



**Исмагилов Ф.Р.**  
**Ismagilov F.R.**

доктор технических наук,  
заведующий кафедрой  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



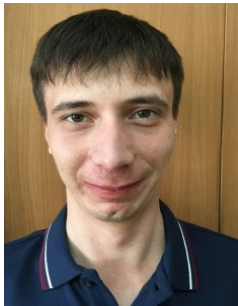
**Вавилов В.Е.**  
**Vavilov V.E.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



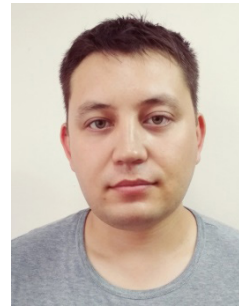
**Уразбахтин Р.Р.**  
**Urazbakhtin R.R.**

студент кафедры  
электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа,  
Российская Федерация



**Веселов А.М.**  
**Veselov A.M.**

магистрант кафедры электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Минияров А.Х.**  
**Miniyarov A.Kh.**

аспирант кафедры электромеханики,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.313.323

## СИНХРОННЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

В настоящее время в мире актуальна проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований относительно их подвижности. Данная проблема решается, если создать электромеханическую систему, обеспечивающую управление движением манипулятора по трем степеням свободы с использованием одного привода. Сейчас в мире не существует конкретных принципов изготовления и разработки подобных систем. В качестве такой электромеханической системы может выступать сферический электродвигатель. Основное требование к конструкции сферического электродвигателя – обеспечение полностью управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы и достижение при этом достаточной точности позиционирования. В статье авторами описан процесс проектирования собственного сферического электродвигателя – разработка статора сферического электродвигателя, стабилизация ротора сферического электродвигателя и придание вращения ротору сферического электродвигателя. Предложено два варианта статора для синхронного сферического электродвигателя; проведено моделирование распределения магнитного поля в программе Ansys Maxwell для каждой из предлагаемых конструкций статора

сферического синхронного электродвигателя. Проведен анализ предлагаемых конструкций статора сферического синхронного электродвигателя, и выявлена разница в распределении магнитного поля для каждой из предлагаемых конструкций статора сферического синхронного электродвигателя. В результате моделирования были получены численные значения магнитного потока около электромагнитов предлагаемых конструкций статоров синхронного сферического электродвигателя. Также в статье подробно описаны математические модели синхронного сферического электродвигателя в статике и в динамике. Решена проблема стабилизации ротора синхронного сферического электродвигателя. Проведен расчет усилий, которые должны быть созданы каждым из электромагнитов статора синхронного сферического электродвигателя для обеспечения стабилизации ротора синхронного сферического электродвигателя на заданной высоте. Описана динамика вращения ротора синхронного сферического электродвигателя посредством математических уравнений. В статье авторами приведена поэтапная методика расчета и проектирования для предлагаемого синхронного сферического электродвигателя.

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель, сферический электродвигатель, распределение магнитного поля, стабилизация ротора сферического электродвигателя, вращение ротора сферического электродвигателя.

