

УДК 621.313.17

ДВИЖЕНИЕ РОТОРА В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

В. В. Наний, В. А. Лыках, А. М. Масленников

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина.

E-mail: v.naniy@mail.ru; lykahva@yahoo.com; x-maslennikov@yandex.ua

Рассмотрен процесс движения эксцентрично расположенного ротора по внутренней поверхности статора между точками равновесия при питании катушек обмотки статора униполярными импульсами для создания дискретно вращающегося магнитного поля. Представлено распределение магнитной индукции в воздушном зазоре электродвигателя с катящимся ротором, дано ее математическое описание, что позволило получить распределение энергии магнитного поля в воздушном зазоре. Движение ротора под действием магнитного поля статора рассмотрено в рамках консервативной механической системы, где перемещение ротора происходит под действием потенциальной энергии, а кинетическая энергия ротора приводит к его колебаниям относительно точки равновесия. Получена зависимость собственной частоты колебаний ротора от геометрических размеров двигателя и его электромагнитной нагрузки.

Ключевые слова: ротор, энергия, магнитное поле, электродвигатель.

РУХ РОТОРА В ЕЛЕКТРОДВИГУНІ З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ

В. В. Наний, В. А. Лыках, А. М. Масленников

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.

E-mail: v.naniy@mail.ru; lykahva@yahoo.com; x-maslennikov@yandex.ua

Розглянуто процес руху эксцентрично розташованого ротора по внутрішній поверхні статора між точками рівноваги при живленні катушок обмотки статора униполярними імпульсами для створення дискретно обертаючого магнітного поля. Надано розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку електродвигуна з ротором, що котиться, що дозволило одержати розподіл енергії магнітного поля в повітряному проміжку. Рух ротора під дією магнітного поля статора розглянуто в рамках консервативної механічної системи, де переміщення ротора відбувається під дією потенційної енергії, а кінетична енергія ротора призводить до його коливань відносно точки рівноваги. Отримано залежність власної частоти коливань ротора від геометричних розмірів двигуна та його електромагнітного навантаження.

Ключові слова: ротор, енергія, магнітне поле, електродвигун.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Двигатели с катящимся ротором (ДКР) относятся к синхронным реактивным двигателям, основным отличием которых является отсутствие обмотки на роторе. Это тихоходные электродвигатели с высоким вращающим моментом и низкой частотой вращения вала. Такие свойства возникают благодаря механическому взаимодействию ротора с поверхностью статора. Ротор расположен эксцентрично и движется под действием сил магнитного поля статора, которое может быть получено как от сети переменного напряжения, так и от сети постоянного напряжения. Выбор питающей сети влияет на конструкцию ДКР и способы получения силы одностороннего магнитного притяжения (СОМП), под действием этой силы ротор перемещается по окружности статора [1].

Первые исследования ДКР были начаты в 1944 г. Москвитиным, а позднее конструкции ДКР и процессы электромагнитного преобразования энергии в них наиболее полно освещены в работах Шон Р. [1], Бертинов А.И., Борзяк Ю.Г., Варлей В.В., Зайков М.А.,

Наний В.П. [2, 3], а также в работах G. Kaminski, H. Wrotek, A. Viviani [4, 5] и других.

Конструкция ДКР зависит от выбора типа питающей сети, а также наличия преобразователя для управления работой двигателя [6, 7]. Для сети переменного напряжения необходимо иметь две обмотки: одна обмотка для униполярного подмагничивания, а вторая для создания вращающегося магнитного поля. В конструкциях ДКР, работающих от сети постоянного тока необходимо наличие устройства, коммутирующего поочередно катушки статора для создания СОМП. Таким образом, на катушки статорной обмотки подается импульсное напряжение, что приводит ротор к дискретному движению, которое является неравномерным.

Под неравномерным движением ротора понимают движение ротора с переменным ускорением между точками равновесия, колебание ротора, срыв ротора – выпадение из синхронизма.

Подобные процессы неравномерного движения наблюдаются у шаговых двигателей. Появление этих процессов обусловлено запасом кинетической

енергии, которая была накоплена при обработке угла и движения ротора в точку равновесия [8].

