



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.8
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118

В. В. ХАРЛАМОВ
Ю. В. МОСКАЛЕВ
А. Ю. МИЛЮТИН
А. П. ПОПОВ

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ НЕРАВНОМЕРНОГО ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ

В статье предложен подход к определению неравномерного воздушного зазора синхронной машины с призматическими постоянными магнитами на роторе, при котором распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора имеет форму, близкую к синусоидальной. Расчет магнитного поля модели электрической машины с заданными геометрическими размерами и свойствами материалов элементов выполнен в программе *FEMM*. Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука–Дживса, ограничения учитывались методом штрафных функций. В результате моделирования магнитного поля электрической машины с рассчитанным оптимальным неравномерным воздушным зазором получена кривая распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности статора, среднее отклонение которой от синусоидальной кривой составило 4,8 %.

Ключевые слова: электрическая машина, постоянный магнит, магнитное поле, воздушный зазор, оптимизация.

Электрические машины (ЭМ) с постоянными магнитами получают все большее распространение в различных отраслях промышленности, энергетических системах и на транспорте [1–7]. Такие ЭМ имеют высокие энергетические и массогабаритные показатели, более простую и надежную конструкцию возбудителя из-за отсутствия обмотки возбуждения, элементов скользящего токосъема, ис-

точника постоянного тока. Например, при равной мощности тяговой асинхронной ЭМ и синхронной ЭМ с постоянными магнитами (СМПМ) габариты и масса синхронной ЭМ меньше на 25 % [7].

Необходимо отметить некоторые недостатки таких ЭМ, среди которых высокая стоимость из-за наличия в конструкции дорогостоящих постоянных магнитов; сложность регулирования магнитного

потока; влияние механических и тепловых воздействий на постоянные магниты. Для изготовления ЭМ с постоянными магнитами необходима более сложная технология сборки из-за наличия сильных магнитных полей, при этом необходимо учитывать отличия характеристик отдельных магнитов, чтобы обеспечить симметрию магнитной системы ЭМ.

Рассмотрим ЭМ с постоянными магнитами, размещенными на цилиндрическом роторе. В настоящее время разработано большое количество схем размещения постоянных магнитов различной формы на цилиндрическом роторе [2–4; 8, 9]. На практике широкое распространение получили постоянные магниты в виде прямой четырехугольной призмы. Использование призматических магнитов позволяет упростить изготовление и повысить мощность ЭМ [2].

Существует несколько часто применяемых схем размещения призматических магнитов, встроенных в ротор: с радиальным намагничиванием; с тангенциальным намагничиванием; с намагничиванием по схеме Хальбаха; V-образная схема [2–4; 8, 9]. Каждая из этих схем размещения магнитов имеет свои особенности расположения магнитомягких и немагнитных материалов (втулок, полюсных наконечников, секторов между магнитами и т.п.), что позволяет уменьшить поля рассеивания, увеличить рабочий магнитный поток, снизить содержание высших гармоник индукции в воздушном зазоре [4, 8, 9].

Среди перечисленных выше схем размещения призматических магнитов наименьшее содержание высших гармоник будет при использовании схемы Хальбаха [9, 10], наибольшее среднее значение модуля магнитной индукции у ротора с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов [2, 10].

Для улучшения показателей работы магнитоэлектрических ЭМ, снижения потерь мощности, пульсации момента, вибрации, шума необходимо уменьшить значения гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре, что может быть реализовано за счет создания неравномерного воздушного зазора между сердечником статора и ротором [4].

Рассмотрим подход для определения оптимального закона изменения величины воздушного зазора между сердечником статора и ротором СМПМ, при котором по внутренней расточке статора будет обеспечено синусоидальное распределение нормальной составляющей магнитной индукции.

При решении задачи приняты следующие допущения: для исключения зубовых гармоник сердечник статора принят гладким; высококоэрцитивные магниты имеют одинаковые характеристики, отсутствует эксцентризитет ротора, ЭМ работает в режиме холостого хода.

В качестве примера рассмотрим СМПМ с четырьмя магнитными полюсами. Четырехполюсные СМПМ позволяют обеспечить меньшую частоту перемагничивания сердечника статора и магнитные потери в нем, чем ЭМ с большим числом полюсов, это обусловило широкое распространение таких ЭМ на практике [8].

