

## Магнитные опоры на основе ВТСП для роторных систем

В.А. Матвеев, О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, В.Н. Герди  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
107005 Москва, Россия

Магнитные опоры, создаваемые на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), весьма перспективны для использования в механизмах с высокооборотными роторами, работающих в экстремальных условиях при низкой температуре, в вакууме т.п. По способу охлаждения ВТСП сверхпроводящие опоры можно разделить на два типа: охлаждение в нулевом магнитном поле (ZFC) и охлаждение в поле постоянных магнитов (FC).

ZFC-опоры, характеризующиеся большой левитирующей силой осуществляют стабилизацию ротора лишь в одном направлении и соответственно требуют дополнительной активной стабилизации. В FC-опорах реализуется меньшая левитационная сила, но они позволяют осуществить стабилизацию ротора по всем направлениям. Нами разрабатываются опоры FC типа, как перспективные с точки зрения использования в роторных системах гиросtabilизаторов космических летательных аппаратов (КЛА).

Эффект полной стабилизации ротора в FC-опорах базируется на возникновении магнитной потенциальной ямы в системе ВТСП—постоянный магнит, т.е. любое взаимное смещение сверхпроводника и магнита, приводит к возникновению силы, стремящейся вернуть систему в исходное состояние. Поэтому, при любом относительном смещении ВТСП и магнита жесткость  $K_x = -dF_x/dx$  всегда отрицательна, что обеспечивает устойчивость системы.

Практическая реализация подвесов FC-типа с высокими нагрузочными и жесткостными характеристиками возможна при использовании ВТСП элементов с высокими значениями захваченных магнитных полей  $\geq 1$ Тл. В настоящее время в МГТУ им. Баумана разработана технология получения квазиоднокристаллов керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ , способных захватывать магнитные поля до 1,25 Тл. На их основе созданы магнитные опоры, конструкция которых позволяет наиболее полно использовать высокие магнитные характеристики ВТСП за счет индуцирования большого магнитного поля порядка 0.7 Тл и высокого градиента во всем объеме сверхпроводника.

Разработаны и изготовлены три модели опор. Первая модель разработана на основе короткозамкнутых сверхпроводящих контуров. Пассивная стабилизация ротора обеспечивается за счет взаимодействия незатухающего тока, циркулирующего в короткозамкнутых сверхпроводящих контурах с магнитными полями, генерируемыми постоянными кольцевыми маг-

нитами, смонтированными на роторе. В качестве короткозамкнутых контуров использовались сверхпроводящие кольца, изготовленные из однодоменного ВТСП материала состава  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ , размером  $D=15$  мм,  $d=7$  мм,  $h=2$  мм с незатухающим циркуляционным током 1000...1200 А в одном кольце. В макете использованы 12 колец общей массой 15 г. Опора имеет нагрузочную способность 36 Н в аксиальном и 15 Н в радиальном направлении. Среднее значение аксиальной и радиальной компонент жесткости подвеса при температуре 77 К составило 30 Н/мм и 40 Н/мм соответственно. При циклических нагружениях ротора обнаруживается гистерезис нагрузочных характеристик величиной 10%. Отношение массы сверхпроводника к максимальной нагрузке в радиальном направлении равно 100. Внешний диаметр опоры -110 мм, высота – 40 мм, масса – 1 кг, в том числе масса ротора - 800 г.

Вторая модель опоры включает магнитную систему на основе кольцевых Nd-Fe-B постоянных магнитов, ротор с ВТСП- дисковыми элементами ( $\varnothing 28$  мм,  $h=4$ мм, 7 шт), в которых циркулируют сверхпроводящие токи  $\sim 4000$ А. Фотография компонентов опоры представлена на рис.1. Разработанная конструкция обеспечивает устойчивый подвес ротора в аксиальном и радиальном направлениях при его циклических нагружениях до 85 Н и 190 Н соот-

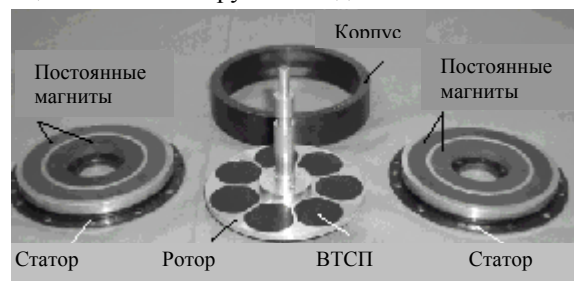


Рис.1. Компоненты ВТСП опоры.

