

ДВУХРОТОРНАЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ И ЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Филоменко А.А.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: filomenko86@mail.ru

Рассмотрены способ снижения вибровоздействия на руку оператора привода возвратно-вращательного движения и система двух управляемых диаметрально намагниченных роторов, которые осуществляют возвратно-вращательное движение в разных направлениях. Получена математическая модель системы двух намагниченных роторов на основе фундаментального интегрального принципа Гамильтона. Билл. 4.

Ключевые слова: постоянный магнит, бесконтактный двигатель магнитоэлектрического типа, математическая модель.

Постановка задачи. Существует класс приборов, для которых необходимо реализовывать возвратно-вращательное движения рабочего органа. Это, например, специальный шлифовальный и полировочный инструмент, медицинские приборы и средства аппаратной косметологии. Принцип работы привода возвратно-вращательного движения описан в [1]. Особенность работы таких приборов состоит в негативном вибровоздействии на руку оператора при работе с ними. Это вибровоздействие возникает в результате действия реактивного знакопеременного момента, приложенного к статору привода. Уменьшить вибровоздействие можно разными способами, например, путем нанесения вибропоглощающего покрытия на корпус, однако, такая мера решает проблему лишь частично, и не всегда приводит к желаемому результату. В статье рассматривается иной способ устранения негативного действия вибрации, суть которого состоит в активном подавлении колебаний путем введения в магнитоэлектрическую систему второго ротора, который колеблется синхронно, но противофазно с первым. Такая мера позволяет улучшить не только эргономические характеристики ручного инструмента, но и функциональные возможности прибора благодаря размещению на валу второго ротора (дополнительного рабочего органа).

Целью статьи является создание математической модели системы, которая учитывает ее конструктивные особенности и описывает электромеханические процессы в системе.

Математическая модель. Для построения математической модели динамического состояния такой двухроторной системы воспользуемся фундаментальным интегральным принципом Гамильтона [3]. Расположим в неподвижной прямоугольной системе координат $X_0Y_0Z_0$ (рис. 1) обмотку управления (ОУ) и обмотки, обеспечивающие упругое взаимодействие с первым (ОП1) и вторым (ОП2) роторами, т.е. эффект магнитной пружины.

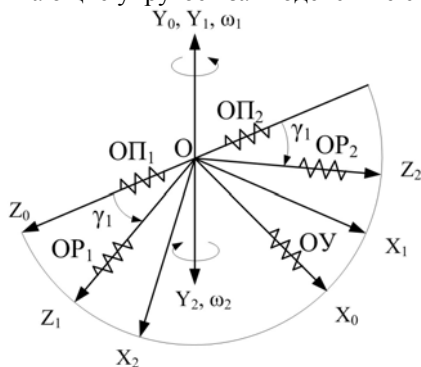


Рис. 1

Обмотки возбуждения первого ротора (ОП1) и второго ротора (ОП2) свяжем с подвижными системами координат $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$, которые развернуты в некоторый момент времени относительно неподвижной системы координат вокруг осей OY_1 и OY_2 в противоположные стороны на углы γ_1 и γ_2 .

В качестве обобщенных независимых координат системы выберем углы поворота роторов γ_1 и γ_2 и электрические заряды в обмотках, а обобщенными скоростями – угловые скорости роторов ω_1 и ω_2 , а также токи в обмотках, представляющие собой скорости изменения зарядов во времени: i_X – ток обмотки управления; i_{P1} , i_{P2} – токи обмоток первого и второго роторов; i_{Z1} , i_{Z2} – токи в обмотках электромагнитных пружин.

Моменты инерции роторов относительно трех взаимно ортогональных осей обозначим J_{X1} , J_{Y1} , J_{Z1} , J_{X2} , J_{Y2} , J_{Z2} . Очевидно, что запасание механической кинетической энергии происходит только во вращающихся роторах, причем оси вращения первого и второго роторов всегда остаются нормальными плоскости X_0OZ_0 благодаря одноосной системе установки роторов в подшипниковых опорах. Это означает, что проекции угловых скоростей роторов на все другие оси координат будут равны нулю: $\omega_{X1}=\omega_{X2}=0$, $\omega_{Y1}=\omega_1$, $\omega_{Y2}=\omega_2$, $\omega_{Z1}=\omega_{Z2}=0$. Выражение для кинетической энергии примет вид