Для моделирования магнитного поля ЭМ методом конечных элементов на практике часто используются различные пакеты программ, например, *ELCUT*, *FEMM*, *ANSYS*, *COMSOL* и другие [9, 11]. Эти программы позволяют по заданным геометрическим размерам, свойствам материалов элементов магнитной цепи рассчитывать картину магнитного

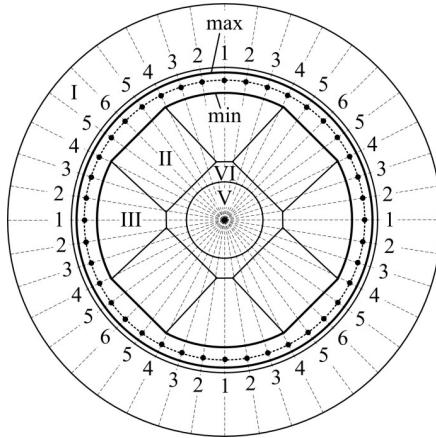


Рис. 1. Схема магнитной системы СМПМ для оптимизации неравномерного воздушного зазора: I — сердечник статора; II — постоянный магнит на роторе; III — сегмент из магнитомягкого материала; IV — втулка из немагнитного материала; V — вал

поля, а также определять необходимые для анализа количественные характеристики поля.

Предложенный подход к определению неравномерного воздушного зазора СМПМ, при котором обеспечивается синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, можно пояснить с использованием схемы на рис. 1.

Вдоль внутренней окружности сердечника статора на рис. 1 изображена окружность штриховой линией, которая соответствует внешней поверхности ротора ЭМ с равномерным воздушным зазором. На этой окружности показано N точек, полученных при пересечении окружности с радиальными линиями (количество точек при расчете может быть увеличено). Две окружности, обозначенные как «*min*» и «*max*», ограничивают минимальное и максимальное значения диапазонов, в которых могут по радиальным штриховым линиям перемещаться эти точки.

Изменение величины воздушного зазора реализуется за счет смещения в отрицательном $- \Delta_i$ (к линии «*min*») или положительном $+ \Delta_i$ (к окружности «*max*») направлениях каждой из точек.

Для обеспечения симметрии магнитной системы ЭМ на полюсных делениях номера точек повторяются, поэтому количество независимых переменных модели k значительно меньше, чем количество точек, размещенных вдоль окружности ротора N . На рис. 1 показано сорок точек на окружности ротора из них только шесть являются переменными модели $\pm \Delta_k$, описывающей распределение магнитной индукции по внутренней окружности сердечника статора.

Необходимо отметить, что обычно величина воздушного зазора ЭМ значительно меньше по сравнению с размерами сердечника статора и ротора, чем воздушный зазор, изображенный на рис. 1.

Вектор магнитной индукции в каждой точке вдоль окружности внутренней расточки статора можно представить в виде геометрической суммы векторов нормальной Bn_i и тангенциальной Bt_i составляющих. Модуль вектора магнитной индукции можно рассчитать по выражению:

$$B_i = \sqrt{Bn_i^2 + Bt_i^2}. \quad (1)$$

Значения магнитной индукции определяются для каждой i -й точки пересечения окружности внутренней расточки статора с радиальными линиями.

Среднее значение модуля магнитной индукции определено следующим образом:

$$B_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i . \quad (2)$$

При решении оптимизационной задачи необходимо определить такие значения переменных модели $\pm \Delta_k$, при которых изменение нормальной составляющей индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет синусоидальным:

$$Bn_{i,\sin}(l_i) = B_{\text{ср}} \sin\left(\frac{2}{R_1} l_i - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

где R_1 — радиус внутренней окружности сердечника статора, м;

l_i — длина по внутренней окружности сердечника статора от точки начала отсчета до заданной i -й точки, м.

Оптимальный неравномерный воздушный зазор будет определен при минимизации следующей функции:

$$F(\Delta\delta_k) = \sum_{i=1}^N (Bn_{i,\text{расч}}(l_i, \Delta\delta_k) - Bn_{i,\sin}(l_i))^2 \rightarrow \min , \quad (4)$$

где $Bn_{i,\text{расч}}(l_i, \Delta_k)$ — модуль вектора нормальной составляющей индукции в i -й точке внутренней окружности сердечника статора, рассчитанной в результате моделирования при заданных значениях независимых переменных Δ_k , Тл.

