

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ БЕСКОНТАКТНОГО МАГНИТНОГО МЕХАНИЗМА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2022

В статье разработана конструкция механизма с учетом требований к эксплуатации в условиях экстремальных давлений, температур, отсутствия энергопотребления и технического обслуживания. Магнитная система представляет собой композицию из постоянных магнитов с чередующейся полярностью из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом SmCo_5 . На основе того, что намагниченность магнитов из сплавов редкоземельных металлов можно принять однородной, анизотропной и не зависящей от величины размагничивающего поля, для расчета магнитостатических сил механизма была принята гипотеза Ампера. Теоретический расчет тангенциальной силы взаимодействия магнитов позволил рассчитать оптимальные размеры магнитной системы и получить наибольшее тянущее усилие при минимальных габаритных размерах механизма. Экспериментальный анализ результатов моделирования тангенциальных магнитостатических сил механизма с магнитами из сплава SmCo_5 показал, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями силы не превышало 12 %.

Ключевые слова: бесконтактный магнитный механизм, магнитостатическое взаимодействие, магнитосиловые характеристики, постоянные магниты, магнитная система.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-12-20

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные магнитные механизмы активно используются в современном высокотехнологичном станкостроении, приборостроении, нефтегазовой промышленности, аэрокосмическом и транспортном машиностроении [1–5]. Особенно успешно они применяются в нестандартных внешних условиях: вакууме, агрессивных и газовых средах [4–9]. Параметры работоспособности магнитных механизмов сохраняются стабильными в достаточно широком диапазоне давлений и температур [1, 6].

При создании аэрокосмической техники магнитные механизмы в качестве компонентов летательных аппаратов практически незаменимы, так как отвечают основным требованиям (высокой надежности, компактности, минимального электропотребления) [10–15]. Одними из самых востребованных механизмов в космической технике являются магнитная пассивная система ориентации и стабилизации объекта и магнитный механизм поступательного перемещения привода блоков аппаратуры. При проектировании бесконтактных магнитных механизмов поступательного перемещения важно получить наибольшее тянущее усилие при минимальных габаритных размерах механизма. Для достижения этого необходимо

разработать методику расчета магнитоэлектродвижущего взаимодействия проектируемой магнитной системы.

В качестве магнитной системы в конструкции механизма поступательного перемещения была выбрана композиция из постоянных магнитов из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом SmCo_5 . Марка магнитов определялась из сравнительного анализа магнитосиловых характеристик [15–18] и с учетом технико-экономического обоснования. Магниты SmCo_5 обладают стойкостью к агрессивным средам, радиационному воздействию и способны эффективно работать в широком диапазоне температур.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Назначение моделируемого механизма – бесконтактная передача тягового усилия поступательного перемещения привода блоков аппаратуры аэрокосмического объекта через сплошную перегородку. В соответствии с техническими требованиями механизм размещается в цилиндрическом корпусе 1 (рис. 1), имеющем внутренний диаметр 20 мм. Корпус разделен на две равные части аксиальной немагнитной герметичной перегородкой 2 толщиной не более 2 мм. Механизм поступательного перемещения представляет собой ведущую 3 и ведомую 4 части: ведущая часть перемещается под действием ходового винта, ведомая – за счет сил взаимодействия системы постоянных магнитов с чередующейся полярностью.

Расчетная схема представляет собой два прямоугольных магнита 1 и 2 размерами $a \times b \times c$, расположенных на расстоянии L друг от друга (рис. 2).

