

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ТА ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ БЕЗПАЗОВОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА З МАСИВНИМ ОСЕРДЯМ СТАТОРА

І.С. Петухов*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв****, канд. техн. наук, **К.П. Акінін*****, докт. техн. наук, **Є.В. Ісаєв**

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

E-mail: igor_petu@ukr.net.

Відмічено економічність конструкції та низьку витратність підготовки виробництва безпазових електричних двигунів з постійними магнітами і масивним осердям статора. Викладено конструкцію експериментальної установки для вимірювання втрат в масивному осерді. Сформульовано етапи методики розрахунку цих втрат. Задля розрахунку втрат від вихрових струмів використовувався програмний комплекс "COMSOL Multiphysics". Втрати від гістерезису розраховувалися за формулою Штейнметца. Для різної густоти розрахункової сітки проведено моделювання втрат в масивному осерді та виконано порівняння з результатами вимірювань в діапазоні частоти обертання 0...3600 об./хв. Задля обчислення максимального моменту в статистиці використано модель обмотки з синусоїдальною просторовою формою МРС. Обчислено залежності обертового моменту від швидкості обертання в досліджуваному діапазоні. Відмічено достатню точність розрахункової методики. Бібл. 12, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: магнітоелектричний двигун, постійні магніти, масивне осердя статора, обертовий момент.

Вступ. Електричні двигуни з постійними магнітами (ДПМ) (в англomовній літературі "PM motors"), як їх ще називають «магнітоелектричні двигуни» [1], широко використовуються в різноманітних пристроях та приводних системах, в тому числі автономних. Сфера застосування згаданих електроприводів – це системи спостереження, стеження, сканування та інші виконавчі пристрої загальнопромислового та спеціального призначення. В теперішній час динамічність ринку автономних приводних систем і швидка зміна попиту в окремих сегментах викликає необхідність пропонувати дешеві конструктивні та технологічні рішення без значного погіршення експлуатаційних показників. У багатьох випадках вирішальними є вимоги до простоти конструкції та її дешевизни. Це стосується випуску великої серії приладів низької собівартості або створення невеликої партії приладів в умовах швидкої підготовки виробництва [1].

Серед сфер застосування ДПМ можна виділити такі, в яких потрібна низька та стабільна кутова швидкість за умов дотримання значного обертового моменту корисного навантаження. Вимога стабільної швидкості обертання викликає необхідність забезпечення постійного значення обертового моменту протягом оберту на подвійний полюсний поділ. Задоволення цієї вимоги вирішується в основному у два способи. Перший – це використання конфігурацій обмотки, магнітопроводу та магнітів системи збудження такими, що забезпечують мінімальні пульсації обертового моменту [2]. Другий – використання можливостей системи управління, яка довершує стабілізацію моменту, що має місце внаслідок неоднорідності структури активної зони [3].

З появою постійних магнітів (ПМ) на основі самарію і, особливо, неодиму, зріс інтерес до використання малогабаритних безпазових електроприводів прямої дії [1]. Незважаючи на те, що безпазова конструкція має дещо нижчі масогабаритні показники порівняно з традиційною пазовою, вона технологічно проста і, що дуже важливо, має менші пульсації крутного моменту. До того ж для безпазових електричних машин не обов'язково дотримуватися обмежень співвідношення пази/полюси, яке є обов'язковим для пазових машин з шихтованими сердечниками статорів, і, таким чином, цей факт додає ступенів свободи у процес проектування машини.

© Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акінін К.П., Ісаєв Є.В., 2025

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

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

© Видавець ВД «Академперіодика» 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>

Ще одним заходом, що може прискорити та здешевити виробництво є виконання магнітопроводу статора масивним як для машин циліндричного виконання [4], так і для аксіального [5]. Це, природно, зменшує діапазон доцільної за енергетичними показниками швидкості обертання двигуна, але безпосередньо спрямовано на досягнення вищезгаданих цілей. Тому **метою даної роботи** є експериментальне та розрахункове дослідження впливу на обертальний момент безпазового магнітоелектричного двигуна наявності масивного сталевго осердя статора.

