

Достовірність запропонованої моделі підтверджена порівнянням амплітуд розрахованого та визначеного експериментально значень ЕРС поляризованого електродвигуна. Незначна розбіжність пояснюється точністю розрахунку еквівалентних магнітних опорів R_m та R_c віток підмагнічування та керування.

Висновки. Результати дослідження за допомогою описаної математичної моделі на конкретному прикладі конструкції коливного двигуна поляризованого типу дають можливість визначити його коефіцієнт чутливості за швидкістю, тобто коефіцієнт пропорційності між електрорушійною силою та кутовою швидкістю. На відміну від класичних електричних машин він є змінною величиною і залежить від намагнічувальної сили обмотки керування та кутового положення ротора. Сталим цей коефіцієнт можна вважати тільки умовно для робочого діапазону кутових відхилень, границі якого не перевищують половини кутової величини перекривання статора і ротора.

1. Харчишин Б.М. Синтез генетично модифікованих конструкцій магнітоелектричних перетворювачів // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 83–86. 2. Мороз В.І., Харчишин Б.М. Моделювання системи слідування на основі апроксимації інтегралу згортки // *Електроінформ*. – 2006. – № 4. – С. 6–8. 3. Мороз В.І., Харчишин Б.М.. Комп'ютерне моделювання електроприводу системи слідування // *Електроінформ*. – 2007. – № 4. – С. 24–26. 4. Андрейко І.І., Біляковський І.С., Денис Б.Д. Електричні мікромашини: У 2 т. Т. 1: Електричні машини постійного струму та мікротрансформатори: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2007. – 452 с.

УДК 62-83:621.382:621.313.32

І.З. Щур, О.В. Макарчук*, М.В. Черепаняк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП
*кафедра ЕМА

СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ БЕЗРЕДУКТОРНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА БАЗІ БЕЗКОНТАКТНИХ ВБУДОВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ МОДУЛІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

© Щур І.З., Макарчук О.В., Черепаняк М.В., 2008

Показано переваги безредукторних електроприводів над традиційними редукторними та окреслено перспективні напрямки їх застосування. Сформовано 5 груп безредукторних електроприводів, що відрізняються між собою показниками якості. Розроблено принципи класифікації та систему умовних позначень стратегій керування, враховуючи які відібрані варіанти ефективніших стратегій для безредукторних електроприводів.

Advantages of gearless electric drives are shown above traditional gear same and outlined perspective directions for their application. 5 groups of gearless electric drives which differ between itself the indexes of quality are formed. Principles of classification and system of conditional denotations of control strategies coming from which the selected variants of the most effective strategies for gearless electric drives are developed.

Постановка проблеми. Традиційно електричний привід (ЕП) промислових механізмів будується за посередництвом такого механічного пристрою, як редуктор. Це зумовлено необхідністю забезпечення рівності номінальних швидкостей механізму і електродвигуна або (та) перетворення характеру руху. З метою зменшення маси, габаритів та вартості електродвигуна, номінальну частоту його обертання доцільно проектувати можливо вищою, проте це призводить до

збільшення (за незмінної потужності) передавального числа, маси, габаритів і вартості проміжного механічного редуктора. Як правило, проектувальники знаходять компромісні рішення щодо вибору привідного двигуна та механічного редуктора, враховуючи з економічними чи іншими показниками ЕП, наприклад, динамічними. Проте, незважаючи на досягнення механіків, редуктор, як правило, є найбільше уразливим місцем ЕП через свою низьку надійність, зумовлену зношуванням зубчастих коліс, відмовою підшипників тощо. Крім того, для відповідальних високоточних ЕП механічний редуктор стає чи не основним джерелом похибок регулювання, пов'язаних із проміжками в зачепленнях передач та скінченною їх жорсткістю, що проявляється у вигляді пружних деформацій, які спричиняють небажані коливання. Вказані проблеми віддавна стимулюють електромеханіків у дослідженнях, спрямованих на виключення з ЕП такої ланки, як механічний редуктор, тобто на розроблення безредукторних ЕП (БЕП) [1]. Проте стримувальним фактором у цьому напрямку виступає неминуче збільшення габаритів, вартості та зниження ККД реального привідного електродвигуна. У низці застосувань, де на перші місця ставляться висока точність і надійність, а не вартість, наприклад, у системах наведення, БЕП доволі широко застосовуються [2]. Останнім часом у зв'язку з появою на ринку високоенергетичних та порівняно недорогих постійних магнітів (ПМ) на основі NeFeB та використання концепції модульної конструкції електродвигуна, вбудованого у привідний механізм, перспективи розроблення та уніфікації БЕП малої та середньої потужності стають цілком реальними на базі багатополосних електричних машин синхронного типу. Цьому сприяє значне спрощення і здешевлення БЕП завдяки відсутності власних підшипників, виключенню з'єднувальних муфт, скороченню монтажних робіт, підвищенню ККД приводу [3, 4]. Принципова відмінність БЕП від традиційного редукторного зумовлює необхідність досліджень, спрямованих на аналіз особливостей та розроблення стратегій ефективного керування такими ЕП.

