

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО БЕСКОНТАКТНОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА НА СИСТЕМЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

О. А. Черкасова<sup>1</sup>, А. А. Скрипкин<sup>2</sup>, С. А. Черкасова<sup>3</sup>

*Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики,  
CherkasovaOA@yandex.ru; ФГБОУ ВО «Саратовский национальный  
исследовательский университет имени Н. Г. Чернышевского» (1), г. Саратов;  
кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.» (2), г. Саратов;  
конструкторский отдел, ООО «Спецдортех» (3), г. Саратов, Россия*

**Ключевые слова:** бесконтактный магнитный подвес; компьютерное моделирование; магнитная индукция; магнитный квазиупругий коэффициент; нагрузочная способность; пондеромоторная сила; постоянный магнит.

**Аннотация:** Получены распределения магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Установлено, что при параллельном размещении тороидальных колец эллиптического сечения в магнитном подвесе магнитная индукция в 1,7 раз больше, чем при перпендикулярном размещении тех же колец. Проведен расчет пондеромоторной и магнитодвижущей сил между двумя тороидальными кольцевыми постоянными магнитами с радиальной намагниченностью эллиптического сечения в системе бесконтактного магнитного подвеса. Рассчитаны квазиупругие коэффициенты жесткости и статическая нагрузочная способность для обеих моделей. Показано, что жесткость подвеса монотонно понижается с уменьшением величины зазора независимо от модели.

---

### Введение

Как известно, постоянные магниты широко используются в различных электронных устройствах [1 – 7], их качество во многом зависит от материала магнита, намагниченности и размеров. Цилиндрические и кольцевые постоянные магниты с диаметральной намагниченностью широко используются как в магнитных подвесках и подшипниках, левитированных магнитных дисках, шестернях и муфтах [8, 9], так и в системах позиционирования [10 – 12]. Понимание распределения магнитного поля постоянного магнита играет ключевую роль в разработке магниточувствительных устройств [13] и медицинских приборов (то есть магнитно-резонансной томографии) [14, 15].

На сегодняшний момент интерес к магнитным подвесам возрос в связи с созданием магнитных подшипников, транспортных систем на магнитной подушке, универсальных систем бесконтактной связи между космическими объектами, систем ориентации, управления или стабилизации космических летательных аппаратов, в гироскопических системах, электротехнике и т.п. [4, 16 – 18]. Разработаны различные конструкции бесконтактных подвесов, как активного типа, так и на основе системы пассивных постоянных магнитов [7, 9, 19 – 22]. В свою очередь магнитные подшипники представляют собой бесконтактные подвесные устройства с различным приложением для вращения и перемещения [23].

Создание новых высокоэффективных электрических машин может потребовать разработки нестандартных конструкций, правильность которых будет доказана в том случае, если они основаны на адекватных методах анализа. Для большинства инженерных решений требуется использование нескольких кольцевых постоянных магнитов в осевом или радиальном расположении [22, 24, 25], что позволяет контролировать положение вдоль оси или центрирование оси. Поэтому необходимо определять магнитные силы взаимодействия в таких системах. Существует множество методов анализа устройств с постоянными магнитами и различных подходов к определению сил взаимодействия между ними [26, 27].

Основным элементом бесконтактного подвеса служит магнитная система, от конструкции которой будут зависеть силовые характеристики в рабочем зазоре при смещении ротора, а также жесткость самого подвеса. В итоге, основная проблема сводится к выбору материала магнитной системы.

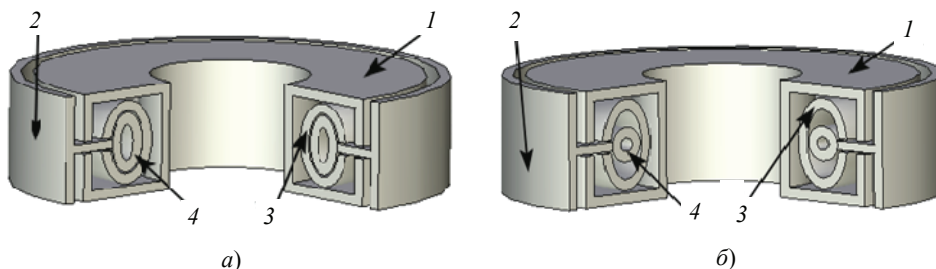
При рассмотрении магнитных подвесов, использующих силы пиннинга, появляется еще одна проблема – взаимное размагничивание элементов системы, следовательно, при выборе материала магнитных элементов системы основной упор делается на высокие показатели таких характеристик, как коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная индукция  $B_r$  и максимальное значение магнитной энергии  $(BH)_{max}$ .

Магнитные кольца из постоянных магнитов могут располагаться концентрически, либо коаксиально в системе подвеса, а сами магниты иметь радиальную или аксиальную намагниченность. Для производства постоянных магнитов используют бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты, редкоземельные (NdFeB, SmCo) и металлокерамические сплавы, различные магнитопласты и магнитоэласты.