Експериментальна установка та етапи методики розрахунку. Обчислення обертального моменту здійснювалося методом тарованої машини. За результатами вимірювання електричних втрат у приводній системі за наявності масивного статора та його відсутності обчислювалася різниця цих втрат. За величиною цієї різниці обчислювався паразитний момент M_{Loss} , що вносить масивний статор

$$M_{Loss} = \frac{P - P_{Drive}}{\omega_R}, \quad (1)$$

де P – виміряна потужність, що споживає привід; P_{Drive} – виміряна потужність, що споживає привід за умов відсутності досліджуваного статора; ω_R – кутова частота обертання ротора. Розміри поперечного перерізу установки наведено на рис. 1.

Втрати в феромагнітному середовищі складаються з втрат від вихрових струмів та гістерезису. У більшості розрахункових методик ці явища розглядаються окремо. Тобто окремо розраховуються втрати від вихрових струмів в безгістерезисному середовищі та втрати від гістерезису. Такий підхід прийнято в даній роботі.

Змінне чи рухоме магнітне поле в електропровідному матеріалі завжди викликає поверхневий ефект. Глибина проникнення змінного магнітного поля δ у такий матеріал залежить від магнітної проникності μ , електропровідності σ та кутової частоти зміни поля ω

$$\delta = \sqrt{2 / \mu \sigma \omega}. \quad (2)$$

Для сталі з відносною магнітною проникністю 1000 за умов швидкості обертання 120 об./хв. ця величина складає 4,5 мм, що співпадає з товщиною досліджуваного статора. Але і за умов такої глибини проникнення вихрові струми розподіляються нерівномірно, що викликає необхідність враховувати нелінійність характеристики намагнічування сталі задля точного розрахунку інтегральних втрат. Задля апроксимації характеристики намагнічування сталі за табличними даними [7] було використано дробово-раціональну функцію, що відображає нелінійну залежність відносної магнітної проникності μ від вектору магнітної індукції $\mathbf{B}$

<i>Матеріал магніту ротора N33H</i>	
Число пар полюсів	1
Залишкова індукція B_r	1,16 Тл
Відносна магнітна проникність	1,05
<i>Матеріал статора (сталь 20)</i>	
Питомий опір (20° С) [6]	0,16 10^{-6} Ом·м
<i>Коефіцієнти апроксимації (2)</i>	
B_{05}	1,4 Тл
μ_{max}	1000
m	6,9

$$\mu = 1 + \frac{\mu_{max}}{1 + (\|\mathbf{B}\| / B_{05})^m}, \quad (3)$$

де μ_{max} – значення відносної магнітної проникності за умов слабого поля; $\mathbf{B}$ – вектор магнітної індукції; B_{05} – величина магнітної індукції на "точці перегинання" кривої намагнічування. Значення коефіцієнтів в (3) наведено в таблиці, де також наведено фізичні характеристики магніту ротора та сталі статора.

Важливо відмітити, що апроксимуюча функція (3) є монотонною та гладкою, що дуже важливо для збіжності ітераційного процесу під час моделювання

магнітного поля. Тим більше, що для геометрії експериментального зразка поле є суттєво тривимірним завдяки невеликій довжині відносно діаметра, а також внаслідок неоднакової довжини магніту та досліджуваного макету статора. Табличні дані характеристики намагнічування сталі та апроксимуюча функція наведено на графіку (рис. 2).

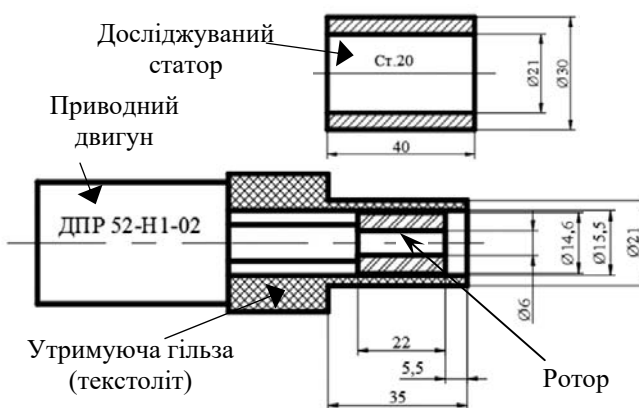


Рис. 1. Розміри досліджуваної моделі

Задля розрахунку, вочевидь, треба моделювати рухоме поле магніту ротора. Але у відповідності до принципу відносності не має значення рухається ротор відносно статора чи навпаки. Тобто можна моделювати обертання статора у полі магніту. Оскільки метою статті є дослідження моменту за умов постійної швидкості обертання, задача зводиться до розрахунку втрат від вихрових струмів, викликаних рухом електропровідного середовища в магнітному полі. Така постановка тривимірної граничної задачі реалізована в інтерфейсі "Magnetic and Electric Field" програмного середовища "COMSOL Multiphysics" [8] для моделювання стаціонарного електромагнітного поля, в тому числі з рухливим електропровідним середовищем шляхом введення в рівняння EPC руху $\mathbf{E}_v$

