

ПРИНЦИПИ КОМУТАЦІЇ БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ У БЕЗРЕДУКТОРНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

Постановка проблеми. Останнім часом завдяки появі відносно недорогих високоенергетичних постійних магнітів (на основі NeFeB) все ширше застосування знаходять безредукторні електроприводи (БЕП) на базі багатополюсних електричних машин, побудованих за принципом синхронної. Для цілої низки застосувань, де потрібна швидкість та (або) висока точність (механізми роботів і маніпуляторів, системи наведення, мотор-колеса тощо), БЕП мають суттєві переваги над традиційними редукторними, особливо за вбудованої у привідний механізм конструкції електромеханічного перетворювача енергії (ЕМП): відсутність власних підшипників, з'єднуваної муфти, максимальна механічна жорсткість, відсутність люфтів, висока надійність [1,2].

Виходячи із особливостей об'єкта привода та вимог, які ставляться до його показників, спектр варіантів реалізації БЕП може бути досить широким. Це зумовлено, насамперед, принциповою відмінністю широко відомих трьох основних способів ефективного керування синхронною машиною з постійними магнітами: частотним керуванням, неперервним синусоїдальним керуванням за положенням ротора (автокерований синхронний двигун, PMSM) та дискретним керуванням за положенням ротора (безконтактний двигун постійного струму, БДПС, BLDC) [3]. Принципові відмінності цих реалізацій проявляються, по-перше, в конструкції ЕМП, по-друге, в наявності та типі давачів координат руху і, по-третє, в принципі електронної комутації обмоток якоря та способі регулювання моменту (фазних струмів якоря). Для БЕП, де, як правило, необхідний високий пусковий момент, прийнятні два останні способи, причому БДПС простіший в реалізації та дешевший.

Аналіз останніх досліджень. БДПС властивий один серйозний недолік – пульсації моменту, зумовлені двома факторами: конструкцією ЕМП і дискретністю комутації його обмоток. Проблемі зниження пульсацій моменту в безконтактних електроприводах з постійними магнітами присвячено багато досліджень [4–6]. Проте безредукторна реалізація привода вносить свої особливості у вирішення цієї проблеми, що зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на розроблення ефективних способів комутації обмоток якоря в БДПС у БЕП.

Мета статті полягає у аналізі конструктивних особливостей ЕМП для БЕП, класифікації способів комутації обмоток якоря, їх порівняльному дослідженні та розробленні рекомендацій щодо ефективного застосування найбільш раціональних варіантів.

Основний матеріал статті. Оскільки ЕМП у БЕП повинен розвивати великі моменти (моментний двигун), то він будується у вигляді багатополюсної електричної машини радіального чи аксіального типів значно більших порівняно з традиційними ЕМП діаметрів. Останній фактор зумовлює неперехресне виконання обмоток якоря, що має безпосередній вплив на характер зворотної ЕРС обертання машини [7]. Форма ЕРС також залежить від типу якоря: за зубчастого якоря обмотка розташовується у пазах феромагнітного шихтованого осердя, а за так званого безпазового чи «гладкого» якоря обмотка якоря фіксується за допомогою немагнітопровідних деталей безпосередньо в робочому повітряному проміжку. ЕМП із зубчастим якорем мають вищий питомий момент, який ще й доповнюється реактивною складовою, у них важче забезпечити потрібну форму зворотної ЕРС через підвищену дію реакції якоря [8]. У безпазових ЕМП, котрі відрізняються більшими розмірами та вартістю, можна порівняно легко забезпечити потрібний характер зворотної ЕРС, який найчастіше вибирається синусоїдальним для векторного керування струмом якоря та одержання гладкого моменту. Такий підхід використовується у високоточних БЕП інфранизьких частот обертання, наприклад, для астронавігаційних приладів, де застосовуються відомі принципи керування з використанням обертової системи координат, різних видів ШІМ-модуляції [9]. Для більш широкого застосування переваги мають компактніші і дешевші ЕМП із зубчастим якорем, які керуються за сигналами дискретних давачів кутового положення ротора (ДКПР), – БДПС. Форма зворотної ЕРС при цьому найчастіше близька до трапецевидної, проте істотно міняється при навантаженні. Наявні в БДПС пульсації моменту для багатьох випадків цілком допустимі, оскільки не зумовлюють значних коливань швидкості через підвищену в БЕП електромеханічну сталу привода. В інших випадках необхідні спеціальні заходи, які дають змогу шляхом удосконалення комутації обмоток якоря зменшити рівень пульсацій електромагнітного моменту двигуна.

