

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333

Александр Николаевич Голубев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий, Россия, Иваново, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Алексей Владимирович Алейников

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, e-mail: Aleynikov-av@yandex.ru

Алгоритм управления, улучшающий вибросиловые характеристики синхронного многофазного магнитоэлектрического электропривода

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для снижения вибраций и шумов, возникающих в процессе работы синхронных двигателей, используют разработки новых, более совершенных конструкций двигателей, а также специальные алгоритмы управления. Использование многофазного ($m > 3$) исполнения синхронного двигателя позволяет влиять на конфигурацию магнитного поля в более широких пределах, что делает актуальной задачу разработки алгоритма управления, улучшающего вибросиловые характеристики многофазного двигателя.

Материалы и методы. Использован метод конечных элементов для расчета магнитного поля в 2D-постановке, реализованный в программном комплексе Elcut, а также методы имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink.

Результаты. Предложен алгоритм управления многофазными синхронными двигателями с постоянными магнитами, снижающий уровень вибраций. Улучшение вибросиловых характеристик достигается путем питания двигателя токами определенной формы, при которой они компенсируют пульсации электромагнитных сил, возникающих между различными частями электрической машины. Данный алгоритм основан на определении электромагнитных сил и момента непосредственно в процессе управления. Приведены результаты моделирования работы двигателя с разработанным алгоритмом управления. Проведено сопоставление характеристик, полученных при использовании данного алгоритма управления, с характеристиками, соответствующими питанию от синусоидального источника.

Выводы. Вибросиловые характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами возможно улучшить посредством системы управления, питающей двигатель токами соответствующим образом синтезированной формы. При этом потребляемая мощность увеличится незначительно.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный синхронный электродвигатель, пульсации электромагнитного момента, вибрации электродвигателя, алгоритм управления

Aleksandr Nikolaevich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Technical Sciences, Professor of Theoretical Basics of Electrotechnics and Electrotechnology Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Aleksey Vladimirovich Aleynikov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, e-mail: Aleynikov-AV@yandex.ru

Control algorithm to improve the vibronoise characteristics of synchronous multi-phase magnetoelectric electric drive

Abstract

Background. Vibrations and noises occur during the operation of synchronous motors. To reduce them, more advanced engine designs and special control algorithms are used. The application of a multiphase ($m>3$) synchronous motor design allows you to influence the configuration of the magnetic field in a wider range. Thus, the task to develop a control algorithm that improves the vibration-noise characteristics of a multiphase motor is relevant.

Materials and methods. The finite element method is used to calculate the magnetic field in a 2D formulation, implemented in the Elcut software package. Also, the simulation methods with the MatLab Simulink package are applied.

Results. The authors suggest the algorithm to control multiphase synchronous motors with permanent magnets that reduces the level of vibrations. Improvement of vibration-noise characteristics is achieved when the motor is supplied with currents of the certain form, and they compensate the pulsation of electromagnetic forces that occur between various parts of the electric machine. This algorithm is based on the measurement of the electromagnetic forces and the torque directly in the process of control. The results of modeling the operation of the engine with the developed control algorithm are presented. The authors have compared the characteristics obtained using the developed control algorithm and the characteristics that correspond to the sinusoidal source supply.

Conclusion. The vibration-noise characteristics of a permanent magnet synchronous motor can be improved by using the control system. This control system generates currents in an appropriately synthesized form. In this case, the power consumption will increase slightly.

