

И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА

На основе анализа электромагнитных процессов в магнитном подшипнике на постоянных магнитах, посредством компьютерного моделирования определены геометрические соотношения объема воздушного зазора и внутреннего кольца, при котором силовые характеристики максимальны, представлена экспериментальная верификация данных моделирования. *Гибридный магнитный подшипник; высокоскоростной шпиндельный узел; магнитный подшипник на постоянных магнитах*

В высокоскоростных шпиндельных узлах (ВШУ) с целью снижения потерь и повышения точности обработки применяются магнитные подшипники [1]. Перспективным, для практического приложения в системах ВШУ, является совместное применение активных магнитных подшипников (АМП) и магнитных подшипников на постоянных магнитах (МППМ) [2]. Основной характеристикой МППМ является силы, создаваемые в воздушном зазоре, которые зависят от величины воздушного зазора.

В работах [3, 4] рекомендуется использовать величину воздушного зазора МППМ в пределах 0,4–1,2 мм, в зависимости от геометрических параметров МППМ. Однако в [5] экспериментальным путем определено, что при увеличении величины зазора силы отталкивания увеличиваются.

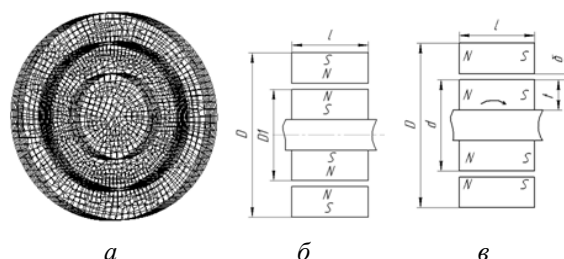
Ввиду противоречивости исследований представленных в литературе [3–5] важно определить влияние величины воздушного зазора на силовые характеристики МППМ и определить зависимость силовых характеристик МППМ от соотношения геометрических параметров МППМ и воздушного зазора.

Поставленная задача решалась путем моделирования МППМ методом конечных элементов. Конечно-элементная трехмерная модель и расчетные схемы исследуемых МППМ представлены на рис. 1.

Методика решения поставленных задач представляет собой совместное использование нескольких программных продуктов:

- SolidWorks, используемый для разработки геометрической модели;
- Ansys, среда компьютерного моделирования методом конечных элементов;

- Matlab, математический пакет, используемый для обработки данных полученных в результате моделирования.



**Рис. 1.** *a* – трехмерная конечно-элементная модель МППМ; *б* – расчетная схема МППМ с радиальным намагничиванием магнитных колец; *в* – расчетная схема МППМ с аксиальным намагничиванием магнитных колец

В качестве материала постоянных магнитов, принимается NdFeB 38Н с осевым и с радиальным направлением намагниченности, характеристики  $B_r = 1,22$  Тл,  $H_c = 1353$  кА/м, окружающая среда – воздух.

Основными задачами моделирования являются:

- определение зависимости силовых характеристик МППМ с радиальной и осевой намагниченностью магнитных колец от изменения величины воздушного зазора, шаг изменения величины воздушного зазора составлял 2 мм;
- определение зависимости силовых характеристик МППМ с радиальной и осевой намагниченностью магнитных колец от изменения безразмерного соотношения  $\lambda = V_\delta / V_{в.к.}$ , где  $V_\delta$  – объем воздушного зазора;  $V_{в.к.}$  – объем внешнего магнитного кольца; шаг изменения  $\lambda$  составлял 0,05.