Для моделирования магнитного поля в программе FEMM [12] составлена двухмерная модель ЭМ с высококоэрцитивными магнитами на роторе со следующими размерами: внешний диаметр ротора — 100 мм, воздушный зазор — 1 мм, внутренний диаметр сердечника статора — 102 мм, наружный диаметр сердечника статора — 160 мм. Длина окружности по внутренней расточке статора (L) равна 320 мм. Все элементы магнитной цепи заданы материалами из библиотеки программы FEMM: из магнитомягкого материала выполнены сердечник статора и сегменты между магнитами (сталь марки М19), вал ротора стальной, немагнитная

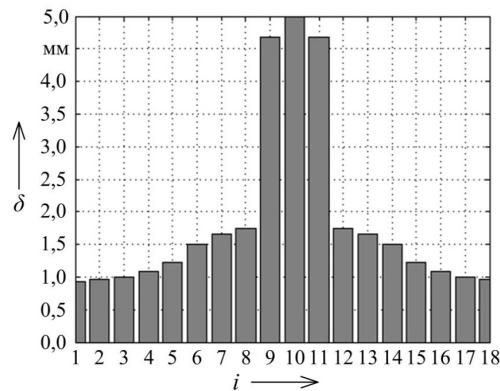


Рис. 2. Оптимальный неравномерный воздушный зазорна одном полюсном делении СМПМ

втулка алюминиевая, неодимовые магниты NdFeB (37 MGoe с коэрцитивной силой 950 кА/м). Высота и ширина призматических магнитов равны 28 мм и 24 мм соответственно.

Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука – Дживса, при этом вдоль окружности ротора задано 72 точки ($N = 72$), количество переменных модели Δ_k равно 10. Начальное приближение независимых переменных принято равным $\Delta_k = 0$ (равномерный воздушный зазор). Максимальные значения, ограниченные окружностью «max» (рис. 1), $\Delta_{k,\text{max}} = +0,5$ мм, минимально допустимые значения, ограниченные линией «min», $\Delta_{k,\text{min}} = [-2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,4; -3,3; -3,8; -4]$ мм.

Формирование множества схем магнитной системы СМПМ с различными неравномерными воздушными зазорами в FEMM выполнено с использованием языка программирования Lua [12].

В результате решения задачи определен оптимальный вектор независимых переменных: $\Delta_{k,\text{opt}} = [0,0625; 0,03125; 0; -0,09375; -0,21875; -0,5; -0,65625; -0,75; -3,6875; -4]$ мм.

По известному оптимальному вектору независимых переменных $\Delta_{k,\text{opt}}$ можно определить изменение величины воздушного зазора на одном полюсном делении СМПМ (рис. 2), за нулевой уровень принятая окружность внутренней поверхности статора, начало отсчета — точка на внутренней окружности статора, соответствующая середине сегмента из магнитомягкого материала на роторе.

