

ВПЛИВ СПЕКТРУ СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ НА ПУЛЬСАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ БЕЗПАЗОВОГО МОМЕНТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

І.С. Петухов*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв****, канд. техн. наук, **К.П. Акінін*****, докт. техн. наук,
В.А. Лавриненко
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: igor_petu@ukr.net.

Досліджено обертальний момент магнітоелектричного трифазного моментного двигуна з постійними магнітами, розташованими на поверхні внутрішнього ротора. Розглянуто режим живлення синусоїдальним струмом, а також режим з інжекцією в струм вищої гармоніки. Обертальний момент обчислювався за статичною моделлю магнітного поля. Визначено, що за умов живлення синусоїдальним струмом в пульсаціях обертового моменту присутній значний внесок шостої гармоніки. Досліджено метод придушення пульсацій моменту шляхом інжекції вищих гармонік в струм живлення. Показано, що за умов амплітуди пульсації обертового моменту шостої гармоніки близько 4% інжекція в струм живлення п'ятої гармоніки з амплітудою 2% від основної гармоніки дає змогу знизити пульсації більше ніж у 10 разів. Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: моментний двигун, постійні магніти, пульсації обертового моменту, інжектування вищих гармонік.

Вступ. Електричні двигуни з постійними магнітами або як їх ще називають магнітоелектричні двигуни широко використовуються в різноманітних пристроях та приводних системах. Серед них можна виділити такі, в яких потрібна дуже низька, але стабільна кутова швидкість (20...30 обертів на хвилину) за умов великого номінального обертового моменту корисного навантаження. Вимога стабільної швидкості обертання викликає необхідність забезпечення постійного значення обертового моменту за будь-яких значень кута обертання. Двигуни, що призначені для таких умов роботи називаються моментними двигунами (МД) [1, 2]. Сфера застосування МД – це електроприводи систем спостереження, стеження, сканування та інших виконавчих пристроїв. Слід відзначити, що у порівнянні з редукторним приводом МД мають перевагу у точності відпрацювання вхідних сигналів завдання завдяки відсутності люфтів.

Зазвичай коливання обертового моменту зумовлені неоднорідністю магнітопроводу (зубцево-пазова структура), геометрією обмотки (зосереджена, розподілена), насиченням ділянок магнітопроводу в залежності від кута повороту ротора, спектром струму живлення. З появою магнітів на основі з'єднань неодим-залізо-бор з'явилася можливість відмовитися від зубцево-пазового шару, оскільки параметри цих магнітів дають змогу отримати у повітряному проміжку цілком прийнятні величини магнітної індукції і, зрештою, потрібні питомі величини моменту та потужності. Такі машини отримали назву безпазових. Обмотка статора в них виконується компаундовою і займає весь повітряний проміжок за винятком мінімального технологічного проміжку між статором і ротором. Хоча безпазова структура двигуна має все ж таки трохи нижчі масогабаритні показники, але з точки зору отримання менших коливань обертового моменту ця структура позбавлена неоднорідного магнітопроводу, а саме зубців, що викликають зубцеві паразитні моменти. Методам боротьби з небажаною пульсацією обертового моменту присвячено багато досліджень. Серед них з новітніх публікацій зазначимо такі: збільшення кількості фаз живлення; застосування магнітів спеціальної форми [3]; виконання двошарової обмотки [4]; "інжекція гармонік в струм живлення" для зміни його форми [2, 5–9].

© Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акінін К.П., Лавриненко В.А., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1416-1174>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9407-1074>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-7830-2311>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Дещо осторонь стоїть робота [10], автори якої позиціонують свій метод як "компенсація струму та регулювання індуктивних параметрів".

