

Определение силовых характеристик радиальных магнитных подшипников с осевой намагниченностью в зависимости от геометрических параметров

ХАЙРУЛЛИН И.Х., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е.

В программном комплексе Ansys решается задача определения геометрических параметров магнитных подшипников, при которых они обладают максимальными силовыми характеристиками. Представлены конкретные практические рекомендации, которые могут быть использованы при проектировании магнитных подшипников.

Ключевые слова: магнитный подшипник, геометрические параметры, силовые характеристики

Магнитные подшипники на постоянных магнитах (МППМ) по сравнению с активными магнитными подшипниками (АМП) обладают такими преимуществами, как отсутствие системы управления и источника питания и, следовательно, имеют меньшую стоимость. Согласно исследованиям [1–3] полный подвес тела (по 5 степеням свободы) в МППМ невозможен. Для этого совместно с МППМ используются АМП (рис. 1), поэтому данный тип системы называется гибридным магнитным подшипником (ГМП).

Преимущество системы магнитного подвеса ротора электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ) на ГМП заключается, в частности, в том, что основное силовое воздействие создается непосредственно МППМ, что приводит к снижению энергопотребления и массогабаритного показателя электромагнитной части ГМП и, как следствие, к уменьшению стоимости системы в целом. К примеру, применение ГМП в высокоскоростных шпиндельных узлах позволяет значительно снизить стоимость шпиндельного узла и улучшить его технические характеристики.

The problem of determining the geometrical parameters of magnetic bearings at which they have the maximal force characteristics is solved using the ANSYS software system. Practical recommendations that can be used in designing magnetic bearings are given.

Key words: magnetic bearing, geometrical parameters, force characteristics

Таким образом, применение ГМП в ЭМПЭ является экономически целесообразным решением [4].

Ввиду того, что основное силовое усилие в ГМП создается МППМ, важно определить геометрические соотношения постоянных магнитов, при которых усилие, создаваемое ими, максимально.

Поставленная задача решалась путем проведения численного эксперимента методом конечных элементов в программном комплексе Ansys. Конечноеlementная трехмерная модель и расчетная схема исследуемого МППМ представлены на рис. 2.

В качестве материала постоянных магнитов принимался NdFeB38H с осевым направлением намагниченности, его характеристики представлены в [5].

Усилие на основе определения виртуальной работы в методе конечных элементов принимается в виде [6]:

$$F_s = \int_V \dot{\{B\}}^T \left\{ \frac{\partial H}{\partial s} \right\} dV + \int_V \dot{\{B\}}^T \left\{ \frac{\partial H}{\partial p} \right\} \frac{\partial \dot{u}}{\partial s} dV, \quad (1)$$



Рис. 1. Магнитный подвес ротора ЭМПЭ на ГМП

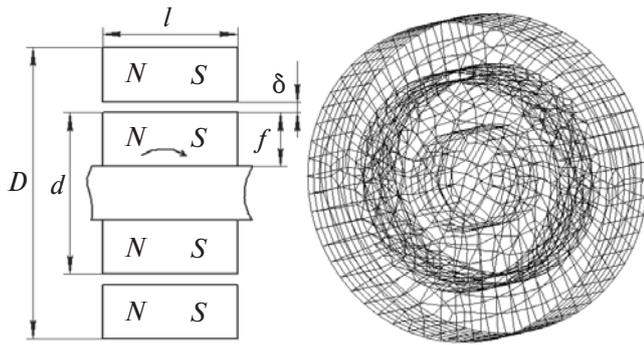


Рис. 2. Расчетная схема и конечноэлементная трехмерная модель МППМ

где S – сила в элементе в направлении s ; $\int \frac{\partial H}{\partial s} dV$ – производная от напряженности поля по перемещению; s – виртуальные перемещения узлов, взятые поочередно в направлениях осей координат; V – объем конечного элемента.

