

УДК 621.311

## Анализ ЭДС вращения магнитоэлектрического двигателя

Масленникова С. И.<sup>1</sup>, Ситников А. В.<sup>1,\*</sup>

[\\*sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье авторы анализируют возможность создания гиromотора на базе магнитоэлектрического двигателя с постоянными магнитами большой коэрцитивной силы. Авторами предложена конструкция магнитоэлектрического двигателя с радиально расположенными цилиндрическими постоянными магнитами, созданными на основе соединения редкоземельных элементов и кобальта. Такая конструкция электромагнитной системы позволяет выполнить статор без традиционного магнитопровода, заполнив его обмоткой из меди. Такая конструкция статора собирается из элементов без органических фракций, что особенно важно для гироскопов с газодинамическими опорами. Кроме того, радиальное расположение постоянных магнитов позволяет обеспечить стабильность центра масс ротора, что улучшает точностные характеристики гироскопических приборов, созданных на основе такого двигателя. Особое внимание в работе уделено анализу электромагнитных процессов, происходящих в электродвигателе, проведено исследование электродвижущей силы вращения, возникающей в обмотках при работе двигателя. В работе представлены сравнительные результаты теоретических расчетов и практических исследований магнитоэлектрического двигателя с постоянными магнитами радиального исполнения.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический двигатель, ротор, статор, статорная обмотка, электродвижущая сила, ЭДС вращения, магниты с высокой коэрцитивной силой

---

### Введение

Точностные характеристики гироскопических приборов зависят от параметров работы гиromотора, от стабильности кинетического момента ротора электродвигателя гиromотора. Широко применяемые в гиromоторах асинхронные двигатели не могут обеспечить требуемое постоянство скорости вращения маховика. Для многих современных гироскопических приборов и систем требуется выдерживать постоянство скорости вращения с точностью порядка сотых и тысячных долей процента. Такие точности могут быть обеспечены с помощью синхронных двигателей переменного тока.

Совершенствование двигателей, входящих в состав гироскопических приборов, идет по пути разработки их новых конструкций с использованием перспективных материалов.

При конструировании электродвигателя гиromотора необходимо провести анализ электромагнитных процессов в нем. Без этого невозможно получение требуемых статических и динамических характеристик двигателя. Необходимо учитывать также очень жесткие требования по габаритам, массе, потреблению энергии, предъявляемые к гироскопическим приборам.

Для анализа электромагнитных процессов, происходящих в электродвигателе, необходимо провести исследования электродвижущей силы (ЭДС) вращения, возникающей в обмотках при работе двигателя. В данной работе проведен анализ ЭДС вращения магнитоэлектрического двигателя (МЭД) с постоянными магнитами. Представлены сравнительные результаты теоретических расчетов и практических исследований такого двигателя.

Предложенная в работе конструкция магнитоэлектрического двигателя радиального исполнения обладает рядом технических достоинств, к которым можно отнести, например, достижение необходимой стабильности центра масс технологическими средствами, выполнение статора из элементов не содержащих органических фракций, что очень важно при использовании газодинамических опор.

### **Конструкция магнитоэлектрического двигателя радиального исполнения**

Физические процессы в двигателе, в том числе закон изменения ЭДС вращения, существенным образом зависят от его конструктивных особенностей. Рассмотрим конструкцию разработанного магнитоэлектрического двигателя с постоянными магнитами высокой коэрцитивной силы.

Целесообразность применения в системе возбуждения гиродвигателя высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе соединения редкоземельных элементов и кобальта, например,  $\text{SmCO}_5$ , связана с необходимостью получения стабильных характеристик гиromотора, повышения его КПД при снижении нагрузки. Высокая плотность энергии магнитов типа  $\text{SmCO}_5$  позволяет создавать достаточные магнитные потоки в относительно больших немагнитных промежутках [1], что дает возможность выполнить статор без магнитопровода, заполнив зазор с учетом каркаса обмоткой из меди, и получить конструкцию статора из элементов без органических фракций. Последнее особенно важно для гироскопа с газодинамическими опорами [2].

Одна из наиболее перспективных схем многополюсного гиromотора с радиальным расположением магнитов приведена на рис 1.

