

Комбинированный электромагнитный подвес с пониженным энергопотреблением для магнитолевитационных транспортных систем

А.А. Фирсов¹, В.М. Амосков¹, Д.Н. Арсланова¹, Г.А. Баранов¹, В.А. Беляков^{1,2}, В.Н. Васильев¹, А.А. Демина¹, М.В. Капаркова¹, В.Д. Кузьменков¹, В.П. Кухтин¹, Е.А. Ламзин¹, М.С. Ларионов¹, М.В. Манзук¹, А.Н. Неженцев¹, Д.А. Овсянников², И.Ю. Родин¹, А.В. Сафонов¹, С.Е. Сычевский^{1,2}, Н.А. Шатиль¹

¹ – АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (Санкт-Петербург, Россия), firsov@sintez.niiefa.spb.su, firsov7777@yandex.ru

² – Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

В докладе описан разработанный и запатентованный в АО «НИИЭФА» комбинированный электромагнитный подвес, использующий в своем составе постоянные опорные магниты или ВТСП магниты. Описан изготовленный исследовательский среднемасштабный макет комбинированного подвеса. Приведены результаты измерения потребляемой мощности при работе среднемасштабного макета.

Ключевые слова: магнитная левитация, электромагнитный подвес, электродинамический подвес, комбинированный электромагнитный подвес, среднемасштабный макет комбинированного электромагнитного подвеса.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики государства напрямую связано с развитием транспортной инфраструктуры. Экономический рост требует повышения скорости грузовых и пассажирских транспортных потоков [1]. Огромную роль в системе транспорта играют железные дороги. Все чаще утверждается необходимость строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей. Однако в настоящий момент ситуация такова, что классическая система «колесо-рельс» приближается к своему техническому пределу с точки зрения соответствия требованиям, предъявляемым к высокоскоростному транспорту, то есть фактически не справляется с требуемыми нагрузками. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование магнитолевитационных систем.

II. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕВИТАЦИОННЫХ ПОДВЕСОВ

Из существующих технологий магнитолевитационного подвеса можно условно выделить два основных направления:

- электродинамический подвес (ЭДП)
- электромагнитный подвес (ЭМП)

Принцип работы электродинамического подвеса заключается в возникновении подъемной силы при движении источника магнитного поля над электропроводящей поверхностью (путевой структуры) за счет взаимодействия с магнитным полем наведенных вихревых токов. Эта сила зависит от источника

магнитного поля, скорости движения, электропроводности материала путевой структуры и величины зазора. Примером такой технологии является технология Inductrack, разработанная в США [2].

В качестве источника магнитного поля могут использоваться постоянные или сверхпроводниковые магниты. Недостатком такой системы является то, что левитация обеспечивается только в случае движения транспортного средства со значительными скоростями. При малых скоростях движения величины подъемной силы оказывается недостаточно. По этой причине на малых скоростях необходимо иметь дополнительный механизм для обеспечения левитации.

Принцип действия электромагнитного подвеса использует силу притяжения электромагнита, расположенного под стальной путевой структурой. Эта сила зависит от величин воздушного зазора между магнитом и путевой структурой, величины магнитного поля, создаваемого электромагнитом. Управление зазором осуществляется регулированием величины тока в магните. Такая система способна обеспечивать левитацию в статических условиях и при движении. В качестве примеров такой системы можно привести китайский Маглев (технология «Transrapid», изначально спроектированная в Германии) и корейскую пассажирскую транспортную ветку, соединившую аэропорт Инчхон с центром Сеула [3]. Факт реализации этих проектов свидетельствует о выгоде применения левитационных систем в системе городского транспорта.

