

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ

А. А. СИЛАЕВ¹, М. Я. МАРУСИНА¹, Е. Ю. ЗАКЕМОВСКАЯ²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sila3v@gmail.com

²ООО „НПП Новтех-СПб“, 198515, Санкт-Петербург, Россия

Представлен метод анализа и оптимизационного синтеза бесколлекторных двигателей постоянного тока, используемых в различных робототехнических и мехатронных системах. Приведены результаты моделирования магнитного поля электродвигателя с помощью программы конечно-элементного анализа FEMM. Сохранение высокого КПД электродвигателя в расширенном диапазоне частот вращения обеспечивается за счет поворота магнитов ротора и введения угла опережения подачи тока в обмотки статора.

Ключевые слова: бесколлекторный двигатель постоянного тока, КПД, момент силы, угол поворота магнитов, диапазон частот вращения, метод конечных элементов

Практика эксплуатации бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ), входящих в состав различных робототехнических и мехатронных систем, показала необходимость обеспечения режимов работы электродвигателя, характеризующихся изменением частоты вращения и электромагнитного момента в широких пределах. Обычно высокий крутящий момент используется лишь в ограниченном диапазоне частот вращения [1]. Возможность обеспечения постоянной мощности с высокой эффективностью в более широком диапазоне частот вращения зависит от способа регулировки магнитного потока электродвигателя.

Были проанализированы различные методы расширения рабочего диапазона частот вращения БДПТ с возбуждением от постоянных магнитов [2], заключающиеся в регулировке магнитного потока в зазоре электродвигателя. Основное преимущество механической регулировки магнитного потока в рабочем зазоре электродвигателя перед электрической состоит в том, что отсутствуют дополнительные потери в меди на возбуждение, при этом обеспечиваются широкий диапазон и плавность регулирования [3]. Патентный анализ механических методов расширения рабочего диапазона частот вращения БДПТ позволил выявить основные сложности при механической регулировке магнитного потока [4—7].

Расчет электродвигателя типа БДПТ проводился в программном комплексе конечно-элементного анализа FEMM [8]. На основании требуемых выходных параметров электродвигателя (момент на валу, частота вращения ротора) предварительно был осуществлен выбор геометрических размеров статора и ротора, величины немагнитного рабочего зазора, числа пар полюсов ротора, зубцов статора, число эффективных витков в фазе и проводников в пазу статора [9, 10]. Далее оптимизация конструкции электродвигателя осуществлялась по предложенному критерию оптимизации:

$$Q = \max(\text{avg}(\text{Efficiency}) + \text{avg}(\text{OutputTorque})/1000),$$

где Efficiency — КПД электродвигателя, нормированный на 100 %; OutputTorque — выходной момент, нормированный к номинальному моменту электродвигателя.

Максимум Q был получен для коллекторной конструкции ротора электродвигателя: ротор набирается из призматических постоянных магнитов чередующейся полярности с тан-

генциальным направлением намагничивания, магниты устанавливаются на немагнитную втулку, между магнитами устанавливаются концентраторы из магнитомягкого материала.

В результате анализа изменения магнитного потока путем механической регулировки для полученной в ходе оптимизации коллекторной конструкции ротора электродвигателя выбрана схема с поворотом тангенциальных магнитов на 90 пространственных градусов вокруг осей, проходящих через собственный центр масс магнитов (рис. 1; 1 — магнитопровод статора; 2 — обмотки статора; 3 — постоянный магнит; 4 — полюсные наконечники с возможностью поворота вместе с магнитами относительно их центра масс; 5 — полюсные наконечники без возможности поворота вместе с магнитами относительно их центра масс). Такой тип механической конструкции позволяет регулировать магнитный поток ротора в широком диапазоне без существенной потери КПД, так как ротор относительно статора всегда занимает положение оптимального угла нагрузки. Также данный тип конструкции электродвигателя отличается компактностью механизма, позволяющего регулировать магнитный поток. Кроме того, сохранение высокого КПД электродвигателя в расширенном диапазоне частот вращения обеспечивается за счет введения угла опережения подачи тока в обмотки статора, различного для высокоскоростного и низкоскоростного вращений.