Аналіз останніх досліджень. Враховуючи особливості об'єкта привода та вимоги, які ставляться до його показників, спектр варіантів реалізації БЕП, як і традиційного редукторного ЕП, може бути доволі широким. Це зумовлено, насамперед, принциповою відмінністю широковідомих трьох основних способів ефективного керування синхронною машиною з ПМ: частотним керуванням, неперервним синусоїдальним керуванням за положенням ротора (вентильний двигун, PMSM) та дискретним керуванням за положенням ротора (безконтактний двигун постійного струму, BLDC) [5]. Принципові відмінності цих реалізацій проявляються, по-перше, в конструкції електромеханічного перетворювача енергії (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). Посидання двох останніх аспектів БЕП і формує те поняття, яке ми вкладаємо у термін “стратегія керування”. Саме вона кардинально визначає можливості і показники ЕП, а такі аспекти, як застосовані варіанти побудови структур САК вже є похідними від базової стратегії керування. Вказані вище три основні способи керування синхронними машинами розвиваються у вигляді різноманітних стратегій та їх модифікацій, які також можна повністю чи частково застосовувати для побудови БЕП.

Аналіз наукової літератури щодо побудови БЕП на базі синхронних машин [2,6,7] дає змогу зробити висновок про винятково спеціальний, зумовлений об'єктом привода, підхід до розроблення систем автоматичного керування (САК). Таку характеристику можна дати і нашим роботам щодо розроблення САК БЕП оптичного телескопа [8,9]. Однак спеціальні вимоги до конкретних САК координатами об'єкта висувають на перший план специфічні питання, тоді як загальні підходи, що визначаються стратегією керування та її модифікацією, уже відходять на задній план, і їх реалізація вважається аналогічною до редукторних ЕП. Проте специфіка конструкції синхронного ЕМП у безредукторному виконанні, його тихохідність, високі зусилля та моменти зумовлюють необхідність детальнішого підходу до оцінювання параметрів привода, обґрунтування доцільності використання тих чи інших відомих стратегій керування та їх модифікацій, а також окреслення напрямків наступних досліджень з метою розроблення нових.

Метою роботи є аналіз особливостей конструкції БЕП на базі електричних машин синхронного типу з ПМ та обґрунтування, враховуючи які, ефективних варіантів стратегій та їх модифікацій для керування моментом (зусиллям) окремих груп потенційних об'єктів БЕП.

Виклад основного матеріалу. Доцільність застосування тієї чи іншої стратегії керування до БЕП визначається, насамперед, тими вимогами, що ставляться до привода з боку об'єктів. У табл. 1 чотири основні з цих вимог наведені та орієнтовно здійснена їх градація у напрямку зростання показника та відповідно складності і вартості БЕП. Використовуючи табл. 1, для поширеніших сьогодні об'єктів БЕП у табл. 2 наведені відповідні вимоги. Як зрозуміло з табл. 2, наведені групи об'єктів істотно відрізняються вимогами до БЕП, причому ці вимоги, в основному, зростають для наведених груп згори донизу. Це ще раз підтверджує доцільність аналізу і розроблення градації БЕП та стратегій керування, з метою забезпечення спектра вимог до привода у напрямку їх зростання.

Таблиця 1

Основні вимоги до показників БЕП

1. Номінальна швидкість в активній зоні, v , полюс/с	2. Діапазон регулювання швидкості, D	3. Пульсація моменту, %	4. ККД в номінальному режимі, η_n
1.1. >10 1.2. $1 < v < 10$ 1.3. <1	2.1. без регулюв. 2.2. <10 2.3. $10 < D < 1000$ 2.4. >1000	3.1. не регламент. 3.2. < 10 3.3. < 5 3.4. < 1	4.1. $< 0,5$ 4.2. $0,5 < \eta_n < 0,7$ 4.3. $> 0,7$

Проаналізуємо три основні складові БЕП, які безпосередньо визначають тип і конфігурацію стратегії керування: ЕМП, давачів координат руху, принципів комутації вентилів та способів керування струмом якоря.