$$\mathbf{E}_v = \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (4)$$

де $\mathbf{v}$ – вектор локальної швидкості середовища. За умов обертального руху треба визначити тільки дві складові v_x, v_y швидкості середовища за формулами

$$\begin{cases} v_x = -\omega_r r \sin \varphi, \\ v_y = \omega_r r \cos \varphi, \end{cases} \quad (5)$$

де r – радіус точки в циліндричній системі координат; φ – її кутова координата.

Для задач, в яких присутній поверхневий ефект, важливо, щоб сітка мала згущення у відповідних ділянках розрахункової області (навіть якщо алгоритм розв'язання є адаптивним). До того ж, у підобластях простої конфігурації рекомендовано використовувати регулярну чотирикутну сітку [8]. Сітку для даної задачі з урахуванням вищезгаданих рекомендацій та урахуванням симетрії моделі наведено на рис. 3 за виключенням "повітряних" підобластей. На зовнішній поверхні оточуючого повітряного середовища було розташовано шар, заповнений нескінченими елементами [8], що точніше відображає нескінченне розповсюдження магнітного поля. Розрахунки проводилися для кількох варіантів сітки. Випробувалася сітка з елементами першого та другого порядку. Мінялася загальна густина сітки, а також її щільність в області статора та прилеглого до статора внутрішнього повітряного проміжку.

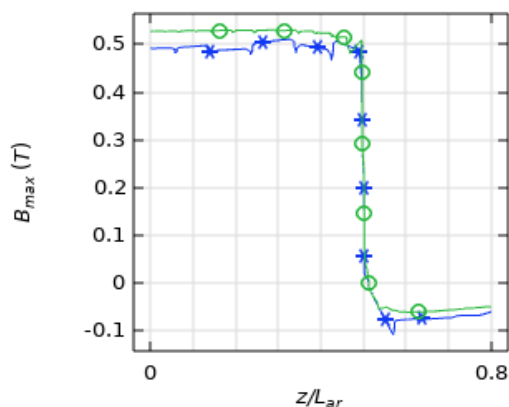


Рис. 4. Максимальне радіальне значення магнітної індукції на поверхні ротора (статор відсутній). Розрахунок для двох сіток різної щільності

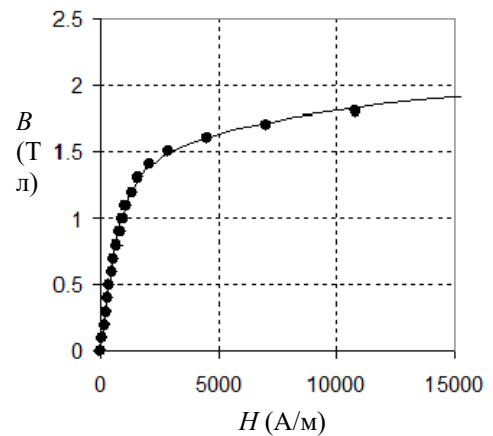


Рис. 2. Дані кривої намагнічування (точки) та її апроксимація

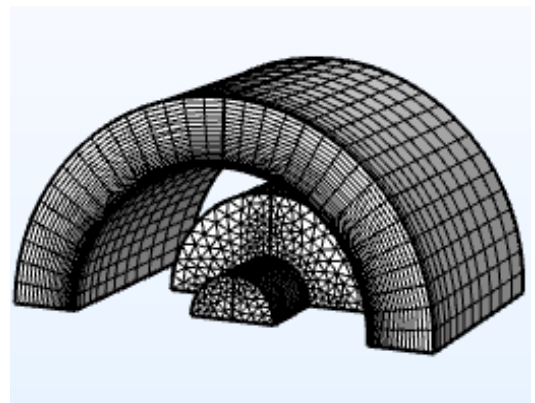


Рис. 3. Сітка в роторі і статорі (поліпшений варіант)

Першим (підготовчим) етапом моделювання була перевірка достовірності розрахунку магнітного поля в статичному режимі за відсутності статора для заданого матеріалу постійного магніту. За допомогою тесламетра було зроблено 20 замірів радіальної компоненти магнітної індукції $B_{\max}$ на осі поля магніту (де вона має максимальне значення). Результати відповідного розрахунку для двох сіток різної щільності наведено на рис. 4. За результатами замірів максимальне значення радіальної індукції лежить в межах 0,49...0,51 Тл, що свідчить про прийнятний збіг даних (похибку також має ручна фіксація щупа тесламетра на поверхні магніту).

