

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

УДК [UDC] 538.955

DOI 10.17816/transsyst20228363-77

© И.В. Мартиросян^{1,2,3}, С.В. Покровский^{1,2,3}, М.А. Осипов^{1,2},
А.С. Стариковский^{1,2}, И.А. Руднев^{1,2,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

²Университет «Сириус»
(Сириус, Краснодарский край, Россия)

³Казанский (Приволжский) федеральный университет
(Казань, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ, РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ¹

Цель: моделирование динамических характеристик магнито-левитационной платформы на основе высокотемпературного сверхпроводника в процессе движения, разгона и торможения.

Методы: численный анализ магнитной левитационной системы выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты: при прямолинейном движении поперечные колебания не превышают 15 %, а увеличение скорости и массы подвеса не оказывает существенного влияния на амплитуду вибраций. В случае вертикальных колебаний увеличение массы и скорости платформы приводит к увеличению вибрационной стойкости системы. При увеличении радиуса поворота пути максимальная возможная скорость вхождения в поворот без отрыва подвеса от магнитного трека увеличивается нелинейно.

Заключение: разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические характеристики левитационного транспорта и может быть применена для систем различного масштаба.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, магнитная левитация, транспортные системы, метод конечных элементов.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Университета «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51012, а также научного проекта РФФИ № 20-38-90144 по конкурсу «Аспиранты» (И.В. Мартиросян).

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian^{1,2,3}, S.V. Pokrovskii^{1,2,3}, M.A. Osipov^{1,2},
A.S. Starikovskii^{1,2}, I.A. Rudnev^{1,2,3}

¹National research nuclear university MEPhI
(Moscow, Russia)

²Sirius University
(Sirius, Krasnodar region, Russia)

³Kazan Federal University
(Kazan, Russia)

SIMULATION OF THE MAGLEV SUSPENSION DYNAMIC CHARACTERISTICS DURING MOVEMENT, ACCELERATION AND DECELERATION

Background: When developing high-speed transport systems based on the magnetic levitation phenomenon, it is necessary to take into account a huge number of factors that affect the characteristics and stability of this type systems. One of the simplest and most convenient methods for achieving these goals is numerical simulation.

Aim: simulation of the dynamic characteristics of a magnetic suspension based on a high-temperature superconductor during movement, acceleration and deceleration.

Methods: numerical analysis of the magnetic levitation system was performed by the finite element method in the Comsol Multiphysics engineering simulation software.

Results: during straight motion, lateral vibrations do not exceed 15 %, and the suspension speed and mass increase does not have a significant effect on the vibrations amplitude. In the case of vertical oscillations, the platform mass and speed increase leads to an increase in the vibration resistance of the system. With an increase in the turning radius of the track, the maximum possible speed of entering the turn without detaching the suspension from the magnetic track increases non-linearly.

Conclusion: The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic characteristics of levitation transport and can be applied to systems of various scales.

Key words: high-temperature superconductor, magnetic levitation, transport systems, finite element method.

ВВЕДЕНИЕ

Явление сверхпроводимости открывает уникальные перспективы в области высокоскоростного наземного транспорта. Крупнейшие мировые производители современных сверхпроводящих композитов, или, так называемых, высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (2G ВТСП), работают над созданием концепций поездов на основе явления магнитной левитации, а также над разработкой методов контроля устойчивости систем этого типа. При разработке таких концепций

необходимо учитывать значительное число факторов: колебания, возникающие из-за неоднородности магнитного поля пути, высокие центробежные силы при наличии поворотов пути, электродинамические и механические процессы при разгоне, движении и торможении и т. д. В этой работе мы проанализируем некоторые из этих аспектов с помощью методов численного моделирования.

В литературе, посвященной вопросу создания магнитолевитационного транспорта, представлены результаты разнообразных исследований. Так, контроль вертикальных вибраций динамической ВТСП системы, подверженной внешним возмущениям обсуждался и моделировался в работе [1]. Горизонтальные колебания сверхпроводника над кольцевым постоянным магнитом исследовались в работе [2]. Представленная в работе [2] система также предполагает использование ВТСП для космического применения в качестве регулятора вибрационной стойкости. Разработки высокоскоростных транспортных систем на основе явления магнитной левитации, в том числе на основе ВТСП, начали получать широкое распространение более 30 лет назад [3–6]. Первый пилотируемый испытательный поезд на магнитной ВТСП подвеске был создан в Лаборатории прикладной сверхпроводимости (ASCLab) в Юго-западном университете Цзяотун (SWJTU), Китай [7]. После этого учеными из Германии, России, Италии было разработано несколько прототипов. В 2013 году в лаборатории ASCLab было проведено успешное испытание кольцевой магнитной линии под названием «Супер-Маглев», в основе которой заложен массив Хальбаха [8]. Во всех исследованиях отмечалось, что в процессе движения ВТСП подвеса неизбежно возникновение вибраций, которые могут служить угрозой безопасности движения состава [9]. Эти вибрации могут быть обусловлены неоднородностью магнитного поля пути, по которому движется подвес, наличием центробежных сил при повороте, суммарным действием сил электродинамического ускорения и аэродинамического сопротивления.

