



Экспериментальные исследования системы динамической боковой стабилизации



Сергей КАЗНАЧЕЕВ
Sergey A. KAZNACHEEV

Татьяна ЗИМЕНКОВА
Tatiana S. ZIMENKOVA



Антон КРАСНОВ
Anton S. KRASNOV

Казначеев Сергей Александрович – инженер Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия.
Зименкова Татьяна Сергеевна – аспирант ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия.
Краснов Антон Сергеевич – старший преподаватель ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия.

Experimental Studies of a Dynamic Lateral Stabilization System

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 57)

Целью проводимых экспериментальных исследований системы динамической боковой стабилизации является нахождение конструктивных решений, позволяющих обеспечить курсовую устойчивость магнитолевитационного транспортного средства при использовании постоянных магнитов. Полученные результаты пригодны в процессе создания конструкции энергонезависимой системы, то есть без применения электромагнитов и сверхпроводников, вследствие чего можно добиться снижения массогабаритных показателей. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения рассмотренных принципов при проектировании магнитолевитационных транспортных систем.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт, экспериментальный стенд, боковая стабилизация, магнитный полюс, массив Хальбаха.

М агнитолевитационный транспорт с использованием постоянных магнитов [15] представляет собой фундаментальную новинку в области транспортных технологий. Новизна в том, что подвешивание, направление и движение транспортного средства обеспечиваются бесконтактным способом, взаимодействие подвижного состава и путевой структуры осуществляется с помощью магнитного поля.

История развития магнитолевитационного транспорта показывает, что решаемые исследователями [8] задачи на разных этапах изменялись, и дать их полный перечень сейчас затруднительно. Однако, согласно работе В. А. Дзензерского [3], можно выделить три группы задач, решение которых на любом из этапов определяло прогресс рассматриваемой транспортной технологии.

К первой группе относятся проблемы, обусловленные расчетно-экспериментальным комплексом исследований, направленных на выбор оптимальной рациональ-



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда, установленного в научно-исследовательской лаборатории «Магнитоэлектрические транспортные системы».

ной схемы и параметров тягово-левитационного узла [4].

Вторая группа причастна к созданию транспортных магнитных систем. Магнитные модули во многом определяют выбор систем тяги, подвеса и боковой стабилизации [9], их эффективность и надежность.

Третья группа связана с необходимостью физического моделирования в лабораторных условиях процессов, протекающих как в левитационных системах в целом, так и в отдельных узлах и устройствах этих систем.

Указанные проблемы красной нитью проходят через все этапы создания магнитолевитационного транспорта. Объясняется это тем, что создание и разработка принципиально нового вида транспорта немислимы без проведения экспериментов, связанных с физическим моделированием тех или иных процессов поискового и поверочного характера. Кроме того, следует наработать и создать банк данных, полученных в ходе проведения экспериментов на испытательных стендах, о применении средств диагностики, приемов и методов испытаний отдельных конструкций, узлов и деталей.

В данной статье представлены результаты исследований, выполненных под руководством члена Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» А. А. Зайцева молодыми учёными – сотрудниками лабораторий «Магнитоэлектрические транспортные системы». Основная цель данных исследований – попытка решения проблемы боковой стабилизации с использованием постоянных магнитов. В монографии, посвященной вопросам магнитолевитационных транспортных технологий [1], указано, что в системе левитации на постоянных магнитах или электромагнитах, согла-

сно теореме Ирншоу [11], отсутствует внутренняя устойчивость, свойственная магнетикам и электромагнетикам. Проведенные исследования позволили получить эффект боковой стабилизации на постоянных магнитах, что обеспечивает научную новизну представленным материалам.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Исследования проводились на магнитолевитационном экспериментальном стенде, общий вид которого приведен на рис. 1.

Стенд состоит из вращающегося диска диаметром 3 м, на котором крепится трековый модуль, изготовленный из сплошного листа алюминия толщиной 10 мм. Вращение обеспечивается двигателем, установленным под диском, мощностью 3,5 кВт.