III. РАЗРАБОТКА МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Разработка и создание различных видов транспорта, использующих принцип магнитной левитации, требует тщательного анализа и оптимизации магнитных систем, обеспечивающих левитацию, стабилизацию движения и привод. Наиболее распространённые типы подвеса, такие как электродинамический подвес и электромагнитный подвес, включают в себя основные наиболее распространённые типы источников электромагнитного поля. К ним относятся сверхпроводящие и «тёплые» магниты, соответственно. Левитационные системы могут содержать и постоянные магниты, как, например, система подвеса Inductrack или

система магнитодинамического подвеса [4]. Проектирование таких систем подвеса и двигателя должно поддерживаться детальными численными расчётами стационарных магнитных полей и переходных электромагнитных процессов в различных элементах конструкции. Вычислительные модели, в свою очередь, требуют описания магнитных свойств материалов, которые часто характеризуются нелинейными зависимостями, проводимости путей структур. Стадия создания оборудования должна сопровождаться контролем свойств материалов.

Анализ различных видов левитационных систем демонстрирует потребность применения широкого диапазона типов материалов. К таким материалам, в частности, относятся магнитомягкие материалы (конструкционные и электротехнические стали), включая тонколистовые стали, которые применяются при изготовлении линейных двигателей, магнитотвердые материалы (постоянные магниты) и немагнитные токопроводящие материалы.

Магнитная система электрофизического устройства может состоять из ряда конструктивных элементов, имеющих различные кривые намагничивания, что обусловлено как конструктивными и стоимостными требованиями (например, различные материалы магнитопровода и полюса), так и технологическими

факторами (изготовление элементов магнитной системы из разных отливок сталей).

Для всех марок сталей, применяемых в анализируемых и изготавливаемых магнитных системах, выполнялись измерения магнитной проницаемости образцов этих сталей на базе специального измерительного оборудования и методик, разработанных и созданных в АО «НИИЭФА» [11]. Это позволяет учесть нелинейные магнитные свойства конкретных сталей в процессе расчётной поддержки проектирования и осуществить выбор оптимальной марки стали в многомерном параметрическом пространстве, характеризуемом ценой, эффективностью магнитной системы, технологичностью изготовления, доступностью и т.п.

IV. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОДВЕС, РАЗРАБОТАННЫЙ В НИИЭФА

Идея разработанного и запатентованного в АО «НИИЭФА» комбинированного электромагнитного подвеса [5-9] состоит в применении наряду с обычными электромагнитами, так называемых опорных магнитов, которые могут быть изготовлены на базе постоянных и/или сверхпроводниковых магнитов [9,10], (см. рис.1).