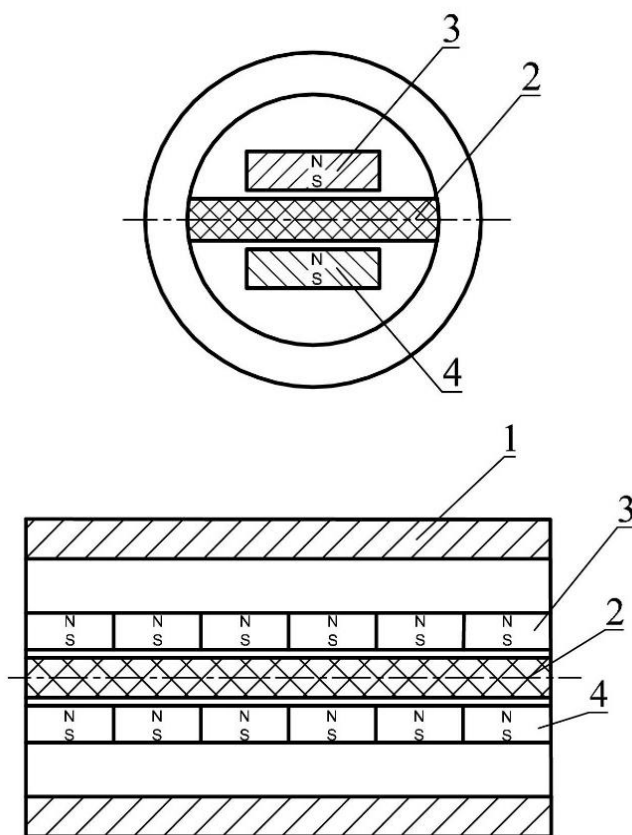


Рис. 1. Схема магнитного механизма поступательного перемещения

Для точного расчета силы взаимодействия магнитов 1 и 2 необходимо определить характер распределения намагниченности по объему магнитов. Постоянные магниты из сплавов редкоземельных металлов РЗМ-Со характеризуются [17, 18] близкой по форме к прямоугольной кривой размагничивания и уникально высокой коэрцитивной силой. Поэтому их намагниченность можно принять однородной, анизотропной и не зависящей от величины размагничивающего поля, создаваемого заряженными магнитами. При учете свойств магнетика РЗМ-Со для расчета намагниченности принята гипотеза Ампера, а постоянные магниты представлены в виде эквивалентных им по размерам соленоидов [15] с однослойными и очень тонкими обмотками, по которым протекают токи с постоянной плотностью I , равной остаточной намагниченности насыщения.

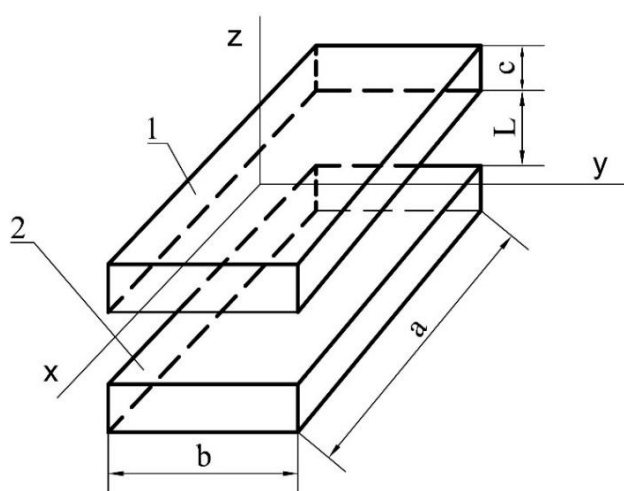


Рис. 2. Расчетная схема расположения магнитов

Цель исследования: расчет и оптимизация размеров магнитного механизма поступательного перемещения, позволяющего получить наибольшее тянущее усилие при минимальной длине механизма.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТОВ РЗМ-СО

Согласно закону Ампера, тангенциальную силу взаимодействия магнитов (см. рис. 2) можно рассчитать по формуле

$$F_t = I \oint_{-(L+c)}^{-(L+2c)} B_z dl_z dZ_z, \quad (1)$$

где I – остаточная намагниченность магнитов (линейная плотность тока соленоида); B_z – нормальная составляющая индукции магнитного поля, создаваемого первым соленоидом (магнитом); dl_z – элемент тока второго соленоида; dZ_z – элемент высоты второго соленоида (магнита). Индукцию магнитного поля B_z , входящую в формулу (1), определим из условия о том, что тангенциальная сила обусловлена только взаимодействием токов, текущих по боковым поверхностям магнитов, параллельных плоскости XZ. Учитывая это и произведя интегрирование формулы (1), получим тангенциальную силу взаимодействия магнитов при смещении верхнего магнита на y_z :

