

DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-111-121

УДК 621.313.13-181.48:621.318

ББК 3261.4

Р.А. РОМАНОВ, Т.В. МЯСНИКОВА, А.Н. МАТЮНИН

## ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА СВЕРХМИНИАТЮРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

**Ключевые слова:** сверхминиатюрная электрическая машина, сверхминиатюрный вентильный электродвигатель, поликапиллярная технология, редкоземельные магниты, магнитная индукция, электромагнитный момент.

Статья посвящена вопросам улучшения энергетических и рабочих характеристик сверхминиатюрных электродвигателей, получивших широкое распространение в современных устройствах робототехники и мехатроники. С развитием цифровых и автономных робототехнических систем задачи повышения эффективности исполнительных микромеханизмов, влияющих на функциональность и продолжительность работы в автономном режиме, стали особенно актуальными. Традиционные конструкторские и технологические решения, применяемые в электрических машинах более высоких мощностей, не масштабированы в область сверхминиатюрных электрических машин. Отечественными и зарубежными разработчиками предлагаются различные варианты конструкции и технологии изготовления. Ключевая особенность конструкции рассматриваемого электродвигателя заключается в стеклянном статоре, изготовленном методом поликапиллярной волоконной технологии, и системе возбуждения от редкоземельных постоянных магнитов. В стенке стеклянного корпуса равномерно по окружности распределены отверстия, в которые уложена обмотка управления. Система возбуждения двигателя представляет собой двухполюсный постоянный магнит, расположенный на вращающемся валу ротора. Целью проведения исследований является определение влияния изменения конструкции системы возбуждения путем изменения расположения магнитных полюсов. Для исследования используется программное обеспечение, моделирующее электромагнитное поле методом конечных элементов. В ходе проведения исследований выявлено, что снижение тела постоянного магнита приводит к снижению электромагнитного момента, не компенсируемому уменьшением краевых эффектов на границе полюсов магнита. Однако увеличение значения максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре позволяет сделать вывод о том, что краевые эффекты на границе полюсов оказывают значительное влияние на снижение энергетических характеристик сверхминиатюрных микромашин. Таким образом, предложенные авторами решения являются недостаточными для увеличения коэффициента полезного действия двигателя, но полученные данные указывают на необходимость снижения краевых эффектов постоянных магнитов.

С развитием микроэлектронных устройств и постепенным внедрением интеллектуальных систем управления актуальными становятся задачи развития микромеханики. Сверхминиатюрные электрические машины (СМЭМ) получили широкое распространение в системах автоматики и телемеханики в качестве датчиков скорости и углового положения. В зависимости от области применения к СМЭМ предъявляются разнообразные требования по надёжности, стойкости к агрессивным средам, воздействию низких и высоких температур и т.п. Актуальными становятся задачи миниатюризации машин в усло-

виях применения в ограниченных пространствах современных микроэлектронных устройств [1–6].

Например, в устройствах контроля печатных плат возникла необходимость в использовании сверхминиатюрных электродвигателей для перемещения диагностического оборудования качества пайки элементов. Необходимость обусловлена уменьшением размеров пассивных элементов (резисторов, конденсаторов и пр.), увеличением плотности их размещения и более высокой точностью позиционирования. Применение сверхминиатюрных электродвигателей позволило уменьшить энергопотребление и понизить массогабаритные показатели диагностического оборудования.

Однако существенным препятствием для распространения СМЭМ является ограниченность их применения в качестве приводов исполнительных механизмов из-за низких показателей момента и коэффициента полезного действия (КПД) [8–10]. Если для современных микромашин мощностью от 700 до 10 Вт КПД снижается с 80 до 35%, то для сверхминиатюрных электрических двигателей мощностью в единицы или доли Вт КПД не превышает 5% [2].

В статье рассматриваются возможные варианты повышения электромагнитного момента сверхминиатюрного вентильного электрического двигателя (СМВЭД) с возбуждением от постоянных магнитов из редкоземельных металлов типа неодим–железо–бор [6]. Особенностью рассматриваемой конструкции СМВЭД (рис. 1) являются:

- стеклянный статор с поликапиллярными отверстиями для обмотки статора;
- бесщёточная конструкция ротора с возбуждением от постоянных магнитов [4].

