

УДК 621.396.6

ББК 31.264.5

А.А. ПЕТРОВ, А.В. МАКАРОВ,
В.Г. МАКАРОВ, Н.Ю. ГРИГОРЬЕВ**СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
С УВЕЛИЧЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА**

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

Цель работы – разработка конструкции синхронного электродвигателя с шестью С-образными зубцами статора, ось вращения ротора которого смещена относительно оси вращения выходного вала, а скорость вращения выходного вала равна удвоенной скорости вращения магнитного потока статора; определение фазовых сдвигов питающих напряжений во времени и пространственного положения обмоток статора; визуализация принципа работы рассматриваемого электродвигателя, а именно пошаговое наблюдение за положением ротора в пространстве при изменении синусоидальной волны напряжения на угол, равный π , с шагом $\pi/6$; математическое описание рассматриваемого двигателя со всеми особенностями строения магнитной цепи статор–ротор. В ходе работы были применены аналитические методы расчета. В результате исследования были определены основные законы работы, а также конструкция и принцип действия рассматриваемого электродвигателя с увеличенной скоростью вращения ротора.

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, 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, пропорциональную частоте питающего напряжения. В статье предложена конструкция синхронных электродвигателей с удвоенной скоростью вращения и рассматривается принцип их действия. Они имеют реактивный ротор с одним полюсом, а на обмотку статора подаются напряжения, сдвинутые по фазе на половинный угол, по сравнению с таковыми при использовании традиционных двигателей.

Рассматривается синхронный двигатель с реактивным цилиндрическим ротором, смещенным относительно оси вращения и имеющим один полюс. Статор имеет шесть С-образных шихтованных магнитопроводов, расположенных под углом $\pi/3$, охватывающих ротор и имеющих кольцевые обмотки (см. рис. 1).

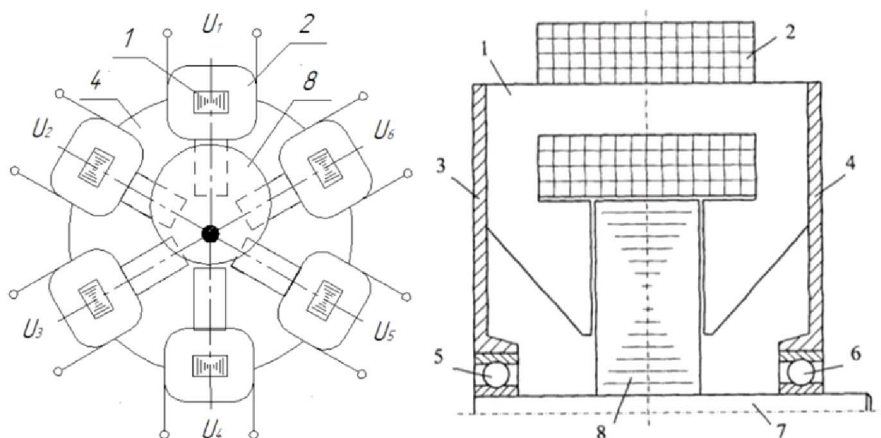


Рис.1. Конструкция синхронного электродвигателя с увеличенной скоростью вращения:

1 – магнитопровод статора; 2 – статорная обмотка;
3, 4 – подшипниковые щиты; 5, 6 – подшипники; 7 – вал; 8 – ротор

На шесть фаз обмотки статора подаются переменные напряжения u_1, \dots, u_6 , сдвинутые по фазе на угол $\pi/6$ (см. рис. 2). В рабочих воздушных зазорах возникает волна магнитной индукции, соответствующая углу π . За время, соответствующее половине периода синусоидального напряжения, волна магнитной индукции поворачивается на угол 2π . Ротор вращается вместе с этой волной [5].

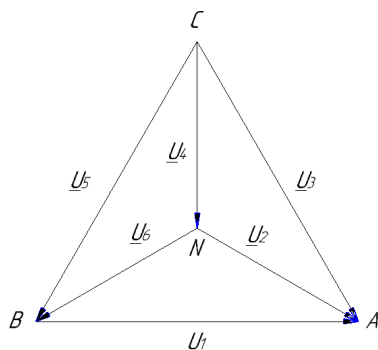


Рис. 2. Векторная диаграмма питающего напряжения

Напряжения u_1-u_6 имеют следующие уравнения изменения напряжения:

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{3}U_m \sin \omega t, \\ u_2 &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 30^\circ), \\ u_3 &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 60^\circ), \\ u_4 &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 90^\circ), \\ u_5 &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ u_6 &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 150^\circ). \end{aligned}$$

Аналогичные соотношения справедливы для токов i_1-i_6 . Однако амплитуда токов от линейных напряжений в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем амплитуда токов от фазных напряжений. Число витков фаз, питающихся от фазных напряжений, в раз $\sqrt{3}$ больше, а амплитуды магнитодвижущей силы (МДС) всех обмоток одинаковые [6].