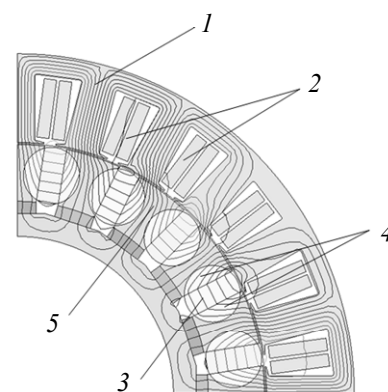


Рис. 1

Вопросы математического моделирования магнитных полей различных устройств рассмотрены в ряде работ [11—15]. Моделирование изменения магнитного потока в зазоре электродвигателя для различных поворотов магнитов ротора производилось методами конечно-элементного анализа. На рис. 2 представлена радиальная составляющая магнитного поля в зазоре электродвигателя (кривые соответствуют углам поворота магнитов от 0 до 90° с шагом 10°).

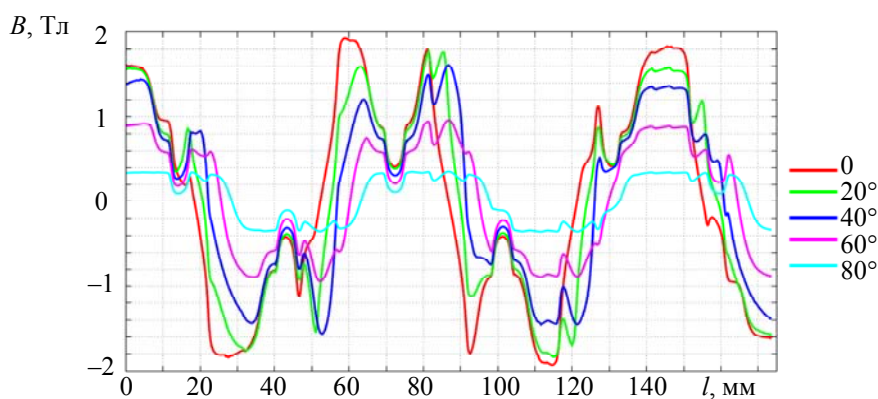


Рис. 2

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением угла поворота магнитов ротора амплитуда индукции снижается, но характер распределения индукции в зазоре остается неизменным.

На рис. 3 проиллюстрировано влияние угла опережения подачи тока в обмотки статора на КПД электродвигателя для разных частоты вращения и моментов силы нагрузки (*a* — при скорости вращения 1000 об/мин, моменте силы 400 Нм и повороте магнитов 65°, *б* — при 500 об/мин, 400 Нм и повороте 10°). При разных режимах работы электродвигателя возникают различные зависимости КПД от угла опережения включения обмоток (на рис. 3, *a* при увеличении угла опережения КПД растет, на *б* — убывает).

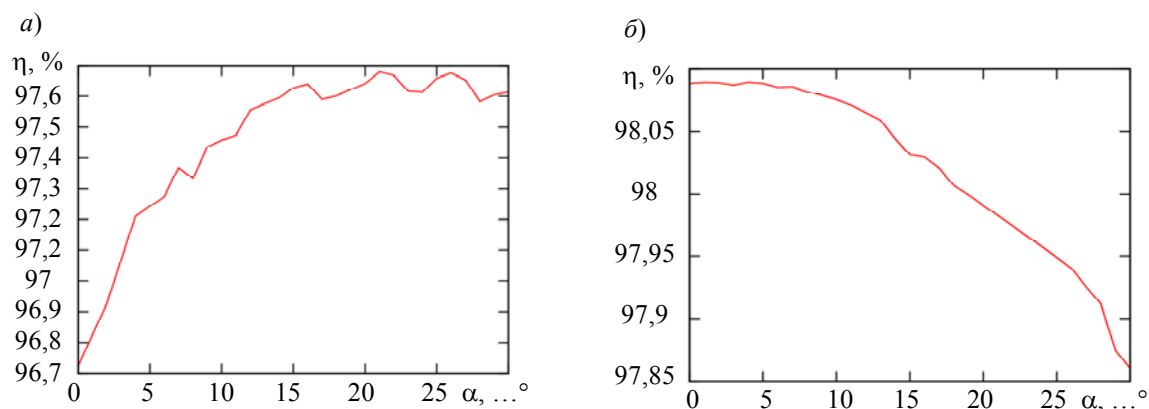


Рис. 3

Был разработан метод анализа и оптимизационного синтеза с изменяемой конфигурацией ротора с использованием выбора оптимального угла опережения подачи тока в обмотки статора.

