

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. А. Черкасова

Целью настоящей работы является численное моделирование бесконтактного магнитного подвеса на основе постоянных магнитов из магнитотвердого сплава на основе редкоземельных металлов NdFeB и последующий расчет силовых характеристик. В качестве объектов исследования рассмотрены две модели пассивного бесконтактного магнитного подшипника, состоящего из системы двух концентрических тороидальных магнитных колец эллиптического сечения с радиальной намагниченностью. Внутреннее тороидальное кольцо расположено в полости наружного тороидального кольца, при этом большие полуоси внутреннего и наружного тороидального магнитов взаимно перпендикулярны или параллельны. При численном моделировании магнитного подвеса в системе подшипника использовался метод конечных элементов с использованием программного обеспечения Elcut и LabelMover. Гармонический анализ распределений и обработка результатов моделирования проводились в среде Origin. Получены распределения магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Установлено, что при параллельном размещении тороидальных колец эллиптического сечения в магнитном подвесе магнитная индукция в полтора раза больше, чем при перпендикулярном размещении тех же колец. Произведен 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 для обеих моделей. Показано, что жесткость подвеса монотонно уменьшается с увеличением величины зазора независимо от модели.

Ключевые слова: постоянный магнит, бесконтактный магнитный подвес, напряженность магнитного поля, пондеромоторная сила, магнитный квазиупругий коэффициент, численное моделирование.

Введение

На сегодняшний момент постоянные магниты широко используются в различных электронных изделиях [1 – 4], и их качество во многом зависит от материала, из которого они сделаны, способа намагничивания и формы. Наиболее широко используются постоянные магниты цилиндрической и кольцевой формы с аксиальной и радиальной намагниченностью. Их используют в различных типах магнитных подвесов, подшипниках, дисках, шестерен и муфт. Особое распространение постоянные магниты получили в системах позиционирования [5]. Для работы большинства магниточувствительных устройств и медицинских приборов (то есть магнитно-резонансной томографии) помимо формы необходима информация о распределении магнитного поля системы, собранной из постоянных магнитов, в рабочем зазоре или канале.

В настоящее время особое внимание уделяется разработке различных конструкций бесконтактных подвесов как активного, так и пассивного типа [3, 4, 6 – 8]. Кроме того, бесконтактные магнитные подвесы используются как составная часть магнитного подшипника с различным приложением для вращения или перемещения.

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 осе-

вом или диаметральном расположении [7 – 9], что позволяет контролировать положение вдоль оси или центрирование данной оси. В связи с чем необходимо определять магнитные силы взаимодействия в таких системах. Современное состояние методов анализа электронных устройств с постоянными магнитами позволяет выбрать требуемый метод, исходя из заданных условий.

При создании любой магнитной системы в электронном устройстве основная проблема, с которой сталкиваются разработчики, сводится к выбору материала магнитов. В основном для производства постоянных магнитов используют бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты (Ba/SrO), редкоземельные неодимовый и самарий-кобальтовый (NdFeB, SmCo) и металлокерамические сплавы, различные магнитопласты и магнитоэласты.

При рассмотрении магнитных подвесов, использующих силы пиннинга, возникает еще одна проблема – это 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 $(BH)_{max}$.

Целью настоящей работы является численное моделирование бесконтактного магнитного подвеса на основе постоянных магнитов из магнитотвердого сплава на основе редкоземельных металлов NdFeB и последующий расчет магнитных силовых характеристик.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были созданы две математические модели бесконтактного магнитного подвеса в системе подшипника на основе прототипов [6, 8, 9]. Магнитный подшипник (рис. 1, *a*) содержит наружное 1 и внутреннее 2 опорные кольца с возможностью свободного вращения относительно друг друга. В полости внутреннего опорного кольца расположен магнитный подвес. Подвес состоит из наружного 3 и внутреннего 4 тороидальных колец эллиптического сечения, изготовленных из магнитотвердого сплава с радиальной намагниченностью. При этом внутреннее тороидальное кольцо эллиптического сечения расположено внутри наружного и жестко связано через цапфу 5 с наружным опорным кольцом магнитного подшипника. Модели отличались друг от друга расположением тороидальных колец в подвесе: параллельным или перпендикулярным.