К числу особенностей данной конструкции относится, во-первых, цилиндрическая форма полюсов и, во-вторых, спиральная однослойная намотка катушек обмотки фаз статора, создающих вращающееся магнитное поле.

Электромагнитная система двигателя с постоянными магнитами состоит из неподвижного статора (рис. 1) и вращающегося ротора. Постоянные магниты цилиндрической формы с чередующейся полярностью посажены в обойму из немагнитного материала, которая запрессовывается в тело маховика ротора. Ротор изготовлен из магнитомягкого ма-

териала, обладающего высокой магнитной проницаемостью. На немагнитном каркасе статора (например, керамическом) в специальных углублениях закреплены однослойные катушки обмоток статора. Таким образом, статор с обмотками находится в воздушном зазоре магнитной цепи ротора.

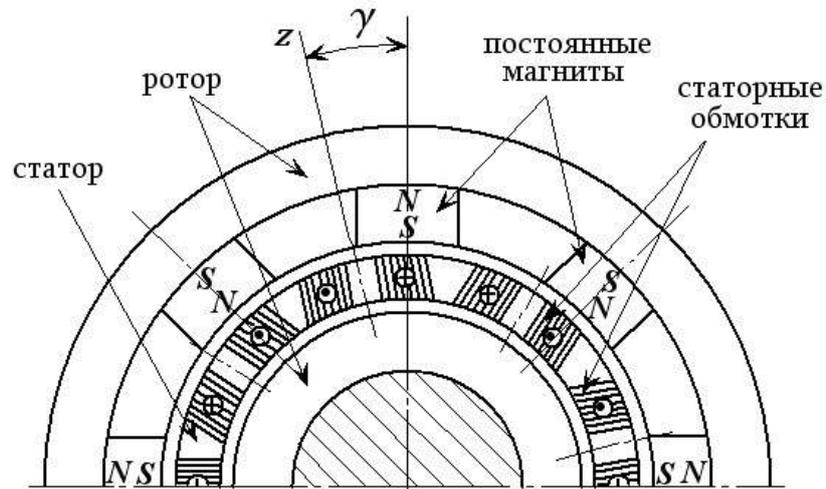


Рис. 1. Электромагнитная система двигателя

Форма магнитов обусловлена необходимостью получения механической стабильности маховика гиromотора, которая обеспечивается за счет хорошей посадки, но, к сожалению, при этом ухудшаются энергетические характеристики гиродвигателя. Однако, с этим ухудшением приходится мириться, т.к. обеспечение стабильности центра масс предпочтительнее обеспечения оптимального распределения магнитного потока в зазоре МЭД.

Основные особенности конструкции рассматриваемого двигателя состоят в следующем: 1) статор выполнен без магнитопровода; 2) индуктор образован дискретно расположенными постоянными магнитами цилиндрической формы из магнитных материалов с высокой плотностью энергии; 3) магнитное поле в рабочем зазоре имеет сложный характер и определено формой магнитов и магнитопровода из магнитомягкого материала (получить аналитическое выражение этого распределения не представляется возможным); 4) на распределение магнитного поля в зазоре поток реакции якоря практически не влияет.

### **Анализ ЭДС вращения магнитоэлектрического двигателя радиального исполнения**

Одной из основных задач исследования электромагнитных процессов в электрическом двигателе является анализ ЭДС в обмотке статора. Особенности конструкции исследуемого двигателя не позволяют воспользоваться известными методиками расчета [3] ЭДС, индуктируемой в обмотке статора, вследствие изменения её взаимного положения в пространстве относительно постоянных магнитов.

Считая магнитную проницаемость материала магнитопровода ротора бесконечно большой по сравнению с магнитной проницаемостью воздушного зазора, пренебрегаем разностью магнитных потенциалов на магнитопроводе и потоками рассеяния и считаем распределение индукции в зазоре равномерным в радиальном направлении с сечением, равным сечению магнита в плоскости, перпендикулярной оси намагничивания.

