

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК 629.439:621.313.282:621.318.1/.3

DOI 10.17816/transsyst20217414-32

© С. Г. Акулицкий¹, В. М. Амосков¹, Д. Н. Арсланова¹, А. А. Белов¹,
В. Н. Васильев¹, С. В. Гаврилов¹, В. В. Деомидов¹, А. А. Зайцев²,
М. В. Капаркова¹, Р. В. Коротков¹, В. П. Кухтин¹, А. Н. Лабусов¹,
Е. А. Ламзин¹, М. С. Ларионов¹, Н. А. Маханьков¹, А. Н. Неженцев¹,
Д. А. Овсянников^{3,1}, И. Ю. Родин¹, С. Е. Сычевский^{4,1}, М. В. Суханова¹,
Н. А. Шатиль¹, А. А. Шкулепа¹, А. А. Фирсов¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д. В. Ефремова»

² Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

³ Санкт-Петербургский Государственный Университет промышленных
технологий и дизайна

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет
(Санкт-Петербург, Россия)

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА ПОЛНОМАСШТАБНОГО ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ДЛЯ СИСТЕМ МАГЛЕВ

Цель: Анализ результатов измерения силовых характеристик магнита на специализированном сертифицированном стенде АО «НИИЭФА»

Материалы и методы: Измерения силовой характеристики магнита АО «НИИЭФА» со стальной пластиной проводились на сертифицированном стенде НИИЭФА с помощью испытательной машины, способной измерять усилия до 100 кН.

Результаты: Получено совпадение результатов натурального и численного моделирования с требуемой на практике точностью.

Заключение: В АО «НИИЭФА» разработан и изготовлен полномасштабный прототип серийного образца гибридного электромагнита (ГЭМ) подвеса магнитолевитационного транспортного средства. Прототип предложенного авторами ГЭМ характеризуется пониженным энергопотреблением и низким уровнем полей рассеяния. Описываемые в работе испытания ГЭМ на сертифицированном специализированном стенде АО «НИИЭФА» были нацелены на подтверждение принятых конструкционных решений и правильности результатов численного моделирования. Проведенные измерения электромагнитных сил подтвердили правильность результатов численного моделирования.

Ключевые слова: стендовые испытания, гибридный электромагнит, маглев, результаты эксперимента

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© S. G. Akulitzky¹, V. M. Amoskov¹, D. N. Arslanova¹, A. A. Belov¹,
V. N. Vasiliev¹, S. V. Gavrilov¹, V. V. Deomidov¹, A. A. Zaytzev²,
M. V. Kaparkova¹, R. V. Korotkov¹, V. P. Kukhtin¹, A. N. Labusov¹,
E. A. Lamzin¹, M. S. Larionov¹, N. A. Makhankov¹, A. N. Nezhentzev¹,
D. A. Ovsyannikov^{3,1}, I. Yu. Rodin¹, N. A. Shatil¹, A. A. Shkulepa¹,
M. V. Sukhanova¹, S. E. Sytchevsky^{4,1}, A. A. Firsov¹

¹ Joint Stock Company “NIIIEFA”

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

³ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

⁴ St. Petersburg State University
(St. Petersburg, Russia)

BENCH TESTING OF HYBRID EMS PROTOTYPE

Aim: To test the levitation performance of a hybrid EMS prototype.

Materials and Methods: a levitation test setup with a 18 mm thick steel rail was constructed on a basis of the certified test bench 1958U-10-1 for measurement in the range up to 100 kN. The attractive force was investigated by varying the air gap size and coil current. Measured data were compared with parametric simulations.

Results: Experimental and numerical results agreed with the accuracy required for practical application.

Conclusions: A prototype of hybrid EMS (HEMS) for maglev transport has been designed, built, and tested at JSC “NIIIEFA”. The HEMS concept has an advantage of reduced power loss and low stray field. The bench testing has proved good levitation performance and low power consumption of the proposed design. The measured data were used to check design solutions and verify 3D numerical models of the magnets. The comparison demonstrated a good match between measurements and simulations.

Key words: bench testing, hybrid EMS, maglev, measurement results

ВВЕДЕНИЕ

Новый вид транспорта – магнитолевитационный – использует системы активного магнитного подвеса [1]. Рассматриваемые в работе гибридные электромагниты (ГЭМ) или магниты, выполненные по гибридной технологии, содержат в магнитной цепи помимо токовой катушки высококоэрцитивные постоянные магниты (ПМ). Такие магниты обладают рядом преимуществ перед электромагнитами традиционного исполнения [2–9]. Их существенным достоинством является, например, пониженное энергопотребление. В АО «НИИЭФА» предложены варианты исполнения ГЭМ, защищенные патентами РФ [10, 11]. Оптимальная

конструкция, наряду с низким потреблением электромагнитного подвеса (ЭМП), позволяет добиться практически полного отсутствия магнитных полей рассеяния вне замкнутой магнитной цепи, что обеспечивает высокие экологические характеристики системы и ее электромагнитную совместимость.

Это дает возможность предложить реализуемую на практике технологию магнитолевитационных транспортных систем (МЛТС). На Рис. 1 схематически показано место ГЭМ в системе подвижного экипажа-и неподвижных ферромагнитных направляющих.

В процессе работ над системами магнитной левитации в АО «НИИЭФА» была разработана вычислительная технология, которая позволяет разрабатывать детальные модели различных вариантов подвесов, выполнять их анализ, синтез и оптимизацию [12–18].

Такой подход практически полностью снимает проблему «масштабирования» магнитов по отношению к разрабатываемым транспортным системам. Магнитный расчет выполняется с помощью программного комплекса КОМПРОТ [19] для 3D численной модели магнита в предположении, что магнитопровод изготовлен из стали с магнитными свойствами близкими к стали марки Ст10.