З причин симетрії моделювалася четверта частина об'єму моделі. На рис. 5 наведено поле норми магнітної індукції в поперечному та осьовому перетині моделі за умов швидкості обертання 1000 об./хв. (поле магніту спрямовано вздовж вертикальної осі). Як свідчить напрям-

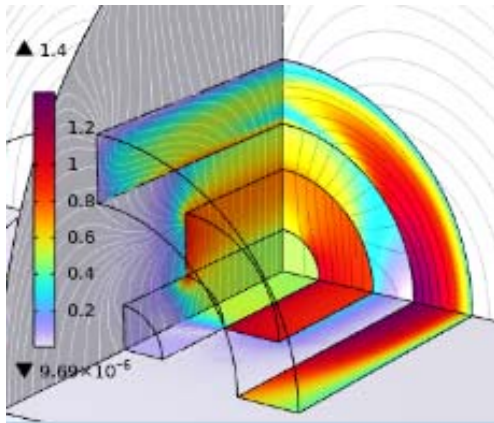


Рис. 5. Поле норми та напрямку магнітної індукції в поперечному та осьовому перерізі

джено в роботах Зірки С.Є., Мороза Ю.І. Зокрема, статичний режим перемагнічування досліджено в роботі [9]. Але моделі для поля в трансформаторах не підходять до аналізу втрат в магнітопроводах електричних машин, тим більше у масивному статорі, де поле має обертальний характер.

В арсеналі пакету "COMSOL Multiphysics" присутня Jiles-Atherton модель нелінійного векторного гістерезису, але для конструкційної сталі важко знайти достовірні значення п'яти коефіцієнтів, що потребує ця модель. До того ж для наближеного обчислення втрат на гістерезис P_h часто використовується формула Штейнметца, що має, як вважається, придатну для інженерних потреб точність [10]

$$P_h = \eta B_{\max}^{1.6}, \quad (7)$$

де η – коефіцієнт, який залежить від властивостей сталі.

Для заліза різної чистоти та термічної обробки у [10] надано досить широкий діапазон цього коефіцієнту, а саме 0,001...0,003. Для трансформаторних сталей з високим вмістом кремнію (до 4%) діапазон цього коефіцієнту складає 0,0007...0,0010 [10]. Вміст кремнію в сталі 20 складає 0,17...0,37% [11] і значення цього коефіцієнту слід очікувати у вищезгаданому діапазоні для заліза. Для вуглецевої сталі в залежності від термообробки діапазон η складає 0,008...0,025 [10]. Сталь 20 є низьковуглецевою з вмістом вуглецю 0,17...0,25% [11]. Тому для оцінки втрат на гістерезис за формулою можна передбачати значення коефіцієнту η в діапазоні 0,0015...0,002.

Результати розрахунку складових і сумарних втрат в статорі

$$P = P_{ec} + P_h, \quad (8)$$

а також дані їхнього вимірювання в залежності від швидкості обертання наведено на рис. 6 за умови значення коефіцієнту $\eta=0,0015$ і узгодження розмірності відповідних величин (формулу Штейнметца у [10] наведено у системі одиниць СГС). Слід зазначити, що візуальна лінійність залежності втрат на гістерезис від частоти (швидкості обертання) це відомий факт [12]. Але отримана залежність – це інтегральна характеристика. А внаслідок поверхневого ефекту та перерозподілу поля з ростом швидкості обертання в різних шарах така лінійність може не спостерігатися. Також треба відзначити, що поєднання квадратичної залежності втрат на вихрові струми та майже лінійної залежності втрат на гістерезис дає кривизну сумарної залежності, яка задові-

мок силових ліній, поле в області торця магніту, збуджує поле, суттєво відрізняється від поля в центральному перетині. З приводу цього до використання двовимірних моделей треба відноситися критично, обов'язково враховуючи величину відносної довжини машини.