Функция оптимизации — максимум КПД. Параметр оптимизации — угол опережения подачи тока в обмотки. Рассматриваемый частотный диапазон работы электродвигателя определяется поворотом магнитов ротора относительно собственного центра масс при условии постоянства мощности на валу электродвигателя. Угол поворота магнитов ротора изменяется от 0 до 70° . Ограничение по току для всех рассматриваемых режимов работы электродвигателя 1000 А.

Для фиксированных напряжения питания $U_{\text{пит}}=100$ В и угла поворота ротора путем перебора значений угла опережения подачи тока в обмотки находится угол опережения, при котором КПД электродвигателя максимален. Угол опережения подачи тока в обмотки статора изменяется от 0 до 30° .

График зависимости КПД электродвигателя от скорости вращения и момента силы приведен на рис. 4, а. Углы опережения подачи тока в обмотки статора α (от 0 до 30°), при которых достигаются эти значения КПД, приведены на рис. 4, б. Изменение угла поворота магнитов φ при построении зависимости на рис. 4, а приведено на рис. 4, в. Угол поворота магнитов менялся от 0 до 70° с шагом 5° .

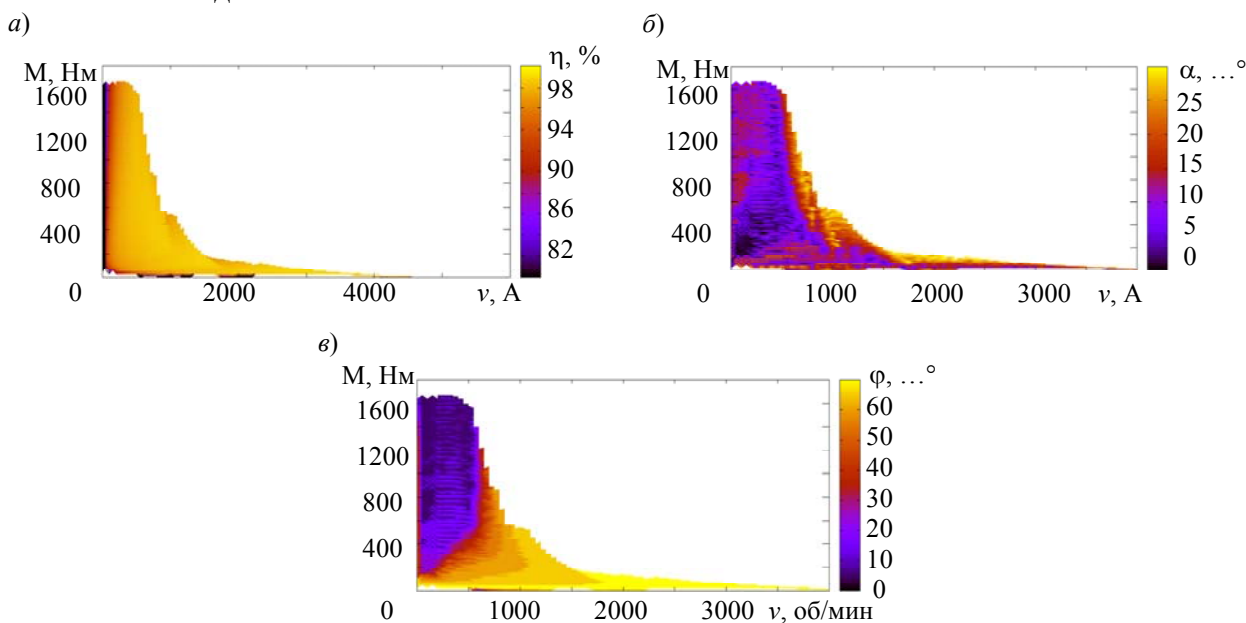


Рис. 4

Эти результаты следует интерпретировать следующим образом: если электродвигатель функционирует на частоте вращения 500 об/мин и момент силы 600 Нм, то для получения максимального КПД в этой рабочей точке следует установить ограничение тока статора 350 А, угол поворота магнитов 20° и угол опережения включения обмоток статора 8° .