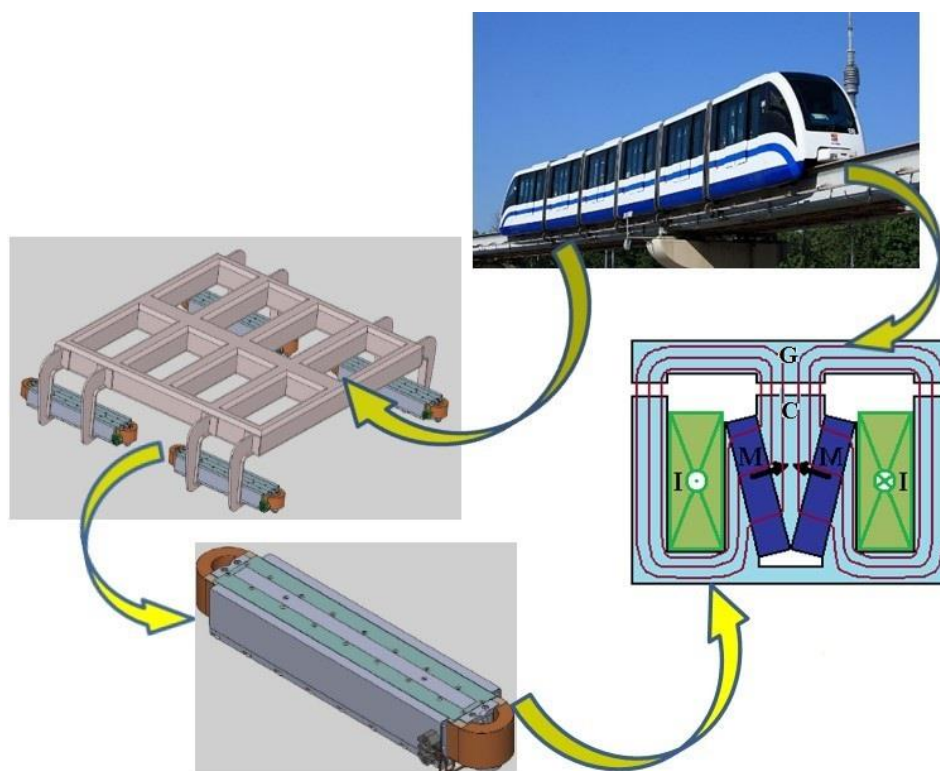


Рис. 1. Вариант российской МЛТС с ЭМП на базе ГЭМ
Состав ГЭМ: стальной магнитопровод (С), токовая катушка (I) и Nd-Fe-B ПМ
Магнитный поток движущегося ГЭМ замыкается через ферромагнитную направляющую (G), закрепляемую на путевой структуре.

Цель настоящей работы состоит в анализе результатов измерения силовых характеристик магнита на специализированном сертифицированном стенде АО «НИИЭФА» [20]. Полученные данные позволят в дальнейшем выполнить возможную необходимую модернизацию стенда, технологической и измерительной оснастки, а также методик и программ измерений для обеспечения подтверждения достоверности пространственных вычислительных моделей и выходного контроля серийных образцов ГЭМ.

ПРОТОТИП ГИБРИДНОГО МАГНИТА ДЛЯ МЛТС

В АО «НИИЭФА» разработан прототип серийного гибридного электромагнита с пониженным энергопотреблением. Параметры магнита удовлетворяют следующим требованиям: диапазон регулирования величины силы притяжения магнита к стальной пластине при зазорах 4–6 мм должен составлять 8–16 кН, габаритные размеры магнита не должны превышать значений ($D \times Ш \times В$) 650×130×150 мм.

Следует отметить, что приведенные величины параметров с методической точки зрения носят достаточно случайный характер, поскольку были продиктованы текущими интересами потенциальных потребителей магнита. Проведенная работа, однако, позволяет обобщить накопленный практический опыт создания подобных систем.

Основные технические параметры изготовленного магнита приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Параметры гибридного электромагнита АО «НИИЭФА»

Сечение токовой катушки, мм ²	1450
Коэффициент заполнения проводника медью	0,8
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	240
Проводник марки ПЭЭИП2-155, мм ²	1,12×3,55 (1,28×3,71 в изол.)
Количество витков проводника в катушке	306
Максимальный ток (стационарный), А	10
Максимальный ток (кратковременный), А	15
Индуктивность (при зазоре 5 мм), мГн	150 (I=13 А) и 300 (I=0 А)
Индуктивность (при зазоре ∞), мГн	180 (I=0 А)
Собственная индуктивность катушки, мГн	25
Сопrotивление обмотки, Ом	2
Марка постоянных Nd-Fe-B магнитов	N48SH
Размеры $D \times Ш \times В$, мм	650×130×89
Вес, Н	450

Разработанная технология может быть применена при создании линейки магнитов для подвесов магнитолевитационных транспортных систем разного назначения. Управление пондеромоторной силой

притяжения магнита к ферромагнитной пластине обеспечивается вариацией электрического тока катушки. При отсутствии тока в катушке номинальный уровень генерируемой пондеромоторной силы в 8 кН обеспечивается только постоянными магнитами. При увеличении тока в проводнике катушки от 0 до 13 А пондеромоторная сила изменяется от 8 до 16 кН.

АО «НИИЭФА» имеет большой опыт разработки разнообразных магнитов для электрофизических установок. В основе их проектирования лежит детальное численное моделирование, с последующим экспериментальным подтверждением рабочих характеристик готового изделия. При известных электрических и магнитных свойствах используемых материалов и требуемой точности описания конструкции магнитов расхождение расчетных и измеренных свойств всегда оставалось в допустимых границах, определяемых уровнем ошибок измерения.

В Табл. 2 и на Рис. 2–4 приведены результаты численного моделирования параметров магнита при разных значениях токов в катушке и величин воздушных зазоров.

Таблица 2. Расчетные значения пондеромоторной силы (кН) между магнитом и стальной пластиной для различных величин воздушных зазоров h (мм) и токов в проводнике катушки I (А)

I, A	$h, мм$				
	4	5	6	7	8
0	12,4	9,1	7,0	5,5	4,4
3	14,4	10,9	8,4	6,6	5,3
6	16,1	12,5	9,8	7,8	6,3
9	17,6	13,8	11,0	8,9	7,3
13	19,3	15,4	12,5	10,3	8,5

Для левитационных гибридных магнитов одним из оптимальных вариантов представляется тот, который создает индукцию 1 Тл в зазоре при уровне индукции в магнитопроводе около 1,7 Тл.

Противоречивые требования, сформулированные потенциальным заказчиком, в виде малых допустимых габаритных размеров магнита и диапазона регулирования величины силы приводят к тому, что стальной магнитопровод работает в области значительного магнитного насыщения, то есть индукция в нем существенно превышает оптимальный уровень значений в 1,7–1,8 Тл. В диапазоне индукций, не превышающем указанный уровень, на силовые характеристики магнита относительно слабо влияет используемая марка стали магнитопровода, поэтому ее выбор не столь существенен. В области индукций, превышающих уровень 1,8 Тл, силовые характеристики магнита заметным образом зависят от выбранной марки стали.