В работе [4] показано, что пространственную картину распределения индукции над поверхностью полюса следует считать симметричной относительно его оси независимо от коэффициента полюсного перекрытия. При этом учитывается, что потокосцепление обмотки якоря МЭД определяется только нормальной к её плоскости составляющей вектора индукции. Форма распределения индукции практически не зависит от соотношения геометрических размеров магнитов и от их магнитных свойств, а определяется величиной коэффициента полюсного перекрытия и шириной рабочего зазора. Причем, чем меньше ширина рабочего зазора, тем ближе форма распределения поля к цилиндрической.

Последние положения с учетом реальных конструктивных размеров рассматриваемого магнитоэлектрического двигателя использовались при расчете ЭДС, наводимой в обмотке торцевого МЭД с якорем без магнитопровода.

Учитывая, что зазор  $\delta$  в многополюсной системе мал по сравнению с его радиусом  $R$  ( $\delta \ll R$ ), пренебрегаем влиянием кривизны поверхности и заменяем кольцевой зазор плоским (рис.2).

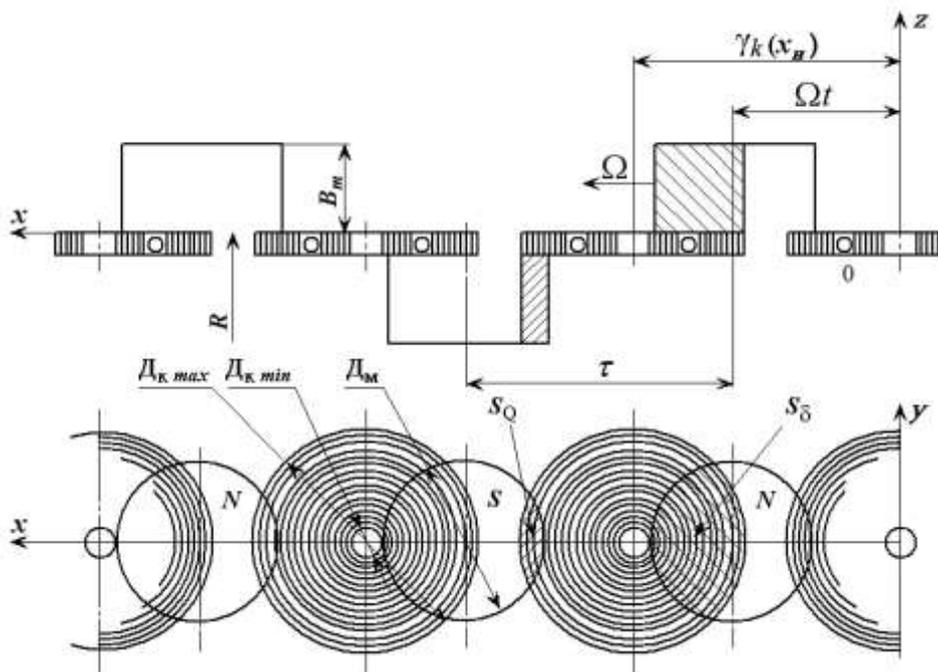


Рис. 2. Развертка магнитной системы МЭД

В этом случае поток возбуждения равен

$$\Phi_B = BS_M,$$

где  $B$  – индукция возбуждения в зазоре,  $S_M$  - сечение магнита.

Потокосцепление поля возбуждения с обмоткой статора зависит от угла  $\gamma$ , характеризующего положение оси обмотки относительно оси намагничивания магнита:

$$\Psi_{12} = f(\gamma).$$

При  $\gamma = 0$  потокосцепление имеет максимальное значение. При повороте ротора в многополюсной машине с числом пар полюсов  $2p = 4$  на угол  $\gamma = 22.5^\circ$  (что соответствует значению 90 эл. градусов) потокосцепление будет равно нулю. При повороте ротора на угол  $\gamma = 45^\circ$  (соответственно на угол 180 эл. градусов) потокосцепление максимально, но имеет противоположный знак. При  $\gamma = 90^\circ$  (360 эл. градусов)  $\Psi$  равно нулю; при этом значение  $\gamma$  соответствует периоду изменения потокосцепления.

При вращении ротора с угловой скоростью  $\Omega$  угол  $\gamma = \Omega t$  линейно увеличивается во времени, а в обмотке статора индуцируется ЭДС вращения, равная

$$e = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -\Omega \frac{d\Psi_{12}}{d\gamma}.$$

Таким образом, ЭДС вращения пропорциональна скорости вращения ротора и скорости изменения потокосцепления по углу поворота ротора.

