

УДК 621.313.10.013-251

ББК 3291.53

А.А. АФАНАСЬЕВ, В.С. ГЕНИН, Н.Н. ИВАНОВА

ВЛИЯНИЕ НЕСООСНОСТИ РОТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: вентильный двигатель, магнитное поле, магнитная индукция, ротор, пульсации, электромагнитный момент.

Представлена математическая модель магнитного поля в рабочем зазоре магнитоэлектрического вентильного двигателя при несоосности ротора относительно оси статора, возникающей при изготовлении, например, из-за дефектов подшипниковых щитов или в процессе эксплуатации вследствие износа подшипников. С помощью конформного преобразования неравномерного воздушного зазора в равномерный (круговое кольцо) проведено исследование магнитного поля в воздушном зазоре двигателя. Рассмотрен случай, когда участок воздушного зазора с минимальным размером неподвижен и связан с конкретным местом поверхности расточки статора. Зубчатость статора учитывалась в среднем с помощью коэффициента Картера. Магнитное поле в неоднородном воздушном зазоре, создаваемое магнитами ротора и током обмотки статора, принималось плоскопараллельным, имеющим двумерный характер.

Получено, что несоосность ротора, связанная с вращательным движением участка воздушного зазора с минимальным размером, приводит к появлению несинусоидальности ЭДС и пульсаций электромагнитного момента с частотой, превышающей в $3r$ раз частоту вращения ротора (r – число пар полюсов). При неподвижном положении участка воздушного зазора с минимальным размером наводится переменная ЭДС вдоль вала ротора, вызывающая переменный ток в контуре: вал – подшипники – подшипниковые щиты – корпус статора.

Пульсации момента электромагнитного момента двигателя вызваны появлением преимущественно 3-й и 9-й гармоник, величины которых с увеличением несоосности растут по закону, близкому к линейному. Постоянная составляющая электромагнитного момента несколько растет с увеличением несоосности.

С развитием силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники все шире применяются вентильные двигатели с постоянными магнитами. Основными преимуществами таких двигателей в сравнении, например, с асинхронными являются:

- более высокая кратковременная перегрузочная способность по моменту, достигающая 10-кратного значения от номинального;
- высокие энергетические показатели ($\cos \varphi = 1$, $\eta = 0,9 \div 0,98$);
- существенно меньшие масса и габариты.

Магнитоэлектрические вентильные двигатели с постоянными магнитами применяются в приводах систем автоматики и робототехники, транспортных средствах. Одним из достаточно распространенных дефектов двигателя является несоосность ротора относительно оси статора, которая может возникнуть при изготовлении, например, из-за дефектов подшипниковых щитов или в процессе эксплуатации из-за износа подшипников. В первом случае участок воздушного зазора с минимальным размером (эксцентриситетом) неподвижен, связан с конкретным местом поверхности расточки статора, во втором – будет вращаться вместе с ротором. Повреждения элементов подшипников наряду

с межвитковыми замыканиями обмотки статора являются одними из наиболее частых видов повреждений.

В [2, 3] с использованием конформного преобразования неравномерного воздушного зазора в плоскости z в равномерный (круговое кольцо) в плоскости t (рис. 1) выполнены расчеты магнитного поля в воздушном зазоре двигателя. При рассмотрении явлений в двигателе, обусловленных несоосностью ротора, приняты следующие допущения:

1) магнитные проницаемости статорного сердечника и ярма ротора равны бесконечности;

2) зубчатость статора учитывается в среднем с помощью коэффициента Картера;

3) магнитное поле в неоднородном воздушном зазоре, создаваемое магнитами ротора и током обмотки статора, плоскопараллельно, имеет двумерный характер.