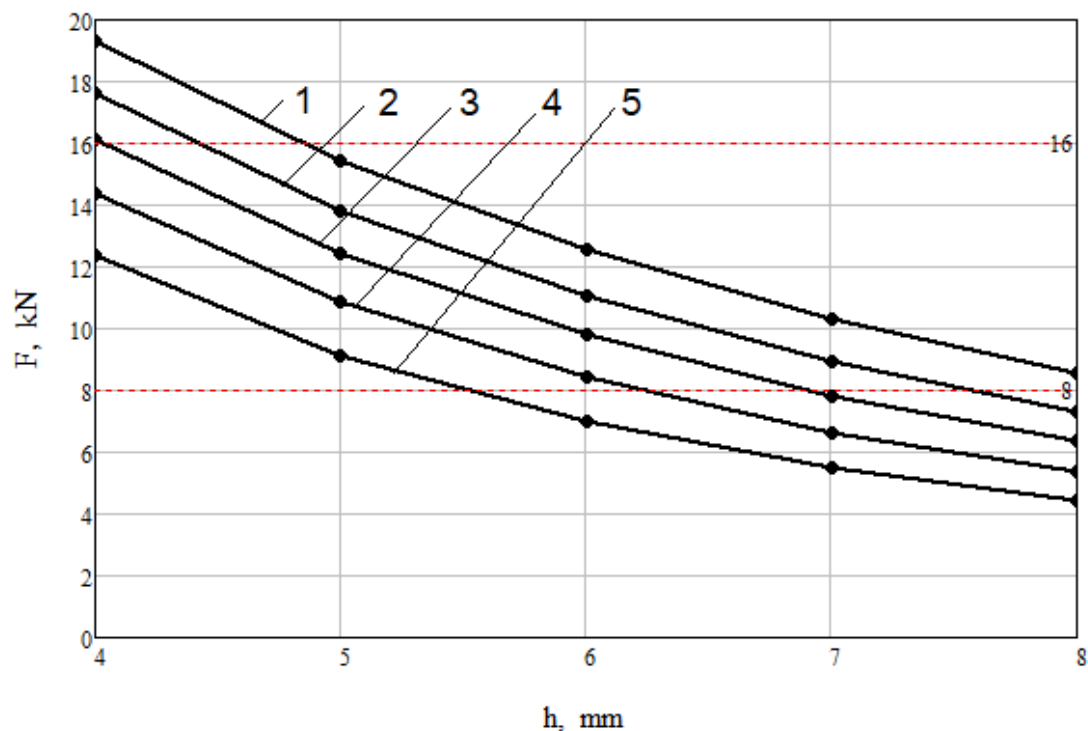


Рис. 2. Расчетная зависимость пондеромоторной силы притяжения магнита к стальной пластине от величины воздушного зазора h при различных значениях тока: 1 - $I = 13$ А, 2 - $I = 9$ А, 3 - $I = 6$ А, 4 - $I = 3$ А, 5 - $I = 0$ А

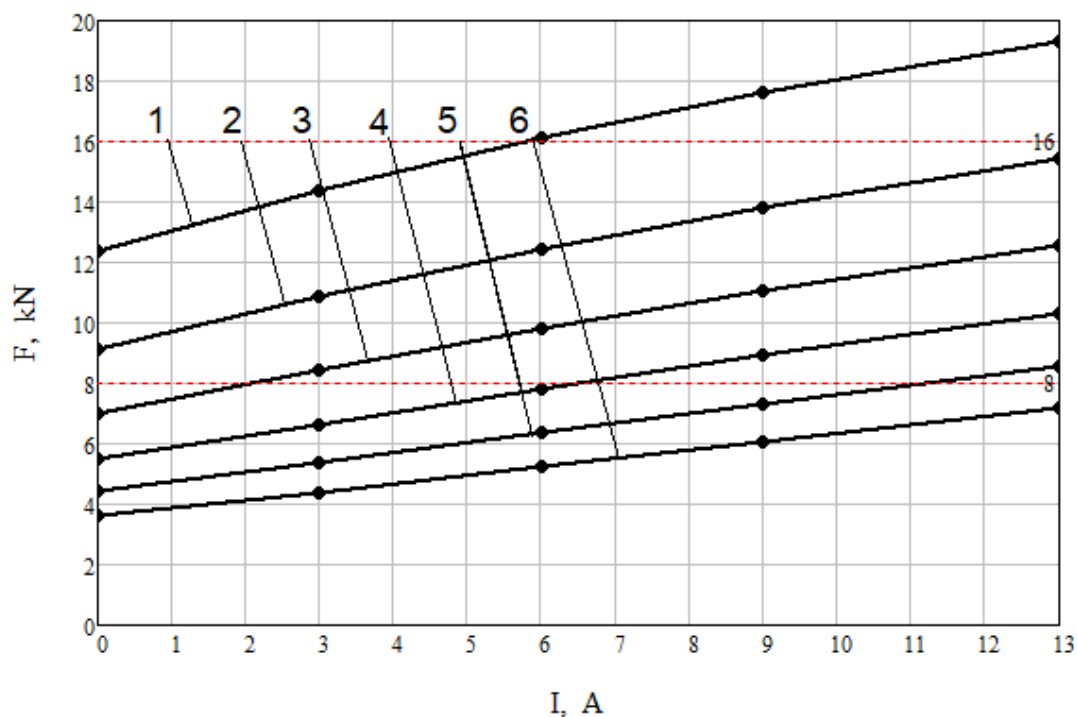


Рис. 3. Расчетная зависимость пондеромоторной силы притяжения магнита к стальной пластине от величины тока I при различных значениях воздушных зазоров: 1 - $h = 4$ мм, 2 - $h = 5$ мм, 3 - $h = 6$ мм, 4 - $h = 7$ мм, 5 - $h = 8$ мм, 6 - $h = 9$ мм

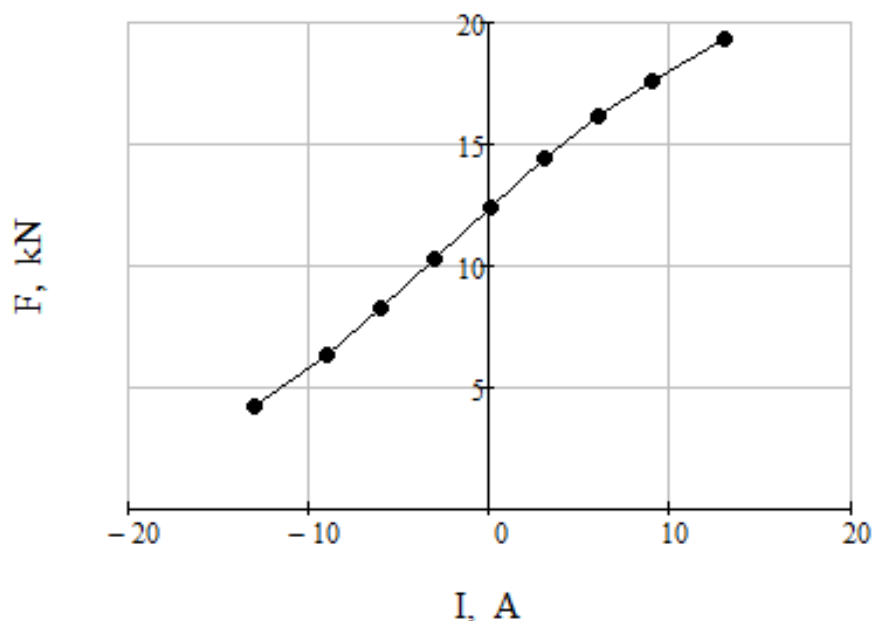


Рис. 4. Расчетная зависимость пондеромоторной силы притяжения магнита к стальной пластине от величины тока при воздушном зазоре $h = 4$ мм