При решении поставленных задач методом конечных элементов применяются уравнения

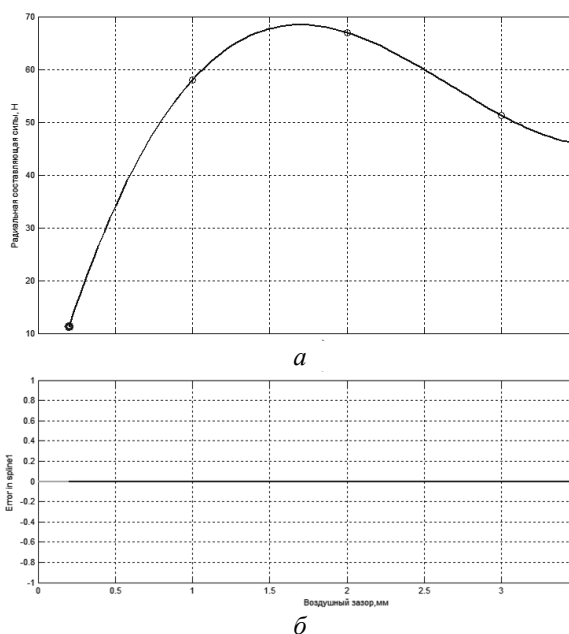
Лапласа. Для того чтобы уравнения Лапласа имели единственное решение для поставленных задач используются граничные условия на замкнутой границе [6]:

- граничные условия Дирихле –  $\varphi_M = f_1(x, y, z)$ ;
- граничные условия Неймана –  $\partial\varphi_M / \partial n = f_2(x, y, z)$ ;
- Граничные условия третьего рода –  $\partial\varphi_M / \partial n + f_3(\varphi_M) = f_4(x, y, z)$ .

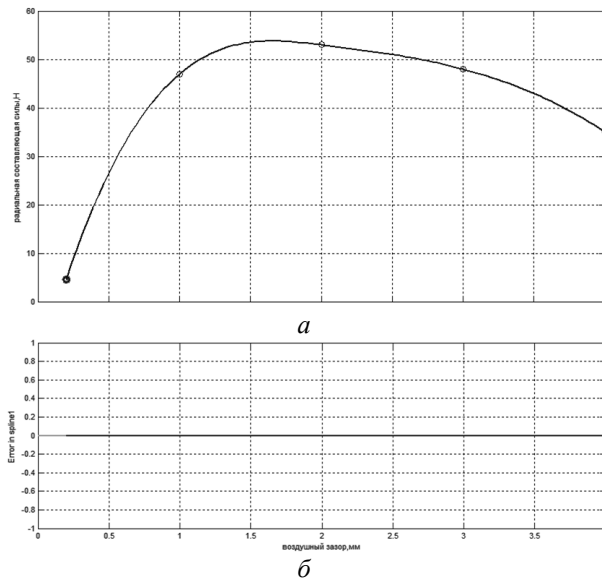
Также применяется ряд допущений:

- внутреннее и внешнее кольцо МППМ имеют одинаковую толщину и длину;
- кольца МППМ установлены без смещения друг относительно друга.

Задача определения зависимости силовых характеристик МППМ решалась на конечно-элементной модели, рис. 1, путем пошагового изменения величины воздушного зазора. В результате были определены силовые характеристики в зависимости от изменения величины зазора. После обработки полученных данных в математическом пакете Matlab, посредством интерполяции, определены кривые зависимости МППМ с осевой и радиальной намагниченностью магнитных колец от изменения величины воздушного зазора, рис. 2–3.



**Рис. 2.** *a* – кривая зависимости силовых характеристик от величины воздушного зазора для МППМ с радиальной намагниченностью магнитных колец; *б* – погрешность интерполяции



**Рис. 3.** *a* – кривая зависимости силовых характеристик от величины воздушного зазора для МППМ с осевой намагниченностью магнитных колец; *б* – погрешность интерполяции

Анализ результатов моделирования, рис. 2– 3 показал, что при увеличении зазора в МППМ с радиально намагниченными кольцами на 50% силовая характеристика МППМ увеличивается на 15,51%. Увеличение силовых характеристик при увеличении зазора наблюдается до определенного максимального значения  $\delta_{ор}$ . При  $\delta > \delta_{ор}$  наблюдается уменьшение силовых характеристик. Таким образом, определено, что в МППМ с радиальной намагниченностью магнитных колец имеется оптимальное значение величины воздушного зазора, при котором силовые характеристики максимальны. В частности, для МППМ с радиальной намагниченностью магнитных колец и геометрическими параметрами  $D = 30$  мм,  $L = 10$  мм,  $d = 5$  мм,  $\delta_{ор}$  составляет 1,7 мм.