На другому етапі розраховувалася потужність втрат в магнітопроводі, встановленому на гільзі експериментальної установки (рис. 1). Розрахунки проводилися для кількох варіантів сітки. Задля визначення втрат від вихрових струмів P_{ec} локальні втрати, що в інтерфейсі "Magnetic and Electric Fields" позначені Q_{rh} , інтегрувалися за об'ємом статора V_s

$$P_{ec} = 4 \int_{V_s} Q_{rh} dV. \quad (6)$$

Коефіцієнт 4 у виразі (6) введено задля урахування симетрії.

Окрім втрат на вихрові струми у феромагнітному матеріалі завжди присутні втрати на гістерезис. Докладно ці втрати для магнітопроводів трансформаторів дослід-

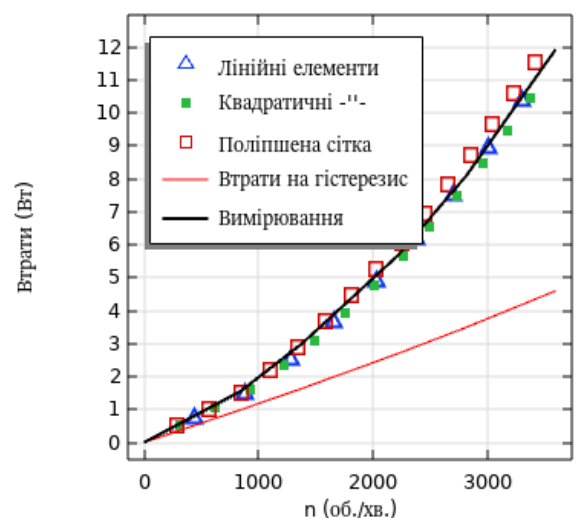


Рис. 6. Залежність сумарних втрат та втрат від гістерезису від швидкості обертання

льно повторює експериментальну і, таким чином, відображає розподіл втрат різної природи у феромагнітному середовищі.

Треба відмітити, що застосування двовимірної моделі магнітного поля дало значення втрат на вихрові струми на 15...25% більше. Тому для розрахунку магнітних втрат і, врешті, обертового моменту для машин з відношенням довжини магнітопроводу l_δ до внутрішнього діаметру статора D_S (відносна довжина машини) близько двох (рис. 1) принципово використовувати тривимірну модель поля.

На третьому етапі відповідно до мети роботи оцінено вплив втрат у масивному статорі безпосередньо на обертовий момент двигуна. Для цього було достатньо в статичному стані обчислити максимальний момент M_{max} , коли вектор МРС обмотки спрямований перпендикулярно до поля магніту, і потім обчислити різницю між отриманою величиною та паразитним моментом, викликаним втратами в феромагнітному масиві статора. Оскільки априорі жодних припущень про схему обмотки не було зроблено, будемо вважати, що в повітряному проміжку розташовано обмотку з синусоїдальним розподілом МРС, тобто відповідним розподілом еквівалентної щільності струму.

Впливом лобових частин знехтуємо, оскільки лобові частини еквівалентної двополусної обмотки, як витікає з розмірів на ескізі (рис. 1), виходили б за межі поля магніту ротора. Тоді під час розрахунків можна обмежитися двовимірною моделлю поля, де щільність струму має одну просторову складову J_z

$$J_z = J_m \cos \varphi, \quad (9)$$

де J_m – амплітудне значення щільності струму; φ – кутова координата. Прийmemo розмір технологічного повітряного проміжку між статором та ротором 0,5 мм, що характерно для конструкцій безпазових машин [1, 3]. Прийmemo також діюче значення щільності струму 8 А/мм^2 , що близько до максимально допустимого за умовами теплового режиму обмотки. На рис. 7 наведено розподіл щільності струму (інтенсивність кольору) в області обмотки, а також силові лінії результуючого магнітного потоку за умов зупиненого ротора та кута зсуву 90° між вектором МРС обмотки (він спрямований вздовж вертикальної осі) та напрямком намагніченості магніту ротора (на рис. 7 поле магніту спрямоване вздовж горизонтальної осі). Саме так досягається максимальне значення обертового моменту M_{max} . Незначне відхилення силових ліній в області ротора від горизонтального напрямку відображає факт, що поле якорної обмотки дуже незначно впливає на поле висококоерцитивного магніту і, врешті, на результуюче поле [1, 3].