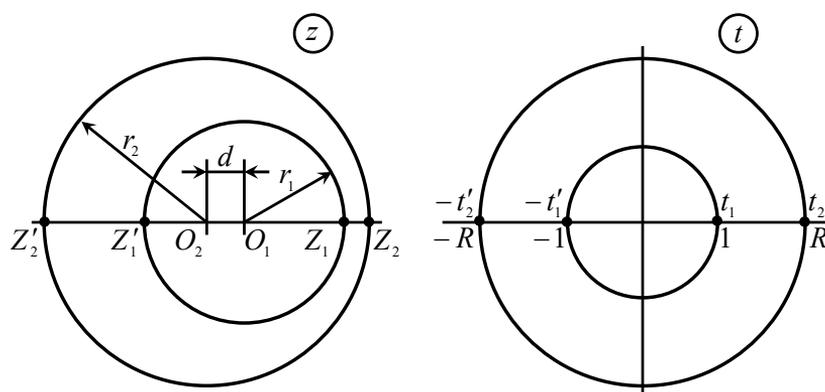


Рис. 1. Конформное преобразование неравномерного воздушного зазора в равномерный

Конформное преобразование производится по формуле

$$t = \frac{(A+1)z - Z_1'A + Z_1}{(A-1)z - (Z_1'A - Z_1)}, \quad (1)$$

где $A = \sqrt{\frac{r_2^2 - (d+r_1)^2}{r_2^2 - (d-r_1)^2}}$; Z_1, Z_1' – диаметральные точки внутренней окружности;

r_1, r_2 – радиусы внутренней и наружной окружностей, соответственно; d – смещение центров окружностей [6].

Радиус внутренней окружности в плоскости t будет равен единице, радиус R наружной окружности будет больше единицы (см. рис. 1):

$$R = \frac{1 + \sqrt{\Delta}}{1 - \sqrt{\Delta}}, \quad (2)$$

где $\Delta = \frac{(r_2 - r_1)^2 - d^2}{(r_2 + r_1)^2 - d^2}$.

Поле в кольцевой области комплексной плоскости t определено как решение первой краевой задачи с известными скалярными магнитными потенциалами $t = f_1(\varphi)$ и $t = f_2(\varphi)$, соответственно, на внутренней (единичного радиуса) и наружной (радиуса R) окружностях. Так как скалярный магнитный потенциал при конформных преобразованиях является величиной инвариантной [7], магнитный потенциал магнитов ротора может быть представлен выражением

$$f_2(\varphi) = \frac{4}{\pi} H_{CB} h_M \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k-1)p\alpha}{2k-1} \sin(2k-1)p\varphi, \quad (3)$$

где H_{CB} , h_M – коэрцитивная сила по индукции и высота магнитов, соответственно; p – число пар полюсов двигателя; α – половина углового расстояния между соседними разнополярными магнитами в радианах.

Расчеты выполнены применительно к серийно выпускаемому АО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) вентильному двигателю 6ДВМ300 А35 (рис. 2) [4]: $D_i = 126$ мм, $l = 150$ мм, $h_M = 7,1$ мм, $H_{CB} = 800$ кА/м, $M = 70$ Нм.

Получены зависимости магнитного скалярного потенциала на внутренней границе кругового кольца плоскости t и радиальной индукции от положения ротора (рис. 3).



Рис. 2. Вентильный двигатель 6ДВМ300

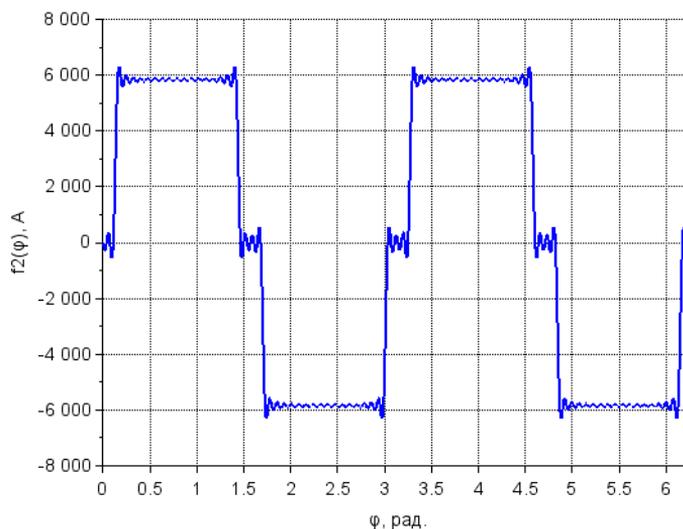


Рис. 3. Скалярный магнитный потенциал внутренней окружности плоскости t

Магнитный потенциал и радиальную индукцию внутри кругового кольца можно определить, используя формулы [7]:

