

## РОТОРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Макарчук О. В., к.т.н, доц., Шаповалов І. Г., м.н.с.  
 Національний Університет "Львівська політехніка"  
 вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна,  
 E-mail: makar\_lp@rambler.ru

Досліджується вплив конструкції ротора на величину пульсацій електромагнітного моменту у безконтактних двигунах зі збудженням від постійних магнітів.

**Ключові слова:** безконтактний двигун, зовнішнє та внутрішнє розташування магнітів, пульсації електромагнітного моменту

**Вступ.** Безконтактні двигуни зі збудженням від постійних магнітів (ПМ) все частіше застосовуються в електроприводах, де традиційно використовувалися машини постійного струму — позиційний сервопривод, приводи слідкуючих систем, моментний привод на інфранизьку частоту обертання, тощо. В даних приводах ці машини, що згідно з міжнародною класифікацією називаються PMSM (анг. *Permanent Magnet Synchronous Motor*), живляться від  $m$ -фазного джерела синусоїдної чи квазісинусоїдної напруги або струму, фази яких залежать від кута повороту ротора, а частота — від частоти обертання. Такий спосіб живлення надалі називатимемо неперервним.

Однією з основних експлуатаційних вимог, що ставиться до таких двигунів — це забезпечення заданого значення моменту на валі, величина якого не повинна залежати від кута повороту ротора. Іншими словами, мінімізація величини пульсації електромагнітного моменту може розглядатися як одна з головних задач проектування таких машин. Проте, відсутність методик проектування, різноманітність конструкцій PMSM, зокрема роторів, нечіткі рекомендації щодо області застосування тої чи іншої конструкції ротора ускладнюють цей процес.

Сподіваємось, що представлене дослідження допоможе у створенні нових та модернізації існуючих видів безконтактних двигунів зі збудженням від ПМ.

**Аналіз попередніх досліджень.** У багатьох публікаціях PMSM розглядаються як традиційні синхронні машини, що працюють паралельно з мережею [1-4]. Рекомендації щодо вибору конструкції ротора ґрунтуються на оптимізації величин і співвідношень індуктивностей машини по повздовжній та поперечній осях  $L_d$  та  $L_q$ , що, як відомо, впливають на максимальний момент, перевантажувальну здатність (статичну перевантажувальність), параметри статичної та динамічної стійкості та ін. У випадках, коли PMSM працює із системою керування, здатною формувати струм необхідної форми та частоти, вищезгадані показники залежатимуть, в першу чергу, від функціональних можливостей цієї системи керування.

У пропонованому дослідженні до уваги будуть братися лише ті чинники, які безпосередньо впливатимуть на величину пульсацій електромагнітного моменту й залежатимуть лише від конструкції ротора, а точніше, від форми та способу розташування полюсів з постійних магнітів.

Розглядатимемо кілька конструкцій ротора, які судячи з огляду періодичних видань [5-7], останніх мо-

нографій [8] та дисертацій [9] найбільш широко застосовуються у вищезгаданих приводах. Це ротори традиційної конструкції, в яких полюси утворені з ПМ дугоподібної форми та закріплені на зовнішній поверхні феромагнітного осердя. У англійських виданнях такі ротори називають SPM (анг. *Surface Permanent Magnet*). Відрізняються вони формою повітряного проміжку, який утворюється між статором і ротором — концентричний або нерівномірний (більший під краями полюсів) та коефіцієнтом полюсної дуги  $\alpha_\delta = b_p / \tau$ , де  $b_p$  — тангенціальна ширина полюса,  $\tau$  — полюсна поділка. Зміною цих проектних параметрів досягають такого розподілу магнітного поля в повітряному проміжку, який наблизатиметься до синусоїдного, що в свою чергу, за умови неперервного живлення, зменшує пульсацію електромагнітного моменту обумовлену вищими гармонічними.

Інший тип роторів, так званий IPM (анг. *Interior Permanent Magnet*), містить полюси з ПМ, що закладено, в спеціально створених, закритих пазах, в тілі осердя ротора. Проектними параметрами таких роторів, які впливають на величину та напрям вектора магнітної індукції в повітряному проміжку, будуть розміри ПМ, спосіб їх розташування в тілі осердя та ширина мостика насичення, що шунтуватиме частину магнітного потоку ПМ на краях магнітів. Як і в попередній конструкції, намагаються забезпечити синусоїдний розподіл радіальної складової вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  в проміжку.