Електромеханічний перетворювач. Оскільки безредукторна реалізація привода повинна забезпечувати значно більші порівняно з редукторною величини механічних зусиль чи моментів, останні створюються активною зоною електромеханічного перетворення енергії відповідно більшої площі. За винятком мікродвигунів, активну зону найкраще реалізувати за допомогою її набору з відповідних модулів – лінійних

Таблиця 2

Вимоги об'єктів привода до показників БЕП

Групи об'єктів привода	Показники з табл. 1				№ групи БЕП з табл. 3
	1.1	2.2-2.3	3.1-3.2	4.2-4.3	
Мотор-колеса	1.1	2.2-2.3	3.1-3.2	4.2-4.3	1 – 3
Механізми роботів і маніпуляторів	1.2	2.3-2.4	3.2-3.3	4.1-4.2	2 – 4
Системи наведення	1.3	2.4	3.3-3.4	4.2-4.2	3 – 5

(прямокутних) у випадках поступального руху механізму чи кутових сегментів для обертального руху. В останньому випадку отримують так звані моментні електродвигуни. Для великого діаметра активної зони моментного двигуна можна використовувати модулі лінійного типу. Конструкція двигуна і відповідно активної зони може бути як радіального типу, так і аксіального, кожен з яких має свої переваги та недоліки. За модульної конструкції двигуна окремі секції (блоки) якоря монтують на нерухомій, несучій частині механізму, а індуктора – полюсів з постійних магнітів – на рухомій частині. Таке вирішення забезпечує безконтактність ЕМП і має переваги простоти проектування (відповідних прив'язок), легкості монтування, а також уніфікації – використання вже спроектованих блоків відповідних типорозмірів для БЕП різноманітних об'єктів. Цілком очевидно, що отримана за модульної конструкції двигуна електромеханічна система є багатополусною (p – кількість пар полюсів), що втілює принцип електромагнітної редукції: зниження у p разів кутової швидкості та підвищення у p разів моменту. Кількість фаз включення та живлення обмоток якоря може бути різною – практично доцільно від 2 до 5, але найчастіше 3.

На рис. 1 схематично показано два варіанти фрагментів активної зони ЕМП, які поєднують дві пари полюсів та три обмотки якоря, що відповідають трифазній схемі живлення. Один модуль може включати від одного до кількох аналогічних фрагментів. З таких модулів можна легко сформувати лінійки чи сектори, які забезпечать лінійне, кутове чи кругове переміщення [10].

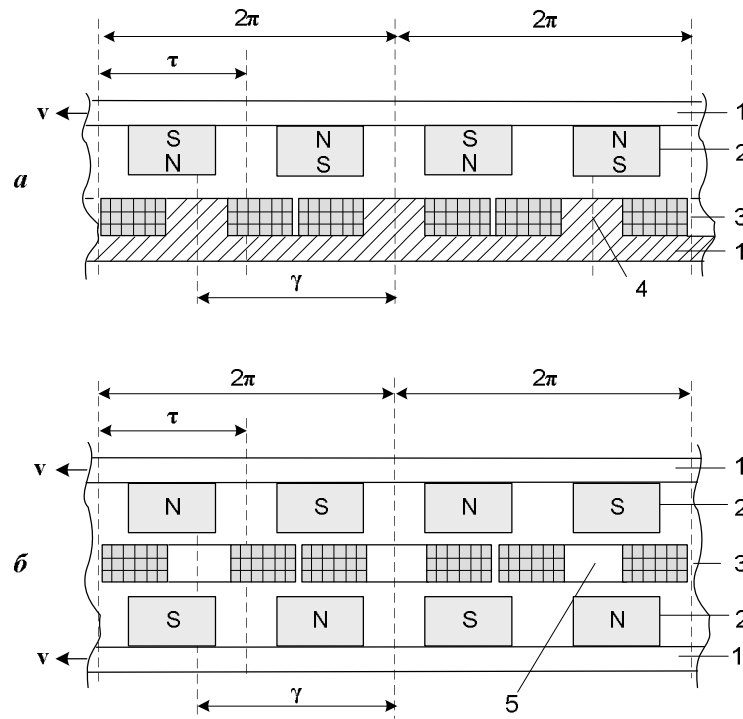


Рис. 1. Схеми фрагментів активної зони ЕМП із зубчастим а) та безпазовим б) якорями:
 1 – ярмо, 2 – постійний магніт, 3 – котушка обмотки якоря, 4 – зубець якоря,
 5 – немагнітопровідний каркас