Представленный в статье метод анализа и оптимизационного синтеза электродвигателей позволяет повысить эффективность функционирования БДПТ в расширенном диапазоне частот вращения за счет совместного применения угла опережения подачи тока в обмотки статора и угла поворота магнитов ротора электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang Hui, Hui Yang, Zhu Z. Q., Heyun Lin, Wenqiang Chu. Flux Adjustable Permanent Magnet Machines: A Technology Status Review // Chinese J. of Electrical Engineering. 2016. Vol. 2, N 2. December.
2. Chau K. T., Chan C. C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles // IEEE Trans. Ind. Electron. 2008. Vol. 55, N 6. P. 2246—2257.
3. Boldea I., Tutelea L. N., Parsa L., and Dorrell D. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: an overview // IEEE Trans. Ind. Electron. 2014. Vol. 61, N 10. P. 5696—5711.
4. Pat. CN109756091, H02K 21/02, H02K 21/14. Flux-weakening acceleration permanent magnet motor / Zhang Lichun, Cheng Fangxun, Wang Chenhui. 201811573761.0.
5. Pat. CN102255451, H02K 16/00, H02K 1/27 H02K 1/16. Multipolar serial flux-weakening motor / Qian Zhijun. 201010180740.X.
6. Пат. RU 2543993С2, МПК H02K 21/12, H02K 1/27. Электродвигатель и/или генератор с механической подстройкой постоянного магнитного поля / Л. Финкл, А. Фуриа. 2012122012/07.
7. Pat. CN109756091, H02K 21/02, H02K 21/14. Brushless Motor Having Permanent Magnets / Masahiro Masuzawa, Noriyoshi Hirao, Takashi Sasaki, Masahiro Mita. 5.821.710.
8. Marusina M. Y., Silaev A. A., Nevmerzhiisky D. A. Method of Converting an Induction Motor to a Permanent Magnet Synchronous Motor (Ls-Pmsm) with Linear Starting Using FEA for Mechatronic Systems // Proc. 2019 IEEE Intern. Conf. “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). 2019. P. 356—358. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928320.
9. Силаев А. А., Марусина М. Я., Невмержицкий Д. А. Стенд для испытаний синхронного бесколлекторного двигателя // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 1030—1033.
10. Силаев А. А., Марусина М. Я. Восстановление формы пазов ротора асинхронного двигателя по результатам испытаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 119—125.
11. Марусина М. Я. Коррекция неоднородности основного магнитного поля МР-томографа на постоянных магнитах. Дис. ... канд. техн. наук. СПб: ИТМО, 1993. 128 с.
12. Галайдин П. А., Иванов В. А., Марусина М. Я. Расчет и проектирование электромагнитных систем магниторезонансных томографов: Учеб. пос. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 87 с.
13. Marusina M. Y., Bazarov B. A., Galaidin P. A. et al. Magnetic system on the basis of permanent magnets for a flowmeter of multiphase fluid environments // Meas. Tech. 2014. Vol. 57. P. 461. DOI:10.1007/s11018-014-0478-0.
14. Marusina M. Y., Bazarov B. A., Galaidin P. A. et al. Design of a Gradient System for a Multiphase Flowmeter // Meas. Tech. 2014. Vol. 57. P. 580. DOI: 10.1007/s11018-014-0501-5.
15. Марусина М. Я., Силаев А. А. Влияние градиента магнитного поля ионного насоса на пробное тело абсолютного баллистического гравиметра // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 8. С. 701—705. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-701-705.

Сведения об авторах

- Алексей Алексеевич Силаев** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sila3v@gmail.com
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р. техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Евгения Юрьевна Закемовская** — канд. техн. наук; ООО „НПП Новтех-СПб“; ведущий инженер; E-mail: jane_zak8787@mail.ru

Поступила в редакцию
02.03.2021 г.