Однако существенным отличием ДКР от шагового электродвигателя является наличие механического контакта между статором и ротором и необходимость создания СОМП для реализации принципа действия. При этом точка контакта движется с большей частотой вращения, чем частота вращения ротора [9].

Понимание процесса движения ротора необходимо для создания эффективных средств и устройств управления с целью максимального использования магнитной системы ДКР и, как следствие, получения наилучших массогабаритных показателей двигателя.

Целью данной работы является рассмотрение процесса движения эксцентрично расположенного ротора под действием СОМП.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Движение ротора в ДКР осуществляется под действием СОМП, значение которой, можно определить так [2]:

$$P = \frac{B_{\delta}^2 \cdot S}{\mu_0}, \tag{1}$$

где B_{δ} – значение магнитной индукции в воздушном зазоре; S – площадь поверхности, через которую проходит основной магнитный поток; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Как видно из выражения (1), СОМП существенно зависит от значения магнитной индукции в воздушном зазоре. При эксцентричном положении ротора в расточке статора воздушный зазор является неравномерным, что приводит к изменению магнитной индукции в воздушном зазоре. Так как на процесс движения ротора оказывает именно СОМП, зависящая от распределения магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 1), то необходимо рассматривать энергию магнитного поля, сконцентрированного в этом объеме.

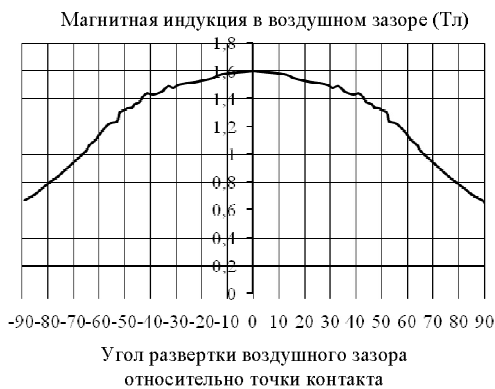


Рисунок 1 – Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ДКР

График, представленный на рис. 1, резко обрывается в точках $+90^\circ$ и -90° , что обусловлено числом включенных катушек статора и отсутствием магнитного поля вне зоны включения катушек.

Зависимость энергии магнитного поля и магнитной индукции характеризуется плотностью энергии магнитного поля [11]:

$$W_m = \int_V w dV = \int_V \frac{B_i^2}{2\mu_0\mu_i} dV, \tag{2}$$

μ_i – магнитная проницаемость среды; B_i – значение магнитной индукции в интегрируемом объеме с учетом среды.

Форма графика распределения магнитной индукции и распределения объемной плотности магнитного поля будут подобны, поэтому для их аналитического описания применим аппроксимацию гиперболическим косинусом:

$$w(\alpha) = \frac{w_{\max}}{ch^n\left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\sigma}\right)}, \tag{3}$$

где w_{\max} – максимальное значение плотности магнитного поля в воздушном зазоре, соответствующее максимальному значению B_{δ} ; α_0 – угол, определяющий положение равновесия ротора при заданном распределении магнитного поля; n – число, определяющее крутизну графика и зависящее от геометрии двигателя, $n=1, 2, 3, \dots$

Положение равновесия ротора находится в точке максимума магнитной энергии и соответствует углу $\alpha_0 = 0^\circ$. Угол α_0 определяет дискретность перемещения магнитного поля, новое положение равновесия ротора (рис. 2). При переключении катушек положение α_0 изменяется на $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

Дискретное изменение положения магнитного поля в пространстве приводит во вращение ротор ДКР. Движение ротора происходит тогда, когда ток во включаемой катушке достигает значения тока троганья, а ток в отключаемой катушке достигает нулевого значения. Вследствие нарастания значения величины тока во включаемой катушке результирующий вектор СОМП перемещается на угол α_0 , а ротор перемещается в точку K^I (рис. 2).

