

УДК 621.396.6

ББК 31.264.5

А.Ю. АФАНАСЬЕВ, В.Г. МАКАРОВ, С.В. ИГНАЕВ, А.А. ПЕТРОВ

СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С РЕАКТИВНЫМИ РОТОРАМИ И ПОВЫШЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Ключевые слова: синхронный двигатель, реактивный ротор, повышенная скорость вращения, электромагнитное возбуждение, электромагнитный момент.

Актуальной задачей для многих предприятий нефтегазохимического и топливно-энергетического комплекса, использующих в своих технологических процессах насосы, вентиляторы и компрессоры, является повышение скорости вращения этих турбомеханизмов. Увеличение скорости вращения таких механизмов связано с повышением их производительности. Довольно часто получение повышенных скоростей вращения является актуальной задачей как для устройств автоматики, так и для специальной техники.

Целью исследования является анализ возможности построения синхронных двигателей с реактивным ротором и разным количеством фаз обмотки статора, а также с неподвижной обмоткой возбуждения переменного тока, которая находится между ротором и статором.

Материалы и методы. Объектом исследования являются синхронные двигатели с реактивным ротором, имеющие повышенную скорость вращения. В работе применялись методы теоретических основ электротехники, теории электромеханического преобразования энергии. Расчеты выполнены с использованием среды программирования Turbo Pascal.

Результаты исследования. Основными результатами исследования являются предложенные конструктивные решения синхронных двигателей с реактивными роторами и различным числом фаз обмотки статора от одного до шести, а также математическое описание электромагнитных процессов, с помощью которого в системе Turbo Pascal проведен расчет моментных характеристик. При разработке математического описания электромагнитных процессов в синхронных двигателях с реактивными роторами и числом фаз обмотки статора от одного до шести использовались аналитические методы теоретических основ электротехники и теории электромеханического преобразования энергии. На основании проведенных исследований показана возможность получения скорости вращения ротора 6000 об./мин при частоте 50 Гц, в то время как серийно выпускаемые синхронные и асинхронные двигатели не позволяют получить скорости вращения более 3000 об./мин при питании от сети той же частоты. Доказаны целесообразность и эффективность применения неподвижной обмотки возбуждения переменного тока, которая находится между ротором и статором. Проведен расчет моментных характеристик синхронных двигателей с числом фаз обмотки статора от одной до шести.

Выводы. В ходе исследования выявлена особенность синхронного двигателя с однофазной обмоткой статора, заключающаяся в том, что момент двигателя может создаваться только обмоткой возбуждения без участия обмотки статора.

Актуальность исследования. Для электроприводов турбомеханизмов, к которым относятся насосы, вентиляторы, компрессоры, весьма актуальной задачей является повышение скорости вращения электродвигателей. Производительность таких механизмов пропорциональна скорости вращения электродвигателей, приводящих их в движение. В большинстве случаев электроприводы

турбомеханизмов выполняются на основе двигателей переменного тока. При питании серийно выпускаемых двигателей переменного тока от сети с частотой 50 Гц максимальная скорость вращения не может быть выше 3000 об./мин. В статье рассматриваются варианты построения синхронных двигателей с реактивными роторами и различным числом фаз обмотки статора, применение которых позволяет получить скорость вращения 6000 об./мин.

Вопросам построения синхронных двигателей с повышенной скоростью вращения посвящены работы [1–4, 7], в которых предложены несколько вариантов конструкции и рассматривается принцип их работы.

Цель исследования – анализ возможности построения и работоспособности синхронных двигателей, имеющих удвоенную скорость вращения, с числом фаз обмотки статора от одной до шести, реактивным ротором, а также целесообразности использования неподвижной обмотки возбуждения переменного тока, находящейся между ротором и статором.

Материалы и методы. Объектом исследования являются синхронные двигатели с реактивным ротором, имеющие повышенную скорость вращения. В работе применялись методы теоретических основ электротехники, теории электромеханического преобразования энергии. Расчеты выполнены с использованием среды программирования Turbo Pascal.