$$T = 1/2(J_{Y1} \cdot \omega_1^2 - J_{Y2} \cdot \omega_2^2).$$

Для записи выражения энергии электромагнитного поля необходимо определить взаимные индуктивности обмоток [4], которые изменяются при изменении положения роторов. В соответствии с рис. 1 запишем

$$\begin{aligned} M_{P1X} &= M_{XP1} = M_{X1} \cdot \sin \gamma_1; & M_{P1Z1} &= M_{Z1P1} = M_{Z1} \cdot \cos \gamma_1; \\ M_{P2X} &= M_{XP2} = -M_{X2} \cdot \sin \gamma_2; & M_{P2Z2} &= M_{Z2P2} = M_{Z2} \cdot \cos \gamma_2; \\ M_{P1P2} &= M_{P2P1} = M_p \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2), \end{aligned}$$

где $M_{X1}, M_{X2}, M_{Z1}, M_{Z2}$, – взаимные индуктивности роторных обмоток с соответствующими обмотками статора при соосном их расположении, M_P – взаимная индуктивность обмоток первого и второго ротора.

С учетом изложенного выражение для энергии электромагнитного поля примет вид

$$W = \frac{1}{2}(L_X \cdot i_X^2 + L_{Z1} \cdot i_{Z1}^2 + L_{Z2} \cdot i_{Z2}^2 + L_{P1} \cdot i_{P1}^2 + L_{P2} \cdot i_{P2}^2 + 2M_{X1} \cdot \sin \gamma_1 \cdot i_X \cdot i_{P1} - 2M_{X2} \cdot \sin \gamma_2 \cdot i_X \cdot i_{P2} + 2M_{Z1} \cdot \cos \gamma_1 \cdot i_{Z1} \cdot i_{P1} + 2M_{Z2} \cdot \cos \gamma_2 \cdot i_{Z2} \cdot i_{P2} + M_P \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot i_{P1} \cdot i_{P2}).$$

Тогда полное выражение для силовой функции Лагранжа будет таким

$$L = T + W = \frac{1}{2}(J_{\gamma_1} \cdot \dot{\gamma}_1^2 - J_{\gamma_2} \cdot \dot{\gamma}_2^2 + L_X \cdot i_X^2 + L_{Z1} \cdot i_{Z1}^2 + L_{Z2} \cdot i_{Z2}^2 + L_{P1} \cdot i_{P1}^2 + L_{P2} \cdot i_{P2}^2 + 2M_{X1} \cdot \sin \gamma_1 \cdot i_X \cdot i_{P1} - 2M_{X2} \cdot \sin \gamma_2 \cdot i_X \cdot i_{P2} + 2M_{Z1} \cdot \cos \gamma_1 \cdot i_{Z1} \cdot i_{P1} + 2M_{Z2} \cdot \cos \gamma_2 \cdot i_{Z2} \cdot i_{P2} + M_P \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot i_{P1} \cdot i_{P2}). \quad (1)$$

Для учета сил рассеяния в двигателе воспользуемся диссипативной функцией Релея, которая представляет собой сумму рассеяния энергии, подводимой к механической $F_M = 1/2 \sum (\dot{\gamma}_i \cdot \nu_{Yi})$, где ν_{Yi} – коэффициент вязкого трения, возникающий при движении ротора вокруг оси OY_i , и рассеяния в электрической F_E части системы, которое происходит на активных сопротивлениях обмоток

$$F = F_M + F_E = \frac{1}{2}(\dot{\gamma}_1 \nu_{Y1} + \dot{\gamma}_2 \nu_{Y2}) + \frac{1}{2}(i_X^2 R_{OY} + i_{Z1}^2 R_{OП1} + i_{Z2}^2 R_{OП2} + i_{P1}^2 R_{P1} + i_{P2}^2 R_{P2}). \quad (2)$$

Для построения модели динамического состояния электромеханической системы необходимо выполнить операции дифференцирования силовой функции Лагранжа (1) и диссипативной функции Релея (2) по выбранным обобщенным координатам (γ_1, γ_2), скоростям ($\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, i_X, i_{Z1}, i_{Z2}, i_{P1}, i_{P2}$) и времени, и подставить результаты в уравнение Эйлера-Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} = Q_k. \quad (3)$$

Подставляя результаты дифференцирования в (3), записав в правых частях уравнений внешние обобщенные силы, которые соответствуют обобщенным координатам и скоростям каждого из уравнений, получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений динамического состояния беспазовой электромеханической системы с двумя магнитными роторами возвратно-вращательного движения.