Аналіз світового досвіду побудови безконтактних електроприводів, побудованих за принципом БДПС, дав змогу виділити основні фактори, що впливають на рівень пульсацій моменту, та провести класифікацію способів комутації фазних обмоток якоря (табл. 1).

З метою зменшення рівня пульсацій моменту БДПС, збільшують число фаз ЕМП та застосовують дробове відношення кількості котушок якоря на полюс і фазу [10]. Топологія силового напівпровідникового перетворювача відповідає кількості фаз та може бути мостовою чи нульовою, причому остання дає змогу незалежного керування фазними струмами. Збільшення числа рівнів напруги живлення силової схеми приводить до значного зниження пульсацій, але за рахунок збільшення вартості та відповідно ускладнення способу керування [3,11]. Особливо значний вплив на рівень пульсацій моменту зумовлюється типом ДКПР. Популярне останнім часом

бездавачеве керування, що базується на застосуванні естиматорів координат, для БЕП менше перспективне, оскільки не дає змоги фіксувати ротор та потребує спеціальних стартових процедур [12]. Це стосується і керування за сигналами зворотної ЕРС. Натомість порівняно великі розміри та доступність до активної частини ЕМП дають можливість просто реалізувати дискретний давач положення (оптичний чи на ефекті Хола), причому і в багатоточковому на полюс виконанні.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на рівень пульсацій моменту в БДПС			
Конструкційні особливості ЕМП	Топологія силового комутатора (інвертора)	Наявність ДКПР та його роздільна здатність	Принцип комутації фазних обмоток якоря
<ul style="list-style-type: none"> кількість фаз (2, 3, 5) кількість котушок якоря на полюс і фазу 	<ul style="list-style-type: none"> нульова схема мостова схема трирівнева багаторівнева 	<ul style="list-style-type: none"> бездавачеве керування керування за зворотною ЕРС дискретний ДКПР з n інформаційними точками на полюс ($n=1, 2, 3, \dots$) 	<ol style="list-style-type: none"> 1) дискретна комутація БВ за положенням ротора із загальним ШІМ-регулюванням їх модуля 2) дискретна комутація БВ за положенням ротора з ШІМ-перемиканням БВ для регулювання 3) дискретна комутація БВ за положенням ротора з їх релейним перемиканням для регулювання 4) цілеспрямована релейна комутація БВ (ДТС) 5) незалежна релейна комутація фаз (струмовий коридор)

Принципи комутації фазних обмоток якоря з метою забезпечення моменту БДПС та його регулювання, які приведені в останній колонці табл. 1, відібрані уже з точки зору їх придатності для використання у БЕП. Вони не залежать від кількості фаз чи топології інвертора, але проведемо їх детальніший аналіз, виходячи з найбільш поширеної трифазної конструкції ЕМП з шестиключовим мостовим транзисторним інвертором.

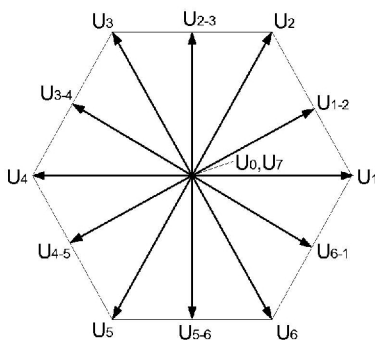


Рис. 1. Базові вектори напруг інвертора за дискретного принципу керування

Перші три принципи побудовані на використанні відомих базових векторів (БВ), які показані на рис. 1: за допомогою триточкового ДКПР та інверсного 180° (кут провідності вентиля) принципу керування ключами одного плеча можна отримати 6 БВ $U_1 - U_6$ з дискретністю 60° ел.; за тих же умов, але 120° принципу керування отримуються 6 БВ $U_{1-2} - U_{6-1}$ з тією ж дискретністю; при шеститочковому ДКПР та 150° принципі керування отримуються уже всі вищевказані 12 БВ з дискретністю 30° ел. Крім цього, за усіх трьох принципів керування присутні 2 нульові вектори U_0, U_7 .

