

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОНТАКТНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

К.П. Акинин*, докт. техн. наук, **В.Г. Киреев****, канд. техн. наук, **А.А. Филоменко*****,
В.А. Лавриненко, Е.М. Михайлик
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина
e-mail: aoc@ied.org.ua

Проведено исследование электромеханических характеристик специальных бесконтактных магнитоэлектрических двигателей возвратно-вращательного движения при различных способах формирования управляющего напряжения питания статорной обмотки. Предложен такой критерий эффективности условий работы двигателя, как отношение амплитуды угла поворота ротора к квадрату действующего значения тока статора. Получены частотные характеристики амплитуд угла поворота и угловой скорости ротора, действующего значения тока статора и предложенного критерия эффективности. Библиограф. 7, рис. 2.

Ключевые слова: бесконтактный магнитоэлектрический двигатель, возвратно-вращательное движение, электромеханические характеристики.

Введение. В различных областях техники возникают задачи создания устройств, предназначенных для реализации возвратно-вращательной траектории движения рабочего органа. Это могут быть: шлифовальное и полировальное оборудование, сканирующие устройства для поисковых и следящих систем, осциляторные медицинские и столярные пилы, многофункциональные средства аппаратной косметологии для проведения процедур лимфодренажа, микрошлифовки и дерматонии и т. п.

Известно несколько способов построения электромеханических систем возвратно-вращательного движения (ВВД), реализация которых базируется на различных физических принципах, например, построение с помощью специальных механических передач [1, 2], асинхронных двигателей с использованием преобразователей [3], двигателей двойного питания [4].

Одним из вариантов реализации электромеханического устройства ВВД является использование специального бесконтактного магнитоэлектрического двигателя (БМД) без применения каких-либо передаточных механизмов [5]. В этом случае рабочий орган устройства устанавливается непосредственно на вал, и появляется возможность управления не только частотой и амплитудой колебаний, но и другими параметрами его движения. Как следствие этого – расширение функциональных возможностей устройств ВВД. В то же время к бесконтактному двигателю предъявляются повышенные требования относительно качества управления, что требует исследования и анализа их электромеханических характеристик.

Цель исследования – качественный и количественный анализ электромеханических характеристик БМД ВВД при различных способах формирования напряжения питания статорной обмотки.

Математическая модель. Базовая структура БМД возвратно-вращательного движения включает в себя установленный в подшипниковых опорах ротор в виде вала с диаметрально намагниченным постоянным магнитом и статор с однофазной обмоткой, внешним кольцевым магнитопроводом и постоянным магнитом, результирующая ось намагничивания которого ортогональна электрической оси обмотки. Благодаря магнитному взаимодействию магнитов ротора и статора реализуется бесконтактная упругая связь между ротором и обмоткой [6].

Математическая модель двигателя описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
 L \frac{di}{dt} &= -Ri - k_m \omega \cos \alpha + u; \\
 M &= k_m i \cos \alpha; \quad M_\omega = k_\omega \omega; \quad M_\alpha = k_\alpha \sin \alpha; \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_\omega - M_\alpha - M_P - M_H; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где ω , α – угловая скорость и угол поворота вала ротора; L , R – индуктивность и активное сопротивление обмотки статора; i , u – ток и управляющее напряжение статора; k_m – коэффициент момента двигателя; J – момент инерции ротора; M_ω , M_α , M_P , M_H – моменты вязкого трения и упругости, реактивный момент подшипников и момент нагрузки соответственно; k_ω , k_α – коэффициенты вязкости и упругости.

Реактивный момент подшипников определяется соответственно выражению

$$M_P = M_{II} \operatorname{sign}(\omega), \tag{2}$$

где M_{II} – момент сопротивления подшипников.

В данном исследовании полагаем такую зависимость для задания момента нагрузки:

$$M_H = k_H \omega, \tag{3}$$

где k_H – коэффициент вязкости нагрузки двигателя.