**Мета роботи.** Об'єктами дослідження обрано ротори PMSM чотирьох різних конструкцій:

- з явновираженими полюсами у вигляді дугоподібних сегментів, розташованих на зовнішній поверхні осердя ротора, надалі цей ротор називатимемо — ротор № 1;
- з полюсами у вигляді дугоподібних сегментів, що заглиблені у пази відповідної форми, назовні осердя ротора, — ротор № 2;
- з полюсами у вигляді прямокутних призм, що розташовані у закритих «тангенціальних» пазах, — ротор № 3;
- з полюсами у вигляді прямокутних призм, що розташовані у закритих V-подібних пазах, — ротор № 4.

Ротори № 1 і № 2, що відповідають типу SPM зображено на рис. 1,а,б; ротори № 3 і № 4 типу IPM — на рис. 1,в,г відповідно.

Метою дослідження є вироблення рекомендацій щодо застосування роторів даних типів, з'ясування впливу конструкції цих роторів, їх розмірів і проект-

них параметрів на рівень пульсацій електромагнітного моменту, за умови неперервного живлення PMSM.

**Матеріал і результати дослідження.** Для дослідження обрано два прототипи безконтактних машин, які випускаються серійно фірмою BOBRME „Komel” (Польща). Це двигуни марок IPMSg132 S4 PMSM та PMSg132 S4 BLDC, які мають практично однакові паспортні дані (номінальні потужність 4 кВт, напруга живлення 400 В, частота обертання 1500 об/хв). Відрізняються ці машини конструкцією ротора: двигун IPMSg132 S4 PMSM містить ротор з заглибленими ПМ (рис. 1,в), PMSg132 S4 BLDC — ротор класичної конструкції (рис. 1,а).

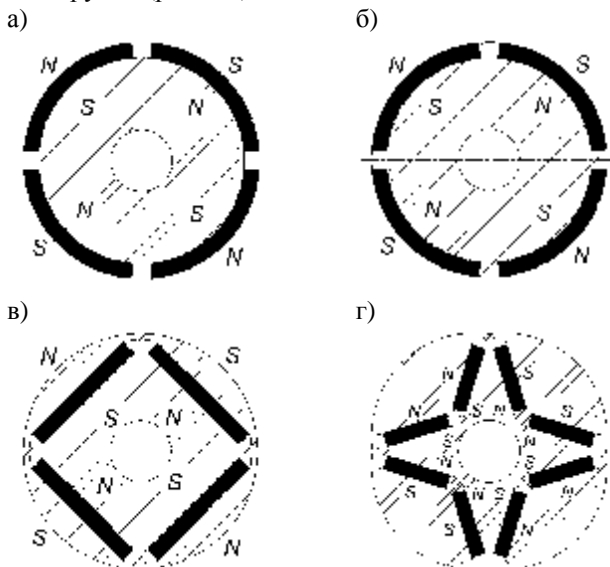


Рисунок 1 – Конструкції роторів різних типів

Дослідження проводитимемо розрахунковим шляхом. Для цього користуємося методом скінченних елементів (МСЕ) і спеціалізованим програмним забезпеченням, що дозволяє розв’язувати задачу магнітостатики, тобто, здійснювати розрахунок магнітного поля за заданими граничною умовою й густиною струмів  $\vec{J}$  в струмопровідних областях. Ця задача формулюється на підставі поняття векторного магнітного потенціалу  $\vec{A}$ . МСЕ зводиться до знаходження мінімуму деякого, пов’язаного з енергією магнітного поля, нелінійного функціоналу, що дає наближений (з заданою точністю) розподіл поля магнітного потенціалу. Решта силових характеристик поля (індукція та напруженість) знаходять за формулами. В даному випадку, розглядається функціонал виду:

$$F[\vec{A}] = \int_S W[\vec{A}] d\vec{S} - \int_S \vec{J} \vec{A} d\vec{S}, \quad (1)$$

де  $W[\vec{A}]$  – густина енергії магнітного поля, що відповідає потенціалові  $\vec{A}$ . У загальному випадку, вона обчислюється як

$$W = \int \vec{H} d\vec{B}. \quad (2)$$

а)

Враховуючи (2) та характеристику намагнічування  $\vec{H} = H[\vec{B}]$ , функціонал (1), для двовимірного формулювання задачі, запишеться як

$$F = \int_S \left( \int_0^{B_x} v \cdot B_x dB_x + \int_0^{B_y} v \cdot B_y dB_y \right) d\vec{S} - \int_S A_z \cdot J_z d\vec{S}, \quad (3)$$

де  $B_x, B_y$  – проекції вектора індукції магнітного поля на відповідні осі системи координат.