Принцип комутації 1, який передбачає регулювання напруги в ланці постійного струму, за своїми показниками практично відповідає тиристорному інвертору за різних кутів провідності вентилів [3], проте в транзисторному варіанті його реалізація ускладнена порівняно з принципом комутації 2, де функції кутової комутації та регулювання виконуються транзисторами інвертора. З метою зменшення комутаційних втрат, функції ШІМ-регулювання доцільно покласти лише на мінімальну кількість ключів, частіше всього це здійснюється 3-а транзисторами колекторної чи емітерної груп моста. Проте для рівномірного теплового навантаження транзисторів їх робота під ШІМ повинна чергуватися. Для 120° принципу керування запропоновані алгоритми керування С60G+ і С60G- [13], у яких кожен із ключів знаходиться під ШІМ протягом перших чи других 60° ел. (рис. 2, а). Крім цього, як показали наші дослідження, таке керування значно зменшує пульсації моменту порівняно з ШІМ трьох ключів. Аналіз показав, що найбільший вклад у пульсацію моменту вносить стрімке зниження лінійного струму, коли після закривання чергового ключа він змушений замикатися через зворотні діоди інвертора і конденсатор ланки постійного струму. Отож, алгоритми ШІМ-регулювання С60G+ і С60G- є низькопульсаційні, бо виключають такі випадки, забезпечуючи замикання струму лише через відкриті ключі та зворотні діоди. Відповідний аналіз дав нам

Перші три принципи побудовані на використанні відомих базових векторів (БВ), які показані на рис. 1: за допомогою триточкового ДКПР та інверсного 180° (кут провідності вентиля) принципу керування ключами одного плеча можна отримати 6 БВ $U_1 - U_6$ з дискретністю 60° ел.; за тих же умов, але 120° принципу керування отримуються 6 БВ $U_{1-2} - U_{6-1}$ з тією ж дискретністю; при шеститочковому ДКПР та 150° принципі керування отримуються уже всі вищевказані 12 БВ з дискретністю 30° ел. Крім цього, за усіх трьох принципів керування присутні 2 нульові вектори U_0, U_7 .

Принцип комутації 1, який передбачає регулювання напруги в ланці постійного струму, за своїми показниками практично відповідає тиристорному інвертору за різних кутів провідності вентилів [3], проте в транзисторному варіанті його реалізація ускладнена порівняно з принципом комутації 2, де функції кутової комутації та регулювання виконуються транзисторами інвертора. З метою зменшення комутаційних втрат, функції ШІМ-регулювання доцільно покласти лише на мінімальну кількість ключів, частіше всього це здійснюється 3-а транзисторами колекторної чи емітерної груп моста. Проте для рівномірного теплового навантаження транзисторів їх робота під ШІМ повинна чергуватися. Для 120° принципу керування запропоновані алгоритми керування С60G+ і С60G- [13], у яких кожен із ключів знаходиться під ШІМ протягом перших чи других 60° ел. (рис. 2, а). Крім цього, як показали наші дослідження, таке керування значно зменшує пульсації моменту порівняно з ШІМ трьох ключів. Аналіз показав, що найбільший вклад у пульсацію моменту вносить стрімке зниження лінійного струму, коли після закривання чергового ключа він змушений замикатися через зворотні діоди інвертора і конденсатор ланки постійного струму. Отож, алгоритми ШІМ-регулювання С60G+ і С60G- є низькопульсаційні, бо виключають такі випадки, забезпечуючи замикання струму лише через відкриті ключі та зворотні діоди. Відповідний аналіз дав нам

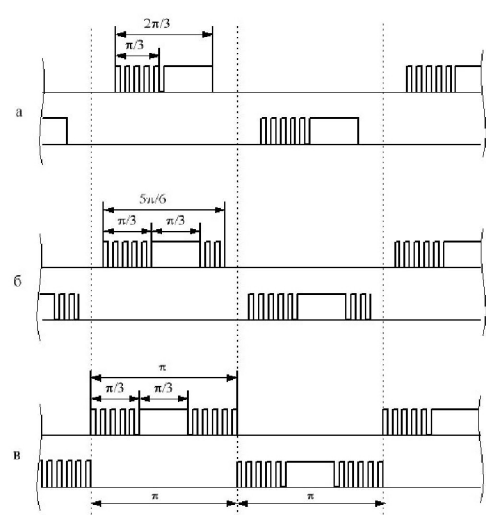


Рис. 2. Низькопульсаційні алгоритми ШІМ-регулювання парою ключів одного плеча для 120° (а), 150° (б) та 180° (в) принципів керування