Приведенные уравнения описывают нелинейную электромеханическую систему, в которой входным воздействием является напряжение или ток при прямом токовом управлении, а выходным параметром – амплитуда механических колебаний ротора. Исследования [7] показали нелинейную амплитудно-частотную зависимость входного и выходного параметров системы с выраженным резонансом при движении ненагруженного вала. Поэтому для эффективного управления БМД ВВД необходимо формирование специальных функциональных зависимостей управляющего воздействия от задаваемых параметров.

Механические колебания вала ротора БМД ВВД должны осуществляться с заданными частотой и амплитудой, которые определяются частотой и амплитудой управляющего напряжения статора, а также его формой.

Рассмотрим режимы работы БМД ВВД для трех вариантов формирования напряжения управления статором:

$$u_1 = U_A \sin 2\pi ft;$$

$$u_2 = U_A \operatorname{sign}(\sin 2\pi ft);$$

$$u_3 = U_A \left(\frac{T}{2} - t \right) \frac{2}{T} \text{ при } 0 < t < \frac{T}{2} \text{ или } u_3 = U_A (T - t) \frac{2}{T} \text{ при } \frac{T}{2} < t < T,$$

где U_A – амплитуда управляющего напряжения статора; f – частота колебаний напряжения; T – период колебаний; t – время. Здесь управляющее напряжение u_3 определено на периоде колебаний T .

Результаты исследований. При заданных параметрах и форме кривой управляющего напряжения статора режим колебательных движений ротора БМД ВВД описывается такими параметрами: действующее значение переменного тока статора – I ; величина амплитуды угла поворота вала ротора – α_A ; величина амплитуды угловой скорости ротора – ω_A .

Вследствие нелинейных свойств рассматриваемой системы управление БМД ВВД может осуществляться в одном из двух режимов ограничений параметров: в диапазоне низких частот – в режиме ограничения амплитуды угла поворота вала ротора на заданном уровне α_3 ; в диапазоне высоких частот – в режиме ограничения действующего значения тока статора на максимально допустимом уровне I_{\max} , определяемом тепловым состоянием двигателя.

