

УДК 621.396.6

ББК 31.264.5

А.Ю. АФАНАСЬЕВ, В.Г. МАКАРОВ, А.А. ПЕТРОВ, П.Е. КРУГЛОВ

## СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОВЫШЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ И СБАЛАНСИРОВАННЫМ РОТОРОМ

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, реактивный ротор, магнитодвижущая сила, векторная диаграмма, скорость вращения, магнитопровод.

Повышение скорости вращения электрических двигателей является актуальной задачей для турбомеханизмов – насосов, вентиляторов, компрессоров. Традиционные синхронные электродвигатели имеют скорость вращения, меньшую или равную частоте питающего напряжения. В статье предложена конструкция и рассматривается принцип действия синхронного электродвигателя с удвоенной скоростью вращения. Он имеет три реактивных ротора с одним полюсом, для статической и динамической балансировки, а на обмотку статора подаются напряжения, сдвинутые по фазе на  $\pi/6$ . Предлагается конструкция синхронного двигателя с восемнадцатью фазами обмотки статора и с тремя роторами, оси которых смещены относительно оси вращения выходного вала. Применение подобной конструкции позволяет увеличить скорость вращения выходного вала в два раза по сравнению с частотой питающих напряжений. Приведены принцип действия двигателя и его математическое описание с учетом особенностей строения магнитной цепи статор – ротор. Основным преимуществом предлагаемого двигателя по сравнению с двигателем с повышенной скоростью вращения является статическая и динамическая балансировка.

Важными элементами электрооборудования являются синхронные электрические машины. Они применяются в качестве первичных источников электроэнергии и в виде стартер-генераторов [1], а также используются в приборных электромеханических системах [2], насосах, вентиляторах, компрессорах, гидравлических и пневматических системах [3], на беспилотных летательных аппаратах в качестве тяговых двигателей [4].

Наряду с требованиями высокой надежности и управляемости важными являются высокие энергетические показатели, связывающие полезную мощность электрической машины с ее объёмом и массой, а также с мощностью электрических, магнитных и механических потерь. Одним из путей совершенствования является увеличение скорости вращения.

Традиционные синхронные электродвигатели имеют скорость вращения, меньшую или равную частоте питающего напряжения. В статье предложена конструкция и рассматривается принцип действия синхронного электродвигателя с удвоенной скоростью вращения. Он имеет три реактивных ротора, для статической и динамической балансировки, с одним полюсом, а на обмотку статора подаются напряжения, сдвинутые по фазе на  $\pi/6$ .

Рассмотрим синхронный двигатель с реактивными цилиндрическими роторами, смещёнными относительно оси вращения. Статор имеет шесть шихтованных магнитопроводов, расположенных под углом  $\pi/3$ , охватывающих ротор и имеющих кольцевые обмотки (см. рис. 1, рис. 2).

