

МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ВТСП ЭЛЕМЕНТОВ

Л.К. Ковалев, С.М.-А. Конеев, С.А. Ларионов, В.Н. Полтавец, Р.И. Ильясов
Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва, Россия

В настоящее время в промышленно развитых странах активно ведутся работы по созданию новых типов высокоскоростных транспортных средств (ВТС) на магнитном подвесе[1,2]. Новый импульс в развитии систем ВТС в последние годы связан с открытием явления высокотемпературной сверхпроводимости, быстрым развитием силовой полупроводниковой техники, а также систем электродвижения на основе новых типов линейных двигателей[3,4]. Так, например, в Китае создан и испытан макет ВТС с магнитным подвесом на основе постоянных магнитов (ПМ) из редкоземельных материалов (РЗМ) и объемных ВТСП материалов, способный перевозить 4 – 5 человек. Как показывают предварительные оценки, использование новых типов магнитных опор на основе ВТСП элементов позволит отказаться от сложных систем электродинамически стабилизированных магнитных опор, увеличить воздушный зазор между основанием магнитного подвеса и подвижным вагоном (в 2 – 4 раза), что повысит надежность и скорость перспективных ВТС. Ниже рассматриваются рабочие процессы в магнитных ВТСП опорах на основе объемных ВТСП элементов и постоянных магнитов (ПМ).

Наиболее перспективны для применения в ВТС монокристаллические ВТСП элементы на основе иттриевых (YBCO) керамик. В первом приближении такой ВТСП элемент можно рассматривать как идеальный диамагнетик относительно внешних магнитных полей[5]. Левитационные характеристики магнитного подвеса с объемными ВТСП элементами существенно зависят от режима его активации. В настоящее время наибольший интерес для практического применения представляют магнитные ВТСП опоры, активированные в режиме *field cooling process*[3], при котором ВТСП элементы переходят в СП состояние во внешнем магнитном поле. Такие опоры имеют лучшие демпферные характеристики, несмотря на относительно более низкие значения сил левитации по сравнению с опорами, ВТСП элементы которых переходят в СП состояние при отсутствии внешнего магнитного поля.

Магнитный ВТСП подвес включает бесконечно длинный (вдоль продольной оси z) ферромагнитный магнитопровод, через который замыкается магнитное поле одного или нескольких ПМ, расположенных на нем (с чередующейся вдоль поперечной оси y полярностью N-S-N) и разделенных проставками из немагнитного материала (рис.1).

Над поверхностью ПМ левитирует объемный ВТСП элемент.

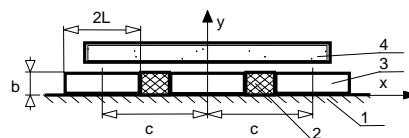


Рис. 1. Расчетная схема магнитного ВТСП подвеса (1 – ферромагнитное основание, 2 – немагнитная проставка, 3 – постоянный магнит, 4 – объемный ВТСП элемент).

Расчет магнитных полей в магнитном ВТСП подвесе с магнитопроводом сводится к решению двумерной задачи Зоммерфельда для одного магнита с последующим наложением решений для заданной системы магнитов[6]. Решение задачи Зоммерфельда проводится в терминах векторного потенциала. В результате решения соответствующей задачи Неймана с использованием формулы Грина получены аналитические выражения для расчета векторного потенциала и двумерного магнитного поля в ВТСП подвесе.

При активации магнитного ВТСП подвеса в магнитном поле магнитные силовые линии оказываются «вмороженными» в керамический ВТСП элемент. В этом случае при отсутствии смещения ВТСП блока относительно начального положения электрические токи в нем равны нулю, и силовое воздействие между ПМ и ВТСП блоком отсутствует. При смещении блока в магнитном поле относительно начального положения «вмороженное» магнитное поле внутри ВТСП блока не меняется, а магнитное поле вне ВТСП блока деформируется. Это приводит к формированию на поверхности ВТСП блока незатухающих биновских токовых слоев (индуцированных возмущениями магнитного поля), взаимодействие которых с магнитным полем ПМ приводит к возникновению сил левитации, действующих на ВТСП блок при его смещении[5].

