

О. І. Толочко<sup>1</sup>  
В. С. Бовкунович<sup>1</sup>  
М. В. Сопіга<sup>1</sup>

## СТРУКТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТРИЗОННОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано нову структурну реалізацію системи тризонного регулювання швидкості системи електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами з використанням оптимальних стратегій керування «Максимальний момент на ампер» та «Максимальний ампер на вольт», в якій підтримка напруги статора на максимально припустимому рівні здійснюється не за допомогою додаткового контуру напруги, а за рахунок подвійного динамічного обмеження моментоутворювальної складової струму статора.

**Ключові слова:** електропривод, синхронний двигун з постійними магнітами, тризонне регулювання швидкості, оптимальні стратегії керування, обмеження координат.

### Вступ

В останні роки виявляється великий інтерес до електроприводів на основі двигунів з постійними магнітами (*PMSM* — *Permanent Magnet Synchronous Machine*). Залежно від розташування магнітів на роторі *PMSM* можна розділити на декілька видів, серед яких слід виділити два: *SPMSM* (*Surface PMSM*) — магніти розташовані на поверхні ротора і *IPMSM* (*Interior PMSM*) — магніти поглиблені в ротор. У разі установки магнітів на поверхні ротора збільшується повітряний зазор і зменшується вплив електричної асиметрії ротора (тобто індуктивності за поздовжньою і поперечною осями приблизно однакові), зменшується реакція якоря і стала часу статора. Поглиблення магнітів в ротор підвищує механічну міцність ротора, що дозволяє працювати на великих швидкостях. Проте при цьому, внаслідок нерівномірності повітряного зазору, виникає електромагнітна асиметрія (тобто індуктивності за поздовжньою і поперечною осями стають різними). Ця асиметрія приводить до появи разом з основною складовою моменту додаткової реактивної складової, використовуючи яку можна отримати більші відношення потужність/вага, момент/струм, момент/напруга, ніж у *SPMSM* за використання оптимальних стратегій керування.

Незважаючи на збудження від постійних магнітів, *PMSM* можна використовувати при регулюванні швидкості в діапазоні вище основної за допомогою так званого псевдопослаблення магнітного поля, що здійснюється шляхом підвищення потокоутворюючої складової струму статора.

При керуванні швидкості *IPMSM* розрізняють 3 діапазони регулювання швидкості, у кожному з яких використовуються різні алгоритми керування. Найбільшу складність при структурній реалізації таких систем є організація переключення керування з одного алгоритму на інший зі збереженням обмежень на струм і напругу статора.

Аналіз літературних джерел [1—7] на тему оптимального керування *IPMSM* показав, що автори частини робіт пропонують занадто складні рішення, які потребують значних обсягів обчислень або використання великих масивів вхідних даних, або погіршують якість перехідних процесів. Інші автори пропонують використовувати замкнений контур напруги, який ускладнює налаштування та знижує швидкодію системи.

В роботах [1—2] запропоновані алгоритми керування із замкнутим контуром напруги ланки постійного струму, які не гарантують стабільне регулювання струму у разі досягнення обмеження

за напругою. У [3] показано, що варіація напруги у ланці постійного струму також може суттєво впливати на якість перехідних процесів у контурах струмів.

У роботі [4] запропоновано стратегію ослаблення поля в умовах зміни напруги ланки постійного струму. Ця стаття паралельно використовує два методи: метод використання зворотного зв'язку за напругою і метод використання даних з таблиць (lookup-table). Використання таблиць має складність, оскільки вони застосовують дані, коректні тільки для одного двигуна. До того ж застосування таблиць даних обмежується обсягом пам'яті обладнання.

У роботі [5] використано алгоритм, що витісняє магнітний потік назовні в осьовому напрямку у відповідності до швидкості двигуна після режиму ослаблення поля. Запропонований метод може реалізувати постійну проти-ЕРС у відповідності з швидкістю двигуна через зменшення потокозчеплення у повітряному зазорі. Недоліком цього методу є те, що він вимагає значних попередніх обчислень та тривимірного моделювання з використанням методу тривимірних кінцевих елементів у відповідності з зазором між статором та ротором, що значно ускладнює реалізацію алгоритму.