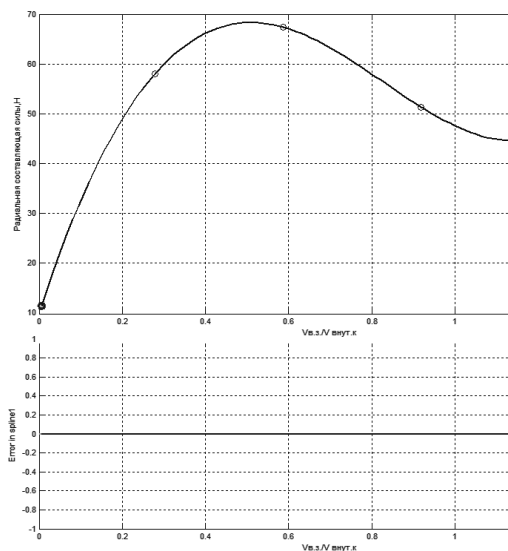
В МППМ с осевой намагниченностью магнитных колец характер кривой аналогичен. В них также имеет место оптимальное значение величины воздушного зазора. В частности для МППМ с радиальной намагниченностью магнитных колец, с геометрическими параметрами  $D = 30$  мм,  $L = 10$  мм,  $d = 5$  мм максимум величины воздушного зазора составляет 1,5 мм.

Таким образом, определено, что максимум силового воздействия достигается при оптимальной величине воздушного  $\delta_{ор}$ . Для различных геометрических параметров МППМ значение оптимальной величины воздушного зазора различно, что затрудняет применение получен-

ных результатов на практике. Ввиду этого важно оценить влияние безразмерного соотношения  $\lambda = V_{\delta} / V_{\text{внут. к.}}$  а силовые характеристики МППМ. Задача определения зависимости силовых характеристик МППМ от безразмерного соотношения  $\lambda = V_{\delta} / V_{\text{внут. к.}}$  решалась на конечно-элементной модели, рис. 1, путем пошагового изменения  $\lambda$ . В результате были определены значения силовых характеристик в зависимости от изменения  $\lambda$ . После обработки полученных данных в математическом пакете Matlab, посредством интерполяции, определены кривые зависимости МППМ с осевой и радиальной намагниченностью магнитных колец от изменения  $\lambda$ , рис. 4–5.

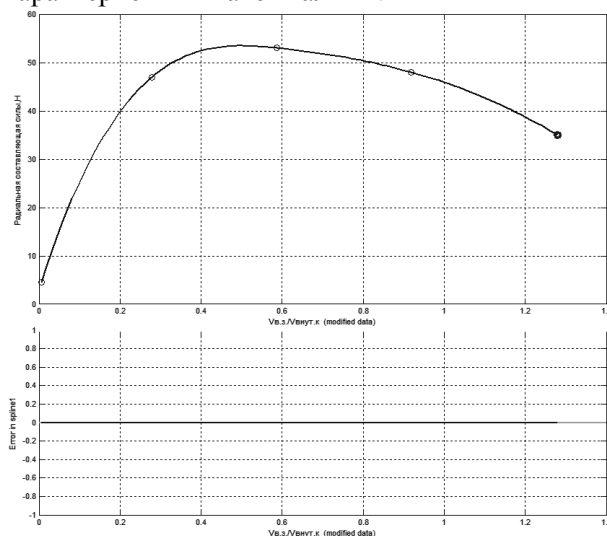
Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении  $\lambda$  на 50% силовые характеристики МППМ с радиально намагниченными кольцами увеличиваются на 12,5%, данный участок кривой соответствует  $\delta > \delta_{\text{оп}}$ . При  $\lambda = 0,3\text{--}0,7$  силовые характеристики МППМ с радиально намагниченными кольцами максимальны. После прохождения данного значения кривая резко убывает. Данный участок кривой соответствует значениям величины воздушного зазора  $\delta < \delta_{\text{оп}}$ .

