

УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ РОТОРА НА ИНДУКЦИЮ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д., Гайсин Р.А.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,  
Уфа, e-mail: s2\_88@mail.ru

Важной задачей при проектировании высокооборотных электрохимических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами является определение такой формы постоянных магнитов, при которой масса электрохимического преобразователя будет минимальной, индукция, создаваемая постоянными магнитами в воздушном зазоре, будет максимальной, при этом кривая магнитной индукции будет синусоидальной, а потери энергии в электрохимическом преобразователе будут минимальными. Поэтому целью статьи являются исследования влияния формы постоянных магнитов ротора на характеристики электрохимического преобразователя энергии. Достижение поставленной цели осуществляется путем исследования магнитного поля ротора с постоянными магнитами численными методами с использованием программного пакета Ansoft Maxwell. При этом рассматриваются четыре формы постоянных магнитов ротора электрохимического преобразователя энергии. В результате исследований определяется оптимальная форма постоянных магнитов ротора с точки зрения механических характеристик ротора и максимума магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами.

**Ключевые слова:** высокооборотные электрохимические преобразователи энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами, Ansoft Maxwell, диаметрально намагничивание

## STUDY OF EFFECT OF ROTOR PERMANENT-MAGNET FORM ON THE AIR GAP INDUCTION OF THE ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Karimov R.D., Gaysin R.A.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: s2\_88@mail.ru

An important objective in the design of high-speed electromechanical energy converters with high-coercivity permanent magnets is the definition of a form of permanent magnets, in which the mass of the electromechanical transducer will be minimum, the induction created by the permanent magnets in the air gap will be the maximum, and the curve is sinusoidal magnetic induction and energy losses the electromechanical converter will be minimal. Therefore, the aim of the article is the study of the influence of the permanent magnet rotor on the characteristics of the electromechanical energy converter. Achieving this goal is accomplished by the study of the magnetic field of the rotor with permanent magnets numerical methods using the software package Ansoft Maxwell. Here we consider four forms of permanent magnet rotor of electromechanical energy converter. The studies determined optimum shape of the permanent magnets of the rotor in terms of mechanical characteristics of the rotor and the maximum magnetic field created by permanent magnets.

**Keywords:** high-speed electromechanical energy converters with high-coercivity permanent magnets, Ansoft Maxwell, diametric magnetization

Важной задачей при проектировании высокооборотных электрохимических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВМП) является определение такой формы ВМП, при которой масса ЭМПЭ будет минимальной, индукция, создаваемая ВМП в воздушном зазоре, будет максимальной, при этом кривая магнитной индукции будет синусоидальной, а потери энергии в ЭМПЭ при этом будут минимальными [1].

Задачам исследования влияния формы ВМП ротора ЭМПЭ посвящены работы [2–5], в которых рассматриваются либо роторы коллекторного типа, либо решаются задачи сравнения энергетических характеристик ротора коллекторного типа и ротора с призматическими или цилиндрическими магнитами. При этом решению задачи оптимизации формы ВМП ротора с призматическими и цилиндрическими ВМП, намагниченными в диаметрально направлении, практически не уделяется внимания. Хотя последние находят широкое применение в высокооборотных ЭМПЭ [6–8] для децентрализованной энергетики, авиакосмической промышленности и судостроения.

В связи с этим задачей данной работы являются исследования влияния формы ВМП ротора с призматическими и цилиндрическими магнитами, намагниченными в диаметрально направлении, на характеристики ЭМПЭ.

Решение поставленной задачи осуществляется численными методами с использованием программного пакета *Ansoft Maxwell*. При этом рассматриваются четыре формы ВМП ротора (рис. 1 а, г) для высокооборотного ЭМПЭ (частота вращения более 24 000 об/мин).