У [8] представлено контролер нечіткої логіки для приводу на основі IPMSM. Контролер спеціально спроектований, щоб бути надійним для високошвидкісних застосувань. Контролер з нечіткою логікою забезпечує надійне керування зовнішнім контуром швидкості. Проте у внутрішньому контурі завдання на струм по осі  $d$  обчислюється методом апроксимації кривої, що потребує достатньо точних параметрів двигуна та інформації про напругу ланки постійного струму.

Досить просту тризонну систему регулювання швидкості для PMSM із зовнішніми, а не вбудованими у ротор магнітами розглянуто у роботі [9].

Метою роботи є розробка системи тризонного регулювання швидкості синхронного двигуна з вбудованими в ротор постійними магнітами без використання складних алгоритмів керування, великих масивів вхідних даних і наявності додаткового контуру регулювання напруги.

### Результати досліджень

Математичний опис IPMSM в оберталній системі координат  $d$ - $q$ , що застосовується для синтезу систем векторного керування (СВК) має вигляд [1—6 та ін.]

$$\begin{cases} u_d = i_d R + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Psi_q; \\ u_q = i_q R + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Psi_d; \\ M_a = k_m \Psi_{pm} i_q; \quad M_r = k_m (L_d - L_q) i_d i_q; \\ M = M_a + M_r = k_m [\Psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_d, u_q, i_d, i_q$  — проєкції просторових векторів напруги і струму статора на осі  $d$  і  $q$ ;  $R$  — активний опір статора;  $L_d, L_q$  — поздовжня і поперечна індуктивності статора ( $L_d < L_q$ );  $\Delta L = L_d - L_q < 0$ ;

$$\Psi_q = L_q i_q; \quad \Psi_d = L_d i_d + \Psi_{pm} \quad (2)$$

—  $d$ - і  $q$ -складові вектора потокозчеплення ротора;  $\Psi_{pm}$  — потокозчеплення постійних магнітів;

$$\omega_e = z_p \omega; \quad k_m = \frac{3}{2} z_p,$$

де  $\omega, \omega_e$  — механічна та електрична кутові швидкості ротора;  $z_p$  — кількість пар полюсів;  $J$  — момент інерції двигуна;  $M, M_a, M_r$  — електромагнітний момент двигуна та його активна і реактивна складові.

Оскільки в такому двигуні той самий момент можна забезпечити за різних сполучень поздовжньої та поперечної складових струму статора, то виникає задача, як їх розподілити між собою, щоби сумарний струм або його квадрат

$$i_s^2 = i_q^2 + i_d^2 \quad (3)$$

в усталеному режимі був мінімально можливим. Така стратегія керування отримала назву максимальний момент на ампер (ММА, англ. *MTA* або *MTPA* — *Maximal Torque per Ampere*). Її зазвичай застосовують для регулювання швидкості у першій зоні, тому що вона водночас мінімізує втрати в міді (в обмотках статора), які у цій зоні є визначальними

$$\Delta W_{Cu} = \frac{3}{2} R \int_0^t i_s^2(t) dt .$$

Ця задача оптимального керування є класичною варіаційною задачею на умовний екстремум, яка розв’язується методом Ейлера–Лагранжа

$$i_{dMPA} = -\frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} - \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qMPA}^2} . \tag{4}$$

Підстановкою (4) у рівняння моменту з системи (1) можна отримати взаємозв’язок між електромагнітним моментом та моментоутворюючою складовою у неявному вигляді:

$$i_{qMPA}^4 + \frac{M\Psi_{pm}}{k_m\Delta L^2} i_q - \left(\frac{M}{k_m\Delta L}\right)^2 = 0 . \tag{5}$$

Перехід у другу зону відбувається з досягненням напруги двигуна, що формується ланкою постійного струму перетворювача частоти, максимально допустимого рівня  $U_{smax}$ . При цьому втрати у сталі (втрати на перемагнічування та втрати від вихрових струмів) [7]

$$\Delta W_{Fe} = c_{Fe}\omega^\gamma (\psi_q^2 + \psi_d^2)$$

зазвичай перевищують втрати у міді, і енергоефективне керування полягає в мінімізації саме цих втрат. Опосередковано їх можна знизити, використовуючи критерій оптимізації «Максимальний момент на вольт» (ММВ, англ. *MTV*, або *MTPV* — *Maximal Torque per Volt*).