Виділені, після такого розрахунку поля, радіальна  $B_r = |\vec{B}| \cos(\arctan(y/x) - \arctan(B_y/B_x))$  та тангенціальна  $B_\tau = |\vec{B}| \sin(\arctan(y/x) - \arctan(B_y/B_x))$  складові  $\vec{B}$  у повітряному проміжку залежності від кутової координати  $\gamma$ , °ел. зображено на рис. 2.

Для кількісного оцінювання отриманих результатів, табличні функції  $B_r[\gamma]$  розкладено у ряд Фур’є. Враховувались 20 гармонік, отже амплітуди гармонік визначалися на підставі 41-го табличного значення функції  $B_r[\gamma]$ .

Гармонічний склад радіальної складової вектора  $\vec{B}$  у повітряному проміжку, для роторів різних типів наведено у табл. 1.

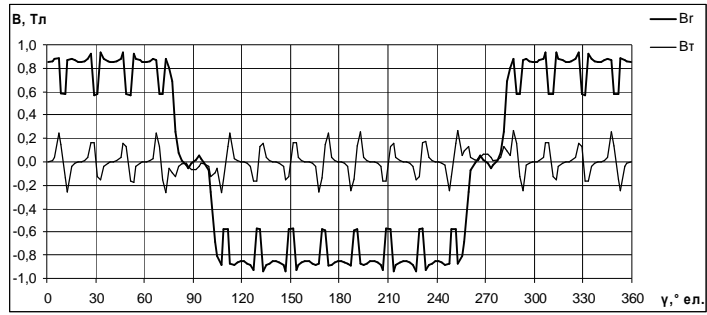
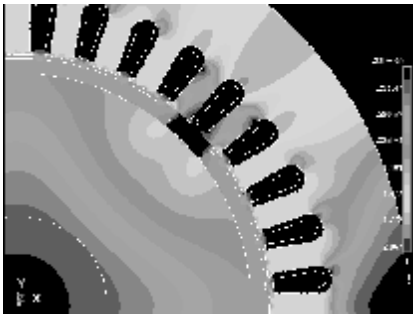
Зазначено амплітуди лише непарних гармонік, причому амплітуди гармонік «зубцевих» порядків не враховуються. Це пов’язано з тим, що проектні параметри, які розглядаються в даному дослідженні, безпосередньо не впливають на їх величину.

У конструкції ротора № 1 зменшення  $\alpha_\delta$ , безсумнівно, зменшує результуючий магнітний потік та середнє значення електромагнітного моменту. Збільшення значення  $\alpha_\delta$  понад 0,9 не призводить до помітного зростання потоку, оскільки його частина замикається на сусідній полюс, через осердя, й не створюватиме моменту. Зміна параметра  $\alpha_\delta$  не здійснює значного впливу на зменшення вищих гармонік поля. Його значення в діапазоні 0,75÷0,87 можуть вважатися прийнятними для роторів даного типу.

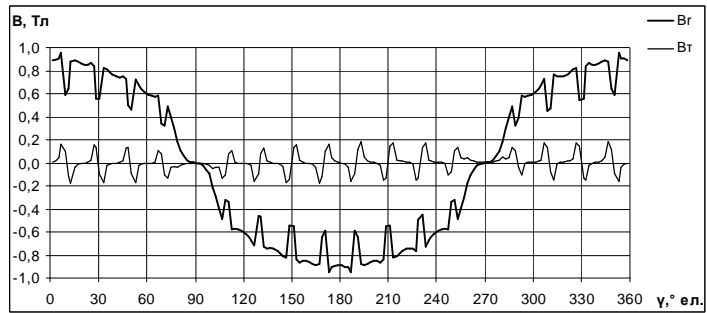
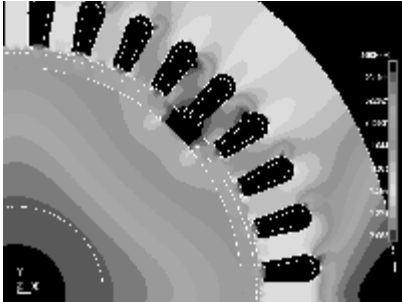
Створення нерівномірного повітряного проміжку, більшого під краями магнітів, для роторів типу SPM кардинально зменшує практично всі непарні гармоніки поля, що безперечно впливатиме на якість електромагнітного моменту.