Данной работой мы начинаем цикл статей, посвященных исследованию динамики ВТСП подвесов, движущихся в неоднородных магнитных полях. Мы начнем с анализа базовых конфигураций, а затем более детально коснемся вопросов стабилизации подвеса и оптимизации его характеристик. В настоящей статье представлены результаты моделирования стопки ВТСП лент разгоняющейся, движущейся и тормозящей в магнитном поле постоянных магнитов. При этом вопрос управления разгоном и торможением на данном этапе не рассматривается, но мы получим первоначальные данные о проблемах, связанных с неоднородностью магнитного поля на прямолинейных участках, поворотах пути и центростремительным ускорением.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Общий концепт магнитолевитационной системы на основе ВТСП композитов представляет из себя ВТСП подвес, движущийся в неоднородном магнитном поле сборки постоянных магнитов (Рис.1). Сборка постоянных магнитов (ПМ) может служить как для вертикальной, так и для латеральной устойчивости магнитолевитационной системы. Вертикальная, или же опорная, сборка может быть представлена в трех вариантах: в виде сонаправленных, встречно направленных магнитов или же магнитной сборки Хальбаха (Рис. 1). Латеральная система, то есть система боковой устойчивости, может быть представлена в виде магнитов, ориентированных горизонтально или вертикально.

В качестве магнитов для вертикальной и латеральной систем использовались NeFeB магниты марки № 42 с остаточной индукцией магнитного поля на поверхности 0,38 Т. В латеральной сборке всегда присутствует лишь по одному магниту с каждой стороны. Количество магнитов в опорной сборке, размеры линейного участка пути, величины радиуса поворота пути являются регулируемыми входными параметрами модели и будут оговорены отдельно для каждого из рассмотренных случаев.

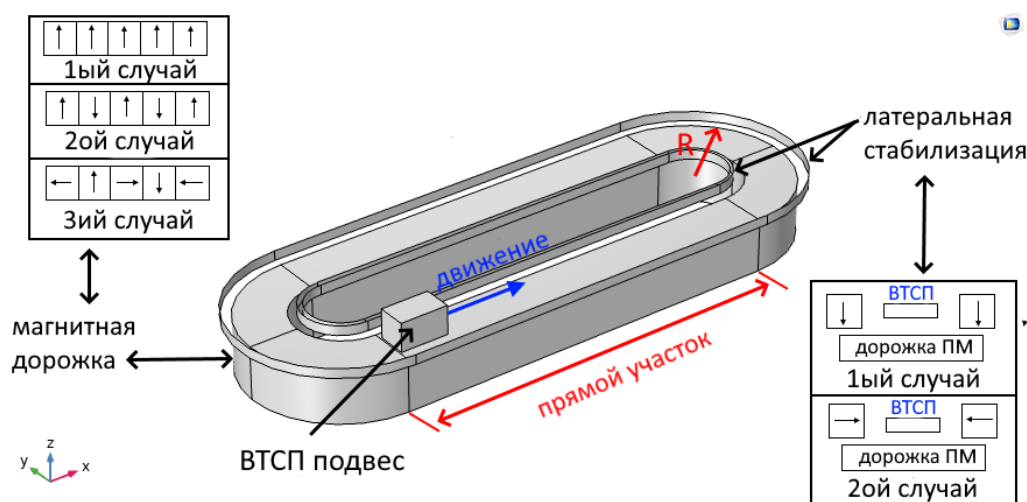


Рис. 1. Общий вид магнитолевитационной системы

В качестве ВТСП элемента на данном этапе будет рассматриваться стопка ВТСП лент. 2G ВТСП ленты имеют слоистую структуру и содержат более 10 слоев [10]. Буферные и защитные слои общей толщины ~120 нм не оказывают существенного влияния на электродинамические и тепловые процессы, рассматриваемые в данной работе, а скорее являются необходимой частью технологического процесса при производстве.