Key words: synchronous electrical drive, multiphase synchronous electric motor, pulsation of the electromagnetic moment, vibration of the electric motor, control algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.038-044

Введение. С развитием техники к электроприводам постоянно выдвигаются все более жесткие требования, в том числе, и к их виброшумовым характеристикам. Возникновение вибраций происходит из-за переменных сил, действующих на различные элементы электрической машины и вызывающих их деформацию [1, 2]. Эти силы можно разделить по характеру их возникновения на механические, аэродинамические и электромагнитные. Вибрации первой группы могут быть вызваны дисбалансом ротора, конструктивного исполнения и технологии изготовления подшипников, несоосного соединения двигателя с нагрузкой, низкой температурой масла (при принудительной циркуляции масла). Ко второй группе относятся в основном вибрации, обусловленные конструкцией вентиляторов и вентиляционных каналов. К третьей группе относятся вибрации, вызванные электромагнитными силами, воз-

никающими между различными частями электрической машины. Условно они делятся на радиальные, тангенциальные и осевые. Пульсации электромагнитного момента приводят к неравномерности вращения двигателя, что может снижать качество обработки деталей и увеличивать нагрузку на элементы креплений и подшипниковые узлы. Радиальные силы, приложенные к зубцам, вызывают деформации статорного кольца и являются основной причиной возникновения магнитных шумов [3, 4].

Использование многофазных двигателей позволяет целенаправленно воздействовать на конфигурацию магнитного поля в воздушном зазоре [5, 6]. Это дает возможность посредством системы управления влиять на распределение в пространстве и во времени электромагнитных сил. Алгоритм управления, реализующий снижение пульсаций электромагнитных сил, позволит уменьшить вибрации и шумы,

возникающие при работе двигателя. При построении такого алгоритма необходимо основываться на расчетах реального распределения магнитного поля в машине.

Методы исследования. В [7] предложен подход к определению электромагнитного момента многофазного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ), основанный на предварительном расчете полевой модели [8] и позволяющий в режиме реального времени рассчитывать момент с учетом реальной конструкции машины, дискретного распределения обмоток по пазам и насыщения магнитной цепи. Итоговое уравнение для расчета электромагнитного момента от фазных токов для двигателя без ферромагнитных вставок на роторе имеет вид

$$M_{\text{э}} = [i]^T \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}, \quad (1)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент; $[i]$ – матрица мгновенных значений фазных токов $[\Psi_0]$ – матрица-столбец потокосцеплений фаз, обусловленных действием постоянных магнитов (ПМ) ротора.

Используя выражение (1), можно определить мгновенное значение токов для обеспечения требуемого значения электромагнитного момента:

$$[i] = \frac{M_{\text{э}}}{[S]^T \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}}, \quad (2)$$

где $[S]$ – матрица-столбец с размерностью, равной числу фаз, служащая для задания формы фазных токов. Ее значения заполняются по формуле

$$S_k = \frac{d\Psi_{0k}}{dt} \left| \frac{d\Psi_{0k}}{dt} \right| - \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{d\Psi_{0j}}{dt} \left| \frac{d\Psi_{0j}}{dt} \right|. \quad (3)$$

В [9] описан подход к определению в реальном времени радиальных электромагнитных сил, действующих на каждый зубец статора СДПМ. Электромагнитные силы предлагается определять через магнитный поток на основании предварительного расчета полевой модели:

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0 S_Z} \left(\left| \Phi_{\text{ПМ}+}(\alpha) + \lambda(\alpha) \cdot i_{3\text{К}} \frac{S_{Z+}(\alpha)}{S_Z} \right| + \left| \Phi_{\text{ПМ}-}(\alpha) - \lambda(\alpha) \cdot i_{3\text{К}} \frac{S_{Z-}(\alpha)}{S_Z} \right| \right)^2, \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{ПМ}+}$ – часть магнитного потока от южного полюса постоянного магнита; $\Phi_{\text{ПМ}-}$ –

часть магнитного потока от северного полюса постоянного магнита; S_Z – площадь наконечника зубца; S_{Z+} – площадь наконечника зубца, где протекает поток $\Phi_{\text{ПМ}+}$; S_{Z-} – площадь наконечника зубца, где протекает поток $\Phi_{\text{ПМ}-}$; $i_{3\text{К}}$ – ток рассматриваемого зубцового контура [10]; $\lambda(\alpha)$ – магнитная проводимость зубцового контура.