Обидві конструкції, показані на рис. 1, можуть бути реалізовані із зубчастим якорем – обмотка якоря 3 розташована у пазах феромагнітного шихтованого осердя 4 (рис. 1, а), або мати так званий безпазовий чи “гладкий” якір – обмотка якоря розташовується безпосередньо в робочому повітряному проміжку, а її фіксація в просторі здійснюється за допомогою деталей з немагнітопровідних матеріалів 5 (рис. 1, б). В обох випадках індуктор може бути як з одностороннім розташуванням магнітів, як показано на рис. 1, а, так і з двостороннім (рис. 1, б).

Наявність концентратора магнітного потоку у вигляді феромагнітного зубчастого осердя якоря дає змогу істотно підвищити індукцію в повітряному проміжку і тим самим збільшити питомі енергетичні показники машини [11]. На жаль, такі конструкції не позбавлені недоліків, зокрема, виникає реактивний момент за рахунок неоднакової сили притягання локальних ділянок статора до ротора. Величина реактивного моменту за певних положень ротора може бути співмірною з величиною номінального, що істотно збільшує пульсацію результуючого моменту машини, мінімальне значення якої є однією з основних експлуатаційних вимог прецизійного БЕП. Зубчаста структура феромагнітного осердя та його нелінійна характеристика намагнічування є джерелом виникнення вищих просторових гармонік магнітного поля, які, своєю чергою, також негативно впливають на вищезгаданий показник. Втрати потужності у феромагнітних осердях, за номінальних частот перемагнічування можуть становити істотну частку в загальному “кошторисі” втрат машини.

Ці недоліки, притаманні машинам класичної конструкції, дають змогу розглядати машини з “гладким” якорем як гідних конкурентів для БЕП. Вони позбавлені більшості з перерахованих “мінусів”, але програють за питомими енергетичними та масово-габаритними показниками, а, отже, є дорожчим [3, 4]. Експлуатаційні витрати для машин обох класів є приблизно однаковими, оскільки для безпазових машин при високих частотах комутації в якорі (понад 1 кГц) спостерігаються додаткові втрати енергії від вихрових струмів в обмотках.

Класичні підходи до вибору та проектування петлевих або хвилевих якірних обмоток з кількістю пазів на полюс і фазу, більшою за 1, не задовольняють вимоги, що є перед БЕП. За великої кількості полюсів $2p$ розміри лобових частин обмоток, що перетинаються, стають значними. Це призводить не лише до перевитрат міді та збільшення розмірів якоря, а й до надлишкових електричних втрат в

обмотці. Використання неперехресних обмоток дає конструктору ширші можливості для штучного створення потрібної форми МРС обмотки за рахунок практично довільного її розподілу, вкорочення або видовження [12]. Для традиційних зубчастих машин найкращі фільтруючі щодо вищих гармонік властивості мають трифазні неперехресні обмотки, в яких кількість котушок S відрізняється від p на $\pm 1, 2$. За таких умов можна досягнути величини обмоткового коефіцієнта за першою гармонікою на рівні 0,95–0,98. Для безпазових конструкцій добитися синусоїдального розподілу МРС обмотки значно простіше, тому під час їх проектування можна орієнтуватися на максимум потокозчеплення котушки, який досягається за співвідношення $2p/S = 4/3$ [13].

Конструкція індуктора також значно впливає на якість привода. Провідні виробники ПМ виконують намагнічування неперервної полюсної системи, виготовленої з магнітопласту, за задалегідь заданим законом. Це означає, що можна зробити неявнополюсний ротор, який забезпечить практично гармонічний розподіл індукції в повітряному проміжку безпазової машини.

Розмагнічувальна дія реакції якоря – ще одне явище, яке належить брати до уваги під час проектування електромеханічних перетворювачів для БЕП. Особливо сильно воно себе проявляє в машинах із зубчастим якорем та під час використання магнітів з порівняно невеликим значенням коерцитивної сили (100–300 кА/м). У таких машинах зменшення потоку під навантаженням може сягати 30–50 %, що негативно вплине як на жорсткість механічної характеристики, так і на умови комутації. За істотних проявів цього явища всі спроби зменшити рівень пульсацій електромагнітного моменту за рахунок покращання фільтруючих властивостей обмотки, оптимізації комутаційних схем, збільшення кількості фаз тощо можуть бути зведені нанівець. Цей недолік можна розглядати як ще один аргумент на користь безпазових конструкцій, у яких за рахунок великого повітряного проміжку розмагнічувальний вплив реакції якоря значно менший.