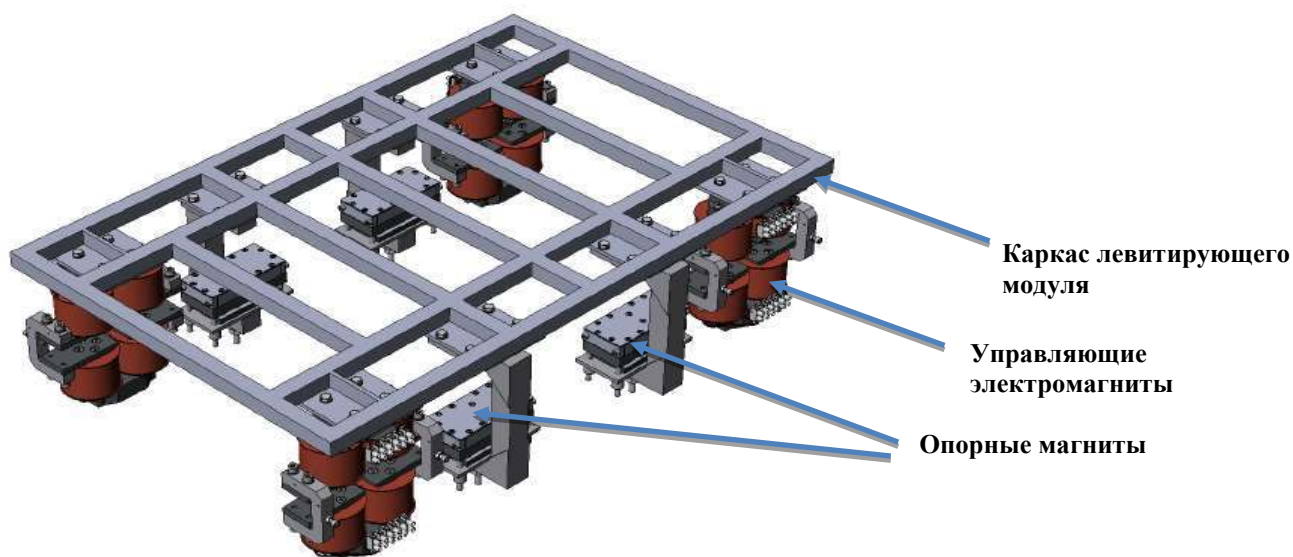


Рис. 1. Левитирующий модуль.

Опорные магниты создают основную подъемную силу, необходимую для левитации, а электромагниты выполняют стабилизирующую функцию – поддержание необходимой величины левитационного зазора. Таким образом происходит существенная экономия электроэнергии при работе данного вида повеса по сравнению с классическим активным электромагнитным подвесом, в котором подъемная сила обеспечивается только электромагнитами.

Проведенные на разработанном макете эксперименты подтвердили возможность такой организации магнитной системы. Для иллюстрации зависимости подъемной силы от

величины левитационного зазора можно привести результаты верификации расчетной модели опорных магнитов путем сравнения результатов численного моделирования с данными измерений подъемной силы изготовленного модуля опорного магнита (рис.2).

Совпадение с требуемой точностью результатов позволяет верифицировать расчётную модель элементов на базе ПМ.

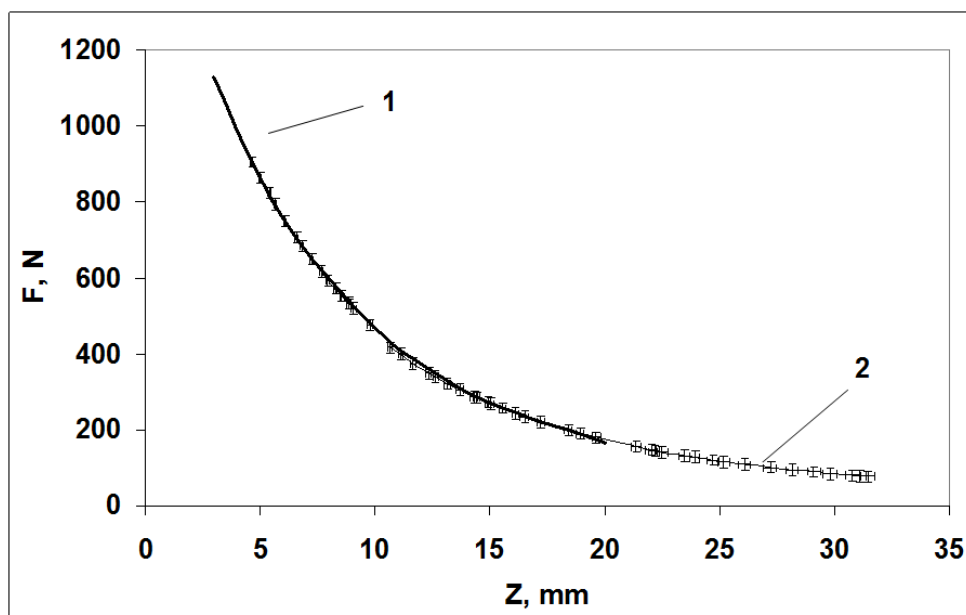


Рис. 2. Результаты измерения и расчёта силы притяжения опорного постоянного магнита к ферромагнитной направляющей путевой структуры: 1 - расчёт, 2 - измерение (с рассчитанными погрешностями измерения).

Аналогичные исследования проводились для нормальнопроводящих электромагнитов и для опорных сверхпроводниковых (СП) магнитов на базе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП-2).

