

Исследование системы активного магнитного подшипника

Г. В. Бельский, А. П. Расторгуев, А. А. Лямкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

gvbelskiy@etu.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются задачи построения и исследования характеристик электромагнитов в составе активного магнитного подшипника (АМП). В работе представлены следующие результаты: описание физического объекта, процесс создания метрологического стенда, план и методика проведения исследований. В результате получена полиномиальная функция тягового усилия электромагнитов, на основе которой можно построить точную математическую модель исследуемого активного магнитного подшипника.

Ключевые слова: активный магнитный подшипник; математическая модель; электромагнитная сила

I. ВВЕДЕНИЕ

Подшипники являются неотъемлемой частью большинства механических систем, они используются для уменьшения трения при наличии относительного движения между двумя частями, такими как вал и корпус.

В подшипниках качения контактные напряжения и силы, возникающие из-за контакта между сопряженными поверхностями, являются основными факторами, препятствующими дальнейшему повышению эффективности системы. Наличие контактного напряжения также способствует износу. В подшипниках скольжения контактная вязкость смазочного материала вызывает потери на трение.

Магнитный подшипник – технология бесконтактного подшипника, целью которой является устранение недостатков подшипников качения и скольжения. Магнитный подшипник основан на базовых принципах электромагнитной левитации. В современной практике данная технология применяется в высокоскоростном машиностроении, вакуумных системах, станкостроении и медицинском оборудовании [1].

В данной статье рассматривается типичный радиальный магнитный подшипник, на основе которого был проведен ряд исследований с целью получения полиномиальной функции тягового усилия. Данная функция в дальнейшем позволяет построить точную математическую модель АМП.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

A. Геометрия активного магнитного подшипника

Конструкция АМП представляет собой статор и цапфу, жестко закрепленную на роторе электрической машины. В роли статора выступает кольцо, состоящее из пакета электротехнической стали, на котором расположено N электромагнитов друг напротив друга. Для создания системы управления АМП требуется точно знать зависимость тягового усилия от тока в обмотках электромагнитов.

В связи со значительными нелинейностями зависимости силы втягивания металлов в магнитное поле от величины воздушного зазора и магнитного потока, в настоящее время не существует точной модели АМП и используются экспериментальные модели, являющиеся точным только в узких диапазонах изменения параметров объекта. Для исследования этих нелинейностей была использована типовая конструкция АМП [2].

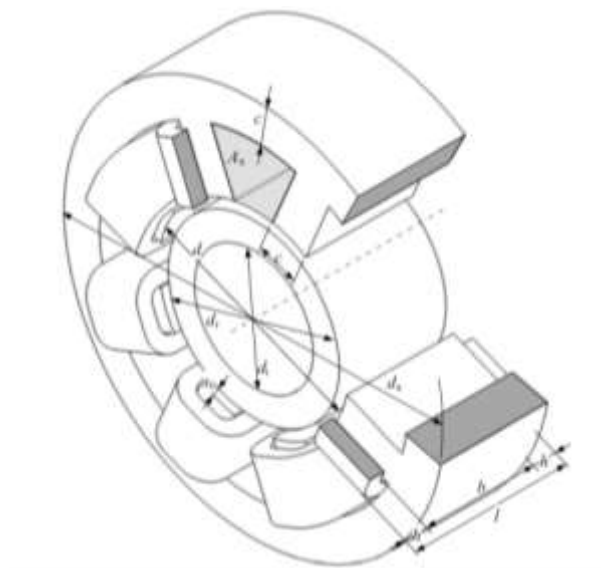


Рис. 1. Геометрия радиального АМП

На рис. 1 показаны геометрические параметры типичных радиальных подшипниковых магнитов, где: d – внутренний диаметр (диаметр подшипника), c – ширина зубца статора, h – высота намоточной головки, d_r – диаметр ротора, A_n – сечение щели (пространство для намотки), d_a – внешний диаметр, d_i – диаметр вала, b – ширина подшипника, l – длина подшипника, s_0 – номинальный воздушный зазор.