Значна частина робіт, присвячених впливу на форму струму живлення, показує перспективність такого підходу. У зазначених вище публікаціях [5–10] викладено результати досліджень комплексу МД – система управління. Як можна побачити, розглянуті в згаданих роботах системи відрізняються різноманітністю. Розглянуті двигуни також відрізняються за структурою і параметрами. Для розроблюваного в Інституті електродинаміки НАН України пристрою запропоновано запровадити два можливі способи корекції струму живлення [2]. Перший полягає в тому, що формується квазисинусоїдальний струм, другий – в живленні обмоток прямокутними імпульсами струму з коливаннями амплітуди на полиці імпульсу. В роботі [10] відмічено, що другий спосіб, який полягає у використанні імпульсів, близьких до прямокутних, більш складний у досягненні бажаного результату. А саме: "У розімкнутій системі подача синусоїдального струму на обмотки статора може пригнічувати пульсації обертового моменту" у досліджуваній машині "краще, ніж використання струму з імпульсами прямокутної форми, коли момент навантаження перевищує" певне значення. Треба зазначити, що хоча у роботі [10] досліджувався двигун з пазовою структурою статора, комплексний підхід до компенсації пульсації моменту та його результати заслуговують на увагу.

Тому метою даної роботи обрано дослідження можливості зменшення пульсації обертового моменту шляхом внесення у струм живлення вищих гармонічних складових. Обмежимося розглядом тільки електромагнітної задачі без прив'язки до схеми управління живленням. Цей результат дає можливість оцінити потрібну величину збурення струму та сформулювати вимоги до системи управління.

Структура машини та математична модель. Поперечний переріз двигуна наведено на рис. 1, а геометричні розміри – в таблиці. Оскільки частота обертання низька, було обрано структуру з внутрішнім ротором та радіальним намагнічуванням магнітів у вигляді паралелепіпедів. Задля запобігання втрат від вихрових струмів в магнітопроводі та обмотці статора будемо вважати, що статор

шихтований або виготовлений з порошкового матеріалу, а трифазна обмотка статора виконана тонкими провідниками і не має нульового проводу. Знехтуємо також вихровими струмами в постійних магнітах.

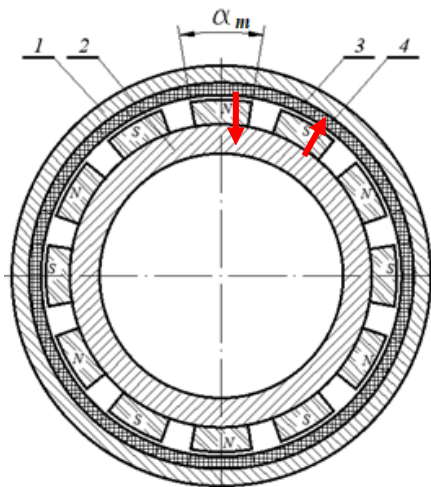


Рис. 1. Поперечний переріз МД (1 – ярмо статора, 2 – ярмо ротора, 3 – шар обмотки, 4 – магніт)

Параметр	Змінна	Величина
Зовнішній діаметр	D_a	88 mm
Активна довжина	L_a	45 mm
Висота ярма статора	h_{ys}	2,5 mm
Висота шару обмотки	h_w	2,5 mm
Технологічний повітряний проміжок	δ	0,5 mm
Висота магнітів	h_{mag}	5,0 mm
Висота ярма ротора	h_{yr}	6,0 mm
Кутовий розмір магнітів (електричні градуси)	α_m	140°

Розрахункову двовимірну область двох полюсних поділів поперечного перерізу машини з трифазною обмоткою статора наведено на рис. 2.

Задля досягнення максимального обертового моменту вектор магніторушійної сили (МРС) обмотки статора повинен випереджати вектор поля ротора на 90 електричних градусів. Априорі вважається, що кутове положення ротора (положення осі намагнічування, рис. 2) визначається системою датчиків, а бажані величини струмів та їхні фази забезпечуються системою управління.