Согласно (4), представляется возможным снизить пульсации радиальных сил, действующих на зубцы статорного кольца двигателя, меняя токи зубцового контура таким образом, чтобы радиальная сила, действующая на каждый зубец, была равна заданной. Однако проведенные исследования показали, что изменение тока контура зубца, через который происходит замыкание магнитного потока от разных полюсов магнита, практически не изменяет радиальную силу до тех пор, пока магнитный поток полностью не перестанет замыкаться через данный зубец, что происходит при довольно больших значениях тока. Данный факт показывает, что невозможно полностью устранить пульсации радиальной силы только за счет формы токов. При этом на зубцы, через которые происходит замыкание магнитного потока, действует минимальная радиальная сила. Из этого следует, что снизить пульсации радиальной силы можно путем уменьшения силы, действующей на остальные зубцы. В соответствии с этим, был разработан алгоритм формирования токов статорной обмотки, снижающей вибрации статорного кольца посредством уменьшения разницы между максимальной и минимальной радиальными силами, действующими на зубцы статорного кольца, при заданном ограничении по току.

Алгоритм должен формировать кривые фазных токов при соблюдении следующих требований: поддержание заданного значения электромагнитного момента; обеспечение снижения максимального значения радиальных сил, действующих на зубцы; удержание фазных токов в заданных ограничениях по амплитудному и действующему значениям. Данные условия можно записать в виде следующей системы соотношений:

$$\begin{cases} M_{\text{э}} = M_3, \\ I_m \leq I_{m3\text{АД}}, \\ I \leq I_{3\text{АД}}, \\ \max(F_r) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

Один из вариантов алгоритма, обеспечивающего достижение поставленных условий с учетом заданных ограничений, представлен на рис. 1.

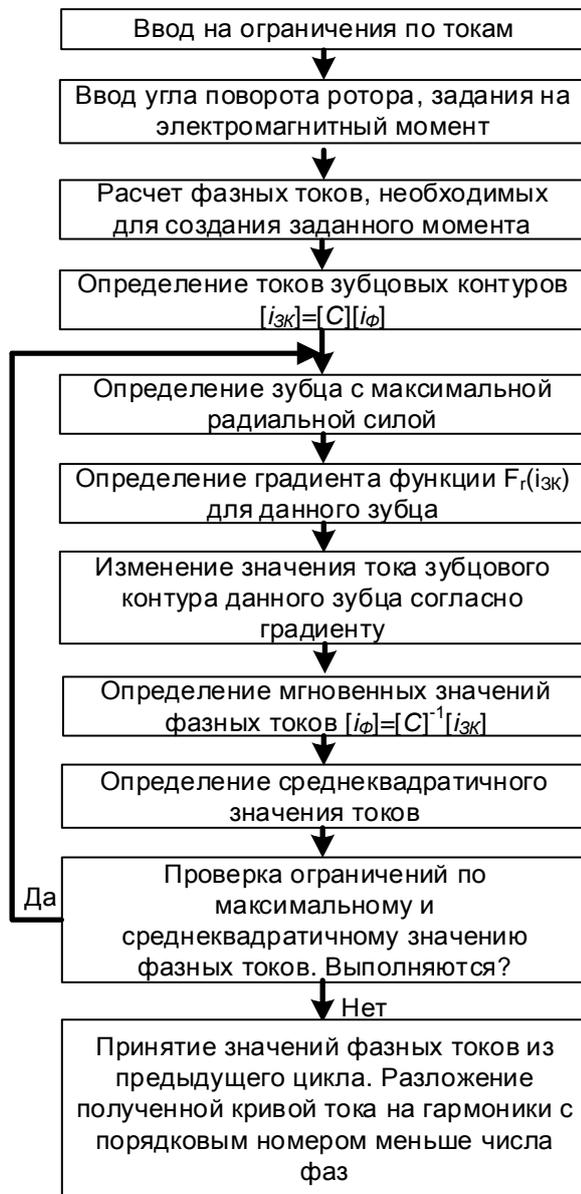


Рис. 1. Алгоритм формирования фазных токов, обеспечивающих улучшение вибросиловых характеристик многофазного СДПМ