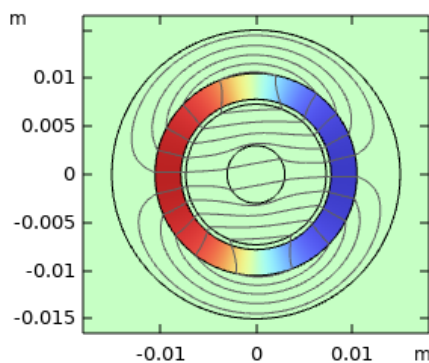


Рис. 7. Поле густини струму обмотки (колір) та ізолінії результуючого магнітного потоку (для обчислення максимального моменту)

Результуючий обертовий момент через сумарні втрати P визначається за формулою

$$M = M_{max} - \frac{P}{\omega_R}. \quad (10)$$

Отримані залежності результуючого моменту від швидкості обертання ротора n наведено на рис. 8. Оскільки сумарні питомі втрати від гістерезису та вихрових струмів описуються виразом [10, 12]

$$p = p_h \frac{f}{50} B_m^{1,6} + p_{ec} \frac{f^2}{50} B_m^2, \quad (11)$$

де p_h , p_{ec} – питомі втрати на гістерезис та вихрові струми відповідно; f – частота поля; B_m – амплітуда магнітної індукції, будучи поділений на частоту вираз (11) перетворюється на лінійну залежність. Цей факт пояснює характер графіків обертового моменту на рис. 8, що близький до лінійного.

Висновки. Безпазові магнітоелектричні мікродвигуни циліндричної конструкції з масивним осердям статора мають переваги в умовах потреб низької собівартості

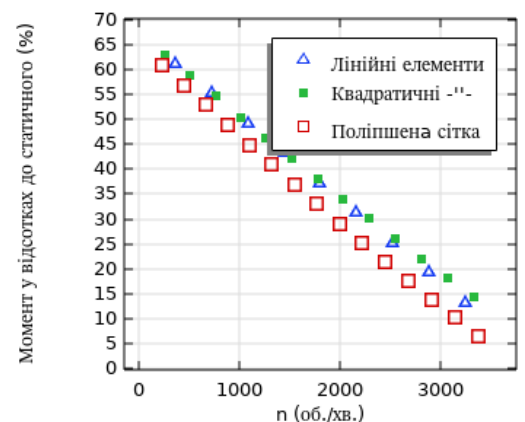


Рис. 8. Обертовий момент безпазового двигуна з масивним осердям статора

конструкції та швидкої підготовки серійного виробництва. Їхнім недоліком є різке зниження обертового моменту зі зростанням швидкості обертання. Отримані залежності дають можливість з високим ступенем ймовірності оцінити це зниження. Так, за умов швидкості обертання 1000 об./хв. зниження обертового моменту за рахунок втрат від гістерезису та вихрових струмів становить приблизно 50%, що обмежує сферу застосування таких двигунів низькообертовими пристроями, наприклад, моментними приводами.

Використана методика розрахунку втрат від вихрових струмів на основі моделювання тривимірного магнітного поля і втрат від гістерезису за допомогою формули Штейнметца у вказаних типах двигунів дає задовільне співпадання з експериментом і може бути рекомендована для досліджень механічних характеристик подібних мікродвигунів інших геометричних розмірів за умов достатніх даних про питомі втрати на гістерезис. Важливим моментом в даній методиці є застосування тривимірної моделі електромагнітного поля для відносно коротких машин (відносна довжина близько двох та менше) радіального виконання.