ветственно. Средняя жесткость опоры в аксиальном направлении 140 Н/мм, в радиальном 190 Н/мм, что превышает жесткостные параметры разработанной ранее конструкции первого образца ВТСП-опоры в 5 раз. Размеры опоры: диаметр 113мм и высота 30 мм, масса ВТСП -элементов 90г. Отношение нагрузочной способности к весу сверхпроводника - 200. Ротор устойчиво вращался со скоростью 5000 об/мин. без нагрузки. На зависимости радиальной силы от смещения (рис.2) можно выделить три характерных участка. Участок 1 наблюдается при очень малых отклонениях ротора от положения равновесия и характеризуется высокой жесткостью,

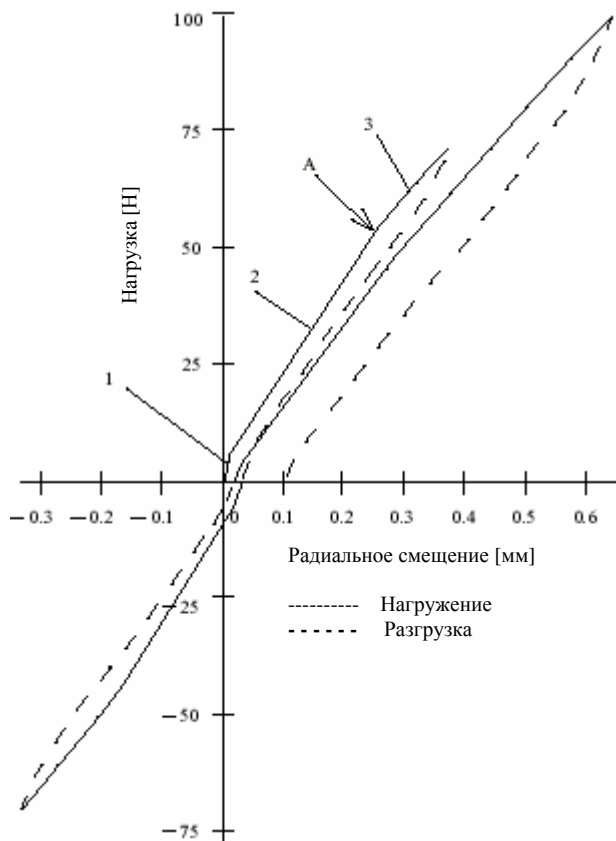


Рис. 2. Зависимость радиальной силы опоры от смещения ротора

которая составляет 560 Н/мм. Он присутствует как на начальной кривой нагружения, так и на кривых повторных нагружений в обоих направлениях смещения. Вторым участком имеет место при смещениях до 0,27 мм от первоначального положения и ему соответствует нагрузка 52 Н. При нагружении менее этой величины ротор возвращается в исходное состояние без остаточного смещения. Жесткость на

данном участке имеет линейный характер и составляет 190 Н/мм. Таким образом участки **1** и **2** составляют зону безгистерезисного (магнитоупругого) взаимодействия сверхпроводников и постоянных магнитов. При больших смещениях и нагрузках (участок **3**) наблюдается гистерезисное поведение силового взаимодействия ВТСП и магнитов. Имеет место петля гистерезиса на нагрузочно-разгрузочной кривой и появляется остаточное смещение ротора относительно исходного положения после снятия нагрузки. Жесткость снижается до 150 Н/мм. Обнаруженное существование магнитоупругого взаимодействия ВТСП элементов и постоянных магнитов обеспечивает высокую точность позиционирования ротора.

Необходимо отметить, что высокая начальная жесткость и зона безгистерезисного смещения являются следствием использования сверхжестких ВТСП с высоким значением пиннинга, который обеспечивает замораживание магнитного поля величиной 1 Тл. Несомненно, что ВТСП с еще более высокими магнитными характеристиками обеспечат заметное увеличение жесткости и несущей способности ротора опоры на участке упругого взаимодействия ВТСП с постоянными магнитами при малых зазорах между их поверхностями в режиме FC, что позволит создать надежные и качественные устройства на ВТСП магнитных подвесах.

Третья модель подвеса выполнена в виде роторной системы на двух магнитных опорах и предназначена для использования в гироскопах. Подвес включает вал с закрепленными на нем 4 парами кольцевых постоянных магнитов и два статора с 7 ВТСП дисками в каждом. Предварительные исследования показали, что ротор общей массой 3,6кг вращается устойчиво со скоростью 1800 об./мин. Охлаждение сверхпроводников до температуры 77К осуществляется через рубашку охлаждения, благодаря чему ротор вращается в воздушной среде, а не в жидком азоте. Нагрузочные характеристики подвеса в настоящее время исследуются.