$$\begin{aligned}
F_{\tau} = & \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right)^2 \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-(L+c)}^{-(L+2c)} \left[-\operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})(-b+y_z)}{(z_z+c)\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + (-b+y_z)^2 + (z_z+c)^2}} + \right. \\
& + \operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})(-b+y_z)}{z_z\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + (-b+y_z)^2 + z_z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(x_z + \frac{a}{2})(-b+y_z)}{z_z\sqrt{(x_z + \frac{a}{2})^2 + (-b+y_z)^2 + z_z^2}} - \\
& - \operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})(-b+y_z)}{z\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + (-b+y_z)^2 + z_z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})(b+y_z)}{z_z\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + (b+y_z)^2 + z_z^2}} + \\
& + \operatorname{arctg} \frac{(x_z + \frac{a}{2})(b+y_z)}{(z_z+c)\sqrt{(x_z + \frac{a}{2})^2 + (b+y_z)^2 + (z_z+c)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(x_z + \frac{a}{2})(b+y_z)}{z_z\sqrt{(x_z + \frac{a}{2})^2 + (b+y_z)^2 + z_z^2}} + \\
& + 2\operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})y_z}{(z_z+c)\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + y_z^2 + (z_z+c)^2}} - 2\operatorname{arctg} \frac{(x_z - \frac{a}{2})y_z}{z_z\sqrt{(x_z - \frac{a}{2})^2 + y_z^2 + z_z^2}} - \\
& \left. - 2\operatorname{arctg} \frac{(x_z + \frac{a}{2})y_z}{(z_z+c)\sqrt{(x_z + \frac{a}{2})^2 + y_z^2 + (z_z+c)^2}} + 2\operatorname{arctg} \frac{(x_z + \frac{a}{2})y_z}{z_z\sqrt{(x_z + \frac{a}{2})^2 + y_z^2 + z_z^2}} \right] dx_z dz_z. \quad (2)
\end{aligned}$$

Тяговое усилие, передаваемое магнитным механизмом (см. рис. 1), на основе принципа суперпозиции магнитных полей

$$F_{\tau} = \frac{1}{2} \sum_i \sum_k F_{\tau}^{ik}, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3$ – магниты ведущей части механизма; $k = 1, 2, 3$ – магниты ведомой части механизма. При учете короткодействующего характера магнитных сил для упрощения расчетов рассматривалось взаимодействие каждого магнита только с пятью близлежащими сопряженными магнитами.

Первоначально ширина и высота магнитов выбирались из расчетов вписывания данных магнитов в размеры механизма. В данной конструкции указанные размеры связаны между собой соотношением

$$c = \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}, \quad (4)$$

где R – внутренний радиус трубы. Размер a варьировался от 10 до 19 мм с шагом 1 мм. Для каждого значения ширины магнита рассчитывалась суммарная тангенциальная сила взаимодействия между магнитами при изменении длины магнитов от 3 до 12 мм с шагом 1 мм.

При фиксированной ширине выбиралась такая длина магнитов, которая соответствовала максимальной суммарной силе взаимодействия между магнитами. По установленной длине магнитов определялись их необходимое количество и соответствующая заданному усилию длина механизма S .

Во всех расчетах значение $\mu_0 I$ принималось равным $0,7 T$, что характерно для самарий-кобальтовых магнитов. Величина зазора L составляла 2 мм, т. е. была равна максимальной толщине перегородки.

По результатам расчетов графически строилась совокупность зависимостей длины механизма S от длины магнитов при различных значениях их ширины (рис. 3). Для всех полученных кривых характерно значение хорошо выраженного минимума,

по которому и был окончательно установлен размер длины магнитов. Оптимальным оказался магнит с размерами $16 \times 8 \times 6$ мм. При найденных размерах магнитов их объем в механизме будет минимальным, что достаточно существенно, учитывая относительно высокую стоимость магнитов.