Для перехода к модели состояния двигателя с магнитным возбуждением потока представим постоянные магниты ротора в виде токовых слоев с поверхностными токами I_{P1} и I_{P2} [2], выразив взаимную энергию магнитов ротора и обмотки управления через их взаимную проводимость. Введем следующие обозначения:

$$i_{P1} \cdot M_{X1} = I_{P10} \cdot w_{OY} \cdot w_{P1} \cdot G_{XP1} = \Psi_{X1}; \quad i_{P2} \cdot M_{X2} = I_{P20} \cdot w_{OY} \cdot w_{P2} \cdot G_{XP2} = \Psi_{X2};$$

$$i_{P1} \cdot M_P = I_{P10} \cdot w_{P2} \cdot w_{P1} \cdot G_{P1P2} = \Psi_{P1}; \quad i_{P2} \cdot M_{P2} = I_{P20} \cdot w_{P1} \cdot w_{P2} \cdot G_{P1P2} = \Psi_{P2};$$

$$i_{P1} \cdot M_{Z1} = I_{P10} \cdot w_{P1} \cdot w_{OП1} \cdot G_{ZP1} = \Psi_{Z1}; \quad i_{P2} \cdot M_{Z2} = I_{P20} \cdot w_{OП2} \cdot w_{P2} \cdot G_{ZP2} = \Psi_{Z2}.$$

Здесь $G_{XP1}, G_{XP2}, G_{P1P2}, G_{ZP1}, G_{ZP2}$ – взаимные проводимости магнитов ротора и обмоток, $w_{OY}, w_{P1}, w_{P2}, w_{OП1}, w_{OП2}$ – число витков обмоток, в частности $w_{P1} = w_{P2} = 1$, I_{P10}, I_{P20} – поверхностные токи магнитов роторов при обесточенной обмотке управления.

Для записи уравнений динамического состояния рассматриваемой системы учтем следующие обстоятельства: постоянный магнит ротора для поддержания своего состояния не потребляет электроэнергию, т.е. $U_P = 0$; поверхностный ток магнита ротора постоянен во времени, поэтому все члены при dI_P/dt обращаются в 0; поле обмоток не оказывает влияния на состояние постоянного магнита и не может возбудить в нем никаких ЭДС, поэтому уравнения электрического равновесия для роторов не имеют физического смысла; учитывая малые величины углов отклонения роторов, можем считать, что $\sin \gamma = \gamma$; $\cos \gamma = 1$.

В результате уравнения динамического состояния системы получаем в виде

$$J_{\gamma_1} \cdot \ddot{\gamma}_1 - \Psi_{X1} \cdot i_X + \Psi_{P1} \cdot i_{P2} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) + \Psi_{Z1} \cdot i_{Z1} \cdot \gamma_1 + \dot{\gamma}_1 \cdot \nu_{Y1} = m_{Y1}; \quad (4)$$

$$-J_{\gamma_2} \cdot \ddot{\gamma}_2 + \Psi_{X2} \cdot i_X - \Psi_{P2} \cdot i_{P1} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) - \Psi_{Z2} \cdot i_{Z2} \cdot \gamma_2 + \dot{\gamma}_2 \cdot \nu_{Y2} = m_{Y2}; \quad (5)$$

$$L_X \cdot \frac{di_X}{dt} + \Psi_{X1} \cdot \dot{\gamma}_1 - \Psi_{X2} \cdot \dot{\gamma}_2 + i_X \cdot R_X = U_X; \quad (6)$$

$$-\Psi_{Z1} \cdot \dot{\gamma}_1 \cdot \gamma_1 + i_{Z1} \cdot R_{Z1} = U_{Z1}; \quad -\Psi_{Z2} \cdot \dot{\gamma}_2 \cdot \gamma_2 + i_{Z2} \cdot R_{Z2} = U_{Z2}. \quad (7,8)$$

Для реализации возвратно-вращательного движения роторов в противоположных направлениях в обмотке управления должен быть возбужден переменный ток, изменяющийся по периодическому закону [1]. В полученной математической модели учтены силы упругих связей между роторами и обмотками, создающими постоянные по направлению и величине магнитные потоки (четвертые члены в первых двух уравнениях), а также между двумя роторами (третьи члены в тех же уравнениях). Сила упругой связи между роторами имеет место из-за сцепляющихся друг с другом потоков рассеяния в их торцевых частях. Условием компенсации реактивного момента привода, действующего на статор и руку оператора во время его работы, является равенство нулю суммы моментов, действующих на первый и второй роторы со стороны статора

$$-\Psi_{X1} \cdot i_X + \Psi_{Z1} \cdot i_{Z1} \cdot \gamma_1 + \Psi_{X2} \cdot i_X - \Psi_{Z2} \cdot i_{Z2} \cdot \gamma_2 = 0. \quad (9)$$

Если предположить полную идентичность постоянных магнитов роторов и магнитных пружин, а также равенство потокоцеплений обмотки управления с обоими роторами, то и компенсация реактивных моментов будет абсолютной.