Таким образом, в результате моделирования определено оптимальное безразмерное соотношение  $\lambda$  (0,3–0,7), при котором силовые характеристики максимальны.



**Рис. 4.** Зависимость силовых характеристик от отношения объема внутреннего кольцевого магнита к величине воздушного зазора для МППМ с осевой намагниченностью магнитных колец (сверху) и погрешность интерполяции (снизу)

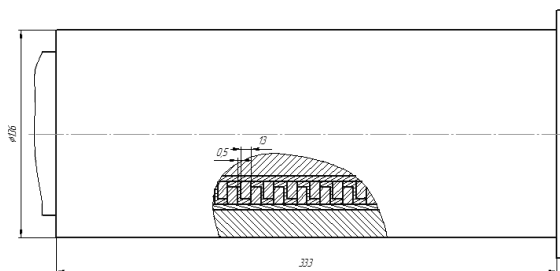
В МППМ с осевой намагниченностью магнитных колец характер кривой аналогичен. В них также имеет место оптимальное значение соотношения  $\lambda$  (0,3–0,7), при котором силовые характеристики максимальны.



**Рис. 5.** Зависимость силовых характеристик от отношения объема внутреннего кольцевого магнита к величине воздушного зазора для МППМ с радиальной намагниченностью магнитных колец (сверху) и погрешность интерполяции (снизу)

Ввиду этого при проектировании и разработке МППМ рекомендуется руководствоваться оптимальным значением безразмерного соотношения  $\lambda = 0,3\text{--}0,7$  для магнитных подшипников на постоянных магнитах с радиальной намагниченностью магнитных колец и с осевой намагниченностью магнитных колец.

В работе [7] представлены экспериментальные исследования конструкции МППМ с осевой намагниченностью постоянных магнитов, рис. 6. С целью подтверждения полученных в работе выводов и адекватности предложенного метода моделирования целесообразно произвести моделирование данной конструкции и сравнить с полученными экспериментальными результатами.



**Рис. 6.** Эскиз модели осевого МППМ

Конечно-элементная трехмерная модель исследуемого осевого МППМ представлена на рис. 7 и разработана по геометрическим параметрам, представленным в [7], рис. 6.

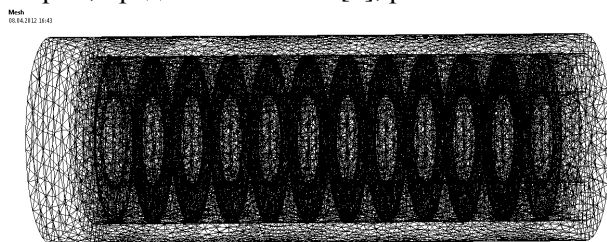


Рис. 7. Конечно-элементная модель осевого МППМ

Материал магнитных колец при моделировании  $NdFeB$  с осевой намагниченностью магнитных колец, характеристики  $B_r = 1,22$  Тл,  $H_c = 1353$  кА/м, окружающая среда – воздух, материал магнитопровода – сталь. При исследованиях представленной конструкции МППМ изменялась величина воздушного зазора, шаг изменения составлял 0,1 мм. В результате моделирования были определены силовые характеристики МППМ при различной высоте воздушного зазора, рис. 8.