В качестве материала для тороидальных колец использовали NdFeB марки НмБ 380/100 (ГОСТ Р 52956-2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры), для опорных колец – сталь марки 2013 (ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая).

Для оценки магнитных характеристик бесконтактного подвеса в системе подшипника проведены электромагнитные расчеты с использованием метода конечных элементов в программной среде Elcut. Силовое воздействие моделировалось с помощью параметрического анализа в LabelMover, то есть одновременное смещение внутреннего тороидального кольца эллиптического сечения от нулевого положения по осям X и Y , проходящим через геометрический центр системы постоянных магнитов, с шагом 0,01 мм. Особенности построения моделей пространственного магнитостатического поля и пондеромоторных нагрузок прецизионной магнитной системы подробно рассмотрены в работах [9, 10]. Обработка результатов моделирования проводилась в среде Origin.

Основными параметрами, рассчитываемыми при численном моделировании, были выбраны нелинейные силовые характеристики [4, 9]: напряженность магнитного поля, пондеромоторная и магнитодвижущая сила, магнитный квазиупругий коэффициент.

Пондеромоторная сила f определяется тензором Максвелла по поверхности. Магнитодвижущая сила F определяется как циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль выбранного контура. Контур для обеих моделей проходил через геометрическую ось тороидальных колец и был параллелен оси вращения подшипника. Длина контура соответствовала высоте подшипника, то есть

высоте наружного опорного кольца. Магнитный квазиупругий коэффициент, то есть жесткость на единицу площади поверхности подвеса K_S , определяется как пондеромоторное усиление, которое создается подвесом на единицу длины смещения, то есть производная от пондеромоторной силы со знаком минус. Знак минус указывает на противоположное действие вектора пондеромоторной силы.

Результаты исследования

Магнитные системы подвеса в системе подшипника прототипов [3, 8] показаны на рис. 1. Для оценки пондеромоторной (рис. 2) и магнитодвижущей силы (рис. 3) моделировалась реакция внутреннего тороидального магнита на изменение воздушного зазора с внешним тороидальным постоянным магнитом.

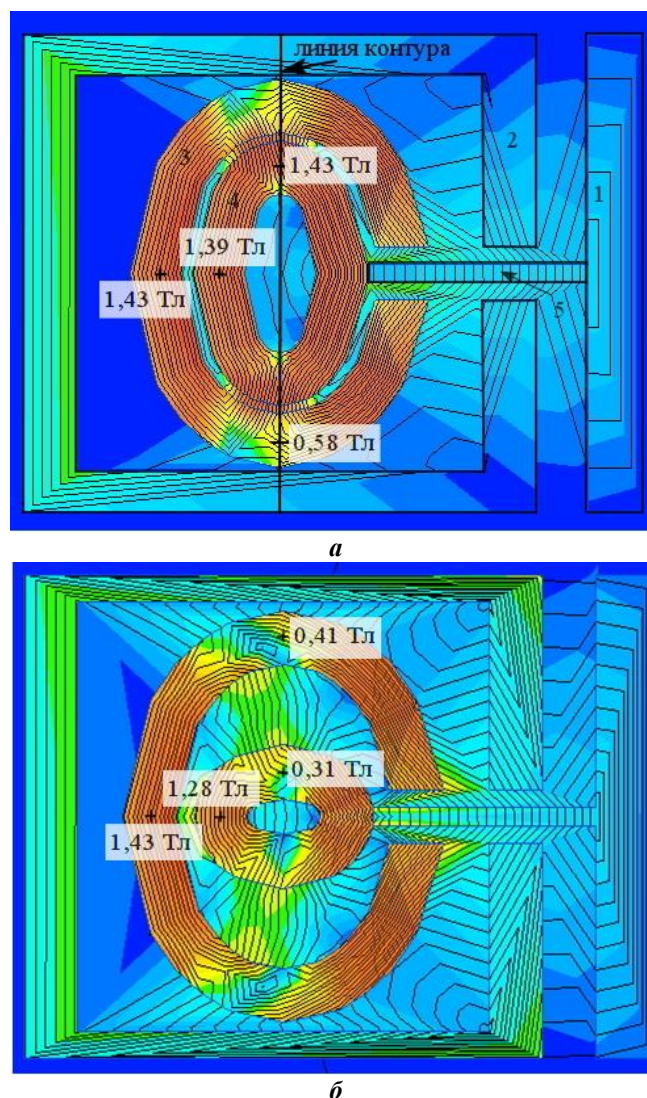


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в модели бесконтактного магнитного подвеса в системе подшипника: *a* – с параллельным расположением тороидальных колец; *б* – с перпендикулярным расположением тороидальных колец