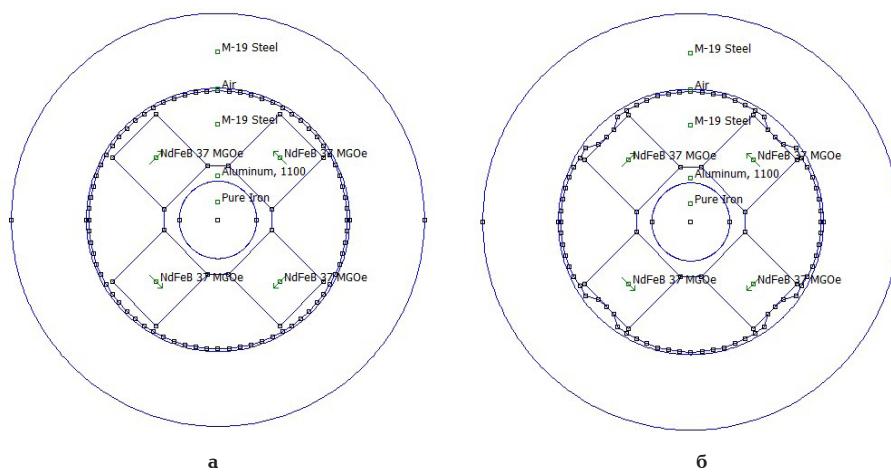


Рис. 3. Схема магнитной системы СМПМ в программе FEMM

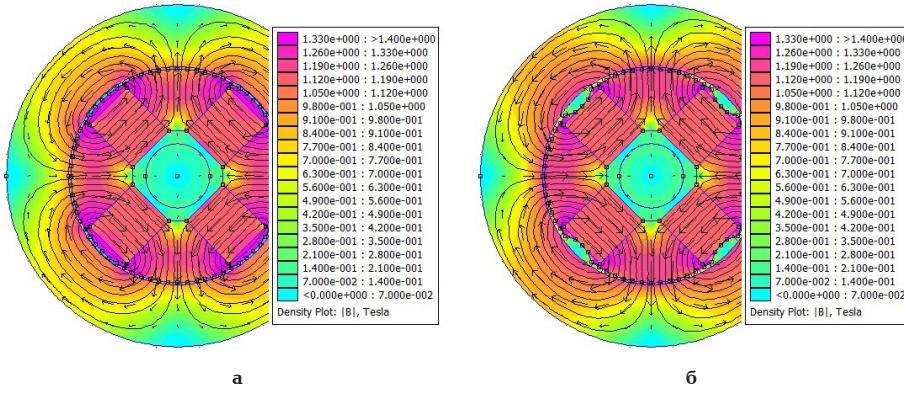


Рис. 4. Картина магнитного поля четырехполюсной СМПМ

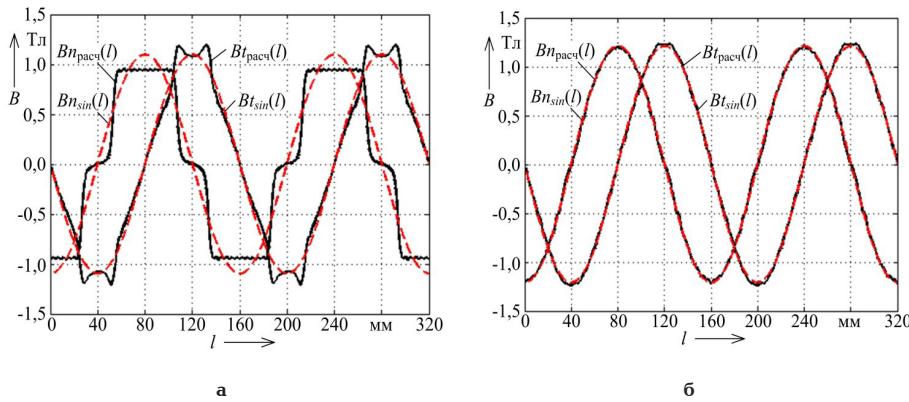


Рис. 5. Графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора

На рис. 3 приведены схемы магнитной системы СМПМ с равномерным (а) и оптимальным неравномерным воздушным зазором (б), составленные в программе *FEMM*.

Картинны магнитного поля четырехполюсной СМПМ с равномерным (а) и оптимальным неравномерным воздушным зазором (б) изображены на рис. 4.

На рис. 5 представлены графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора с равномерным (а) и неравномерным воздушным зазором (б).

Среднее значение модуля магнитной индукции, рассчитанное по формуле (2), составило 1,097 Тл для равномерного воздушного зазора (1 мм) и 1,210 Тл для неравномерного воздушного зазора. Увеличение магнитной индукции в воздушном зазоре достигается за счет уменьшения полей рассеивания, которые замыкаются по ферромагнитным элементам ротора, размещенным между постоянными магнитами и равномерным воздушным зазором (рис. 3а).

Для того чтобы оценить отличие расчетной кривой нормальной составляющей индукции от синусоидальной кривой, использовано выражение:

$$\delta B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Bn_{i,pacq}(l_i, \Delta\delta_{k,opt}) - Bn_{i,sin}(l_i)}{Bn_{i,sin}(l_i)} \right| 100 \% . \quad (5)$$

Среднее отклонение расчетной кривой нормальной составляющей магнитной индукции при неравномерном воздушном зазоре от синусоидальной кривой, определенное по выражению (5), составило

4,8 %. При расчете не учитывались точки, в которых $Bn_{sin}(l)$ принимает нулевые значения.