Залежність між складовими струму статора у цьому випадку можна визначити мінімізацією виразу

$$u_s^2 = u_q^2 + u_d^2 , \tag{6}$$

який у разі нехтування у перших двох рівняннях системи (1) падінням напруги на активних та індуктивних опорах статора перетворюється на

$$u_s^2 \approx \omega_e^2 \psi_s^2 = \omega_e^2 (\psi_q^2 + \psi_d^2) = \omega_e^2 [(L_q i_q)^2 + (\Psi_{pm} + L_d i_d)^2] . \tag{6}$$

Використовуючи рівняння Ейлера–Лагранжа з урахуванням рівняння моменту, отримують:

$$i_{dMTV} = -\frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} \left(2 - \frac{L_q}{L_d}\right) - \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qMTV}^2} . \tag{7}$$

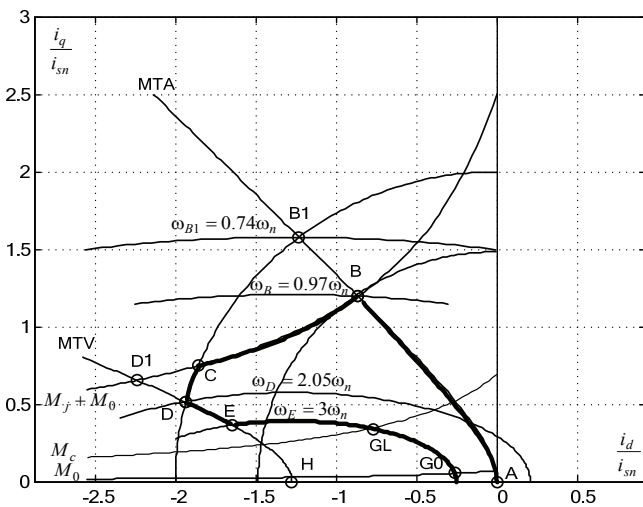


Рис. 1. Діаграми розподілення складових струму статора у разі трizonного регулювання швидкості IPMSM

Траєкторії *MTA* та *MTV*, побудовані у відносних одиницях у площині  $i_q/i_{sn}$  ( $i_d/i_{sn}$ ) за формулами (4) і (7), показані на рис. 1.

На цей же графік нанесено 2 кола постійних струмів за рівнянням (3), 3 гіперболи постійних моментів, побудовані за формулою

$$i_q = \frac{M}{k_m [\Psi_{pm} + \Delta L \cdot i_d]} , \tag{8}$$

що впливає з рівняння моменту, і 3 еліпси постійних швидкостей, побудованих за рівнянням (6) за умови  $u_s = u_{smax}$ .

Для побудови цих графіків використано IPMSM з такими параметрами:  $I_n = 20,4$  А;  $U_{ln} = 97$  В,  $n_n = 2000$  об./хв.;  $z_p = 2$ ;  $M_n = 1,67$  Нм;  $J = 0,0005$  кг·м<sup>2</sup>;  $\Psi_{pm} = 0,0785$  Вб;  $R = 0,57$  Ом;  $L_d = 8,72e^{-3}$  Гн;  $L_q = 22,78e^{-3}$  Гн.

Розгін починається з точки А майже миттєвим переходом у точку В або у точку В1 на траєкторії МТА. Він відбувається саме у цих точках за рахунок одночасного збільшення амплітуди і частоти напруги статора, завдяки чому зміна швидкості не супроводжується переходом на інший еліпс. Після досягнення амплітудою напруги рівня напруги ланки постійного струму перетворювача частоти (точка В), яка визначає верхню межу цієї величини

$$u_s \leq U_{dc} = u_{s \max} \quad (9)$$

виконання стратегії МТА стає неможливим.