Поэтому в рамках модели они не учитывались. Основные параметры ВТСП лент, использованные при моделировании, соответствуют реальной архитектуре композита и представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Параметры моделируемых ВТСП лент

Наименование	Параметр
Производитель	SupreOx, Россия
Высокотемпературный сверхпроводник	REBCO (где RE- редкоземельный элемент)
Толщина сверхпроводящего слоя	2 мкм
Подложка	Hastelloy C-276
Толщина подложки	50 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм
Толщина слоя меди	30 мкм
Средний критический ток, I_c	550 А (77,4 К, собственное поле)
Показатель степени ВАХ	27

Размер каждой ВТСП ленты в стопке составляет 12мм x 20 мм, а их количество является варьируемым параметром. Для того чтобы исследовать влияние массы перевозимого груза на вибрационную стойкость системы, при моделировании над стопкой ВТСП лент располагается сплошной блок размера 12 мм x 20 мм x 1 мм, который предназначен для регулирования массы подвеса и не участвует в электродинамических и тепловых процессах. Так, в рамках данной работы были рассмотрены случаи массы подвеса 50 и 350 г, при этом при изменении массы регулировочного блока, его размер не изменялся, как не менялся бы размер вагона при изменении массы перевозимого груза. Масса подвеса равняется сумме масс ВТСП лент и регулировочного блока. Для каждого слоя ВТСП ленты известны точные размеры и зависимости их плотности от температуры, так что их масса может быть точно определена. Поэтому плотность блока вычисляется как:

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{bulk}}{V_{bulk}} = \frac{m_s - m_{HTS}}{V_{bulk}} \quad (1)$$

где ρ_{bulk} – плотность материала регулировочного блока, m_{bulk} и V_{bulk} – его масса и объем, m_s – масса подвеса, которая задается равной 50 г или 350 г, а m_{HTS} – масса стопки ВТСП лент, которая вычисляется как сумма масс всех слоев, для которых объемы и плотности известны. Таким образом, в рамках численной модели задается масса ВТСП платформы, а плотность регулировочного блока вычисляется автоматически для обеспечения необходимой массы подвеса.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

А. Электродинамическая модель

FEM (finite element model) модель магнитной левитационной системы была выполнена с использованием А-Н формализма, реализованного в программной среде Comsol Multiphysics. Данный формализм был успешно применен для расчета поведения ВТСП материалов [11,12], а также для расчета магнитных систем на их основе [13]. В этой постановке задачи прямой решатель среды Comsol Multiphysics использует две статических переменных: магнитное поле \mathbf{H} и магнитный векторный потенциал \mathbf{A} . Прямой решатель использует больше памяти, но при этом обладает большей точностью в сравнении с итерационным решателем.

Формулировка в терминах компонент магнитного поля (Н-формализм) применяется в ВТСП доменах для решения задачи о распределении плотности тока \mathbf{J} в сверхпроводнике:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

Управляющее уравнение для нестационарной задачи в случае Н-формализма представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} + d\mathbf{B}/dt = \nabla \times \mathbf{E} + d(\mu_0 \mathbf{H})/dt = 0 \quad (2)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля, \mathbf{B} – индукция магнитного поля, t – время, μ_0 – относительная магнитная проницаемость.

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

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость.

Вольтамперная характеристика $\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J}$ задается в виде степенного закона для сопротивления ВТСП слоя.

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \cdot \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (4)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля, ρ – сопротивление, E_c – критерий, равный 1 мкВ/см, J_c – плотность критического тока, n – показатель степени ВАХ. Плотность критического тока J_c автоматически вычисляется как частное критического тока и сечения ВТСП ленты, размеры которой известны. Величина критического тока, так же, как и

величина показателя степени n , являются одними из основных характеристик ВТСП материала и были представлены в Табл. 1. Распределение тока J вычисляется на основе закона Ампера (1) и применяется в выражении (4) для вычисления сопротивления сверхпроводника. Для других слоев ВТСП ленты используется линейная зависимость сопротивления от тока. Также в рамках модели учитывается зависимость критического тока от магнитного поля [14]. В качестве граничных условий используется условие Дирихле.

В. Теплофизическая модель

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

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

где d – плотность, C_p – теплоемкость, T – температура, k – теплопроводность, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические, \mathbf{u} – поле скорости температур. Плотности, теплоемкости и теплопроводности всех слоев ленты заложены в виде интерполяции экспериментальных данных [15]. 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.