### Материалы и методы

Известно, что постоянные магниты имеют нелинейный характер, следовательно, при сложной конфигурации магнитного тела аналитическое решение уравнения электромагнитного поля для магнитного потенциала в векторном или скалярном виде найти затруднительно, однако можно использовать численные методы. При компьютерном моделировании магнитного подвеса в системе подшипника использовался интегрированный пакет прикладных программ Elcut v.6.4 и LabelMover, использующий метод конечных элементов.

В работе [22] авторы установили, что для обеспечения устойчивого положения системы постоянных магнитов в конструкции бесконтактного подвеса за счет сил пиннинга необходимо использовать тороидальные постоянные магниты с эллиптическим сечением (рис. 1).



**Рис. 1. Модель бесконтактного магнитного подвеса в системе подшипника с параллельным (а) и перпендикулярным (б) расположением тороидальных колец: 1, 2 – соответственно внутреннее и наружное опорные кольца; 3, 4 – соответственно наружное и внутреннее тороидальные кольца из постоянных магнитов**

Предлагаемые авторами конструкции бесконтактного магнитного подвеса содержат наружное и внутреннее опорные кольца, а также жестко связанные с ними наружное и внутреннее тороидальные кольца, изготовленные из магнитотвердого сплава на основе редкоземельных металлов (**РЗМ**) с радиальным намагничиванием (см. рис. 1). Внутреннее тороидальное кольцо расположено в полости наружного.

В качестве материала для тороидальных колец использовали NdFeB НмБ 380/100 (ГОСТ Р 52956–2008), для опорных колец Ст2013 (ГОСТ 21427.2–83). Наиболее распространенными границами магнитных полей являются границы, к которым магнитный поток параллелен (то есть, условие Дирихле) и перпендикулярен (условия Неймана); поэтому при расчетах принималось, что векторный магнитный потенциал постоянен и равен нулю. Принцип создания модели и задание необходимых условий подробно рассмотрены в работе [28].

Основными параметрами, рассчитываемыми при компьютерном моделировании, выбраны нелинейные силовые характеристики [7, 18, 24, 29]: магнитная индукция или напряженность магнитного поля, пондеромоторная и магнитодвижущая силы, магнитный квазиупругий коэффициент и статическая нагрузочная способность.

Пондеромоторная сила  $f$  определяется тензором Максвелла по поверхности

$$f = \frac{1}{2} \oint_S (\mathbf{H}(\mathbf{nB}) + \mathbf{B}(\mathbf{nH}) - \mathbf{n}(\mathbf{HB})) dS,$$

где  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$  – векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции соответственно;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к контуру;  $S$  – площадь поверхности контура.

Магнитодвижущая сила  $F$  определяется как циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль выбранного контура

$$F = \int_L (\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}) dL,$$

где  $\boldsymbol{\tau}$  – единичный вектор, касательный к контуру;  $L$  – длина контура.

Выбранный контур параллелен оси вращения модели и проходит через геометрический центр тороидальных колец из постоянных магнитов.

Магнитный квазиупругий коэффициент, то есть жесткость на единицу площади поверхности подвеса  $K_S$  определяется как пондеромоторное усиление, которое создается подвесом на единицу длины смещения:

$$K_S = -\frac{\partial f}{\partial \delta},$$

где  $\delta$  – воздушный зазор.

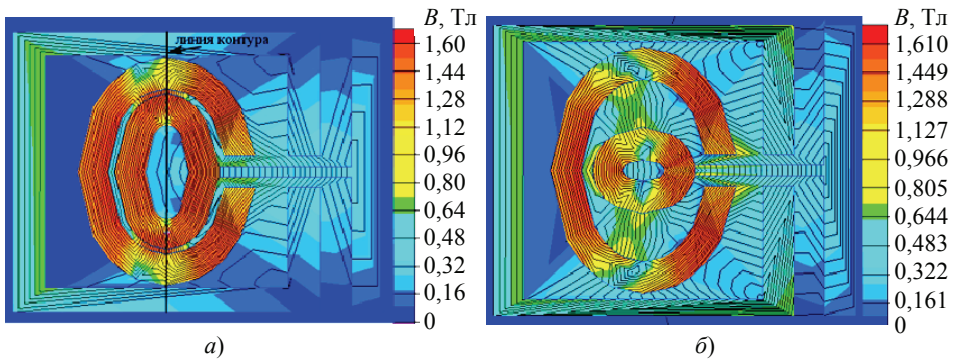
Статическая нагрузочная способность определяется как максимальная нагрузка, при которой отсутствует контакт колец бесконтактного магнитного подвеса при их вращении, определяемая силой отталкивания элементов подвеса:

$$F = \frac{1}{2} \oint_S (\mathbf{H}(\mathbf{nB}) + \mathbf{B}(\mathbf{nH}) - \mathbf{n}(\mathbf{HB})) dS.$$

Гармонический анализ распределений и обработка результатов моделирования проводились в среде Origin 7.0.