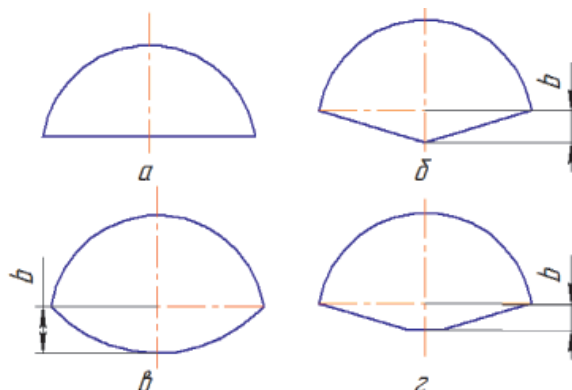


Рис. 1. Исследуемые формы ВПМ ротора

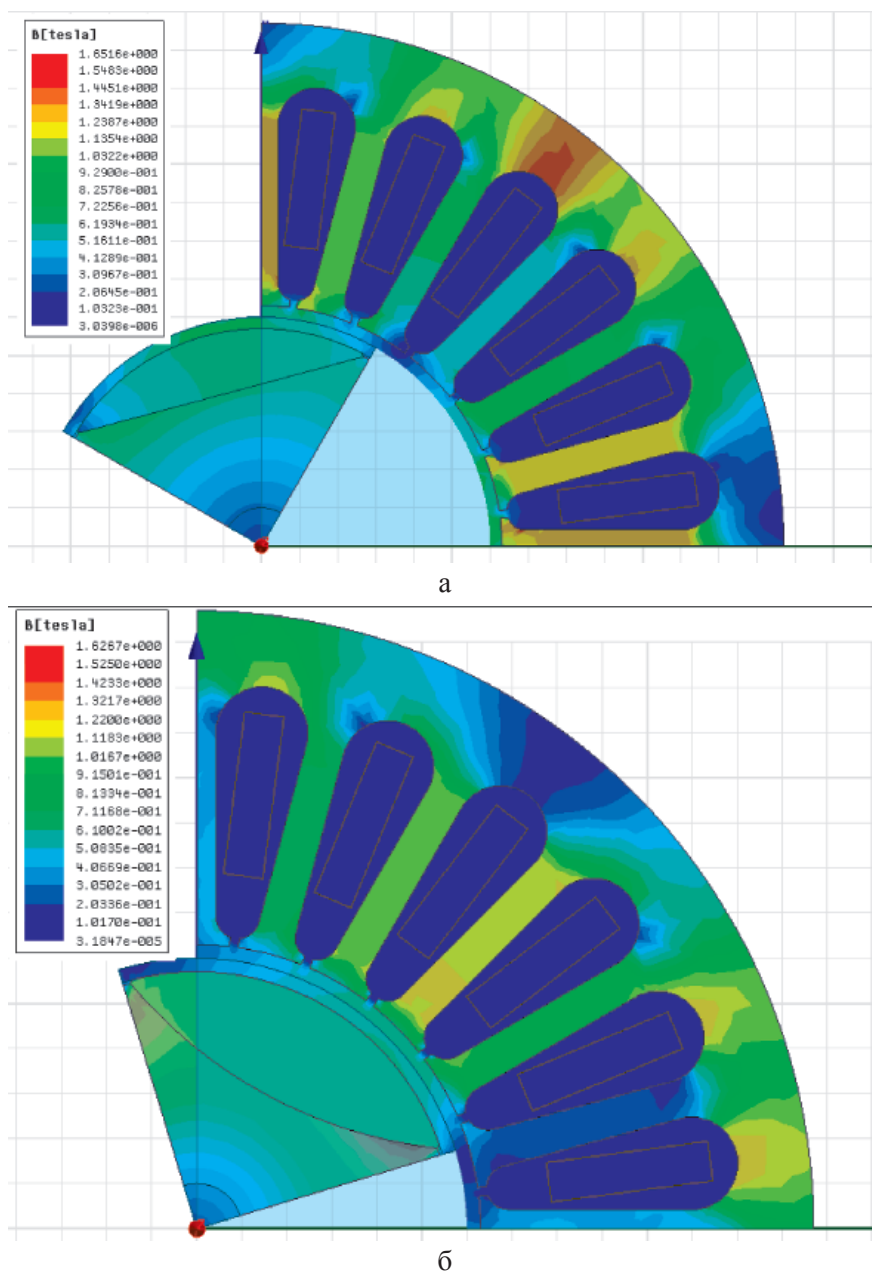


Рис. 2. Спектр распределения магнитной индукции для ВПМ: а – для ВПМ формы по рис. 1а; б – для ВПМ формы по рис. 1б

В результате решения поставленной задачи было получено распределение магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ при холостом ходе для каждой рассматриваемой геометрической формы (рис. 2 а, б).

В результате решения поставленной задачи было получено распределение магнитного поля в магнитной цепи ЭМПЭ при холостом ходе для каждой рассматриваемой геометрической формы (рис. 2).

А также были получены зависимости распределения магнитной индукции от величины  $b$  (рис. 1), которые были с помощью функций *Ansoft Maxwell* разложены в ряд Фурье с целью определения их гармонического состава. На рис. 3, 4, 5 представлены зависимости 1, 3 и 5 гармоник для каждой исследуемой формы ВПМ ротора.