Оскільки в розрахунковій моделі вихрові струми відсутні, граничну задачу можна вважати магнітостатичною. Магнітне поле в активному об'ємі вважалось двовимірним. Для моделювання було використано інтерфейс "Magnetic fields" програмного комплексу "COMSOL Multiphysics". В ньому магнітне поле розраховується відносно векторного магнітного потенціалу $A=(0,0,A_z)$, що має одну осьову складову. Вектор магнітної індукції B отримується з векторного магнітного потенціалу як

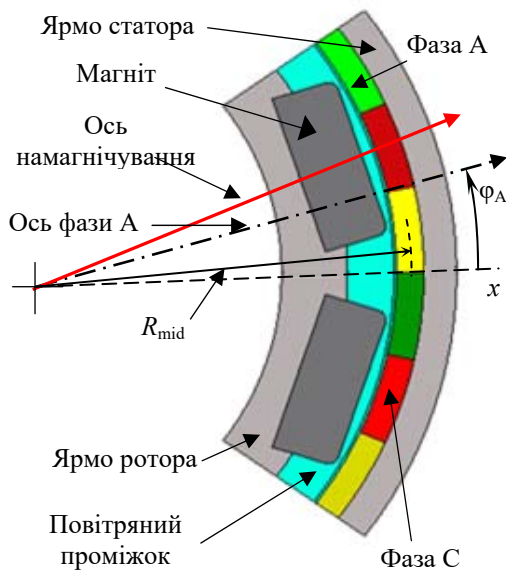


Рис. 2. Два полюсних поділа МД ($p = 5$)

В реальній машині магнітне поле послаблюється за наближенням до торців за рахунок розсіювання, чи, так званого, крайового ефекту. Це фізично призводить до зниження обертового моменту. Використання моделі двовимірного поля передбачає оцінку похибки, яка неминуче має місце за рахунок неврахування скінченної активної довжини машини. Оскільки часто МД має коротку активну довжину [2], оцінка цієї похибки має важливе значення. Задля спрощення розрахунку залежності обертового моменту від активної довжини машини використовувалася тривимірною областю, що відображає половину активної зони, яка є симетричною (рис. 3). При цьому зроблено припущення, що моменти від струму кожної з фаз не залежать один від одного. Таке припущення не породжує суттєвої похибки, оскільки струми обмотки майже не впливають на насичення магнітопроводів у порівнянні з полем постійних магнітів. Таким чином, задля визначення впливу скінченної довжини магнітопроводу можна обчислювати обертовий момент, створюваний лише однією фазою обмотки, що відображено на рис. 3.

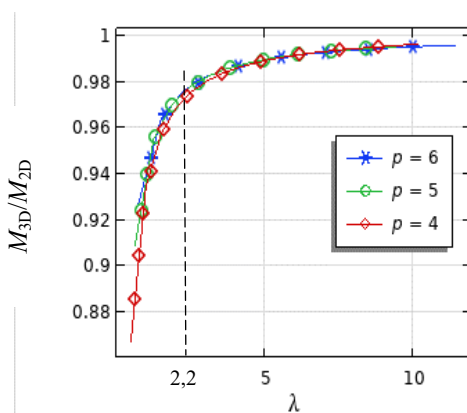


Рис. 4. Вплив крайового ефекту

Дані рис. 4 свідчать, що для заданих розмірів двигуна та його полюсності, яким відповідає значення 2,2

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

В безпазових машинах можна обчислити електромагнітний момент шляхом інтегрування виразу для вектора сили Лоренца F_L за поперечним перерізом обмотки [12]

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

де $\mathbf{J} = (0, 0, J_z)$ — вектор густини струму обмотки, що, як і векторний потенціал, має єдину z -компоненту. Обертовий момент M_{axial} обчислювався інтегруванням тангенціальної складової сили Лоренца $F_{L\tau}$ за областю обмотки Ω_W

$$M_{axial} = \int_{\Omega_W} F_{L\tau} dV \quad (3)$$

Для тривимірного магнітного поля також використовувався інтерфейс "Magnetic fields" з тією різницею, що векторний потенціал, а також інші вектори поля в ньому мають всі три просторові компоненти.