Особливості конструкції ротора № 2 незначно позначаються на покращанні гармонічного складу поля. Проте, в ній змінено співвідношення між індуктивними опорами по поздовжній та поперечній осях  $L_q \geq L_d$ . Це може призвести до створення гальмівного релактансного моменту, однак, з іншого боку, сприятиме збільшенню переважувальної здатності PMSM, що працюють паралельно з мережею.

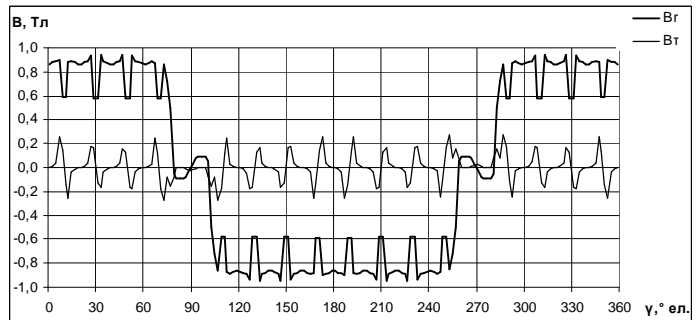
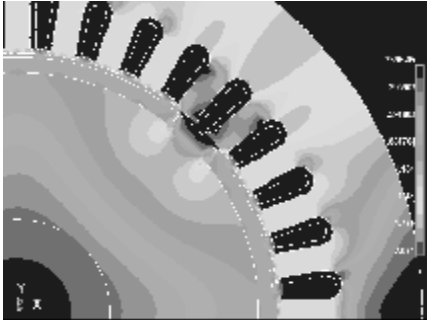
Потік ротора № 3 має істотно меншу величину, порівняно з аналогічними за розмірами конструкціями роторів № 1 і № 2.



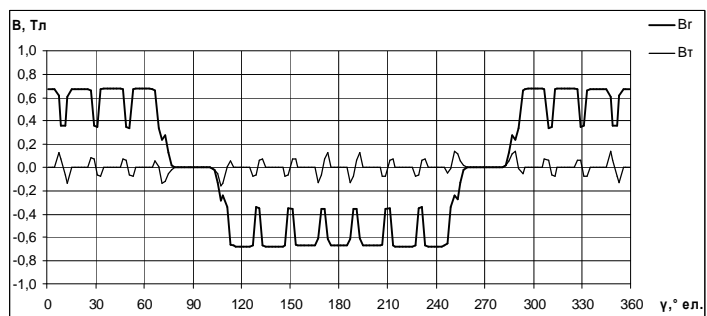
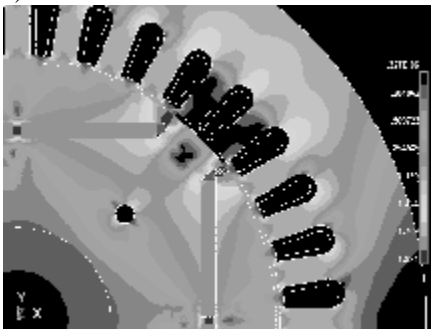
б)



в)



г)



д)

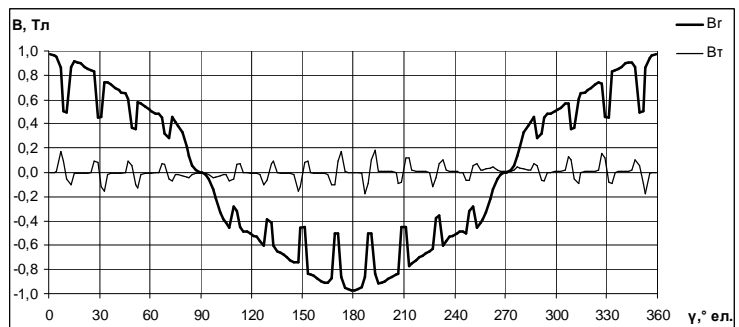
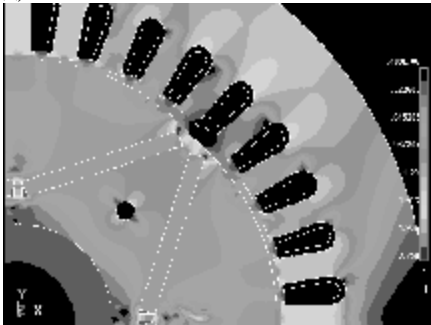


Рисунок 2 – Поле вектора  $\vec{B}$ , залежності його радіальної  $B_r$  та тангенціальної  $B_\tau$  складових від кугової координати  $\gamma$  для роторів різних типів: а) ротор № 1 (проміжок рівномірний); б) ротор № 1 (проміжок нерівномірний); в) ротор № 2; г) ротор № 3; д) ротор № 4