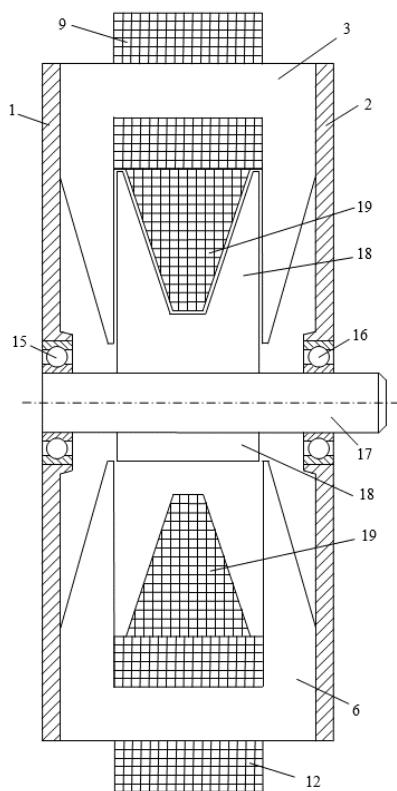


Рис. 1. Продольное сечение двигателя

Результаты исследования. Конструктивная схема в продольном сечении показана на рис. 1, а поперечные сечения в случаях трех, четырех и шести фаз статора – на рис. 2–4.

Синхронный двигатель с тремя фазами (рис. 1, 2) имеет подшипниковые щиты 1, 2; первый – третий С-образные магнитопроводы статора 3 – 5; первую – третью фазы обмотки статора 6 – 8; подшипники 9, 10; вал 11; ротор 12; обмотку возбуждения 13 [7].

Синхронный двигатель с четырьмя фазами (рис. 1, 3) имеет подшипниковые щиты 1, 2; первый – четвертый С-образные магнитопроводы статора 3 – 6; первую – четвертую фазы обмотки статора 7 – 10; подшипники 11, 12; вал 13; ротор 14; обмотку возбуждения 15 [6].

Синхронный двигатель с шестью фазами (рис. 1, 4) имеет подшипниковые щиты 1, 2; первый – шестой С-образные магнитопроводы статора 3 – 8; первую – шестую фазы обмотки статора 9 – 14; подшипники 15, 16; вал 17; ротор 18; обмотку возбуждения 19 [5].

C-образные магнитопроводы 3–8 шестифазного статора выполнены шихтованными из электротехнической стали и расположены под углом 60 градусов относительно друг друга. Они объединены в единую конструкцию с помощью подшипниковых щитов 1, 2, выполненных из немагнитного материала. На C-образных магнитопроводах 3–8 установлены фазы 9–14 обмотки статора. Ротор 18 выполнен из ферромагнитного материала. Он имеет форму цилиндра с клинообразной проточкой, смещенного относительно оси вала 17, опирающегося на подшипники 15, 16. Ротор входит в зазор между магнитопроводами 3–8. На статоре установлена неподвижная обмотка возбуждения 19, имеющая форму кольца с трапециевидальным сечением и входящая в проточку ротора [8].

