

## **ИСПЫТАНИЯ ЛЕВИТАЦИОННОГО МОДУЛЯ С ВТСП -2 РЕЙСТРЕКОВЫМИ КАТУШКАМИ В СОСТАВЕ КРУПНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА ДЛЯ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА**

**Е. Н. Андреев, О. С. Васильева, В. Н. Васильев,  
А. А. Дёмина, Е. Р. Запретилина, О.А. Ковальчук,  
В. П. Кухтин, А. А. Ланцетов, В. А. Ланцетов,  
М. С. Ларионов, А. Н. Неженцев, И. Ю. Родин,  
С. К. Самойлов, А. В. Сафонов, А. А. Фирсов,  
Н. А. Шатиль**

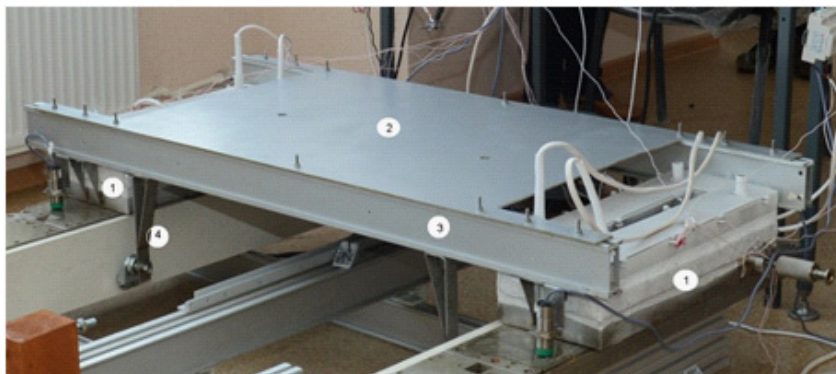
**АО «Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д. В. Ефремова» (Санкт-Петербург, Россия)**

## **TESTS OF HTSC RACETRACK COIL MODULE ON LARGE-SCALE DUMMY FOR EDS MAGLEV**

**E. N. Andreev, A. A. Dyomina, A. A. Firsov, O. A. Kovalchuk,  
V. P. Kukhtin, A.A. Lantzetov, V. A. Lantzetov,  
M. S. Larionov, A. N. Nezhentzev, I. Yu. Rodin,  
A. V. Safonov, S. K.Samoilov, N. A. Shatil, O. S Vasilieva,  
V. N Vasiliev, E. R. Zapretilina**

**Joint Stock Company «D. V. Efremov Scientific Research Institute  
of Electrophysical Apparatus»  
(St. Petersburg, Russia)**

В докладе представлены результаты испытаний левитационного модуля, изготовленного с использованием ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения (ВТСП-2), в составе крупномасштабного макета для натурных исследований электродинамического подвеса (ЭДП), принципы построения которого приведены в [1]. Конструктивно ВТСП-2 модуль представляет собой сборку из двух блоков, каждый из которых представляет собой азотный криостат с размещенной внутри парой ВТСП-2 катушек рейстрековой формы. Катушки каждого блока оснащены токовводами, потенциальными выводами для контроля активной компоненты напряжения и датчиками Холла для измерения индукции магнитного поля на поверхности катушки. Конструкция и результаты предварительных испытаний блока подробно описаны в [2]. Блоки модуля объединены жесткой структурой, состоящей из текстолитовой платформы и алюминиевых профилей. Боковую устойчивость ВТСП-2 модуля обеспечивает подвижная механическая структура в виде роликов. Внешний вид ВТСП-2 модуля представлен на рисунке 1.



*Рис. 1. Внешний вид ВТСП-2 модуля: 1 – азотные криостаты, 2 – текстолитовая пластина, 3 – алюминиевый профиль, 4 – ролики подвижной механической структуры*

Номинальный полный ток каждой ВТСП-2 катушки – 14 кА-витков; собственный вес блока – 10 кг; вес блока после заполнения криостата азотом – 17кг; вес платформы ~ 14кг; общий вес модуля с криостатами, заполненными жидким азотом - примерно 48 кг.