**Таблиця 1 – Порівняння гармонічного складу поля роторів різних типів**

Тип ротора	Ротор №1 (проміжок рівномірний)				
№ гармоніки	1	3	5	7	9
Амплітуда, Тл	1,010	0,269	0,097	0,014	0,060
Амплітуда, %	100,00	26,63	9,60	1,39	5,94
Тип ротора	Ротор №1 (проміжок нерівномірний)				
№ гармоніки	1	3	5	7	9
Амплітуда, Тл	0,917	0,103	0,028	0,001	0,038
Амплітуда, %	100,00	11,23	3,05	0,10	4,14
Тип ротора	Ротор №2				
№ гармоніки	1	3	5	7	9
Амплітуда, Тл	1,013	0,245	0,059	0,031	0,104
Амплітуда, %	100,00	24,19	5,82	3,06	10,27
Тип ротора	Ротор №3				
№ гармоніки	1	3	5	7	9
Амплітуда, Тл	0,727	0,148	0,002	0,062	0,097
Амплітуда, %	100,00	20,36	0,32	8,53	13,34
Тип ротора	Ротор №4				
№ гармоніки	1	3	5	7	9
Амплітуда, Тл	0,865	0,049	0,057	0,028	0,007
Амплітуда, %	100,00	5,66	6,59	3,24	0,86

Це, в свою чергу, зменшує питомі енергетичні показники машини. На форму поля в проміжку, в такій машині, можна впливати шириною «мостиків насичення» поміж полюсами протилежної полярності. Своєрідні полюсні наконечники, в цій конструкції, «вирівнюють» нерівномірність розподілу поля під різними полюсами, спричинену технологічними чинниками виготовлення ПМ.

На нашу думку, основною перевагою конструкції ротора типу IPM, за умови виготовлення осердя шихтованим з електротехнічної сталі, є зменшення втрат від вихрових струмів у тілі ПМ, що виконані з струмопровідних сплавів, наприклад SmCo, AlNiCo, NdFeB. Ці втрати, спричинені пульсаціями поля «зубцевих» порядків на поверхні осердя ротора, досягають істотних значень у високошвидкісних машинах.

За рахунок V-подібного розташування магнітів, збільшена величина магнітного потоку в конструкції ротора №4, порівняно з №3. Відповідне профілювання поверхні осердя цього ротора, що забезпечує нерівномірний робочий повітряний проміжок, аналогічний конструкції на рис. 2, б, дозволяє забезпечити розподіл поля близький до синусоїдного. Також, цій конструкції притаманні всі переваги ротора № 3.

Подальше дослідження роторів спрямоване на відтворення форми та величини електромагнітного моменту, з комплексним урахуванням усіх чинників, що впливатимуть на нього, в реальних умовах роботи машини, у їх взаємозв'язку, а саме: реакції якоря, враховуючи насичення магнітопроводу; реального гармонічного складу намагнічувальної сили якірної обмотки, враховуючи гармоніки зубцевих порядків; магнітної анізотропії полюсів індуктора за двома просторовими координатами; реактивних моментів, спричинених силовою взаємодією ПМ із конструкційними елементами магнітопроводу. Для цього побудуємо математичну модель для розрахунку електромеханічних перехідних процесів у PMSM із досліджуваними конструкціями роторів. Результати моделювання дозволять побачити зміну величини електромагнітного

моменту в часі, за живлення обмоток цих машин від ідеалізованого трифазного джерела синусоїдного струму, фази якого залежать від біжучого положення ротора.

За живлення від джерела струму, система рівнянь, що описує процеси у PMSM, не містить рівнянь електричної рівноваги напруг. Це істотно зменшує кількість рівнянь та спрощує модель.

Рівняння механічної рівноваги

$$-J \frac{dw}{dt} + M - M_c = 0; \quad w = \frac{dg}{dt}, \quad (4)$$

де  $J$  – момент інерції обертових частин двигуна;  $M_c$  – момент статичного навантаження;  $\omega, \gamma$  – кутова частота обертання та кут повороту ротора, відповідно.

Формули для визначення миттєвих значень фазних струмів живлення як функцій кута повороту ротора, матимуть вигляд

$$i_1 = I_m \sin(p\gamma + j_1); \quad i_2 = I_m \sin(p\gamma + j_2); \quad (5)$$

$$i_3 = I_m \sin(p\gamma + j_3),$$

де  $p$  – кількість пар полюсів машини.