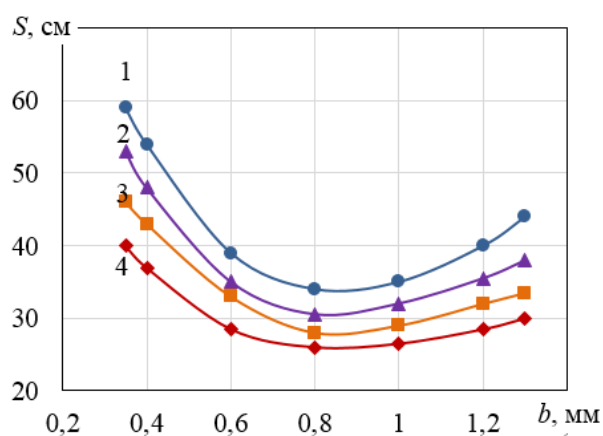


Рис. 3. Зависимость длины механизма от размеров магнита:
 1 – $a = 1$ см; 2 – $a = 1,1$ см; 3 – $a = 1,2$ см; 4 – $a = 1,4$ см

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценка тангенциальных магнитостатических сил производилась на модели магнитного механизма поступательного перемещения. Два прямоугольных магнита из сплава SmCo_5 , имеющие заданные размеры, перемещались относительно друг друга в плоскости ХОУ по направлению X (аналогично реальному механизму). Непараллельность горизонтальных поверхностей магнитов не превышала $1 \dots 3^\circ$. Также варьировалась величина зазора L между магнитами в направлении оси Z . Величина силы взаимодействия магнитов в зависимости от тангенциального смещения между ними и зазора L фиксировалась двумя тензодатчиками. Результаты правильности проверки теоретической формулы (2) представлены на рис. 4.

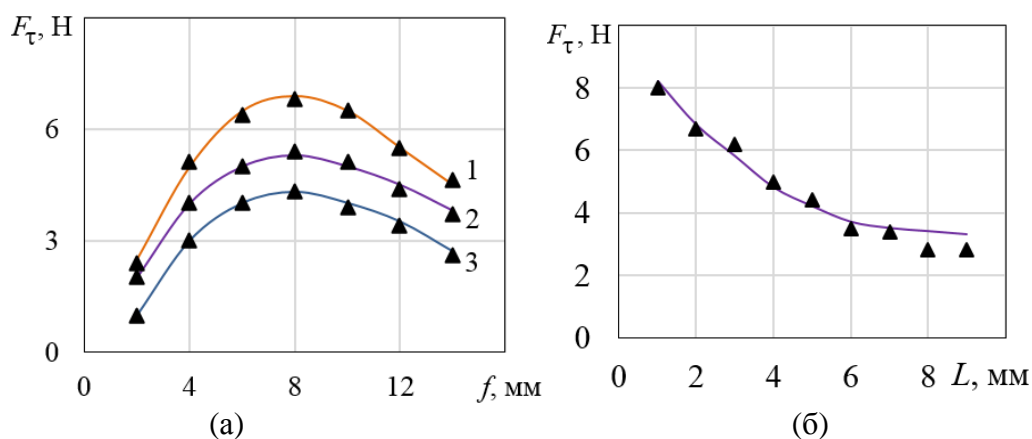


Рис. 4. Зависимость силы взаимодействия магнитов от величины смещения f одного магнита: 1 – $f = 3$ мм; 2 – $f = 4$ мм; 3 – $f = 5$ мм (а); от зазора между ними (б); размеры магнитов – $1,4 \times 2,1 \times 0,9$ см ($a \times b \times c$); ▲ – результаты эксперимента; – (сплошная линия) – расчет по формуле (2)

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями силы не превышало 12 %. Ошибка расчетов тем меньше, чем выше магнитная жесткость и однородность намагниченности магнитов. Экспериментально рассчитанная оптимальная длина магнитного механизма для передачи усилия 200 Н с магнитами из сплава S_mCo_5 ($\mu_0 I = 0,7$ Т) отличалась от теоретической на 8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена простая и надежная конструкция бесконтактного магнитного механизма поступательного перемещения для аэрокосмического оборудования. Проведенный теоретический расчет магнитостатического взаимодействия магнитов из сплава РЗМ-Со позволил рассчитать оптимальные размеры магнитной системы и получить наибольшее тянущее усилие при минимальных габаритных размерах механизма. Экспериментальный анализ результатов моделирования тангенциальных магнитостатических сил механизма с магнитами из сплава S_mCo_5 показал, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями силы не превышало 12 %.