Результат моделирования позволяет установить, что магнитная индукция в модели с параллельным расположением магнитов (рис. 1, а) составляет 1,43 Тл для внутреннего тороидального магнита и 0,58 Тл для внешнего тороидального магнита на оси геометрического центра магнитной системы, в то время как для модели с перпендикулярным расположением постоянных тороидальных магнитов (рис. 1, б) она, соответственно, равна 0,41 и 0,31 Тл. Такое различие может быть объяснено величиной зазора между тороидальными кольцами эллиптического сечения: чем больше зазор, тем меньше значение магнитной индукции.

Из-за конструктивных особенностей величина воздушного зазора разная для рассматриваемых моделей, поэтому для анализа был выбран максимально возможный идентичный участок воздушного зазора, характерный для обеих моделей, равный 0,4 мм.

Как видно из рис. 2, 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 (рис. 3) форма кривых не повторяется. Для модели с параллельным расположением тороидальных колец (рис. 3, кривая 1) при увеличении воздушного зазора до 0,3 мм магнитодвижущая сила возрастает до величины минус 12 А и только при максимальном зазоре 0,31 мм резко уменьшается, что можно объяснить взаимодействием сил отталкивания/притяжения между постоянными магнитами тороидальной формы. Для второй модели (рис. 3, кривая 2) наблюдается спад магнитодвижущей силы, при этом значение силы в 3 – 5 раз меньше. При величине зазора, равного 0,1 мм, магнитодвижущая сила для первой модели равна минус 450 А, для второй модели – минус 1967 А. При воздушном зазоре в 0,3 мм магнитодвижущая сила для второй модели – минус 2397 А.

Результаты расчета магнитных квазиупругих коэффициентов для обеих математических моделей представлены на рис. 4. Установлено, что данный коэффициент для модели с параллельным расположением тороидальных колец эллиптического сечения равен минус 25,23 Н/мм при воздушном зазоре 0,32 мм, для другой модели – минус 8,21 Н/мм при воздушном зазоре в 0,31 мм. При минимальном отклонении от положения равновесия магнитных колец в 0,01 мм магнитный квазиупругий коэффициент равен для первой модели минус 1953,07 Н/мм, для второй модели – минус 854,8 Н/мм.

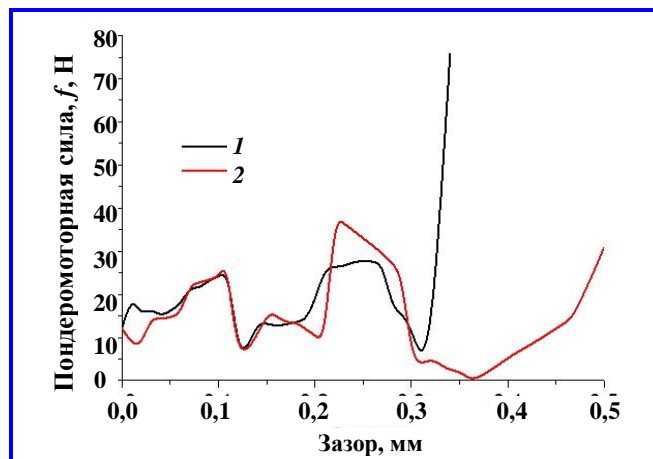


Рис. 2. Распределение пондеромоторной силы внутреннего тороидального кольца эллиптического сечения для моделей: 1 – с параллельным расположением тороидальных колец; 2 – с перпендикулярным расположением тороидальных колец