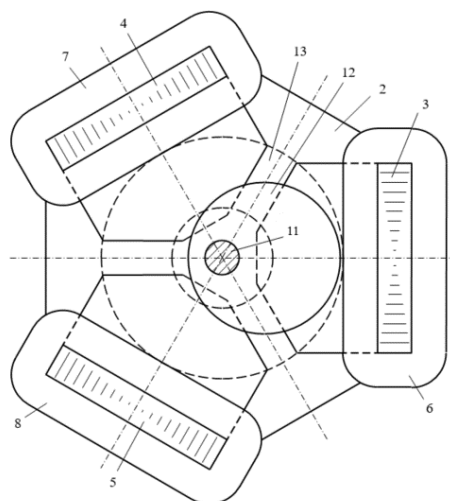


Рис. 2. Поперечное сечение трехфазного двигателя

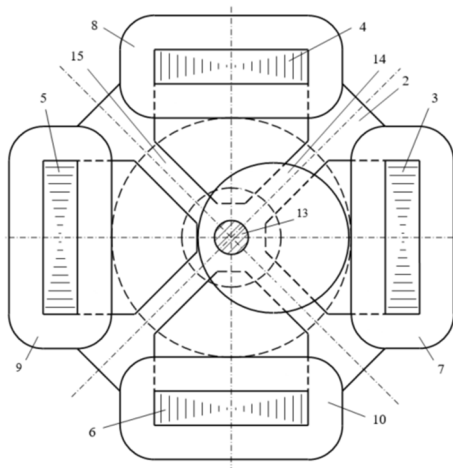


Рис. 3. Поперечное сечение четырехфазного двигателя

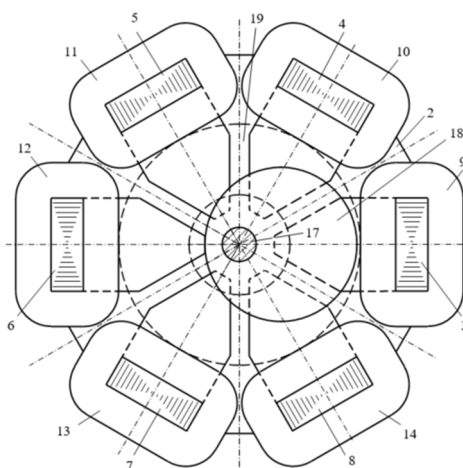


Рис. 4. Поперечное сечение шестифазного двигателя

Синхронный электродвигатель с шестифазной обмоткой статора работает следующим образом. Фазы обмотки статора питаются переменными токами, сдвинутыми по фазе на угол $\pi/6$:

$$\begin{aligned}
 i_1 &= I_m \sin(\beta + 3\pi/4); \\
 i_2 &= I_m \sin(\beta + 3\pi/4 - \pi/6); \\
 &\dots\dots\dots; \\
 i_6 &= I_m \sin(\beta + 3\pi/4 - 5\pi/6),
 \end{aligned}$$

$$\beta = \omega t,$$

где ω – угловая частота питающих напряжений.

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 . Эта волна вращается с угловой скоростью 2ω . Например, при частоте питания 50 Гц скорость вращения ротора составит 6000 об/мин.

Магнитная проводимость рабочего воздушного зазора для одного магнитопровода определяется формулой

$$\Lambda = \frac{\mu_0 S}{\delta},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; S – площадь между магнитопроводом и ротором; δ – суммарный зазор между ними.

Ротор стремится занять положение, при котором максимальная магнитная проводимость и максимум площади перекрытия соответствуют максимуму модулей МДС и магнитной индукции.

На рис. 5 представлены графики фазных токов обмотки статора i_1, \dots, i_6 и тока возбуждения

$$i_f = I_{fm} \sin\left(\beta + \frac{\pi}{3}\right).$$

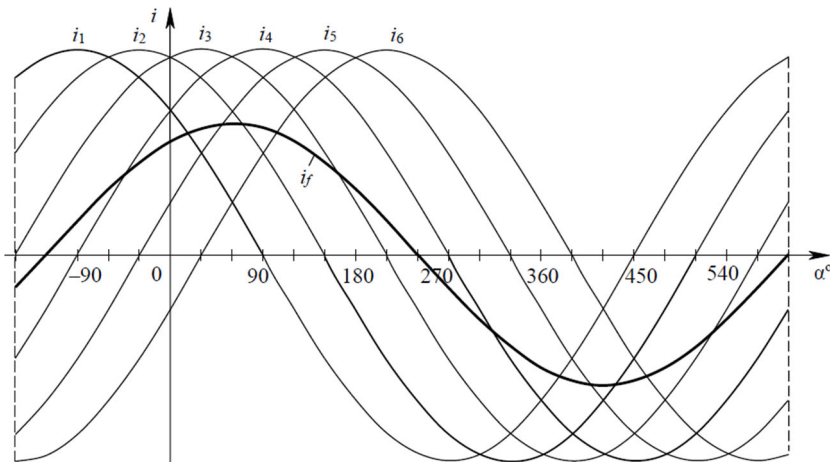


Рис. 5. Графики фазных токов и тока возбуждения

Видно, что ток возбуждения пропорционален сумме мгновенных значений фазных токов:

$$i_f(\alpha) = c \sum_{k=1}^6 i_k(\alpha),$$

где в качестве аргумента взят угол поворота ротора $\alpha = 2\beta = 2\omega t$.

Электромагнитный момент определяется формулой

$$M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \frac{d\Lambda_k}{d\alpha} (i_k w + i_f w_f)^2,$$

где Λ_k – магнитная проводимость между ротором и k -м магнитопроводом; w , w_f – количество витков фаз обмотки статора и обмотки возбуждения соответственно.

Если

$$\Lambda_1 = \Lambda_0 + \Lambda_m \cos \alpha,$$

то

$$\frac{d\Lambda_1}{d\alpha} = -\Lambda_m \sin \alpha.$$

В системе Turbo Pascal 7.0 составлена программа и проведен расчет моментной характеристики шестифазного синхронного двигателя. Приняты следующие значения параметров:

$$w = 100; I_m = 2A; w_f = 20; I_{fm} = 5A;$$

$$\Lambda_m = 0,0025 \text{ Гн}; \quad \sin(5\pi/12) \approx 0,965926,$$

где Λ_m – амплитуда переменных составляющих магнитных проводимостей Λ_k .