Аналізуючи всі ці міркування, можна виділити п'ять принципово різних типів конструкції ЕМП енергії, відповідно до яких сформувавши п'ять груп БЕП як показано в табл. 3. Враховуючи описані експлуатаційні властивості цих типів ЕМП, можна окреслити їх ефективні галузі застосування (див. останню колонку табл. 2).

Таблиця 3

Групи БЕП на базі електричних машин синхронного типу з постійними магнітами

№ групи		1	2	3	4	5
ЕМП	Конструкція якоря	зубчастий феромагнітний	зубчастий феромагнітний	зубчастий феромагнітний	безпазова	безпазова
	Форма зворотної ЕРС	довільна, спеціально не сформована	трапецевидна	синусоїдальна	трапецевидна	синусоїдальна
	Якісна оцінка	високі енергетичні показники, значна реакція якоря			низькі енергетичні показники, мала реакція якоря	
Давачі координат	ДКПР	дискретний	дискретний	неперервний	дискретний	неперервний
	ДС	1 давач у ланці постійного струму	1 давач у ланці постійного струму або давачі у фазах	давачі у фазах	1 давач у ланці постійного струму або давачі у фазах	давачі у фазах
Шифри ефективних стратегій керування		mDk- α mDk- α PWM mDk- α PWM-1S/PI mDk-DTC-1S mSL- α PWM mSL- α PWM-1S/PI	mDk- α mDk- α PWM mDk- α PWM-1S/PI mDk- α PWM-mS/PI mDk- α -mS/HB mDk-DTC-1S mSL- α PWM mSL- α PWM-1S/PI	mC-PWM-2S/PI mC-PWM-2R/PI mC-SVM-2R/PI mC-HB-mS mC-DTC-1S mC-DTC-2S mSL-PWM-2R/PI mSL-SVM-2R/PI mSL-SVM-2R/HB	mDk- α mDk- α PWM mDk- α PWM-1S/PI mDk- α PWM-mS/PI mDk- α -mS/HB mDk-DTC-1S mSL- α PWM mSL- α PWM-1S/PI	mC-PWM-2S/PI mC-PWM-2R/PI mC-SVM-2R/PI mC-HB-mS mC-DTC-1S mC-DTC-2S mSL-PWM-2R/PI mSL-SVM-2R/PI mSL-SVM-2R/HB

№ групи	1	2	3	4	5
Порівнювальна якісна характеристика БЕП	високий питомий момент, великі пульсації моменту	найвищий питомий момент, середні пульсації моменту	середній питомий момент, малі пульсації моменту	низький питомий момент, мінімальні пульсації моменту	найнижчий питомий момент, гладкий момент
Порівнювальна вартість	мала	середня	висока	вища середньої	найвища

Давачі координат руху. З трьох основних способів керування синхронною машиною з ПМ тільки скалярне частотне керування не потребує інформації про кутове положення ротора. Проте такий принцип керування забезпечує дуже малий пусковий момент і тому практично для усіх БЕП є непридатним. Інші два способи керування електричною машиною з ПМ, побудованою за принципом синхронної, ґрунтуються на керуванні положенням та величиною вектора струму якоря щодо вектора ЕРС обертання (чи магнітного потоку збудження) і тому вимагають інформації про кутове положення ротора [5, 14]. Цю інформацію можна отримати або безпосередньо від давача кутового положення ротора (ДКПР), або розрахунковим способом, але знову ж таки на підставі інформації, отриманої від інших давачів – струму (ДС), напруги (ДН), кутової швидкості (ДШ) [15, 16]. Тому наявність тих чи інших давачів координат безпосередньо впливає на стратегію керування ЕП.