зможу запропонувати низькопульсаційні алгоритми ШІМ-керування і для 150° та 180° принципів керування, які показані на рис. 2,б,в. Вони побудовані так, що під ШІМ перебувають завжди 2 ключі однієї групи з 3-х працюючих. Це дещо збільшує комутаційні втрати, проте знижує рівень пульсацій моменту на 40-50%. Осцилограми на рис. 3 ілюструють перевагу низькопульсаційного алгоритму керування над традиційним.

3-й принцип комутації відрізняється від 2-го заміною ШІМ-регулювання на релейне і відомий із ефективного застосування в серійному електроприводі ЕПБ. Проте для ефективного зниження пульсацій моменту його доцільно удосконалити, використавши описані вище низькопульсаційні алгоритми. 4-й та 5-й принципи комутації можуть забезпечити практично гладкий момент, проте якість їх роботи суттєво залежить від точності додаткових пристроїв: естиматора моменту для 4-го принципу та формувача задаючих значень лінійних струмів ЕМП в залежності від кутового положення ротора та режиму роботи привода для 5-го принципу. Вивчення можливостей цих принципів комутації обмоток якоря БДПС в БЕП буде предметом наступних досліджень.

З метою порівняння ефективності різних принципів комутації обмоток якоря БДПС в середовищі MatLab/Simulink розроблено низку комп'ютерних моделей, які відрізняються типом зворотної ЕРС ЕМП (синусоїдальна і трапецевидна), принципами дискретного керування ключами інвертора (120° , 150° , 180°), алгоритмами ШІМ-регулювання (3-ключові, 6-ключові – запропоновані низькопульсаційні). В усіх випадках ЕМП мав наступні параметри: $P_n=6$ кВт, $\omega_n=15$ с $^{-1}$, $M_n=400$ Н·м, $p_n=20$, $R_n=0,5$ Ом, $L_n=5$ мГн, $\Phi_n=0,2$ Вб.

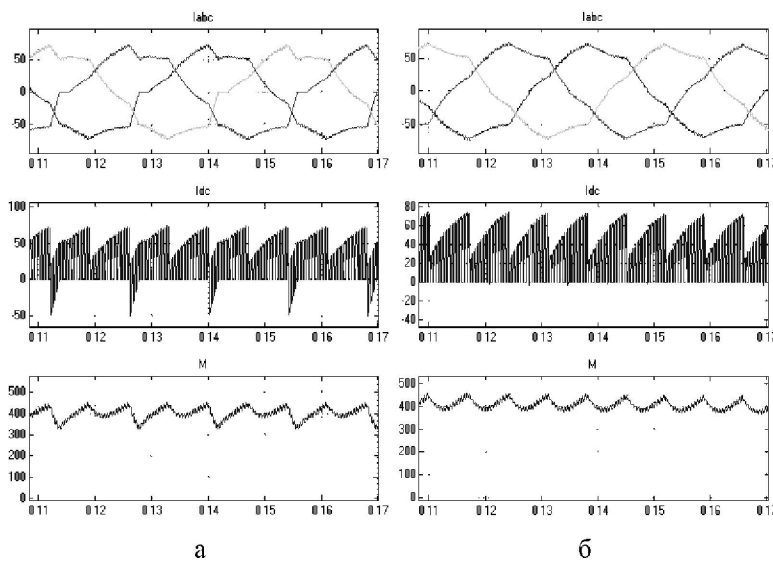


Рис. 3. Вплив алгоритму ШІМ-регулювання на пульсацію моменту за 150° принципу керування ключами: а) ШІМ 3-а верхніми ключами; б) низькопульсаційний алгоритм (рис. 2,б)

$$f_i(\theta) = \sin \psi_i + \frac{1}{4} \sin 3\psi_i + \frac{1}{12} \sin 5\psi_i + \frac{1}{72} \sin 7\psi_i,$$

де $\psi_i = p_n \theta + \pi/2 + \Delta\phi_i$; $\Delta\phi_a = 0$; $\Delta\phi_b = -2\pi/3$; $\Delta\phi_c = 2\pi/3$.