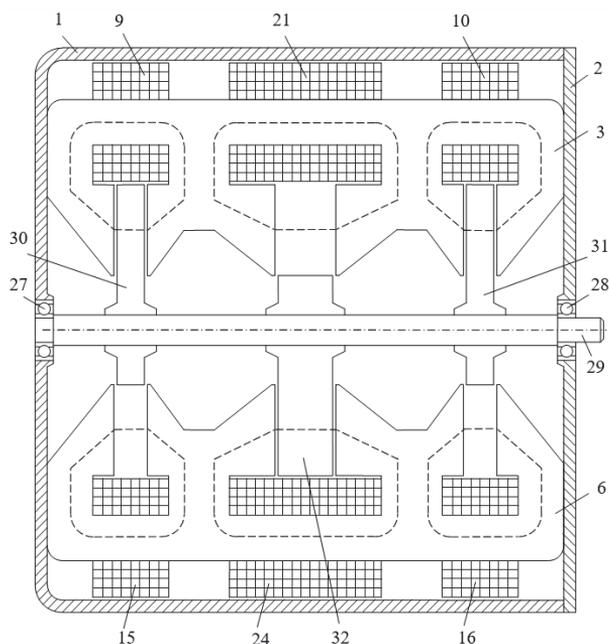


Рис. 1. Продольное сечение двигателя

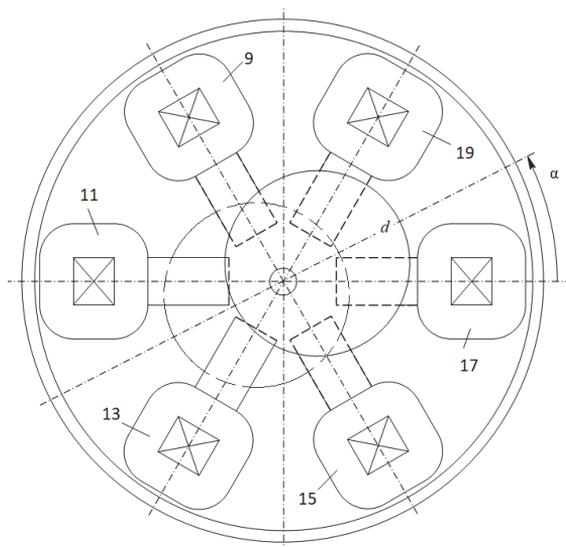


Рис. 2. Поперечное сечение двигателя

Рассматриваемый двигатель содержит корпус 1, подшипниковый щит 2, магнитопроводы 3 – 8, катушки малые 9 – 20, катушки большие 21 – 26, подшипники 27, 28, вал 29, малые роторы 30, 31, большой ротор 32. Магнитопроводы 3 – 8 имеют С-образную форму, расположены под углом  $\pi/3$  друг к другу и установлены на корпусе и подшипниковом щите. На каждом магни-

топроводе имеются две малых прорези и посередине – прорезь двойной ширины. На валу установлены два малых ротора и посередине – ротор двойной толщины. Каждый ротор имеет форму толстого диска с осью, параллельной оси вращения и смещенной относительно нее. Оси малых роторов смещены в одну сторону, а ось большого ротора – в противоположную.

Катушки малые 9 – 20 включены попарно последовательно. Катушки 9 – 10, 13 – 14, 17 – 18 образуют первую трехфазную обмотку и питаются напряжениями

$$\begin{aligned} u_1 &= u_A = U_m \sin(\omega t); \\ u_3 &= -u_C = U_m \sin(\omega t - \pi/3); \\ u_5 &= u_B = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3). \end{aligned}$$

Катушки малые 11 – 12, 15 – 16, 19 – 20 образуют вторую трехфазную обмотку и питаются напряжениями

$$\begin{aligned} u_2 &= u_{AC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - \pi/6); \\ u_4 &= u_{BC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - \pi/2); \\ u_6 &= u_{BA} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - 5\pi/6). \end{aligned}$$

Аналогичные соотношения справедливы для токов  $i_1, i_3, i_5$  и  $i_2, i_4, i_6$ . Однако амплитуда токов второй обмотки в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем амплитуда токов первой обмотки. Число витков фазы второй обмотки в  $\sqrt{3}$  раз больше, а амплитуды магнитодвижущей силы (МДС) обеих обмоток одинаковые [5]. При этом активное сопротивление и индуктивность фазы второй обмотки в 3 раза больше аналогичных величин первой обмотки [6].

Катушки большие 21, 23, 25 имеют напряжения

$$\begin{aligned} u_7 &= u_{BC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - \pi/2); \\ u_9 &= u_{BA} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - 5\pi/6); \\ u_{11} &= u_{CA} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - 7\pi/6). \end{aligned}$$

Катушки большие 22, 24, 26 имеют напряжения

$$\begin{aligned} u_8 &= u_B = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ u_{10} &= -u_A = U_m \sin(\omega t - \pi); \\ u_{12} &= u_C = U_m \sin(\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$

Напряжение большой катушки отстает по фазе от напряжения малых катушек на одном магнитопроводе на угол  $\pi/2$ . Это обеспечивает синхронную работу большого и малых роторов, сдвинутых в пространстве на угол  $\pi$ .