## SYNCHRONOUS SPHERICAL ELECTRIC MOTOR

At present, the problem of designing new-generation manipulators is urgent in cause of the increase in requirements regarding their mobility. This problem is solved if we create an electromechanical system that provides control of the movement of the manipulator in three degrees of freedom using a single drive. Now in the world there are no specific principles for the manufacture and development of such systems. As such an electromechanical system can be a spherical electric motor. The main requirement for the design of a spherical electric motor is the provision of a fully controlled displacement of the rotor with three degrees of freedom and at the same time achieving sufficient positioning accuracy. In the article the authors describe the process of designing their own spherical electric motor – development of a stator of a spherical electric motor, stabilization of the rotor of a spherical electric motor and imparting a rotation of the rotor of a spherical electric motor. Two variants of a stator for a synchronous spherical electric motor are proposed; simulation of the magnetic field distribution in the Ansys Maxwell for each of the proposed stator designs of a spherical synchronous motor is performed. The analysis of the proposed stator designs of a spherical synchronous electric motor is carried out and the difference in the magnetic field distribution for each of the proposed stator designs of a spherical synchronous electric motor is revealed. As a result of the simulation, numerical values of the magnetic flux near the electromagnets of the proposed stator designs of a synchronous spherical electric motor were obtained. Also in the article are described in detail the mathematical models of a synchronous spherical electric motor in statics and in dynamics. The problem of stabilizing the rotor of a synchronous spherical electric motor is solved. The calculation of the forces that must be created by each of the stator electromagnets of a synchronous spherical electric motor is made to ensure stabilization of the rotor of a synchronous spherical electric motor at a given altitude. The dynamics of rotor rotation of a synchronous spherical electric motor is described by means of mathematical equations. In the article the authors show a step-by-step calculation and design method for the proposed synchronous spherical electric motor.

**Key words:** synchronous motor, spherical electric motor, magnetic field distribution, stabilization of the rotor of a spherical electric motor, rotation of the rotor of a spherical electric motor.

В настоящее время в мире актуальна проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований относительно их подвижности. Сервоприводы существующих манипулято-

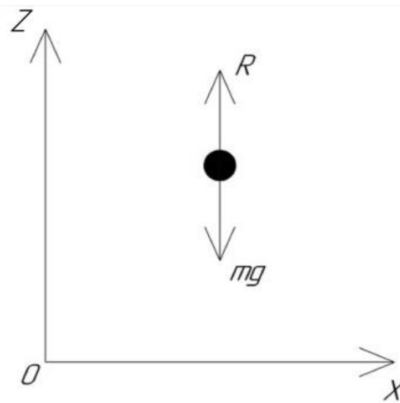
ров обладают только одной степенью свободы движений, что обуславливает ограниченную подвижность систем, в которых они используются. Для обеспечения движения по каждой дополнительной степени свободы

требуется установка отдельного сервопривода, что влечет за собой усложнение конструкции системы управления и механизма, в котором применяется этот привод, к увеличению массы конструкции и понижению ее надежности. Данная проблема решается, если создать электромеханическую систему, обеспечивающую управление движением манипулятора по трем степеням свободы с использованием одного привода. Сейчас в мире не существует конкретных принципов изготовления и разработки подобных систем [1].

В качестве такой электромеханической системы может выступать сферический электродвигатель. Основное требование к конструкции сферического электродвигателя –

обеспечение полностью управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы и достижение при этом достаточной точности позиционирования. В статье авторами описан процесс проектирования собственного сферического электродвигателя – разработка статора сферического электродвигателя, стабилизация ротора сферического электродвигателя и придание вращения ротору сферического электродвигателя.

Сначала рассмотрим условие равновесия ротора, представляющего собой постоянный магнит сферической формы, в магнитном поле, создаваемом электромагнитами статора (рис. 1).



**Рисунок 1.** Расчетная схема для ротора сферического электродвигателя при условии, что он находится в равновесии, где  $R$  – результирующая сила, действующая со стороны электромагнитов статора;  $mg$  – сила тяжести, действующая на ротор сферического электродвигателя

Из классических представлений физики условие равновесия ротора запишется следующим образом:

$$R = mg. \tag{1}$$

Выразим условие равновесия ротора через вертикальную составляющую вектора напряженности магнитного поля:

$$H_z = f(z). \tag{2}$$

Согласно формуле (2) вертикальная составляющая магнитного поля является функцией от координаты ротора по вертикали. В свою очередь вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля выражается через координату по вертикальной оси  $z$ , и напряженность магнитного поля на высоте левитации  $H_l$  выглядит следующим образом:

$$H_z = H_l \sqrt{1 - \frac{z - z_l}{1,5r_{ш}}}, \tag{3}$$

где  $r_{ш}$  – радиус ротора сферического электродвигателя.