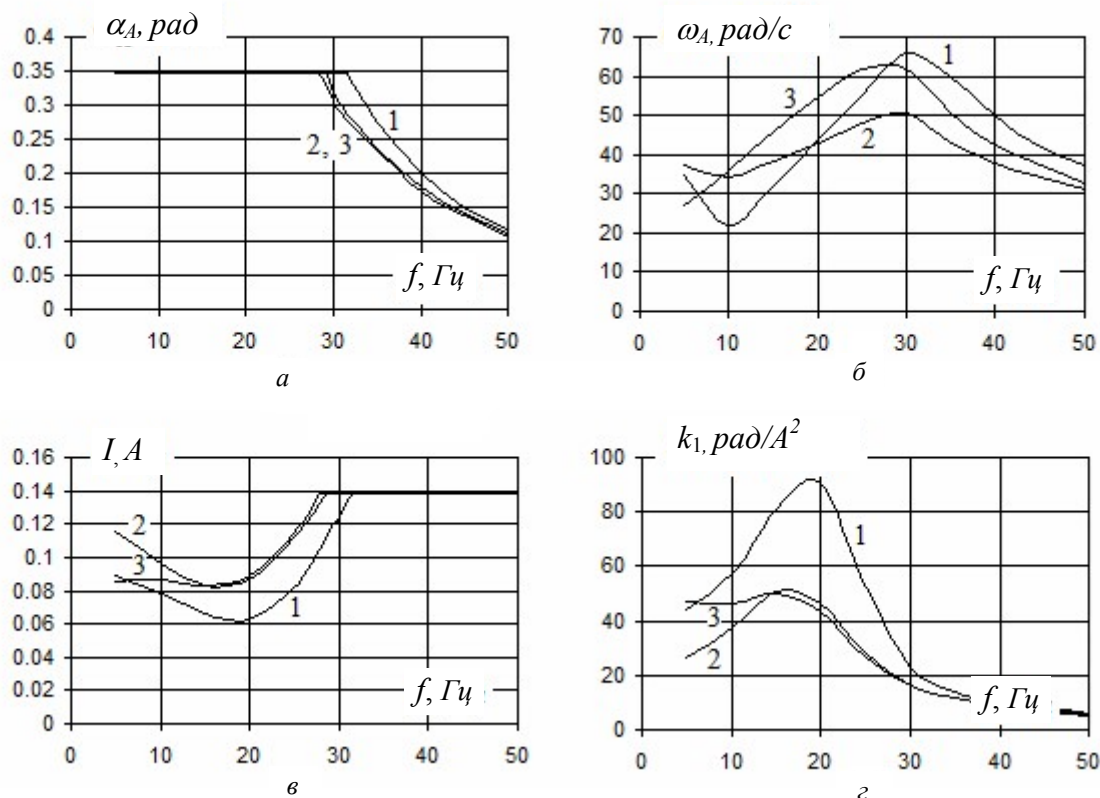


Рис. 1

Механические колебания вала должны осуществляться с заданными параметрами (частотой и амплитудой) при минимальной величине потерь в меди статорной обмотки. Поэтому для оценки эффективности работы БМД ВВД введен также дополнительный показатель эффективности, определяемый как отношение параметров $k_1 = \frac{\alpha_A}{I^2}$.

Возможно, что такой оценки эффективности недостаточно, поскольку может потребоваться реализация колебаний при максимальном значении амплитуды угловой скорости ω_A .

Для рассматриваемой БМД ВВД были проведены расчеты зависимостей основных параметров режима работы α_A , I , ω_A и k_1 от частоты f в диапазоне от 5 до 50 Гц при условии заданных ограничений амплитуды угла и действующего значения тока статора $\alpha_3 = \pi/9 \text{ рад}$ и $I_{\max} = 0,14 \text{ А}$, а также при других значениях параметров двигателя и нагрузки: $L = 0,012 \text{ Гн}$; $R = 40 \text{ Ом}$; $k_{m1} = 0,125 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$; $k_{\omega} = 0,000065 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$; $k_{\alpha} = 0,0448 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; $J_2 = 0,0000024 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M_{\Pi} = 0,0002 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $k_H = 0,00055 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$.

Эти зависимости приведены на рис. 1. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены соответственно три варианта управляющего напряжения статора. Полученные зависимости иллюстрируют режимы ограничения угла поворота ротора α (рис. 1 а) и действующего значения тока статора I (рис. 1 в) в разных частотных диапазонах

Для иллюстрации работы БМД ВВД проведен расчет мгновенных значений переменных управляющего напряжения u и тока i статора, а также угловой скорости ω и угла поворота вала ротора α при значении частоты колебаний 10 Гц. На рис. 2 приведены указанные кривые для трех вариантов формирования управляющего напряжения статора – синусоидального, прямоугольного и пилообразного.

Выводы. Использование трех разных вариантов формирования управляющего напряжения статора позволяет получить разные параметры, характеризующие качество выполнения возвратно-вращательных траекторий вала БМД. В первом случае практически во всем