В рамках модели предусмотрено безжидкостное охлаждение системы до температуры 77,4 К. Практическая реализация такого охлаждения возможна с применением криокулерной техники. В рамках модели предполагается торцевое охлаждение стопки ВТСП лент по всему ее периметру. Для этого на боковых границах стопки задается условие теплоотвода, мощность которого также зависит от температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первичные расчеты были посвящены исследованию влияния типа опорной магнитной сборки на вертикальную силу левитации [16]. Расчеты показали, что максимальная левитационная сила достигается при использовании магнитной сборки Хальбаха для стопок лент различной высоты. Однако в этом случае с увеличением левитационного зазора сила левитации уменьшается значительно быстрее, чем в случае сборки магнитов, ориентированных в одном направлении. С подробностями

влияния типа сборки на вертикальную составляющую силы левитации можно ознакомиться в нашей ранней работе [16]. Таким образом, наиболее перспективным для использования в транспортных системах является сборка с согласно или противоположно ориентированными магнитами. Сборка Хальбаха может наиболее успешно применяться в системах с малым зазором левитации, например, в магнитных подшипниках. Опираясь на эти выводы, мы провели расчет движения стопки 50 ВТСП лент в магнитном поле сборки сонаправленных магнитов. Стопка разгонялась до скорости 100 км/ч, размерность ускорения 10 м/с. Максимальное сопротивление движению в магнитном поле соответствует началу разгона платформы и достигает ~4 Н (Рис. 2), а затем снижается и принимает типичные значения для латеральной силы при движении в данном магнитном поле. Аэродинамические силы, действующие на подвес, напротив, возрастают с увеличением скорости. Суперпозиция этих двух компонент – электро и аэродинамической – является той силой, которая препятствует движению подвеса вдоль прямого участка магнитного рельса. Соответственно, наиболее просто преодолеть эту силу будет при той скорости, при которой сумма двух описанных вкладов минимальна.

Из приведенного графика следует, что наименьшее суммарное сопротивление движению для данного случая соответствует скорости движения подвеса ~45 км/ч. Как уже говорилось ранее, при моделировании над стопкой ВТСП лент располагается блок, который не участвует в электродинамических и тепловых процессах, а лишь искусственно регулирует массу левитирующего подвеса. Аэродинамическое сопротивление зависит от миделева сечения, то есть наибольшего по площади сечения подвеса поперек направления движения. Но поскольку в рамках модели изменение массы происходит без изменения объема и размеров подвеса, миделево сечение всегда одинаково (число ВТСП лент * поперечное сечение одной ленты + поперечное сечение массивного блока). Роль массы подвеса становится очевидной при расчете колебаний и при расчете динамики подвеса на поворотах пути.

Для рассмотренного выше случая наблюдается появление и вертикальных и боковых вибраций. Нормированные максимальные амплитуды вертикальных и боковых вибраций для различных скоростей движения подвеса приведены на Рис. 3. Отметим некоторые характерные особенности:

- на прямом участке пути поперечные колебания не превышают 15%. Увеличение скорости подвеса существенно не влияет на величину вибрации;
- увеличение массы подвеса при боковых колебаниях существенно не влияет на поперечное смещение;

- в случае вертикальных колебаний увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний почти вдвое;
- с увеличением скорости движения вертикальная составляющая колебаний сначала насыщается и даже уменьшается на прямом участке пути при большей массе подвеса.