Рассмотрим некоторые структуры двухроторной системы с возможностью компенсации вибровоздействия:

- 1) система содержит два намагниченных ротора и две обмотки управления, а также две обмотки статора, создающие упругие связи, то возможно независимо изменять и силы упругих связей, и моменты, отклоняющие роторы путем регулирования токов во всех четырех обмотках;
- 2) построение системы предполагает раздельное управление роторами, а создание упругих связей с помощью постоянных магнитов статора предполагает регулирование лишь токов в обмотках управления;
- 3) использование единственной обмотки для отклонения обоих роторов – компоновка системы больше всего отвечает требованиям минимизации габаритов и электропотребления системы, однако минимизация реактивного момента будет возможна только за счет изменения взаимных потокоцеплений между роторами и обмоткой путем изменения их взаимного положения вдоль оси вращения роторов.

При значительном различии параметров магнитов роторов и магнитов пружин полная компенсация реактивного момента может вообще не быть достигнута, поэтому третий вариант построения привода зависит от отбора магнитных комплектов по принципу равенства создаваемых ими магнитных потоков.

Выводы. Разработана математическая модель магнитоэлектрического двигателя возвратно-вращательного движения с двумя магнитными роторами. Из полученной модели динамического состояния системы определено условие полной компенсации реактивного момента и показаны принципы его регулирования для некоторых случаев компоновки системы. Рассмотренная двухроторная магнитоэлектрическая система принципиально позволяет компенсировать знакопеременные моменты реакции статора.

1. Антонов А.Е., Петухов И.С., Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения с упругой связью ротора // Технічна електродинаміка. – 2013. – №1. – С. 49 – 55.

2. Барабанов В.А. Основные модели постоянного магнита в электромеханических системах / Препринт АН УССР. Ин-т электродинамики, № 222. – Киев, 1980. – 50 с.

3. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Ч.2. Динамика системы материальных точек. – М.–Л.: Главная редакция технико-теоретической литературы, 1937. – С. 41–60.

4. Seely S. Electromechanical energy conversion. – : MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1962.

УДК 621.313.8

ДВОРОТОРНА МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА ЗВОРОТНО-ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТА ЇЇ МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Філоменко А.А.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: filomenko86@mail.ru

Запропоновано спосіб зниження дії вібрації на руку оператора приводу зворотно-обертального руху. Розглянуто систему двох керованих діаметрально намагнічених роторів, які здійснюють зворотно-обертальний рух у різних напрямках. Отримано математичну модель системи двох намагнічених роторів на основі фундаментального інтегрального принципу Гамільтона. Бібл. 4.

Ключові слова: постійний магніт, безконтактний двигун магнитоелектричного типу, математична модель.

MATHEMATICAL MODEL OF DOUBLE-ROTOR MAGNETOELECTRIC SYSTEM SWINGING MOVEMENT

Filomenko A.A.

Institute of Elektrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraina.

e-mail: filomenko86@mail.ru

We propose a method for reducing vibration exposure to the operator's hand drive reciprocating rotary motion. We consider a system of two diametrically magnetized driven rotors that perform reciprocating rotary motion in different directions. The mathematical model of a system of two magnetized rotors based on the fundamental principle of integral Hamilton. References 4.

Key words: permanent magnet, magneto magnetoelectric motor type, the mathematical model.

1. Antonov A.Ye., Petukhov I.S., Filomenko A.A. Magnetolectric motor reciprocating rotary motion with elastic coupling rotor // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 1. – Pp. 49 – 55. (Rus)

2. Barabanov V.A. The basic model of the permanent magnet electro-mechanical systems / Preprint Akademii Nauk USSR. Institute of Elektrodynamics, № 222. – Kyiv, 1980. – 50 p. (Rus)

3. Bukhholz N.N. The main course of theoretical mechanics. Part 2. The dynamics of the system of material points. – Moskva–Leningrad: Glavnaia redaktsiia tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1937. – Pp. 41–60 (Rus)

4. Seely S. Electromechanical energy conversion. – : MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 1962.

Надійшла 30.01.2014