Испытаниям ВТСП-2 модуля предшествовало численное моделирование электромагнитных процессов с использованием детальных вычислительных моделей ЭДП, описанных в [1]. Наличие кассеты из ферромагнитного материала, удерживающей сборку постоянных магнитов, усложняет картину электромагнитного взаимодействия ВТСП-2 катушки и макета путевой структуры. В этом случае внешнее магнитное поле на ВТСП-2 катушке рассчитывается как суперпозиция поля постоянных магнитов и поля ферромагнитного кейса, намагниченного суммарным полем постоянных магнитов и ВТСП-2 катушки. Поле постоянных магнитов, взаимодействуя с током катушки, обеспечивает эффект отталкивания (левитации); поле ферромагнитного кейса, помимо отталкивания, приводит к возникновению силы, притягивающей блоки к путевой структуре. В результате, подъемная сила модуля сложным образом зависит от тока катушки и зазора между нижней поверхностью блоков и макетом путевой структуры (левитационным зазором). При фиксированном зазоре и увеличении тока в ВТСП-2 катушке подъемная сила растет, достигает максимума и начинает спадать. Чем больше левитационный зазор, тем выше значение тока, при котором достигается максимум подъемной силы. При малых зазорах максимальное значение подъемной силы невелико, и дальнейший рост тока приводит к притяжению блока к путевой структуре. Подобная система отличается слабой вертикальной устойчивостью.

Для управления положением ВТСП-2 модуля в пространстве была разработана методика, позволяющая регулировать зазор между нижней поверхностью ВТСП-2 модуля и макетом путевой структуры. Для реализации методики была разработана система контроля левитационного зазора, состоящая из четырех датчиков зазора, трёх АЦП, ЦАП, управляющего контроллера, компьютера верхнего уровня и двух источников питания. Программное обеспечение (ПО) системы контроля было разработано в среде инженерного программирования LabView. ПО позволяет управлять источниками питания ВТСП-2 катушек как в ручном режиме, так и по заданному алгоритму, который использует элемент PID-регулирования.

Программа испытаний включала исследование динамики поведения ВТСП-2 модуля при различных величинах начального зазора. В ходе испытаний изменялись токи ВТСП-2 катушек с контролем напряжений на выводах и магнитного поля на поверхности. Одновременно проводился мониторинг расходных характеристик криостатов, характеризующих качество тепловой изоляции. Испытания проводились без дополнительной весовой нагрузки. ВТСП-2 модуль устанавливался над путевой структурой с начальным зазором, задаваемым калиброванными текстолитовыми прокладками. Токи в ВТСП-2 катушках изменялись по заданной программе. Левитационный зазор измерялся датчиками перемещения, сигналы которых могут быть использованы для формирования сигналов обратной связи.

ВТСП-2 модуль во время испытаний представлен на рисунке 2. Результаты испытаний полностью подтвердили выводы численного моделирования. При начальном зазоре от 0 до 12 мм расчетная подъемная сила мала, что подтверждается малыми значениями вертикального перемещения. При этом наблюдается предсказанный быстрый переход от подъема к притяжению. При величине начального зазора от 22 до 34 мм подъемная сила нарастает и ВТСП-2 модуль переходит в режим электромагнитного с левитационным зазором 40–45 мм.

ВТСП-2 катушки продемонстрировали стабильную работу в магнитных полях, эквивалентных полям реальных ЭДП, как при номинальных, так и при повышенных токах. Криостаты показали приемлемые в лабораторных условиях характеристики: при общем объеме жидкого азота 9 л, паримость криостата при максимальном токе 60 А не превышала 2 л в час, что обеспечивает непрерывную работу в течение не менее 4 часов.

Таким образом, успешные испытания ВТСП-2 модуля в составе крупномасштабного макета для натурных исследований ЭДП завершили цикл работ, в ходе которого была апробирована технология изготовления рейстрековых ВТСП-2 катушек и компактных азотных криостатов. В ходе работ были спроектированы, изготовлены и испытаны блоки ВТСП-2 модуля, отработаны конструкторские решения и верифицированы вычислительные модели. Это позволяет перейти к созданию опытно-промышленного образца унифицированного модуля системы левитации транспортного средства.