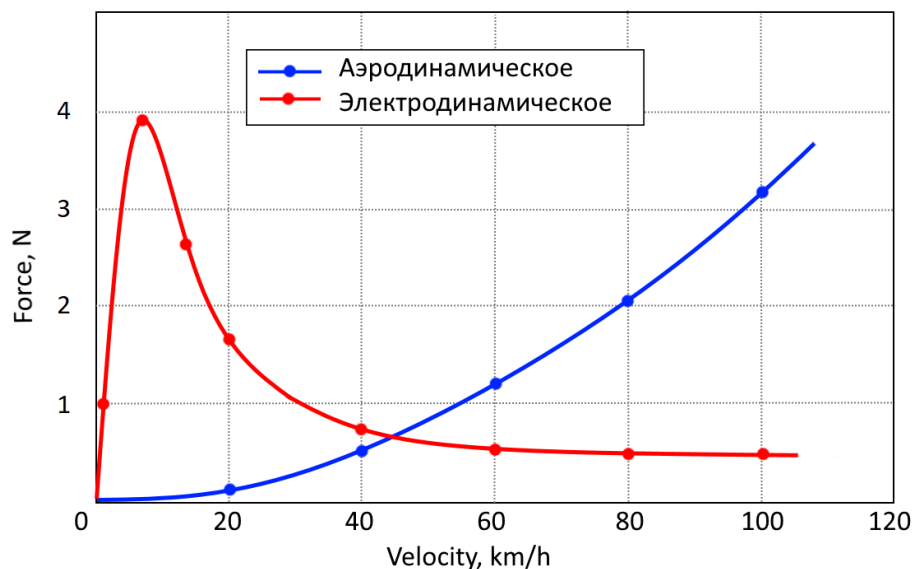


Рис. 2. Зависимости электродинамического и аэродинамического сопротивления подвеса от скорости движения

Фактически, рассчитанные зависимости от скорости отражают и характер поведения подвеса при разгоне и торможении. Так, при торможении подвеса аэродинамическое сопротивление будет уменьшаться, а электродинамические потери при торможении после равноускоренного движения начнут расти.

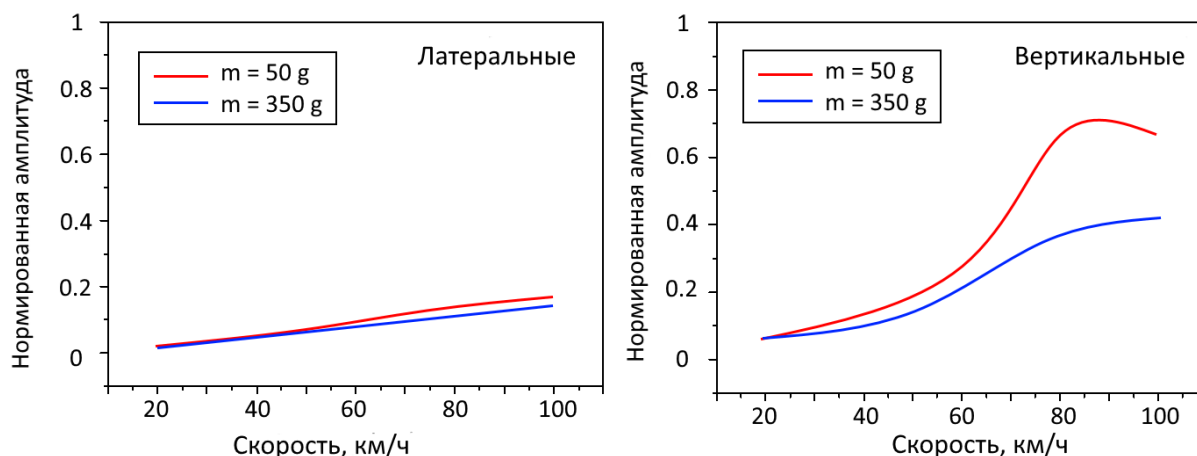


Рис. 3. Зависимости нормированной максимальной амплитуды вибраций ВТСП подвеса от скорости движения для боковых (слева) и вертикальных (справа) вибраций при прямолинейном движении

Таким образом, увеличение массы подвеса положительно влияет на вибрационную стойкость системы, однако ситуация существенно меняется при появлении поворотов пути. Несмотря на то, что при прямолинейном движении увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний, при движении по криволинейной траектории из-за наличия центробежных сил более легкий подвес может разгоняться до более высоких скоростей. Если центробежная сила превышает максимальную боковую силу, то подвес оторвется от магнитного рельса. Так, магнитная платформа массой 350 г может войти в поворот радиусом 10 см на максимальной скорости < 1 км/ч, тогда как при массе подвеса 50 г максимальная скорость при повороте составляет уже 2,5 км/ч (Рис. 4).