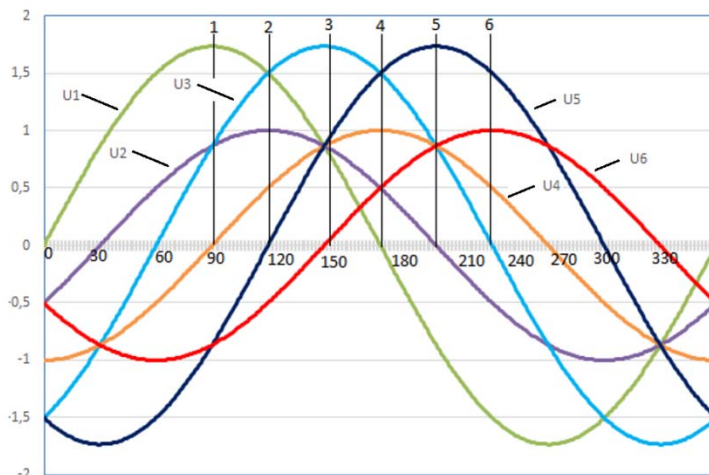


Рис. 3. Временные диаграммы питающего напряжения

Рассмотрим распределение магнитодвижущей силы (МДС) в рабочем зазоре в различные моменты времени, соответствующие изменению фаз напряжения питания на угол $\pi/6$. Рассматриваемый участок соответствует половине периода, т.е. 6 точкам, показанным на рис. 3.

Первая точка соответствует максимальному значению напряжения u_1 , при этом ωt соответствует углу $\pi/2$.

Распределение МДС для 1-й (слева) и 2-й (справа) точек показано на рис. 4.

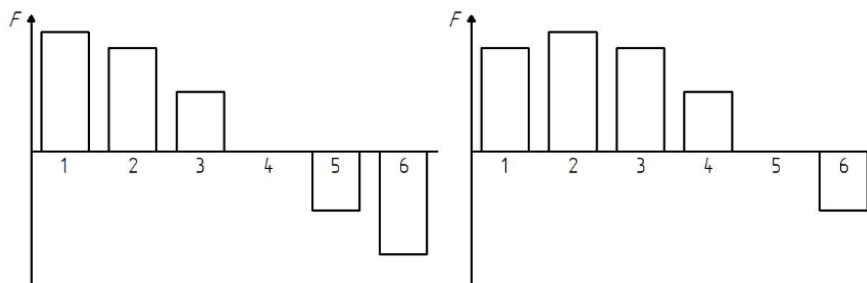


Рис. 4. Распределение МДС для 1-й (слева) и 2-й (справа) точек

Распределение МДС для 3-й (слева) и 4-й (справа) точек приведено на рис. 5.

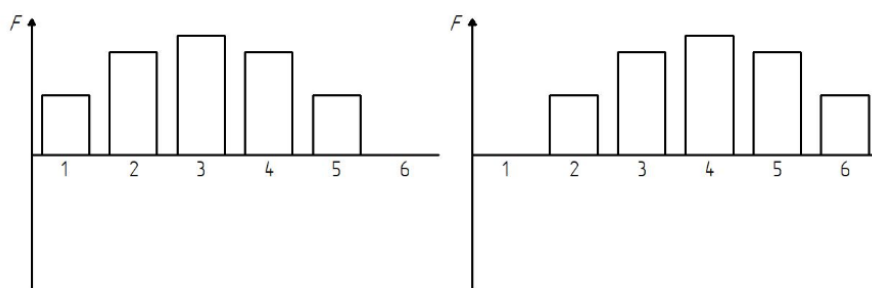


Рис. 5. Распределение МДС для 3-й (слева) и 4-й (справа) точек

Распределение МДС для 5-й (слева) и 6-й (справа) точек показано на рис. 6.