$$u(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[r^{2k-1} B(k) + r^{-(2k-1)} D(k) \right] \sin(2k-1)p\varphi, \quad (4)$$

$$B_r(r, \varphi) = -\mu_0 \sum \left[r^{2k-2} B(k) - r^{-2k} D(k) \right] (2k-1) \sin(2k-1) p \varphi, \quad (5)$$

где $B(k) = -\frac{b(k)}{r^{2(2k-1)} - 1}$, $D(k) = b(k) \frac{r^{2(2k-1)}}{r^{2(2k-1)} - 1}$, $b(k) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_2 \sin[(2k-1)p\varphi] d\varphi$.

Из выражений (2)–(5) могут быть определены значения магнитных индукций на границах кругового кольца. С помощью конформного преобразования (1) устанавливается связь магнитных индукций в комплексных плоскостях z и t [5]:

$$B(z) = B(t) \left| \frac{dt}{dz} \right|, \quad (6)$$

где

$$f(z) = \left| \frac{dt}{dz} \right| = \frac{(A+1)[(A-1)z - (z_1' A - z_1)] - (A-1)[(A+1)z - (z_1' A + z_1)]}{[(A-1)z - (z_1' A - z_1)]^2}. \quad (7)$$

Значения функции на смещённых окружностях радиусов r_1 и r_2 плоскости z показаны на рис. 4.

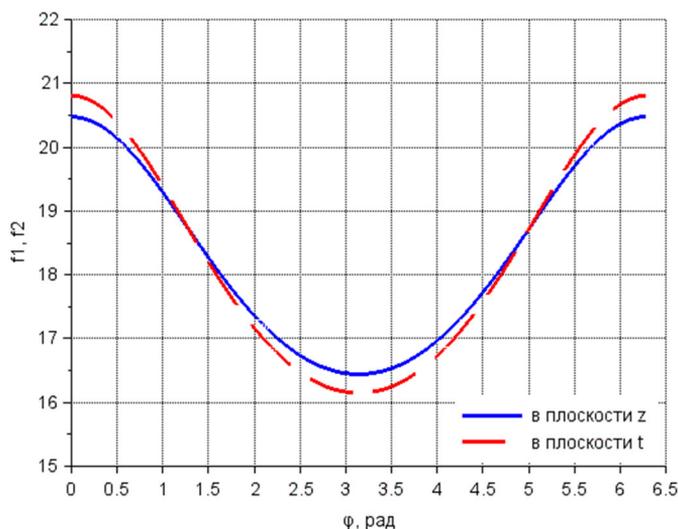


Рис. 4. Функция связи значений магнитных индукций в плоскостях z и t

Радиальные составляющие магнитных индукций на границах воздушного зазора, полученные по (6), (7), показаны на рис. 5.

Из-за смещения внутренней окружности в направлении радиуса с нулевой угловой координатой (см. рис. 1) при значениях, близких к $\varphi = 0, 2\pi$, получаются наибольшие значения максимумов индукции. Осцилляции индукции на графике объясняются использованием ограниченного числа слагаемых бесконечного ряда.