Численный эксперимент проводился при заданных геометрических размерах, при этом определялись зависимости:

силовых характеристик МППМ с осевой намагниченностью магнитных колец (МК) от изменения геометрического соотношения $l = \frac{2l}{d}$ при постоянном рабочем зазоре d и толщине постоянных магнитов t ;

силовых характеристик МППМ с осевой намагниченностью МК и МППМ с радиальной намагниченностью МК от изменения активной длины l при постоянном рабочем зазоре d , диаметрах d , D и толщине постоянных магнитов t ;

силовых характеристик МППМ с осевой намагниченностью МК от изменения толщины постоянных магнитов и их материала при постоянном рабочем зазоре d и активной длине постоянных магнитов l .

При решении поставленных задач методом конечных элементов применяются уравнения Лапласа. Для того чтобы они имели единственное решение, используются граничные условия на замкнутой границе:

Дирихле

$$j_M = f_1(x, y, z);$$

Неймана

$$\frac{\partial j_M}{\partial n} = f_2(x, y, z);$$

третьего рода

$$\frac{\partial j_M}{\partial n} + f_3(j_M) = f_4(x, y, z).$$

Зависимости силовых характеристик МППМ с осевой намагниченностью МК от изменения гео-

метрического соотношения $l = \frac{2l}{d}$ при постоянном рабочем зазоре d и толщине постоянных магнитов t определялись на конечноэлементной модели (рис. 2) путем пошагового изменения значения геометрического фактора. Шаг изменения значения геометрического фактора составлял 0,5.

В результате получена зависимость силы, создаваемой в рабочем МППМ с осевой намагниченностью МК, от геометрического соотношения $2l/d$ (рис. 3).

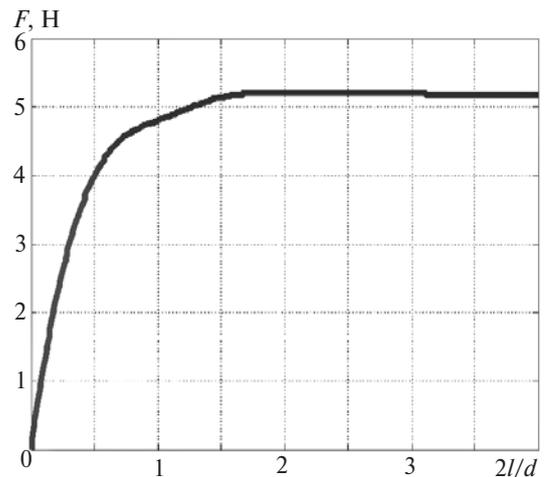


Рис. 3. Зависимость силы в рабочем зазоре МППМ с осевой намагниченностью МК от геометрического соотношения

Анализ результатов численного эксперимента показал, что усилие максимально при $0,5 < l < 2$. Однако ввиду того, что при меньшем значении l силовая характеристика МППМ с осевой намагниченностью МК распределена по всей активной длине, а при его увеличении в центре МППМ с осевой намагниченностью силовое воздействие меньше, нежели по краям, рекомендуется при проектировании МППМ с осевой намагниченностью МК использовать геометрическое соотношение $0,5 < l < 0,8$.

Зависимости силовых характеристик радиального МППМ с осевой намагниченностью МК и МППМ с радиальной намагниченностью МК от изменения активной длины l при постоянном рабочем зазоре d , диаметрах d , D и толщине постоянных магнитов t определялись на конечноэлементной модели (рис. 2) путем пошагового изменения активной длины; шаг равнялся 2 мм. Результаты численного эксперимента показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видим, что в МППМ с осевой намагниченностью МК силовые характеристики в рабочем зазоре возрастают при увеличении активной длины до определенного значения l_k , после чего увеличение активной длины не оказывает на силовые характеристики существенного влияния. В ча-