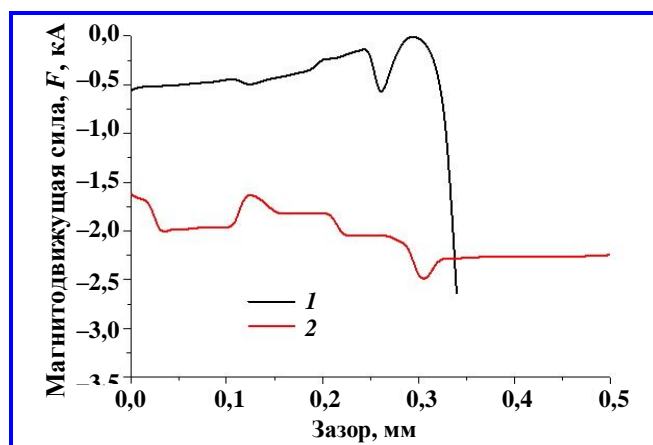


Рис. 3. Распределение магнитодвижущей силы внутреннего тороидального кольца эллиптического сечения для моделей: 1 – с параллельным расположением тороидальных колец; 2 – с перпендикулярным расположением тороидальных колец

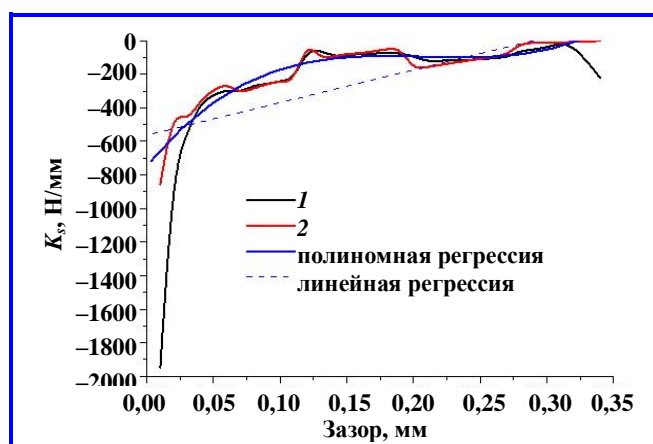


Рис. 4. Магнитный квазиупругий коэффициент для компьютерных моделей: 1 – с параллельным расположением тороидальных колец; 2 – с перпендикулярным расположением тороидальных колец

Согласно полученным данным, формы кривых для обеих математических моделей совпадают. Для анализа была выбрана линейная регрессия вида (1):

$$y = -563,2 + 1941,88x. \quad (1)$$

Однако полученный коэффициент корреляции равен 0,58, что указывает на несоответствие опытных данных выбранной линейной регрессии (1); следовательно, данный тип регрессии (1) отклоняется, и поэтому применим вариант полиномиальной регрессии вида (2):

$$y = -747,1 + 9787,9x - 479467x^2 + 767185x^3. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции для уравнения (2) равен 0,85, что свидетельствует о тесной положительной связи признаков X и Y , а коэффициент детерминации, соответственно, равен 0,72, что также свидетельствует о соответствии опытных данных используемой полиномиальной регрессии (2). Таким образом, предложенные математические модели можно признать адекватными.

Установлено, что при уменьшении воздушного зазора между тороидальными постоянными магнитами жесткость подвеса уменьшается, возвращая систему к состоянию равновесия, то есть за счет сил отталкивания происходит самостабилизация системы постоянных магнитов.

Предложенные компьютерные модели бесконтактного магнитного подвеса могут быть использованы для расчета магнитного подшипника, магнитных муфт и шестерней.

Заключение

В результате проведенной работы были созданы две математические 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, которое в дальнейшем используется для расчета пондеромоторной и магнитодвижущей силы. На основе данных пондеромоторной силы получены значения квазиупругих коэффициентов. Показано, что значения пондеромоторной и магнитодвижущей силы изменяется с увеличением воздушного зазора. Такое поведение магнитных систем предложенных моделей обусловлено силами пиннинга.