### Результаты моделирования

Распределение магнитной индукции в компьютерных моделях, полученное в результате компьютерного моделирования, показано на рис. 2. Результаты моделирования магнитной индукции в геометрическом центре эллиптического сечения магнитов и на некотором удалении от него, параллельно оси вращения модели,



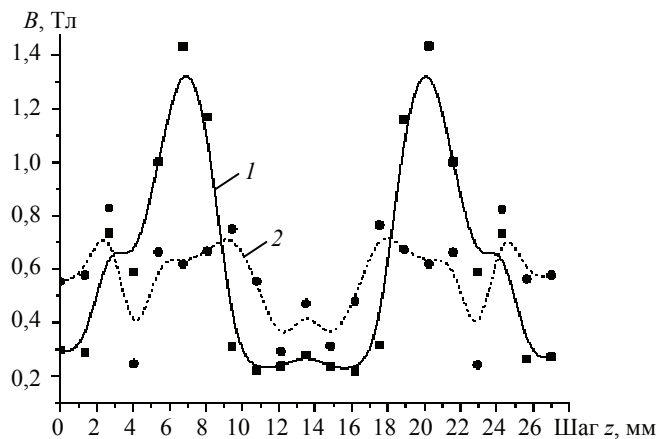
**Рис. 2. Распределение магнитной индукции  $B$  в модели бесконтактного магнитного подвеса в системе подшипника с параллельным (а) и перпендикулярным (б) расположением тороидальных колец**

представлены на рис. 3. Форма кривых, описывающих изменение магнитной индукции, совпадает, единственная разница – в значениях данной величины. Такое различие может быть объяснено величиной зазора между тороидальными кольцами эллиптического сечения: чем больше зазор, тем меньше значение магнитной индукции.

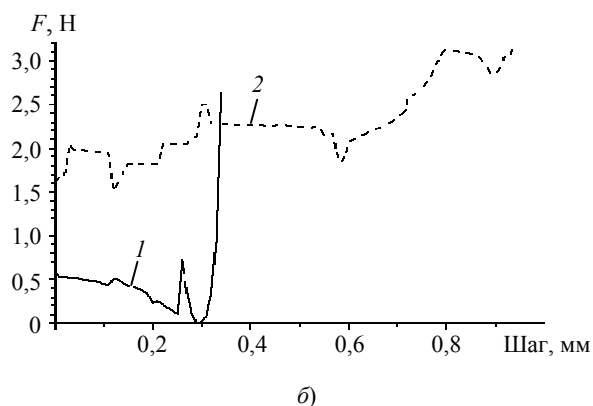
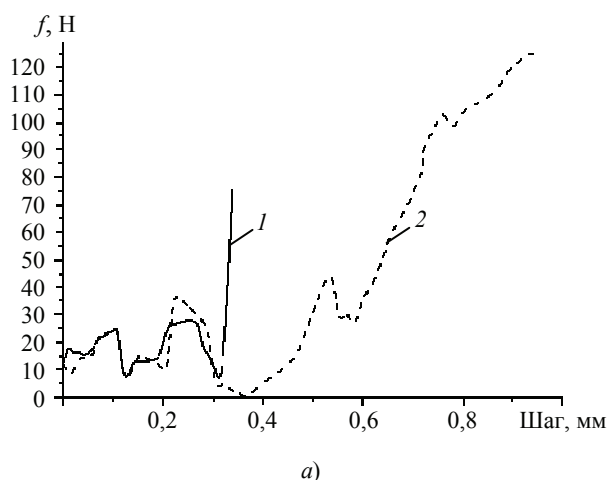
Для оценки пондеромоторной и магнитодвижущей сил моделировалась реакция внутреннего тороидального магнита на изменение воздушного зазора с внешним тороидальным постоянным магнитом, то есть его одновременное смещение от нулевого положения по осям  $X$  и  $Y$ , проходящим через геометрический центр системы постоянных магнитов, с шагом 0,01 мм (рис. 4). При смещении внутреннего тороидального кольца (см. рис. 1, позиция 4), внешнее кольцо постоянно магнита (см. рис. 1, позиция 3) оставалось неподвижным, так как конструктивно его смещение невозможно.

В связи с тем, что величина воздушного зазора разная для рассматриваемых моделей, для анализа выбран максимально возможный идентичный участок воздушного зазора, характерный для обеих моделей.