Использование предложенного подхода определения неравномерного воздушного зазора СМПМ позволит уменьшить содержание высших гармоник в рабочем магнитном потоке и, следовательно, улучшить показатели работы ЭМ. При этом в спектре магнитной индукции, так же как при равномерном воздушном зазоре, останутся зубцовые гармоники.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Предложен подход для оптимизации величины неравномерного воздушного зазора СМПМ с постоянными магнитами призматической формы на роторе с тангенциальным направлением намагниченности, при котором распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет близким к синусоидальному.

2. В качестве примера определен неравномерный воздушный зазор для четырехполюсной СМПМ, моделирование магнитного поля выполнено в программе *FEMM*. Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука – Дживса, ограничения учитывались методом штрафных функций.

3. Для СМПМ с равномерным и оптимальным неравномерным воздушным зазором получены графические изображения магнитного поля, графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора. Среднее отклонение расчетной кривой изменения нормальной составляющей индукции по внутренней окружности сердечника статора от синусоидальной кривой составило 4,8 %.

Библиографический список

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2010. 350 с. ISBN 978-5-469-01381-5.
 2. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с. ISBN 5-06-000719-7.
 3. Furlani Ed. P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. New York: Academic press, 2001. 537 p. ISBN 0-12-269951-3.
 4. Магин В. В. Особенности проектирования роторов малошумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 144, № 1. С. 3–15.
 5. Татевосян А. А., Мищенко В. С. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 90–93.
 6. Кулешов Е. В., Сергеев В. Д. Быстроходный магнитоэлектрический синхронный ветрогенератор // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2003. С. 338–344.
 7. Синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира. 2011. № 6. С. 38–42.
 8. Вавилов В. Е. Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 26–29.
 9. Геча В. Я., Захаренко А. Б., Нацкин А. К. Проектирование электромашины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 177, № 4. С. 3–10.
 10. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Серкова Л. Е. Анализ схем размещения постоянных магнитов на роторе четырехполюсной электрической машины // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 73–79. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-73-79.
 11. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Семина И. А. Исследование моделей магнитных систем открытого типа в комплексах программ ELCUT и ANSYS // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 231–235.
 12. Finite Element Method Magnetics. URL: <http://www.femm.info> (дата обращения: 24.10.2022).
-
- ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.
SPIN-код: 5093-8463
AuthorID (РИНЦ): 465264
ORCID: 0000-0003-3621-3377
AuthorID (SCOPUS): 7006332004
Адрес для переписки: etoe@omgups.ru
- МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.
SPIN-код: 1422-1951
AuthorID (РИНЦ): 657144
ORCID: 0000-0002-0970-937X
AuthorID (SCOPUS): 57200088110
Адрес для переписки: yugiyvm@mail.ru
- МИЛЮТИН Алексей Юрьевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.
Адрес для переписки: etoe@omgups.ru
- ПОПОВ Анатолий Петрович**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.
Адрес для переписки: etoe@omgups.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю., Попов А. П. Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 112–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118.

Статья поступила в редакцию 11.01.2023 г.

© В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин,
А. П. Попов

UNEVEN AIR GAP OPTIMIZATION OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT ROTOR MAGNETS

The article proposes an approach to determining the uneven air gap of a synchronous machine with prismatic magnets on the rotor, in which the distribution of the normal component of magnetic induction along the inner circumference of the stator core has a shape close to sinusoidal. The calculation of the magnetic field of an electric machine model with the specified geometric dimensions and properties of the element materials is performed in the FEMM program. To solve the optimization problem, the Hook-Jeeves method is used, restrictions are taken into account by the method of penalty functions. As a result of modeling the magnetic field of an electric machine with a calculated optimal uneven air gap, a distribution curve of the normal component of magnetic induction along the inner circumference of the stator is obtained, the average deviation of which from the sinusoidal curve is 4,8 %.

Keywords: electrical machine, permanent magnet, magnetic field, air gap, optimization.

