

П.М. ЕРЫКОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ,
М.А. ОСИПОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТОПКИ ВТСП ЛЕНТ

В работе рассмотрены экспериментальные и численные исследования левитационных характеристик ВТСП-подвеса, состоящего из стопки композитных ВТСП-лент на основе соединения $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и массива цилиндрических постоянных магнитов NdFeB, в частности, магнитосиловые характеристики (жесткость и левитационная сила) системы, охлаждаемой жидким азотом в условиях охлаждения в магнитном поле, а также динамика изменения жесткости левитационной системы. Выявлена зависимость между максимальной отталкивающей вертикальной силой, максимальной возвращающей силой и высотой охлаждения ВТСП-лент.

P.M. ERYKOV, I.V. MARTIROSYAN, D.A. ALEXANDROV, A.S. STARIKOVSKII,
M.A. OSIPOV, S.V. POKROVSKII

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

MAGNETO-LEVITATION CHARACTERISTICS OF AN HTS TAPES STACK AT DIFFERENT COOLING HEIGHTS IN A FIELD OF A PERMANENT MAGNET

The paper considers experimental and numerical studies of the levitation characteristics of a HTS suspension consisting of a composite HTS tapes stack based on the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ compound and an array of cylindrical NdFeB permanent magnets, in particular, the magneto-force characteristics (rigidity and levitation force) of a system cooled by liquid nitrogen under field-cooling conditions, and the dynamics of changes in the rigidity of the levitation system. The relationship between the maximum repulsive vertical force, the maximum guidance restoring force and the cooling height of the HTS tapes is revealed.

Для использования обычных бесконтактных магнитных систем необходимо активное управление с обратной связью для поддержания левитационного зазора в заданных пределах, в то время как удержание определенного зазора между составляющими ВТСП-систем осуществляется значительно проще [1,2]. В подавляющем большинстве конструкций левитационных систем предполагается, что элементы ВТСП охлаждаются при наличии внешнего магнитного поля. Особое внимание уделяется высоте охлаждения, т.е. расстоянию между ВТСП-элементом и источником магнитного поля в момент охлаждения ниже критической температуры. Изменение высоты охлаждения приводит к изменению начальной конфигурации магнитного поля, что напрямую влияет на рабочие характеристики устройства, такие как жесткость, устойчивость и сила левитации.

Экспериментальные измерения сил магнитного левитационного взаимодействия между стопкой из 50 ВТСП-лент и стопкой из 3 постоянных магнитов были проведены при охлаждении жидким азотом для серии фиксированных высот охлаждения. Для моделирования аналогичной системы были проведены расчеты с использованием метода конечных элементов с учетом той же геометрии магнитной системы.

В результате проведенного исследования были получены характеристики вертикальной и латеральной нагрузки ВТСП-подвеса, а также зависимости максимальных левитационных сил от высоты охлаждения. Было показано, что максимальная отталкивающая левитационная сила при вертикальных перемещениях ВТСП-элемента нелинейно возрастает с увеличением высоты охлаждения, в то время как максимальная возвращающая сила при боковых перемещениях нелинейно уменьшается с увеличением высоты охлаждения. Таким образом, наблюдается выраженная обратная корреляция между вертикальной и латеральной составляющими левитационного взаимодействия, отражающая баланс между несущей способностью подвеса и его устойчивостью.

Также было установлено, что выбор высоты охлаждения влияет на устойчивость системы в вертикальном и поперечном направлениях. Получено, что вертикальная жесткость подвеса значительно возрастает с уменьшением высоты охлаждения, в то время как латеральная жесткость имеет максимум при относительно низких значениях высоты охлаждения, но уменьшается вблизи поверхности магнитной сборки.

Полученные данные о зависимости характеристик левитации от высоты охлаждения могут быть использованы в качестве отправной точки для проектирования и оптимизации более сложных магнитных систем, таких как подшипники для кинетических накопителей энергии или транспортных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00394-П).

Список литературы

1. T. Huang, M. Zheng, and G. Zhang, "A Review of Active Magnetic Bearing Control Technology," in 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019, pp. 2888-2893.
2. D. K. Supreeth, S. I. Bekinal, S. R. Chandranna, and M. Doddamani, "A Review of Superconducting Magnetic Bearings and Their Application," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 3, pp. 1-15, 2022.