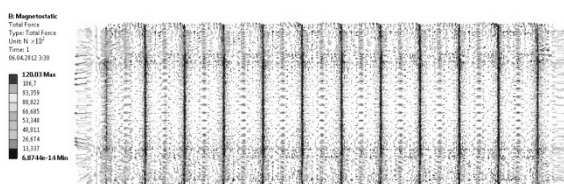


Рис. 8. Силовые характеристики осевого МППМ, высота воздушного зазора 0,2 мм

На рис. 9 представлен сравнительный анализ экспериментальных данных [7] и результатов моделирования.

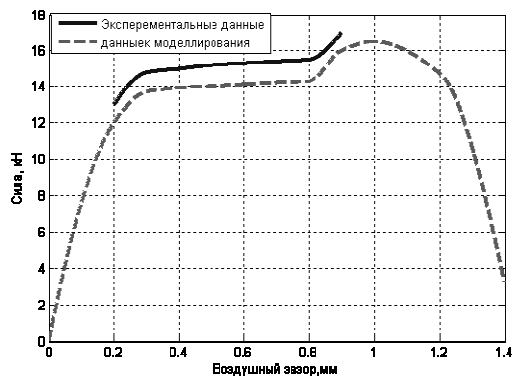


Рис. 9. Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования показал, что расхождение экспериментальных данных и моделирования не превысило 10%, причем данное расхождение вызвано не только погрешностью моделирования, но и неполнотой данных об экспериментальных исследованиях: материал магнитных колец и магнитопровода, полный размерный ряд, погрешность измерительных приборов.

Таким образом, представленная методика оптимизации величины воздушного зазора обладает достаточной точностью.

К достоинствам предложенной оптимизации величины воздушного зазора, по сравнению с экспериментальными исследованиями, относятся снижение временных затрат, затрат на материалы и приборы. Кроме того, при моделировании возможно получить данные, которые при экспериментальных исследованиях определить затруднительно, в частности определение силовых характеристик и параметров электромагнитного поля при малых геометрических размерах колец МППМ.

В работе исследовано влияние величины воздушного зазора на силовые характеристики магнитных подшипников на постоянных магнитах. Определено, что величина воздушного зазора имеет оптимальное значение, при котором силовые характеристики максимальны. Причем оптимум величины воздушного зазора определен как для магнитных подшипников с осевой намагниченностью постоянных магнитов, так и с радиальной намагниченностью. Также определено оптимальное значение безразмерного соотношения  $\lambda = V_{\delta} / V_{\text{внут. к.}}$ , которое составило 0,3–0,7 для магнитных подшипников с радиальной намагниченностью магнитных колец и для магнитных подшипников с осевой намагниченностью.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании магнитных подшипников на постоянных магнитах и гибридных магнитных подшипников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щетинин В. С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомангнитных опорах металлорежущих станков: автореферат дис... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2011
2. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.

3. **Барсуков В. Н.** Расчет специальных электрических машин и магнитных подшипников: учеб. пособие. Л.: ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1967. 152 с.
4. **Johan K. Fremerey**, Permanentmagnetische Lager: Jülich Forschungszentrum Jülich, 2000 г.
5. **Шаров В. С.** Особенности расчета магнитного подвеса роторов высокоскоростных электродвигателей. М.: МЭИ, 1982. 84 с.
6. **Буль О. Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. М.: АСАДЕМІА, 2006. 285 с.
7. **Гулиа Н. В.** Новая магнитная опора большой грузоподъемности // Вестник машиностроения. 2004. № 3.

#### ОБ АВТОРАХ

**Хайруллин Ирек Ханифович**, проф. каф. электро-механики. Дипл. инженер-электромеханик (Ивановск. энерг. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устр. упр. (УАИ, 1981). Иссл. в обл. электро-мех. преобр. энергии.

**Исмагилов Флюр Рашитович**, проф., зав. той же каф., проректор УГАТУ. Дипл. инженер-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.

**Вавилов Вячеслав Евгеньевич**, асп. той же каф. Дипл. инженер-электромеханик (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.