Статическая грузоподъемность f_{max} радиального магнитного подшипника представляет собой максимальную статическую силу, действующую на один из четырех U-образных магнитов подшипника. Два перпендикулярных магнита достигают максимальной силы, увеличенной в 1,41 раза по сравнению с силой одного магнита.

Удельная грузоподъемность может быть связана с проекцией площади опоры db . Предположим, что ширина полюсного наконечника p равна ширине ноги c . На диаметр подшипника d мы имеем одну восьмую окружности на полюс в нашем распоряжении. Используя 50% этого значения для ширины полюсного наконечника, поверхность наконечника определяется как:

$$A_a = d\pi/8 * 0.5 * b$$

При использовании современных трансформаторных листов из сплава кремния, которые используются для подшипниковых магнитов, максимальная плотность потока B_{max} составляет 1,6 Тесла. Используя данное значение и учитывая, что силы обоих полюсов действуют не перпендикулярно, а под углом $\pi/8$, можно получить удельную нагрузочную способность f_{max}/db . Применяя магниты с различным соотношением сплавов, можно получить удельную нагрузочную способность до 0.65 МПа.

Однако данные оценки не дают достаточной информации о требуемых характеристиках обмоток катушек, потоке и внешнем диаметре подшипника.

Поскольку подшипники обладают сложной конструкцией, в которой необходимо учитывать множество различных факторов, существует необходимость разработки отдельных АМП для каждого конкретного применения.

В. Метрологический стенд

Для определения подъемной силы электромагнита был разработан метрологический стенд, состоящий из двух тензометрических датчиков, на которых закреплена цапфа. Крепление цапфы осуществлялось с помощью двух деталей (рис. 2), поддерживающих ее с двух концов таким образом, что центр масс совпадает с геометрическим центром.

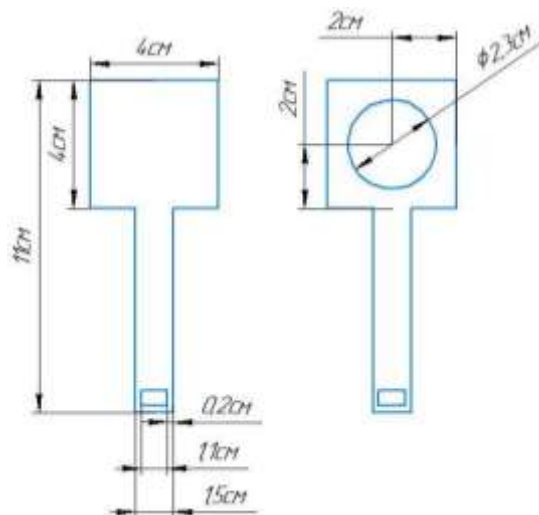


Рис. 2. Чертеж деталей крепления

Тензодатчики подключались к весовым терминалам КСК18.

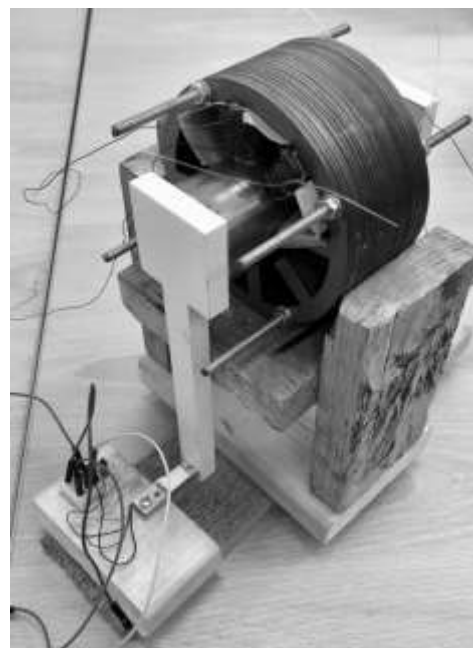


Рис. 3. Метрологический стенд в собранном виде

На рис. 3 представлен собранный метрологический стенд, на котором проводились испытания.

Питание обмоток осуществлялось с помощью лабораторного источника питания, что позволяло обеспечивать необходимый уровень напряжения с высоким уровнем точности.

III. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Магнит расположен над цапфой, таким образом, втягивающая сила действует только в вертикальной оси и противонаправлена действию силы тяжести. Так как сила тяжести постоянна, тяговую силу можно вычислить, зная суммарный вес цапфы. Сила тяжести давит на цапфу, вследствие чего тензометрические датчики показывают суммарный вес цапфы и крепежных элементов. Суммарный вес цапфы и двух крепежных элементов составил $P_0=700$ грамм. Именно с такой силой подшипник давит на тензодатчики. Поскольку датчика два, то можно сказать, что на каждый давит сила в 350 грамм. Тензометрические датчики одинаковы и могут выдерживать вес $P_T = 750$ грамм каждый. Отсюда следует, что значение максимальной тяговой силы, которую возможно измерить, следующее:

$$F_{max} = P_T * 2 + P_0$$

и составляет 2200 грамм.

Исследовались две обмотки, состоящие из 260 и 300 витков соответственно. Воздушный зазор изменялся в пределах от четырех мм, до нуля. Для исследования тяговой силы, которую может развить магнит в зависимости от воздушного зазора и подаваемого тока, обмотка была подключена к лабораторному источнику напряжения с максимальным выходным напряжением 30 В. Сопротивление обмоток составляет 11,5 и 14 Ом соответственно, что ограничивает максимальный ток 2,6 и 2,15 А. Однако, использованные в магнитах провода способны выдержать не более одного ампера при длительной работе, что существенно ограничивает эффективность подвеса.

Испытания состояли из следующих этапов:

1. фиксировались начальные значения тензометрических датчиков;
2. подавался ток различной величины (в диапазоне от 0 до 2 А);
3. показания тензодатчиков фиксировались в таблице измерений;
4. с учётом значений тока и воздушного зазора вычислялась тяговая сила;
5. проводилась аппроксимация функции полиномом;

6. значение воздушного зазора изменялось, далее повторялись пп. 1–6.

Были проведены три серии экспериментов: с использованием первой обмотки, затем второй и их последовательного подключения. В последнем случае магниты были смещены на $22,5^\circ$, для того чтобы вектор суммарной силы был направлен вертикально вверх. Максимальный ток в этом случае ограничен 1,2 А.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Ниже приведены результаты испытаний при значениях воздушного зазора 3,8 мм, 2,1 мм и 0,9 мм.

Для каждого графика была получена полиномиальная функция, аппроксимирующая полученные результаты:

а) $y = -13,805x^4 + 54,365x^3 + 27,525x^2 + 11,587x - 2,3577$

б) $y = -176,41x^4 + 783,75x^3 - 611,01x^2 + 301,55x - 21,802$

в) $y = 9764,4x^4 - 12353x^3 + 6584,9x^2 - 914,33x + 27,765$

Из данных результатов можно увидеть, что в первых двух случаях подъемная сила не превышает силу тяжести при допустимых диапазонах тока. Это означает, что мощности магнита не хватает для выбранного зазора и необходимо увеличивать количество витков, либо уменьшать зазор.

При зазоре 0,9 мм для удержания цапфы в подвешенном состоянии достаточно подавать ток, равный 0,7 А. Однако существует риск, что при разработке системы управления может потребоваться тяговая сила, способная не только удерживать цапфу в статическом состоянии, но и осуществлять её перемещение. Тогда зазор в 0,9 мм может оказаться недостаточным, так как для дальнейшего увеличения тяговой силы необходимо будет подавать больший ток, что может привести к перегреву.

Аналогичные эксперименты были проведены для катушки с 300 витками и последовательным включением двух магнитов. В последнем случае достигается практически двукратное увеличение мощности, однако, в виду возросшего активного сопротивления, необходим источник большего напряжения. Так же возможно одновременное включение двух магнитов от разных источников, что, в свою очередь, усложняет алгоритм управления положением объекта. Результаты испытаний приведены в таблице.