Результирующая сила, действующая со стороны электромагнитов статора на ротор, выражается через напряженность магнитного поля на высоте левитации:

$$R = \frac{3}{8} \pi \chi_k \mu_0 H_l^2 r_{ш}^2, \tag{4}$$

где  $\chi_k$  – кажущаяся магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Кажущаяся магнитная проницаемость – величина магнитной проницаемости, заниженная по сравнению с истинной величиной магнитной проницаемости из-за влияния размагничивающего фактора.

Из уравнений (1), (3) и (4) получим окончательное условие левитации:

$$r_{ш} = \frac{9}{32} \frac{\chi_k \mu_0}{\rho g} H_{л}^2, \quad (5)$$

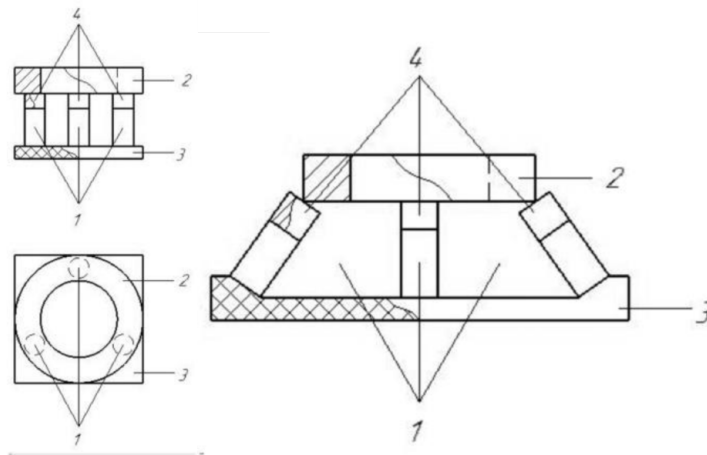
где  $\rho$  – плотность материала, из которого изготовлен ротор;  $g$  – ускорение свободного падения [2].

Для дальнейшего проектирования статора сферического электродвигателя установим связь между напряженностью магнитного поля на высоте левитации и вектором магнитной индукции в этой же точке:

$$B_{л} = \mu H_{л}. \quad (6)$$

Таким образом, установлена связь между вектором магнитной индукции на высоте левитации  $B_{л}$  и результирующей силой, действующей со стороны электромагнитов статора на ротор. В дальнейшем полученная зависимость будет нужна для реализации системы управления сферическим электродвигателем и для расчетов его параметров [3].

Предлагаемые конструкции статоров представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Конструкция статора № 1 (слева) и конструкция статора № 2 (справа), где 1 – электромагниты статора; 2 – постоянный кольцевой магнит; 3 – каркас статора; 4 – крепления для постоянного кольцевого магнита

В предлагаемых конструкциях ротора электромагниты статора находятся в вершинах правильного треугольника. Электромагниты статора выполняются одинаковыми, с целью обеспечения равномерного распределения сил, действующих на ротор со стороны электромагнитов статора. Угол между электромагнитами статора равен  $120^\circ$ . Каркас статора и крепления для кольцевого магнита выполняются из немагнитного материала.

В приведенной конструкции синхронного сферического электродвигателя магнитное поле постоянного кольцевого магнита существенно влияет на ротор. Это влияние проявляется в возникновении сил отталкивания между постоянным кольцевым магнитом и ротором, представляющим собой постоянный магнит сферической формы. Однако применение одного лишь постоянного кольцевого магнита не позволяет устойчиво удерживать электромеханическую систему в рав-

новесном состоянии. Поэтому для обеспечения устойчивости дополнительно применяются электромагниты статора, по которым протекают изменяющиеся с течением времени токи. Закон изменения токов во времени формирует автоматизированная система управления на основании сигналов отрицательной обратной связи по положению ротора синхронного сферического электродвигателя в пространстве. Применение предлагаемого конструктивного решения позволяет снизить токи, протекающие по электромагнитам статора, за счет того, что по электромагнитам статора протекает только переменная составляющая токов и, как следствие, снижается мощность, потребляемая системой автоматического управления для формирования управляющего воздействия.