В процессе механических испытаний для обеспечения механической прочности и отсутствия деформаций толщина верхней пластины ГЭМ выбиралась существенно превосходящей ту толщину (18 мм), которой достаточно для того, чтобы пропустить магнитный поток, генерируемый в магните. Дополнительно были проведены измерения с пластиной, толщина, которой была определена как оптимальная с точки зрения магнитной цепи. Полученные данные свидетельствуют о значительных деформациях этой пластины, что требует решения совместной задачи расчета электромагнитных сил и напряженно-деформированного состояния для магнитной системы подвеса как целого. Высказанная рекомендация относится как к оборудованию стенда, так и к собственно путевой структуре МЛТС. К дополнительным проблемам может приводить нагрев катушек при превышении допустимой величины вводимого тока, что, в частности, приводит к увеличению сопротивления катушки и перегреву постоянных магнитов. В итоге это вызовет смещение рабочей точки магнитов ЭМП.

ИСПЫТАНИЯ МАГНИТА

Измерения силовой характеристики магнита АО «НИИЭФА» со стальной пластиной толщиной 18 мм (определение зависимости величины пондеромоторной силы от величины зазора между полюсами магнита и параллельной полюсам стальной пластиной и от величины тока катушки) проводились на сертифицированном стенде НИИЭФА с помощью

испытательной машины 1958У-10-1 зав.№19 [20], способной измерять усилия до 100 кН. Частный и общий вид испытательной машины с установленным приспособлением, обеспечивающим плоскопараллельное перемещение испытуемого магнита относительно стальной пластины, показаны на Рис. 5–7, соответственно.



Рис. 5. Фрагмент испытательной машины со специальным приспособлением 1, закрепленном на траверсе машины 3. Магнит 2 крепится к приспособлению 1, а стальная пластина 4 – к динамометрической штанге 5

Приспособление (1) магнита (2) закрепляется на плоскости подвижной траверсы испытательной машины (3), оборудованной подъемным механизмом, с помощью которого изменяется зазор между плоскостями полюсов магнита и стальной пластины (4). Стальная пластина толщиной 18 мм крепится стационарно (неподвижно) к вертикальной штанге испытательной машины (5), соединенной с измерительным динамометром (диапазон измерения сил ± 100 кН, дискретность измерения – 10 Н). Предполагалось, что стальная пластина (4) при изменении зазора будет скользить по двум направляющим штырям приспособления (1), обеспечивающим соблюдение параллельности плоскости полюсов магнита относительно плоскости пластины (4) при вертикальном перемещении траверсы (3). На Рис. 5 приведен компоновочный вид испытательного приспособления с закрепленным магнитом и стальной пластины, вывешенной на динамометрической штанге.

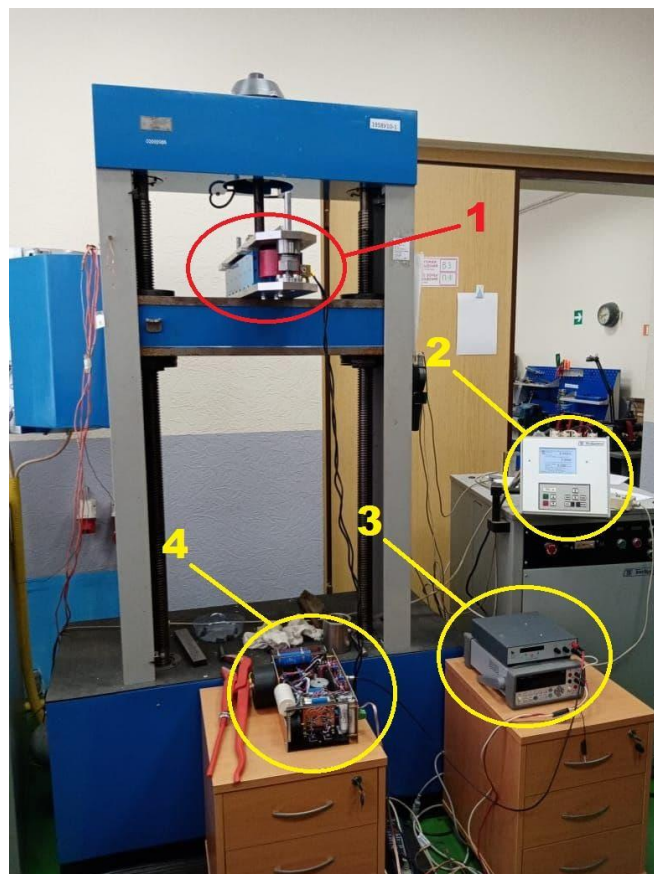


Рис. 6. Испытательный стенд АО «НИИЭФА» на базе машины 1958У-10-1

Метрологического центра ООО «Автопрогресс-М»:

- 1 – закрепленный на траверсе ГЭМ и закрепленная на штанге динамометра пластина;
- 2 – терминал управления машиной;
- 3 – блок управления источником тока ГЭМ;
- 4 – источник тока ГЭМ разработки АО «НИИЭФА»

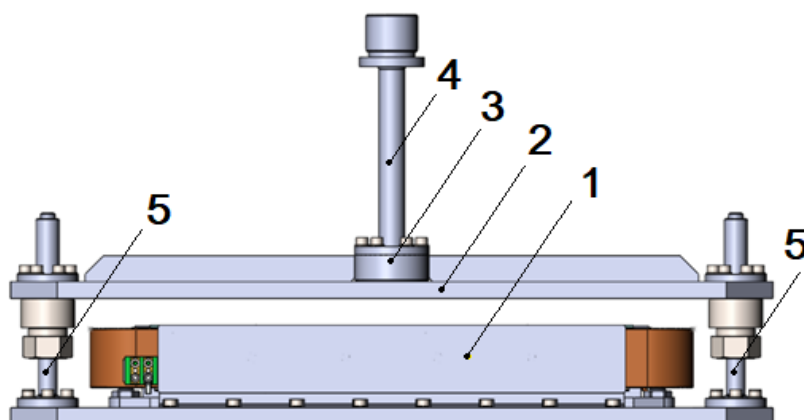


Рис. 7. Приспособление с закрепленным на нем магнитом (1) и стальная пластина (2), соединенная с помощью узла крепления (3) с динамометрической штангой (4) испытательной машины 1958У-10-1; направляющие штыри (5) приспособления служат для обеспечения лучшей параллельности относительного перемещения магнита и пластины