Математическая модель может быть использована для расчета магнитного поля кольцевого эллиптического цилиндра, а предложенные конструкции пассивного бесконтактного магнитного подшипника для расчета систем с магнитным подвесом. В случаях, когда большая и малая полуоси эллиптического тора равны, он становится круглым тором; поэтому полученная модель может быть использована для вычисления магнитного поля круглого тора с радиальной намагниченностью.

Литература

1. Permanent magnet couplings: Field and torque three-dimensional expressions based on the Coulombian model / R. Ravaut, G. Lemarquand, V. Lemarquand [et al.] // IEEE Trans. on Magn. – 2009. – Vol. 45. – No. 4. – P. 1950 – 1958. – DOI : 10.1109/TMAG.2008.2010623.
2. Применение объемных высокотемпературных сверхпроводников в перспективных космических системах / В. А. Матвеев, В. А. Маевский, В. В. Асеев [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2016. – № 1. – С. 15 – 32. – DOI : 10.18698/0236-3933-2016-1-15-32.
3. Патент на полезную модель № 205597 U1 Российская Федерация, МПК F16F 1/22. Листовая рессора транспортного средства : № 2021112697: заявл. 30.04.2021 : опубл. 22.07.2021 / Скрипкин А. А., Королев А. В., Королев А. А., Черкасова О. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». – Бюл. № 21. – 6 с.
4. Force and stiffness calculation and optimization of permanent magnetic thrust bearing used in vessels / X. Zhao, C. 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.
5. Аналого-цифровые преобразователи составляющих перемещения с применением микроэлектронных синусно-косинусных магнитных энкодеров / Ю. С. Смирнов, Т. А. Козина, Е. В. Юрасова [и др.] // Измерительная техника. – 2014. – № 1. – С. 28 – 31.
6. Патент на полезную модель № 204695 U1 Российская Федерация, МПК F16C 32/04, F16C 39/06. Бесконтактный магнитный подшипник : № 2021107834 : заявл. 23.03.2021 : опубл. 07.06.2021 / А. А. Скрипкин, А. В. Королев, А. А. Королев, О. А. Черкасова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». – Бюл. № 16. – 12 с.
7. О принципиальной возможности создания бесконтактного магнитного подвеса на постоянных магнитах / О. А. Черкасова, А. А. Скрипкин // Авиационная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 25 – 30.
8. Патент на полезную модель № 207304 U1 Российская Федерация, МПК F16C 32/04, F16C 39/06. Бескон-

тактный подшипник на пассивном магнитном подвесе : № 2021120663 : заявл. 12.07.2021 : опублик. 21.10.2021 / А. А. Скрипкин, А. В. Королёв, А. А. Королёв, О. А. Черкасова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» – Бюл. № 30. – 9 с.

9. Некоторые особенности конструкции бесконтактного магнитного подвеса на системе постоянных магнитов / О. А. Черкасова, А. А. Скрипкин // Авиационная промышленность. – 2021. – № 2. – С. 31 – 35.

10. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования / О. А. Черкасова // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2014. – Вып. 17. – С. 112 – 120.

Ольга Алексеевна Черкасова, кандидат физико-математических наук, доцент, т. +7 (845) 251-46-88, e-mail: cherkasovaOA@yandex.ru.

(Саратовский филиал Института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского).