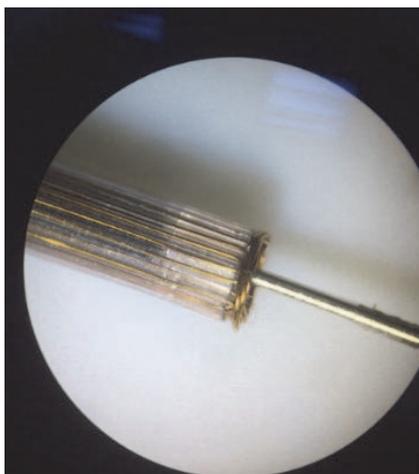


Рис. 1. Опытный образец СМВЭД в объективе микроскопа

Поликапиллярная стекловолоконная технология позволяет успешно решать вопросы миниатюризации СМЭМ, так как дает возможность получать корпуса двигателей диаметром 1,8 мм и меньше. Однако проведенные исследова-

дования указывают на низкие значения электромагнитного момента и КПД [3]. В СМВЭД применяется малораспределенная витковая трехфазная обмотка, соединенная по схеме «звезда».

Количество проводников определяется формулой

$$Z_i = 2pmq, \quad (1)$$

где  $2p$  – число полюсов ротора;  $m$  – число фаз обмотки статора;  $q$  – число проводников на полюс и фазу.

В рассчитываемом образце СМВЭД количество проводников составляет 24 (по 8 на каждую фазу).

Действующее значение ЭДС фазы обмотки статора определяется выражением

$$E_1 = 2,22 \frac{Z_1}{mp} f_1 \Phi_{m1} k_{01}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{m1}$  – амплитуда магнитного потока полюса, созданного намагниченным ротором и сцепленным с фазной обмоткой статора;  $k_{01}$  – обмоточный коэффициент.

Как следует из формулы (2), ЭДС обмотки определяется значением магнитного потока, который может быть найден путем расчёта магнитного поля, созданного ротором в пространстве:

$$\Phi = \int_s \overline{B_r} ds = l_\delta \int_0^{2\pi} B_r r d\alpha, \quad (3)$$

где  $l_\delta$  – длина активной части ротора;  $B_r$  – радиальная составляющая индукции магнитного поля в расположении проводников обмотки статора;  $r$  – радиус цилиндрической поверхности  $S$ , проходящей через оси проводников обмотки статора.

Решение задачи определения радиальной составляющей индукции магнитного поля для случая поляризованного диэлектрического цилиндра изложено в [7].

Итоговое выражение для момента СМВЭД примет вид

$$M = C_m I_a \Phi, \quad (4)$$

где постоянная момента  $C_m$  зависит от конструктивных данных электродвигателя и определяется выражением:

$$C_m = \frac{pN}{2\pi\alpha}, \quad (5)$$

где  $N$  – коэффициент размагничивания цилиндрического ротора;  $2\alpha$  – количество параллельно соединенных ветвей якоря.

Электромагнитная мощность, развиваемая СМВЭД, в этом случае

$$P_{ЭМ} = 0,1Mn. \quad (6)$$

Для повышения электромагнитной мощности и КПД авторами предложено несколько вариантов изменения конструкции ротора СМВЭД.

Расчёт магнитного поля в рабочем зазоре был произведен методом конечных элементов. При расчёте количество элементарных участков состави-

ло 1128, общее количество точек наблюдения – 19 552, количество точек в воздушном зазоре – 2304.

Магнитная проницаемость участков стеклянного статора  $\mu_r = 1$ , индукция на поверхности магнитов ротора  $B_r = 1,08$  Тл,  $H_{cB} = 796\ 000$  А/м. Внешний диаметр ротора  $d = 1,8$  мм, активная длина  $l_\delta = 8$  мм.

На рис. 3–5 представлены геометрическая модель СМВЭД и диаграмма нормальной составляющей магнитной индукции и электромагнитного момента.