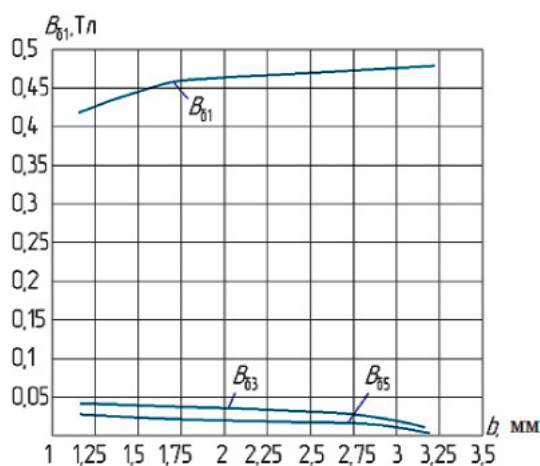


Рис. 3. Зависимость 1, 3 и 5 гармоник для ВПМ формы по рис. 1 г

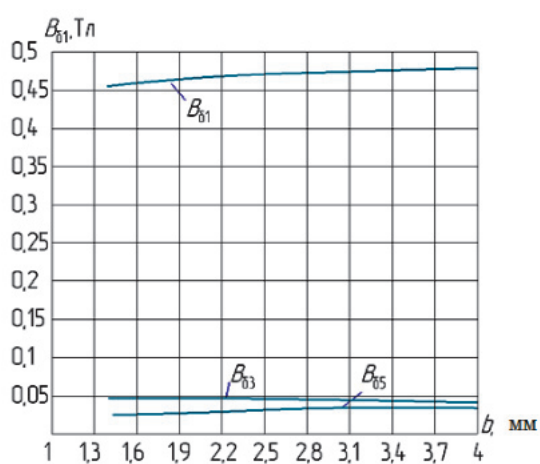


Рис. 4. Зависимость 1, 3 и 5 гармоник для ВПМ формы по рис. 1 б

Из зависимостей, представленных на рис. 3, видно, что с увеличением величины  $b$  для исследуемых численных параметров

для ВПМ формы по рис. 1 г увеличивается первая гармоническая составляющая (при увеличении величины  $b$  с 1,25 до 2,25 первая гармоническая составляющая увеличивается на 8%), при этом третья и пятая гармонические составляющие снижаются на 3–4%. Другими словами, при неизменном воздушном зазоре, при применении ВПМ в формы по рис. 1 г можно ожидать увеличение мощности на 17–18%, а также увеличение КПД ЭМПЭ с ВПМ за счет снижения третьей и пятой гармонических составляющих.

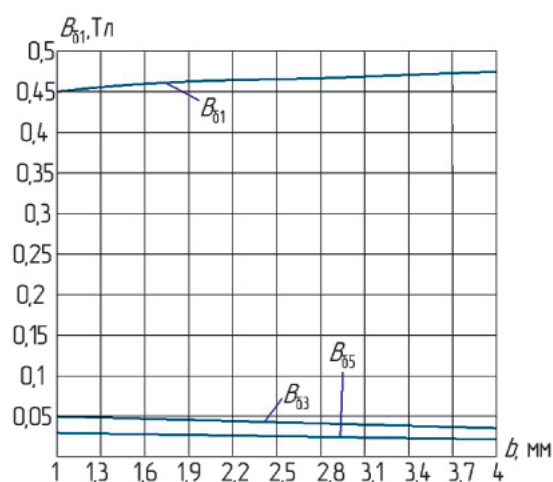


Рис. 5. Зависимость 1, 3 и 5 гармоник для ВПМ формы по рис. 1 в

Важно отметить, что с увеличением расстояния  $b$  происходит увеличение массы ВПМ, а следовательно, для высокоскоростных ЭМПЭ и увеличение центробежных сил, действующих на бандажную оболочку ротора, что приведет к увеличению толщины последней, а следовательно, и снижению магнитной индукции в воздушном зазоре. Поэтому для высокоскоростных ЭМПЭ изменение формы ВПМ может оказаться малоэффективным для повышения мощности. В то же время полученные результаты могут являться перспективными для низкоскоростных ЭМПЭ с ВПМ, применяемых, к примеру, в ветро- и гидроэнергетике.

Из зависимостей, представленных на рис. 4, видно, что с увеличением величины  $b$  для исследуемых численных параметров для ВПМ формы по рис. 1 б увеличивается первая гармоническая составляющая (при увеличении величины  $b$  с 1,6 до 3,2 первая гармоническая составляющая увеличивается на 3–3,5%) при этом третья гармоническая составляющая снижается на 2–3%. При этом пятая гармоническая составляющая незначительно увеличивается. Другими словами, при неизменном воздушном

зоре, при применении ВПМ в формы по рис. 1 б можно ожидать увеличение мощности на 7–8%, а также увеличение КПД ЭМПЭ с ВПМ за счет снижения третьей гармонической составляющей.

Таким образом, форма ВПМ по рис. 1 б менее эффективна по сравнению с формой ВПМ по рис. 1 г по энергетическим характеристикам.