Как видно из рис. 4, а, кривые 1 и 2 имеют схожий характер на интервале [0; 0,311] мм, при величине зазора равного 0,1 мм для обеих моделей пондеромоторная сила равна 24,67 Н. В случае магнитодвижущей силы форма кривых не повторяется (см. рис. 4, б). Для модели с параллельным расположением тороидальных



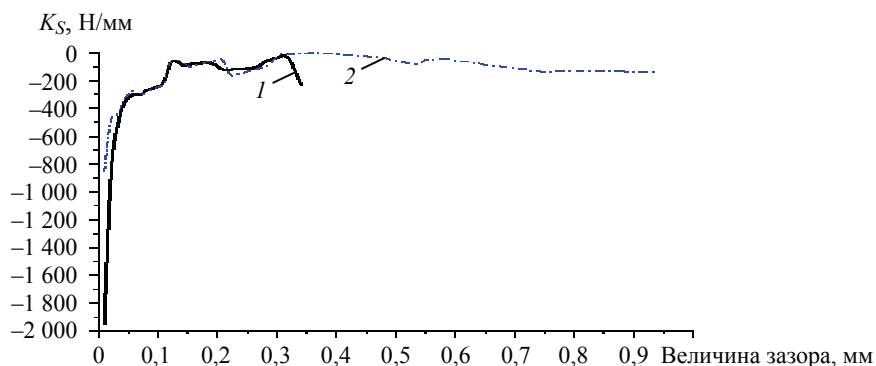
**Рис. 3. Распределение магнитной индукции на оси тороидальных колец эллиптического сечения с параллельным (1) и перпендикулярным (2) их расположением**



**Рис. 4. Распределение ponderomotive силы внутреннего тороидального кольца эллиптического сечения (а) и магнитодвижущей силы (б) для моделей с параллельным (1) и перпендикулярным (2) расположением тороидальных колец**

колец при уменьшении воздушного зазора магнитодвижущая сила по модулю уменьшается и только при минимальном зазоре резко увеличивается, что объясняется взаимодействием сил пиннинга (см. рис. 4, б, кривая 1). В случае со второй моделью наблюдается плавный рост магнитодвижущей силы, при этом значение силы в 3 – 5 раз больше (см. рис. 4, б, кривая 2). При величине зазора, равного 0,1 мм, магнитодвижущая сила для первой модели равна 450 А, для второй – 1 967 А.

При расчете магнитных квазиупругих коэффициентов получены идентичные результаты для обеих компьютерных моделей (рис. 5). Из анализа коэффициентов жесткости следует, что жесткость подвеса монотонно понижается с уменьшением величины зазора  $\delta$ . Такое поведение может быть связано с особенностями конструкции, а именно – концентрическим расположением тороидальных эллиптических колец одно в другом, при котором уменьшение величины зазора с одной стороны приводит к ее увеличению с другой. Причем увеличение/уменьшение тягового усилия при уменьшении/увеличении воздушного зазора возвращает систему к состоянию равновесия, то есть за счет сил пиннинга происходит самостабилизация системы постоянных магнитов.



**Рис. 5. Магнитный квазиупругий коэффициент для компьютерных моделей с параллельным (1) и перпендикулярным (2) расположением тороидальных колец**

Анализ статической нагрузочной способности показал, что для предложенных моделей (1) и (2) бесконтактного подвеса в системе подшипника максимальная нагрузка составляет соответственно 1,468 и 4,083 кН, что значительно больше по сравнению с газодинамическими и газостатическими подшипниками [30].

Таким образом, определение нелинейных силовых характеристик и магнитных квазиупругих коэффициентов бесконтактного магнитного подвеса позволит повысить адекватность указанных компьютерных моделей.

### Заключение

В результате проведенной работы созданы две компьютерные модели бесконтактного магнитного подвеса, состоящего из системы двух постоянных магнитов в форме тороидальных колец эллиптического сечения. С помощью метода конечных элементов получено распределение магнитного поля, генерируемого тороидальными магнитными кольцами эллиптического сечения с радиальной намагниченностью в любой точке пространства модели, как внутри магнита, так и в окружающем его пространстве (воздухе). Показано, что значения поперечной и магнитодвижущей сил изменяются с увеличением воздушного зазора. Такое поведение магнитных систем предложенных моделей обусловлено силами пиннинга. При анализе магнитных квазиупругих коэффициентов установили, что данный коэффициент стремится к значению 12,04 Н/мм при увеличении воздушного зазора, независимо от расположения тороидальных магнитных колец в системе подвеса.

Предложенные компьютерные модели бесконтактного магнитного подвеса могут быть использованы для расчетов магнитного подшипника, магнитных муфт и шестерней, магнитного поля кольцевого эллиптического цилиндра. В случаях, когда большая и малая полуоси эллиптического тора равны, он становится круглым. Поэтому полученная модель может быть использована для вычисления магнитного поля круглого тора с радиальной намагниченностью.