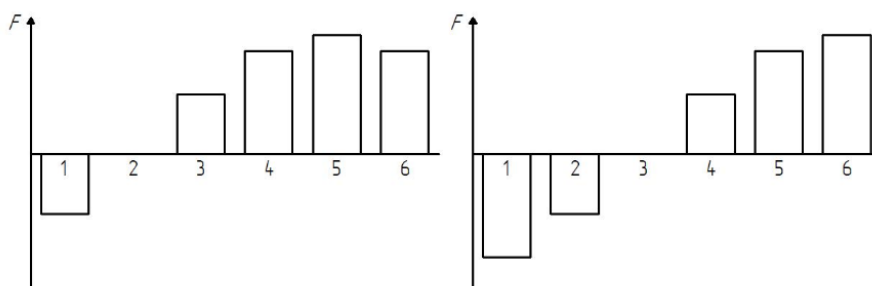


Рис. 6. Распределение МДС для 5-й (слева) и 6-й (справа) точек

Проследим, как изменяются положения ротора при изменении ωt в пределах $[\pi/2; 3\pi/2]$.

Положение ротора для 1-й (слева) и 2-й (справа) точек (рис. 7).

Положение ротора для 3-й (слева) и 4-й (справа) точек (рис. 8).

Положение ротора для 5-й (слева) и 6-й (справа) точек (рис. 9).

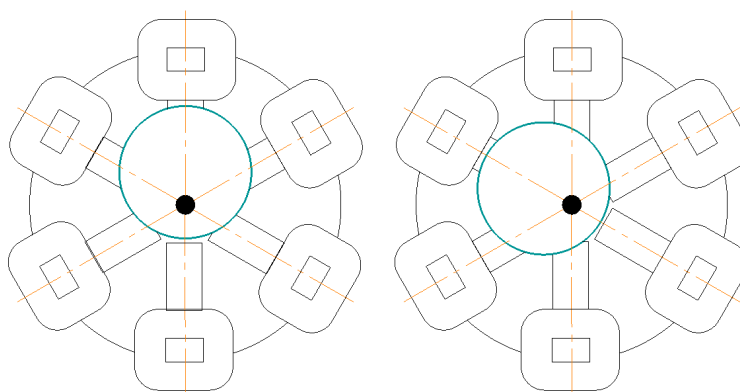


Рис. 7. Положение ротора для 1-й (слева) и 2-й (справа) точек

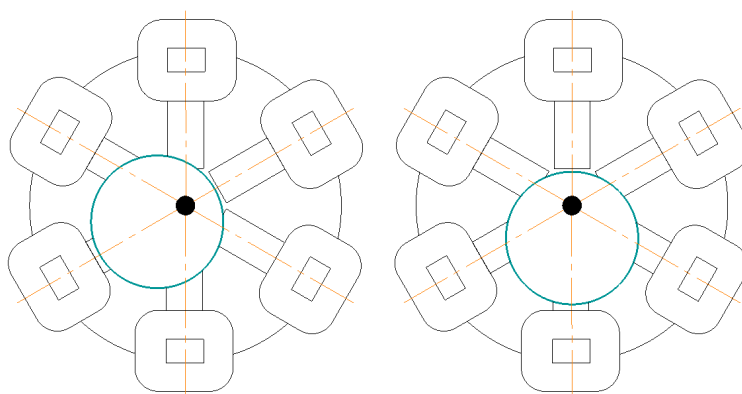


Рис. 8. Положение ротора для 3-й (слева) и 4-й (справа) точек

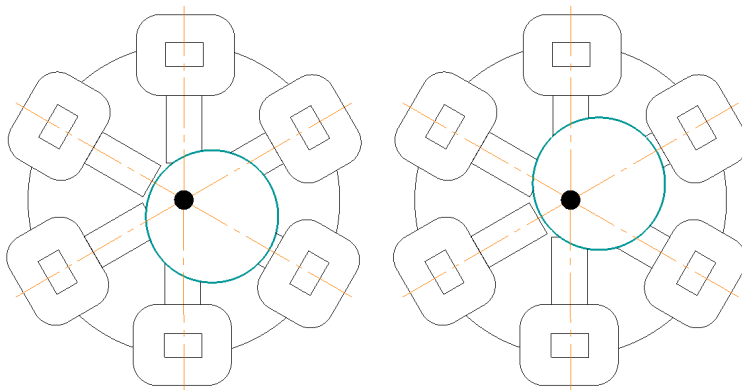


Рис. 9. Положение ротора для 5-й (слева) и 6-й (справа) точек

Видно, что при изменении напряжения в пределах $[\pi/2; 3\pi/2]$, т.е. за половину периода, ротор поворачивается на угол, равный 2π , т.е. на полный оборот. При питании от электросети частотой 50 Гц скорость вращения ротора $n = 6000$ об./мин, что в 2 раза больше скорости стандартных двигателей.