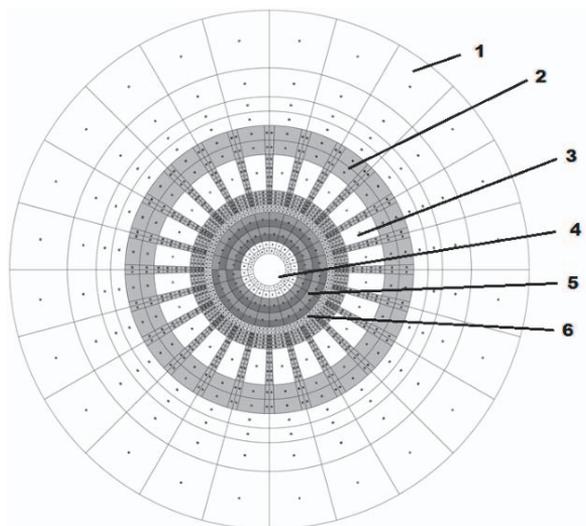


Рис. 3. Геометрическая модель СМВЭД:

- 1 – воздушное окружающее пространство; 2 – стеклянный сердечник статора;  
3 – проводники; 4 – вал ротора; 5 – постоянный магнит;  
6 – воздушный зазор (рабочая область)

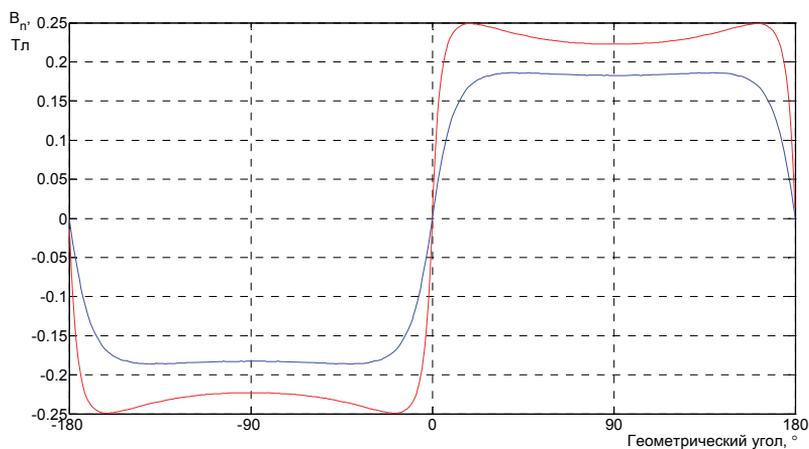


Рис. 4. Нормальная составляющая магнитной индукции по обеим границам воздушного зазора при нулевом значении электромагнитного момента

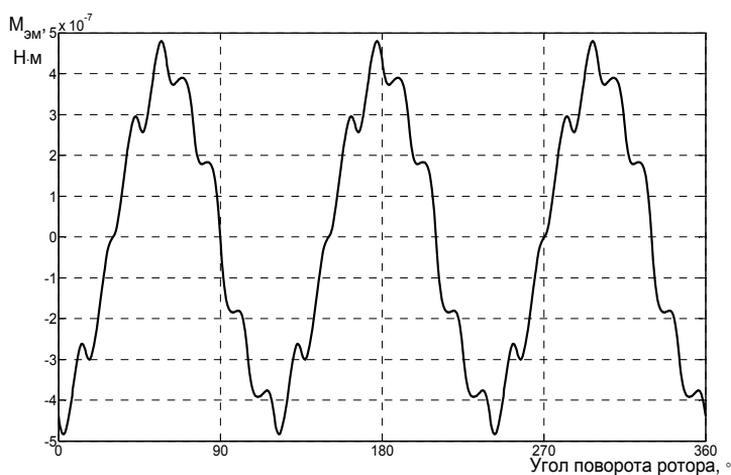


Рис. 5. Электромагнитный момент ротора

Расчетные данные магнитной индукции, полученные путем моделирования в разработанной программе на основе методов конформных отображений [1], отличаются от данных, полученных экспериментальным путем [3], на 20–25%.