Результати та обговорення. Результати роботи [2] свідчать, що оптимальною кількістю полюсів для розглянутої структури МД є 8 – 14 (число пар полюсів $p = 4 - 7$).

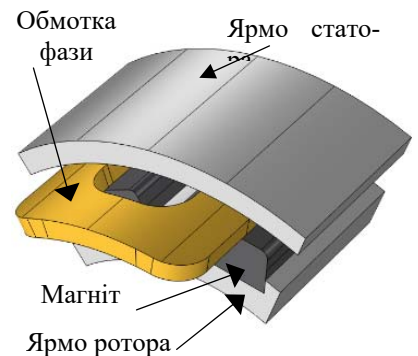


Рис. 3. Розрахункова область

Для чисельної оцінки впливу крайового ефекту в теорії електричних машин використовується безрозмірний критерій, що характеризує відносну довжину полюсного поділу

$$\lambda = L_a / \tau, \quad (4)$$

де $\tau = \pi R_{mid} / p$ — полюсний поділ. Залежність коефіцієнту зменшення моменту із врахуванням тривимірності поля від критерію λ наведено на рис. 4. Майже повний збіг графіків для різних чисел пар полюсів зумовлений подібним розподілом магнітного поля збудження і універсальністю критерію λ . Структури з меншим числом полюсів розглядувати недоцільно, оскільки, по-перше, вони забезпечують менший максимальний обертовий момент [2], по-друге, в них частота пульсацій менша, і за однакових інерційних властивостей рухомої частини пристрою призведуть до більшої амплітуди пульсації ротора.

критерію λ (рис. 5), зменшення величини обертального моменту за рахунок скінченної активної довжини складає близько 3%, що свідчить про прийнятну точність двовимірного моделювання.

Формування обертального моменту відбувається від взаємодії "хвиль" магнітної індукції та МРС обмотки. За умов їхнього синусоїдального характеру обертальний момент не залежить від кута повороту ротора і є постійним. Розподіл магнітної індукції постійних магнітів не є синусоїдальним, оскільки магніт формує практично прямокутний розподіл коерцитивної сили. В малих безпазових електричних машинах технологічно дуже важко зробити розподілену обмотку, яка може створити синусоїдальний розподіл МРС. Тому в таких машинах обмотки виконуються зосередженими (рис. 1) и мають в спектрі помітний внесок вищих гармонік. Трапецієвидний розподіл МРС F однієї фази зосередженої обмотки за умови її симетричного розташування відносно початку координат визначається виразом

$$F(\alpha) = \frac{4F_{\max}}{\alpha\pi} \left(\sin\alpha + \frac{1}{9}\sin3\alpha + \frac{1}{25}\sin5\alpha + \dots \right), \quad (5)$$

де $\alpha = \pi/6$ – половина кута фазної зони, який дорівнює $\pi/3$. У відповідності до (5) величина амплітуди першої гармоніки МРС становить $1,22 F_{\max}$, амплітуда п'ятої складає $0,049 F_{\max}$. Третя гармоніка хоча і присутня в кривій МРС однієї фази, але струми третьої гармоніки в трифазній обмотці без нульового проводу, як відомо, відсутні. Розподіл магнітної індукції вздовж полюсного поділу та на кількох перерізах вздовж осі обертання, а також її спектр для дванадцятиполюсної машини з геометричними даними (таблиця) та кутовим розміром магнітів $\alpha_m 140^\circ$ наведено на рис. 5. Амплітуди спектру обчислено для осьової координати z у межах $(0 \dots ,6) L_a$ у відсотках по відношенню до максимального значення. В спектрі магнітної індукції, як видно з рис. 5, теж