Далее смоделируем распределение магнитного поля в предлагаемых конструкциях статора (рис. 3). Постоянный кольцевой

магнит выполнен из материала SmCo, провод в обмотке электромагнитов статора медный.

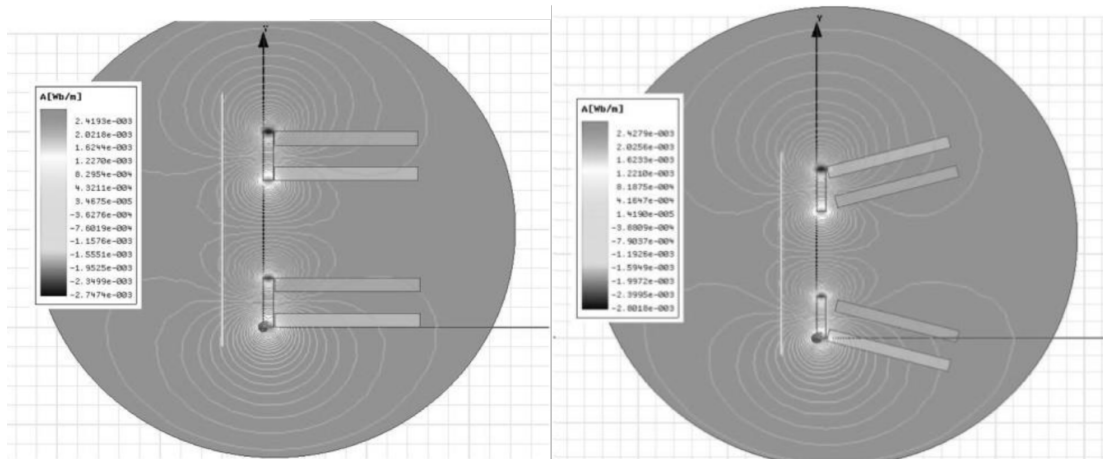


Рисунок 3. Распределение магнитного поля в конструкции статора № 1 (слева) и конструкции статора № 2 (справа)

Изготовление статора сферического электродвигателя возможно при применении обеих конструкций статора. Стоит отметить, что конструкция статора № 1 проще в изготовлении, чем конструкция статора № 2. Однако при применении конструкции статора № 2 возможно осуществить позициони-

рование ротора на меньшей высоте по отношению к постоянному кольцевому магниту.

Найдем усилие, которое создается каждым из электромагнитов статора, при условии, что ротор неподвижен. Расчетная схема с расстановкой сил, действующих на ротор, представлена на рисунке 4.

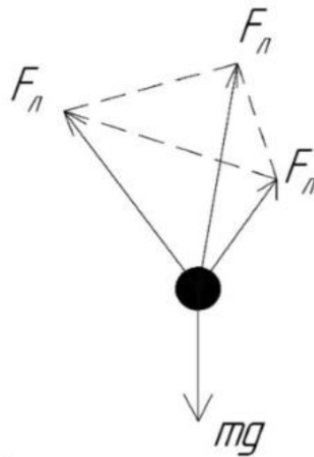


Рисунок 4. Расчетная схема с расстановкой сил, действующих на ротор, где  $F_n$  – сила, действующая на ротор сферического электродвигателя со стороны каждого электромагнита статора

Введем Декартову трехмерную прямоугольную систему координат и спроецируем действующие на ротор силы на вертикальную и горизонтальную плоскости. Заметим, что в силу симметричности системы условие равновесия ротора в горизонтальной плоскости (4) будет выполняться при любых значе-

ния сил. Проведя математические преобразования, получим:

$$F_n = \frac{mg}{3\cos\alpha} \quad (7)$$

В формуле (7) угол  $\alpha$  будет определяться исходя из распределения магнитных полей статора и ротора сферического электродвигателя на заданной высоте левитации.