Потокосцепление потока возбуждения с обмоткой статора, а следовательно, и ЭДС вращения зависит от размеров и конструкции обмоток и от геометрии магнитного поля, сцепляющегося с витками обмотки.

ЭДС вращения, индуцируемая в фазе обмотки (фазная ЭДС) МЭД, может быть определена по формуле:

$$e_\phi = 2p \sum_{j=1}^k e_j,$$

где  $e_j$  - ЭДС  $j$ -го витка катушки,  $k$ - число витков катушки,  $2p$ - число катушек в фазе. Следовательно, для определения ЭДС вращения фазы МЭД необходимо определить ЭДС одного витка.

Предварительно сделаем допущение, что распределение индукции задано. Причем, распределение нормальной составляющей индукции симметрично относительно оси магнитов, т.е. радиальные и тангенциальные сечения распределения индукции на полюсном делении, проходящие через ось магнита, равны (рис. 3).

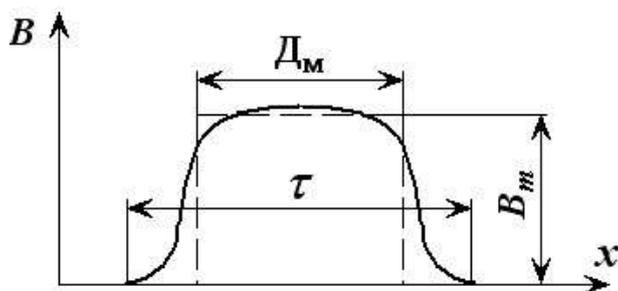


Рис. 3. Распределения индукции на полюсном делении

Приближенно реальное распределение индукции может быть заменено прямоугольным, образующим при его вращении вокруг оси магнита цилиндр диаметром  $D_m$ .

При данном допущении для определения потокосцепления и ЭДС необходимо рассчитать площадь, охватываемую магнитным потоком при взаимном перемещении обмотки и полюса.

С учетом конструктивных особенностей МЭД и витков, и полюс представим окружностями с радиусами соответственно  $R$  и  $r$ , причем  $R \gg r$ . В качестве аргумента функции  $S_B$  принимаем координату  $x$ .