Перехід з параболи МТА на параболу MTV відбувається або по колу максимально допустимого струму (ділянка В1—D) або по гіперболі постійного моменту (ділянка В—D1) або спочатку по гіперболі постійного моменту зі збільшенням струму, а потім (з досягненням струмом рівня обмеження) — по колу максимального струму (ділянка В—С—D). Рух по гіперболі здійснюється у разі недовантаженого двигуна зі зростанням потужності за рахунок зростання струму, а рух по колу — з постійною потужністю.

Алгоритм регулювання швидкості у разі досягнення напругою статора рівня обмеження впливає з рівняння (6) і носить назву *Field Weakening Control (FWC)*

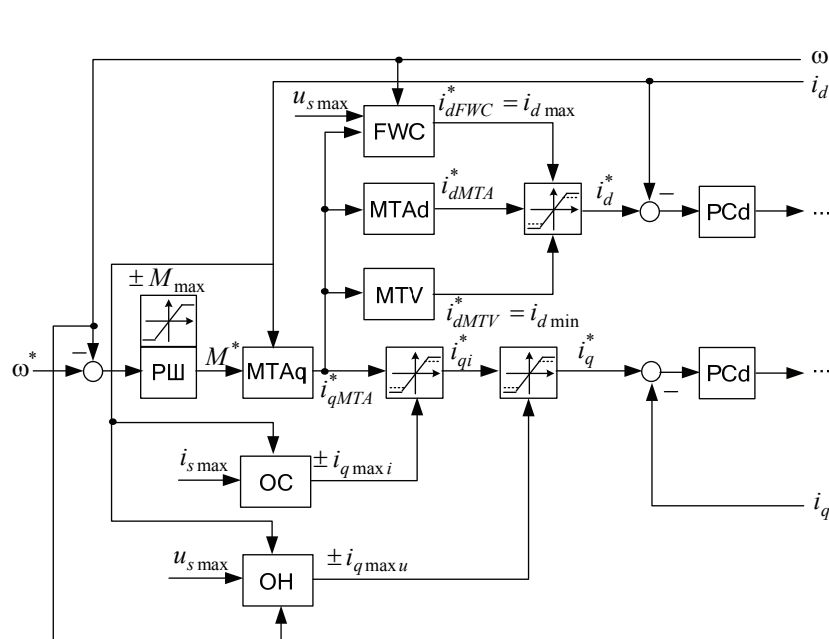
$$\omega = \frac{u_{s \max}}{z_p \sqrt{L_q^2 i_{qFWC}^2 + (L_d i_{dFWC} + \psi_{pm})^2}}; \quad (10)$$

звідки 
$$i_{dFWC} = \frac{-\psi_{pm} + \sqrt{u_{s \max}^2 / \omega_e^2 - L_q^2 i_{qFWC}^2}}{L_d}, \text{ якщо } |\omega_e| \geq z_p \omega_B. \quad (11)$$

Далі збільшення швидкості до бажаної величини відбувається по траєкторії MTV. У цьому режимі *d*-складова струму не тільки не зменшується, а навпаки зростає. Тому подальше зростання швидкості (ділянка D—E) можливе тільки за рахунок зменшення *q*-компоненти струму (див. рівняння (10)). При цьому зменшується не тільки момент, але й амплітуда струму, що за сталої амплітуди напруги приводить і до зниження потужності. Після досягнення усталеної швидкості відбувається зменшення моменту до моменту статичного опору по еліпсу усталеної швидкості до перетину його з гіперболою моменту статичного опору (ділянка E-G0, якщо розгін відбувався без навантаження при  $M_c = M_0$ , або E-GL при  $M_c = M_L$ ).

Якщо розглядати регулювання швидкості за траєкторію А-В-С-D-E, то регулювання у першій зоні відбувається від 0 до  $\omega_B$ , у другій зоні — від  $\omega_B$  до  $\omega_D$ , а у третій зоні — від  $\omega_D$  до  $\omega_E$ .

Концентричні еліпси постійних швидкостей мають центр у точці Н з координатами  $i_{d0} = \psi_{pm} / L_d$ ,  $i_{q0} = 0$ , у якій закінчується лінія MTV, що відповідає повному розмагнічуванню двигуна ( $\psi_q = 0$ ) і



безкінечній усталеній швидкості  $\omega$  ( $\omega = \infty$ ) за нульового моменту статичного опору ( $M_c = 0$ ).