Аналогичные соотношения справедливы для токов  $i_7, i_9, i_{11}$  и  $i_8, i_{10}, i_{12}$ . Однако амплитуда токов второй обмотки в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем амплитуда токов первой обмотки. Число витков фазы второй обмотки в  $\sqrt{3}$  раз меньше, а амплитуды магнитодвижущей силы (МДС) обеих обмоток одинаковые [5]. При этом активное сопротивление и индуктивность фазы второй обмотки в 3 раза меньше аналогичных величин первой обмотки [6]. Амплитуды МДС больших катушек в два раза больше амплитуды МДС малых катушек.

Векторные диаграммы напряжений представлены на рис. 3.

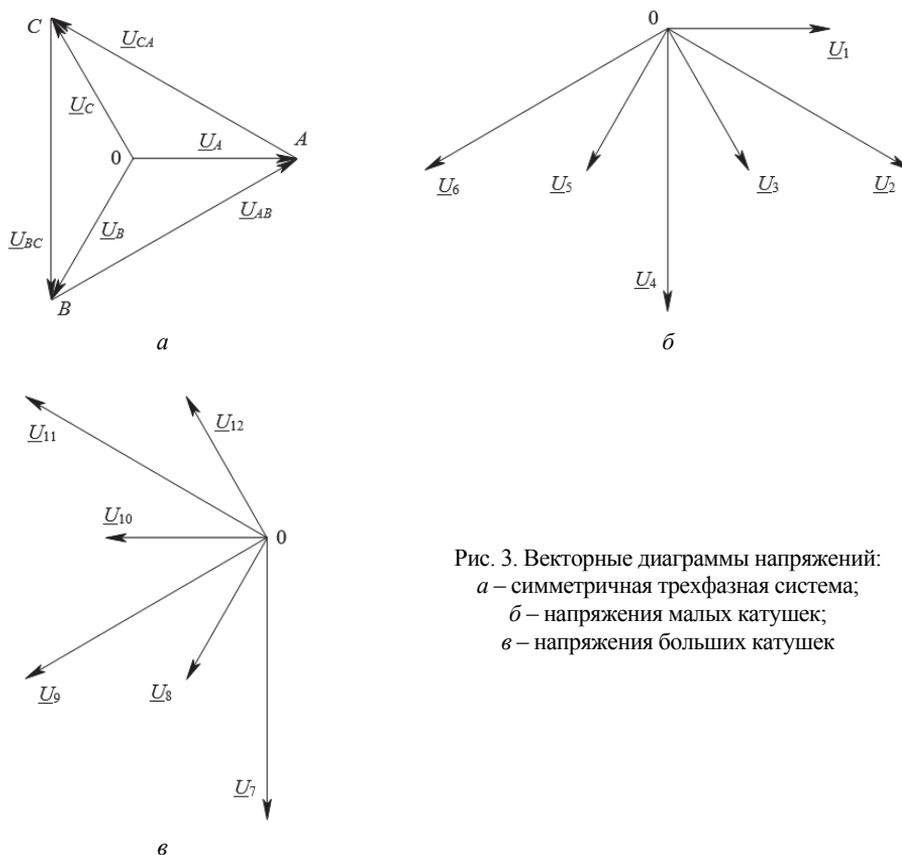


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений:  
 а – симметричная трехфазная система;  
 б – напряжения малых катушек;  
 в – напряжения больших катушек

Размеры трех роторов на валу обеспечивают статическую и динамическую балансировку. Балансировочный груз не требуется, что уменьшает относительную массу двигателя. Рабочие зазоры большого ротора в два раза превышают рабочие зазоры малых роторов. Поэтому амплитуды магнитной индукции и магнитных потоков всех зазоров одинаковые. Магнитные потоки малых катушек отличаются по фазе от магнитных потоков больших катушек на каждом магнитопроводе на угол  $\pi/2$ . Поэтому центральные стержни магнитопроводов, где проходят суммарные потоки, толще крайних стержней не в 2 раза, а лишь в 1,414 раза, что также уменьшает относительную массу двигателя.

