Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 629.439

DOI 10.17816/transsyst201954115-123

© Ю. Ф. Антонов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

УСТРОЙСТВО ЛЕВИТАЦИИ И БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ ЛЕНТОЧНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Сверхпроводниковое левитационное устройство содержит стационарный магнитный рельс из постоянных магнитов и криостат на транспортном средстве с размещенным в криостате ленточным высокотемпературным сверхпроводником второго поколения, сложенным стопкой или намотанным катушкой на немагнитный каркас без электрического соединения концов. В охлажденном состоянии ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения, сложенный в виде стопки или намотанный на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки, причем без электрического соединения концов, ведет себя как массивный образец сверхпроводника и, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда, магнитное поле, созданное магнитным рельсом, вытесняется из объема сверхпроводника, вследствие чего возникает сила левитации, а транспортное средство зависает над путевой структурой.

Высокие критические параметры ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения обеспечивают сверхпроводниковому левитационному устройству эффективную работу.

Цель: Показать техническую возможность и эффективность создания узла левитации на базе использования ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения и постоянных магнитов из редкоземельных металлов.

Методы: Расчеты распределения магнитного поля в комбинации магнитный рельс и массивный сверхпроводник, эскизное проектирование узла левитации и экспериментальные исследования на модели.

Результаты: Опыты на экспериментальной модели сверхпроводникового левитационного устройства подтвердили работоспособность данного технического решения и его эффективность.

Заключение: Предложено оригинальное техническое решение, позволяющее значительно улучшить энергетические характеристики узла левитации за счет применения ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения, работающего в пассивном режиме без транспортного тока, с использованием частичного эффекта Мейсснера-Оксенфельда и зацепления квантованных нитей магнитного потока на центрах пиннинга.

Ключевые слова: магнитный рельс, постоянный магнит, ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения, левитация, боковая стабилизация.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© **Yu. F. Antonov**Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**LEVITATION AND LATERAL STABILIZATION DEVICE BASED ON
A SECOND-GENERATION HIGH-TEMPERATURE
SUPERCONDUCTOR**

The superconducting levitation device comprises a stationary magnetic rail of permanent magnets and a cryostat on a vehicle with a second-generation high-temperature tape superconductor placed in the cryostat, folded in a stack or wound by a coil on a non-magnetic frame without electrical connection of the ends and the transport current. Cool tape high-temperature superconductor of the second generation, folded in a stack or wound on a non magnetic frame in the form of axisymmetric or track coil, without electric connections of the ends and a transport current, behaves as a massive sample of a superconductor and the Meissner – Oxenfeld effect, the magnetic field created by the magnetic rail is displaced from the volume of the superconductor, causing the power of levitation and the vehicle hangs over the track structure.

The high critical parameters of the second-generation high-temperature superconductor belt ensure efficient operation of the superconducting levitation device.

Aim: To demonstration the technical feasibility and efficiency of creating a levitation unit based on the use of a second-generation high-temperature superconductor and permanent magnets made of rare earth metals.

Methods: Calculations of the magnetic field distribution in the combination of a magnetic rail and a massive superconductor, preliminary design of the levitation unit and experimental studies on the model.

Results: Experiments on a model of a superconducting levitation device confirmed the efficiency of this technical solution and its effectiveness.

Conclusion: an original technical solution is proposed that allows to significantly improve the energy characteristics of the levitation node by using a second-generation high-temperature superconductor operating in a passive mode without a transport current, using the partial Meissner-Oxenfeld effect and the engagement of quantized magnetic flux strands at the pinning centers.

Keywords: magnetic rail, permanent magnet, tape high-temperature superconductor of the second generation, levitation, lateral stabilization.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно сверхпроводниковое магнитостатическое левитационное устройство, примененное в проекте «Кобра» [1]. Данное устройство содержит магнитный рельс в виде набора полюсов из постоянных магнитов, расположенных стационарно на путевой структуре, и криостатов

на борту транспортного средства. В криостатах размещены массивные сверхпроводниковые образцы из иттриевой керамики IBCO.