Результатом исследований и математического моделирования различных вариантов подвеса для магнитолевитационного транспорта явилось создание работающего макета комбинированного

электромагнитного подвеса, содержащего опорные постоянные магниты и электромагниты (рис.3).

Для управления электромагнитами разработаны и изготовлены специальные управляемые источники тока. Совместно с СПбГУ разработан алгоритм управления, учитывающий нелинейную зависимость подъемной силы опорных постоянных магнитов от величины левитационного зазора.

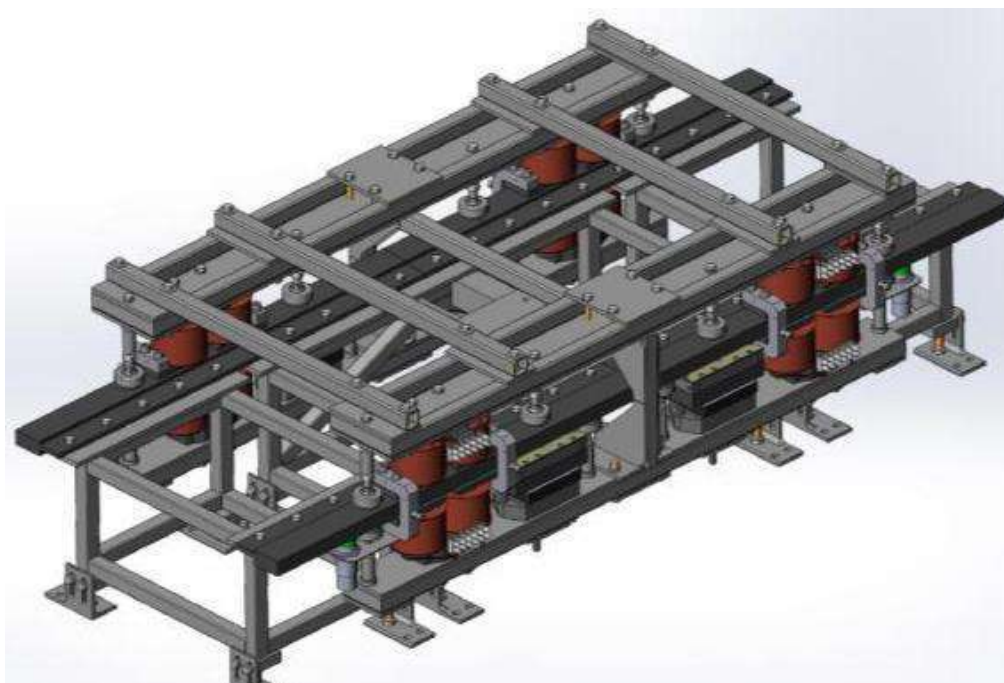


Рис.3. Фотореалистическое изображение среднemasштабного макета комбинированного левитационного подвеса

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты, проведенные на разработанном и созданном в АО «НИИЭФА» макете показали, что опорными постоянными магнитами можно

компенсировать значительную часть массы транспортной платформы, таким образом, достигается экономия электроэнергии по сравнению с «классическим» электромагнитным подвесом.

Основной сложностью применения в комбинированном подвесе постоянных магнитов, является нелинейная зависимость подъемной силы от величины зазора между магнитом и путевой структурой – что значительно усложняет управляющую функцию для токов в электромагнитах. Устойчивая многочасовая левитация макета позволяет говорить об уникальности разработанного комбинированного подвеса и алгоритмов управления магнитной системой, в которой применены как электромагниты, так и постоянные магниты.

Следует отметить, что наряду с постоянными магнитами в качестве опорных могут применяться и сверхпроводящие магниты. Это делает систему более гибкой в плане управления грузоподъемностью. Использование высокотемпературных сверхпроводников,

способных работать при температуре жидкого азота, так же существенно уменьшает затраты на электроэнергию, требуемую для создания необходимой подъемной силы.