References

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electrical machines. AC machines]. Saint Petersburg, 2010. 350 p. ISBN 978-5-469-01381-5. (In Russ.).
2. But D. A. Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny [Non-contact electrical machines]. Moscow, 1990. 416 p. ISBN 5-06-000719-7. (In Russ.).
3. Furlani Ed. P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. New York: Academic press, 2001. 537 p. ISBN 0-12-269951-3. (In Engl.).
4. Magin V. V. Osobennosti proyektirovaniya rotorov maloshchimnykh sinkhronnykh dvigateley s vozobuhdeniem ot postoyannykh magnitov [Rotor design special features of the low-noise synchronous motors with a constant excitation from permanent magnets] // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. Electromechanical Matters. VNIIEM Studies. 2015. Vol. 144, no. 1. P. 3–15. (In Russ.).
5. Tatevosyan A. A., Mishchenko V. S. Modelirovaniye magnitnogo polya sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami [Simulation of magnetic field of synchronous generator with permanent magnets] // Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin. 2016. No. 4 (148). P. 90–93. (In Russ.).
6. Kuleshov E. V., Sergeyev V. D. Bystrokhodnyy magnitoelektricheskiy sinkhronnyy vetrogenerator [High-speed magnetoelectric synchronous wind generator] // Sovremennyye tendentsii v razvitiu i konstruirovaniyu kollektornykh i drugikh elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii. Current Trends in the Development and Design of Collector and other Electromechanical Energy Converters. Omsk, 2003. P. 338–344. (In Russ.).
7. Sinkhronnyye tyagovyye dvigateli s vozobuhdeniem ot postoyannykh magnitov [Synchronous traction motors with
- permanent magnet excitation] // Zheleznyye dorogi mira. The World's Railways. 2011. No. 6. P. 38–42. (In Russ.).
8. Vavilov V. E. Vybor magnitnoy sistemy rotora elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii s vysokokoerativnymi postoyannymi magnitami [Selection of magnetic system of rotor of energy electromechanical converters with high-coercive permanent magnets] // Vestnik mashinostroyeniya. Engineering Journal. 2018. No. 1. P. 26–29. (In Russ.).
9. Gecha V. Ya., Zakharenko A. B., Nadkin A. K. Proyektirovaniye elektromashiny s postoyannymi magnitami, namagnichennymi po skheme Khal'bakha [Designing an electrical machine with permanent magnets magnetized according to Halbach scheme] // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. Electromechanical Matters. VNIIEM Studies. 2020. Vol. 177, no. 4. P. 3–10. (In Russ.).
10. Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Serkova L. E. Analiz skhem razmeshcheniya postoyannykh magnitov na rotore chetyrekhpolyusnoy elektricheskoy mashiny [Analysis of permanent magnet arrangement on the rotor of a four-pole electric machine] // Dinamika sistem, mehanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 73–79. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-73-79. (In Russ.).
11. Andreyeva E. G., Tatevosyan A. A., Semina I. A. Issledovaniye modeley magnitnykh sistem otkrytogo tipa v kompleksakh programm ELCUT i ANSYS [Investigation of open magnetic system models in ELCUT and ANSYS software packages] // Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin. 2013. No. 2 (120). P. 231–235. (In Russ.).
12. Finite Element Method Magnetics. URL: <http://www.femm.info> (accessed: 24.10.2022). (In Engl.).

KHARLAMOV Viktor Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Machines and

General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.
SPIN-code: 5093-8463
AuthorID (RSCI): 465264
ORCID: 0000-0003-3621-3377
AuthorID (SCOPUS): 7006332004
Correspondence address: emoe@omgups.ru
MOSKALEV Yuriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.
SPIN-code: 1422-1951
AuthorID (RSCI): 657144
ORCID: 0000-0002-0970-937X
AuthorID (SCOPUS): 57200088110
Correspondence address: yuriyvm@mail.ru
MILYUTIN Aleksey Yuryevich, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

Correspondence address: emoe@omgups.ru
POPOV Anatoliy Petrovich, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.
Correspondence address: emoe@omgups.ru

For citations

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milutin A. Yu., Popov A. P. Uneven air gap optimization of synchronous machine with permanent rotor magnets // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 112 – 118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118.

Received January 11, 2023.

© V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev,
A. Yu. Milutin, A. P. Popov