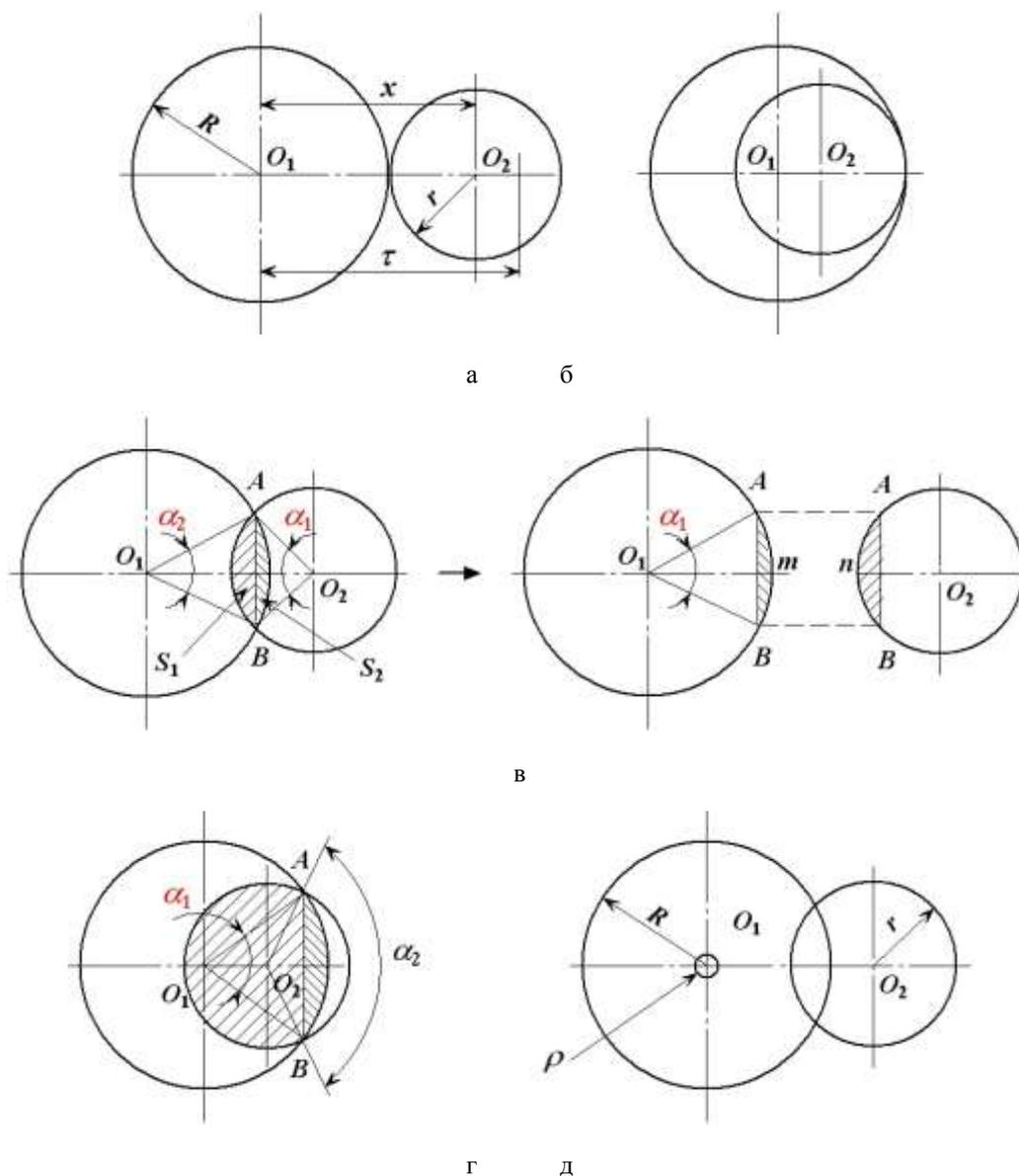


Рис. 4. К расчету площади, охватываемой магнитным потоком

При этом возможны 4 случая.

1.  $x \geq R + r$ . Тогда  $S_{\text{общ}} = 0$ . (рис. 4а).

2.  $\sqrt{R^2 - r^2} \leq x < R + r$  (рис. 4в). В этом случае площадь, охватываемая магнитным потоком, равна сумме площадей двух сегментов  $AmB$  и  $AnB$ , эту площадь можно выразить через координату  $x$ .

$$S_{\text{общ}} = S_{AmB} + S_{AnB} = S_{\text{сект}O_1AmB} - S_{\text{треуг}O_1AB} + S_{\text{сект}O_2AnB} - S_{\text{треуг}O_2AB} =$$

$$= \frac{\alpha_1 R^2}{2} - \frac{1}{2} AB \sqrt{R^2 - \frac{(AB)^2}{4}} + \frac{\alpha_2 r^2}{2} - \frac{1}{2} AB \sqrt{r^2 - \frac{(AB)^2}{4}},$$

где  $\alpha_1 = 2 \arctg \frac{AB}{2\sqrt{R^2 - \frac{(AB)^2}{4}}}$ ,  $\alpha_2 = 2 \arctg \frac{AB}{2\sqrt{r^2 - \frac{(AB)^2}{4}}}$ ,

$$AB = \frac{4\sqrt{C(C-x)(C-R)(C-r)}}{x}, \quad C = \frac{R+r+x}{2}.$$

$AB$  – хорда, образованная пересечением полюса цилиндрической формы с витком обмотки (рис. 4в),  $x$ - текущая координата, изменяющаяся в пределах  $0 \leq x \leq \tau$ . Хорда  $AB$  определяется геометрическими размерами и полюсным делением  $\tau$ , а общая площадь может быть представлена как функция координаты  $S_{\text{общ}} = F(x)$ .