Через специфіку конструкції БЕП, яка описана вище, давачі координат руху – ДКПР і ДШ – теж мають певні особливості. Звичайно, їхні функції можуть виконати стандартні інкрементальні енкодери чи резолвери, проте лише за умови доступності та можливості їх конструктивного прив'язання до осі обертання. Але останнє обмеження, а також значна вартість цих пристроїв здебільшого роблять їх застосування неможливим чи недоцільним. Натомість, доступність до активної частини ЕМП та великий розмір діаметра моментного двигуна дають змогу порівняно легко та невеликим коштом реалізувати давачі координат в зоні активної частини, наприклад, в одному з її модулів. У ролі ДКПР дискретного типу можуть бути застосовані давачі Хола чи окремі оптопари, причому їх кількість у межах однієї секції обмоток якоря може бути доволі великою, що зменшує дискретність керування [17]. Для порівняно швидкохідних БЕП, що відповідають вимогам пп. 1.1 і 1.2 у табл. 1, такий дискретний ДКПР може виконувати і функцію ДШ. Для тихохідних БЕП (п. 1.3) ДШ, причому безконтактний, доцільно реалізувати як синхронний тахогенератор у вигляді додаткових інформаційних обмоток якоря (з синусоїдальним кутовим розподілом їх потокозчеплення), що збуджуються робочими ПМ ротора. З метою зменшення впливу реакції якоря на вихідні сигнали інформаційних обмоток, їх доцільно реалізувати у вигляді окремого модуля чи сегмента ЕМП, правда, за рахунок зменшення сумарного моменту двигуна [3,4]. За допомогою спеціально розроблених алгоритмів обробки вихідних напруг цих обмоток, крім значення кутової швидкості та напрямку обертання, можна отримати також біжуче значення кутового положення ротора [18].

Для якісного регулювання моменту двигуна, а також у стратегіях керування без давачів координат руху у складі БЕП повинні бути наявні один чи більше ДС. Для простих стратегій дискретного керування доцільно використати простішу апаратну реалізацію з одним ДС у ланці постійного струму, тоді як для якісніших стратегій неперервного синусоїдального керування чи стратегій без давачів координат руху потрібні від двох до п'яти давачів фазних струмів [5, 19]. Найдоступнішою та якісною реалізацією нині є ДС на ефекті Хола, наприклад, марки LEM.

Принципи комутації вентилів та способи керування струмом якоря. Формування електромагнітного моменту двигуна здійснюється комутацією обмоток якоря узгоджено з положенням вектора магнітного потоку ротора (кутовим положенням ротора) та керуванням фазними струмами якоря. Принципи комутації безпосередньо пов'язані із типами ЕМП енергії та типами давачів координат руху.

За дискретного принципу керування зміною стану напівпровідникових ключів здійснюється дискретне регулювання, насамперед, кута положення просторового вектора напруги живлення двигуна. Дискретність керування залежить від кількості інформаційних точок ДКПР на секцію обмоток якоря, кількості фаз двигуна та алгоритму керування ключами. Так, для найпоширенішого випадку трифазного двигуна та шестиключового інвертора за допомогою триточкового ДКПР та інверсного 180° алгоритму керування ключами одного плеча можна отримати шість базових векторів $U_1 - U_6$ з дискретністю 60° ел. та 2 нульові вектори U_0, U_7 (рис. 2). За тих самих умов, але 120° алгоритму керування отримуються 6 базових векторів $U_{1-2} - U_{6-1}$ з тією самою дискретністю (рис. 2). А при шеститочковому ДКПР та 150° алгоритмі керування отримуються уже всі вищевказані 12 базових векторів з дискретністю 30° ел. Регулювання фазних струмів за дискретного перемикання базових векторів здійснюється високочастотним імпульсним регулюванням модуля базових векторів напруги одним із способів: 1) з постійною високою частотою методом ШІМ (перемикання між заданим базовим вектором напруги та нульовим вектором); 2) зі змінною високою частотою за методом прямого керування моментом (DTC) [5] (перемикання базових векторів за таблицею залежно від сектора перебування вектора магнітного потоку ротора). Отже, за першого способу кут просторового вектора напруги якоря змінюється дискретно, а модуль плавно, а за другого – і кут, і модуль змінюються плавно. Але для реалізації останнього способу необхідне доволі точно визначене значення моменту двигуна. Дискретний принцип керування можна здійснити за допомогою нескладних алгоритмів, що реалізуються недорогими мікроконтролерами.

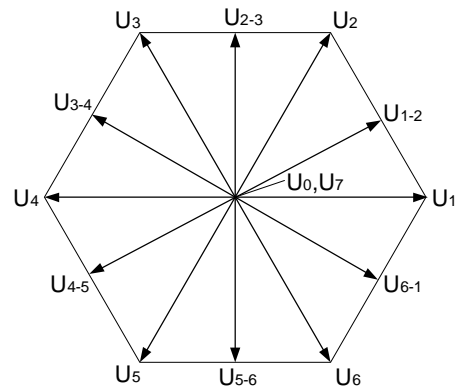


Рис. 2. Базові вектори напруг інвертора за дискретного принципу керування

Для БЕП з невисокими вимогами до основних показників (табл. 1) за ШІМ-способу регулювання струмів якоря можна здійснювати у розімкнених системах, тоді як для отримання вищих показників необхідне використання замкнених систем регулювання струмів (до них належить і згаданий спосіб DTC) [20]. Замкнені за струмом (-ами) системи мають такі переваги над розімкненими: підвищення точності керування струмом, обмеження максимального струму і захист від перевантажень, підвищення динамічних показників завдяки форсуванню електромагнітних перехідних процесів, зменшення чутливості до параметричних змін якірної обмотки, компенсація коливань напруги живлення та спадків напруги в силовому комутаторі.