Инженерное решение магнитного механизма отвечает основным требованиям к космической технике. Его внедрение позволит повысить стабильность, долговечность и безотказность работы космических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейц В.Л., Ганзбург Л.Б., Петров В.М. Бесконтактные магнитные и электромагнитные механизмы. Конструирование и расчет: в 2 кн.. Кн. 1: Статика бесконтактных механизмов. СПб.: СПбГПУ. 2004. 308 с.
2. Miyazaki Y., Mizuno K., Yamashita T. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system // *Cryogenics*. 2016. V. 80. P. 234–237.
3. Подливаев А.И., Руднев И.А. Магнитное торможение и энергетические потери в бесконтактных подшипниках на основе сверхпроводящих лент // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. № 4. С. 593–597.
4. Werfel F.N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B. Encapsulated HTS bearings: Technical and cost considerations // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2005. V. 15. № 2. P. 2306–2311.
5. Werfel F.N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B. HTS magnetic bearings in prototype application // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. V. 20. № 3. P. 874–879.
6. Beno J., Wuks D.W., Zierer J.J., Hayes R.J. Application of bulk high temperature superconductors (HTS) for flywheels, energy storage systems on lunar poles // *1st International Workshop on Lunar Superconductor Applications*. 2011, Houston, Texas. P. 10.
7. Koshizuka N. The superconducting magnetic bearings and magnetic clutches for flywheel energy storage // *7th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE) BCO Large Grain Materials (PASREG 2010)*. Washington, DC. 2010. P. 22.
8. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием для специального технологического оборудования // *Технология машиностроения*. 2011. № 2. С. 47–51.

9. Писаревский Ю.В., Писаревский А.Ю., Фурсов В.Б., Илларионов Ю.А. Оптимизация магнитных систем бесконтактных электродвигателей постоянного тока с гладким якорем // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2014. № 2. С. 18–23.
10. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 2 (2). С. 14–22.
11. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение. 1975. 248 с.
12. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Расчет магнитожидкостных узлов трения, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 42–49.
13. Holehouse R.C., Atallah K., Wang J. Design and realization of a linear magnetic gear // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. V. 47. № 10. P. 4171–4174.
14. Tallerico T.F., Cameron Z.A., Scheidler J.J. Design of a magnetic gear for NASA's vertical lift quadrotor concept vehicle // *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE*. 2019. P. 1–21.
15. Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия. 1980. 488 с.
16. Wang J.Y., Ghantasala M.K., McLean R.J. Bias sputtering effect on ultra-thin SmCo₅ films exhibiting large perpendicular coercivity // *Thin Solid Films*. 2008. V. 517. № 2. P. 656–660.
17. Pop V., Isnard O., Chicinaş I., Givord D. Magnetic and structural properties of SmCo₅/α-Fe nanocomposites // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. V. 310. № 2. Suppl. Part 3. P. 2489–2490.
18. Ponomareva O.I., Maykov V.G., Puzanova T.Z. Thermal magnetization of SmCo₅ magnets with different levels of coercive force // *The Physics of Metals and Metallography*. 1989. V. 68. № 2. P. 89–96.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация размеров бесконтактного магнитного механизма поступательного перемещения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 12–20.

CALCULATION OF OPTIMAL DIMENSIONS OF CONTACTLESS MAGNETIC MECHANISM OF TRANSLATIONAL MOVEMENT

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

The article develops the design of the mechanism taking into account the requirements for operation in conditions of extreme pressures, temperatures, lack of energy consumption and maintenance. The magnetic system is a composition of permanent magnets with

alternating polarity made of rare earth metal alloys with cobalt SmCo5. Based on the fact that the magnetization of magnets made of rare earth metal alloys can be assumed to be homogeneous, anisotropic and independent of the magnitude of the demagnetizing field, the Ampere hypothesis was adopted to calculate the magnetostatic forces of the mechanism. The theoretical calculation of the tangential force of the interaction of magnets made it possible to calculate the optimal dimensions of the magnetic system and obtain the greatest pulling force with the minimum overall dimensions of the mechanism. Experimental analysis of the simulation results of tangential magnetostatic forces of the mechanism with magnets made of SmCo5 alloy showed that the discrepancy between the calculated and experimental values of the force did not exceed 12 %.