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

1. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. К.: Компас, 2011. 216 с.
2. Petukhov I.S., Kireyev V.G., Akinin K.P., Lavrinenko V.A. Decreasing Torque Ripple of a Slotless Permanent Magnet Torque Motor Using a Double-Layer Winding. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.057>.
3. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the Development of Slotless Brushless Magnetolectric Torque Motors. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>.
4. Paulides J.J.H., Meessen K.J., Lomonova E.A. Eddy-Current Losses in Laminated and Solid Steel Stator Back Iron in a Small Rotary Brushless Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Trans. Magn.* 2008. Vol. 44. No 11. Pp. 4373–4376. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001996>.
5. Friedrich L.A.J., Gysen B.L.J., Jansen J.W., Lomonova E.A. Analysis of Motional Eddy Currents in the Slitted Stator Core of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020. Vol. 56. No 2. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2953625>.
6. Характеристики марки сталі 20. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/20> (accessed 2024-12-15).
7. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1970. 632 с.
8. COMSOL – Software for Multiphysics Simulations. URL: <https://www.comsol.com/?ref=lovejay.top> (дата доступу 15.12.2024).
9. Zirka S.E., Moroz Y.I., Chiesa N., Harrison R.G., Høidalen H.Kr. Implementation of Inverse Hysteresis Model Into EMTP. Part I: Static Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 5. Pp. 2224–2232. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2416201>.
10. Миткевич В.Ф. Физические основы электротехники. Л.: Социалист, 1933. 449 с.
11. Metinvest-smc. Вуглецева сталь: класифікація, маркування, застосування. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/uglerodistaya-stal-klassifikaciya-markirovka-primenenie/> (дата доступу 19.12.2024).
12. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Т. 1. М.: Мир, 1982. 416 с.

RESEARCH OF LOSSES AND TORQUE OF A SLOTLESS MAGNETOELECTRIC MOTOR WITH A SOLID STATOR CORE

I.S. Petukhov, V.G. Kireyev, K.P. Akinin, Ye.V. Isaiev
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: igor_petu@ukr.net.

The efficiency of the structure and the low cost of preparation of production of non-steady electric motors with permanent magnets and massive stator core. The design of the experimental installation for measuring losses in a solid stator core will be laid out. The stages of the method of calculating these losses are formulated. To calculate the losses from eddy currents used the software complex "Comsol multiphysics". The hysteresis losses were calculated by the Steinmetz formula. For different density of the calculated grid, the loss of losses in the massive core was made and a comparison

was made with the results of measurements in the rotation speed range 0...3600 rpm. To calculate the maximum moment in statics, a model of winding with a sinusoidal spatial form of MRS was used. The dependences of the rotational moment on the speed of rotation in the study range was computed. Sufficient accuracy of the calculation methodology is noted. References 12, figures 8, tables 1.

Keywords: magnetoelectric motor, permanent magnets, solid stator core, torque.

1. Antonov A.Ie. Electric machines of magnetoelectric type. Kiev: Kompas, 2011. 216 p. (Rus)
2. Petukhov I.S., Kireyev V.G., Akinin K.P., Lavrinenko V.A. Decreasing Torque Ripple of a Slotless Permanent Magnet Torque Motor Using a Double-Layer Winding. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 4. Pp. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.057>.
3. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the Development of Slotless Brushless Magnetoelectric Torque Motors. *Pr. Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukraïni*. 2022. Vyp. 63. Pp. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>.
4. Paulides J.J.H., Meessen K.J., Lomonova E.A. Eddy-Current Losses in Laminated and Solid Steel Stator Back Iron in a Small Rotary Brushless Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Trans. Magn.* 2008. Vol. 44. No 11. Pp. 4373–4376. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001996>.
5. Friedrich L.A.J., Gysen B.L.J., Jansen J.W., Lomonova E.A. Analysis of Motional Eddy Currents in the Slitted Stator Core of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2020. Vol. 56. No 2. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2953625>.
6. Characteristics of steel grade 20. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/20> (accessed 2024-12-15). (Ukr)
7. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goriainov F.A. Design of Electrical Machines. Moskva: Energiia, 1970. 632 p. (Rus)
8. COMSOL – Software for Multiphysics Simulations. URL: <https://www.comsol.com/?ref=lovejay.top> (accessed at 15.12.2024).
9. Zirka S.E., Moroz Y.I., Chiesa N., Harrison R.G., Høidalen H.Kr. Implementation of Inverse Hysteresis Model Into EMTP. Part I: Static Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 5. Pp. 2224–2232. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2416201>.
10. Mitkevich V.F. Physical foundations of electrical engineering. Leningrad: Sotsialist, 1933. 449 p. (Rus)
11. Metinvest-smc. Carbon steel: classification, marking, application. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/uglerodistaya-stal-klassifikaciya-markirovka-primenenie/> (accessed at 19.12.2024). (Ukr)
12. Ivanov-Smolensky A.V. Electrical Machines. Vol. 1. Moskva: Mir, 1982. 416 p. (Rus)

Надійшла 23.12.2024
Остаточний варіант 25.02.2025