Зазор между плоскостью полюсов магнита и параллельной ей плоскостью стальной пластины выставлялся с помощью набора калиброванных дистанеров известной высоты. В измерениях использовались немагнитные дистанеры с высотами 4, 5, 6, 7, 8 мм. Четыре дистанера выбранного калибра устанавливались на плоскости полюсов магнита в углах. С помощью подвижной траверсы испытательной машины магнит сближался со стальной пластиной до момента касания ее тремя дистанерами. Поскольку параллельность плоскости полюсов магнита и плоскости пластины не абсолютна, то при их сближении касание дистанерами поверхности пластины происходит не одновременно, а в некоторой последовательности. Непараллельность (относительный наклон) изначально присутствует из-за естественных неточностей изготовления конструкции и узла крепления стальной пластины к динамометрической штанге. Это порождает неоднородный характер продольного распределения пондеромоторных сил в пластине.

При сближении магнита с пластиной возрастают пондеромоторные силы, приводящие к увеличению упругих деформаций, как в узле крепления так и в самой пластине, вследствие чего исходный угол наклона будет только расти. На рисунке 8, для наглядности, показаны характерные фазы взаимодействия магнита с пластиной при их сближении. Наклон и характер распределение плотности пондеромоторных сил вдоль пластины (Рис. 8а, б) связан с обратной зависимостью пондеромоторной силы от локальной величины зазора.

При приближении магнита к стальной пластине интегральная пондеромоторная сила, тянущая ее вниз, монотонно увеличивается, что фиксирует измеряющий динамометр. После первого касания поверхности стальной пластины одним из дистанеров в кривой характера показаний динамометра проявляется «излом», вызванный реакцией опоры от первого коснувшегося дистанера. Угол наклона пластины относительно магнита в этот момент будет максимальным. Дальнейшее сближение пластины и магнита будет приводить к росту реакции опоры, дальнейшему увеличению интегральной пондеромоторной силы и снижению относительного угла наклона пластины вплоть до момента касания пластины остальными дистанерами (Рис. 8в). В этот момент сумма реакций опор контактирующих дистанеров сравняется с интегральной пондеромоторной силой и динамометр, связанный с пластиной, покажет ноль действующей на пластину и на него силы. Дальнейшая попытка подъема траверсы с магнитом приводит к росту реакций опор без изменения пондеромоторной силы и изменению знака измеряемой динамометром силы.

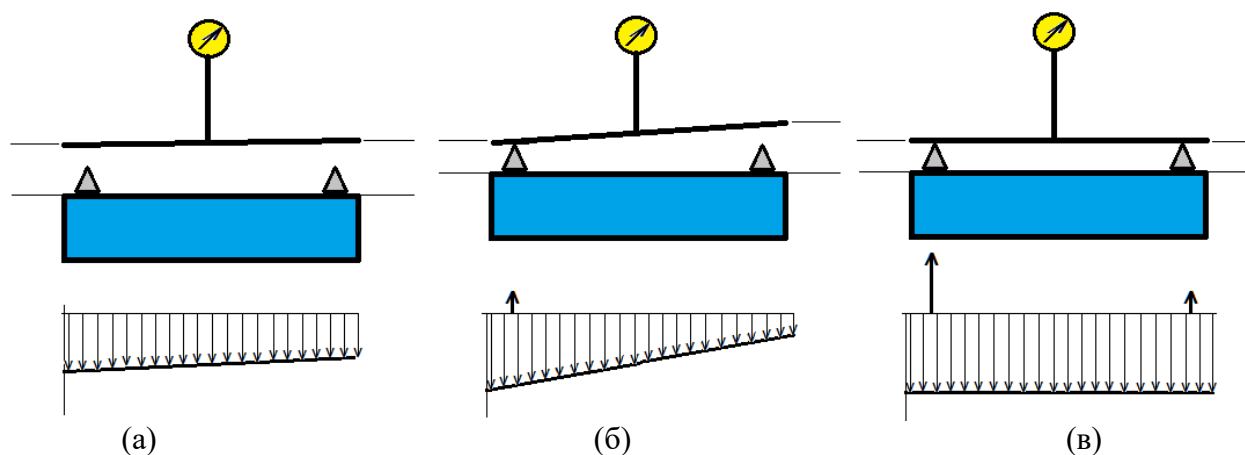


Рис. 8. Взаимодействие магнита и стальной пластины при сближении. Эпюры отражают изменения в распределении пондеромоторных сил вдоль пластины на разных этапах сближения ее и магнита.

(а) – неоднородность распределения пондеромоторных сил вследствие наклона и изгиба пластины; (б) – появление реакции опоры; (в) – под действием реакций опор пластина выставляется параллельно полюсам, пондеромоторные силы распределены равномерно

При обратном движении траверсы с закрепленным магнитом вниз (в сторону увеличение зазора) наблюдается «гистерезис» в характере изменения угла наклона пластины и пондеромоторных сил. «Отрыв» последнего дистанера может происходить при меньшем угле наклона, чем тот который был в момент касания при подъеме траверсы. Наличие такого гистерезисного проявления в угле наклона пластины при касании ее дистанером и при отрыве было подтверждено косвенными измерениями с помощью штангенциркуля.

Фиксация силы соответствующей высоте дистанера производилась по моменту ее отрыва от пластины. Момент отрыва определялся по характерному максимуму силы, наблюдаемому при опускании траверсы. При сравнении вариантов с параллельным и не параллельным относительным расположением плоскостей пластины и полюсов магнита (углы наклона $< 0,3$ град) следует отметить, что интегральная пондеромоторная сила в обоих случаях будет одинакова, если фиксированный зазор в первом случае будет равен средней величине зазора во втором случае. Таким образом, хотя и использовались калиброванные дистанеры, истинные величины зазоров отличались от них в большую сторону.

На Рис. 9, для сравнения, приведены результаты электромагнитных расчетов и натурных измерений сил притяжения пластины к магниту, выполненных в АО «НИИЭФА».