При заливке в криостаты криогенной жидкости массивные образцы из иттриевой керамики переходят в сверхпроводящее состояние и, как следствие, магнитное поле, создаваемое магнитным рельсом, выталкивается из объема образцов иттриевой керамики IBCO, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда. В результате возникает сила левитации и транспортное средство зависает над путевой структурой. Часть магнитного поля, создаваемого магнитным рельсом, проникает в объем образцов иттриевой керамики IBCO, благодаря магнитометрическому коэффициенту размагничивания, присущему макроскопическому телу любой формы и размера. Проникшее в образец магнитное поле закрепляется на центрах пиннинга, вследствие чего левитационное устройство приобретает устойчивость.

Это техническое решение мало эффективно, поскольку иттриевая керамика, как высокотемпературный сверхпроводник, имеет недостаточно высокие критические параметры по току и магнитному полю, которые взаимосвязаны, в сравнении, например, с ленточными высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) второго поколения.

Задача состоит в описании нового технического решения узла левитации и боковой стабилизации и обосновании его эффективной работы.

МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЕ ЛЕВИТАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО: КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Повышение эффективности сверхпроводникового левитационного устройства возможно за счет применения ВТСП с более высокими критическими параметрами. В настоящее время налажено промышленное производство ленточных ВТСП второго поколения с достаточно высокими критическими параметрами, в том числе при температуре жидкого азота.

Опыт показывает, что в устройстве левитации нецелесообразно использовать магнитную систему, намотанную из ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения (2G ВТСП) в виде катушки, с заведенным в катушку током, поскольку левитационное устройство работает неустойчиво, согласно теореме Ирншоу [2]. Рациональным решением является изготовление из ленточного 2G ВТСП стопки, которая помещается в коробку из немагнитного материала, а коробка закрепляется на внутренней стенке криостата. Стопка ленточного 2G ВТСП может быть ориентирована по отношению к магнитному рельсу

плоскими сторонами параллельно или перпендикулярно. Перпендикулярная ориентация предпочтительнее с учетом специфики проникновения внешнего, создаваемого магнитным рельсом (Рис. 1), магнитного поля в сверхпроводник. Наиболее технологичный способ укладки ленточного 2G ВТСП реализуется путем намотки ленты на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки, причем концы катушки электрически не соединены.

Рис. 1. Схема сверхпроводникового магнитостатического левитационного устройства:

- 1 – магнитный рельс;
- 2 – постоянные магниты;
- 3 – криостат;
- 4 – стопка из ленточного 2G ВТСП

МОДЕЛЬ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ЛЕВИТАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Модельная установка состоит из магнитного рельса и платформы на базе криостата с массивным ленточным 2G ВТСП, охлаждаемым жидким азотом. Для исследования левитации и боковой стабилизации платформы с использованием 2G ВТСП выбрана оптимальная по массогабаритным и

экономическим показателям схема сборки магнитного рельса с периодическим изменением полярности модульных магнитов в поперечном (боковом) направлении. Блок магнитного рельса (Рис. 1) имеет габариты 0,5 x 0,5 м. Он состоит из 15 модульных магнитов, представляющих собой тонкостенные (1,5 мм) трубы из нержавеющей стали с установленными в них десятью элементарными магнитами NdFeB с габаритами 46×46×46 мм. Для эксперимента выбраны магниты марки N35U, которые имеют следующие параметры: остаточная индукция 1,17 Тл, коэрцитивная сила по индукции 868 кА/м, коэрцитивная сила по намагниченности 955 кА/м, энергетическое произведение (BH) max 263 кДж/м³. Масса элементарного магнита 1 кг. Модульные магниты расположены в пазах зубчатого ферромагнитного сердечника попарно так, что магнитные моменты элементарных магнитов соседних модулей направлены горизонтально и встречно. Блок магнитного рельса с вариантом сборки магнитов в пазы ферромагнитного зубчатого сердечника (Рис. 2) незначительно уступает варианту сборки по схеме Хальбаха без ферромагнитного зубчатого сердечника по значению магнитной индукции в левитационном зазоре, однако превосходит в экономии потребного количества элементарных постоянных магнитов. Массивный 2G ВТСП представляет собой осесимметричную катушку из 2G ВТСП производства компании Super Power на немагнитном каркасе (Рис. 3). Толщина ленты 0,1 мм, ширина 4 мм. Критический ток 150 А.