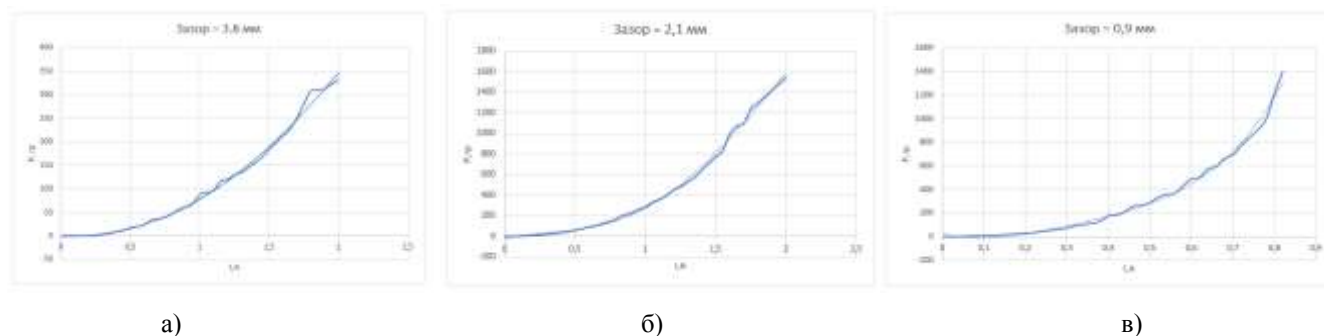


Рис. 4. Зависимости подъемной силы электромагнита с 260 витками от тока с зазором, составляющим а) 3,8мм, б) 2,1мм, в) 0,9мм

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Эксперимент	Полиномиальная форма
300 витков, зазор 3,8мм	$y=3,1441x^4-0,5162x^3+120,25x^2-0,7508x+0,14173$
300 витков, зазор 2,1мм	$y=218,36x^4-479,9x^3+871,5x^2-182,4x+10,028$
300 витков, зазор 0,9мм	$y=-11349x^4-7428,7x^3+3373,6x^2-155,11x+6,8075$
Последовательное подключение, зазор 3,8мм	$y=-34,572x^4+184,74x^3+126,28x^2+36,672x-1,1031$
Последовательное подключение, зазор 2.1мм	$y=629,45x^4-1041,9x^3+1573,9x^2-191,31x+8,1906$
Последовательное подключение, зазор 0.9мм	$y=89761x^4-79389x^3+26995x^2-2522,5x+45,31$

Так была получена зависимость подъемной силы от зазора при постоянном токе.

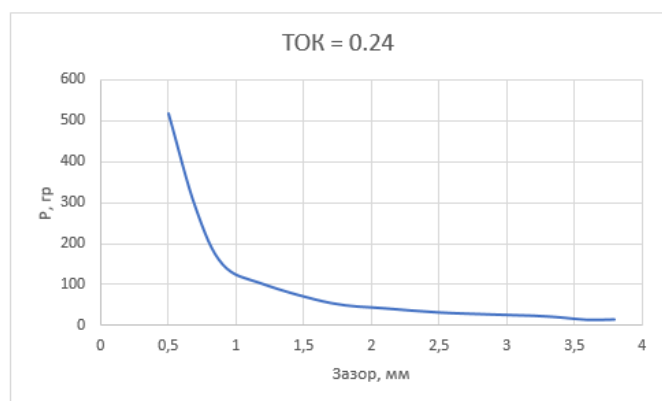


Рис. 5. Зависимость подъемной силы от величины зазора

Как видно из рис. 5, зависимость так же нелинейная и наиболее простым, и эффективным для увеличения работоспособности подвеса является сокращение воздушных зазоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования системы магнитного подвеса были получены полиномиальные формы, описывающие зависимости подъемной силы от тока в обмотках магнитов. Несмотря на то, что полученные результаты говорят о невозможности использования данной конструкции для создания магнитного подшипника, можно составить точную математическую модель, на основании которой можно скорректировать конструкцию подшипника. Так же возможно уменьшение зазора, путем увеличения внешнего диаметра цапфы, либо уменьшения ее массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Schweitzer G. (2000) Magnetic bearings as a component of smart rotating machinery. Proc. 5th Internat. Conf. on Rotor Dynamics IFToMM, Darmstadt, Sept. 7-10, 3-15.
- [2] Schweitzer G., Maslen E.H. Magnetic bearings. Theory, design, and application to rotating machinery. New York: Springer, 2009. 541 p.