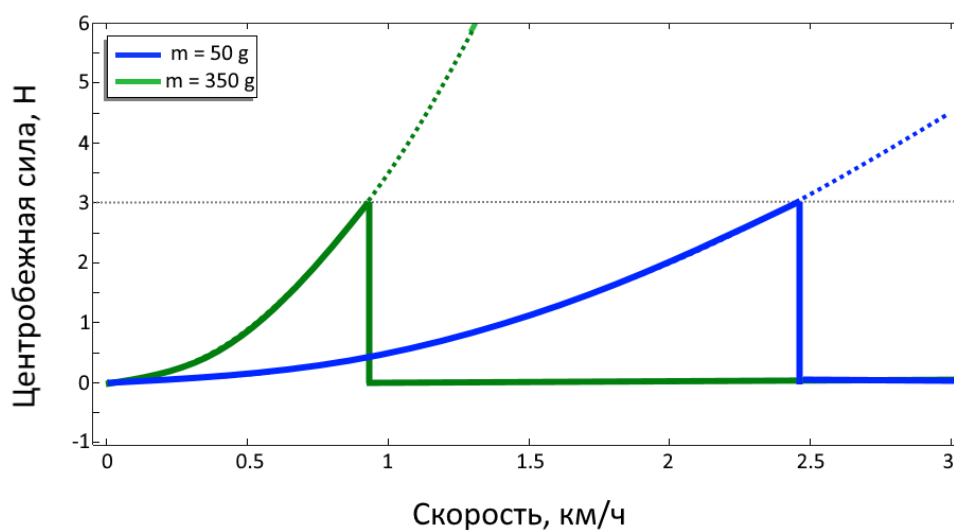


Рис. 4. Зависимости центробежной силы от скорости движения подвеса на повороте радиуса 10 см

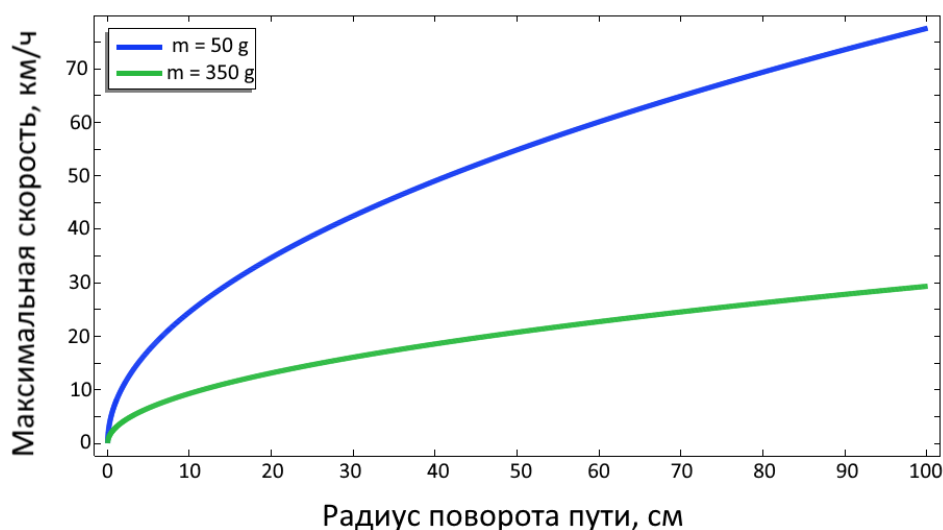


Рис. 5. Зависимости максимальной скорости подвеса от радиуса поворота магнитного пути

Зависимость максимальной скорости движения подвеса от радиуса поворота пути приведена на Рис. 5. Зависимость носит нелинейный характер, и для более легкого подвеса характерны более высокие скорости вхождения в поворот.

Кроме того, при движении на повороте пути величина и градиент магнитного поля по внутреннему и внешнему радиусу магнитной дорожки существенно различаются. На Рис. 6 в качестве примера приведено распределение магнитного поля для внешнего и внутреннего радиуса магнитного пути, состоящего из 10мм x 10мм x 10мм постоянных магнитов. Можно увидеть, что амплитуда поля по внешнему радиусу может отличаться на 30–60 % от амплитуды поля по внутреннему и неоднородность поля вдоль внешнего радиуса значительно выше.

Таким образом, мы предполагаем, что колебания подвеса по внешнему радиусу будут значительно сильнее, чем по внутреннему. Подвес будет отклоняться от горизонтального положения, причем амплитуда и частота вибраций будет различаться для двух сторон левитирующей платформы, находящихся на разных сторонах магнитного трека. Анализ поведения положения подвеса при поворотах магнитного пути и методам его стабилизации будет посвящена следующая работа цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная мультифизическая модель магнитного подвеса на основе 2G ВТСП композитов, которая позволяет проводить совместный электродинамический и тепловой расчет параметров магнитной системы при движении стопки ВТСП лент в неоднородном магнитном поле. Выполнен расчет вертикальных и поперечных колебаний при прямолинейном движении, также выполнен расчет электродинамического и аэродинамического сопротивления подвеса в процессе разгона. Проведен расчет максимально возможной скорости подвеса при наличии поворотов магнитной дорожки с учетом воздействия на систему центробежных сил, получены зависимости максимальной скорости подвеса от радиуса поворота пути. По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

- При прямолинейном движении необходимо учитывать баланс между электродинамическим и аэродинамическим сопротивлением. Для рассматриваемой системы наименьшее энергопотребление требуется для поддержания скорости ~45 км / ч.