На рис. 6 представлена изменённая конструкция ротора с радиальным и тангенциальным расположением постоянных магнитов на роторе (первый модифицированный вариант). На рис. 7 и рис. 8 представлены нормальная составляющая магнитной индукции и электромагнитный момент ротора для первого модифицированного варианта.

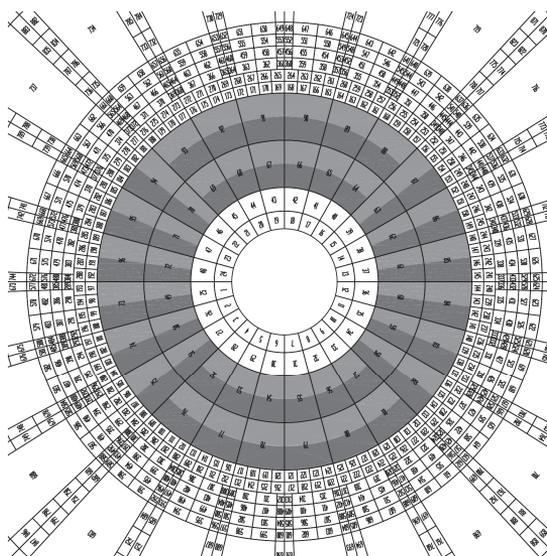


Рис. 6. Первый модифицированный вариант ротора (радиальное и тангенциальное расположение магнитных вставок)

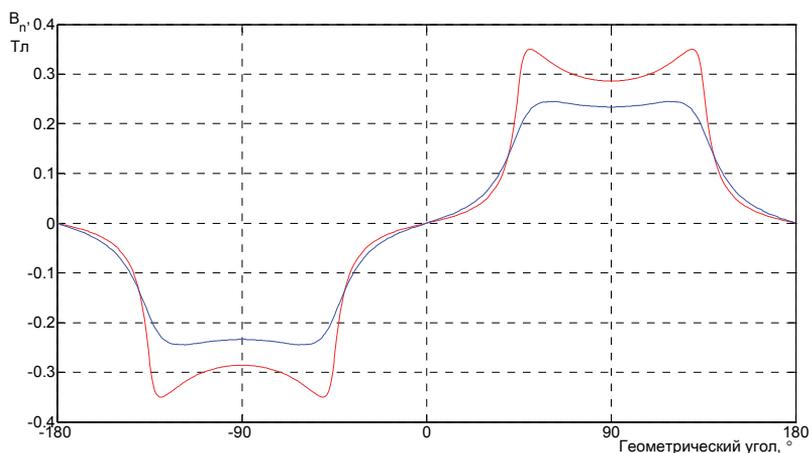


Рис. 7. Нормальная составляющая магнитной индукции по обеим границам воздушного зазора при нулевом значении электромагнитного момента

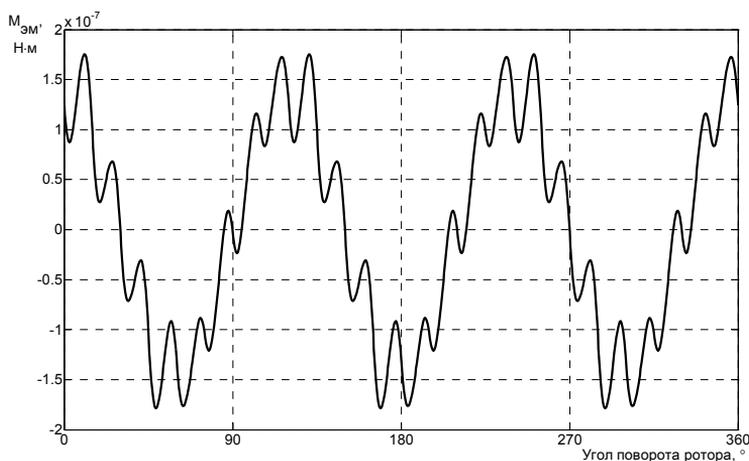


Рис. 8. Электромагнитный момент ротора для первого модифицированного варианта

Как видно из рис. 7, изменение конструкции ротора приводит, с одной стороны, к увеличению максимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре, с другой – к уменьшению площади распределения магнитной индукции по окружности, что отражается на уменьшении электромагнитного момента более чем в 2 раза (рис. 8).

