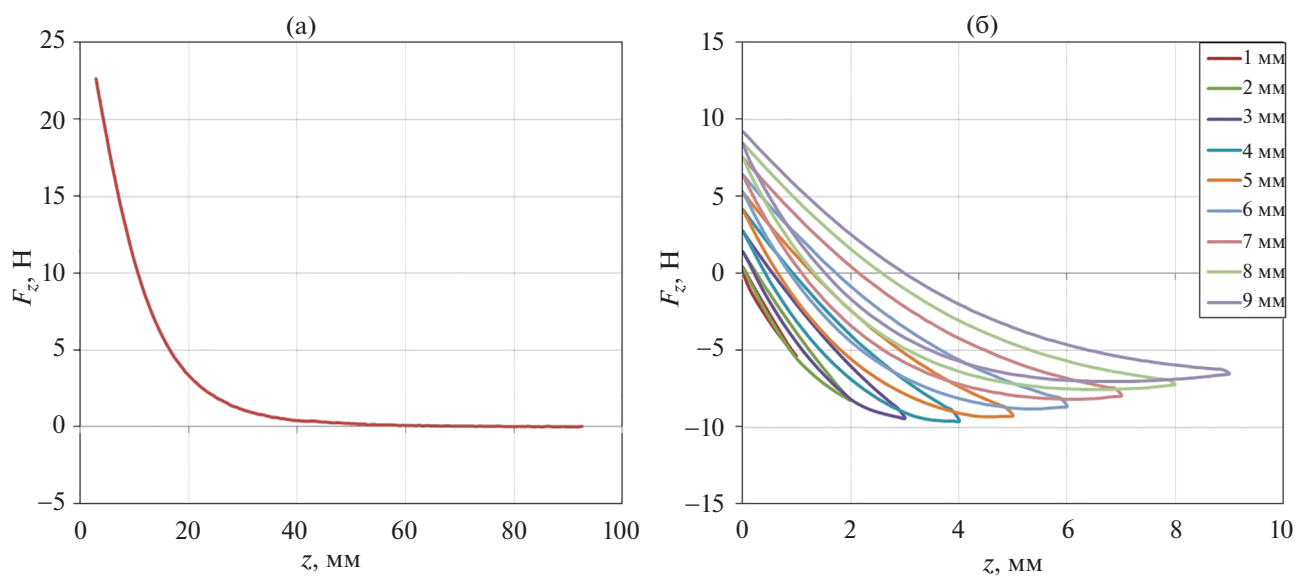
Разработана и испытана методика измерения нагрузочных характеристик аксиального и радиального подшипников. Показано, что с ее помощью можно провести прямое сравнение аксиальной и латеральной устойчивости подшипников на основе ВТСП лент. Получены данные по величине возвращающей силы в зависимости от величины вертикального и горизонтального смещения и по зависимости смещения положения равно-

весия подшипника от амплитуды вынуждающего сдвига в режиме охлаждения в поле, измерены силы отталкивания при приближении магнитов к сверхпроводнику в режиме охлаждения в нулевом поле. Сопоставление этих данных позволяет сделать выводы об особенностях применения подшипников разной геометрии.

Несмотря на большую подверженность радиального подшипника к перемagnetиванию и смещению точки равновесия при вертикальных перемещениях, он показывает лучшую устойчивость за счет значительно больших значений вертикальных и горизонтальных компонент возникающих возвращающих сил и является предпочтительным для работы в режиме охлаждения в поле. Аксиальный подшипник измеренной конфигурации, однако, может представлять интерес для исполь-

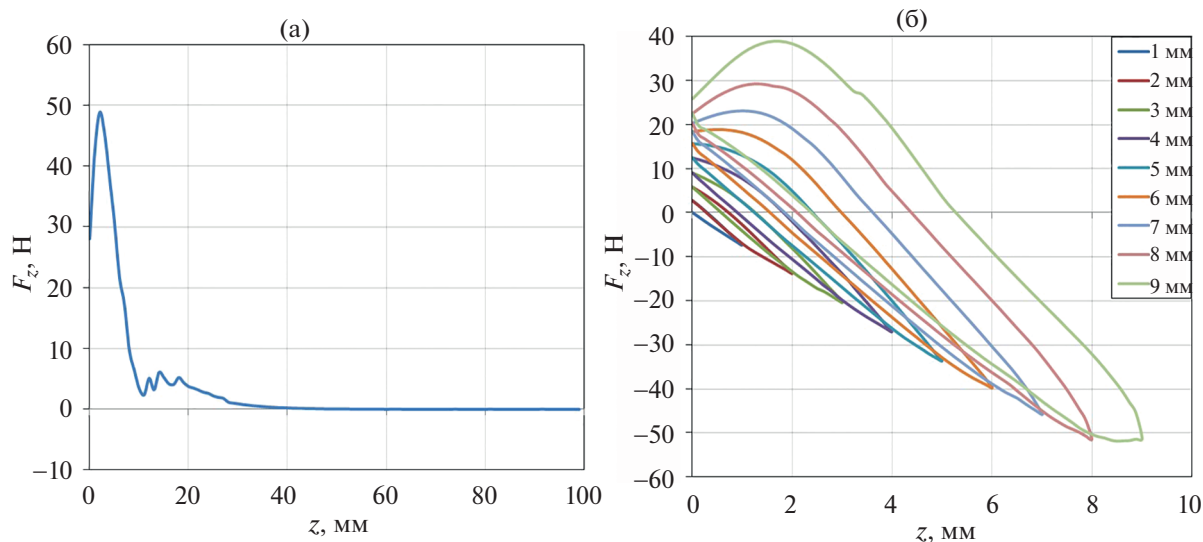


**Рис. 7.** Геометрия эксперимента для (а) опорного и (б) радиального подшипников. 1 – Постоянные магниты, 2 – ВТСП лента, 3 – магнитопровод. Стрелками указано направление намагниченности.