Благодаря тому, что магнитопровод статора выполнен в виде С-образных элементов с фазами обмотки, а цилиндрический ротор смещен относительно оси, получен синхронный электродвигатель с простой конструкцией и малым моментом инерции ротора с повышенной скоростью вращения при питании от трехфазной сети.

Основные уравнения рассматриваемого двигателя имеют вид

$$M = \sum_{k=1}^6 \frac{(i_k w_k)^2}{2} \frac{d\lambda_k}{d\alpha}, \quad \lambda_k = \frac{\mu_0 S_k}{2\delta},$$

где S_k – площадь рабочей части ротора; λ_k – магнитная проводимость k -го магнитопровода;

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega;$$

ω – угловая скорость вращения ротора;

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{эм} - M_c}{J}, \quad U_k = ri_k + w \frac{d\Phi_k}{dt}, \quad \Phi_k = w_k i_k \lambda_k,$$

$$\frac{d\Phi_k}{dt} = w_k i_k \frac{d\lambda_k}{dt} + w_k \lambda_k \frac{di_k}{dt}, \quad \frac{d\lambda_k}{dt} = \frac{d\lambda_k}{d\alpha} \omega.$$

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- 1) при рассматриваемой конструкции внутренний объем двигателя используется полностью, но усложняется конструкция в связи с различием в обмоточных данных катушек нечетных и четных фаз;
- 2) предлагаемая конструкция и принцип действия двигателя позволяют сделать новый шаг в электромашиностроении;
- 3) переход на двойную скорость вращения при питании от промышленной 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 визирования 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., Купцов 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.

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

МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ – ассистент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (amakarov.kai@gmail.com).

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

ГРИГОРЬЕВ НИКИТА ЮРЬЕВИЧ – студент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (xevil.exw@gmail.com).

Aleksei A. PETROV, Aleksei V. MAKAROV,
Valeriy G. MAKAROV, Nikita Yu. GRIGORIEV

SYNCHRONOUS MOTOR WITH INCREASED ROTOR SPEED

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

Development of the design of a synchronous electric motor with six C-shaped stator teeth, the rotor axis of rotation of which is displaced relative to the axis of rotation of the output shaft. The rotational speed of the output shaft is equal to twice the rotational speed of the stator magnetic flux. Determination of the phase shifts of the supply voltages in time and the spatial position of the stator windings. Visualization of the principle of operation of the electric motor under consideration, namely, step-by-step observation of the position of the rotor in space, when the sinusoidal voltage wave changes by an angle equal to π , with a step of $\pi/6$. Mathematical description of the engine under consideration, with all the structural features of the stator-rotor magnetic circuit. In the course of the work, analytical calculation methods were applied. As a result of the study, the basic laws of operation were determined, as well as the design and principle of operation of the considered electric motor with a suspended rotation speed.

References

1. Borodin V.M., Spiridonov I.O., Fayzudinov R.N. *Analiz dinamiki sistemy passivnoy stabilizatsii linii vizirovaniya s chetyrekhnym 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. Aviatsonnaya 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 aviatsonnyy dvigatel'* [High-temperature frameless starter-generator integrated into an aircraft engine]. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 98–102.
3. D'yakov 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. Aviatsonnaya tekhnika*, 2014, no. 4, pp. 17–19.
4. D'yakov D.A., Zavalov O.A., Turkin I.K. *Ponyatiye i opredeleniye inte-gral'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. Aviatsonnaya 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. *Aviatsonnyye elektricheskiye mashiny pere-mennogo toka s povyshennymi energeticheskimi pokazatelyami* [Aviation electric machines of alternating current with increased energy indicators]. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya tekhnika*, 2018, no. 4, pp. 122–125.

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

ALEKSEI V. MAKAROV – Assistant Lecturer, Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (amakarov.kai@gmail.com).

VALERIY G. MAKAROV – Doctor of Technical Science, Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (vg_makarov@mail.ru).

NIKITA Yu. GRIGORIEV – Student, Department of Automation and Control, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (xevil.exw@gmail.com).

Формат цитирования: Петров А.А., Макаров А.В., Макаров В.Г., Григорьев Н.Ю. Синхронный двигатель с увеличенной скоростью вращения ротора // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 125–131. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-125-131.