Модель второй конструкции ротора представлена на рис. 9 (второй модифицированный вариант). Из расчёта исключены тангенциальные магниты на роторе. На рис. 10 и 11 представлены нормальная составляющая магнитной индукции и электромагнитный момент ротора для второго модифицированного варианта.

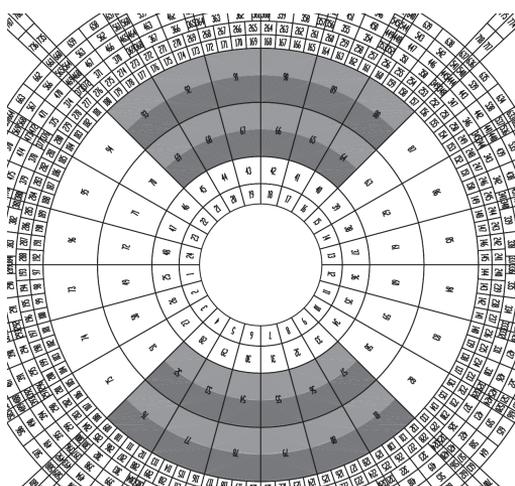


Рис. 9. Второй модифицированный вариант ротора

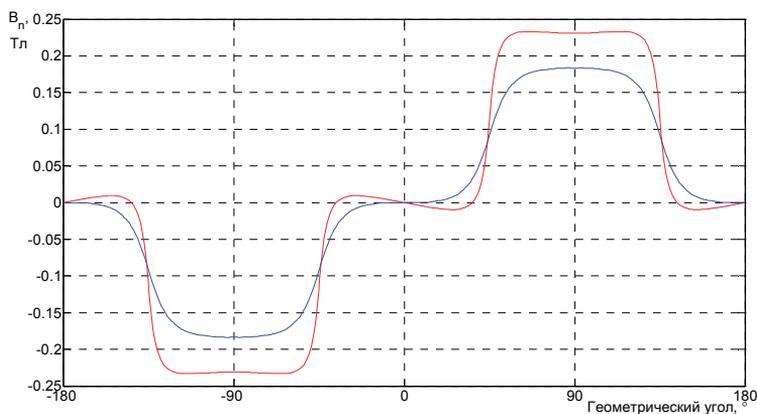


Рис. 10. Нормальная составляющая магнитной индукции по обеим границам воздушного зазора при нулевом значении электромагнитного момента

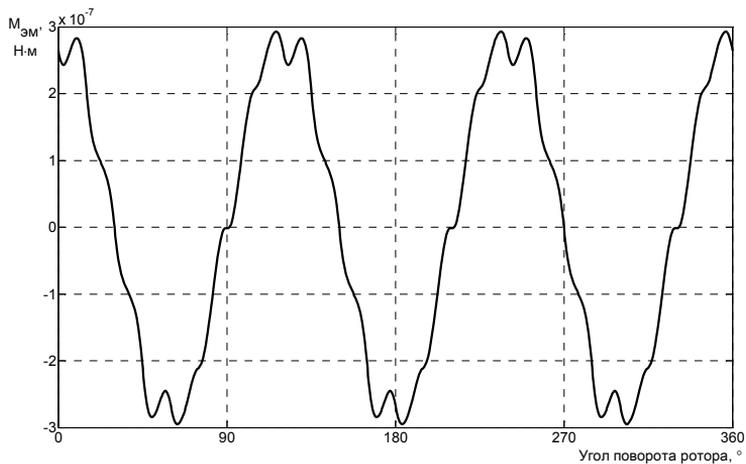


Рис. 11. Электромагнитный момент ротора для второго модифицированного варианта

Графики на рис. 10 и 11 указывают на существенное увеличение магнитной индукции и электромагнитного момента СВЭД, но их значения по-прежнему меньше ротора со сплошным цилиндрическим магнитом.

Третья конструкция, ротора с двумя перекрывающимися слоями радиально расположенных магнитов представлена на рис. 12 (третий модифицированный вариант). На рис. 13 и рис. 14 представлены нормальная составляющая магнитной индукции и электромагнитный момент ротора для третьего модифицированного варианта.