Средний момент электродвигателя определяется выражением

$$M_0 = 0,75\Lambda_m(I_m w)^2 + \sin\left(\frac{5\pi}{12}\right) \cdot I_m w \cdot I_{fm} w_f.$$

Без обмотки возбуждения момент шестифазного синхронного двигателя имеет постоянное значение $M_0 = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$. С обмоткой возбуждения момент изменяется по углу в пределах от 75 до 147,444 Н·м, а среднее значение момента – 123,296 Н·м. График моментной характеристики шестифазного синхронного двигателя показан на рис. 6.

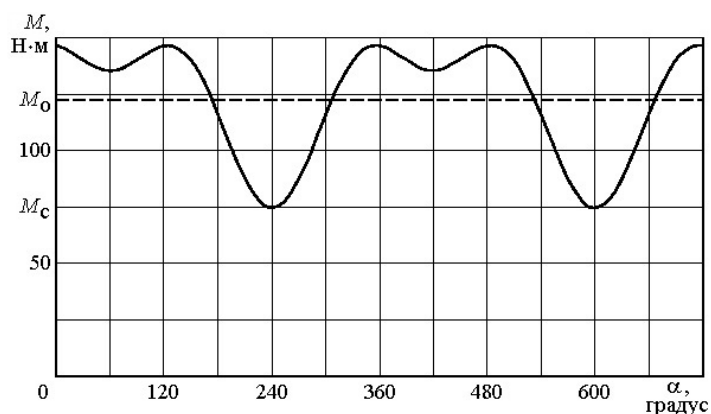


Рис. 6. Моментная характеристика шестифазного синхронного двигателя

В соответствии с рис. 6 момент шестифазного синхронного двигателя с обмоткой возбуждения состоит из двух компонент – постоянного реактивного момента $M_c = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и переменного активного момента, равного нулю в отдельных точках, когда ток возбуждения равен нулю. Показан средний момент $M_0 = 123,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Очевидно, что средний момент M_0 больше момента M_c на 39,17 %. Таким образом, доказаны эффективность и целесообразность применения обмотки возбуждения.

Благодаря кольцевой проточке на роторе и выполнению обмотки возбуждения в виде кольца с трапецеидальным сечением возможно уменьшение ее среднего радиуса, что снижает ее сопротивление и мощность потерь в ней.

В системе Turbo Pascal 7.0 составлена программа и проведен расчет моментных характеристик синхронных двигателей при числе фаз $m = 1, 2, \dots, 6$. Приняты следующие значения параметров:

$$w = 100; I_m = 2 \text{ A}; w_f = 20; I_{fm} = 5 \text{ A}; \Lambda_m = 0,0025 \text{ Гн.}$$

В таблице приведены результаты моделирования электродвигателей при числе фаз $m = 1, 2, \dots, 6$. В качестве аргумента взят угол поворота ротора $\alpha = 2\beta = 2\omega t$, где ω – угловая частота питающих напряжений.

Были использованы следующие формулы:

$$i_k = I_m \sin(\beta + \delta - (k - 1)\Delta\beta);$$

$$\delta = \frac{3\pi}{4}; \Delta\beta = \frac{\pi}{m}; i_f = I_{fm} \sin(\beta + \gamma); \gamma = \pi \frac{m + 2}{4m};$$

$$\frac{d\Lambda_k}{d\alpha} = \Lambda_m \sin(\alpha + \pi - (k - 1)\Delta\alpha); \Delta\alpha = \frac{2\pi}{m};$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \frac{d\Lambda_k}{d\alpha} (i_k w + i_f w_f)^2;$$

$$M_0 = c_1 \Lambda_m (I_m w + I_{fm} w_f)^2 \text{ при } m = 1;$$

$$M_0 = c_1 \Lambda_m (I_m w)^2 + c_2 \Lambda_m \cdot I_m w \cdot I_{fm} w_f \text{ при } m = 2, \dots, 6;$$

$$M_1 = M_{1m} \sin(\alpha + \varphi_1);$$

$$M_2 = M_{2m} \sin(2\alpha + \varphi_2);$$

$$M = M_0 + M_1 + M_2,$$

где m – количество фаз обмотки статора; γ – начальная фаза тока возбуждения; $\Delta\beta$ – угол сдвига по фазе между токами фаз обмотки статора; $\Delta\alpha$ – угол между осями фаз статора; δ – начальная фаза тока для первой фазы статора; c_1, c_2 – коэффициенты для вычисления среднего момента; φ_1, φ_2 – начальные фазы первой и второй гармоник момента; M_0 – среднее значение момента; M_{1m}, M_{2m} – амплитуды первой и второй гармоник момента.