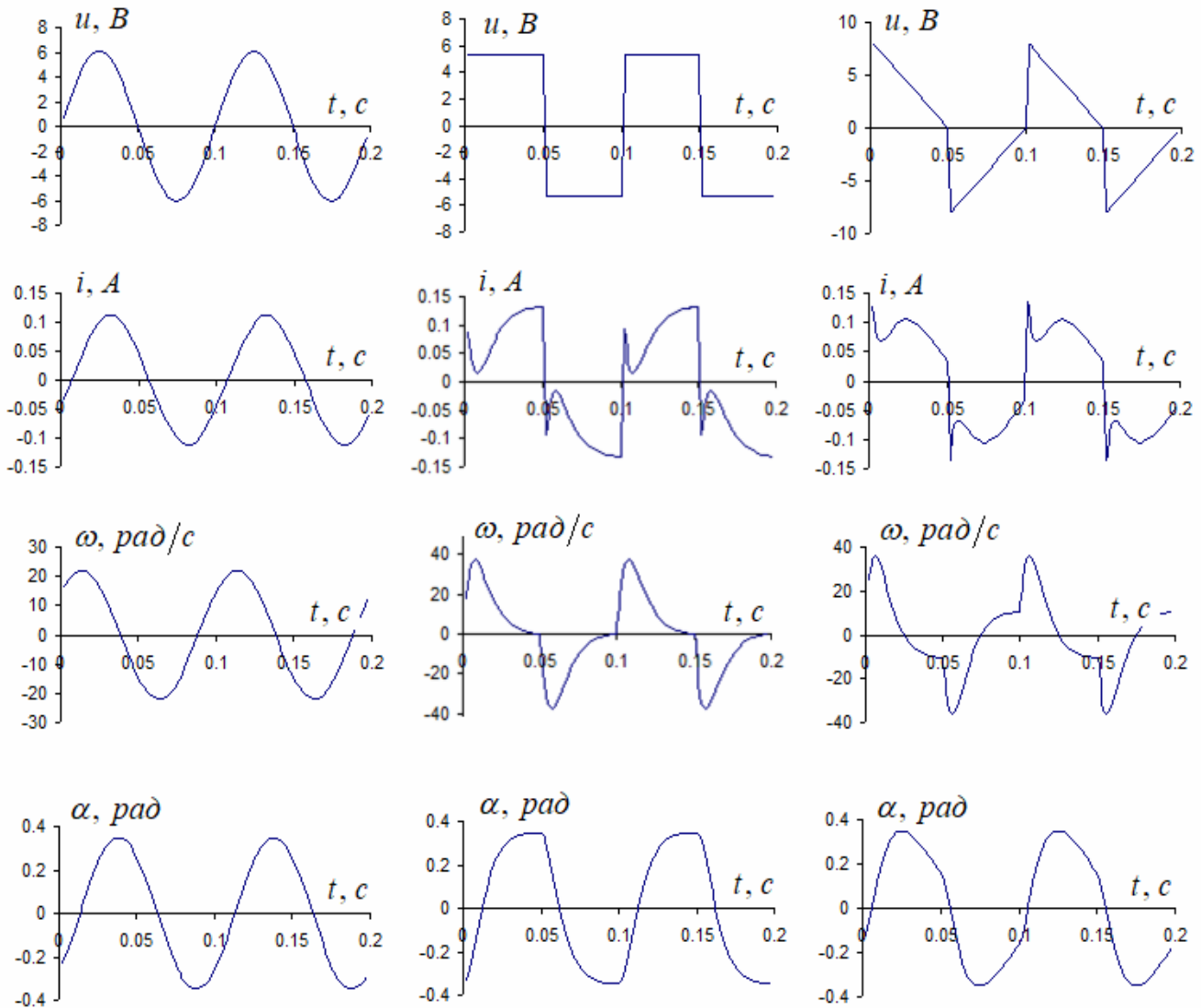


Рис. 2

частотном діапазоні управління досягається найбільше значення показателя ефективності k_1 (рис. 1 *а*), означаюче совершение колебаний вала двигателя при наименьшей величине квадрата действующего значения тока статора, что позволяет минимизировать нагрев двигателя. Тем не менее, наибольшие значения амплитуды угловой скорости достигаются во втором случае при частотах менее 10 Гц, а в третьем – в диапазоне частот от 10 до 28 Гц (рис. 1 *б*), что при выполнении некоторых технологических операций дает существенное функциональное преимущество по сравнению с первым вариантом формирования напряжения статора.

Фінансується за держбюджетною темою «Створити методи активної компенсації реактивних зусиль, моментів та просторових переміщень в електромеханічних системах магнітоелектричного типу та розробити принципи побудови пристроїв на їх основі» (шифр «ІНДЕМ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 15.10.2013 р., протокол № 14. Державний реєстраційний номер роботи 0113U006532.