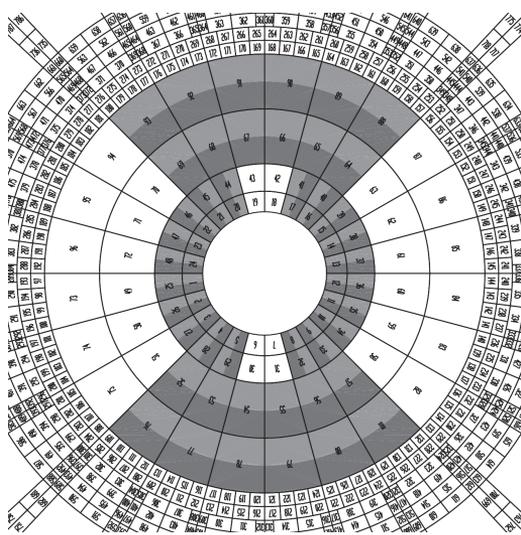


Рис. 12. Третий модифицированный вариант ротора

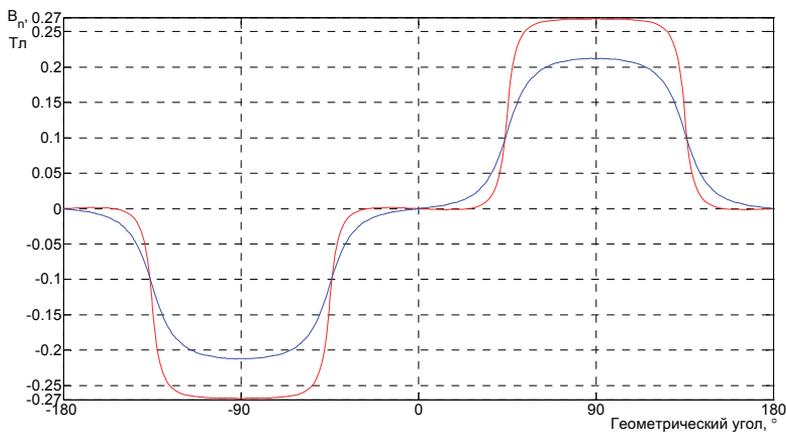


Рис. 13. Нормальная составляющая магнитной индукции по обеим границам воздушного зазора при нулевом значении электромагнитного момента

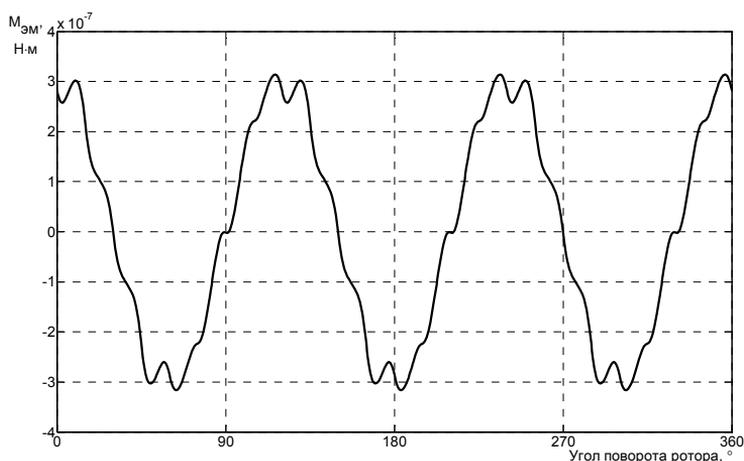


Рис. 14. Электромагнитный момент ротора для третьего модифицированного варианта

По рис. 13 мы наблюдаем увеличение максимального значения магнитной индукции в рабочем зазоре СМВЭД. Наблюдается незначительный рост электромагнитного момента (рис. 14). Однако он по-прежнему меньше электромагнитного момента ротора со сплошным постоянным магнитом.

Из графиков на рис. 5, 8, 11 и 14 видно, что изменение конструкции ротора приводит к существенному снижению электромагнитного момента, что связано с уменьшением тела постоянного магнита. В то же время графики на рис. 4, 7, 10 и 13 демонстрируют увеличение амплитудного значения магнитной индукции в рабочем зазоре СМВЭД.