Рис. 2. Блок магнитного рельса с вариантом сборки магнитов в пазы ферромагнитного зубчатого сердечника

- 1 – плита Ст. 3 ($s=50$);
- 2 – пруток Ст. 3 (50x50x500 мм);
- 3 – магниты NdFeB 46x46x46 мм
15 шт. в трубе X18H10T

Рис. 3. 2G ВТСП лента компании Super Power
ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения

Сверхпроводниковое левитационное устройство работает следующим образом. Вначале производится захолаживание путем, например, заливки в криостат криогенной жидкости, в частности, жидкого азота. Во время работы сверхпроводникового левитационного устройства обеспечивается его непрерывное криостатирование. Поскольку в охлажденном состоянии ленточный высокотемпературный сверхпроводник второго поколения проявляет сверхпроводящие свойства, то, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда, магнитное поле, созданное магнитным рельсом, вытесняется из объема сверхпроводника и возникает сила левитации, а транспортное средство зависает над путевой структурой. Вследствие более высоких критических параметров ленточного 2G ВТСП, в сравнении с иттриевой металлокерамикой, предлагаемое сверхпроводниковое левитационное устройство работает эффективнее, чем в проекте «Кобра».

Ленточный 2G ВТСП более технологично наматывать на немагнитный каркас в виде осесимметричной или трековой катушки без электрического соединения концов (Рис. 3). Такая конструкция будет работать как массивная стопка, но более эффективно, поскольку с помощью натяга можно добиться высокого коэффициента по намотке.

Эксперименты с моделью [3] сверхпроводникового левитационного устройства показали следующие результаты (Рис. 5):

- удельная подъемная сила левитации, отнесенная к массе сверхпроводниковой стопки или катушки, составляет 100 кН/м^3 ;
- боковая сила стабилизации соответственно 45 кН/м^3 .

Эксперименты подтверждают, что данное техническое решение является перспективным для внедрения на магнитолевитационном транспортном средстве с магнитостатической левитацией.

Рис. 4. Демонстрация левитационного зазора под нагрузкой (веревки применяются для испытания боковой устойчивости)

Рис. 5. Зависимость удельной силы левитации F от левитационного зазора h

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено оригинальное техническое решение, позволяющее значительно улучшить энергетические характеристики узла левитации за счет применения ленточного 2G ВТСП, работающего в пассивном режиме без транспортного тока, с использованием частичного эффекта Мейсснера-Оксенфельда и зацепления квантованных нитей магнитного потока на центрах пиннинга.

Сверхпроводниковое левитационное устройство на базе ленточных 2G ВТСП можно применять в двух модификациях бортового полюса:

1) криостат с 2G ВТСП обеспечивает две функции – левитации и боковой стабилизации;

2) криостат с 2G ВТСП в комбинации с постоянными магнитами выполняет функцию боковой стабилизации, а постоянные магниты обеспечивают левитацию [4].

Автор заявляет что:

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Stephan R, de Andrade Junior R, Ferreira A, et al. Maglev-cobra: an urban transportation system for highly populated cities. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):16-25. doi: 10.17816/transsyst20151216-25.
2. Earnshaw S. On the nature of molecular forces which regulate the constitution of luminiferous ether. *Transactions of Cambridge Philosophie Society*. 1842;(V-VII):97-112.
3. Антонов Ю.Ф., Данилов Н.К., Казначеев С.А., и др. Разработка модельной установки и исследование левитации и боковой стабилизации платформы с использованием высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – №2. – С. 62–84. [Antonov YuF, Danilov NK, Kaznacheev SA, et al. Development of model setup and study of levitation and lateral stabilization of the platform with the use of high-temperature superconductors of the 2nd generation. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):62-84 (In Russ.)]. doi: [10.17816/transsyst20151262-84](https://doi.org/10.17816/transsyst20151262-84)
4. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)] ISBN 978-5-9221-1540-7.

Сведения об авторе:

Антонов Юрий Федорович, доктор технических наук;
eLibrary SPIN: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Information about the author:

Yuri F. Antonov, Doctor of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Цитировать:

Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 115–123. doi: 10.17816/transsyst201954115-123

To cite this article:

Antonov YuF. Levitation and Lateral Stabilization Device Based on a Second-Generation High-Temperature Superconductor. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):115-123. doi: 10.17816/transsyst201954115-123