Следует обратить внимание, что при $m = 2, \dots, 6$ для создания момента требуются токи фаз обмотки статора ($I_m > 0$), а в случае $m = 1$ момент может быть создан только током возбуждения.

Значения основных величин

Показатели	Количество фаз обмотки статора (m)					
	1	2	3	4	5	6
γ	$3\pi/4$	$\pi/2$	$5\pi/12$	$3\pi/8$	$7\pi/20$	$\pi/3$
$\Delta\beta$	–	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/5$	$\pi/6$
$\Delta\alpha$	–	π	$2\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/5$	$\pi/3$
c_1	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75
c_2	–	0,35355	0,5	0,65328	0,80902	0,96593
φ_1	π	–	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/5$	$\pi/6$
φ_2	$3\pi/2$	$3\pi/2$	$7\pi/6$	π	$0,9\pi$	$5\pi/6$
M_0	28,125	42,678	62,50	82,664	102,951	123,296
M_{1m}	56,25	0,0	12,5	19,134	25,0	30,619
M_{2m}	28,125	42,678	12,5	13,530	15,451	17,678

Выводы. На основании проведенного анализа можно сделать вывод о возможности построения и работоспособности синхронных двигателей с реактивным ротором, обмоткой возбуждения переменного тока и числом фаз обмотки статора от одной до шести. При этом однофазный двигатель будет обладать особенностью, заключающейся в том, что момент двигателя может создаваться обмоткой возбуждения, а не основными обмотками. В ходе исследования доказана эффективность применения обмотки возбуждения, поскольку при ее наличии наблюдается увеличение момента двигателя.

Литература

1. *Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Каримов Д.Р.* Синхронный двигатель с суммированием частот вращения // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. С. 77 – 80.
2. *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.
3. *Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А.* Синхронный двигатель с удвоенной частотой вращения ротора // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 383–389.
4. *Никаноров В.Б.* Высокоскоростной синхронный привод с импульсным регулированием возбуждения для сканеров // Вестник Московского государственного университета печати. 2013. № 5. С. 69–71.
5. Пат. 2757423 РФ, МПК H02K 19/06, H02K 19/06. Синхронный электродвигатель / Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., Кильдияров Р.Р.; патентообладатель: Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. № 2021108829; заявл. 01.04.2021; опубл. 15.10.2021, Бюл. № 29. 11 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=39BA4D44-6B08-4019-93A7-A87B874FFEAB> (дата обращения: 01.10.2022).
6. Пат. 2757459 РФ, МПК H02K 19/06, H02K 1/06. Синхронный электродвигатель / Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., Игнаев С.В.; патентообладатель: Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. № 2021106646; заявл. 15.03.2021; опубл. 18.10.2021, Бюл. № 29. 10 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=999B8813-6D2A-40E3-8C71-DE90DEDFFF5C> (дата обращения: 01.10.2022).
7. Пат. 2761085 РФ, МПК H02K 19/12, H02K 19/12. Синхронный электродвигатель / Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., Круглов П.Е.; патентообладатель: Казан. национ. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. № 2021110275; заявл. 13.04.2021; опубл. 03.12.2021, Бюл. № 34. 13 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=F3156CDE-D890-491E-8A9F-E11B3DCD90AF> (дата обращения: 01.10.2022).
8. *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.

АФАНАСЬЕВ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (afanasiev0@mail.ru).

МАКАРОВ ВАЛЕРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – доктор технических наук, заведующий кафедрой электропривода и электротехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань (vg_makarov@mail.ru).

ИГНАЕВ СТАНИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ – магистрант кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (ignae99@gmail.com).

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

Anatoly Yu. AFANASYEV, Valeriy G. MAKAROV,
Stanislav V. IGNAEV, Alexey A. PETROV
SYNCHRONOUS MOTORS WITH REACTIVE ROTORS
AND HIGHER ROTATION SPEED

Key words: synchronous motor, reactive rotor, increased rotation speed, electromagnetic excitation, electromagnetic torque.