Алгоритм работает следующим образом: на основании текущего положения ротора по уравнениям (1)–(3) рассчитываются токи статорной обмотки, необходимые для создания заданного электромагнитного момента. После этого программа входит в цикл уменьшения пульсаций радиальных сил. В цикле программа находит зубец с максимальной радиальной силой при данных токах и положении ротора. Далее по уравнению (4) определяется градиент за-

висимости радиальной силы от контурных токов $F_r(i_{k3})$, согласно которому изменяется значение тока зубцового контура выбранного зубца. Следующим этапом является вычисление новых фазных токов и проверка ограничений по их максимальному и среднеквадратичному значениям.

Среднеквадратичное значение рассчитывается по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m i_k^2} \quad (6)$$

Если в функции присутствуют гармоники только с порядковым номером, меньшим числа фаз, то среднеквадратичное значение будет равно действующему значению.

Цикл повторяется до тех пор, пока среднеквадратичное и амплитудное значения фазных токов не превысят заданных параметров. После выхода из цикла выбираются значения фазных токов из предыдущей итерации.

Для управления силами каждого зубца отдельно требуется многофазный двигатель с числом катушек на одну фазу, равным 1 [11]. Создание синтезируемой формы тока возможно обеспечить посредством использования преобразователя, работающего по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} u_k = \varphi_k - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varphi_k, \\ \varphi_k = U_d \text{ if } (i_k < i_{k_зАд}) \text{ and } \left(i_{k_зАд} > -\frac{1}{3} i_M \right), \\ \varphi_k = -U_d \text{ if } (i_k > i_{k_зАд}) \text{ and } \left(i_{k_зАд} < \frac{1}{3} i_M \right), \\ \text{else } \varphi_k = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где u_k – мгновенное значение напряжения в фазе под номером $k \in (1 \dots m)$; U_d – значение постоянного напряжения на входе инвертора; i_k – мгновенное значение тока в фазе под номером $k \in (1 \dots m)$; $i_{k_зАд}$ – мгновенное значение задания на ток в фазе под номером $k \in (1 \dots m)$; i_M – текущее амплитудное значение тока; φ_k – мгновенное значение потенциала на выходе с инвертора в фазе $k \in (1 \dots m)$.

Данный алгоритм позволяет создавать напряжения, обеспечивающие питание двигателя заданной формой токов.

Результаты исследования. Работоспособность предложенного подхода была проверена на моделях девятифазных СДПМ с двумя парами полюсов и раз-

личными способами размещения постоянных магнитов. Рассматривался вариант двигателя, индуктор которого выполнен из четырех магнитов, установленных на роторе (рис. 2), и вариант, когда каждый полюс индуктора набирался из нескольких магнитов (рис. 3).

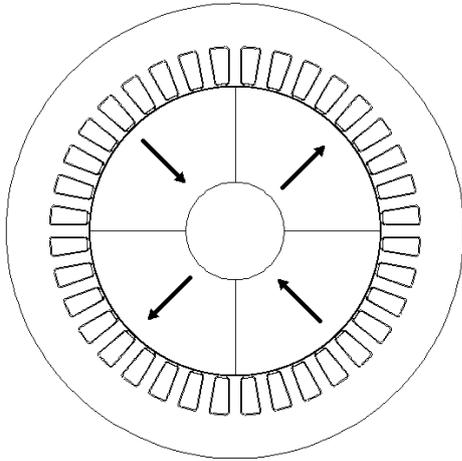


Рис. 2. Конструкция девятифазного СДПМ, каждый полюс которого выполнен из одного магнита