### Список литературы

1. Fountain, T. W. R. Wireless Control of Magnetic Helical Microrobots Using a Rotating-Permanent-Magnet Manipulator / T. W. R. Fountain, P. V. Kailat, J. J. Abbott // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3 – 7 May, 2010, Anchorage, AK, USA. – IEEE, 2010. – P. 576 – 581. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509245

2. Cuguat, O. Magnetic Micro-Actuators and Systems (Magmas) / O. Cuguat, J. Delamare, G. Reyne // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2003. – Vol. 39, No. 6. – P. 3607 – 3612. doi: 10.1109/TMAG.2003.816763
3. Permanent Magnet Couplings: Field and Torque Three-Dimensional Expressions Based on the Coulombian Model / R. Ravaut, G. Lemarquand, V. Lemarquand [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2009. – Vol. 45, No. 4. – P. 1950 – 1958. doi: 10.1109/TMAG.2008.2010623
4. Подшивалов, А. К. Электромагнитные устройства в системах левитации / А. К. Подшивалов, Е. С. Козлова // *Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов*. – 2018. – № 17. – С. 347 – 350.
5. Применение объемных высокотемпературных сверхпроводников в перспективных космических системах / В. А. Матвеев, В. А. Маевский, В. В. Асеев [и др.] // *Вестн. Московского гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение*. – 2016. – № 1 (106). – С. 15 – 32. doi: 10.18698/0236-3933-2016-1-15-32
6. Ribeiro, M. Demagnetization Analysis of Mechanical Manipulation on Permanent Magnets / M. Ribeiro, L. Martins, M. Ortner // *2018 UKSim-AMSS, Proceedings of the 20th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 27 – 29 March, 2018, Cambridge, UK. – IEEE, 2018. – P. 169 – 174. doi: 10.1109/UKSim.2018.00041
7. Force and Stiffness Calculation and Optimization of Permanent Magnetic Thrust Bearing Used in Vessels / X. Zhao, Ch. Shuai, W. Xu [et al.] // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2020. – Vol. 63, No 6. – P. 1 – 16. doi: 10.3233/JAE-209007
8. Characteristic Analysis on Permanent Magnet Synchronous Machines with Three Types of Diametrically Magnetized Rotors under Magnetic Circuit Construction Conditions / S. M. Jang, M. M. Koo, Y. S. Park [et al.] // *Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference*, 9 – 12 October, 2012, Seoul, Korea (South). – IEEE, 2012. – P. 227 – 230. doi: 10.1109/VPPC.2012.6422529
9. Canders, W.-R. Contactless Magnetic Bearings for Flywheel Energy Storage Systems / W.-R. Canders, H. May, J. Hoffmann // *Proceedings of the 8th International Symposium on magnetic suspension technology*, August, 2005, Dresden. – URL : [https://www.researchgate.net/publication/267642500\\_Contactless\\_Magnetic\\_Bearings\\_for\\_Flywheel\\_Energy\\_Storage\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/267642500_Contactless_Magnetic_Bearings_for_Flywheel_Energy_Storage_Systems) (дата обращения: 01.10.2021).
10. Аналого-цифровые преобразователи составляющих перемещения с применением микроэлектронных синусно-косинусных магнитных энкодеров / Ю. С. Смирнов, Т. А. Козина, Е. В. Юрасова, А. В. Соколов // *Измерительная техника*. – 2014. – № 1. – С. 28 – 31.
11. Trackhold: A Novel Passive Arm-Support Device / B. Lenzo, M. Fontana, S. Marcheschi [et al.] // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2016. – Vol. 8, No. 2. – P. 021007. doi: 10.1115/1.4031716
12. Wu, J. Study on the Torque of Sleeve Permanent Magnetic Couplings / J. Wu, X. Li, L. Guo // *Advanced Manufacturing and Automation VIII*. – Springer, Singapore, 2019. – P. 694 – 700.
13. Портной, Г. Я. Современные магниточувствительные датчики Холла и приборы на их основе / Г. Я. Портной // *Вестник автоматизации*. – 2013. – № 1 (39). – С. 7 – 12.
14. Ciarrocchi, M. Design of an Elliptical Permanent Magnet for Surface Magnetic Resonance Imaging / M. Ciarrocchi, V. Dimicoli, M. Alecci [et al.] // *Measurement Science and Technology*. – 2009. – Vol. 20, No. 1. – P. 017002. doi: 10.1088/0957-0233/20/1/017002