COMPARATIVE STUDY OF NONLINEAR MAGNETIC CHARACTERISTICS FOR MAGNETIC SUSPENSION BY NUMERICAL MODELING

O. A. Cherkasova

Background and Objectives: The purpose of the real work is numerically modeling of a contactless magnetic suspension based on permanent magnets from a magnetically solid alloy based on rare-earth NdFeB metals. As objects of investigation, two models of passive contactless magnetic bearing consisting of a system of two concentric toroidal magnetic rings of elliptical section with radial magnetization are considered. The inner toroidal ring is located in the cavity of the outer toroidal ring, while the large semi-axes of the inner and outer toroidal magnets are mutually perpendicular or parallel. **Materials and Methods:** In case of numerically modeling of the magnetic suspension in the bearing system, the finite element method the Elcut and LabelMover software used using. Harmonic analysis of distributions and processing of modeling results in Origin carried out. **Results:** The results of 2D computer simulation of proposed models presented. Magnetic induction and magnetic field strength distributions obtained. It found that with parallel arrangement of toroidal rings of elliptical section in magnetic suspension magnetic induction is 1.5 times more than with perpendicular arrangement of the same rings. Thus, it calculation of the ponderomotive and magnetomotive force between two toroidal ring permanent magnets with radial magnetization of elliptical section in system of contactless magnetic suspension is made. Quasi-elastic stiffness coefficients and static load capacity in a contactless magnetic suspension for both models are calculated. The rigidity of the suspension decreases monotonically with a decrease in the gap value independent of the model showed. **Conclusion:** This research presents two versions of the design of a contactless magnetic suspension on a permanent magnet system are proposed, some of its design features and non-linear power characteristics are determined, which depend on the thickness of the permanent magnets used in the suspension system, magnetic material, what to consider when designing. The computer model can be used to calculation of magnetic field of circular elliptical cylinder, and proposed designs of passive non-contact magnetic bearing for calculation of systems with magnetic suspension. In cases where major and minor semi-axis of the elliptic torus are equal, it becomes a circular torus, therefore, the deriving model can be used to compute the magnetic field of a circular torus with radial magnetization.

Keywords: permanent magnet, magnetic induction, ponderomotive force, magnetomotive force, magnetic quasi-elastic coefficient, numerical modeling.

References

1. Permanent magnet couplings: Field and torque three-dimensional expressions based on the Coulombian model / R. Ravaut, G. Lemarquand, V. Lemarquand [et al.] // IEEE Trans. on Magn. – 2009. – Vol. 45. – No. 4. – P. 1950 – 1958. – DOI : 10.1109/TMAG.2008.2010623.
2. Application of bulk high-temperature superconductors in advanced space systems / V. A. Matveev, V. A. Maevskiy, V. V. Aseev [et al.] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series instrument engineering. – 2016. – No. 1. – P. 15 – 32. – DOI : 10.18698/0236-3933-2016-1-15-32.
3. Patent for useful model № 205597 U1, Russian Federation, IPC F16F 1/22. Vehicle leaf spring : No. 2021112697 : appl. 30.04.2021 : publ. 22.07.2021 / A. A. Skripkin, A. V. Korolev, A. A. Korolev, O. A. Cherkasova. – Bull. No. 21. – 6 p.
4. 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.
5. Analog-to-digital converters of the components of a displacement with the use of microelectronic sine-cosine magnetic encoders / Y. S. Smirnov, T. A. Kozina, E. V. Yurasova [et al.] // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57. – No. 1. – P. 41 – 46. – DOI : 10.1007/s11018-014-0404-5.
6. Patent for useful model No. 204695 U1, Russian Federation, IPC F16C 32/04, F16C 39/06. Contactless magnetic bearing: No. 2021107834 : appl. 23.03.2021 : publ. 07.06.2021 / A. A. Skripkin, A. V. Korolev, A. A. Korolev, O. A. Cherkasova. – Bull. No. 16. – 12 p.

7. On principal possibility of creating contactless magnetic suspension on permanent magnets / O. A. Cherkasova, A. A. Skripkin // Aviation Industry. – 2021. – No. 1. – P. 25 – 30.
8. Patent for useful model No. 207304 U1, Russian Federation, IPC F16C 32/04, F16C 39/06. Non-contact bearing on passive magnetic suspension : No. 2021120663 : appl. 12.07.2021 : publ. 21.10.2021 / A. A. Skripkin, A. V. Korolev, A. A. Korolev, O. A. Cherkasova. – Bull. No. 30. – 9 p.
9. Some design features of a contactless magnetic suspension on a permanent magnet system / O. A. Cherkasova, A. A. Skripkin // Aviation Industry. – 2021. – No. 2. – P. 31 – 35.
10. Research of the magnetic field of the permanent magnet by means of computer modeling / O. A. Cherkasova // Geteromagnitnaia mikroelektronika. – 2014. – Iss. 17. – P. 112 – 120.

*Olga Alekseevna Cherkasova, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor,
tel.: +7 (845) 251-46-88, e-mail: cherkasovaOA@yandex.ru.
(Saratov Branch of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of the Russian Academy of Sciences, Saratov State University).*