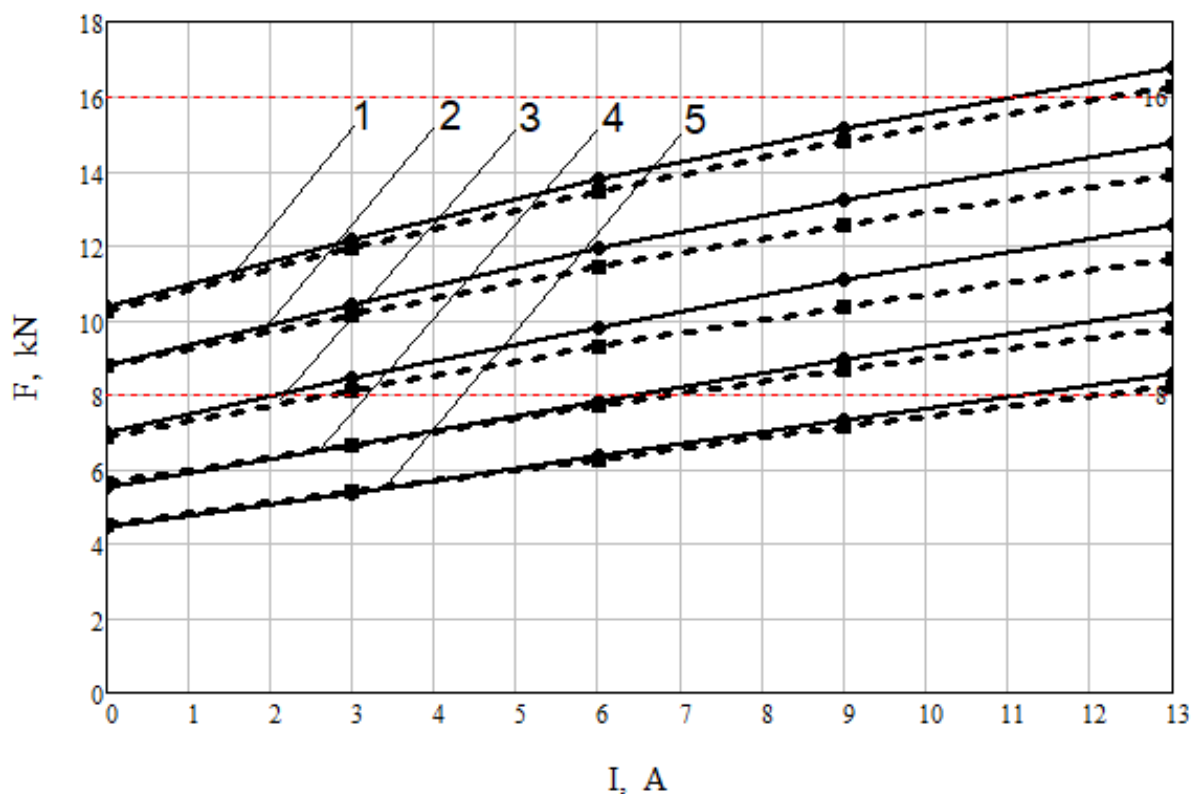


Рис. 9. Сравнение величин пондеромоторной силы гибридного магнита АО «НИИЭФА», полученных методом математического моделирования (сплошные линии) и прямыми физическими измерениями с помощью испытательной машины 1958V-10-1 (штриховые линии) для стальной пластины толщиной 18 мм при разных зазорах:
1 – $h = 4.6$ мм, 2 – $h = 5.2$ мм, 3 – $h = 6$ мм, 4 – $h = 7$ мм, 5 – $h = 8$ мм
Точками отмечены фиксированные в эксперименте значения токов

Отличие измеренных и рассчитанных величин пондеромоторных сил разниться не более чем на 7 %. Расхождение между измеренными и рассчитанными величинами, наблюдаемое при нарастании тока, связано с соответствующим увеличением пондеромоторной силы, которая приводит к росту деформации пластины и, следовательно, к увеличению отклонения среднего зазора от высоты дистанера.

На Рис. 10 приведены для сравнения результаты электромагнитных расчетов и физических измерений нормальной к плоскости полюсов магнита компоненты индукции, выполненные в поперечном сечении $z = 0$ магнита на высоте 0,4 мм от поверхности полюсов в отсутствии стальной пластины (одиночно стоящий магнит).

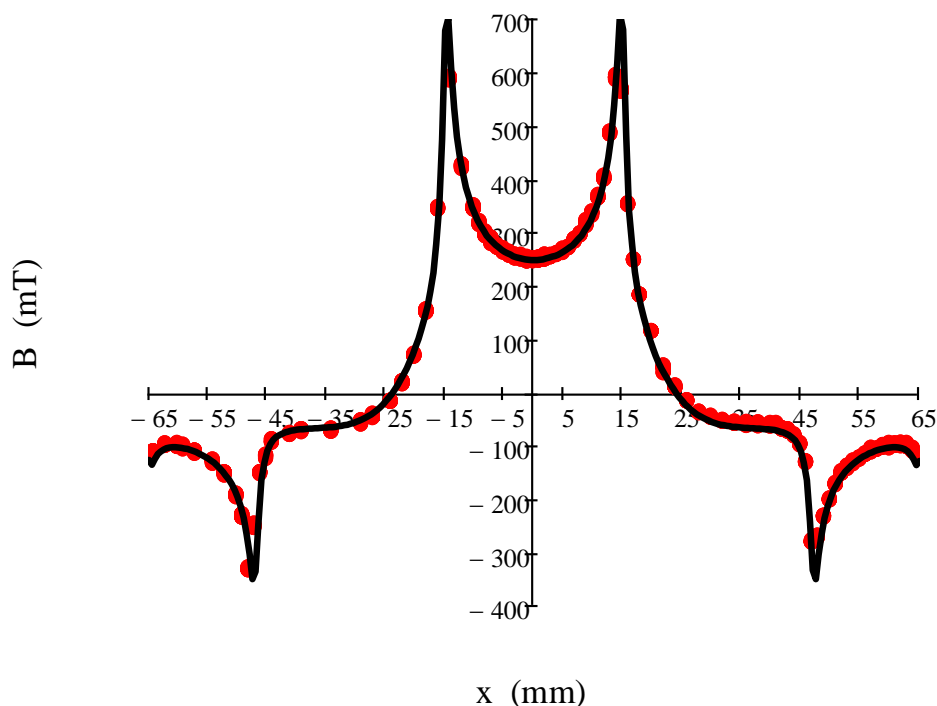


Рис. 10. Вертикальная (нормальная к плоскости полюсов) компонента индукции измеренная (точки) и рассчитанная (линия) на высоте $y = 0,4$ мм от плоскости полюсов в сечении $z = 0$

ВЫВОДЫ

В АО «НИИЭФА» разработан и изготовлен полномасштабный прототип серийного образца гибридного электромагнита подвеса МЛТС. Прототип демонстрирует характерное для ГЭМ пониженное энергопотребление и подтверждает правильность предложенной авторами схемы магнитной системы, отличающейся низким уровнем полей рассеяния.