Вираз для визначення електромагнітного моменту, формально, запишемо як

$$M = M[i_1, i_2, i_3, \gamma]. \quad (6)$$

Однак, для потреб проектування PMSM, для розрахунку їх параметрів та характеристик, розв'язання оптимізаційних задач обов'язково виникне необхідність у визначенні решти невідомих, які притаманні даному об'єктові дослідження. Зокрема, для обчислення потокозчеплень  $\psi$ , а за необхідності ЕРС контурів статора, використовуватимемо вирази

$$\psi_1 = \psi[i_1, i_2, i_3, \gamma]; \quad \psi_2 = \psi[i_1, i_2, i_3, \gamma]; \quad (7)$$

$$\psi_3 = \psi[i_1, i_2, i_3, \gamma].$$

Отже, задача розрахунку електромеханічних перехідних процесів у PMSM, що живиться від джерела струму, потребуватиме чисельного інтегрування системи алгебро-диференційних рівнянь (САДР) (4)-(6), а потім, за відомими значеннями струмів  $i_1, i_2, i_3$  та кута повороту ротора  $\gamma$ , обчислення за (7) значень потокозчеплень  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ .

САДР (4)-(6) складається із шести скалярних рівнянь і містить стільки ж скалярних невідомих:  $i_1, i_2, i_3, M, g, w$ . Доповнюючи її початковою умовою  $g|_{t=t_0}, w|_{t=t_0}$ , отримуємо формулювання задачі Коші.

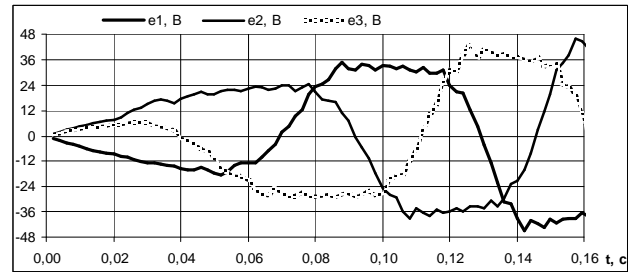
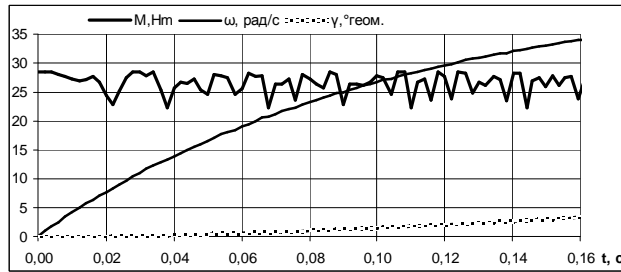
Зауважимо, що величини (6), (7), а за необхідності і їх похідні, обчислюються на підставі інтегрального аналізу двовимірного магнітного поля, яке розраховується МСЕ, на засадах, описаних вище.

Як вже згадувалося, прототипами для математичних експериментів обрано двигуни марок IPMSg132 S4 PMSM та PMSg132 S4 BLDC. Досліджувався пуск під навантаженням. Результати моделювання, у вигляді графічних залежностей від часу невідомих  $M, \omega$  та  $\gamma$ , показано на рис. 3.

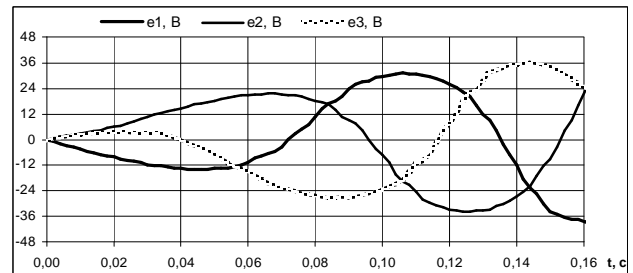
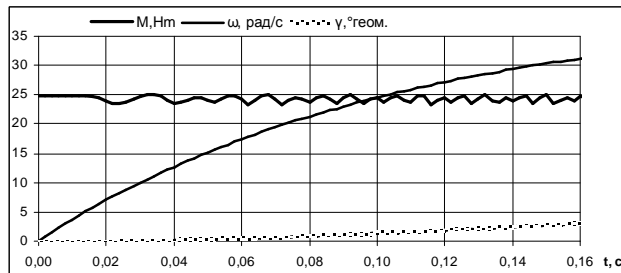
Момент інерції їх обертових частин становить –  $J = 0,0646 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Амплітудне значення фазного струму живлення дорівнює  $I_m = \sqrt{2} \cdot 9,0 \approx 12,7 \text{ А}$ .