- На прямом участке пути амплитуда поперечных колебаний не превышает 15 % от начального положения стопки ВТСП лент. Увеличение скорости подвеса существенно не влияет на величину вибрации.

Увеличение массы подвеса при боковых колебаниях существенно не влияет на поперечное смещение при прямолинейном движении.

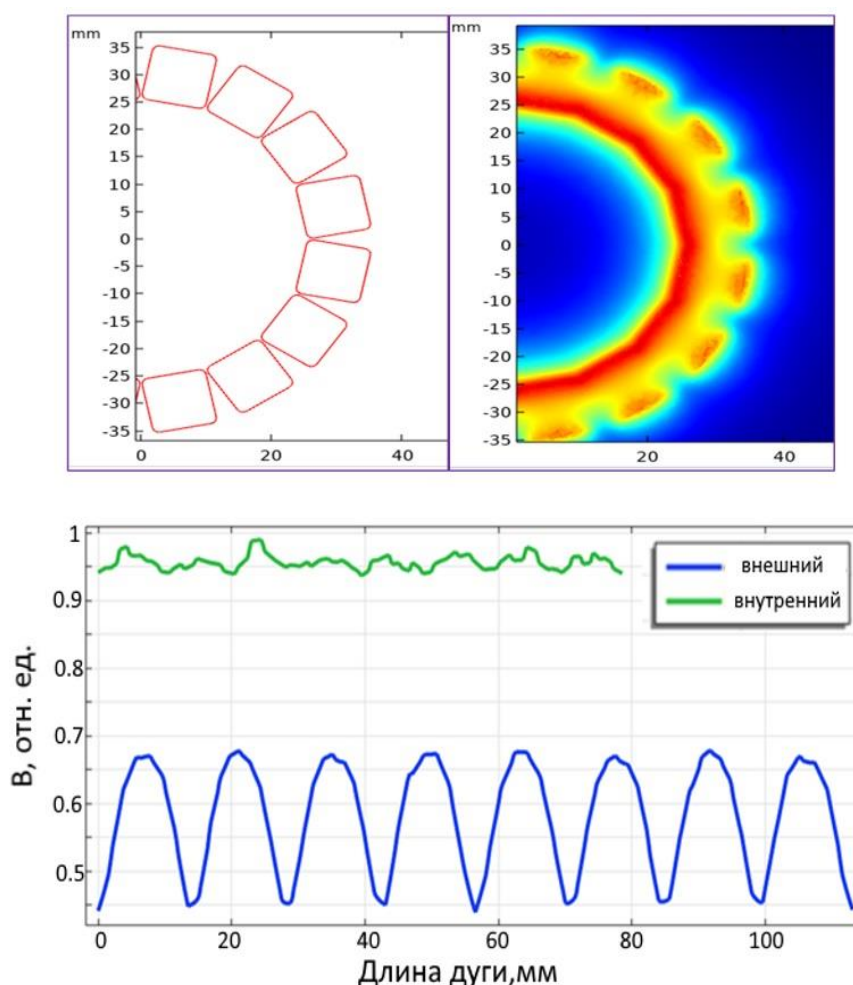


Рис. 6. Нормированные распределения магнитного поля на высоте 1 мм от магнитной дорожки, состоящей из одного ряда магнитов 10x10x10 мм по внешнему и по внутреннему радиусам

– В случае вертикальных колебаний при прямолинейном движении увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний почти вдвое. С увеличением скорости движения вертикальная составляющая колебаний насыщается и даже уменьшается на прямом участке пути.

– Зависимости колебаний от скорости являются характерными, как для разгона, так и для процесса торможения. То есть при уменьшении скорости зависимости примут вид зеркальный тому, который характерен для разгона.

– При криволинейном движении, если центробежная сила превышает максимальную боковую силу, то подвес оторвется от магнитного рельса. Так, магнитный подвес массой 350 г может войти в поворот радиусом

10 см на максимальной скорости < 1 км/ч, тогда как при массе подвеса 50 г максимальная скорость при повороте составляет уже 2,5 км/ч. При увеличении радиуса поворота пути максимальная возможная скорость вхождения в поворот без отрыва от магнитного трека нелинейно увеличивается.