Порівняння ефективності принципів комутації обмоток якоря здійснювалося за критеріями:

- якості керування моментом – відносна пульсація моменту в розімкненій системі $\delta M = (M_{\max} - M_{\min})/M_c$, де M_c – момент статичного навантаження;
- якості форми лінійного струму двигуна – сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень THD;

- відносної енергетичної ефективності η_Σ^* – відношення сумарного ККД БДПС (інвертора і ЕМП) за M_n та $0,5\omega_n$ (щільність ШІМ-регулювання 0,5, $f_{\text{ШІМ}} = 2$ кГц) до відповідного базового значення ККД (сумарного ККД за тих же параметрів, але для ЕМП з синусоїдальною ЕРС та векторним принципом керування – вектор синусоїдального струму спрямований за вектором ЕРС).

З метою дослідження впливу лише принципу комутації на величину ККД, в усіх комп'ютерних експериментах підбиралися такі оптимальні значення кутового зміщення γ_{opt} початку імпульсу фазної напруги відносно початку ЕРС (аналогія встановлення ДКПР), щоб вектор струму якоря здійснював у процесі комутації симетричні відносно вектора ЕРС осциляції в межах кута $\pm\alpha_1$. Як приклад, на рис. 4 приведені осцилограми, з яких видно задовільну трапецевидну форму ЕРС та необхідне деяке відставання початку імпульсу фазної напруги, що задає початок імпульсу струму, відносно початку ЕРС з метою суміщення кривих i та e і забезпечення мак-

Комп'ютерна модель ЕМП будувалася за відомою математичною моделлю БДПС без врахування насичення магнітопроводу [14], що є допустимо через порівняно великий повітряний проміжок ЕМП для БЕП у зв'язку зі збільшенням діаметра машини:

$$[u] = R_n [i] + (L_n - M) p [i] + [e], \quad (1)$$

де $[u]$, $[i]$, $[e]$ – стовпцеві матриці фазних напруг, лінійних струмів та фазних ЕРС обертання відповідно; M – взаєміндуктивність обмоток якоря.

Фазні ЕРС моделювалися виразами

$$e_i = p_n \omega \Phi_n f_i(\theta), \quad (i = a, b, c)$$

де θ – кут положення ротора, а функції $f_i(\theta)$ визначаються наступним чином:

- для синусоїдальної ЕРС

$$f_i(\theta) = \sin \psi_i;$$

- для трапецевидної ЕРС

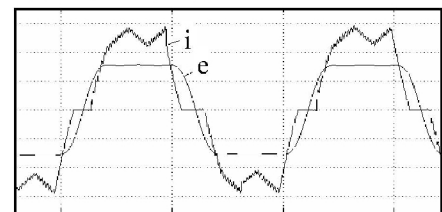


Рис. 4. Осцилограми струму та трапецевидної ЕРС за 120° принципу керування ключами і γ_{opt}

симального значення середньої потужності.

У табл. 2 приведені результати порівняльних досліджень роботи розімкнених систем БЕП з двома типами ЕМП (формами ЕРС: sin – синусоїдальна, trap – трапецевидна) та різними принципами комутації обмоток якоря (3 кл. – ШІМ-регулювання 3-а ключами колекторної групи; 6 кл. – низькопульсаційні алгоритми ШІМ-регулювання). Отримані результати підтверджують ефективність низькопульсаційних алгоритмів ШІМ: пульсації моменту знижуються на 40-50%, а спотворення кривих струму (ТНД) – на 30-50%. При цьому сумарний ККД привода за 120° принципу керування зростає за рахунок покращення форми струму і практично незмінних комутаційних втрат в інверторі, а за 150° і 180° принципів сумарний ККД дещо знижується через зростання комутаційних втрат. Щодо форми зворотної ЕРС ЕМП, то для трапецевидної, як і очікувалося, кращі результати (нижчий δM) забезпечує 120° принцип керування, тоді як для синусоїдальної – 150° і 180°, причому для останнього усі показники дещо кращі. Враховуючи простішу реалізацію 180° принципу у порівнянні зі 150°, його більш доцільно використовувати за синусоїдальної форми ЕРС.