Время перекачивания ротора из точки K в точку K^I складывается из суммы времени переходного процесса в катушке с нарастанием значения тока до установившегося и собственно механического перемещения ротора. Как правило, интервал времени переходного процесса в катушке гораздо больше времени перекачивания ротора, поэтому, после пе-

рекачывания ротор остановится в новой точке равновесия и тем самым двигатель перейдет из динамического режима работы в статический – режим удержания.

Элементарный вклад в энергию магнитного поля для бесконечно малого угла [10]:

$$dW_m = wdV. \quad (4)$$

Интегрируя по элементу объема, получим значение всей энергии, сосредоточенной в воздушном зазоре:

$$W_m = \int_V wdV, \quad (5)$$

где dV – элемент объема,

$$dV = \delta \cdot dS, \quad (6)$$

δ – значение воздушного зазора по расточке статора для любого β , изменяющегося в пределах от 0 до p ; элементарная площадь поверхности статора при бесконечно малом приращении угла β ;

$$dS = l \cdot R_S d\alpha, \quad (7)$$

R_S – внутренний радиус статора.

Раскрывая переменные в уравнении (5), описывающее значение всей энергии магнитного поля в воздушном зазоре при эксцентричном положении ротора в расточке статора, необходимо ввести пределы интегрирования, определяющиеся числом включенных катушек статора. При включении половины статорных катушек пределы интегрирования составляют $\pm \frac{\pi}{2}$ от точки равновесия ротора α_0 . Если же учесть, что ротор совершает затухающие колебания относительно точки K^I , амплитуда которых зависит от угла β , то его необходимо также учитывать. Подставляя переменные в уравнение (5) с учетом отклонения ротора от точки равновесия имеем следующее:

$$W(\alpha_0, \beta) = \int_{\alpha_0 - \frac{\pi}{2}}^{\alpha_0 + \frac{\pi}{2}} w_{\max} \frac{1}{ch\left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\sigma}\right)} \cdot [l \cdot R_S d\alpha] \times \\ \times [(R_S - R_r)(1 - \cos(\alpha - (\alpha_0 + \beta)))] \quad (8)$$

Решая уравнение (8) в среде MathCad можно получить графическую зависимость, представленную на рис. 3.

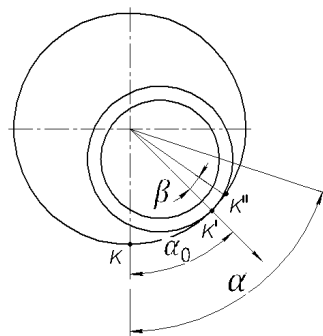


Рисунок 2 – Углы, определяющие движение и колебание ротора

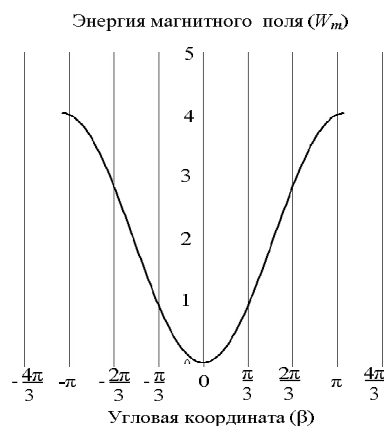


Рисунок 3 – График распределения энергии магнитного поля

Приведенный график зависимости энергии магнитного поля в воздушном зазоре ДКР также является распределением потенциальной энергии системы, под действием которой ротор перемещается между точками равновесия. Устойчивое положение равновесия ротора находится в точке локального минимума потенциальной энергии.

Неравномерное движение ротора с различным ускорением между точками равновесия приводит к тому, что ротор, обладая кинетической энергией, проходит точку равновесия и совершает затухающие колебания под действием силы, направленной в противоположную отклонению сторону. Таким образом, положение равновесия ротора определяется распределением потенциальной энергии, а амплитуда колебаний ротора – запасом кинетической энергии. На его кинетическую энергию оказывает влияние момент инерции, определяемый относительно оси симметрии ротора. Тогда уравнение кинетической энергии ротора запишется как [11]

$$T = \frac{mV^2}{2} + \frac{I_0\Omega^2}{2}, \quad (9)$$

где V – линейная скорость ротора относительно

$$V = (R_S - R_r) \cdot \dot{\beta}, \quad (10)$$

R_s – внутрішній радіус статора; R_r – зовнішній радіус ротора; β – кут зміщення ротора відносно положення рівноваги; I_0 – момент інерції ротора відносно його осі;

$$I_0 = \frac{1}{2} m \cdot (R_r^2 - R_{ri}^2) \quad (11)$$

m – маса ротора; R_{ri} – внутрішній радіус ротора; Ω – кутова швидкість.