Ссылка для цитирования: Силаев А. А., Марусина М. Я., Закемовская Е. Ю. Повышение эффективности функционирования электродвигателей мехатронных систем в широком диапазоне частот вращения // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 270—275.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF ELECTRIC MOTORS OF MECHATRONIC SYSTEMS IN A WIDE RANGE OF ROTATIONAL FREQUENCIES

A. A. Silaev¹, M. Ya. Marusina¹, E. Yu. Zakemovskaya²

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: sila3v@gmail.com

²Novtex-SPb Research Company Ltd, 198515, St. Petersburg, Russia

Brushless direct current motors (BDCM) used in various robotic and mechatronic systems are considered. A method for analysis and optimization of the motors synthesis is proposed. Results of magnetic field modeling in the electric motor in question performed with the use of the FEMM finite element analysis program are presented. Maintaining a high efficiency of the electric motor in an extended range of rotation speeds is ensured by turning the rotor magnets and introducing an angle of advance for the current supply to the stator windings.

Keywords: brushless permanent-magnet dc motor, efficiency factor, moment of force, angle of rotation of magnets, frequency range, finite element method

REFERENCES

1. Yang Hui, Hui Yang, Zhu Z.Q., Heyun Lin, Wenqiang Chu. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, no. 2(2).
2. Chau K.T., Chan C.C., and Liu C. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, no. 6(55), pp. 2246–2257.
3. Boldea I., Tutelea L.N., Parsa L. and Dorrell D. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014, no. 10(61), pp. 5696–5711.
4. Patent CN109756091, H02K 21/02, H02K 21/14, *Flux-weakening acceleration permanent magnet motor*, Zhang Lichun, Cheng Fangxun, Wang Chenhui, Patent application no. 201811573761.0.
5. Patent CN102255451, H02K 16/00, H02K 1/27 H02K 1/16, *Multipolar serial flux-weakening motor*, Qian Zhijun, Patent application no. 201010180740.X.
6. Patent RU2543993C2, H02K 21/12, H02K 1/27, *Elektrodvigatel' i/ili generator s mekhanicheskoy podstroykoy postoyannogo magnitnogo polya* (Electric Motor and/or Generator with Mechanical Adjustment of the Permanent Magnetic Field), Finkl L., Furia A., Patent application no. 2012122012/07. (in Russ.)
7. Patent CN109756091, H02K 21/02, H02K 21/14, *Brushless Motor Having Permanent Magnets*, Masahiro Masuzawa, Noriyoshi Hirao, Takashi Sasaki, Masahiro Mita, Patent application no. 5.821.710.
8. Marusina M.Y., Silaev A.A., Nevmerzhiitskiy D.A. *Proc. of the 2019 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2019, pp. 356–358. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928320.
9. Silayev A.A., Marusina M.Ya., Nevmerzhiitskiy D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 1030–1033. (in Russ.)
10. Silayev A.A., Marusina M.Ya. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 2(64), pp. 119–125. (in Russ.)
11. Marusina M.Ya. *Korrektziya neodnorodnosti osnovnogo magnitnogo polya mr-tomografa na postoyannykh magnitakh* (Correction of the Inhomogeneity of the Main Magnetic Field of MRI Scanner with Permanent Magnets), Candidate's Thesis, St. Petersburg, 1993, 128 p. (in Russ.)
12. Galaydin P.A., Ivanov V.A., Marusina M.Ya. *Raschet i proyektirovaniye elektromagnitnykh sistem magnitarezonansnykh tomografov* (Calculation and Design of Electromagnetic Systems of Magnetic Resonance Tomography), St. Petersburg, 2004, 87 p. (in Russ.)
13. Marusina M.Y., Bazarov B.A., Galaidin P.A. et al. *Measurement Techniques*, 2014, no. 57, pp. 461. DOI:10.1007/s11018-014-0478-0.
14. Marusina M.Y., Bazarov B.A., Galaidin P.A. et al. *Measurement Techniques*, 2014, no. 57, pp. 580. DOI:10.1007/s11018-014-0501-5.
15. Marusina M.Ya., Silayev A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 8(61), pp. 701–705. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-701-705 (in Russ.)

Data on authors

- Alexey A. Silaev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: sila3v@gmail.com
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Evgeniya Yu. Zakemovskaya** — PhD; Novtex-SPb Research Company Ltd; Leading Engineer; E-mail: jane_zak8787@mail.ru

For citation: Silaev A. A., Marusina M. Ya., Zakemovskaya E. Yu. Improving the efficiency of the functioning of electric motors of mechatronic systems in a wide range of rotational frequencies. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 270—275 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-270-275