Таблиця 2
Порівняння принципів комутації БДПС ($M_{\Sigma}; \delta = 0,5; f_{\text{ШІМ}} = 2 \text{ кГц}$)

Показник	120°			150°			180°		
	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.	sin 3 кл.	sin 6 кл.	trap 6 кл.
δM	0,475	0,250	0,213	0,325	0,188	0,280	0,313	0,175	0,285
ТНД	0,222	0,146	0,154	0,140	0,085	0,110	0,156	0,080	0,086
η_{Σ}^*	0,957	0,972	0,915	0,981	0,947	0,898	0,970	0,951	0,902
α_I	$\pm 21^\circ$	$\pm 12^\circ$	$\pm 11^\circ$	$\pm 16^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 12^\circ$	$\pm 17^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 12^\circ$
γ_{opt}	-20°	-13°	-13°	2°	8°	7°	29°	39°	37°

Висновки.

1. Проведений аналіз особливостей конструкції багатополюсних ЕМП з постійними магнітами у роторі для БЕП дав змогу класифікувати фактори, що впливають на рівень пульсацій моменту в БДПС та виділити 5 принципово різних принципів комутації фазних обмоток якоря (табл. 1).

2. Дослідженнями чисельно підтверджено для БЕП переваги дискретної комутації ключів за 120° принципу керування для ЕМП з трапецевидною формою ЕРС та 180° – з синусоїдальною, причому запропоновано низькопульсаційні алгоритми ШІМ-регулювання.

3. Комп'ютерною симуляцією встановлено, що за дискретної комутації БВ за положенням ротора основне миттєве зниження електромагнітного моменту відбувається за час перехідного процесу значної зміни струмів у обмотках якоря після чергової комутації БВ, коли проходить нагромадження енергії магнітного поля в фазних обмотках машини. Після закінчення перехідного процесу за подальших незначних змін лінійних струмів миттєве значення моменту наростає до попереднього рівня. Тому для зменшення комутаційних пульсацій моменту необхідно шукати шляхи більш плавної комутації струмів якоря.

Література.

1. Свечарник Д.В. Электромашины непосредственного привода: Безредукторный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
2. Сабинин Ю.А., Денисова А.В. Безредукторный позиционный электропривод // Электротехника. – 1999, №8. – С.22-28.
3. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
4. Hanselman D.C. Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1994, V. 41, No. 3. – pp. 392-300.
5. Jahns T.M., Soong W.L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives – A review // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1996, V. 43, No. 2. – pp. 321-330.
6. Batzel T.D., Lee K.Y. Commutation torque ripple minimization for permanent magnet synchronous machines with Hall effect position feedback // IEEE Trans. Energy Convers. – 1998, V. 13, No. 3. – pp. 257-262.
7. Чучман Ю.И., Черспаляк М.В., Максимович Д.С. Структурная и параметрическая оптимизация неперекрещивающихся обмоток исполнительных и измерительных электрических машин // Электротехника. – 2008. – №3. – С. 17-24.
8. Gieras J.F., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications. – Marcel Dekker, NY, 2002. – 581 p.
9. Чучман Ю.И., Шур І.З., Черспаляк М.В., Журкіна В.М. Прещизійний тихохідний безредукторний безконтактний електропривід // Електроінформ. – 2006. – №2. – С. 11 – 13.
10. Chan C.C., Chen G.H., Wang X.Y., Chau K.T. A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1994, V. 30, No. 1. – pp. 1258-1265.
11. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE PRESS. – Wiley Interscience, 2002. – 610 p.
12. Ogasawara S., Akagi H. An approach to position sensorless drive for brushless dc motors // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1991, V. 27, No. 5. – pp. 928-933.
13. Domoracki A., Krykowski K. Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne. – 2005, Nr. 72. – S. 155-159.
14. Pillay P., Krishnan R. Modelling, Simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part II: the brushless DC motor drive // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1989, V. 25, No. 2. – pp. 274-279.