1. Смелягин А.И. Структура механизмов и машин. Москва: Высш. шк., 2006. 304 с.
2. Yusoff A.S., Che-Ani A.I., Hussain Z., Hamzah N., Boudville R., Rahman M.F.A. Back-Drivability of Powered Knee Orthosis for Knee Free Swing and Knee Extension. *7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2017)*. 24–26 November 2017, Penang, Malaysia. Pp. 331–335.
3. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

4. Загривный Э.А., Гаврилов Ю.А. Способ возбуждения и регулирования авторезонансных колебаний в электроприводе возвратно-вращательного движения. Патент РФ № 2410826, 2009.
5. Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Масажний пристрій. Патент України № 74668, 2006.
6. 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.
7. Антонов А.Е., Акинин К.П., Киреев В.Г., Филоменко А.А. Компенсация реактивных моментов в электроприводе возвратно-вращательного движения. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 54–60.

УДК 621.313.8

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗКОНТАКТНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗВОРОТНО-ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

К.П. Акинин, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв**, канд. техн. наук, **А.А. Філоменко**, **В.А. Лавриненко**, **О.М. Михайлик**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

Проведено дослідження електромеханічних характеристик спеціальних безконтактних магнітоелектричних двигунів зворотньо-обертального руху за різних способів формування керуючої напруги живлення обмотки статора. Запропоновано такий критерій ефективності умов роботи двигуна, як відношення амплітуди кута повороту ротора до квадрату діючого значення струму статора. Представлено частотні характеристики амплітуд кута повороту та кутової швидкості ротора, діючого значення струму статора та запропонованого критерію ефективності. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: безконтактний електромагнітний двигун, зворотньо-обертальний рух, електромеханічні характеристики.

RESEARCH OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF BRUSHLESS MAGNETOELECTRIC MOTORS OF RETURN-ROTARY MOTION

K.P. Akynin, **V.G. Kyreyev**, **A.A. Filomenko**, **V.A. Lavrinenko**, **E.M. Mikhailik**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The research of the electromechanical characteristics of special brushless magnetoelectric motors return-rotary motion when using different methods of forming the control supply voltage of the stator winding is made. Efficiency criterion of motor operating conditions as a relation of rotation angle amplitude of rotor shaft and square of stator current effective value is proposed. Frequency characteristics of amplitudes of rotation angle and rotor angular speed, of stator current effective value and proposed efficiency criterion are given. References 7, figures 2.

Key words: brushless magnetoelectric motor, return-rotary motion, electromechanical characteristics.

1. Smeliahin A.Y. The structure of mechanisms and machines. Moskva: Vysshaya shk., 2006. 304 p. (Rus)
2. Yusofl A.S., Che-Ani A.I., Hussain Z., Hamzah N., Boudville R., Rahman M.F.A. Back-Drivability of Powered Knee Orthosis for Knee Free Swing and Knee Extension. *7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2017)*. 24–26 November 2017, Penang, Malaysia. Pp. 331–335.
3. Lukovnikov V.Y. Electric drive of oscillatory motion. Moskva: Energoatomizdat, 1984. 152 p. (Rus)
4. Zahrivnyi E.A., Havrilov Yu.A. The method of excitation and regulation of autoresonance oscillations in the electric drive of the return-rotary motion. Patent RF No 2410826, 2009. (Rus)
5. Antonov A.E., Kyreyev V.H. Massage device. Patent UA No 74668, 2006. (Ukr)
6. Antonov A.E., Petukhov Y.S., Filomenko A.A. Magnetolectric motor reciprocating rotary motion with elastic coupling rotor. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 1. Pp. 49–55. (Rus)
7. Antonov A.E., Akynin K.P., Kyreyev V.H., Filomenko A.A. Compensation of the reactive torque in electric drive of a return-rotary motion. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 51. Pp. 54–60. (Rus)

Надійшла 25.10.2019

Received 25.10.2019