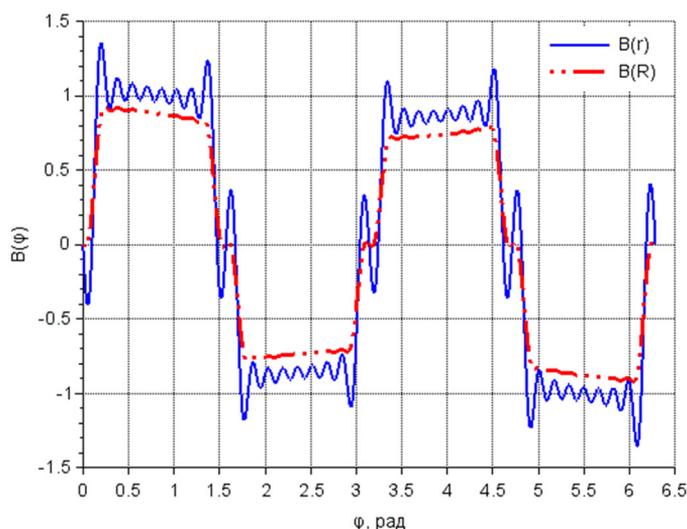


Рис. 5. Магнитная индукция на границах воздушного зазора в плоскости z

Затем определяются амплитудные значения индуктивностей взаимной индукции $L_{Af\nu}$ магнитов ротора с фазой A обмотки статора с учетом того, что минимум воздушного зазора вращается вместе с ротором:

$$L_{Af\nu} = \frac{4}{\pi^2} \frac{wk_w(\nu)\tau l}{H_{cB}h_m} \int_0^{2\pi} B(r_2 e^{j\phi}) \sin \phi d\phi, \quad (8)$$

с помощью которых можно найти потокосцепление $\psi_A(\phi)$ и ЭДС холостого хода $e_{A0}(\phi)$ этой фазы

$$\psi_A(\phi) = H_{cB}h_m \sum_{\nu=1}^{\infty} L_{Af\nu} \sin \nu\phi, \quad (9)$$

$$e_{A0}(\phi) = -\frac{d\psi_A(\phi)}{dt} = \frac{1}{2} \omega H_{cB}h_m \sum_{\nu=1}^{\infty} L_{Af\nu} \cos \nu\phi, \quad (10)$$

где $\omega = 2 \frac{d\phi}{dt}$ – электрическая угловая частота рассматриваемого четырёхполюсного двигателя.

На рис. 6 показана рассчитанная по формуле (10) обусловленная магнитами ротора ЭДС холостого хода.

Полагаем, что вентиляльный двигатель с постоянными магнитами имеет в обмотке статора практически синусоидальные ток и напряжение, фазные углы которых техническими средствами могут быть привязаны к угловому положению ротора. Электромагнитный момент двигателя определяем, используя равенство (7) и предполагая, что фазные токи находятся в противофазе с ЭДС холостого хода:

$$M(\phi) = \frac{1}{2} \frac{P}{\omega} [e_{A0}(\phi)i_A(\phi) + e_{A0}(\phi - 2\pi/3)i_A(\phi - 2\pi/3) + e_{A0}(\phi - 4\pi/3)i_A(\phi - 4\pi/3)], \quad (11)$$

где $i_A(\phi) = I_m \cos p\phi$.

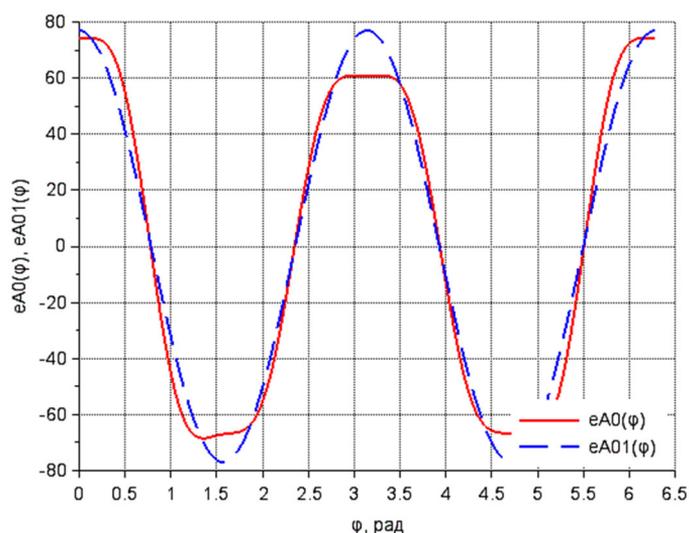


Рис. 6. ЭДС холостого хода фазы A (результатирующая e_{A0} и основной гармоники e_{A01}), обусловленная магнитами ротора