На рис. 4 показано распределение МДС и их квадратов при  $\alpha = 0$ . Видно, что максимум МДС приходится на зону поперечной оси  $q$ , проходящей вертикально.

На рис. 5 показано распределение МДС и их квадратов при  $\alpha = \pi/6$ . Видно, что максимум МДС приходится на зону поперечной оси  $q$ , проходящей под углом  $\pi/6$  относительно вертикали.

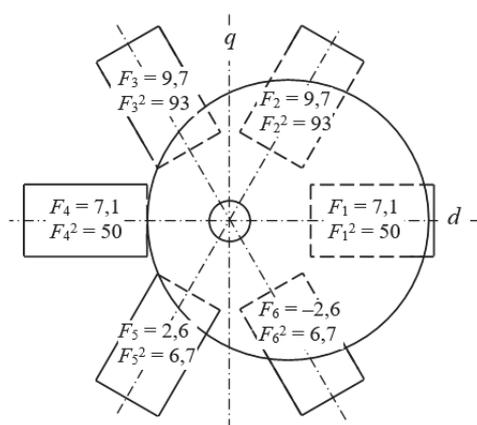


Рис. 4. МДС и их квадраты при  $\alpha = 0$

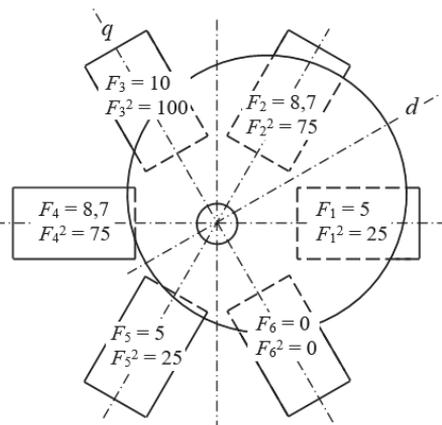


Рис. 5. МДС и их квадраты при  $\alpha = \pi/6$

При угловой частоте питания  $\omega$  угловая скорость ротора составляет  $2\omega$ . Например, при частоте питания 50 Гц ротор вращается со скоростью 6000 об/мин.

Уравнения баланса напряжений имеют простой вид, так как каждый магнитопровод имеет свой магнитный поток. Уравнения для малых катушек:

$$u_k = r i_k + w \frac{d\Phi_k}{dt} = r i_k + w^2 i_k \omega \frac{d\Lambda_k}{d\alpha} + w^2 \Lambda_k \frac{di_k}{dt}; \quad k = 1, \dots, 6.$$

Для больших катушек уравнения имеют аналогичный вид:

$$u_k = r' i_k + w' \frac{d\Phi_k}{dt} = r' i_k + w'^2 i_k \omega \frac{d\Lambda_k}{d\alpha} + w'^2 \Lambda_k \frac{di_k}{dt}; \quad k = 7, \dots, 12,$$

где  $u_k, i_k$  – напряжение и ток катушки;  $\Phi_k$  – магнитный поток магнитопровода;  $\Lambda_k$  – магнитная проводимость его рабочих зазоров;  $r, w$  – активное сопротивление и число витков малой катушки;  $r', w'$  – активное сопротивление и число витков большой катушки;  $\omega$  – скорость вращения ротора.

Уравнения кинематики и динамики имеют вид

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega; \quad \frac{d\omega}{dt} = (M - M_c) / J_\Sigma,$$

где  $\alpha$  – угол поворота ротора;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_c$  – статический момент нагрузки.