3.  $R - r \leq x < \sqrt{R^2 - r^2}$  (рис. 4г). Общая площадь  $S_{\text{общ}}$ , как и в предыдущем случае, определяется как сумма площадей двух сегментов, однако, площадь  $S_2$  вычисляется теперь как

$$S_2 = \frac{\pi r^2}{2} - S_{\text{сегм}AmB},$$

а угол  $\alpha$  равен  $\alpha_2 = 2\pi - 2 \arctg \frac{AB}{2\sqrt{r^2 - \frac{(AB)^2}{4}}}$ .

4.  $x < R - r$ ,  $S_{\text{общ}} = \pi r^2$ . Кроме того, при расчете необходимо учитывать наличие в обмотке статора внутреннего наименьшего витка диаметром  $\rho$  (рис. 4д).

Полученные соотношения для окружностей с радиусами  $R$  и  $r$  можно перенести и на окружности с радиусами  $r$  и  $\rho$ . Общая площадь в этом случае уменьшается, если  $R - \rho < r$ . На рис. 5 приведена полученная в результате расчета зависимость площади (потокосцепления) витка от координаты  $x$  при взаимном перемещении витка обмотки и полюса.

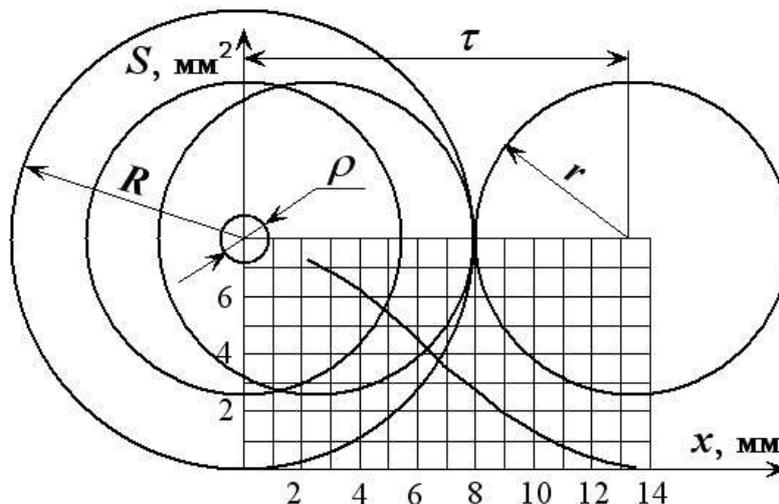


Рис. 5. Зависимость площади витка от координаты  $x$

Расчеты были выполнены для следующих размеров МЭД:  $R = 7.5 \text{ мм}$ ,  $r = 5.0 \text{ мм}$ ,  $\rho = 1.5 \text{ мм}$ .

При спиральной намотке приращение потокосцепления можно считать дискретным. Поэтому потокосцепление вращающегося поля с катушкой определяем путем суммирования потокосцеплений всех витков катушки:

$$\Psi = \sum_{j=1}^n \Psi_j. \quad (1)$$

На рис. 6 приведено семейство характеристик, аналогичных характеристике рис. 5, построенных для различных размеров витков катушки в диапазоне от  $R = 7.5 \text{ мм}$  до  $R = 2.0 \text{ мм}$ .

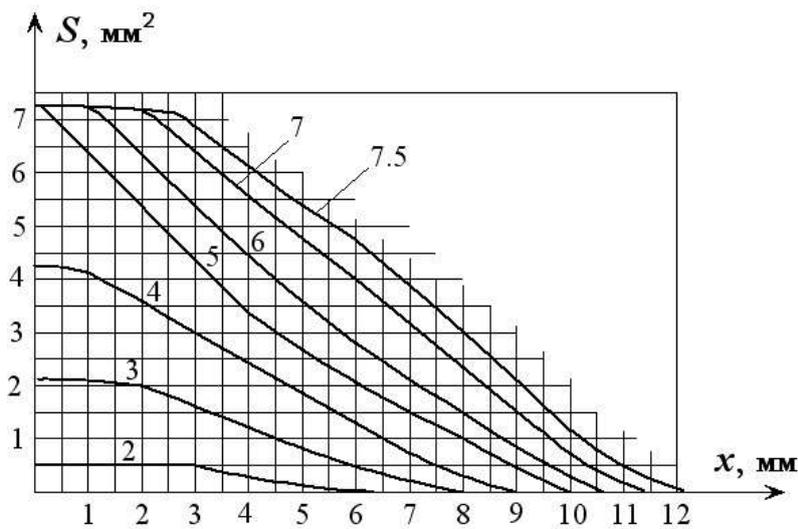


Рис. 6. Зависимости потокосцеплений от координаты  $x$

Учитывая, что относительно обмотки перемещается не один полюс, например, северный, но и второй – южный (на рис.2 показан виток в поле двух магнитов), получим кривую изменения полного потокосцепления как разность соответствующих потокосцеплений (рис.7), где  $\tau$  - полюсное деление.