Расчет локальных электродинамических сил, действующих на ВТСП блок при его смещении из начального положения, проводится на основе метода отражений. При этом поверхность ВТСП блока в первом приближении считается плоским «диамагнитным зеркалом» относительно возмущенного магнитного поля H_B . Величина H_B находится путем отражений в «диамагнитном зеркале» той части системы ПМ, которая ответственна за формирование возмущения магнитного поля. Так как отраженные элементы системы ПМ имеют магнитный момент, противоположный моменту реальных ПМ, то величина плотности биновского поверхно-

стного тока I_s на единицу длины ВТСП блока будет равна удвоенной разности значений касательных составляющих напряженностей магнитного поля до и после смещения. Локальная сила левитации определяется произведением тока I_s на среднюю индукцию магнитного поля в биновском токовом слое, а полная сила – интегрированием локальной силы по объему токового слоя ВТСП элемента.

В работе проведен расчетный анализ магнитных полей, локальных и интегральных сил левитации в магнитных подвесах на основе объемных ВТСП материалов и ПМ различной конфигурации. Показано, в частности, что в вертикальном магнитном ВТСП подвесе с тремя ПМ при различной величине вертикального смещения ВТСП пластины h имеются два ярко выраженных максимума в распределении локальных сил левитации по ширине ВТСП подвеса и два дополнительных максимума с вдвое меньшей амплитудой (рис.2). Расчеты показывают, что величина основных максимумов в системе из трех ПМ приблизительно в два раза больше, чем в случае с одним ПМ.

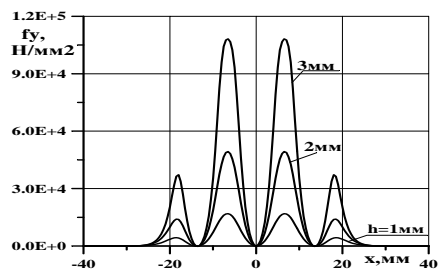


Рис. 2. Распределение локальных электродинамических сил в вертикальной ВТСП опоре

В МАИ совместно с ЗАО «Спецремонт» разработан крупномасштабный макет ВТС с магнитным ВТСП подвесом (рис.3). Магнитное полотно длиной 5,6м представляет собой две полосы ПМ из РЗМ (на основе Fe – Nd – В), каждая из которых в поперечном направлении содержит три магнита шириной по 50 мм, разделенных проставками из немагнитного материала шириной 15мм. Магниты имеют намагниченность по вертикальной оси и по ширине полосы устанавливаются с чередующейся полярностью (N-S-N). Левитирующая платформа представляет собой раму, на которой закреплены четыре криостата с ВТСП керамикой и система криогенного охлаждения. На платформу устанавливается корпус демонстрационного экипажа с посадочным местом для человека. Общая сухая масса платформы с корпусом (без человека) составляет 160кг.



Рис. 3. Макет транспорта с магнитным ВТСП подвесом.

Эксперименты показали, что если захлаживание ВТСП керамики производится при начальном зазоре между магнитным полотном и поверхностью криостатов 35 мм, то платформа с корпусом, запасом жидкого азота и одним человеком левитирует над поверхностью полотна с зазором 20мм. При этом суммарная левитирующая масса 280 кг. При общей левитирующей массе 440 кг (3 пассажира) зазор между левитирующей платформой и магнитным полотном 5мм.

Результаты испытаний созданного макета ВТС подтверждают возможность создания полномасштабного транспортного средства, использующего новые физические явления (высокотемпературную сверхпроводимость) для обеспечения перспективного вида передвижения – левитации транспортных средств с ВТСП объемными материалами в магнитном поле.

1. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А., Ногорский В.Д. Транспорт с магнитным подвесом. - М.: Машиностроение, 1991.
2. Proceedings of the MAGLEV'2000, June 7-10-2000, Rio de Janeiro, Brazil.
3. Moon Fr. Superconducting Levitation. Cornell University, 1996.
4. Wang J., Wang S., Ren Z., Wang X., Song H. High Temperature Superconducting Maglev Vehicle. Proceedings of ISMAGLEV'2002, June 25-27-2002, Chengdu, China.
5. Глебов И.А., Лаверик Ч., Шахтарин В.Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. – Ленинград, Наука, 1980.
6. Зоммерфельд А. Электродинамика. - М.: Иностранная литература, 1958.