Электромагнитный момент определяется формулой

$$M = \sum_{k=1}^6 i_k^2 w_k^2 \Lambda'_k + \frac{1}{2} \sum_{k=7}^{12} i_k^2 w_k^2 \Lambda'_k,$$

где  $w_k$  – число витков катушки;  $i_k$  – ток  $k$ -й фазы;  $\Lambda'_k$  – производная от магнитной проводимости  $\Lambda_k$  по углу поворота ротора  $\alpha$ . Допустим, что при отсутствии сопротивления магнитопроводов

$$\Lambda_k = \Lambda_0 + \Lambda_m \cos(\alpha - (k-1)\pi/3).$$

Тогда

$$\Lambda'_k = -\Lambda_m \sin(\alpha - (k-1)\pi/3).$$

Пусть фазные МДС катушек 9, 11, 13, 15, 17, 19 изменяются по законам

$$F_k = F_m \sin(\alpha/2 - (k-1)\pi/6 + \gamma/2); \quad k = 1, \dots, 6.$$

Тогда квадрат МДС

$$F_k^2 = \frac{F_m^2}{2} (1 - \cos(\alpha - (k-1)\pi/3 + \gamma)).$$

Подставляя эти выражения, получаем

$$M_{1,\dots,6} = \frac{F_m^2 \Lambda_m}{4} \sum_{k=1}^6 \sin(\alpha - (k-1)\pi/3) \cos(\alpha - (k-1)\pi/3 + \gamma);$$

$$M_{1,\dots,6} = -\frac{3F_m^2 \Lambda_m}{4} \sin \gamma.$$

Все катушки создают момент в 4 раза больше:

$$M = -3F_m^2 \Lambda_m \sin \gamma.$$

Максимальный момент получается при  $\gamma = -\pi/2$  или при  $\gamma = 3\pi/2$ :

$$M_m = 3F_m^2 \Lambda_m.$$

Предлагаемые конструкция и принцип действия двигателя с тремя реактивными роторами позволяют сделать новый шаг в электромашиностроении. Переход на двойную скорость вращения при питании от трехфазной сети обеспечивает качественный скачок в компрессоростроении и в конструкциях гидравлических насосов.

#### Литература

1. Бородин В.М., Спиридонов И.О., Файзулдинов Р.Н. Анализ динамики системы пассивной стабилизации линии вивирования с четырехосным кардановым подвесом // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 480–488.
2. Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Фаррахов Д.Р., Якупов А.М., Бекузин В.И. Высокотемпературный бескорпусный стартер-генератор, интегрированный в авиационный двигатель // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 98–102.
3. Дьяконов Д.А., Завалов О.А., Куццов Д.А., Туркин И.К. Определение характеристик и выбор основных параметров рулевых сервоприводов дистанционно пилотируемого вертолета малого класса одновинтовой схемы с рулевым винтом // Известия вузов. Авиационная техника. 2014. № 4. С. 17–19.
4. Дьяконов Д.А., Завалов О.А., Туркин И.К. Понятие и определение интегральных летно-технических характеристик дистанционно пилотируемого вертолета малого класса // Известия вузов. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 35–39.
5. Прохоров С.Г., Хуснутдинов Р.А. Электрические машины. Казань: Изд-во КГТУ, 2012. 409 с.
6. Петров А.А., Афанасьев А.Ю. Авиационные электрические машины переменного тока с повышенными энергетическими показателями // Известия вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 122–125.

---

**АФАНАСЬЕВ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (afanasiev\_co@mail.ru).

**МАКАРОВ ВАЛЕРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (vg\_makarov@mail.ru).

**ПЕТРОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ** – аспирант кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (PetrovAlekse95@mail.ru).

**КРУГЛОВ ПАВЕЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – студент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (Pavel.kruglov.999@mail.ru).