Исследуемый образец сборки магнитного полюса располагается непосредственно над трековым модулем. Регулирование скорости вращения диска осуществляется с помощью преобразователя частоты. В состав приборного оснащения экспериментальной установки входят датчики усилия, с помощью которых фиксируются силы, действующие на исследуемую сборку магнитного полюса вследствие возникновения динамической стабилизации.

2. СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОЙ БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

В мировой практике существует несколько основных типов систем боковой стабилизации (рис. 2): с применением боковых стабилизирующих колес, с использованием электромагнитов, высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и др. [7, 2, 6, 13, 14]. Все системы имеют как достоинства, так и недостатки, основным из которых является их сложность.



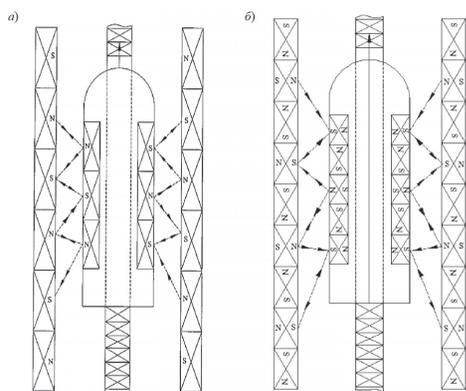


Рис. 2. Схема левитации, боковой стабилизации и тяги: а – система The Railway Technical Research Institute (RTRI), Tokyo, Japan; б – система Inductrack с «массивами Хальбаха» из постоянных магнитов [5].

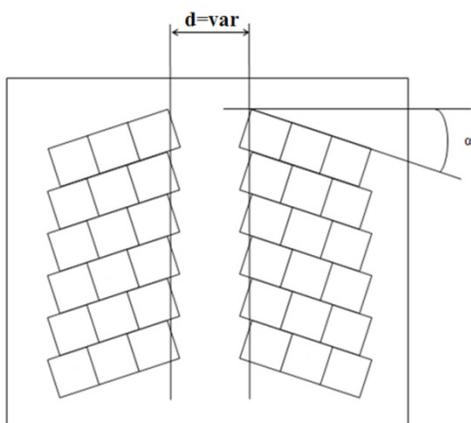


Рис. 3. Схема сборки магнитов.

На основании результатов, полученных в ходе проведения многочисленных испытаний, авторами была разработана конструкция магнитного полюса из элементарных массивов Хальбаха [10, 12]. Схема сборки магнитов и распределение магнитного поля приведены на рис. 3, общий вид



а)



б)

Рис. 4. Общий вид магнитной сборки: а) магнитный полюс; б) распределение магнитного поля сборки.

сборки и распределение магнитных силовых линий – на рис. 4. Магнитный полюс изготовлен из магнитов NdFeB размерами 21x21x21 мм, помещенных в трубки из нержавеющей стали. Сборки магнитов расположены под углом к оси движения магнитного полюса.

Предметом исследования является нахождение расстояния d , при котором сила торможения не оказывает существенного влияния и достигаются наибольшие силы, препятствующие поперечному сдвигу при заданном значении угла α .

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ D

На основании обработанных данных, полученных в результате экспериментальных исследований, построены графики зависимостей силы стабилизации от линейной скорости движения при d , равном 180 и 140 мм (рис. 5–6).

Экспериментальные исследования при $d = 120$ мм проводились при условии прохождения центра сборки по краю трекового модуля, как показано на рис. 7.

По обработанным результатам экспериментальных данных построен график зависимости силы стабилизации от скорости движения, показанный на рис. 8.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные, а также результаты их обработки и анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Оптимальное расстояние d для рассматриваемой конструкции составляет 140 мм, так как при линейной скорости от 11,5 м/с наблюдается существенный рост значений сил боковой стабилизации.