Звичайно, що досягти цієї точки практично неможливо, але діапазон регулювання швидкості у третій зоні обмежується тільки моментом навантаження та механічною міцністю ротора.

Треба зазначити, що на усталеній швидкості потокоутворююча складова струму статора не повинна перевищувати приблизно  $i_{d0}/2$ , щоб запобігти неповоротного розмагнічування постійних магнітів.

Структурна реалізація описаного алгоритму керування показана на рис. 2.

Рис. 2. Структурна реалізація оптимальних стратегій керування IPMSM з урахуванням обмежень на струм і напругу статора

В ній регулятор швидкості РШ формує завдання на момент двигуна  $M^*$ . Щоб запобігти розв'язання в реальному часі рівняння (5), завдання на  $q$ -складову струму статора  $i_{qMTA}^*$  визначається за формулою (8), а на  $d$ -складову  $i_{dMTA}^*$  — за формулою (4). Щоб запобігти утворення алгебраїчного кола, у рівнянні (8) використовують не сигнал завдання на  $d$ -складову струму статора  $i_d^*$ , а сигнал зворотного зв'язку за цим сигналом  $i_d$ . Обмеження амплітуди струму статора досягається блоком динамічного обмеження  $q$ -складової струму статора на рівні

$$|i_{q\max i}| = \sqrt{i_{s\max}^2 - i_d^2}, \tag{12}$$

що обчислюється блоком ОС.

Переключення алгоритму керування з  $MTA$  на  $FWC$  та з  $FWC$  на  $MTV$  відбувається шляхом обмеження вихідного сигналу блока на рівні  $i_{dFWC}^*$  зверху та на рівні  $i_{dMPV}^*$  знизу (див. рис. 1).

Обмеження на амплітуду напруги статора закладено в алгоритм  $FWC$ , але в алгоритмі  $MTV$  воно відсутнє. Тому  $q$ -складову струму статора додатково обмежено на рівні

$$i_{q\max u} = \frac{\sqrt{u_{s\max}^2 - (L_d i_d + \psi_{pm})^2}}{L_q},$$

що впливає з рівняння (6), якщо  $u_s = u_{s\max}$ .

Точність обмеження напруги можна підвищити, якщо, складаючи рівняння (10), не нехтувати падінням напруги на активних опорах.

Графіки перехідних процесів у системі рис. 2, отримані методом структурного математичного моделювання показані на рис. 3.

Координати характерних точок графіків рис. 3 збігаються з відповідними точками діаграм рис. 1. Амплітуда струму статора не перевищує її максимально допустимого значення, а перевищення максимально допустимого рівня напругою статора відбувається на ділянках, де  $di_s/dt > 0$  і знаходиться у межах 1,5%, що треба врахувати зниженням на цю величину рівня обмеження напруги.

Отже запропонована система надійно забезпечує обмеження за напругою без наявності додаткового контуру напруги, що досягається виведенням залежності між амплітудою напруги статора та моментоутворюючою складовою струму статора та відповідним її обмеженням.

Для адекватного перемикання алгоритмів керування слід ретельно проаналізувати варіанти реалізації блоків динамічного обмеження сигналів. Можна показати, що деякі з них приводять до небажаних коливань в системі при перемиканнях між стратегіями керування. Це пояснюється тим, що у деяких випадках