Предложенные решения по изменению конструкции ротора являются недостаточными для повышения КПД СМВЭД до величин, сравнимых с микромашинами более высокой мощности. В то же время исключение или снижение краевых эффектов в теле постоянного магнита приводят к увеличению максимального значения магнитной индукции в рабочем зазоре СМВЭД, что способствует увеличению электромагнитного момента и энергетических характеристик СМВЭД. Таким образом, в ходе исследования выявлено, что краевые эффекты в теле постоянного магнита оказывают существенное влияние на энергетические и рабочие характеристики сверхминиатюрных электрических машин.

#### Литература

1. Афанасьев А.А., Белов В.В., Ефимов В.В., Николаев А.В. Метод удельной магнитной проводимости в расчётах радиальных и тангенциальных магнитных полей магнитоэлектрических машин // Электричество. 2013. № 4. С. 39–44.
2. Лифанов В.А., Помогаев Г.В., Ермолин Н.П. Расчёт электрических машин малой мощности. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. 127 с.
3. Нестерин В.А., Генин В.С., Романов Р.А., Нестерин А.В., Матюнин А.Н. Исследование сверхминиатюрной магнитоэлектрической машины с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов в режиме датчика скорости // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехнике и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваши. ун-та, 2018. С. 243–248.

4. Нестерин В.А., Генин В.С., Романов Р.А., Токмаков Д.А. Конструктивные особенности сверхминиатюрных электрических машин // Вестник Чувашского университета. 2017. № 3. С. 115–122.

5. Нестерин В.А., Романов Р.А., Матюнин А.Н., Мясникова Т.В. Бесконтактные высокотемпературные датчики углового положения на базе сверхминиатюрной магнитоэлектрической машины // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 176–184.

6. Романов Р.А. Определение рабочих точек постоянных магнитов разных типов для магнитной системы сверхминиатюрного вентильного электродвигателя // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 113–118.

7. Nesterin V.A., Genin V.S., Romanov R.A., Tokmakov D.A. Mathematical simulations of the electromagnetic system of a subminiature magnetoelectric engine. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 7, pp. 400–403.

8. Stolting H.-D. von, Hanser C. Handbuch Elektrische Kleinantriebe. München, Verlag, 2011, 464 p.

9. Seegen A. Kleinstmotoren bewegen die «Welt». Antriebs & Schalttechnik, 2015, Ausgabe 6.

10. Schönfeld R., Hofmann W. Elektrische Antriebe und Bewegungssteuerungen. VDE, 2005, 454 p.

---

**РОМАНОВ РОМАН АРТЕМЬЕВИЧ** – ассистент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ragnum@mail.ru).

**МЯСНИКОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (tatyana.myasnikova@yandex.ru).

**МАТЮНИН АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (matyunin86@mail.ru).

---

**Roman A. ROMANOV, Tatyana V. MYASNIKOVA, Alexey N. MATYUNIN**  
**INCREASE IN THE ELECTROMAGNETIC MOMENT**  
**OF A SUPERMINIATURE ELECTRIC MOTOR EXCITED BY RARE EARTH PERMA-**  
**NENT MAGNETS**

*Key words:* superminiature electric machine, superminiature valve electric motor, polycapillary technology, rare earth magnets, magnetic induction, electromagnetic moment.

*The article is devoted to improving the energy and performance characteristics of superminiature electric motors, which are widely used in modern devices of robotics and mechatronics. With the development of digital and Autonomous robotic systems, the tasks of improving the efficiency of Executive micromechanisms that affect the functionality and duration of work in offline mode have become particularly relevant. Traditional design and technological solutions used in higher-power electric machines are not scalable to the field of superminiature electric machines. Domestic and foreign developers offer various design options and manufacturing technologies. The key design feature of the electric motor under consideration is a glass stator made by polycapillary fiber technology and an excitation system from rare-earth permanent magnets. In the wall of the glass case, holes are evenly distributed around the circumference, in which the control winding is laid. The motor excitation system is a two-pole permanent magnet located on the rotating rotor shaft. The purpose of the research is to determine the effect of changing the design of the excitation system by changing the location of the magnetic poles. The research uses software that simulates the electromagnetic field using the finite element method. In the course of research, it was found that a decrease in the body of a permanent magnet leads to a decrease in the electromagnetic moment, which is not compensated by a decrease in edge effects at the boundary of the poles of the magnet. However, an increase in*