2. Экстремум магнитного поля должен совпадать с краем трекового модуля (краем

Зависимость силы стабилизации от скорости движения в зависимости от принудительного сдвига (в %) магнитной сборки над трековым модулем

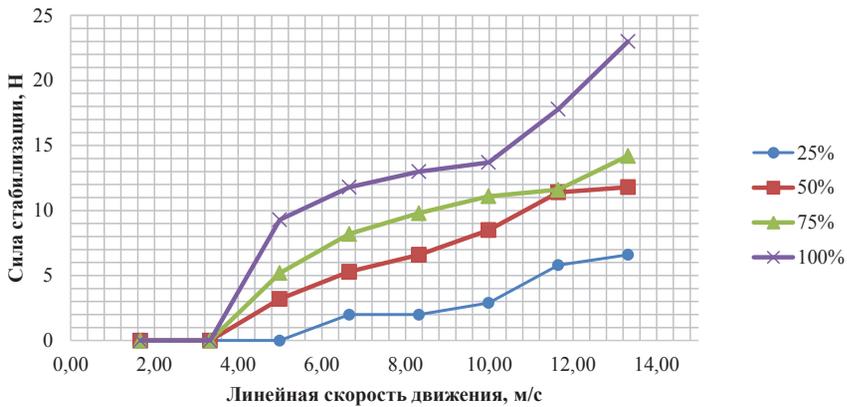


Рис. 5. Результаты исследований при $d = 180$ мм.

Зависимость силы стабилизации от скорости движения в зависимости от принудительного сдвига (в %) магнитной сборки над трековым модулем

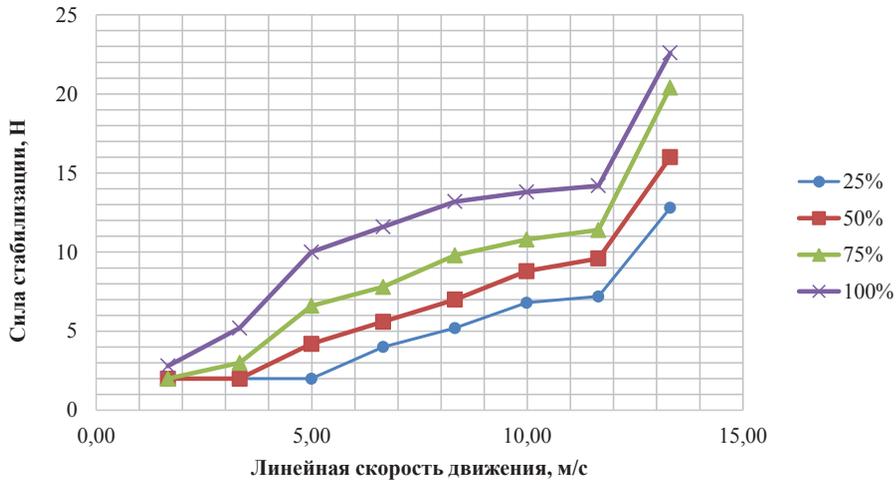


Рис. 6. Результаты исследований при $d = 140$ мм.



Рис. 7. Условия проведения эксперимента.



Зависимость силы стабилизации от скорости движения в зависимости от принудительного сдвига (в %) магнитной сборки над трековым модулем