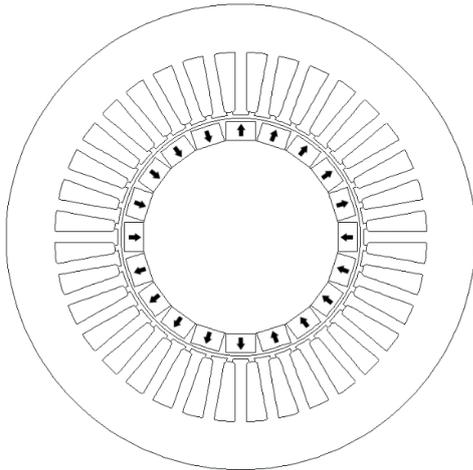


Рис. 3. Конструкция девятифазного СДПМ с полюсами, набранными из пяти магнитов

Для двигателя с индуктором из четырех магнитов (рис. 2) на рис. 4 представлены результаты расчета математической модели с заданием на уменьшение пульсаций электромагнитных сил при ограничении по действующему и амплитудному значениям тока 130 % от номинального. Для сравнения на рис. 5 представлены результаты расчета этого же двигателя с системой управления с питанием от синусоидального источника. В табл. 1 приведены интегральные параметры для экспериментов, представленных на рис. 4 и 5, а также максимальные значения изменения электромагнитного момента и радиальной силы.

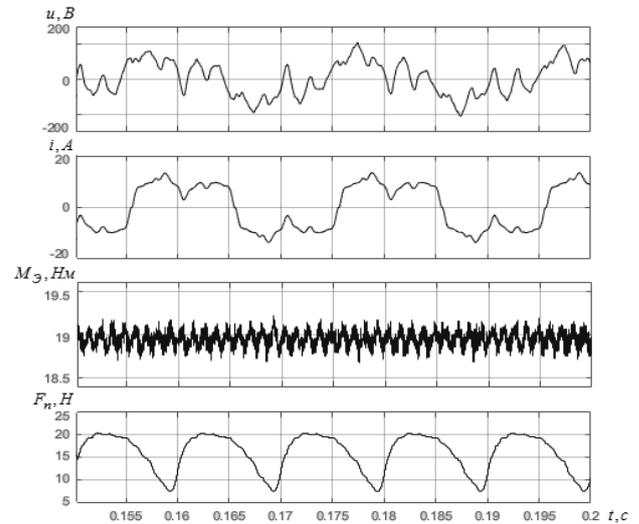


Рис. 4. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с системой управления, улучшающей вибросиловые характеристики

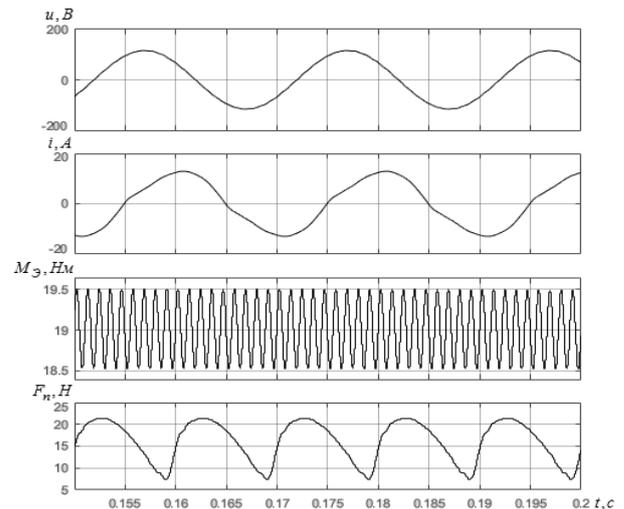


Рис. 5. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с питанием от синусоидального источника

Таблица 1. Сравнение параметров СДПМ при использовании различных СУ

Вид СУ	U , В	I , А	P_{Σ} , кВт	P_m , кВт	ΔM_{Σ} , Нм	ΔF_n , Н
С синусоидальным источником	82	9	3,3	3	1	15
Улучшающая вибросиловые характеристики	91	8,8	3,6		0,5	12,5

Для двигателя с индуктором, каждый полюс которого набран из нескольких магнитов (рис. 3), на рис. 6 представлены ре-

зультаты расчета математической модели с заданием на уменьшение пульсаций электромагнитных сил при ограничении по действующему и амплитудному значениям тока 130 % от номинального. Для сравнения на рис. 7 представлены результаты расчета этого же двигателя с системой управления с питанием от синусоидального источника.