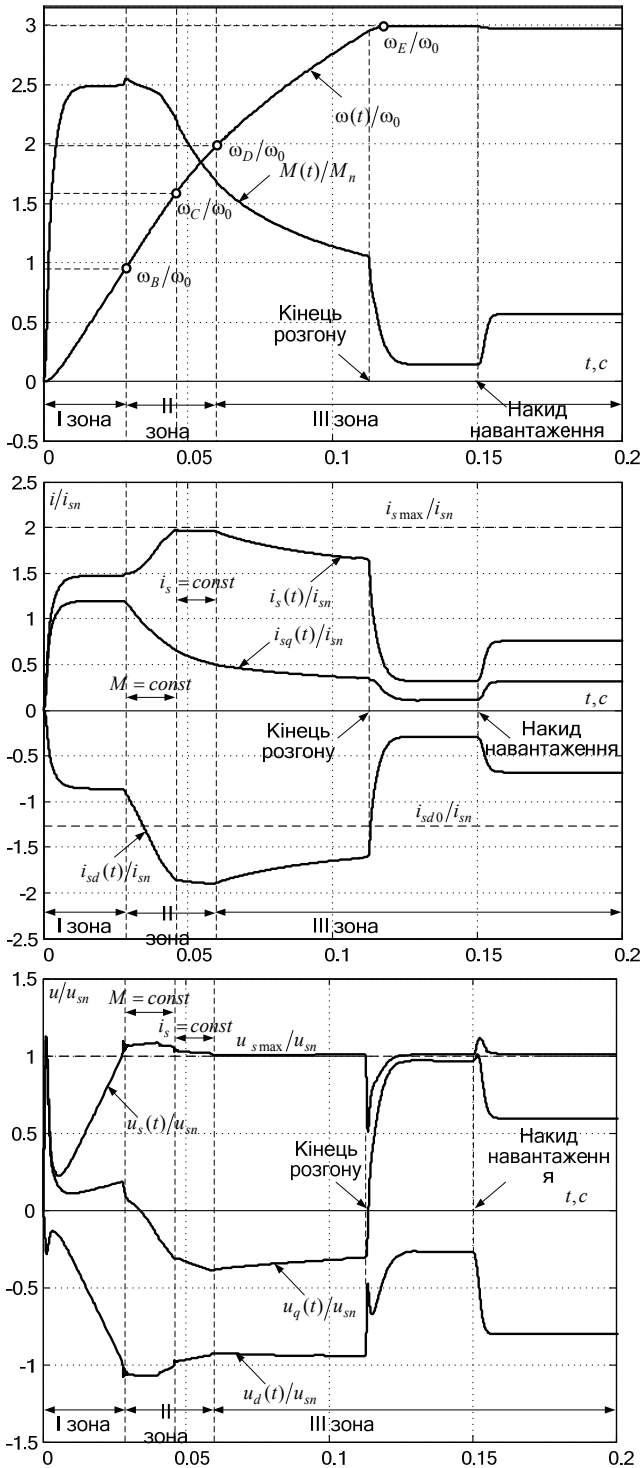


Рис. 3. Перехідні процеси у системі тризонного регулювання швидкості IPMSM з системою керування рис. 2

сигнал обмеження зверху з часом стає меншим, ніж сигнал обмеження знизу, внаслідок чого робота блока обмеження залежить від черговості виконання операцій.

Очевидно, що в алгоритми керування (див. формули (4), (7), (11)) входить велика кількість параметрів двигуна, неточне визначення яких впливає на енергоефективність керування. З цих параметрів найскладніше отримати інформацію про індуктивності *IPMSM*. Тому в роботі [10] розглянуто декілька варіантів ідентифікації індуктивностей рекурентним методом найменших квадратів.

### Висновки

1. Аналіз літературних джерел на тему оптимального керування СДПМ показав, що автори частини робіт пропонують занадто складні рішення, які потребують значних обчислень або використання великих масивів вихідних даних. Інші автори пропонують використовувати замкнений контур напруги, але рекомендації щодо його налаштування відсутні.

2. У запропонованій структурній реалізації системи тризонного керування швидкістю з оптимальним керуванням у першій та третій зонах досягнуте чітке перемикання алгоритмів у разі переходу з однієї зони в іншу та надійного обмеження напруги і струму за відсутності алгебраїчних контурів, без застосування громіздких тривимірних таблиць та складних обчислень і без додаткового регулятора напруги.

3. Синтезовану систему доцільно використовувати для приводу електричних та гібридних транспортних засобів з автономними джерелами живлення, для яких енергоефективне керування двигуном дозволить підвищити час роботи без підзарядки.

