

## КРУПНОМАСШТАБНЫЙ МАКЕТ ДЛЯ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА ГРУЗОВОГО ЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

**В. М. Амосков<sup>1</sup>, Е. Н. Андреев<sup>1</sup>, Д. Н. Арсланова<sup>1</sup>,  
В. А. Беляков<sup>1,3</sup>, В. Н. Васильев<sup>1</sup>, В. Ф. Волков<sup>1</sup>,  
А. А. Дёмина<sup>1</sup>, Е. Р. Запретилина<sup>1</sup>, В. П. Кухтин<sup>1</sup>,  
Е. А. Ламзин<sup>1</sup>, А. А. Ланцетов<sup>1</sup>, В. А. Ланцетов<sup>1</sup>,  
М. С. Ларионов<sup>1</sup>, А. В. Мизинцев<sup>2</sup>, В. М. Михайлов<sup>1</sup>,  
А. Н. Неженцев<sup>1</sup>, И. Ю. Родин<sup>1</sup>, Т. А. Савельева<sup>1</sup>,  
С. Е. Сычевский<sup>1,3</sup>, А. А. Фирсов<sup>1</sup>, П. Ю. Чайка<sup>1</sup>,  
К. А. Шарков<sup>1</sup>, Н. А. Шатиль<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (Санкт-Петербург, Россия),

<sup>2</sup> – ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (Санкт-Петербург, Россия)

<sup>3</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

## MAGLEV DUMMY FOR EXPERIMENTAL CHECK OF ELECTRODYNAMIC SUSPENSION PERFORMANCE

**V. M. Amoskov<sup>1</sup>, E. N. Andreev<sup>1</sup>, D. N. Arslanova<sup>1</sup>,  
V. A. Belyakov<sup>1,3</sup>, P. Yu. Chaika<sup>1</sup>, A. A. Dyomina<sup>1</sup>,  
A. A. Firsov<sup>1</sup>, V. P. Kukhtin<sup>1</sup>, E. A. Lamzin<sup>1</sup>, A. A. Lantzetov<sup>1</sup>,  
V. A. Lantzetov<sup>1</sup>, M. S. Larionov<sup>1</sup>, V. M. Mikhailov<sup>1</sup>,  
A. V. Mizintzev<sup>2</sup>, A. N. Nezhentzev<sup>1</sup>, I. Yu. Rodin<sup>1</sup>,  
T. A. Savelieva<sup>1</sup>, S. E. Sytchevsky<sup>1,3</sup>, K. A. Sharkov<sup>1</sup>,  
N. A. Shatil<sup>1</sup>, V. N. Vasiliev<sup>1</sup>, V. F. Volkov<sup>1</sup>, E. R. Zapretilina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – Joint Stock Company “D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus”

<sup>2</sup> – NIEFA-ENERGO Ltd

<sup>3</sup> – Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

В АО «НИИЭФА» при поддержке ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» создан специальный макет для испытаний элементов электродинамического подвеса (ЭДП), на котором выполнено исследование системы электромагнитных сил, соответствующей состоянию подвеса, скорость движения которого асимптотически приближается к максимальной.

Предложенная авторами вычислительная технология в принципе позволяет рассчитать детальные пространственные и временные распределения вихревых токов, полей и пондеромоторных сил, необходимые для оптимального про-

ектирования подвеса. Методики и вычислительные модели были верифицированы ранее с использованием опубликованных данных о крупномасштабном натурном эксперименте в Лоуренсовской национальной лаборатории в Ливерморе (LLNL, США). Однако, величины скорости в экспериментах были ограничены сравнительно невысокими значениями до 10 м/с.

Интерес представляет и другой предельный случай - максимальной скорости движения подвеса. Сила левитации монотонно увеличивается с ростом скорости и асимптотически стремится к предельному значению, которое индивидуально для каждой конкретной реализации ЭДП и определяется в результате численного решения нестационарной задачи Коши о распределении вихревых токов. Это же предельное значение силы может быть найдено и как решение соответствующей магнитостатической задачи с использованием метода зеркальных изображений в системе двух покоящихся источников магнитного поля (ИП), расположенных симметрично относительно бесконечной плоскости. Первый ИП идентичен источнику ЭДП, второй - является изображением первого. Распределение сил, действующих на первый ИП, эквивалентно силам в системе из идеально проводящей бесконечно тонкой пластины в плоскости зеркального отражения и первого ИП, движущимся в плоскости, компланарной плоскости отражения. Вихревые токи, индуцируемые в идеально проводящей пластине ИП, который движется с конечной скоростью, эквивалентны токам в пластине с конечной проводимостью, которые создаются этим источником, движущимся с бесконечной скоростью. Таким образом, для точных измерений и анализа системы электромагнитных сил в ЭДП, движущегося с предельными скоростями, может быть использована статическая система измерения эквивалентных ИП. В качестве ИП были использованы постоянные магниты (ПМ) в виде стандартных изделий - кейсов (крупномасштабных блоков ПМ).

Одна из основных целей работы заключалась в проверке работоспособности сверхпроводящих (ВТСП-2) катушек в магнитных полях, эквивалентных полям в реальных ЭДП, и верификации детальных вычислительных моделей ЭДП. Предложенная концепция макета, являющегося по сути полномасштабным, но с ограниченными функциями, представляется наиболее практичной в ситуации, когда с помощью эксперимента необходимо лишь верифицировать вычислительную модель, которая в свою очередь обеспечивает расчёт всех интересующих параметров подвеса. Такой подход позволил существенно (в сотни раз) уменьшить стоимость макета по сравнению с аналогичными крупномасштабными лабораторными демонстрационно-испытательными макетами, на которых проводятся попытки исследования сил путём прямых измерений. При этом на описываемом макете достигнуты большие величины левитационных зазоров и диапазоны перемещения вдоль путевой структуры, что, впрочем, совершенно не являлось целью работы. Следует подчеркнуть, что т.н. «подвесы», построенные по принципу отталкивания полюсов постоянных магнитов, установленных друг напротив друга, лишь имитируют предельное состояние ЭДП для частного случая бесконечно высоких скоростей; другого существенного практического приложения такие неустойчивые системы для целей магнитной левитации не имеют.

Выбор параметров макета был обусловлен компромиссом между противоречивыми факторами различной природы. Во-первых, плотности индукции магнитного поля, электромагнитных сил и магнитной энергии, величина левитационного зазора в макете близки к аналогичным значениям в реальной левитационной системе. Поэтому можно рассматривать макет как полномасштабную установку для моделирования элементов подвеса, отработки и испытания систем измерений, сбора и накопления информации. Во-вторых, геометрические размеры левитирующей платформы макета совпадают с размерами тележки – основного (базового) элемента магнито-левитационной платформы. Это позволяет проанализировать сформулированные ранее требования к системе допусков ЭДП. В-третьих, исследовалась возможность применения разработанной в АО «НИИЭФА» технологии изготовления кейсов (ПМ из Nd Fe В) для производства магнито-левитационных систем. На начальном этапе после численного анализа с целью сокращения затрат были использованы стандартные кейсы. Отрабатывалась методика монтажа/демонтажа элементов систем подвеса на базе кейсов. В-четвёртых, левитация осуществлялась практически непрерывно в течение 15 месяцев. Предполагается использование макета для длительного тестирования элементов оборудования, отработки методики оценки их долговечности и работоспособности, исследования электромагнитной совместимости подсистем ЭДП. В-пятых, распределение магнитного поля в макетируемых элементах ЭДП топологически эквивалентно распределениям в системах, основанных как на ПМ, так и на СП магнитах. Испытаны элементы систем левитации на основе ВТСП.