Початкові фазові зсуви –  $\varphi_1 = 1,745 \text{ рад}$  ( $100^\circ$ ),  $\varphi_2 = -0,3491 \text{ рад}$  ( $-20^\circ$ ),  $\varphi_3 = 2,443 \text{ рад}$  ( $-140^\circ$ ). Ста-

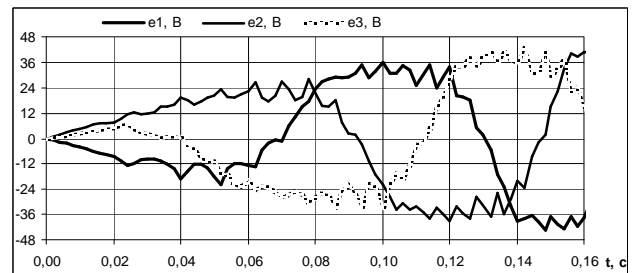
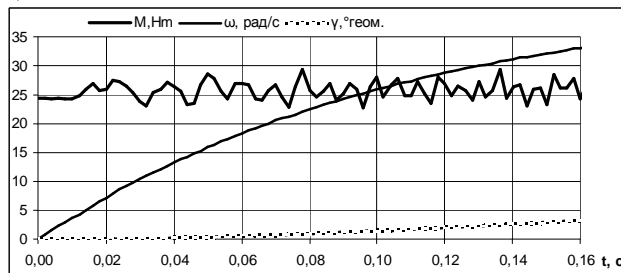
тичний момент навантаження  $M_c$ , пропорційний частоті обертання, вираховується як  $M_c = -M_n \omega / \omega_n$ , де  $\omega_n = 41,9 \text{ рад/с}$  – номінальна частота обертання;  $M_n = 25,5 \text{ Нм}$  – номінальний момент навантаження.



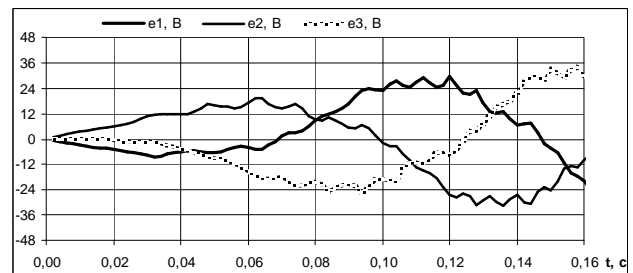
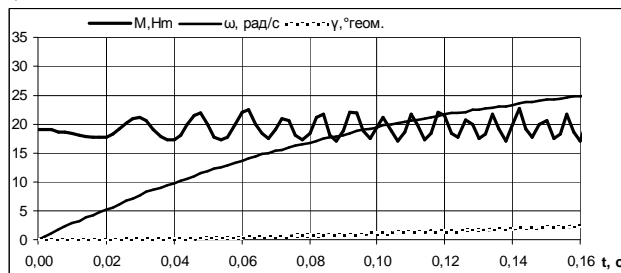
б)



в)



г)



д)

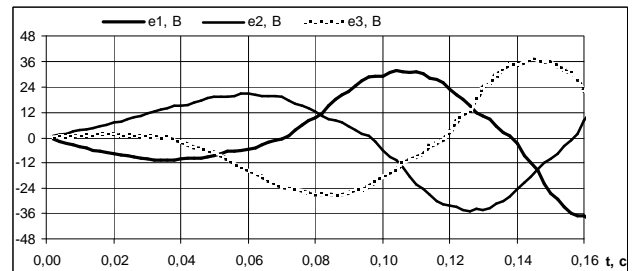
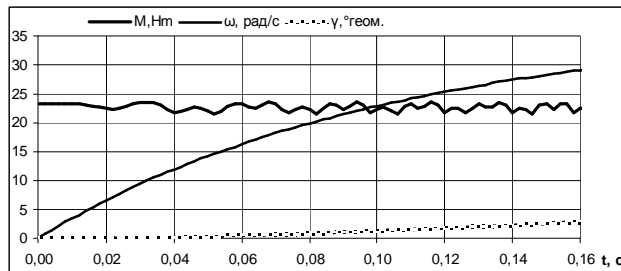


Рисунок 3 – Залежності від часу моменту  $M$ , частоти обертання  $\omega$ , кута повороту ротора  $\gamma$  та фазних ЕРС  $e_1, e_2, e_3$  для роторів різних типів: а) ротор № 1 (проміжок рівномірний); б) ротор № 1 (проміжок нерівномірний); в) ротор № 2; г) ротор № 3; д) ротор № 4

Додатково розраховано фазні ЕРС  $e_1, e_2, e_3$  та зображено на тому ж рисунку.