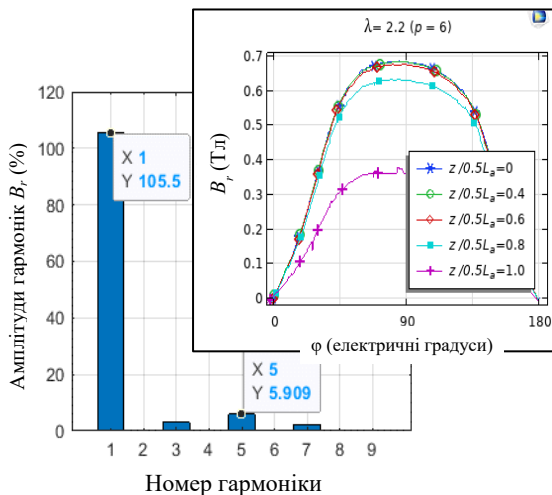


Рис. 5. Спектр магнітної індукції в повітряному проміжку

спостерігається найбільший внесок п'ятої гармоніки. Оскільки електромагнітне зусилля у безпазовій машині пропорційне добутку струму на магнітну індукцію (2) в кутовій залежності електромагнітного моменту слід очікувати появу четвертої або шостої гармонічних складових.

Для компенсації коливань моменту відповідно до мети дослідження розглянемо інжекцію п'ятої гармоніки в спектр струму. В підсумку вираз для струму фази A буде виглядати таким чином:

$$i_A = I_1 \sin(p\omega_R t + \psi_1) + I_5 \sin(5p\omega_R t + \psi_5), \quad (6)$$

де ω_R – кутова швидкість обертання ротора; ψ_1, ψ_5 – фазові кути, що забезпечують потрібний електричний кут 90° між "хвилею" МРС обмотки та магнітною віссю ротора (рис. 2). На рис. 6 наведено результати моделювання обертального моменту в залежності від кута обертання ротора ϕ_R та відповідні спектри обертального моменту без інжекції п'ятої гармоніки струму (сині стовбці) та з інжекцією п'ятої гармоніки з амплітудою $0,02 I_1$ (червоні стовбці) і початковою фазою

$$\psi_5 = \psi_1 + \pi / 6. \quad (7)$$

Амплітуди гармонік спектру обчислені відповідно до середньої величини моменту, яка становить $1,64 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 6).

Як і передбачалося, в першому випадку в коливаннях моменту присутня шоста гармонічна складова з амплітудою біля 4%. Інжекція ж у спектр струму живлення п'ятої гармоніки з амплітудою 2% від основної гармоніки зменшує пульсації обертального моменту приблизно у 13 разів. Відзначи-

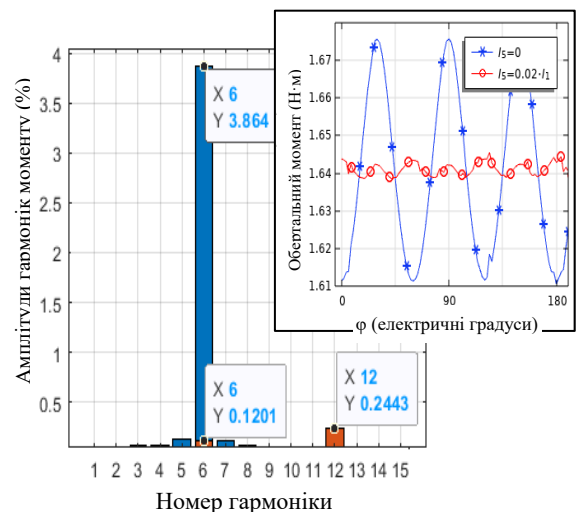


Рис. 6. Пульсації моменту та їх спектр

мо, що в цьому випадку основний внесок в пульсації робить дванадцята гармоніка, що показує обчислення спектру, наведеного на рис. 6.