Неперервний принцип керування вектором струму якоря орієнтований на досконаліше апаратне і програмне забезпечення – неперервні ДКПР та DSP-мікроконтролери [21]. При тому за умови синусоїдальної форми зворотної ЕРС ЕМП можна досягти абсолютно гладкого моменту та найвищих показників БЕП. Принципи керування струмом якоря у цьому разі реалізуються вийняткову у замкнених системах за векторним принципом в обертовій та орієнтованій за вектором магнітного потоку ротора системі координат. Неперервне окреме регулювання фазних струмів здійснюється за принципом імпульсного високочастотного роздільного регулювання фазних напруг інвертора за одним із способів: струмового коридору, просторової векторної ШІМ (SVM) чи DTC. Для БЕП з порівняно високими швидкостям завдяки потужному обчислювальному середовищу DSP-мікроконтролера можна реалізувати керування без давачів координат руху, проте для визначення початкового положення ротора необхідні все таки хоча б дискретні давачі [16] або відповідні додаткові стартові процедури [22].

Враховуючи виконаний аналіз, для оперативної ідентифікації стратегій керування БЕП та їх модифікацій доцільно розробити систему умовних позначень. З метою якомога повнішої характеристики стратегії керування, пропонуємо таку схему шифра (в англійській термінології):

***m* вид ДКПР-принцип комутації-спосіб регулювання струму,**

де ***m*** – кількість фаз ЕМП;

вид ДКПР: Dk – дискретний (discrete), k – кількість інформаційних точок на секцію обмотки якоря; C – неперервний (continued); SL без ДКПР (sensorless);

принцип комутації: α PWM – кут провідності вентилів α для дискретного керування з ШІМ-регулюванням; α НВ – те саме, але з гістерезисним (НВ – hysteresis band) регулюванням; SVM; DTC;

спосіб регулювання струму: [кількість координат регулювання][тип системи координат (S – стаціонарна, R – обертова)] / [тип регулятора струму (PI – пропорційно-інтегральний, НВ – гістерезисний)].

Для прикладу: 3D3-120PWM-1S/PI – трифазна система з дискретним триточковим ДКПР, 120° кутом провідності вентилів та ШІМ-регулюванням, одноконтурним регулюванням струму в стаціонарній системі координат та ПІ-регулятором струму якоря; 3C-SVM-2R/PI – трифазна система з неперервним ДКПР, просторово-векторною модуляцією, двоконтурним регулюванням струму в обертовій системі координат та ПІ-регуляторами d,q-проекцій струму якоря.

Як результат виконаного аналізу в табл. 3 наведені шифри основних ефективних для кожної групи БЕП на базі електричних машин синхронного типу стратегій керування і їх модифікацій та дана порівнювальна якісна оцінка їх основних показників: питомого (на одиницю ваги та одиницю об'єму) моменту, пульсацій моменту та вартості. Більшість приведених стратегій керування вже розроблена та використовується у традиційному редукторному ЕП. Для їх використання у БЕП потрібні незначні корекції, пов'язані із описаними вище особливостями такого привода. Проте з метою ефективного використання цілої низки перспективних стратегій чи їх модифікацій у БЕП, необхідно виконати відповідні дослідження. Ось напрямки деяких із них:

- для стратегій керування mDk- α PWM-1S/PI 1-ї групи БЕП визначення найефективніших принципів дискретної комутації (кута провідності вентилів, кількості точок дискретного ДКПР) та ШІМ-регулювання за різних форм розподілу зворотної ЕРС обертання для різної фазності ЕМП;
- для стратегій керування першої, другої і четвертої груп БЕП розроблення простого естиматора електромагнітного моменту за інформацією про середнє значення струму в ланці постійного струму на основі балансу активних потужностей;
- розроблення нової простої перспективної стратегії керування mDk-DTC-1S 1-ї групи БЕП.