15. Miyata, K. Analysis of Magnetic Characteristics of Permanent Magnet Assembly for MRI Devices Taking Account of Hysteresis and Eddy Current / K. Miyata, K. Ohashi, N. Takahashi [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1998. – Vol. 34, No. 5. – P. 3556 – 3559. doi: 10.1109/20.717839
16. Козорез, В. В. Динамические системы магнитно взаимодействующих свободных тел / В. В. Козорез. – Киев : Наук. думка, 1981. – 140 с.
17. First Heavy Load Bearing for Industrial Application with Shaft Loads up to 10 kN / H. Walter, J. Bock, Ch. Frohne [et al.] // *Journal of Physics Conference Series*. – 2006. – Vol. 43. – P. 995 – 998. doi: 10.1088/1742-6596/43/1/243
18. Филатов, А. В. Расчет магнитной подвески с коротким замыканием сверхпроводящие контуры для низкотемпературных машин / А. В. Филатов, В. А. Матвеев // *Вестн. Московского гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение*. – 1999. – № 1 (33). – С. 49 – 59.
19. Yonnet, J.-P. Permanent Magnet Bearing and Coupling // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1981. – Vol. 17, Issue 1. – P. 1169 – 1173. doi: 10.1109/TMAG.1981.1061166
20. Пат. 204695 Российская Федерация, МПК F16C 32/04, F16C 39/06. Бесконтактный магнитный подшипник / А. А. Скрипкин, А. В. Королев, А. А. Королев, О. А. Черкасова ; заявитель и патентообладатель СГТУ имени Гагарина Ю. А. – № 2021107834 ; заявл. 23.03.2021 ; опубл. 07.06.2021, Бюл. № 16. – 12 с.
21. Мартыненко, Г. Ю. Магнитный подшипник на постоянных кольцевых магнитах с изменяемой жесткостью / Г. Ю. Мартыненко // *Проблемы машиностроения*. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 46 – 55.
22. Черкасова, О. А. О принципиальной возможности создания бесконтактного магнитного подвеса на постоянных магнитах / О. А. Черкасова, А. А. Скрипкин // *Авиационная промышленность*. – 2021. – № 1. – С. 25 – 30.
23. Lemarquand, V. Passive Permanent Magnet Bearing for Rotating Shaft: Analytical Calculation / V. Lemarquand, G. Lemarquand // *Magnetic Bearings, Theory and Applications* / Ed. B. Polajzer. – Sciyo, 2010. – P. 85 – 116.
24. Modeling and Development of Passive Permanent Magnetic Bearing for a Small Cross Flow Vertical Axis Wind Turbine / S. Seralathan, B. V. Reddy, M. Yadav [et al.] // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2018. – Vol. 8, No. 4. – P. 1868 – 1880.
25. Черкасова, О. А. Некоторые особенности конструкции бесконтактного магнитного подвеса на системе постоянных магнитов / О. А. Черкасова, А. А. Скрипкин // *Авиационная промышленность*. – 2021. – № 2. – С. 31 – 35.
26. Attraction Magnetic Force Calculation of Axial Passive Magnetic Bearing / A. Vučković, S. Aleksić, S. Plić [et al.] // *Electrical and Electronic Engineering*. – 2013. – Vol. 3, No. 2. – P. 43 – 48. doi: 10.5923/j.eee.20130302.03
27. Nguyen, T. V. Analytical Computation of the Magnetic Field of a Conical Permanent Magnet with Arbitrarily Uniform Magnetization / T. V. Nguyen // *AIP Advances*. – 2020. – Vol. 10, Issue 4. – P. 045208. doi: 10.1063/5.0004211
28. Черкасова, О. А. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования / О. А. Черкасова // *Гетеромагнитная микроэлектроника*. – 2014. – № 17. – С. 112 – 120.
29. Урман, Ю. М. О левитации диамагнитных тел в магнитном поле / Ю. М. Урман, Н. А. Бугрова, Н. И. Лапин // *Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 80, № 9. – С. 25 – 33.
30. Мордвинкин, В. А. Несущая способность упорного газостатического подшипника (УГСП) с учетом вращения / В. А. Мордвинкин // *Вестн. Донского гос. техн. ун-та*. – 2008. – Т. 8, № 2 (37). – С. 165 – 169.



## Computer Simulation of a Radial Contactless Magnetic Suspension on a Permanent Magnet System

O. A. Cherkasova<sup>1</sup>, A. A. Skripkin<sup>2</sup>, S. A. Cherkasova<sup>3</sup>

*Department of General, Theoretical and Computer Physics,  
CherkasovaOA@yandex.ru; Saratov National Research University  
named after N. G. Chernyshevsky (1), Saratov;*

*Department of Technology of Mechanical Engineering,  
Gagarin Saratov State Technical University (2), Saratov;  
Design Department, Spetsdortekh LLC (3), Saratov, Russia*

**Keywords:** contactless magnetic suspension; computer modelling; magnetic induction; magnetic quasi-elastic coefficient; load capacity; ponderomotive force; permanent magnet.

**Abstract:** The distributions of magnetic induction and magnetic field strength are obtained. It was found that with a parallel arrangement of toroidal rings of elliptical cross-section in a magnetic suspension, the magnetic induction is 1.7 times higher than with a perpendicular arrangement of the same rings. The calculation of the ponderomotive and magnetomotive forces between two toroidal annular permanent magnets with a radial magnetization of an elliptical section in a contactless magnetic suspension system is carried out. Quasi-elastic stiffness coefficients and static load capacity were calculated for both models. It is shown that the rigidity of the suspension decreases monotonically with a decrease in the size of the gap, regardless of the model.