Anatoly Yu. AFANASYEV, Valeriy G. MAKAROV,  
Alexey A. PETROV, Pavel E. KRUGLOV

### SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH HIGHER SPEED ROTATION AND BALANCED ROTOR

**Key words:** Synchronous motor, reluctance rotor, magnetomotive force, vector diagram, rotation speed, magnetic circuit.

*Increasing the speed of rotation of electric motors is an urgent task for turbine mechanisms – pumps, fans, compressors. Traditional synchronous motors have a rotation speed that is less than or equal to the frequency of the supply voltage. The article proposes a design and considers the principle of operation of a synchronous electric motor with double rotation speed. It has three reluctance rotors with one pole, for static and dynamic balancing, and the stator winding is supplied with voltages out of phase by  $\pi/6$ . The proposed design of a synchronous motor with eighteen phases of the stator winding and, with three rotors, the axes of which are offset relative to the axis of rotation of the output shaft. The use of such a design makes it possible to double the rotation speed of the output shaft in comparison with the frequency of the supply voltages. A description of the principle of operation of the motor and its mathematical description are given, taking into account the structural features of the stator-rotor magnetic circuit. The main advantage of the proposed engine in comparison with a high-speed engine is static and dynamic balancing.*

#### References

1. Borodin V.M., Spiridonov I.O., Fayzutdinov R.N. *Analiz dinamiki sistemy passivnoy stabilizatsii linii vizirovaniya s chetyrekhosnym kardano-vym podvesom* [Analysis of the dynamics of the system of passive stabilization of the line of sight with a four-axis gimbal]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2016, no. 4, pp. 480–488.
2. Vavilov V.Ye., Ismagilov F.R., Khayrullin I.KH., Farrakhov D.R., Yakupov A.M., Bekuzin V.I. *Vysokotemperaturnyy beskorpusnyy starter-generator, integrirovanny v aviatsionnyy dvigatel'* [High-temperature frameless starter-generator integrated into an aircraft engine]. *Izvestiya. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 98–102.
3. D'yakonov D.A., Zavalov O.A., Kuptsov D.A., Turkin I.K. *Opredeleniye kharakteristik i vybor osnovnykh parametrov rulevykh servoprivodov distantsionno pilotiruyemogo vertoleta malogo klassa odnovintovoy skhemy s rulevym vintom* [Determination of characteristics and selection of the main parameters of the steering servo drives of a remotely piloted small class single-rotor helicopter with a tail rotor]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2014, no. 4, pp. 17–19.
4. D'yakonov D.A., Zavalov O.A., Turkin I.K. *Ponyatiye i opredeleniye integral'nykh letno-tekhnicheskikh kharakteristik distantsionno pilotiruyemogo vertoleta malogo klassa* [The concept and definition of integral flight performance characteristics of a remotely piloted small-class helicopter]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2018, no. 1. pp. 35–39.
5. Prokhorov S.G., Khusnutdinov R.A. *Elektricheskiye mashiny* [Electric cars]. Kazan, 2012, 409 p.
6. Petrov A.A., Afanas'yev A.Yu. *Aviatsionnyye elektricheskiye mashiny pere-mennogo toka s povyshennymi energeticheskimi pokazatelyami* [Aviation electric machines of alternating current with increased energy indicators]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2018, no. 4, pp. 122–125.

**ANATOLY Yu. AFANASYEV** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (afanasiev\_eo@mail.ru).

**VALERIY G. MAKAROV** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (vg\_makarov@mail.ru).

**ALEXEY A. PETROV** – Post-Graduate Student, Department of Automation and Control, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (PetrovAlekse@mail.ru).

**PAVEL F. KRUGLOV** – Student, Department of Automation and Control, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (Pavel.kruglov.999@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** *Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., Круглов П.Е.* Синхронный электродвигатель с повышенной скоростью вращения и сбалансированным ротором // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 1. – С. 19–26. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-19-26.