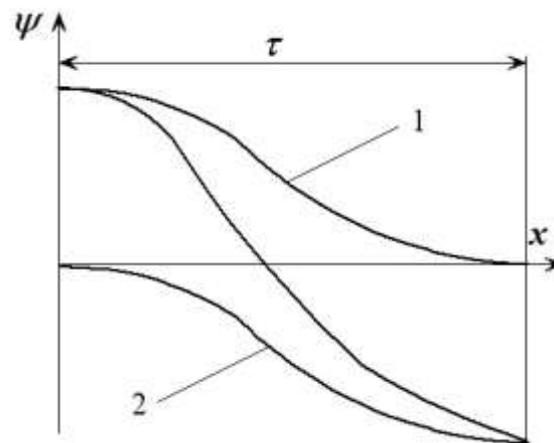


Рис. 7. Зависимость потокосцепления витка от координаты  $x$

На развертке кольцевого зазора (рис.2) перемещение обмотки (витка) относительно полюса (или наоборот, полюса относительно витка) может измеряться либо длиной дуги  $x$ , либо углом  $\gamma$ . Причем,  $x = \gamma R_3$ ;  $R_3 = \frac{\tau p}{\pi}$ , где  $R_3$  - средний радиус окружности зазора,  $p$  - число пар полюсов двигателя.

Электродвижущая сила катушки также может быть представлена как сумма ЭДС отдельных витков.

На рис. 8 приведена зависимость ЭДС катушки в функции  $x$  (кривая 1).

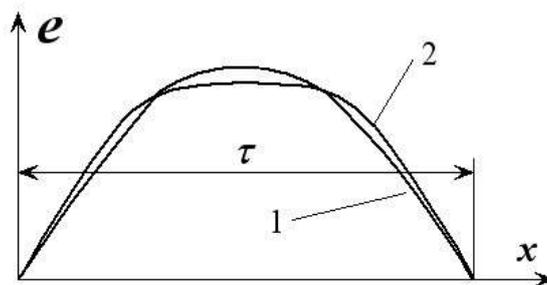


Рис. 8. Зависимость ЭДС катушки от координаты  $x$

Если заменить дискретное распределение витков на непрерывное, то сумму в формуле (1) следует заменить интегралом.

Были проведены экспериментальные исследования анализируемого двигателя. На рис. 8 приведена экспериментально полученная зависимость  $e(x)$  (кривая 2).

### Заключение

Рассмотренная в работе конструкция магнитоэлектрического двигателя радиального исполнения обладает хорошими технологическими характеристиками, предпочтительна при использовании газодинамических опор, позволяет получить требуемую стабильности кинетического момента ротора гиromотора. Применение в конструкции двигателя высокоэрцитивных постоянных магнитов  $\text{SmCO}_5$  позволяет повысить КПД системы.

В работе предложена методика расчета ЭДС вращения, необходимая для создания электродвигателей с предсказуемыми статическими и динамическими характеристиками, что позволяет создавать прецизионные гироскопические приборы.

В работе получено аналитическое выражение ЭДС вращения, что позволяет оценить предельные мощность и момент двигателя. При экспериментальном исследовании электродвигателя с радиальным расположением магнитов была получена характеристика зависимости ЭДС от координаты  $e = f(x)$  (рис. 8), на которой видно, что теоретические выкладки, предложенные в работе могут быть применены для расчета такого типов двигателей.