Макет состоит (см. рис. 1) из неподвижной путевой структуры, подвижной левитирующей части, измерительной части и вспомогательного оборудования. Неподвижная путевая структура образована поперечными опорами, продольными опорными направляющими, специальным профилем для организации перемещения направляющей тележки, кейсами. К основным узлам подвижной левитирующей части относится платформа направляющей тележки с колёсиками, реактивная телескопическая штанга, собственно левитирующая платформа с установленными на ней кейсами. Измерительная часть содержит, в частности, динамометры и датчики для измерения левитационного зазора. Вспомогательное оборудование содержит механизм перемещения и фиксации левитирующей платформы с направляющей тележкой по профилю, механизм точной компенсации бокового смещения левитирующей платформы, механизм компенсации свободного хода динамометра. Такая конструкция допускает перемещение левитирующей платформы в продольном (ось X) и вертикальном (ось Z) направлениях при любом угле её наклона относительно путевой структуры. При этом конструктивно ограничивается возможность перемещения левитирующей платформы в поперечном (боковом) направлении. Путевая структура образована кейсами, уложенными в горизонтальной плоскости  $Z=0$  друг за другом в направлении движения (вдоль оси X). Между состыкованными сборками постоянных магнитов соседних кейсов образуется зазор 78 мм (вдоль X) за счёт немагнитного стального каркаса.

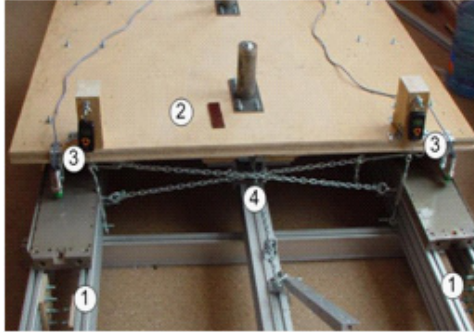


Рис. 1. Основные части макета:

1 – неподвижная путевая часть, 2 – подвижная левитирующая часть,  
3 – измерительная структура, 4 – вспомогательное оборудование.

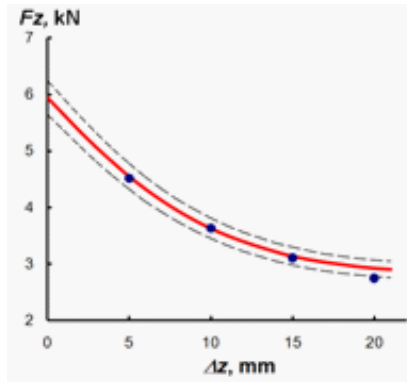


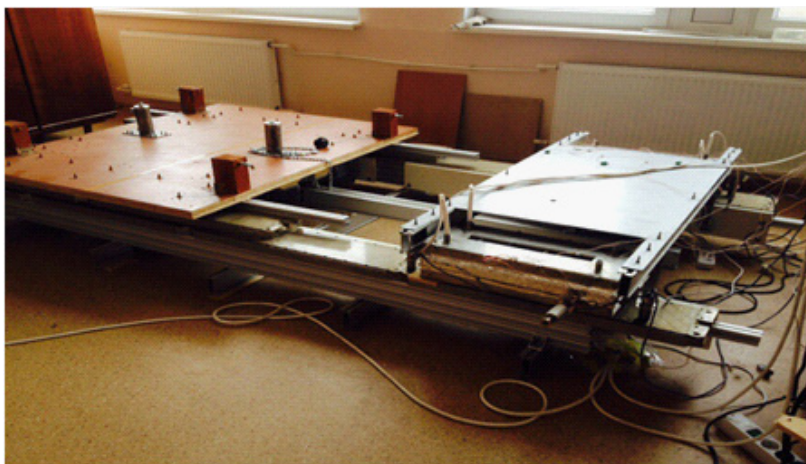
Рис. 2. Вертикальная сила от левитационного зазора  $\Delta z$ :  
сплошная линия – расчёт, точки – измерения, размер точки определяется  
разбросом данных, штрихи выделяют диапазон  $\pm 5\%$ .

Наличие зазора обуславливает сложный характер силового взаимодействия кейсов, закреплённых на платформе, с кейсами на путевой структуре при их различных взаимных положениях вдоль оси X. Зазор позволяет имитировать влияние реальных конструктивных зазоров, в частности, направляющих стрелок.