Измерения электромагнитных сил, создаваемых ГЭМ, проведены на сертифицированном специализированном стенде АО «НИИЭФА». Получено совпадение результатов натурного и численного моделирования с требуемой на практике точностью.

На основании выполненных работ будут подготовлены рекомендации по модернизации стенда, измерительной и технологической оснастки, методике и программе измерений, процедуре выходного контроля серийных магнитов.

Натурный эксперимент продемонстрировал необходимость решения совместной задачи для моделирования электромагнитного поля, пондеромоторных сил, напряженно-деформированного и теплового состояния всей магнитной системы подвеса, включая собственно ГЭМ, устанавливаемые на экипаже, и путевую структуру в виде ферромагнитной направляющей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда Академика Василия Андреевича Глухих.

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. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с. [Zhuravljov JuN. Aktivnye magnitnye podshipniki. Teoriya, raschyot, primeneniye. SPb: Politehnika, 2003. 206 s. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: https://www.studmed.ru/zhuravlev-yun-aktivnye-magnitnye-podshipniki-teoriya-raschet-primeneniye-2003_ae0c7437419.html
2. Tzeng YK, Wang TC. Optimal design of the electromagnetic levitation with permanent and electro magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1994;30(6):4731-733. doi: 10.1109/20.334204
3. Onuki T, Toda Y. Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1993;29(2):1783-1786. doi: 10.1109/20.250751
4. Kim K, Han H, Kim C, Yang S. Dynamic Analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2013;8(6):1571-1578. doi: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571
5. Kim C-H, Cho H-W, Lee J-M, et al. Zero-power control of magnetic levitation vehicles with permanent magnets. *ICCAS 2010: Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*; 2010 Oct 27-30; Gyeonggi-do, Korea (South). 2010. p. 732-735. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5670118
6. Safaei F, Suratgar AA, Afshar A, et al. Characteristics Optimization of the Maglev Train Hybrid Suspension System Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1163-1170. doi: 10.1109/tec.2014.2388155
7. Erkan K, Okur B, Koseki T, et al. Experimental evaluation of zero-power levitation control by transfer function approach for a 4-pole hybrid electromagnet. In: *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*; 2011 April 13-15; Istanbul, Turkey. 2011. p. 23-28, doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971299
8. Morishita M, Azukizawa T, Kanda S, et al. A new MAGLEV system for magnetically levitated carrier system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1989;38(4):230-236. doi: 10.1109/25.45486
9. Wang TC, Tzeng YK. A new electromagnetic levitation system for rapid transit and high speed transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994;30(6):4734-4736. doi: 10.1109/20.334205
10. Патент РФ на изобретение № RU2739939/ 30.12.2020. Бюл. № 1. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю.,

- Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный электромагнит для системы маглев». [Pat. RUS № RU2739939/ 30.12.2020. Byul. № 1. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. "Gibridnyj jelektromagnit dlya sistemy maglev". (In Russ.)]. Дата обращения: 27.10.2021. Режим доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2739939C1>
11. Патент РФ на изобретение № RU2743753/ 25.02.2021. Бюл. № 6. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный магнит без полей рассеяния для системы маглев». [Pat. RUS № RU2743753/ 25.02.2021. Byul. № 6. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. "Gibridnyj magnit bez poley rassejaniya dlya sistemy maglev". (In Russ.)]. Дата обращения: 27.10.2021. Режим доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2743753C1>
 12. Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Simulation of electrodynamic suspension systems for levitating vehicles. I. Modelling of electromagnetic behaviour of maglev vehicles with electrodynamic suspension. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes.* 2014;4:5-15.
 13. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Базаров А.М. и др. Численное моделирование электродинамических подвесов левитационных транспортных систем. II. Верификация вычислительных моделей // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2015. – Сер. 10. – Вып. 2. – С. 18-32. [Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Simulation of electrodynamic suspension systems for levitating vehicles. II. Validation of computational models. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes.* 2015;2:18-32. (In Russ.)].
 14. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Базаров А.М. и др. Численное моделирование электродинамических подвесов левитационных транспортных систем. III. ЭДП с непрерывной путевой структурой // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2015. – Сер. 10. – Вып. 3. – С. 4–21. [Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Simulation of electrodynamic suspension systems for levitating vehicles. III. Continuous track systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes.* 2015;3:4-21. (In Russ.)].
 15. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Базаров А.М. и др. Численное моделирование электродинамических подвесов левитационных транспортных систем. IV. ЭДП с дискретной путевой структурой // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2016. – Сер. 10. – Вып. 3. – С. 4–17. [Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Simulation of electrodynamic suspension systems for levitating vehicles. IV. Discrete track systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes.* 2016;3:4-17 (In Russ.)]. doi: 10.21638/11701/spbu10.2016.301
 16. Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Simulations of maglev EDS performance with detailed numerical models. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series Applied mathematics. Computer science. Control processes.* 2018;14(4):286-301. doi: 10.21638/11702/spbu10.2018.402
 17. Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Modeling EMS maglev systems to develop control algorithms. *Cybernetics and physics.* 2018;7(1):11-17. doi: 10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17

18. Andreev EN, Arslanova DN, Akhmetzyanova EV, et al. Combined electromagnetic suspensions with reduced energy consumption for levitation vehicles. *Technical Physics*. 2019;64(7):1060-1065. doi: 10.1134/S1063784219070041
19. Amoskov VM, Belov AV, Belyakov VA, et al. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. *Plasma Devices and Operations*. 2008;16(2):89-103. doi: 10.1080/10519990802018023
20. Суханова М.В., Гаврилов С.В., Акулицкий С.Г. и др. Механические испытания электрической изоляции катушки PF 1 при температуре 77K // Тезисы докладов III Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015. 25-26 ноября 2015; НИЦ «Курчатовский институт», Москва: Курчатовский ин-т, 2015. – 127 с. [Suhanova MV, Gavrilov SV, Akulickij SG, et al. Mehanicheskie ispytaniya jelektricheskoy izoljacji katushki PF 1 pri temperature 77K. In: Tezisy dokladov III Nacional'noj konferencii po prikladnoj sverhprovodimosti NKPS-2015. 2015 Nov 25-26, Moscow, Kurchatov Inst. Moscow: NRCKI; 2015. p.127 (In Russ.)].