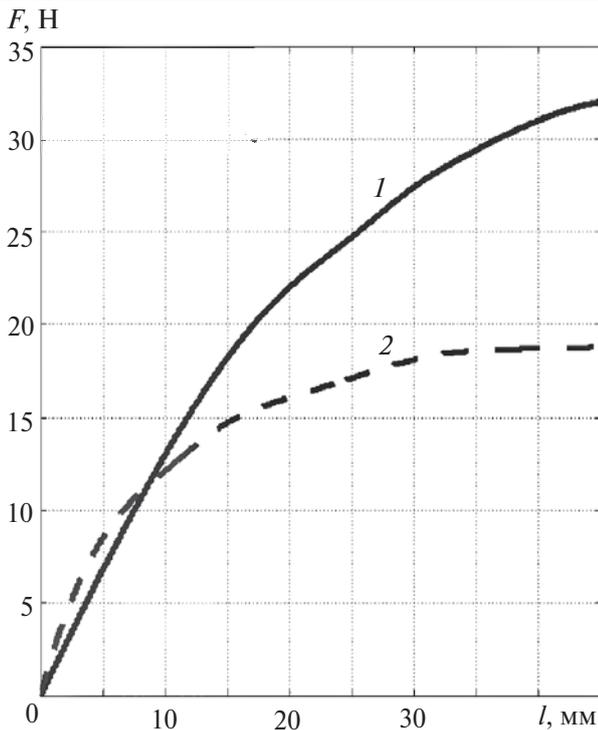


Рис. 4. Зависимость силы в рабочем зазоре МППМ с осевой намагниченностью МК и МППМ с радиальной намагниченностью МК от активной длины: 1 — радиальная намагниченность; 2 — осевая

ности, для $d = 60$ мм, $t = 15$ мм, $d = 1$ мм значение l_k составляет 35 мм, причем увеличение активной длины до значения на 40% приводит к увеличению силы на 37%.

Таким образом, с целью рационального использования материала постоянных магнитов рекомендуется при проектировании МППМ и ГМП с осевым направлением намагниченности использовать заданное значение активной длины l_k или на 20% большее, что соответствует геометрическому соотношению $0,5 < l < 0,8$.

В МППМ с радиальной намагниченностью МК силовые характеристики при увеличении активной длины возрастают. Причем при увеличении активной длины в 1,3; 2 или 2,3 раза сила увеличивается, соответственно, на 33,6; 58,8 или 70,5%.

При малой активной длине ($l < 9$ мм) целесообразно применять МППМ с осевой намагниченностью МК, так как в этих случаях сила МППМ с осевой намагниченностью больше на 5–7%.

Зависимости силовых характеристик МППМ с осевой намагниченностью МК от изменения толщины постоянных магнитов и материала при постоянном рабочем зазоре d и активной длине постоянных магнитов l определялись на конечноэлементной модели (рис. 2) путем пошагового изменения значения толщины постоянных магнитов для заданных характеристик материала, причем толщина внешнего и внутреннего магнитных колец при-

нималась одинаковой; шаг изменения толщины магнитного кольца составлял 2 мм.

Результаты численного эксперимента показаны на рис. 5. При увеличении толщины магнитного кольца на 50% сила в рабочем зазоре МППМ с осевой намагниченностью МК возрастает на 35%. При заданной толщине постоянных магнитов силовая характеристика МППМ с осевой намагниченностью МК имеет максимальное значение, после которого сила начинает убывать. В частности, при $d = 50$ мм, $l = 10$ мм, $d = 1$ мм значение двойной толщины кольца МППМ с осевой намагниченностью МК, при котором сила максимальна, составило 33 мм.

Анализ влияния свойств материалов показал, что при их изменении характер зависимостей не меняется, а при увеличении коэрцитивной силы постоянных магнитов МППМ с осевой намагниченностью МК на 17,66% максимальное значение силы возрастает на 88,23%.