Кут зміщення ротора відносно положення рівноваги змінюється в межах $(-\rho; \rho)$, т.к. ротор може викинутися з потенціальної ями [11] при більш швидкому русі і опереженні магнітного поля під впливом центробіжних сил – срыв ротора.

Кутову швидкість визначаємо як швидкість чистого обертання навколо миттєвої осі, що збігається з лінією дотику циліндрів. Розкриваючи всі змінні і підставляючи їх в рівняння (9), отримуємо наступне вираження для кінетичної енергії ротора:

$$T = \frac{m}{2} \dot{\beta}^2 (R_s - R_r)^2 \cdot \left[2 - \frac{R_{ri}^2}{R_r^2} \right]$$

Отримавши вираження для потенціальної і кінетичної енергії, можна розв'язати рівняння Лагранжа і отримати власну частоту коливань ротора в зоні локального мінімуму потенціальної ями.

Для визначення частоти коливань ротора необхідно скласти диференціальні рівняння руху механічної системи, які можна вивести з функції Лагранжа. В найпростішому випадку консервативної системи вона дорівнює різниці між кінетичною T і потенціальною W енергіями:

$$L = T - W \quad (10)$$

В загальному випадку рівняння Лагранжа має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \quad (11)$$

Визначаючи його члени і розв'язуючи рівняння Лагранжа можна отримати рівняння вільних коливань ротора і його власну частоту лінійних коливань:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{2 \cdot w_0 \cdot l \cdot R_s}{m \cdot (R_s - R_r) \left(2 - \frac{R_{ri}^2}{R_r^2} \right)}} \quad (12)$$

Знаючи власну частоту лінійних коливань ротора, можна визначити його резонансну частоту. Для цього необхідно знати коефіцієнт затухання коливань ротора, який в загальному випадку залежить від коефіцієнта тертя і форми розподілу магнітного поля статора.

ВИСНОВКИ. Отримані вираження демонструють залежність значення магнітної енергії в повітряному зазорі від геометричних розмірів магнітної системи ДКР і електромагнітних навантажень, які визначають значення густоти магнітної енергії в повітряному зазорі. Отримане рівняння (9) описує зміну магнітної енергії при різних кутах переміщення результуючої СОМП і коливань ротора відносно точки рівноваги. При подальшому його інтегруванні відносно $\sigma_0 = 0$ можна отримати графік розподілу потенціальної енергії – потенціальну криву. Форму потенціальної кривої задає розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі двигача, який має максимум в точці контакту статора і ротора. В цій точці знаходиться точка локального мінімуму потенціальної енергії ротора. Визначивши власну частоту коливань ротора, можна розрахувати резонансну частоту і комутувати котушки обмотки статора з частотою, необхідною для плавного руху ротора при дискретному імпульсному живленні.

ЛИТЕРАТУРА

- Schön, R. (1961) "Elektrische Walzmaschinen", *Elektrotech und Maschinenbau*, no. 78, pp. 257–266.
- Борзяк Ю.Г., Зайков М.А., Наний В.П. Електродвигачи з катящимся ротором. – К.: Техніка, 1982. – 120 с.
- Бертинов А.И., Варлей В.В. Электрические машины с катящимся ротором. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
- Viviani, A. (1980) "Experimental and theoretical study of hypocycloidal motors with two-harmonic field windings", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 99, no. 1, pp. 292–300.
- Kaminski, G. and Wrotek, H. (2001) "Magnetic circuit analysis of switched reluctance motor with rolling rotor", *Archives Electr. Eng.*, vol. L, no. 4, pp. 339–350.
- Aschen, R.A. and Bolton, H.R. (1981) "Aspects of the hypocycloidal reluctance motor", *IEE Proceedings*, Vol.128, Pt.B, iss. 6, pp. 313–322.
- Reinert, J. Enslin, J.H.R. and Smith, E.D. (1993) Digital control and optimization of a rolling rotor switched reluctance machine, *IEEE Transactions*, vol. 1, pp. 130–136.
- Кикавский А.В. Шаговые двигатели: принцип действия и отличия от двигателей постоянного тока

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electromotor.com.ua/katalog-tovarov/stati/134-shag>.