### References

1. Fountain T.W.R., Kailat P.V., Abbott J.J. Wireless Control of Magnetic Helical Microrobots Using a Rotating-Permanent-Magnet Manipulator, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3 - 7 May, 2010, Anchorage, AK, USA, IEEE, 2010, pp. 576-581, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509245
2. Cuguat O., Delamare J., Reyne G. Magnetic Micro-Actuators and Systems (Magmas), *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 3607-3612, doi: 10.1109/TMAG.2003.816763
3. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V. [et al.] Permanent Magnet Couplings: Field and Torque Three-Dimensional Expressions Based on the Coulombian Model, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1950-1958, doi: 10.1109/TMAG.2008.2010623
4. Podshivalov A.K., Kozlova Ye.S. [Electromagnetic devices in levitation systems], *Tekhnika XXI veka glazami molodykh uchenykh i spetsialistov* [Technology of the XXI century through the eyes of young scientists and specialists], 2018, no. 17, pp. 347-350. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Matveyev V.A., Mayevskiy V.A., Aseyev V.V., Ivliyev A.S., Sysoyev M.A. [Application of bulk high-temperature superconductors in promising space systems], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroyeniye* [Bulletin of the Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Series: Instrumentation], 2016, no. 1 (106), pp. 15-32, doi: 10.18698/0236-3933-2016-1-15-32 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Ribeiro, M. Martins L., Ortner M. 2018 UKSim-AMSS, Proceedings of the 20th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim), 27 - 29 March, 2018, Cambridge, UK, IEEE, 2018, pp. 169-174, doi: 10.1109/UKSim.2018.00041

7. Zhao X., Shuai Ch., Xu W. [et al.] Force and Stiffness Calculation and Optimization of Permanent Magnetic Thrust Bearing Used in Vessels, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, vol. 63, no 6, pp. 1-16, doi: 10.3233/JAE-209007
8. Jang S.M., Koo M.M., Park Y.S. [et al.] Characteristic Analysis on Permanent Magnet Synchronous Machines with Three Types of Diametrically Magnetized Rotors under Magnetic Circuit Construction Conditions, Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, 9 - 12 October, 2012, Seoul, Korea (South), IEEE, 2012, pp. 227-230, doi: 10.1109/VPPC.2012.6422529
9. [https://www.researchgate.net/publication/267642500\\_Contactless\\_Magnetic\\_Bearings\\_for\\_Flywheel\\_Energy\\_Storage\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/267642500_Contactless_Magnetic_Bearings_for_Flywheel_Energy_Storage_Systems) (accessed 01 October 2021).
10. Smirnov Yu.S., Kozina T.A., Yurasova Ye.V., Sokolov A.V. [Analog-to-digital converters of displacement components with the use of microelectronic sinecosine magnetic encoders], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2014, no. 1, pp. 28-31. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Lenzo B., Fontana M., Marcheschi S. [et al.] Trackhold: A Novel Passive Arm-Support Device, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, vol. 8, no. 2, p. 021007, doi: 10.1115/1.4031716
12. Wu J., Li X., Guo L. *Advanced Manufacturing and Automation VIII*, Springer, Singapore, 2019, pp. 694-700.
13. Portnoy G.Ya. [Modern magnetically sensitive Hall sensors and devices based on them], *Vestnik avtomatizatsii* [Bulletin of automation], 2013, no. 1 (39), pp. 7-12. (In Russ.)
14. Ciarrocchi M., Dimiccoli V., Alecci M., Sotgiu A., Galante A. Design of an Elliptical Permanent Magnet for Surface Magnetic Resonance Imaging, *Measurement Science and Technology*, 2009, vol. 20, no. 1, p. 017002, doi: 10.1088/0957-0233/20/1/017002
15. Miyata K., Ohashi K., Takahashi N. [et al.] Analysis of Magnetic Characteristics of Permanent Magnet Assembly for MRI Devices Taking Account of Hysteresis and Eddy Current, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 3556-3559, doi: 10.1109/20.717839
16. Kozorez V.V. *Dinamicheskiye sistemy magnitno vzaimodeystvuyushchikh svobodnykh tel* [Dynamical systems of magnetically interacting free bodies], Kiev: Naukova dumka, 1981, 140 p. (In Russ.)
17. Walter H., Bock J., Frohne Ch. [et al.] First Heavy Load Bearing for Industrial Application with Shaft Loads up to 10 kN, *Journal of Physics Conference Series*, 2006, vol. 43, pp. 995-998, doi: 10.1088/1742-6596/43/1/243
18. Filatov A.V., Matveyev V.A. [Calculation of the magnetic suspension with short circuit superconducting circuits for low-temperature machines], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroyeniye* [Bulletin of the Moscow State Technical University N. E. Bauman. Series: Instrumentation], 1999, no. 1 (33), pp. 49-59.
19. Yonnet J.-P. Permanent Magnet Bearing and Coupling, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1981, vol. 17, issue 1, pp. 1169-1173, doi: 10.1109/TMAG.1981.1061166
20. Skripkin A.A., Korolev A.V., Korolev A.A., Cherkasova O.A. *Beskontaktnyy magnitnyy podshipnik* [Contactless magnetic bearing], Russian Federation, 2021, Pat. 204695. (In Russ.)
21. Martynenko G.Yu. [Magnetic bearing on permanent annular magnets with variable stiffness], *Problemy mashinostroyeniya* [Problems of mechanical engineering], 2008, vol. 11, no. 2, pp. 46-55. (In Russ.)