Таким образом, при проектировании МППМ и ГМП с осевым направлением намагниченности магнитных колец с целью увеличения силового воздействия рекомендуется использовать оптимальное или близкое ему значение толщины магнитных колец МППМ (для МППМ с осевой намагниченностью МК при $d = 50$ мм, $l = 10$ мм, $d = 1$ мм оптимальное значение двойной толщины составляет 33 мм). При этом следует учитывать как необходимое значение силового воздействия, так и механическую прочность вала [7], а также технологические факторы, в частности максимально возможное значение диаметра под посадку внешнего магнитного кольца.

В работе исследовано влияние геометрических параметров постоянных магнитов МППМ с осевой

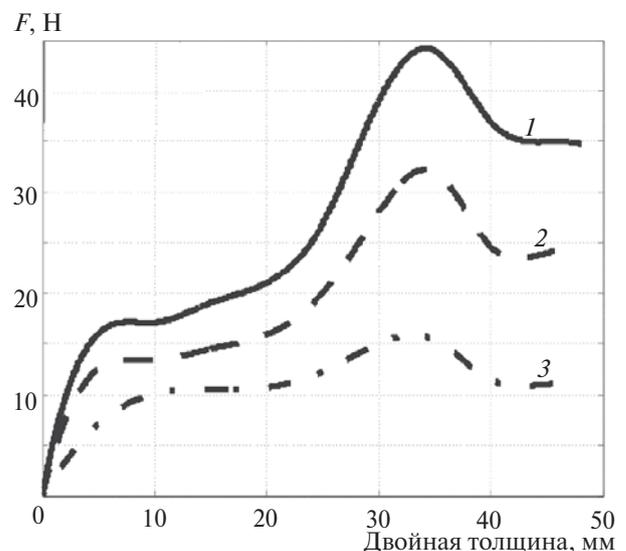


Рис. 5. Зависимость силы в рабочем зазоре МППМ от толщины магнитных колец МППМ: 1 — 35Н; 2 — 38SH; 3 — 38UH

намагниченностью МК на развиваемое ими усилие и жесткость. Определено, что наиболее приемлемое геометрическое соотношение составляет $0,5 < l < 0,8$. При этих значениях жесткость и усилие, развиваемое МППМ и ГМП, максимальны, а значит, использование постоянных магнитов наиболее рационально и экономически целесообразно. Установлено, что в МППМ с осевой намагниченностью МК и размерами $d = 50$ мм, $l = 10$ мм, $d = 1$ мм при двойной толщине 33 мм силовая характеристика достигает пикового значения 46 Н, после прохождения которого начинает убывать; при увеличении толщины на 14% оптимального значения силовое воздействие уменьшается на 21,27%.

Достоинством данной методики является возможность ее применения для магнитных подшипников на постоянных магнитах как с осевой намагниченностью магнитных колец, так и с радиальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brounbeck W.** Freischwebende Korper in elektrischen und magnetischen Feld. – Z. Phys., 1939.
2. **Brounbeck W.** Frein schwebende diamagnetischen Korper in Magnetfeld. – Z. Phys., 1939.
3. **Журавлев Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб: Политехника, 2003.
4. **Petzold O.** Hybridmagnete für einen magnetisch gelagerten Rundtisch. – Technische mechanik, 2006, Bd 26, N. 2.
5. <http://ferrite.ru/products/magnets/ndfeb>
6. **Мартыненко Г.Ю.** Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах. – Харьков: Вестник НТУ «ХПИ», 2007, № 38.
7. **Волкова З.А.** Расчет вала на прочность, жесткость и поперечные колебания: метод, указания к выполнению расчетно-графических работ. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010.

[11.09.12]

Авторы: Хайруллин Ирек Ханифович окончил Ивановский энергетический институт в 1963 г. Докторскую диссертацию защитил в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ) в 1981 г. Профессор кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Исмагилов Флюр Рашитович окончил Уфимский авиационный институт в 1973 г. Докторскую диссертацию защитил в УГАТУ в 1998 г. Заведующий кафедры «Электромеханика», проректор УГАТУ.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич окончил УГАТУ в 2010 г. Аспирант кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