Опишем динамику ротора сферического электродвигателя при условии, что ротор неподвижен в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом ротор может вращаться в каждой из трех плоскостей Декартовой прямоугольной системы координат. В данном случае вращение ротора в направлении, не совпадающем с направлением ни одной из плоскостей прямоугольных Декартовых координат, будет являться комбинацией из вращений ротора в каждой из плоскостей прямоугольной Декартовой трехмерной системы координат [4, 5].

Уравнения перемещения будут определяться исходя из изменений углов в трех плоскостях прямоугольной Декартовой системы координат  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ . Запишем уравнения для изменения угловых скоростей  $\omega_i$  ротора по трем рассматриваемым плоскостям:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} \\ \omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} \\ \omega_3 = \frac{d\varphi_3}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

### Список литературы

1. Липин А.В. Разработка и исследование трехкоординатного электропривода для манипуляторов [Электронный ресурс]. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf>, pdf (Дата обращения: 09.04.2018)
2. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н. и др. Постоянные магниты. Справочник. – М.: Энергия, 1980. – 487 с.
3. Ankit B., Masaaki K., Ralph H. Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, (Seattle, May 26-30 2015).
4. Bo L., Manabu A., Takehiro T., Hideki T. Sandwich-type Multi-degree-of-freedom Spherical Ultrasonic Motor [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A\\_0\\_855/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A_0_855/_pdf) (Data obrashhenija: 09.04.2018).

Тогда уравнения движения для ротора сферического двигателя запишутся в следующем виде:

$$\begin{cases} I \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = (mg + \sum F_1)L \\ I \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = (mg + \sum F_2)L \\ I \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} = (mg + \sum F_3)L \end{cases} \quad (9)$$

где  $I$  – момент инерции ротора сферического электродвигателя;  $F_i$  – сила, действующая на ротор со стороны электромагнитов статора в рассматриваемой плоскости вращения ротора.

Уравнениями (8) – (9) полностью описывается динамика ротора синхронного сферического электродвигателя [1, 6].

Итак, в статье авторами предложен новый вариант реализации сферического электродвигателя. Рассмотрены две возможные конструкции статора сферического электродвигателя. Предложена новая методика расчета предлагаемого сферического электродвигателя.

5. Wang J., Mitchell K., Jewell G.W., D. Howe Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ent.mrt.ac.uk/iml/paperbase/ICRA\\_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA\\_PAPERS/I1050.pdf](http://www.ent.mrt.ac.uk/iml/paperbase/ICRA_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA_PAPERS/I1050.pdf) (Дата обращения: 09.04.2018).

6. Кислицын А.Л. Синхронные машины. – Ульяновск: УЛИГТУ, 2000. – 108 с.

### References

1. Lipin A.V. Razrabotka i issledovanie trehkoordinatnogo jelektroprivoda dlja manipuljatorov [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf>, pdf (Data obrashhenija: 09.04.2018).
2. Al'tman A.B., Vernikovskij Je.E., Gerberg A.N. i dr. Postojannye magnity. Spravochnik. – М.: Jenergija, 1980, 487 p.

3. Ankit B., Masaaki K., Ralph H. Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, (Seattle, May 26-30 2015).

4. Bo L., Manabu A., Takehiro T., Hideki T. Sandwich-type Multi-degree-of-freedom Spherical Ultrasonic Motor [Elektronnyj resurs]. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A\\_0\\_855/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2009A/0/2009A_0_855/_pdf) (Data obrashhenija: 09.04.2018).

5. Wang J., Mitchell K., Jewell G.W., D. Howe Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors [Elektronnyj resurs]. URL: [http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA\\_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA\\_PAPERS/I1050.pdf](http://www.ent.mrt.ac.lk/iml/paperbase/ICRA_CDs/ICRA2001/PDFFILES/PAPERS/ICRA_PAPERS/I1050.pdf) (Дата обращения: 09.04.2018).

6. Kislicyn A.L. Sinhronnye mashiny. – Ul'janovsk: UIGTU, 2000. – 108 p.