the value of the maximum magnetic induction in the air gap allows us to conclude that edge effects at the pole boundary have a significant effect on reducing the energy characteristics of superminiature micromachines. Thus, the solutions proposed in this paper are not sufficient to increase the efficiency of the engine, but the data obtained indicate the need to reduce the edge effects of permanent magnets.

#### References

1. Afanasyev A.A., Belov V.V., Efimov V.V., Nikolaev A.V. *Metod udel'noi magnitnoi provodimosti v raschetakh radial'nykh i tangentsial'nykh magnitnykh polei magnitoelektricheskikh mashin* [Method of specific magnetic conductivity in calculations of radial and tangential magnetic fields of magnetolectric machines]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 4, pp. 39–44.
2. Lifanov V.A., Pomogaev G.V., Ermolin N.P. *Raschet elektricheskikh mashin maloi moshchnosti* [Calculation of low-power electric machines]. Chelyabinsk, 2008, 127 p.
3. Nesterin V.A., Genin V.S., Romanov R.A., Nesterin A.V., Matyunin A.N. *Issledovanie sverkhminiaturnoi magnitoelektricheskoi mashiny s vzbuzhdeniem ot vysokoenergeticheskikh postoyannykh magnitov v rezhime datchika skorosti* [Investigation of a superminiature magnetolectric machine with excitation from high-energy permanent magnets in the speed sensor mode]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Sci. and Techn. Conf. «Problems and prospects of energy, electrical engineering and energy efficiency development»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2018, pp. 243–248.
4. Nesterin V.A., Genin V.S., Romanov R.A., Tokmakov D.A., *Konstruktivnye osobennosti sverkhminiaturnykh elektricheskikh mashin* [Design features of superminiature electric machines]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 115–122.
5. Nesterin V.A., Romanov R.A., Matyunin A.N., Myasnikova T.V. *Beskontaktnye vysokotemperaturnye datchiki uglovogo polozheniya na baze sverkhminiaturnoi magnitoelektricheskoi mashiny* [Non-contactless high-temperature angular sensors on the basis of superminiature magnetolectric machine]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 176–184.
6. Romanov R.A. *Opredelenie rabochikh toчек postoyannykh magnitov raznykh tipov dlya magnitnoi sistemy sverkhminiaturnogo ventil'nogo elektrodvigatelya* [Determination of working points of permanent magnets of different types for the magnetic system of a superminiature valve motor.]. In: *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 13<sup>th</sup> Rus. Sci. and Techn. Conf. «Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2019, pp. 113–118.
7. Nesterin V.A., Genin V.S., Romanov R.A., Tokmakov D.A. *Mathematical simulations of the electromagnetic system of a subminiature magnetolectric engine*. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 7, pp. 400–403.
8. Stolling H.-D. von, Hanser C. *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. München, Verlag, 2011, 464 p.
9. Seegen A. *Kleinstmotoren bewegen die «Welt»*. Antriebs & Schalttechnik, 2015, Ausgabe 6.
10. Schönfeld R., Hofmann W. *Elektrische Antriebe und Bewegungssteuerungen*. VDE, 2005, 454 p.

---

**ROMAN A. ROMANOV** – Assistant Lecturer, Electrical Equipment and Automated Manufacturing Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ragnum@mail.ru).

**TATYANA V. MYASNIKOVA** – Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor, Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Manufacturing Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (tatyanyamysnikova@yandex.ru).

**ALEXEY N. MATYUNIN** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Manufacturing Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (matyunin86@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Романов Р.А., Мясникова Т.В., Матюнин А.Н. Повышение электромагнитного момента сверхминиатюрного электрического двигателя с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 1. – С. 111–121. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-111-121.