Данные предварительных расчётов для различных положений платформы хорошо совпали с измерениями (см. рис. 2). Для «центрального» положения платформы на каждый из кейсов платформы действует интегральная сила, вертикальная компонента которой значительно превышает две другие компоненты. Боковое смещение устранялось с помощью механизма точной компенсации. Равнодействующая вертикальных сил в системе параллельных сил в каж-

дом фиксированном положении зора определялась как сумма показаний динамометров, веса пустой платформы с кейсами и крепёжной арматурой (заранее измерен с точностью 1%) и веса помещённого на неё груза.

Измерение силы производилось с помощью динамометров, погрешность менее 0.1%. Для контроля фиксации платформы относительно пути использовались калиброванные прокладки и щупы. Относительная ошибка измерений оценивалась величиной 2-3%. Отклонение величин рассчитанных и измеренных сил не превышает  $\pm 5\%$ , причём максимальная оценка ошибки соответствует минимальным абсолютным значениям сил.



*Рис. 3. Внешний вид ВТСП-2 модуля в составе крупномасштабного макета для натурных исследований элементов электродинамического подвеса.*

Испытаны элементы ЭДП в виде ВТСП-2 рейстровых катушек в азотных криостатах объединённых в модуль магнитной системы (см. рис. 3).

**Сведения об авторах:**

Амосков Виктор Михайлович, [avm@sintez.niiefa.spb.su](mailto:avm@sintez.niiefa.spb.su)  
Андреев Евгений Николаевич [andreev@sintez.niiefa.spb.su](mailto:andreev@sintez.niiefa.spb.su)  
Арсланова Дарья Николаевна, [arslanova@sintez.niiefa.spb.su](mailto:arslanova@sintez.niiefa.spb.su)  
Беляков Валерий Аркадьевич, [belyakov@niiefa.spb.su](mailto:belyakov@niiefa.spb.su)  
Васильев Вячеслав Николаевич, [vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su](mailto:vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su)  
Волков Владимир Федорович [volkovvf@kit.niiefa.spb.su](mailto:volkovvf@kit.niiefa.spb.su)  
Демина Анна Андреевна, [demina@sintez.niiefa.spb.su](mailto:demina@sintez.niiefa.spb.su)  
Запретилина Елена Руслановна [zapretilina@sintez.niiefa.spb.su](mailto:zapretilina@sintez.niiefa.spb.su)  
Кухтин Владимир Петрович, [kukhtin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:kukhtin@sintez.niiefa.spb.su)  
Ламзин Евгений Анатольевич, [elamzin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:elamzin@sintez.niiefa.spb.su)  
Ланцетов Андрей Анатольевич [lancetov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:lancetov@sintez.niiefa.spb.su)  
Ланцетов Владислав Андреевич, [firsov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:firsov@sintez.niiefa.spb.su)

Ларионов Михаил Сергеевич, [larionov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:larionov@sintez.niiefa.spb.su)  
Мизинцев Александр Витальевич, [info@nfenergo.ru](mailto:info@nfenergo.ru)  
Михайлов Валерий Михайлович, [mikhailov\\_valery@list.ru](mailto:mikhailov_valery@list.ru)  
Неженцев Андрей Николаевич, [nezhentsev@sintez.niiefa.spb.su](mailto:nezhentsev@sintez.niiefa.spb.su)  
Родин Игорь Юрьевич, [rodin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:rodin@sintez.niiefa.spb.su)  
Савельева Татьяна Александровна, [savelyeva@sintez.niiefa.spb.su](mailto:savelyeva@sintez.niiefa.spb.su)  
Сычевский Сергей Евгеньевич, [syтч@sintez.niiefa.spb.su](mailto:sytch@sintez.niiefa.spb.su)  
Фирсов Алексей Анатольевич, [firsov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:firsov@sintez.niiefa.spb.su)  
Чайка Павел Юрьевич, [chaikap@sintez.niiefa.spb.su](mailto:chaikap@sintez.niiefa.spb.su)  
Шарков Константин Александрович, [sharkov@kit.niiefa.spb.su](mailto:sharkov@kit.niiefa.spb.su)  
Шатиль Николай Александрович, [shatiln@sintez.niiefa.spb.su](mailto:shatiln@sintez.niiefa.spb.su)