## Список литературы

1. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов / А.В. Миткевич. – СПб.: "Ленанд", 2015. 130 с.
2. Дадаев С.Г. Нестационарные модели газодинамических подшипников со спиральными канавками / С.Г. Дадаев. -Челябинск.: Изд-во ЮурГУ. 2000. 231 с.
3. Кацман М.М. Электрические машины: Учебник / М.М.Кацман. - М.: Высшая школа 2003 г., 472 с.
4. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Определение коэффициента полюсного перекрытия быстроходных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными цилиндрическими магнитами *Электричество*. – 2013. - №11. с. 51-53.
5. Красовский А.Б. Основы электропривода: Уч. пособие / Красовский А.Б. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
6. Шерстняков Ю.Г., Стрелков Б.В., Роднов Н.А. Основы электромеханики. Машины постоянного тока: учебн. пособие / Ю.Г. Шерстняков, Б.В. Стрелков, Н.А. Роднов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2012.
7. Баранов Е. Н., Ситников А.В. Дисковый вентильный электродвигатель с печатной обмоткой разомкнутого типа *Радиооптика Сетевое издание*, Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2015. № 3.

## Analysis of the EMF of the Magneto-electric Motor Rotation

S.I. Maslennikova<sup>1</sup>, A.V. Sitnikov<sup>1,\*</sup>

[\\*sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** Magneto-electric motor, a rotor, a stator, stator windings, electromotive force, EMF of rotation, magnets with high coercive force

---

The main element of gyroscopic equipment is gyro-motor. The precision characteristics of gyroscopic systems mostly depend on the stability of the kinetic moment of the gyro-motor rotor. The article analyzes the possibility of creating gyro based on the magneto-electric motor (MEM) with permanent magnets of high coercive force.

The proposed MEM design with radially arranged cylindrical permanent magnets has the following features: the stator has no magnetic core, the inductor is formed of discretely spaced permanent magnets of cylindrical shape from magnetic materials with high energy density, the magnetic field in the working clearance is complicated in nature and determined by the shape of magnets and magnetic circuit from magnetic material, the flux of armature reaction practically has no effect on distribution of magnetic field in the clearance.

Since a stator is made without magnetic circuit its space is filled with a spiral single layer phase windings. The radial arrangement of the permanent magnets allows ensuring the stability of the center of mass of the rotor, which improves the precision of gyroscopic devices based on this motor.

One of the main research objectives of electromagnetic processes in electric motor is to analyze the EMF in the stator winding. The paper explores the EMF induced in the coil magnet motor with radially arranged cylindrical permanent magnets; the rotor is made without a magnetic core. This study takes into account the fact that the form of distribution of the magnetic system induction of the motor is almost independent on the ratio of the geometric dimensions of the magnets and their magnetic properties. It is determined by the value of the coefficient of pole overlapping and by width of the working clearance.

The paper presents comparative results of theoretical calculations and practical investigations of MEM with radially arranged permanent magnets.

## References

1. Mitkevich A.V. *Stabil'nost' postoyannykh magnitov* [Constant magnets stability]. St-Petersburg, Lenand Publ., 2015. 130 p. (in Russian).
2. Dadaev S.G. *Nestatsionarnye modeli gazodinamicheskikh podshipnikov so spiral'nymi kanavkami* [Non-stationary models of gasodynamic bearing with spiral flutes]. Chelyabinsk, YuurGU Publ., 2000. 231 p. (in Russian).
3. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 472 p. (in Russian).
4. Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E. Determining the Pole Overlapping Ratio in High-Speed Magnetolectric Machines with High-Coercitivity Cylindrical Magnets. *Elektrichestvo*, 2013, no. 11, pp. 51-53. (in Russian).
5. Krasovskiy A.B. *Osnovy elektroprivoda* [Electric drive basics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. (in Russian).
6. Sherstnyakov Yu.G., Strelkov B.V., Rodnov N.A. *Osnovy elektromekhaniki. Mashiny postoyannogo toka* [DC machines. Basics of electromechanics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 48 p. (in Russian).
7. Baranov E.N., Sitnikov A.V. Diskovyy ventil'nyy elektrodvigatel' s pechatnoy obmotkoy razomknutogo tipa. *Radiooptika Setevoe izdanie = Radiooptics electronic journal*, 2015, no. 3. (in Russian). DOI: [10.7463/rdopt.0315.0789748](https://doi.org/10.7463/rdopt.0315.0789748)