An urgent task for many enterprises of the petrochemical and fuel and energy complex, using pumps, fans and compressors in their technological processes, is to increase the speed of rotation of these turbomechanisms. An increase in the speed of rotation of such mechanisms is due to an increase in their productivity. Quite often, obtaining increased rotation speed is an urgent task for both automation devices and special equipment.

The purpose of the study is to analyze the possibility of building synchronous motors with a jet rotor and a different number of phases of the stator winding, as well as an AC fixed excitation winding, which is located between the rotor and the stator.

Materials and methods. The object of research in the article is synchronous motors with a jet rotor, which have an increased speed of rotation. The methods of theoretical foundations of electrical engineering and the theory of electromechanical energy conversion are applied in the work. Calculations are performed using the Turbo Pascal programming environment.

Results of the study. The main results of the study are the proposed design solutions for synchronous motors with jet rotors and a different number of phases of the stator winding from one to six, as well as a mathematical description of electromagnetic processes, with the help of which the moment characteristics were calculated in the Turbo Pascal system. When developing a mathematical description of electromagnetic processes in synchronous motors with reactive rotors and the number of phases of the stator winding from one to six, analytical methods of the theoretical foundations of electrical engineering and the theory of electromechanical energy conversion are used. Based on the studies carried out, the possibility of obtaining a rotor rotation speed of 6000 rpm at frequency of 50 Hz is shown, while commercially available synchronous and asynchronous motors do not allow obtaining rotation speeds of more than 3000 rpm when powered by a network of the same frequency. The expediency and effectiveness of the use of a fixed alternating current excitation winding, which is located between the rotor and the stator, has been proven. The moment characteristics of synchronous motors with the number of phases of the stator winding from one to six are calculated.

Findings. The study revealed the feature of a synchronous motor with a single-phase stator winding, which consists in the fact that the motor moment can only be created by the excitation winding without the stator winding.

References

1. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Karimov D.R. *Sinkhronnyi dvigatel' s summirovaniem chastot vrashcheniya* [Synchronous motor with higher speed rotation]. In: *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of Int. conf. «Mathematical methods in engineering and technology»], St. Petersburg, 2020, pp. 77–80.
2. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., Kruglov P.E. *Sinkhronnyi ehlektrodvigatel' s povyshennoi skorost'yu vrashcheniya i sbalansirovannym rotorom* [Synchronous motor with higher speed rotation and balanced rotor]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 19–26. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-19-26.
3. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A. *Sinkhronnyi dvigatel' s udvoennoi chastotoi vrashcheniya rotora* [Synchronous motor with double speed rotation]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotehniki i energoeffektivnosti: sb. materialov V mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* [Proc. of 5th Int. conf. «Problems and prospects of development of energy, electrical engineering and energy efficiency»], Cheboksary, Chuvash University Publ., 2021, pp. 383–389.
4. Nikanorov V.B. *Vysokoskorostnoi sinkhronnyi privod s impul'snym regulirovaniem vzbuzhdeniya dlya skanerov* [High-speed synchronous drive with pulsed excitation control for scanners]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta pechati*, 2013, no. 5, pp. 69–71.

5. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., Kildiyarov R.R. *Sinkhronnyi ehlektrodvigatel'* [Synchronous motor]. Patent RF, no. 2757423, 2021.

6. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., Kruglov P.E. *Sinkhronnyi ehlektrodvigatel'* [Synchronous motor] Patent RF, no. 2 761 085, 2021.

7. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., Ignaev S.V. *Sinkhronnyi ehlektrodvigatel'* [Synchronous motor] Patent RF, no. 2 757 459, 2021.

8. Petrov A.A., Makarov A.V., Makarov V.G., Grigorev N.Yu. *Sinkhronnyi dvigatel' s uvelichennoi skorost'yu vrashcheniya rotora* [Synchronous motor with higher speed rotation] *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 3. pp. 125–131. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-125-131.

ANATOLY Yu. AFANASYEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (afanasiev_eo@mail.ru).

VALERIY G. MAKAROV – Doctor of Technical Science, Head of the Department of Electric Drive and Electrical Engineering, Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan (vg_makarov@mail.ru).

STANISLAV V. IGNAEV – Master's Program Student, Department of Automation and Control, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev, Russia, Kazan (ignae99@gmail.com).

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).

Формат цитирования: *Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Игнаев С.В., Петров А.А.* Синхронные электродвигатели с реактивными роторами и повышенной скоростью вращения // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2. – С. 55–63. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-55-63.