Висновки. 1. БЕП з погляду забезпечення точності відпрацювання завдання, швидкості реалізації переміщень виконавчих органів, надійності та ремонтпридатності здебільшого мають істотні переваги над редукторними.

2. У результаті аналізу конструктивних особливостей безредукторних ЕМП синхронного типу з постійними магнітами сформовано п'ять груп БЕП, що відрізняються між собою потенційними показниками якості роботи ЕП.

3. Аналіз спектра сучасних систем ЕП на базі синхронних двигунів з постійними магнітами дав змогу розробити принципи класифікації стратегій керування цими ЕП, враховуючи які запропонована система умовних позначень у вигляді шифрів, що забезпечує можливість оперативної ідентифікації стратегій керування та їх модифікацій.

4. Для п'яти сформованих груп БЕП відібрано варіанти ефективних стратегій керування та намічено напрямки перспективних досліджень.

1. Свечарник Д.В. *Электромашины непосредственного привода: Безредукторный электропривод.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с. 2. *Следящие приводы: В 3 т. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Т. 2: Электрические следящие приводы / Е.С. Блейз, В.Н. Бродовский, В.А. Введенский и др.* – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 880 с. 3. Chuchman Y., Zavgorodny V. *Direct drive DC torque motors and tachogenerators with permanent magnet excitation for astrophysics equipment / Materialy XXXIII Międzynar. Sympoz. Maszyn Elektrycznych „Maszyny Elektryczne o Magnesach Trwałych”.* Poznań/ Kieck, 09-12.06.97. – Poznań: Wydaw. Polskiego Tow. Elektrotechn. Teor. I Stosow., 1997. – С. 79–83. 4. Чучман Ю.І., Щур І.З., Черепаняк М.В., Журкіна В.М. *Прецизионный тихоходный безредукторный безконтактный электропривод // Электроинформ.* – 2006. – № 2. – С. 11–13. 5. Bose B.K.

Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p. 6. Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. – Л.: Ленингр. дом научн.-техн. пропаганды, 1987. – 27 с. 7. Сабинин Ю.А., Денисова А.В. Безредукторный позиционный электропривод // *Электротехника.* – 1999. – № 8. – С. 22–28. 8. Щур І.З., Журкіна В.М. Система оптимального прецизійного керування позиційним електроприводом інформаційного телескопа // *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика* // *Вест. Нац. техн. ун-та “ХПИ”.* – Харьков, 2003. – Вып. 10, т. 2. – С. 442–444. 9. Щур І.З., Малярчук С.О., Козій В.Б. Система безредукторного електрпривода інфранізких частот обертання // *Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* – К.: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 77–78. 10. Столов Л.И, Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с. 11. Шевченко А.Ф. Новые многополюсные синхронные двигатели исполнительных электромеханизмов. – В кн.: *Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова.* – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 376–384. 12. Чучман Ю.И., Черепаняк М.В., Максимович Д.С. Структурная и параметрическая оптимизация неперекрещивающихся обмоток исполнительных и измерительных электрических машин // *Электротехника.* – 2008. – № 3. – С. 17–24. 13. Gieras J.F., Wing M. *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications.* – Marcel Dekker, Inc., NY, 2002. – 581 p. 14. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* // IEEE PRESS. – Wiley Interscience, 2002. – 610 p. 15. Corley M.J., Lorenz R.D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 1998. – Vol. 34, No. 1. – P. 784–789. 16. Batzel T.D., Lee K.Y. Slotless permanent magnet synchronous motor without a high resolution rotor angl sensor // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2000. – Vol. 15, No. 4. – P. 366–371. 17. 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. – Vol. 30, No. 1. – P. 1258–1265. 18. Щур І.З., Малярчук С.О., Козій В.Б. Алгоритм роботи комплексного давача електричного кута положення, швидкості і напрямку обертання для тихохідного електропривода // *Електроенергетичні та електромеханічні системи* // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 2005. – № 544. – С. 168–173. 19. Parsa L., Toliyat H.A. Five-phase permanent-magnet motor drives // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 30–37. 20. Kazmierkowski M.P., Malesani L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 1998. – Vol. 45, No. 5. – P. 691–703. 21. Batzel T.D., Lee K.Y. Electric propulsion with sensorless permanent magnet synchronous motor: Implementation and performance // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2005. – Vol. 20, No. 3. – P. 575–583. 22. Ogasawara S., Akagi H. An approach to position sensorless drive for brushless dc motors // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 1991. – Vol. 27, No. 5. – P. 928–933.