Из зависимостей, представленных на рис. 5 видно, что с увеличением величины  $b$  для исследуемых численных параметров для ВПМ формы по рис. 1 в увеличивается первая гармоническая составляющая (при увеличении величины  $b$  с 1,25 до 2,25 первая гармоническая составляющая увеличивается на 4%), при этом третья гармоническая составляющая снижается на 2–3%. При этом 5 гармоническая составляющая незначительно снижается на 0,5–1%. Другими словами, при неизменном воздушном зазоре, при применении ВПМ в формы по рис. 1 г можно ожидать увеличение мощности на 8–9%, а также увеличение КПД ЭМПЭ с ВПМ за счет снижения третьей гармонической составляющей.

Таким образом, из рассмотренных форм ВПМ можно сделать вывод об эффективности формы ВПМ по рис. 1 г. Причем наибольшую эффективность данная форма будет иметь при применении в низкоскоростных ЭМПЭ. Так как при применении данной формы в высокоскоростных ЭМПЭ с ВПМ при увеличении величины  $b$  вызовет увеличение толщины бандажной оболочки ротора.

Представленные результаты могут быть использованы на практике при проектировании ЭМПЭ с ВПМ.

#### Список литературы

1. Гребеников В.В., Прымак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2009. – 2. – С. 57–60.
2. Зарицкая Е.И. Оценка влияния конфигурации магнитной системы на характеристики тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 28–32.
3. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. *Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами*. – М.: Машиностроение, 2014. – 262 с. ISBN 978-5-94275-755-7.
4. Advanced MicroTurbine System. REVIEW © 2002. Capstone Turbine Corporation // [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.microturbine.com/ju> (дата обращения 21.07.2012).
5. Bailey C., Saban D., Guedes-Pinto P. Design of High-Speed Direct-Connected Permanent-Magnet Motors and Generators for the Petrochemical Industry // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2009. – Vol. 45. – № 3. – P. 1159–1165.

6. Dong-Kyun Woo, Il-Woo Kim, Hyun-Kyo Jung Optimal Rotor Structure Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine based on Efficient Genetic Algorithm Using Kriging Model // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2012. – Vol. 7, № 4. – P. 530–537.

7. El-Hasan T., Luk P. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high-speed axial flux generators // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2003. – Vol. 39. – № 5. – P. 3340–3342.

8. Kolehmainen, J. Optimal Dovetail Permanent Magnet Rotor Solutions for Various Pole Numbers // *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. – 2009. – Vol. 57, Issue 1. – P. 70–77

9. Li W., Zhang X., Cheng S. Thermal Optimization for a HSPMG Used for Distributed Generation Systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2013. – Vol. 60. – № 2. – P. 474–482.

#### References

1. Grebenikov V.V., Prymak M.V. Issledovanie vlijaniya konfiguracii magnitnoj sistemy na momentnye harakteristiki jelektrodvigatelej s postojannymi magnitami // *Jelektrotehnika i jelektrojenergetika*. 2009, no. 2 pp. 57–60.
2. Zarickaja E. I. Ocenka vlijaniya konfiguracii magnitnoj sistemy na harakteristiki tihohodnogo sinhronnogo generatora s postojannymi magnitami // *Jelektrotehnika i Jeletromehanika*. 2012. no. 1. pp. 28–32.
3. Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Hajrullin I.H., Vavilov V.E. *Jeletromehanicheskie sistemy s vysokokocercitivnymi postojannymi magnitami* // Moskva, Mashinostroenie, 2014. 262 p. ISBN 978-5-94275-755-7.
4. Advanced MicroTurbine System. REVIEW © 2002. Capstone Turbine Corporation // [Jeletronnyj resurs] URL: <http://www.microturbine.com/ju> (data obrashhenija 21.07.2012).
5. Bailey C., Saban D., Guedes-Pinto P. Design of High-Speed Direct-Connected Permanent-Magnet Motors and Generators for the Petrochemical Industry // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009. Vol. 45. no. 3. pp. 1159–1165.
6. Dong-Kyun Woo, Il-Woo Kim, Hyun-Kyo Jung Optimal Rotor Structure Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine based on Efficient Genetic Algorithm Using Kriging Model // *Journal of Electrical Engineering & Technology* Vol. 7, no. 4, pp. 530–537, 2012.
7. El-Hasan T., Luk P. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high-speed axial flux generators // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 39. no. 5. pp. 3340–3342.
8. Kolehmainen, J. Optimal Dovetail Permanent Magnet Rotor Solutions for Various Pole Numbers // *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Vol. 57, Issue: 1, 2009, pp. 70–77
9. Li W., Zhang X., Cheng S. Thermal Optimization for a HSPMG Used for Distributed Generation Systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60. no. 2. pp. 474–482.

#### Рецензенты:

Демин А.Ю., д.т.н., профессор кафедры электроники и биомедицинских технологий, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа;

Фетисов В.С., д.т.н., профессор кафедры информационно-измерительной техники, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.