Таким образом, увеличение массы и скорости левитирующей ВТСП платформы в общем положительно сказывается на вибрационной стойкости системы при прямолинейном движении, но отрицательно – при движении по траектории с поворотами. Следовательно, существуют оптимальные параметры массы и скорости, необходимые для наиболее устойчивого движения подвеса вдоль магнитного трека с известными радиусами поворота пути. Кроме того, для увеличения эффективности систем разгона и торможения магнитолевитационного транспорта необходимо производить учет в совокупности электродинамических и аэродинамических сил.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Nagaya K, Tsukagoshi M, Kosugi Y, Murakami M. VIBRATION CONTROL FOR A HIGH-T_c SUPERCONDUCTING NON-LINEAR LEVITATION SYSTEM. J SOUND VIB. 1997;208(2):299-311. doi:10.1006/jsvi.1997.1223
2. Jang-Horng Y, Postrekhin E, Ki Bui M, et al. Vibration isolation for space structures using HTS-magnet interaction. IEEE T APPL SUPERCON. 1999;9(2):908-10. doi:10.1109/77.783444
3. Brandt EH. Levitation in Physics. Science. 1989;243(4889):349-55. doi:10.1126/science.243.4889.349
4. Moon FC. Superconducting Levitation: Applications to Bearing & Magnetic Transportation 1994 August 01, 1994. 310 p. Available from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994slab.book.....M/>
5. Ma K, Postrekhin YV, Chu W-K. Superconductor and magnet levitation devices. REV SCI INSTRUM. 2003;74:4989-5017. doi:10.1063/1.1622973
6. Hull JR. Superconducting bearings. SUPERCOND SCI TECH (Online). 2000;13(2):R1-R15. doi:https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/2/201
7. 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
8. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China. IEEE T APPL SUPERCON. 2016;26(6):1-8. doi:10.1109/TASC.2016.2555921
9. Li H, Deng Z, Ke Z, et al. Curve Negotiation Performance of High-Temperature Superconducting Maglev Based on Guidance Force Experiments and Dynamic Simulations. IEEE T APPL SUPERCON. 2020;30(1):1-11.

doi:10.1109/TASC.2019.2932283

10. Lee S, Petrykin V, Molodyk A, Samoilencov SV, et al. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. SUPERCOND SCI TECH. 2014;27:044022. doi:10.1088/0953-2048/27/4/044022
11. Dular P, Remacle J, Henrotte F, et al. Magnetostatic and magnetodynamic mixed formulations compared with conventional formulations. IEEE T MAGN. 1997;33(2):1302-5. doi:10.1109/20.582494
12. Bíró O. Edge element formulations of eddy current problems. COMPUT METHOD APPL M. 1999;169(3):391-405. doi:https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00165-0
13. Bortot L, Auchmann B, Garcia IC, et al. A Coupled A-H Formulation for Magneto-Thermal Transients in High-Temperature Superconducting Magnets. IEEE T APPL SUPERCON. 2020;30(5):1-11. doi:10.1109/TASC.2020.2969476
14. Strickland N, Wimbush S. The magnetic-field dependence of the critical current: what we really need to know. IEEE T APPL SUPERCON. 2016;PP:1. doi:10.1109/TASC.2016.2636561
15. Zhang M, Matsuda K, Coombs TA. New application of temperature-dependent modelling of high temperature superconductors: Quench propagation and pulse magnetization. JPN J APPL PHYS. 2012;112(4):043912. doi:10.1063/1.4747925
16. Anischcenko I, Pokrovskii S, Rudnev I, Osipov M. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations. SUPERCOND SCI TECH. 2019;32(10):105001. doi:10.1088/1361-6668/ab2bbe

Сведения об авторах:

Мартиросян Ирина Валерьевна, инженер;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, ассистент;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Осипов Максим Андреевич, инженер;

eLibrary SPIN:4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;

E-mail: max.vfk@gmail.com

Стариковский Александр Сергеевич, аспирант;

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

E-mail: sanniyok1995@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, engineer;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Maxim A. Osipov, engineer;

eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;

E-mail: max.vfk@gmail.com

Alexander S. Starikovskii, Graduate;

eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID0000-0002-7605-7578;

E-mail: sannyyok1995@gmail.com

Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;

E-mail: iarudnev@mephi.ru

Цитировать:

Мартirosян 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. doi: 10.17816/transsyst20228363-77

To cite this article:

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. doi: 10.17816/transsyst20228363-77