Висновки. В безпазових трифазних моментних двигунах з обмоткою без нульового проводу, з'єднаною у «зірку», завдяки застосуванню зосередженої обмотки з'являється шоста гармоніка обертового моменту. Зниження пульсацій моменту шляхом інжекції додаткових гармонік струму є ефективним методом. Так, в багатополосній машині ($p = 4, 5, 6$) з відношенням діаметру ротора до полюсного поділу не менше 2,2 інжекція в спектр синусоїдального струму п'ятої гармоніки з амплітудою лише 2% від амплітуди основної гармоніки струму дає можливість зменшити пульсації обертового моменту більше ніж у 10 разів.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробити наукові основи та принципи побудови магнітоелектричних мехатронних модулів для спеціалізованих систем автоматичного керування» («Мехатрон»), КПКВК 6541030.

1. Sahdev S.K. Electrical Machines. Cambridge University Press, 2017. 980 p.
2. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetoelectric torque motors. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. No 63. Pp. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>.
3. Yousuf M., Khan F., Ikram J., Badar R., Bukhari S.S.H., Ro J.-S. Reduction of Torque Ripples in Multi-Stack Slotless Axial Flux Machine by Using Right Angled Trapezoidal Permanent Magnet. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 22760–22773. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056589>.
4. Asama J., Watanabe J., Tek Kee T. Development of a Slotless Permanent Magnet Motor with Two-Layer Toroidal Winding for Minimization of Torque Ripple. IEEE International Conference on *Mechatronics (ICM)*, Kashiwa, Japan, 07-09 March 2021. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICM46511.2021.9385679>.
5. Yuan Q., Yin W. Torque Ripple Suppression of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motors with the Harmonic Injection. *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC)*, Shanghai, China, 15-17 November 2018. Pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/APMRC.2018.8601063>.
6. Jia C., Sun T., Yu G., Lin D., Liang J. Torque Ripple Minimization of IPMSM Drives With Current Injection Derived from Torque Error. 8th International Conference on *Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, Hong Kong, China, 07-10 December 2020. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESA50370.2020.9344030>.
7. Honda K., Akatsu K. A 3rd Harmonic Current Control of the Open-Winding Permanent Magnet Synchronous Motor for the Torque Ripple Reduction. IEEE 4th International *Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Singapore, 25-28 November 2019. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IFEEC47410.2019.9014989>.
8. Lee G.H., Kim S.I., Hong J.P., Bahn J.H. Torque Ripple Reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Harmonic Injected Current. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 6. Pp. 1582–1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.915776>.
9. Pham T.H., Wendling P. Current Harmonics Injection Table to Minimize Torque Ripples for Electric Powertrain Interior Permanent Magnet Motor Over Maximum Torque-Speed Curve. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 19-21 June 2019. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2019.8790540>.
10. Pei X., Zhou Y., Wang N. Torque Ripple Suppression of Building-Block Transverse Flux Permanent Magnet Motor by Current Compensation and Variable Parameter Control Based on Real-Time Inductance. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 11405–11415. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963123>.

INFLUENCE OF THE SUPPLY CURRENT SPECTRUM ON THE TORQUE RIPPLE OF A SLOTLESS PERMANENT MAGNET TORQUE MOTOR

I.S. Petukhov, V.G. Kireyev, K.P. Akinin, V.A. Lavrinenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: igor_petu@ukr.net.

The torque of a magnetoelectric three-phase torque motor with permanent magnets located on the surface of the internal rotor was studied. The mode of feeding with a sinusoidal current, as well as the mode with injection into the higher harmonic current, are considered. The torque was calculated according to the static model of the magnetic field. It was determined that under the conditions of power supply with a sinusoidal current, there is a significant contribution of the sixth harmonic in the pulsations of the torque. The method of suppressing torque pulsations by injecting higher harmonics into the supply current was studied. It is shown that under the conditions of the amplitude of the pulsations of the rotational moment of the sixth harmonic of about 4%, the injection of the fifth harmonic with an amplitude of 2% of the fundamental into the current allows the reduction the pulsations by more than 10 times. References 10, figures 6, tables 1.

Keywords: torque motor, permanent magnets, torque pulsations, injection of higher harmonics.

Надійшла 08.04.2024

Остаточний варіант 24.06.2024