На среднемасштабном макете левитационного подвеса проведены исследования зависимости потребляемой мощности электромагнитов от веса груза. Получена оценка величины мощности 0.75 Вт/кг при фиксированном положении опорных магнитов и левитационном зазоре между путевой структурой и полюсами электромагнитов 4.5 мм (рис.3). При уменьшении левитационного зазора величина потребляемой мощности будет уменьшаться.

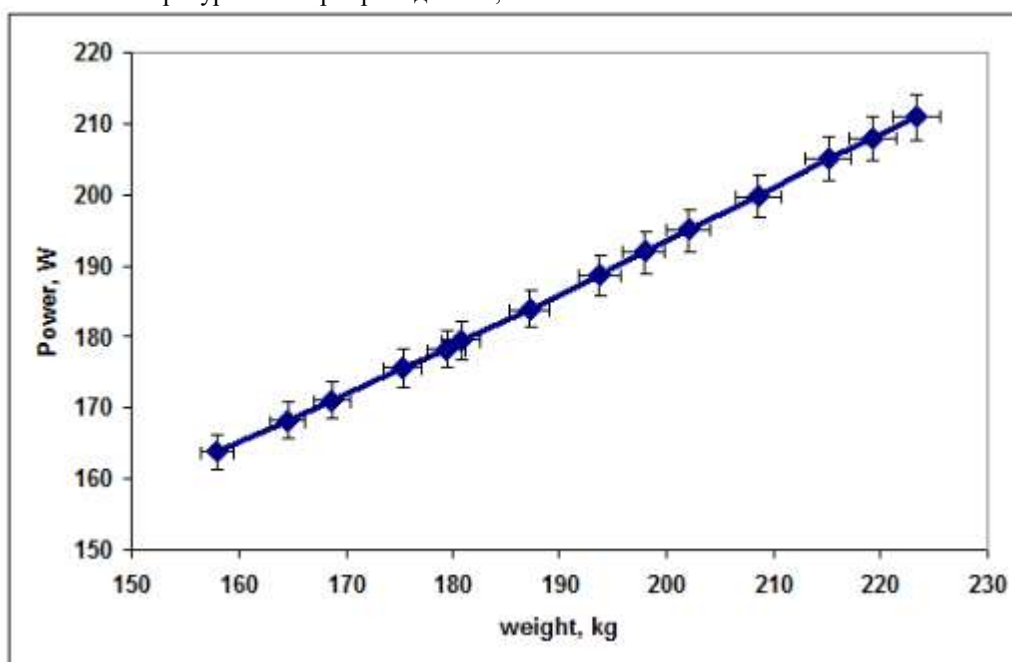


Рис.3. Зависимость мощности потребления от веса левитирующего модуля

Подъемная сила, обеспечиваемая опорными магнитами в режиме левитации составляла 135 N, т.е. обеспечивалась грузоподъемность ~ 130 кг при общей массе левитирующего модуля 160 ± 3 кг.

При дальнейшем увеличении массы груза необходимо осуществлять регулировку положения опорных магнитов. Подобная регулировка может быть осуществлена за счет применения дополнительных управляемых механизмов. Гораздо целесообразнее в этом плане выглядит использование сверхпроводниковых опорных магнитов на базе ВТСП.

В работе [12] для французского высокоскоростного поезда TGV весом 400 т,двигающегося со скоростью, превышающей 10 км/ч, приведена эмпирическая оценка величины силы F , выраженной в ньютонах, вызванной трением колёс, в зависимости от скорости (в м/сек): $F = 3750 + 48.9 \cdot V$,

где первый член отражает величину, связанную с трением в подшипниках, а второй определяется трением колеса о рельс. Из формулы следует, что при достижении поездом TGV скорости движения 85 м/с удельный расход энергии, затрачиваемый на преодоление сил трения, достигнет величины 0.7 Вт/кг. Если полагать, что

удельные затраты энергии на работу ЭМП для TGV будут составлять 0.7 Вт/кг (как было оценено в эксперименте с левитирующим макетом), то можно сделать вывод, что при движении экипажа со скоростью, превышающей 85 м/с (300 км/ч), преимущество по потреблению энергии будет иметь экипаж на основе ЭМП.