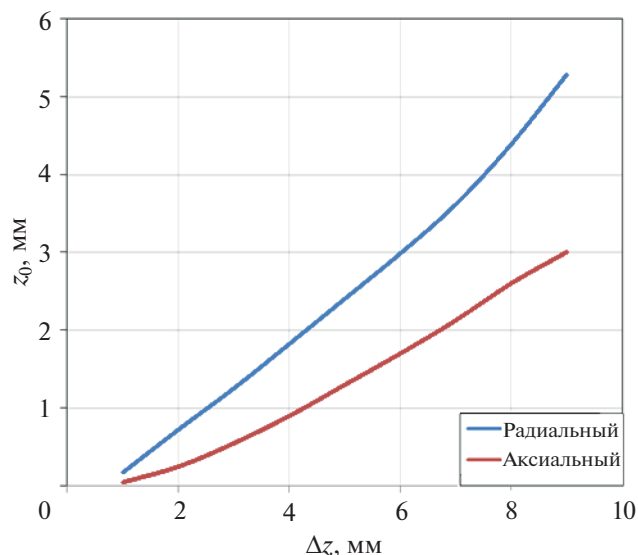


**Рис. 8.** Зависимости вертикальной силы, действующей на элемент аксиального подшипника от величины вертикального смещения. Представлены результаты для (а) ZFC и (б) FC режимов. На легенде указана амплитуда смещения.

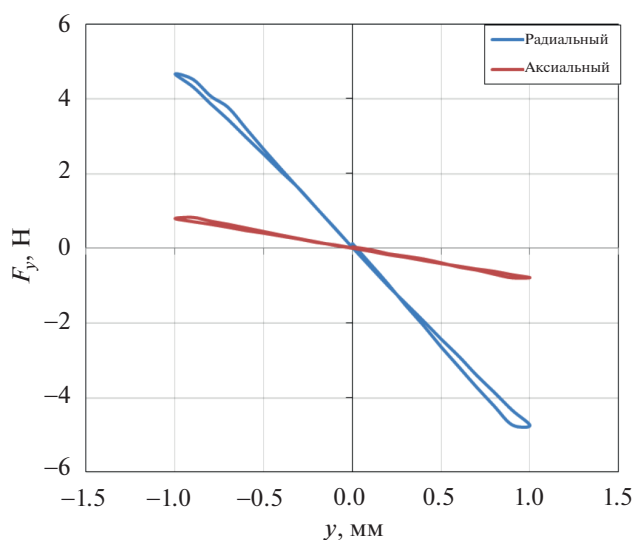




**Рис. 9.** Зависимости вертикальной силы, действующей на элемент радиального подшипника от величины вертикального смещения. Представлены результаты для (а) ZFC и (б) FC режимов. На легенде указана амплитуда смещения.



**Рис. 10.** Зависимости сдвига положения равновесия подшипника от амплитуды вертикального смещения для аксиального и радиального ВТСП-подшипников.



**Рис. 11.** Зависимости величины латеральных сил, действующих на элемент подшипника от величины горизонтального сдвига.

зования в качестве опорного при необходимости работы на больших расстояниях.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

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

## СПИОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Mousavi G S.M. et al. // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V. 67. P. 477–490.

2. Amiryar M.E., Pullen K.R. // Appl. Sci. 2017. V. 7 (3). P. 286.
3. Li X., Palazzolo A. // J. Energy Storage. 2022. V. 46. P. 103576.
4. Olabi A.G. et al. // Energies. 2021. V. 14. № 8. P. 1–33.
5. Supreeth D.K. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (3). P. 1–15.
6. Patel A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2017. V. 30 (2). P. 024007.
7. Quéval L. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2018. V. 31 (8). P. 084001.
8. Sass F. et al. // Phys. Proc. 2012. V. 36. P. 1008–1013.

9. *Osipov M. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2021. V. 34 (3). P. 035033.
10. *Patel A. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28 (11). P. 115007.
11. *Martirosian I.V. et al.* // Modern Transport. Sys. Technol. 2024. V. 10 (1). P. 76–92.
12. *Valiente-Blanco I. et al.* // Tribol. Lett. 2014. V. 54. P. 213–220.
13. *Seino H. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 234 (3). P. 032052.
14. *Patel A. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26 (3). P. 1–5.

## Method for Measuring the Load Characteristics of Axial and Radial Bearings Based on High-Temperature Superconducting Tapes

A. S. Starikovskii<sup>1</sup>\*, M. A. Osipov<sup>1</sup>, and I. A. Rudnev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

*\*e-mail: ASStarikovskii@mephi.ru*

Received November 29, 2024; revised December 2, 2024; accepted November 3, 2024

**Abstract**—A method for measuring the load characteristics of axial and radial bearings has been developed and tested. The load characteristics of bearings with various geometries based on modern superconducting tapes have been examined. The dependences of the vertical and lateral forces on the corresponding displacement have been obtained and analyzed, and the stabilities of the bearings have been compared. The method is appropriate for measurements in the zero-field cooling (ZFC) regime and in the field cooling (FC) regime, i.e., in a nonzero field at the boiling temperature of liquid nitrogen.

**Keywords:** HTSC tapes, critical current, magnetic bearing, levitation force