График электромагнитного момента в функции угла поворота, построенный по (11), при значениях несоосности ротора относительно поверхности статора от 0 до 1,2 мм показан на рис. 7. Видно, что при несоосности ротора появляется переменная составляющая электромагнитного момента, основная гармоника которой в $3p$ раз выше частоты вращения ротора (p – число пар полюсов), т.е. имеет частоту, в шесть раз превышающую частоту тока статора.

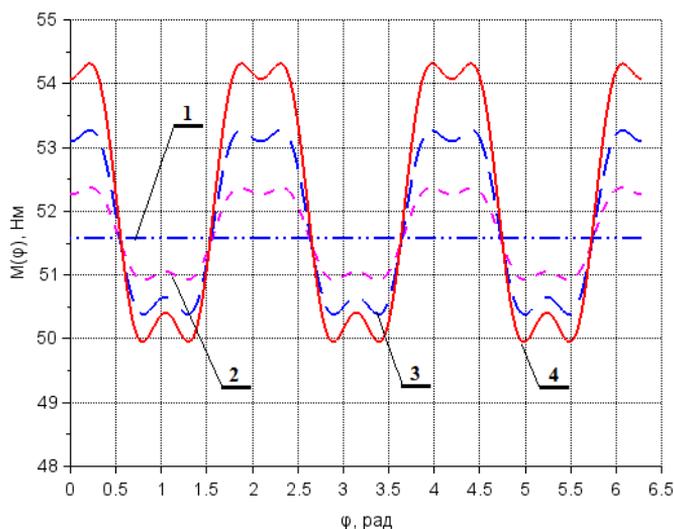


Рис. 7. Электромагнитный момент при номинальном токе статора в функции углового положения ротора φ при различных значениях несоосности:
1 – $d = 0$ мм; 2 – $d = 0,4$ мм; 3 – $d = 0,8$ мм; 4 – $d = 1,2$ мм

Величина пульсаций электромагнитного момента с ростом величины несоосности, очевидно, увеличивается. Для рассматриваемого вентиляционного двигателя 6ДВМ300 амплитуда пульсаций при величине несоосности, например, 1 мм при номинальном токе может достигать $\approx 7\%$ от номинального момента. Из анализа гармоник электромагнитного момента двигателя при смещении оси ротора относительно оси статора можно увидеть, что пульсации момента вызваны появлением преимущественно 3-й и 9-й гармоник, величины которых с увеличением несоосности растут по закону, близкому к линейному. Амплитудный спектр пульсаций электромагнитного момента двигателя при смещении оси вращения ротора относительно оси статора на 1 мм показан на рис. 8.

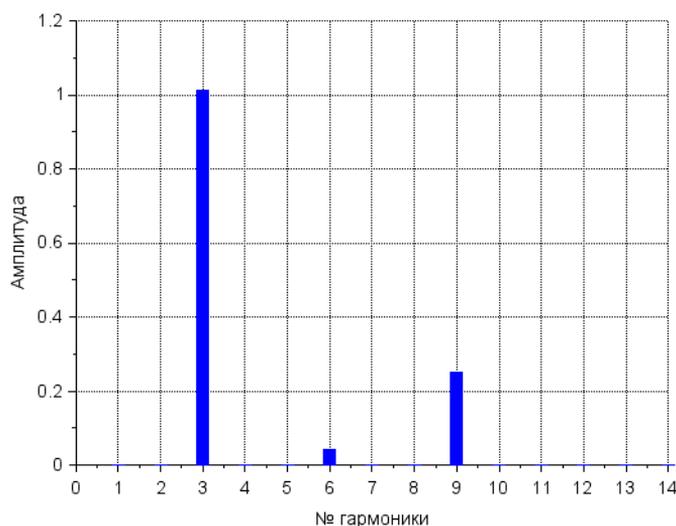


Рис. 8. Амплитудный спектр пульсаций

На рис. 9 показана зависимость постоянной составляющей электромагнитного момента от величины несоосности. Постоянная составляющая электромагнитного момента двигателя несколько растёт с увеличением несоосности. Это может быть объяснено уменьшением минимального воздушного зазора при смещении оси вращения ротора к поверхности статора.