Keywords: contactless magnetic mechanism, magnetostatic interaction, magnetic force characteristics, permanent magnets, magnetic system.

REFERENCES

1. Veits V.L., Ganzburg L.B., Petrov V.M. Beskontaknyye magnitnye i elektromagnitnye mekhanizmy. Konstruirovaniye i raschet: (v 2 kn.). Kn. 1: Statika beskontaknykh mekhanizmov. [Non-contact magnetic and electromagnetic mechanisms. Design and calculation: (in 2 books). Book 1: Statics of non-contact mechanisms]. St. Petersburg: SPbGPU. 2004. 308 p.
2. Miyazaki Y., Mizuno K., Yamashita T. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system. *Cryogenics*. 2016. V. 80, pp. 234–237.
3. Podlivaev A.I., Rudnev I.A. Magnetic braking and energy losses in non-contact bearings based on superconducting tapes. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020. V. 90. No. 4, pp. 593–597. (In Russian).
4. Werfel F.N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B. Encapsulated HTS bearings: technical and cost considerations. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2005. V. 15. No. 2, pp. 2306–2311.
5. Werfel F.N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B. HTS magnetic bearings in prototype application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. V. 20. No. 3, pp. 874–879.
6. Beno J., Wuks D.W., Zierer J.J., Hayes R.J. Application of bulk high temperature superconductors (HTS) for flywheels, energy storage systems on lunar poles. *1st International Workshop on Lunar Superconductor Applications*. 2011, Houston, Texas. P. 10.
7. Koshizuka N. The superconducting magnetic bearings and magnetic clutches for flywheel energy storage. *7th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE) BCO Large Grain Materials (PASREG 2010)*. Washington, DC. 2010. P. 22.
8. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznetsov P.S., Stepanchikov S.V. Devices with non-contact magnetic interaction for special technological equipment. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2011. No. 2, pp. 47–51. (In Russian).
9. Pisarevskii Yu.V., Pisarevskii A.Yu., Fursov V.B., Illarionov Yu.A. Optimization of magnetic systems of non-contact DC electric motors with a smooth armature. *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya*. 2014. No. 2, pp. 18–23. (In Russian).

10. Bolotov A.N., Burdo G.B., Novikova O.O., Novikov V.V. Influence of a magnetic field on surface effects during lubrication with a magnetic fluid. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2019. No. 2 (2), pp. 14–22. (In Russian).
11. Kovalenko A.P. Magnitnye sistemy upravleniya kosmicheskimi letatelnyimi apparatami [Magnetic control systems for spacecraft]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1975. 248 p.
12. Burdo G.B., Bolotov A.N. Calculation of magnetic fluid friction units operated in an airless or gaseous environment. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No. 2 (6), pp. 42–49. (In Russian).
13. Holehouse R.C., Atallah K., Wang J. Design and realization of a linear magnetic gear. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. V. 47. No. 10, pp. 4171–4174.
14. Tallerico T.F., Cameron Z.A., Scheidler J.J. Design of a magnetic gear for NASA's vertical lift quadrotor concept vehicle. *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE*, 2019, pp. 1–21.
15. Altman A.B., Gerberg A.N., Gladyshev P.A. and others. Postoyannye magnity: spravochnik [Permanent magnets: Reference book]. Ed. Yu.M. Pyatin. Moscow: Energiya. 1980. 488 p.
16. Wang J.Y., Ghantasala M.K., McLean R.J. Bias sputtering effect on ultra-thin SmCo₅ films exhibiting large perpendicular coercivity. *Thin Solid Films*. 2008. V. 517. No. 2, pp. 656–660.
17. Pop V., Isnard O., Chicinaş I., Givord D. Magnetic and structural properties of SmCo₅/α-Fe nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. V. 310. No. 2. Suppl. Part 3, pp. 2489–2490.
18. Ponomareva O.I., Maykov V.G., Puzanova T.Z. Thermal magnetization of SmCo₅ magnets with different levels of coercive force. *The Physics of Metals and Metallography*. 1989. V. 68. No. 2, pp. 89–96.

Поступила в редакцию/received: 10.01.2022; после рецензирования/revised: 27.01.2022;
принята/accepted: 04.02.2022