**Information about authors:**

Amoskov V.M., [avm@sintez.niiefa.spb.su](mailto:avm@sintez.niiefa.spb.su)  
Andreev E.N., [andreev@sintez.niiefa.spb.su](mailto:andreev@sintez.niiefa.spb.su)  
Arslanova D.N., [arslanova@sintez.niiefa.spb.su](mailto:arslanova@sintez.niiefa.spb.su)  
Belyakov V.A., [belyakov@niiefa.spb.su](mailto:belyakov@niiefa.spb.su)  
Chaika P.Yu., [chaikap@sintez.niiefa.spb.su](mailto:chaikap@sintez.niiefa.spb.su)  
Dyomina A.A., [demina@sintez.niiefa.spb.su](mailto:demina@sintez.niiefa.spb.su)  
Firsov A.A., [firsov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:firsov@sintez.niiefa.spb.su)  
Kukhtin V.P., [kukhtin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:kukhtin@sintez.niiefa.spb.su)  
Lamzin E.A., [elamzin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:elamzin@sintez.niiefa.spb.su)  
Lantzetov A.A., [lancetov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:lancetov@sintez.niiefa.spb.su)  
.Lantzetov V.A, [firsov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:firsov@sintez.niiefa.spb.su)  
Larionov M.S., [larionov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:larionov@sintez.niiefa.spb.su)  
.Mikhailov V.M, [mikhailov\\_valery@list.ru](mailto:mikhailov_valery@list.ru)  
Mizintzev A.V., [info@nfenergo.ru](mailto:info@nfenergo.ru)  
Nezhentzev A.N., [nezhentsev@sintez.niiefa.spb.su](mailto:nezhentsev@sintez.niiefa.spb.su)  
Rodin I. Yu., [rodin@sintez.niiefa.spb.su](mailto:rodin@sintez.niiefa.spb.su)  
Savelieva T.A., [savelyeva@sintez.niiefa.spb.su](mailto:savelyeva@sintez.niiefa.spb.su)  
Sytchevsky S.E., [syтч@sintez.niiefa.spb.su](mailto:sytch@sintez.niiefa.spb.su)  
Sharkov K.A., [sharkov@kit.niiefa.spb.su](mailto:sharkov@kit.niiefa.spb.su)  
Shatil N.A., [shatiln@sintez.niiefa.spb.su](mailto:shatiln@sintez.niiefa.spb.su)  
Vasiliev V.N., [vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su](mailto:vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su)  
Volkov V.F., [volkovvf@kit.niiefa.spb.su](mailto:volkovvf@kit.niiefa.spb.su)  
Zapretilina E.R., [zapretilina@sintez.niiefa.spb.su](mailto:zapretilina@sintez.niiefa.spb.su)

---

© Амосков Виктор Михайлович, Андреев Евгений Николаевич, Арсланова Дарья Николаевна, Беляков Валерий Аркадьевич, Васильев Вячеслав Николаевич, Волков Владимир Федорович, Демина Анна Андреевна, Запретилина Елена Руслановна, Кухтин Владимир Петрович, Ламзин Евгений Анатольевич, Ланцетов Андрей Анатольевич, Ланцетов Владислав Андреевич, Ларионов Михаил Сергеевич, Мизинцев Александр Витальевич, Михайлов Валерий Михайлович, Неженцев Андрей Николаевич, Родин Игорь Юрьевич, Савельева Татьяна Александровна, Сычевский Сергей Евгеньевич, Фирсов Алексей Анатольевич, Чайка Павел Юрьевич, Шарков Константин Александрович, Шатиль Николай Александрович