В случае, если участок воздушного зазора с минимальным размером ротора неподвижен относительно поверхности статора, симметричное магнитное поле в круговом кольце плоскости t будет вращаться, а функция $f(z) = \frac{dt}{dz}$, связывающая значения индукции в плоскостях t и z , остаётся неподвижной. В результате магнитное поле в полюсах (магнитах) и ярме ротора начнёт пульсировать, причем суммарный переменный магнитный поток, замыкающийся вокруг вала ротора, будет отличен от нуля. В этом случае, как известно, вдоль вала наводятся ЭДС и протекает переменный ток, замыкающийся через подшипники, подшипниковые щиты и корпус статора [1]. В результате может наблюдаться нагрев подшипников, сопровождающийся электрохимической эрозией.

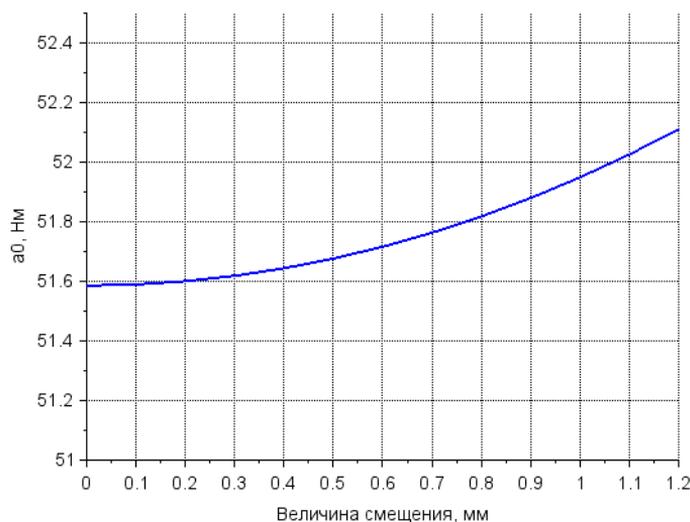


Рис. 9. Зависимость постоянной составляющей электромагнитного момента двигателя от величины несоосности

Выводы. 1. Несоосность ротора, связанная с вращательным движением участка воздушного зазора с минимальным размером, вызывает несинусоидальность ЭДС холостого хода и пульсации электромагнитного момента с частотой, превышающей в $3r$ раз частоту вращения ротора.

2. Пульсации электромагнитного момента двигателя вызваны появлением преимущественно 3-й и 9-й гармоник, величины которых с увеличением несоосности растут по закону, близкому к линейному. Постоянная составляющая электромагнитного момента несколько растет с увеличением несоосности.

3. При неподвижном положении участка воздушного зазора с минимальным размером наводится переменная ЭДС вдоль вала ротора, вызывающая переменный ток в контуре: вал – подшипники – подшипниковые щиты – корпус статора.

Литература

1. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. Л.: Энергия, 1967. 344 с.
2. Афанасьев А.А. Аналитический расчёт магнитного поля синхронной машины с неравномерным воздушным зазором // Электротехника. 2022. № 7. С. 41–45.
3. Афанасьев А.А. Математическое моделирование электромеханических систем. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. 274 с.
4. Двигатели вентильные серии бДВМ. Основные технические характеристики [Электронный ресурс], <https://www.cheaz.ru/assets/images/production/10-ensber/1-electrodvig/2-6-dvm/6dvm.pdf>.
5. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В. Применение конформного преобразования в электромашинных расчетах электрических машин. Аналитические методы. М.: МЭИ, 1980. 85 с.
6. Коппенфельс В., Штальман Ф. Практика конформных отображений: пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 407 с.
7. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001. 576 с.

АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

ГЕНИН ВАЛЕРИЙ СЕМЕНОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (v.s.genin@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-0906>).

ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (niva_mail@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7130-8588>).

Aleksandr A. AFANASYEV, Valeriy S. GENIN, Nadezhda N. IVANOVA

EFFECT OF ROTOR MISALIGNMENT ON MAGNETOELECTRIC VALVE MOTOR PERFORMANCE

Key words: valve motor, magnetic field, magnetic induction, rotor, pulsation, electromagnetic moment.

A mathematical model of the magnetic field in the working clearance of a magnetolectric valve motor is presented when the rotor is misaligned relative to the stator axis, which occurs during manufacture, for example, due to defects in bearing panels or during operation due to bearing wear. Using the conformal transformation of an uneven air gap into a uniform (circular ring), a study of the magnetic field in the air gap of the engine was carried out. A case is considered when the section of the air gap with the minimum size is stationary and is associated with a specific place on the surface of the stator boring. The serrature of the stator was taken into account on average using the Carter coefficient. The magnetic field in the inhomogeneous air gap created by the rotor magnets and the current of the stator winding was assumed to be plane-parallel, having a two-dimensional character.

It is obtained that the misalignment of the rotor associated with the rotational motion of the air gap section with a minimum size leads to the appearance of non-sinusoidal EMF and pulsations of electromagnetic moment with a frequency exceeding $3p$ times the rotational speed of the rotor (p is the number of pairs of poles). With fixed eccentricity, an alternating EMF is induced along the rotor shaft, causing alternating current in the circuit: shaft – bearings – bearing panels – stator housing.

Pulsations of the moment of the electromagnetic moment of the engine are caused by the appearance of mainly the 3rd and 9th harmonics, the values of which increase with increasing misalignment according to a law close to linear. The constant component of the electromagnetic moment increases somewhat with increasing misalignment.

References

1. Alekseeva M.M. *Mashinnye generatory povyshennoi chastoty* [High Frequency Machine Generators]. Leningrad, Energiya Publ., 1967, 344 p.
2. Afanasyev A.A. Analytical Calculation of the Magnetic Field of a Synchronous Machine with an Uneven Air Gap. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 7, pp. 467–471.
3. Afanas'ev A.A. *Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem* [Mathematical Modeling of Electromechanical Systems]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2020, 274 p.
4. *Dvigateli ventil'nye serii 6DVM. Osnovnye tekhnicheskie kharakteristiki* [Valve motors series 6DVM. Main technical characteristics]. Available at: <https://www.cheaz.ru/assets/images/production/10-ensber/1-electrodvig/2-6-dvm/6dvm.pdf>.
5. Ivanov-Smolenskii A.V., Abramkin Yu.V. *Primenenie konformnogo preobrazovaniya v elektromashinnykh raschetakh elektricheskikh mashin. Analiticheskie metody* [Application of conformal transformation in electric machine calculations of electrical machines. Analytical methods]. Moscow, MEI Publ., 1980, 85 p.

6. Koppenfels W., Stallman F. Praxis der Konformen Abbildung. Berlin u. a., Springer, 1959 (Russ. ed.: *Praktika konformnykh otobrazhenii*. Moscow, 1963, 407 p.).

7. Polyaniin A.D. *Spravochnik po lineinym uravneniyam matematicheskoi fiziki* [Handbook of Linear Equations of Mathematical Physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 576 p.

ALEKSANDR A. AFANASYEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).

VALERIY S. GENIN – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (v.s.genin@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-0906>).

NADEZHDA N. IVANOVA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (niva_mail@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7130-8588>).

Формат цитирования: *Афанасьев А.А., Генин В.С., Иванова Н.Н.* Влияние несоосности ротора на характеристики магнитоэлектрического вентильного двигателя // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 35–44. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-35-44.