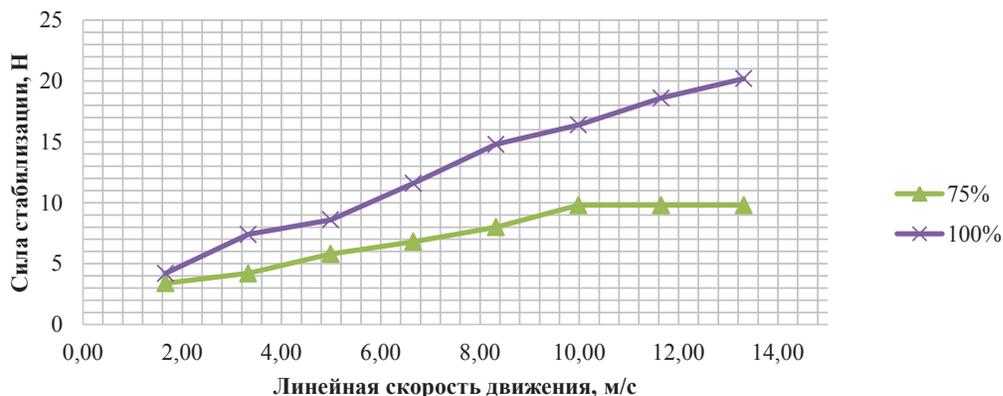


Рис. 8. Результаты исследований при $d = 120$ мм.

активной путевой структуры). При данном условии достигаются максимальные значения силы боковой стабилизации.

3. При расстоянии $d = 120$ и 140 мм эффект возникновения сил боковой стабилизации возникает даже при малых скоростях движения, в то время как при расстоянии $d = 180$ мм появление такого эффекта возможно только при скоростях движения свыше 3 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили возможность разработки конструкции системы боковой стабилизации с использованием постоянных магнитов, что со временем позволит отказаться от применяемых в настоящее время конструкций магнитолевитационного транспортного средства, предполагающих охват путевой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
2. Бахвалов Ю. А., Бочаров В. И., Винокуров В. А., Нагорский В. Д. Транспорт с магнитным подвесом. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
3. Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В., Матин В. И., Сергеев С. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. – Киев: Наукова думка, 2001. – 479 с.
4. Дзензерский В. А., Радченко Н. А. Исследования колебаний и устойчивость движения вагона

с электродинамическим подвесом // Прикладная механика. – 1994. – № 1. – С. 73–77.

5. Зайцев А. А., Антонов Ю. Ф. Особенности магнитолевитационной технологии, применяемой на общественном транспорте // Известия ПГУПС. – 2012. – № 3. – С. 11–18.

6. Ковалев Л. К., Конеев С. М., Ларионов С. А., Полтавец В. Н. Сверхпроводниковые магнитные опоры с объемными ВТСП элементами // Электричество. – 2003. – № 6. – С. 18–23.

7. Ковалев Л. К., Конеев С. М., Полтавец В. Н., Гончаров М. В., Ильясов Р. И. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 38. [Электронный ресурс]: <http://www.mai.ru/science/trudy/>. Доступ 06.12.2016.

8. Кочетков В. М., Ким К. И., Трещев И. И. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 1. – С. 72–91.

9. Меденец Р., Чун-ву Ли Боковая сила в системах с магнитной левитацией // ТИИ ЭР. – 1974. – № 5. С. 39–49.

10. Патент 6664880 USA. Inductrack magnet configuration / R. F. Post. – Оубл. 09.01.2003.

11. Earnshaw S. On the nature of the molecular forces witch regulate the constitution of the luminiferous ether // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. – 1842. – V. 7. – Pp. 97–112.

12. Halbach, K. Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material / K. Halbach // Nuclear Instruments and Methods. – V. 169. – N1. – 1980. – Pp. 1–10.

13. Kazuo Sawada. Technological Development of the Superconducting Magnetically Levitated Train // Japanese railway engineering. – 2008. – № 160. – Pp. 2–5.

14. Murai T., Fujiwara S. Characteristics of combined propulsion, levitation and guidance system with asymmetric figure between upper and lower coils in EDS, Trans. IEE Jpn., 116-D, 1996. – Pp. 1289–1296.

15. Pope D. Halbach Arrays Enter the Maglev Race // The Industrial Physicist. – 2003. – № 4. – Pp. 34–36. ●

Координаты авторов: **Казначеев С. А.** – kaznacheeff.serezha@yandex.ru,

Зименкова Т. С. – tatyana.zimenkova@gmail.com, **Краснов А. С.** – anton.s.krasnov@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 06.12.2016, принята к публикации 28.12.2016.