Як бачимо з графіків, результати моделювання динамічних процесів в машинах типу PMSM підтверджують висновки, отримані раніше. Середні значення електромагнітного моменту та його пульсації, для роторів різних типів зведено в табл. 2.

**Таблиця 2 – Порівняння якості моменту для роторів різних типів**

Тип ротора	Середнє значення моменту, Нм	Пульсація моменту, %
Ротор №1 (проміжок рівн.)	26,5	23,6
Ротор №1 (проміжок нерівн.)	26,3	6,5
Ротор №2	25,7	26,0
Ротор №3	19,3	28,7
Ротор №4	22,7	9,1

**Висновки.** Серед розглянутих конструкцій ротори типу SPM створюють найбільший за величиною питомий електромагнітний момент на одиницю об'єму ротора.

Профілювання поверхні осердя ротора дозволяє досягнути такого розподілу поля, в утвореному нерівномірному проміжку між статором та ротором, що, за неперервного живлення якоря, забезпечуватиме мінімальну пульсацію електромагнітного моменту.

Для двигунів типу PMSM, у яких частота «зубцевої» гармоніки  $f_z = Z \frac{n_n}{60}$ , де  $Z$  - кількість зубців статора;  $n_n$  - номінальна частота обертання, об/хв., не перевищує 800÷1200 Гц доцільно застосовувати конструкцію ротора № 1, з нерівномірним проміжком, а для більших частот — ротор № 4.

## ЛІТЕРАТУРА

1. A.Wang, H.Li, W.Lu, H.Zhao, Influence of skewed and segmented magnet rotor on IPM machine performance and ripple torque for electric traction. Electric Machines and Drives Conf., 2009. IEMDC '09. IEEE International. – 2009–p. 305–310.
2. Rahman, F. Dutta, R. A new rotor design of interior permanent magnet machine suitable for wide speed range. Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conf. of the IEEE. – 2004. – vol.1. P.699.
3. Lovelace, E.C. Keim, T. Lang, J.H. Wentzloff, D.D. Jahns, T.M. Wai, J. McCleer, P.J. Design and experimental verification of a direct-drive interior PM synchronous machine using a saturable lumped-parameter model// Ind. Applicat. Conf., 2002. 37th IAS Annual Meeting. 2002. – vol.4, P.2486–2492.
4. A.Isfahani, S.Sadeghi. Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine for the Hybrid Electric Vehicle// World Academy of Science, Engineering and Technology, 45.– 2008.– P. 566–570.
5. Wen L. Soong, N. Ertugrul. Field-Weakening Performance of Interior Permanent-Magnet Motors//IEEE Trans. Industry Applicat.–2002.– vol.38, – № 5.– P.1251–1258.
6. H. Ghassemi, S. Vaez-Zadeh. A very fast direct torque control for interior permanent magnet synchronous motors start up//Energy Conversion and Management–2005.–46. P.715–726.
7. S.Wang, J.Kang, Shape optimization of BLDC motor using 3-D finite element method//IEEE Trans. on Magnetics.– 2000.–vol. 36.–№ 4. P. 1119–1123.
8. Pyrhonen, J. Design of rotating electrical machines / Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova; translated by Hanna Niemela, 2008.– 512 p.
9. Pyrhonen, J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. Dissertation, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 249, ISBN 952-214-296-4, 2006, 147 p.

Стаття надійшла 04.02.2011 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Прусом В.В.

## РОТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

*Макарчук А.В., к.т.н, доц., Шаповалов И.Г., м.н.с,  
Национальный Университет "Львовская политехника"  
ул. С.Бандеры, 12, 79013, г. Львов, Украина,  
E-mail: makar\_lp@rambler.ru*

Исследуется влияние конструкции ротора на величину пульсаций электромагнитного момента в бесконтактных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов.

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель, внешнее и внутреннее расположение магнитов, пульсации электромагнитного момента.

## ROTORS OF THE ELECTRICAL MOTORS WITH AN EXCITATION OF PERMANENT MAGNET

*Makarchuk A., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Shapovalov I., Resear.  
Lviv Polytechnic National University  
vul. Bandery, 12, 79013, Lviv, Ukraine,  
E-mail: makar\_lp@rambler.ru*

The effect of rotor design on the magnitude of an electromagnetic torque ripples in the brushless motors excitation of permanent magnet is studied.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; surface permanent magnet; interior permanent magnet; electromagnetic torque ripples.