9. Arkkio, A., Biernat, A., Bucki, B., Kaminski, G., Niemenmaa, A., Smak, A. and Staszewski, P. (2010) Finite-Element Analysis for a Rolling-Rotor Electrical Machine, *IEEE Transactions*, Vol. 46, iss. 8, pp. 2727–2730.

10. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 463 с.

11. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Механика. – М.: Наука, 1973. – 208 с.

ROTOR MOTION IN THE ROLLING-ROTOR ELECTRICAL MACHINE

V. Naniy, V. Lykah, A. Masliennikov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

vul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: v.naniy@mail.ru; lykahva@yahoo.com; x-maslennikov@yandex.ua

Rotor motion in a stator round circle within the rolling rotor electrical motor is a complex process which depends on a number of factors. Rotor motion is performed subject to a lateral magnetic adhesion which can be gained in various ways. Mechanical interaction between the rotor and the stator is a necessary condition for operation of this electrical motor. Rotor motion in a stator magnetic field depends on induction density distribution in a stator-to-rotor gap. Rotor movement in a stator round circle corresponds to magnetic field movement. In the paper a rotor motion process at discretely moving magnetic field of the stator is observed; and expression to define own oscillation frequency of the rotor is obtained.

Key words: rotor, energy, magnetic field, electrical motor.

REFERENCES

1. Schön, R. (1961), “Elektrische Walzmaschinen,, *Elektrotech und Maschinenbau*, no. 78, pp. 257–266.

2. Borziak, Yu.G., Zaykov, M.A., Naniy, V.P. (1982), *Elektricheskie mashiny s ktyaschimsya rotorom* [A rolling-rotor electrical machines], Tehnika, Kyiv, USSR.

3. Bertinov, A.I., Varlei, V.V. (1969), *Elektricheskie mashiny s ktyaschimsya rotorom* [A rolling-rotor electrical machines], Energiya, Moscow, USSR.

4. Viviani, A. (1980), “Experimental and theoretical study of hypocycloidal motors with two-harmonic field windings”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 99, no. 1, pp. 292–300.

5. Kaminski, G. and Wrotek, H. (2001), “Magnetic circuit analysis of switched reluctance motor with rolling rotor”, *Archives Electr. Eng.*, vol. L, no. 4, pp. 339–350.

6. Aschen, R.A. and Bolton, H.R. (1981), “Aspects of the hypocycloidal reluctance motor”, *IEE Proceedings*, vol. 128, Pt.B, iss. 6, pp. 313–322.

7. Reinert, J. Enslin, J.H.R. and Smith, E.D. (1993), “Digital control and optimization of a rolling rotor switched reluctance machine”, *IEEE Transactions*, vol. 1, pp. 130–136.

8. Kikavskii, A.V. (2010), Stepping motors: principle of operation and differences from DC motors, available at: <http://www.electromotor.com.ua/katalog-tovarov/stati/134-shag> (accessed March, 2010).

9. Arkkio, A., Biernat, A., Bucki, B., Kaminski, G., Niemenmaa, A., Smak, A. and Staszewski, P. (2010), “Finite-Element Analysis for a Rolling-Rotor Electrical Machine”, *IEEE Transactions*, vol. 46, iss. 8, pp. 2727–2730.

10. Govorkov, V.A. (1960), *Elektricheskie i magnitnye polya* [Electric and magnetic fields]. Moscow–Leningrad, State Energy Publishing, USSR.

11. Landau, L.D. (1973), *Teoreticheskaya physica* [Theoretical physics], Nauka, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 29.05.2014.