Сведения об авторах:**Акулицкий Сергей Георгиевич;**

eLibrary SPIN: 1738-3510; ORCID: 0000-0001-8659-2243;

E-mail: akulickiy@sintez.niiefa.spb.su

Амосков Виктор Михайлович, к.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116;

Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

Арсланова Дарья Николаевна, магистр;

eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X;

Scopus ID: 55314279800;

E-mail: arslanova-sci@yandex.ru

Белов Андрей Александрович, магистр;

ORCID: 0000-0001-7040-6741;

E-mail: avm@sintez.niiefa.spb.su

Васильев Вячеслав Николаевич;

eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274;

Scopus ID: 7005989574;

E-mail: vvm@mail.ru

Гаврилов Сергей Васильевич;

ORCID: 0000-0002-8886-6989;

E-mail: gavrilovsv@sintez.niiefa.spb.su

Деомидов Валерий Викторович, магистр;

ORCID: 0000-0003-2795-8342;

E-mail: deomidov@icloud.com

Зайцев Анатолий Александрович, д.э.н.;

eLibrary SPIN: 9477-4316; ORCID: 0000-0002-1342-8036;

Scopus ID: 57199509604;

E-mail: nocpp@pgups.ru

Капаркова Марина Викторовна;

eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581;

Scopus ID: 12445243900;

E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru

Коротков Роман Владимирович; магистр;
eLibrary SPIN: 6137-1024 ORCID: 0000-0001-6161-7184

E-mail: roman.korotkov@sintez.niiefa.spb.su

Кухтин Владимир Петрович, к.ф.-м.н.;
eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141;
Scopus ID: 35353250700;

E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru

Лабусов Алексей Николаевич, к.ф.-м.н.;
eLibrary SPIN: 4734-7358; ORCID: 0000-0003-2264-677X;

E-mail: labusov@sintez.niiefa.spb.su

Ламзин Евгений Анатольевич, д.ф.-м.н.;
eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711;
Scopus ID: 12756829300;

E-mail: lamzin-sci@yandex.ru

Ларионов Михаил Сергеевич;
ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;

E-mail: larionov-sci@yandex.ru

Маханьков Николай Алексеевич, магистр;
eLibrary SPIN: 2463-8007; ORCID: 0000-0002-9264-0296;
E-mail: makhankovna@sintez.niiefa.spb.su

Неженцев Андрей Николаевич;
eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211;
Scopus ID: 57201374326;

E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru

Овсянников Дмитрий Александрович, магистр;
eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494

E-mail: d-ovs@yandex.ru

Родин Игорь Юрьевич, к.ф.-м.н.;
eLibrary SPIN: 4935-6473; ScopusID: 7005063976;

E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

Сычевский Сергей Евгеньевич, д.ф.-м.н.;
eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015;
Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

Суханова Мария Владимировна, к.т.н.;
ORCID: 0000-0001-9449-8708; ScopusID: 7003295498;

E-mail: suhanova@sintez.niiefa.spb.su

Шатиль Николай Александрович, к.т.н.;
eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X;
Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

Шкулепа Александр Анатольевич;
ORCID: 0000-0002-3450-6662;

E-mail: shkulepa@sintez.niiefa.spb.su

Фирсов Алексей Анатольевич;
eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717;
Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

Information about the authors:**Sergey G. Akulitzky,**

eLibrary SPIN: 1738-3510; ORCID: 0000-0001-8659-2243;

E-mail: akulitckiy@sintez.niiefa.spb.su

Victor M. Amoskov, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116;

Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

Darya N. Arslanova, MSc;

eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X;

Scopus ID: 55314279800;

E-mail: arslanova-sci@yandex.ru

Andrei A. Belov, MSc;

ORCID: 0000-0001-7040-6741;

E-mail: avm@sintez.niiefa.spb.su

Vyacheslav N. Vasiliev, MSc;

eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274;

Scopus ID: 7005989574;

E-mail: vvnm@mail.ru

Sergey V. Gavrilov;

ORCID: 0000-0002-8886-6989;

E-mail: gavrilovsv@sintez.niiefa.spb.su

Valery V. Deomidov, MSc;

ORCID: 0000-0003-2795-8342 ;

E-mail: deomidov@icloud.com

Anatoly A. Zaytzev, PhD, DSc in Economics;

eLibrary SPIN: 9477-4316 ORCID: 0000-0002-1342-8036;

Scopus ID: 57199509604;

E-mail: nocpp@pgups.ru

Marina V. Kaparkova, MSc;

eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581;

Scopus ID: 12445243900;

E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru

Roman V. Korotkov, MSc;

eLibrary SPIN: 6137-1024 ORCID: 0000-0001-6161-7184

E-mail: roman.korotkov@sintez.niiefa.spb.su

Vladimir P. Kukhtin, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141;

Scopus ID: 35353250700;

E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru

Alexey N. Labusov, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 4734-7358; ORCID: 0000-0003-2264-677X;

E-mail: labusov@sintez.niiefa.spb.su

Evgeny A. Lamzin, PhD, DSc in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711;

Scopus ID: 12756829300;

E-mail: lamzin-sci@yandex.ru

Mikhail S. Larionov, MSc;

ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;

E-mail: larionov-sci@yandex.ru

Nicolai A. Makhankov, MSc;

eLibrary SPIN: 2463-8007; ORCID: 0000-0002-9264-0296;

E-mail: makhankovna@sintez.niiefa.spb.su

Andrey N. Nezhentzev, MSc;

eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211;

Scopus ID: 57201374326;

E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru

Dmitry A. Ovsyannikov, MSc;

eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494

E-mail: d-ovs@yandex.ru

Igor Yu. Rodin, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 4935-6473; Scopus ID: 7005063976;

E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

Nicolai A. Shatil, MSc, PhD in Engineering;

eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X;

Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

Alexander A. Shkulepa;

ORCID: 0000-0002-3450-6662;

E-mail: shkulepa@sintez.niiefa.spb.su

Maria V. Sukhanova, PhD in Engineering;

ORCID: 0000-0001-9449-8708; Scopus ID: 7003295498;

E-mail: suhanova@sintez.niiefa.spb.su

Sergey E. Sytchevsky, DSc in Physics and Mathematics, Full Professor;

eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015;

Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

Alexey A. Firsov, MSc;

eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717;

Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

Цитировать:

Акулицкий С.Г., Амосков В.М., Арсланова Д.Н. и др. Результаты стендовых испытаний прототипа полномасштабного гибридного электромагнита для систем маглев // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 14–32. doi: 10.17816/transsyst20207414-32

To cite this article:

Akulitzky SG, Amoskov VM, Arslanova DN, et al. Bench testing of hybrid EMS prototype. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):14-32. doi: 10.17816/transsyst20217414-32