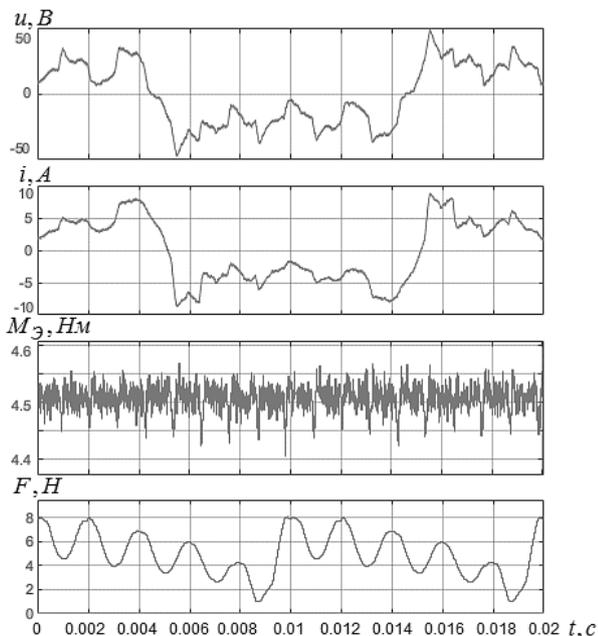


Рис. 6. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с системой управления, улучшающей вибросиловые характеристики

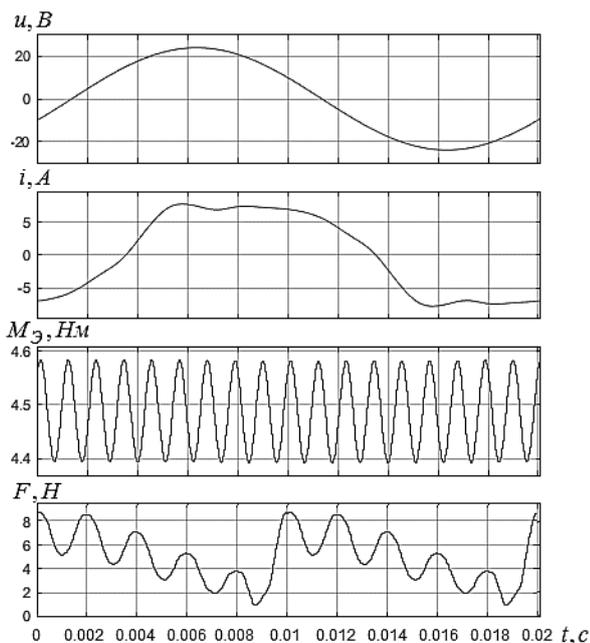


Рис. 7. Результаты расчета установившегося режима работы девятифазного СДПМ с питанием от синусоидального источника

В табл. 2 приведены интегральные параметры для экспериментов, представленных на рис. 6 и 7, а также максимальные значения изменения момента и радиальной силы.

Таблица 2. Сравнение параметров СДПМ при использовании различных СУ

Вид СУ	U, В	I, А	Pэ, Вт	Pм, Вт	ΔMэ, Нм	ΔFn, Н
С синусоидальным источником	17	6	761	706	0,2	7,4
Улучшающая вибросиловые характеристики	23	5	763		0,16	6,6

Данные, приведенные в табл. 1 и 2, демонстрируют эффективность предложенного способа улучшения вибросиловых характеристик электропривода.

Для проверки достоверности предложенного подхода из полученных результатов моделирования работы двигателя с предложенным алгоритмом управления брались значения фазных токов в дискретных точках. В программе полевого моделирования с использованием полученных значений токов проводился расчет электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы. Далее они сопоставлялись с данными, полученными при моделировании работы двигателя с предложенным алгоритмом управления. Полученная погрешность составила 3 %.