22. Cherkasova O.A., Skripkin A.A. [On the fundamental possibility of creating a contactless magnetic suspension on permanent magnets], *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry], 2021, no. 1, pp. 25-30. (In Russ., abstract in Eng.)
23. Lemarquand V., Lemarquand G., Polajzer B. [Ed.] *Magnetic Bearings, Theory and Applications*, Sciyo, 2010, pp. 85-116.
24. Seralathan S., Reddy B.V., Yadav M. [et al.] Modeling and Development of Passive Permanent Magnetic Bearing for a Small Cross Flow Vertical Axis Wind Turbine, *International Journal of Renewable Energy Research*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 1868-1880.
25. Cherkasova O.A., Skripkin A.A. [Some design features of a contactless magnetic suspension on a system of permanent magnets], *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry], 2021, no. 2, pp. 31-35. (In Russ., abstract in Eng.)
26. Vučković A., Aleksić S., Ilić S. [et al.] Attraction Magnetic Force Calculation of Axial Passive Magnetic Bearing, *Electrical and Electronic Engineering*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 43-48, doi: 10.5923/j.eee.20130302.03
27. Nguyen T.V. Analytical Computation of the Magnetic Field of a Conical Permanent Magnet with Arbitrarily Uniform Magnetization, *AIP Advances*, 2020, vol. 10, issue 4, p. 045208, doi: 10.1063/5.0004211
28. Cherkasova O.A. [Study of the magnetic field of a permanent magnet using computer modeling], *Geteromagnitnaya mikroelektronika* [Heteromagnetic microelectronics], 2014, no. 17, pp. 112-120. (In Russ., abstract in Eng.)
29. Urman Yu.M., Bugrova N.A., Lapin N.I. [About levitation of diamagnetic bodies in a magnetic field], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2010, vol. 80, no. 9, pp. 25-33. (In Russ., abstract in Eng.)
30. Mordvinkin V.A. [Bearing capacity of a thrust gas-static bearing (UGSP) taking into account rotation], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2008, vol. 8, no. 2 (37), pp. 165-169. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Computer-Simulation einer radialen kontaktlosen magnetischen Aufhängung auf dem System von Dauermagneten**

**Zusammenfassung:** Es sind die Verteilungen der magnetischen Induktion und der magnetischen Feldstärke erhalten. Es ist festgestellt, dass bei paralleler Anordnung torusförmiger Ringe mit elliptischem Querschnitt in einer magnetischen Aufhängung die magnetische Induktion 1,7 Mal höher ist als bei senkrechter Anordnung gleicher Ringe. Die Berechnung der ponderomotorischen und magnetomotorischen Kräfte zwischen zwei torusförmigen ringförmigen Permanentmagneten mit radialer Magnetisierung des elliptischen Abschnitts in dem berührungslosen magnetischen Aufhängungssystem ist durchgeführt. Für beide Modelle sind quasi-elastische Steifigkeitsbeiwerte und statische Tragfähigkeit berechnet. Es ist gezeigt, dass die Steifigkeit der Aufhängung modellunabhängig mit abnehmender Spaltgröße monoton abnimmt.

---

### **Simulation informatique de la suspension magnétique radiale sans contact sur le système d'aimants permanents**

**Résumé:** Sont obtenues les distributions d'induction magnétique et de champ magnétique tendu. Est constaté que lorsque des anneaux toroïdaux de section elliptique sont placés en parallèle dans une suspension magnétique, l'induction magnétique est de

1,7 fois plus grande que lorsque les mêmes anneaux sont placés perpendiculairement. Est effectué le calcul de la force pondéromotrice et magnétomotrice entre deux aimants permanents toroïdaux à magnétisation radiale elliptique dans un système de poids magnétique sans contact. Sont calculés les coefficients de rigidité quasi-élastiques et la capacité de charge statique pour les deux modèles. Est démontré que la rigidité de la suspension diminue de façon monotone avec une diminution de l'écart, quel que soit le modèle.

---

**Авторы:** *Черкасова Ольга Алексеевна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей, теоретической и компьютерной физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский университет имени Н. Г. Чернышевского», г. Саратов; *Скрипкин Александр Александрович* – доктор технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», г. Саратов; *Черкасова Светлана Алексеевна* – кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, конструкторский отдел, ООО «Спецдортех», г. Саратов, Россия.

**Рецензент:** *Сивяков Борис Константинович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», г. Саратов, Россия.