Выводы

– В АО «НИИЭФА», СПбГУ проведен детальный анализ различных видов левитационных систем, в результате которого предложена концепция построения комбинированного электромагнитного подвеса с пониженным энергопотреблением, использующем в своем составе опорные магниты, которые могут быть изготовлены на базе постоянных и/или сверхпроводниковых магнитов.

– По результатам проведенных исследовательских работ получено пять патентов РФ.

– Изготовлен среднемасштабный макет комбинированного электромагнитного подвеса.

– Разработан алгоритм управления комбинированным подвесом, учитывающий нелинейную зависимость подъемной силы от величины левитационного зазора.

– Анализ примененных технологий показывает, что практически все элементы транспортной системы на базе комбинированного электромагнитного подвеса могут быть изготовлены на российских предприятиях из материалов и комплектующих, производимых в РФ.

– Разработки базируются на программном обеспечении и вычислительных технологиях, созданных в РФ и зарегистрированных в России.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев / Магнитолевитационная транспортная технология // М.: Физматлит. - 2013. - 480 с.
- [2] R.F. Post, D.D. Ryutov, "The Inductrack Approach to Magnetic Levitation", Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-ID-138593. April 2000
- [3] Status and research progress of the linear rail transit system in china W. Li, D. Li, X. Zhang, J. Cao Транспортные системы и технологии. 2016. № 1 (3). С. 16-42.
- [4] В.А. Дзензерский, С.В. Васильев, В.И. Матин, В.И. Омеляненко, С.А. Сергеев Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией Киев.: Наукова Думка. – 2001. – 480с.
- [5] Патент РФ № 2573524 «Комбинированный магнитный подвес транспортного средства»
- [6] Патент РФ № 2573135 «Магнитный подвес транспортного средства для комбинированного путепровода»
- [7] Патент РФ № 2579446 «Электромагнитное устройство, путепровод и транспортное средство, снабженные таким устройством»
- [8] Патент РФ № 2566507 «Сверхпроводящее электромагнитное устройство, магнитный подвес и транспортное средство, снабженные таким устройством»
- [9] Комбинированные магнитные подвесы левитационных транспортных систем Амосков В.М., Беляков В.А., Васильев В.Н., Глухих В.А., Зайцев А.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Мизинцев А.В., Неженцев А.Н., Овсянников Д.А., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Филатов О.Г., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. Транспортные системы и технологии. 2016. № 2 (4). С. 43-46.
- [10] Испытания левитационного модуля с ВТСП-2 рейстрекковыми катушками в составе крупномасштабного макета для натурных исследований электродинамического подвеса Андреев Е.Н., Васильева О.С., Васильев В.Н., Дёмина А.А., Запретилина Е.Р., Ковальчук О.А., Кухтин В.П., Ланцетов А.А., Ланцетов В.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Самойлов С.К., Сафонов А.В., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. Транспортные системы и технологии. 2016. № 2 (4). С. 74-78.
- [11] В.М.Амосков, В.А.Беляков, Т.Ф.Белякова, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбикян, С.Н.Дмитриев, И.А.Иваненко, О.В.Илясов, В.А.Костырев, В.Г.Кучинский, В.П.Кухтин, М.С.Ларионов, Е.А.Ламзин, Б.П.Максимов, А.Г.Семченков, О.В.Семченкова, С.Е. Сычевский, О.Г.Филатов, А.А.Фирсов, И.М.Франко Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик магнитных материалов в широком диапазоне индукций //Препринт ОИЯИ Р13-2004-158, Дубна 2004.
- [12] В.Ю. Кирякин, В.Ш. Лежава, А.В. Новгородцева, М.В. Соколова, Л.Н. Понарин Об оценке оптимальной скорости вакуумных поездов и выборе глубины вакуума Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД» №5, 2016 С. 28-36.