Выводы. Результаты проведенного моделирования показали, что при питании двигателя от инвертора со стандартным выходным напряжением возможно посредством применения предложенного алгоритма управления снизить пульсации электромагнитного момента и электромагнитных сил, действующих на зубцы статора. При ограничении по действующему и амплитудному значениям тока 130 % от номинального удалось добиться снижения амплитуды пульсаций электромагнитного момента на 20–50 %, а амплитуды пульсации радиальных сил – на 11–17 % в зависимости от конструкции двигателя.

Список литературы

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для ву-

зов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.

2. **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

3. **Stuckman C.** Noise and vibration levels of modern electric motors // PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. – 2016. – P. 1345.

4. **Min S.G., Sarlioglu B.** Modeling and investigation on electromagnetic noise in PM motors with single and double layer concentrated winding for EV and HEV application // IEEE Transaction on Transportation Electrification. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 292.

5. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Многофазный синхронный регулируемый электропривод/ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 156 с.

6. **Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А.** Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. – С. 19–26.

7. **Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А.** Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 5. – С. 37–43.

8. **Технология** моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов / А.И. Тихонов, А.В. Гусенков, Ю.В. Тамьярова, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 57–65.

9. **Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А.** Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 1 – С. 10–13.

10. **Мартынов В.А.** Современные методы расчета нелинейных электромеханических устройств / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2000. – 140 с.

11. **Daniel Martínez.** Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with NonOverlapping Concentrated Windings. XR-EE-E2C, 2012.

References

1. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and the trans-

formation of energy in electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 312 p.

2. Shubov, I.G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electric machines]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 208 p.

3. Stuckman, C. Noise and vibration levels of modern electric motors. PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2016, p. 1345.

4. Min, S.G., Sarlioglu, B. Modeling and investigation on electromagnetic noise in PM motors with single and double layer concentrated winding for EV and HEV application. IEEE Transaction on Transportation Electrification, 2018, vol. 4, no. 1, p. 292.

5. Golubev, A.N., Lapin, A.A. *Mnogofaznyy sinkhronnyy reguliruemyy elektroprivod* [Multiphase synchronous regulated electric drive]. Ivanovo, 2008. 156 p.

6. Tereshkin, V.M., Grishin, D.A., Makulov, I.A. Perspektivy primeneniya mnogofaznykh mashin peremennogo toka [Prospects of application of multiphase AC machines]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2017, no. 1, pp. 19–26.

7. Aleynikov, A.V., Golubev, A.N., Martynov, V.A. Razrabotka utochnennoy matematicheskoy modeli sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami dlya raschetov v real'nom vremeni [Development of a refined mathematical model of a synchronous motor with permanent magnets for real-time calculations]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 5, pp. 37–43.

8. Tikhonov, A.I., Gusenkov, A.V., Tam'yarova, Yu.V., Podobnyy, A.V. Tekhnologiya modelirovaniya v Simulink dinamicheskikh rezhimov raboty elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem biblioteki polevykh raschetov [Simulink technology for simulation of dynamic modes of operation of electrical machines using a library of field calculations]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 6, pp. 57–65.

9. Aleynikov, A.V., Golubev, A.N., Martynov, V.A. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami [Mathematical model for calculating electromagnetic forces in a synchronous electric drive with permanent magnets]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 1, pp. 10–13.

10. Martynov, V.A. *Sovremennye metody rascheta nelineynykh elektromekhanicheskikh ustroystv* [Modern methods for calculating nonlinear electro-mechanical devices]. Ivanovo, 2000. 140 p.

11. Daniel, Martínez. Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with NonOverlapping Concentrated Windings for the Shell Eco Marathon Urban Prototype. Degree project in Electrical Engineering Master of Science. Stockholm, Sweden, XR-EE-E2C, 2012.