4. Працездатність запропонованої системи слід перевірити шляхом експериментальних досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Schröder D. Elektrische Antriebe — Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2009. — 1336 S.
2. New field weakening technique for high saliency interior permanent magnet motor / B. Bae, N. Patel, S. Schulz, S. Sul // Conf. Rec. of 2003 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. — 2003.
3. Lopez G. G. Current control of induction machines in the field-weakened region / G. G. Lopez, F. Gunawan, J. E. Walters // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2007. — Vol. 43, No. 4, July/Aug. — Pp. 981—989.
4. Morimoto S. Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator / S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda // IEEE Trans. on Industry Applications. — 1994. — Vol. IA-30, No. 4. — Pp. 920—926.
5. Lee Jae Hyuk. Field-weakening strategy in condition of DC-link voltage variation using on electric vehicle of IPMSM / Jae Hyuk Lee, Jung Hyo Lee // IEEE Trans. Ind. Applicat. — 2011. — Vol. 27, Jan/Feb. — Pp. 38—44.
6. Ki-Chan. A novel magnetic flux weakening method of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles / Ki-Chan Kim // IEEE Trans. Ind. Applicat. — 2012. — Vol. 33, Jan/Feb. — Pp. 43—48.
7. Loss minimizing control of PMSM for electric power steering / Oluleke Babayomi, Adeola Balogun, Charles Osheku // 17th UKSIM-AMSS International Conference on Modelling and Simulation. — 2015. — Pp. 438—443.
8. Fuzzy maximum torque per ampere and maximum torque per voltage control of interior permanent magnet synchronous motor drive / M.-S. Wang, M.-F. Hsieh, I. N. Syamsiana, W.-C. Fang // Sensors and Materials. — 2017. — Vol. 29, No. 4. — Pp. 461—472.
9. Толочко О. И. Анализ систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при регулировании скорости вверх от номинальной / О. И. Толочко, В. В. Божко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — 2010. — № 28. — С. 149—152.
10. Толочко О. І. Ідентифікація індуктивностей синхронного двигуна з постійними магнітами рекурентним методом найменших квадратів / О. І. Толочко, В. В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2012. — Вип. № 1 (12)—2(13). — С. 234—238. — (Електротехніка і енергетика).

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10.2017

**Толочко Ольга Іванівна** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода, e-mail: tolochko.ola@gmail.com ;

**Бовкунович Віталій Сергійович** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода;

**Сопіга Микола Володимирович** — магістрант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода

**O. I. Tolochko<sup>1</sup>**  
**V. S. Bovkunovych<sup>1</sup>**  
**M. V. Sopiha<sup>1</sup>**

## **Structural Implementation of Three-Zone Speed Control System of Synchronous Motor with Permanent Magnets Using Optimal Control Strategies**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*A new structural implementation of three-zone speed control system of electric drive system based on synchronous motor with permanent magnets has been proposed. It uses optimal control strategies "Maximum torque per ampere" and "Maximum torque per volt", in which the support of stator voltage at the maximally acceptable level is carried out not with additional voltage circuit, but due to the double dynamic limitation of the moment-forming component of the stator current.*

**Keywords:** electric drive, synchronous motor with permanent magnets, three-zone speed control, optimal control strategies, coordinate restrictions.

**Tolochko Olha I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Automation of Electromechanics Systems and Electromechanic Drive, e-mail: tolochko.ola@gmail.com ;

**Bovkunovych Vitalii S.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Automation of Electromechanics Systems and Electromechanic Drive;

**Sopiha Mykola V.** — Master's Degree Student of the Chair of Automation of Electromechanics Systems and Electromechanic Drive

**О. И. Толочко<sup>1</sup>**  
**В. С. Бовкунович<sup>1</sup>**  
**Н. В. Сопига<sup>1</sup>**

## **Структурная реализация системы трехзонного регулирования скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами при использовании оптимальных стратегий управления**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Предложена новая структурная реализация системы трехзонного регулирования скорости системы электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами при использовании оптимальных стратегий управления «Максимальный момент на ампер» и «Максимальный момент на вольт», в которой поддержка напряжения статора на максимально допустимом уровне осуществляется не с помощью дополнительного контура напряжения, а за счет двойного динамического ограничения моментобразующей составляющей тока статора.*

**Ключевые слова:** электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, трехзонное регулирования скорости, оптимальные стратегии управления, ограничение координат.

**Толочко Ольга Ивановна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: tolochko.ola@gmail.com ;

**Бовкунович Виталий Сергеевич** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

**Сопига Николай Владимирович** — магистрант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода