

УДК 62-83

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.030>

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТОЧОК ПЕРЕМИКАНЬ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ ЯВНОПОЛЮСНИМИ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

О.І. Толочко*, докт. техн. наук, О.О. Бурмельов, Я.О. Каленчук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги 37, м. Київ, 03056, Україна
e-mail: tolochko.ola@gmail.com, oleksii.burmelov@gmail.com

У роботі виконано детальний аналіз алгоритмів керування синхронним двигуном із постійними магнітами в широкому діапазоні швидкостей у разі використання оптимальних стратегій: “Максимальний момент на ампер” (перша зона), “Режим послаблення поля” (друга зона) та “Максимальний момент на вольт” (третья зона). Запропоновано методику визначення меж першої та другої зони, а також спосіб визначення максимального статичного моменту, з яким двигун може працювати без ризику неповоротного розмагнічування постійних магнітів. Показано, як можна розрахувати максимально можливу робочу швидкість двигуна за заданого навантаження, максимальне навантаження двигуна за заданої швидкості, а також як визначити доцільність використання другої та третьої зон керування для досягнення максимальної швидкості двигуна за заданого навантаження. Бібл. 19, рис. 4.

Ключові слова: електропривод, синхронний двигун, постійні магніти, максимальний момент на ампер, послаблення поля, максимальний момент на вольт, обмеження координат.

Постановка проблеми. Останнім часом синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ, англ. *PMSM – Permanent Magnet Synchronous Machine*) набувають усе більшого розповсюдження завдяки найкращим масогабаритним показникам, високим значенням коефіцієнта корисної дії (ККД) і коефіцієнта потужності, різноманітності конструкції та способів керування, що здатні задовольнити багато вимог [1–5]. Залежно від розташування полюсів розрізняють машини з поверхневими магнітами (англ. *SPMSM – Surface Permanent Magnet Synchronous Machine*) та машини з магнітами, вбудованими в середину ротора (англ. *IPMSM – Interior Permanent Magnet Synchronous Machine*). *SPMSM* є неявнополюсними (мають симетричну магнітну систему). Через розташування магнітів на поверхні ротора неявнополюсні двигуни не можуть обертатися з великою швидкістю і використовуються переважно для приводу малих транспортних засобів (велосипеди, самокати, сігвеї, кондиціонери, повітрорудні системи обігріву тощо). *IPMSM* мають міцну конструкцію ротора, який є особливо придатним для високошвидкісної роботи, тобто *IPMSM* можуть обертатися зі швидкістю, що перевищує номінальну завдяки псевдопослабленню поля (*FWC Control*). *IPMSM*, на відміну від *SPMSM*, мають асиметричну магнітну систему (зазвичай $L_d < L_q$), тобто є явнополюсними, що зумовлює наявність в електромагнітному моменті таких двигунів не тільки активної, а ще й реактивної складової. Ця особливість сприяє ще більшому покращенню енергетичних та масогабаритних показників двигуна та надає додаткові можливості для ефективного застосування стратегій оптимального керування.

Швидкість *PMSM* можна регулювати змінюванням напруги статора, послабленням дії постійних магнітів (повздовжня складова магнітного поля) та послабленням поперечної складової магнітного поля. Відповідно до цих трьох способів виділяють три зони регулювання швидкості, у кожній із яких використовуються різні алгоритми керування [1, 6–8]. Найбільшою складністю під час реалізації таких систем є організація перемикачів керування з одного алгоритму на інший зі збереженням обмежень на струм і напругу статора. При формуванні алгоритму керування в режимі *online* необхідно чітко визначити всі умови перемикачів алгоритмів, частина з яких отримується через розв’язання нелінійних рівнянь ітераційними методами [1, 2, 7]. Такі алгоритми є зазвичай досить заплутаними і такими, що потребують складних обчислень у реальному часі.

Саме з цієї причини основним способом розв'язання цієї проблеми є застосування в системах керування попередньо розрахованих або отриманих за допомогою експериментальних випробувань тривимірних таблиць [9–11]. Недоліком такого рішення є неможливість адаптації системи до зміни параметрів, потреба великого обсягу пам'яті для збереження таблиць і необхідність формувати таблиці для кожного певного двигуна з урахуванням технологічних умов його роботи.

Ще одним способом реалізації енергоефективного керування є застосування таких структурних схем, у яких перемикання алгоритмів відбувається автоматично [12, 13]. У всіх випадках складність системи керування суттєво залежить від кількості зон. Для двигунів, призначених для регулювання швидкості в діапазоні, що перевищує номінальну швидкість, у паспорті надається максимальна швидкість, але залишається невідомим, чи достатньо для її досягнення двозонного керування або потребується й перехід у третю зону. Тому актуальним питанням є визначення верхньої межі другої зони та порівняння її з максимально припустимою швидкістю двигуна. Другою проблемою на стадії вибору двигуна є визначення максимального статичного навантаження в усталених режимах з умови обмеження повздовжньої складової струму статора на рівні, що надійно запобігає неповоротному розмагнічуванню постійних магнітів. Розв'язання сформульованих проблем дасть змогу правильно здійснити вибір двигуна за заданою тахограмою і навантажувальною діаграмою та синтезувати енергоефективну систему керування мінімальної складності.

В наявних публікаціях [1-3, 12, 14-17] наведено певні формули і алгоритми керування явнополюсним СДПМ при використанні різних стратегій оптимального керування та рівняння, на яких ці алгоритми побудовані. Але в цій статті мова йде не про алгоритми керування, а про попередню оцінювання можливостей наявних двигунів і систем керування задовольнити технологічні вимоги.

Метою роботи є визначення меж зон регулювання швидкості векторно-керованого IPMSM у разі використання оптимальних стратегій керування «Максимальний момент на Ампер» (перша зона), «Послаблення поля» (друга зона) та «Максимальний момент на Вольт» (третя зона) залежно від обмеження на струм статора і його складові та від заданого моменту навантаження та визначення максимально припустимих навантажень з умови запобігання неповоротному розмагнічуванню постійних магнітів.

Матеріали і результати досліджень. Математичний опис IPMSM в оберտальній системі координат d - q , орієнтованій за вектором потокозчеплення постійних магнітів Ψ_{pm} , що застосовується під час синтезування систем векторного керування (СВК) має вигляд [1–6 та ін.]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = i_d R + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Psi_q, \\ u_q = i_q R + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Psi_d, \\ \Psi_q = L_q i_q, \\ \Psi_d = \Psi_{pm} + L_d i_d, \\ M_a = k_m \Psi_{pm} i_q, \\ M_r = k_m (L_d - L_q) i_d i_q, \\ M = M_a + M_r = k_m (\Psi_{pm} i_q + \Delta L i_d i_q), \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

де $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q$ – проєкції просторових векторів напруги, струму і потокозчеплення статора на осі d і q ; R – активний опір статора; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора ($L_d < L_q$); $\Delta L = L_d - L_q < 0$; M, M_a, M_r, M_c – електромагнітний момент двигуна, його активна і реактивна складові та момент статичного опору; ω, ω_e –

механічна та електрична кутові швидкості ротора; z_p – кількість пар полюсів; J – момент інерції двигуна;

$$\Delta L = L_d - L_q < 0; \quad (2)$$

$$\omega_e = z_p \omega, \quad k_m = \frac{3}{2} z_p. \quad (3)$$

Якщо в рівняннях напруги статора (перші 2 рівняння системи (1)) знехтувати падіннями напруги на активному опорі, то в усталеному режимі взаємозв'язок між амплітудою напруги, швидкістю двигуна та складовими струмів визначається виразом:

$$u_s = \sqrt{u_q^2 + u_d^2} \approx Z_p \omega \sqrt{(L_d i_q)^2 + (\psi_{pm} + L_d i_d)^2}, \quad (4)$$

Звідки:

$$\omega \approx \frac{u_s}{z_p \sqrt{(L_q i_q)^2 + (\psi_{pm} + L_d i_d)^2}}. \quad (5)$$

З (4) випливає можливість регулювання швидкості через змінювання трьох сигналів: u_s , i_d та i_q .

Регулювання швидкості до її номінального значення (перша зона) відбувається завдяки зміні напруги. Запас напруги (різниця між напругою ланки постійного струму перетворювача u_{dc} та номінальною напругою статора u_{sn}) використовується для форсування перехідних процесів. У другій зоні регулювання швидкості відбувається через збільшення d -складової струму у від'ємному напрямку, що зумовлює псевдопослаблення поля двигуна. Надмірне збільшення абсолютної величини струму i_d на тривалий час може спричинити незворотне розмагнічування постійних магнітів. Тому подальшого збільшення швидкості можна досягти тільки завдяки зменшенню q -складової струму статора (третя зона), що зменшує величину моменту статичного опору M_c , за якої може бути досягнуто бажане збільшення максимальної швидкості ω_{max} в усталеному режимі.

Для аналізу усталених режимів і визначення точок перемикання стратегій керування зручно використовувати в системі координат i_d, i_q криві постійних струмів, постійних моментів, постійних напруг та постійних швидкостей.

Зі зв'язку між амплітудою струму статора та його складовими

$$i_s^2 = i_q^2 + i_d^2 \quad (6)$$

видно, що криві рівних струмів є колами радіусу i_s з центром у початку координат.

Криві постійних моментів є гіперболами, що знаходяться з рівняння моменту за однією з таких формул:

$$i_q = \frac{M}{k_m (\psi_{pm} + \Delta L i_d)}, \quad (7)$$

$$i_d = \frac{M - k_m \psi_{pm} i_q}{k_m \Delta L i_q}. \quad (8)$$

Для графічної інтерпретації рівнянь напруги (3) їх записують у вигляді [12]:

$$\left(\frac{u_s}{\omega_e} \right)^2 = L_q^2 i_q^2 + L_d^2 (i_d + i_{d0})^2, \quad (9)$$

де

$$i_{d0} = \psi_{pm} / L_d \quad (10)$$

– струм, що відповідає повному розмагнічуванню двигуна.

Рівняння (9) є рівнянням еліпса з центром у точці з координатами $[-i_{d0}, 0]$ і півосями:

$$r_d = \frac{u_s}{\omega_e L_d}, \quad r_q = \frac{u_s}{\omega_e L_q}. \quad (11)$$

У разі одночасної зміни напруги та швидкості, що відбувається під час розгону та гальмуванні двигуна в першій зоні, розмір еліпса визначає тільки відношення напруги до швидкості, яке за сталого прискорення майже не змінюється. За фіксованої швидкості такі еліпси є кривими постійних напруг (чим більше еліпс, тим більше напруга), а за фіксованої напруги (друга і третя зона) вони є кривими постійних швидкостей (чим менше еліпс, тим більше швидкість). У разі повного розмагнічування двигуна в усталеному режимі розглянутий еліпс вироджується в точку з координатами $[-i_{d0}, 0]$, якій відповідає нескінченна швидкість двигуна за нульового моменту статичного опору. Очевидно, що практичне досягнення такого режиму є неможливим.

На рис. 1 показано діаграми розподілення складових струму статора в разі тризонного регулювання швидкості IPMSM у відносних одиницях $\bar{i} = i / i_{sn}$, $\bar{M} = M / M_n$, $\bar{\omega} = \omega / \omega_n$ у системі координат $\bar{i}_q(\bar{i}_d)$. На рис. 1 зображена гіпербола постійного моменту $M = M_j + M_c$, яка в пуско-гальмівних режимах складається з динамічної M_j та статичної M_c складових. З рисунку видно, що один і той же момент двигуна M можна забезпечити за різних сполучень складових струму i_d та i_q . Тому ви-

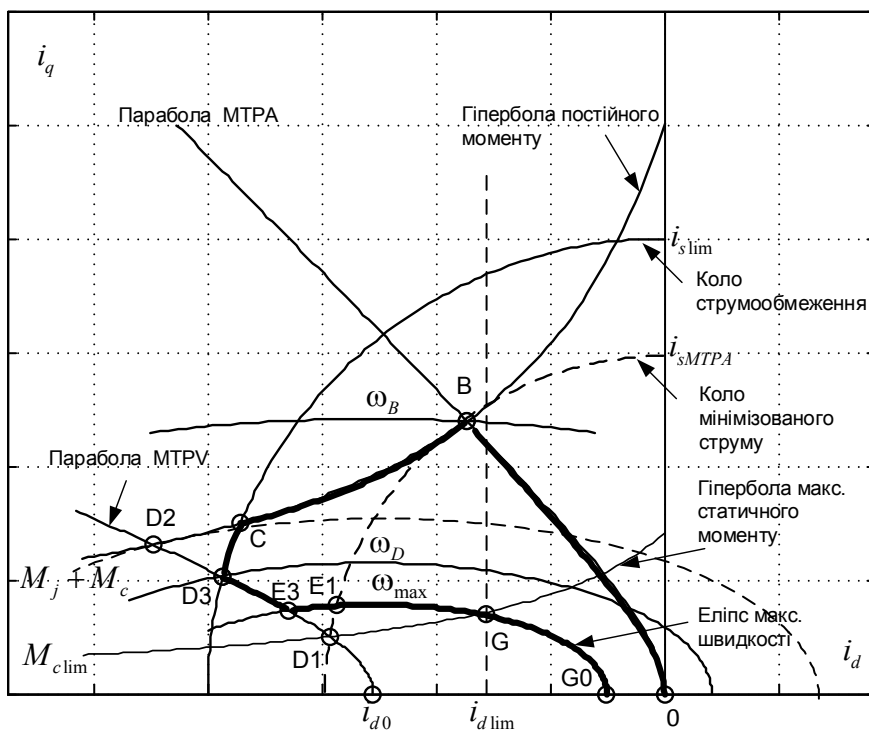


Рис. 1

никає задача вибору такого їхнього сполучення, яке б забезпечило мінімальний струм або мінімальну напругу статора. Першому критерию відповідає відома оптимальна стратегія керування «Максимальний момент на Ампер» (*Maximal Torque per Ampere – МТРА*), а другому – стратегія «Максимальний момент на вольт» (*МТРВ – Maximal Torque per Volt*). Ці обидві стратегії надзвичайно важливі в умовах живлення двигуна від автономного джерела енергії, де треба забезпечити максимальний момент за обмеженої потужності. Додатково перевагою стратегії МТРА є мінімізація втрат у міді, а стратегії МТРВ – мінімізація втрат у сталі від вихрових струмів.

Для графічної інтерпретації цих критеріїв треба побудувати коло струмів та еліпс напруги, що є дотичними до гіперболи моменту, які зображені на рис. 1 пунктиром.

У багатьох роботах доведено, що в першій зоні найкращі результати можна дістати у разі використання стратегії МТРА, для якої складові струму статора пов'язуються між собою співвідношенням [1–3, 15, 17–19]

$$i_{dMTPA} = -\frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} - \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qMTPA}^2} \quad (12)$$

Стратегія МТРВ, яка використовується для регулювання швидкості в третій зоні, описується залежністю [1–3,12]:

$$i_{dMTPV} = -\frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} \cdot \left(2 - \frac{L_q}{L_d}\right) - \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qMTPV}^2} \quad (13)$$

Параболи МТРА та МТРV, побудовані за формулами (11) та (12), додано на рис. 1. Перша з них є екстремаллю, що мінімізує струм статора за заданого моменту. Друга є екстремаллю, що мінімізує напругу статора за заданого моменту і заданої швидкості або максимізує швидкість за обмеженої напруги. Як бачимо, вони проходять через точки, в яких парабола постійного моменту торкається кола мінімального струму та еліпса мінімальної напруги (пунктирні криві) відповідно.

На ділянці *OB* діаграми рис. 1 відбувається швидке формування бажаних складових струму статора і моменту двигуна, а регулювання швидкості в першій зоні внаслідок змінювання напруги статора з заданим моментом відбувається в точці *B*. Швидкість двигуна в цій точці у разі досягнення напругою статора рівня обмеження є межею першої зони. Цю зону в англійській літературі називають *Constant Torque Region*.

Перехід з параболи МТРА на параболу МТРV може відбуватися через збільшення струму i_d у від'ємному напрямку (псевдопослаблення поля) за колом постійного струму з поступовим зменшенням моменту (траєкторія *B D1*) або за гіперболою постійного моменту з поступовим збільшенням амплітуди струму статора (траєкторія *B D2*). Таке регулювання відбувається в другій зоні за стратегією керування, яку називають *Field Weakening Control* (FWC). У разі керування з постійним струмом, яке відбувається з постійною потужністю (*Power Constant Region*) може статися так, що коло постійного струму перетне параболу МТРV за швидкості, що перевищує максимальну швидкість двигуна ω_{max} . Це означає, що вхід у третю зону не відбудеться (траєкторія *BE1*). У другому випадку можливо досягнення струмом максимально припустимого рівня $i_{s,lim}$. Тоді алгоритм керування перемикається на регулювання швидкості з постійним струмом, а робота в другій зоні відбувається за траєкторією *B C D3*. Швидкість двигуна в точках *D1*, *D2* або *D3* визначає межу другої зони без урахування обмежень на струм і швидкість.

Після досягнення двигуном траєкторії МТРV починається регулювання швидкості в третій зоні через зменшення *q*-складової струму статора за одночасного зменшення модуля *d*-складової (траєкторія *D3 E3*). Це призводить до ще більш інтенсивного зменшення моменту, тобто регулювання відбувається зі зменшенням потужності.

Максимально можлива швидкість двигуна ω_{max} залежить не тільки і не стільки від законів керування, а від технологічних і конструктивних обмежень. Вона зазвичай вказується в паспорті двигуна. Після досягнення двигуном заданої швидкості відбувається зменшення електромагнітного моменту двигуна завдяки зникненню його динамічної складової до рівня моменту статичного опору, яке відбувається за еліпсом постійної швидкості до точки перетину з гіперболою статичного моменту (траєкторія *E3 G* – третя зона або *E1 G* – друга зона). Під час роботи на усталеній швидкості ($\omega = \text{const}$, $M_j = 0$) необхідно обмежити модуль струму i_d на рівні $i_{d,lim}$, за якого надійно унеможливується неповоротне розмагнічування постійних магнітів. У режимі ідеального холостого ходу ($M_c = 0$) робочою точкою стає точка *G0*, розташована на тому ж самому еліпсі. Процес гальмування двигуна відбуватиметься в зворотному напрямку аналогічними траєкторіями в 3-му квадранті з урахуванням реверсу динамічного моменту.

З виконаного аналізу роботи приводу випливає, що під час синтезування системи оптимального керування важливо визначити, у яких зонах буде здійснюватися регулювання швидкості, який момент статичного опору забезпечується й за яких струмів відбувається керування. Для відповіді на ці питання необхідно визначити координати всіх характерних точок на діаграмах, зображених на рис. 1.

Щоби визначити величину мінімізованого струму, що утворює заданий момент у разі роботи в першій зоні, необхідно знайти координати точки *B* перетину параболи МТРА та гіперболи заданого моменту за допомогою чисельного розв'язання нелінійного рівняння:

$$\frac{M - k_m \Psi_{pm} i_{qB}}{k_m \Delta L i_{qB}} + \frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} + \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qB}^2} = 0, \tag{14}$$

яке після перетворень набуває вигляду неповного алгебраїчного рівняння четвертого степеня щодо i_{qB} [1]:

$$i_{qB}^4 + \frac{M \Psi_{pm}}{k_m \Delta L^2} i_{qB} - \left(\frac{M}{k_m \Delta L} \right)^2 = 0, \tag{15}$$

З (7) можна розрахувати i_{dB} і знайти відстань цієї точки від початку координат за формулою (5), як це показано на рис. 1. Знайдена точка перетину розташована на колі з радіусом

$$i_{sMTPA} = i_{sB}(M) = \sqrt{i_{qB}^2(M) + i_{dB}^2(M)}, \tag{16}$$

дотичному до гіперболи заданого моменту.

Щоби визначити межу регулювання швидкості в першій зоні ω_B , яку зазвичай називають основною (*base speed*), необхідно в рівняння (4) підставити значення i_{dB} та i_{qB} номінальну напругу, що обирається за формулою:

$$\omega_{1m} = \omega_B \approx \frac{u_{sn}}{z_p \sqrt{[L_q i_{qB}(M)]^2 + [\Psi_{pm} + L_d i_{dB}(M)]^2}}. \tag{17}$$

Графіки залежностей $\bar{\omega}_B(\bar{M})$, $\bar{i}_{sB}(\bar{M})$ та $\bar{u}_{sB}(\bar{M})$ наведено на рис. 2 ($\bar{\omega}_B = \omega_B / \omega_n$, $\bar{i}_{sB} = i_{sB} / i_{sn}$, $\bar{u}_{sB} = u_{sB} / u_{sn}$). Він побудований для двигуна з параметрами $I_n=7.1$ А, $U_{ln}=97$ В, $n_n=2000$ об./хвил.; $z_p=2$, $M_n=1.67$ Нм, $J=0.0005$ кг·м², $\Psi_{pm}=0.0785$ Вб, $R=0.57$ Ом, $L_d=8.72$ мГн, $L_q=22.78$ мГн. З рис. 2 видно, що перехід у другу зону відбувається за швидкості, яка за малих навантажень може значно перевищувати номінальну. Це обумовлено тим, що у разі використання алгоритму МТРА, як показано, наприклад, у [17] поряд з мінімізацією i_s/M значно зменшується і відношення u_s/M , що дає змогу за номінальної напруги досягти вищої швидкості.

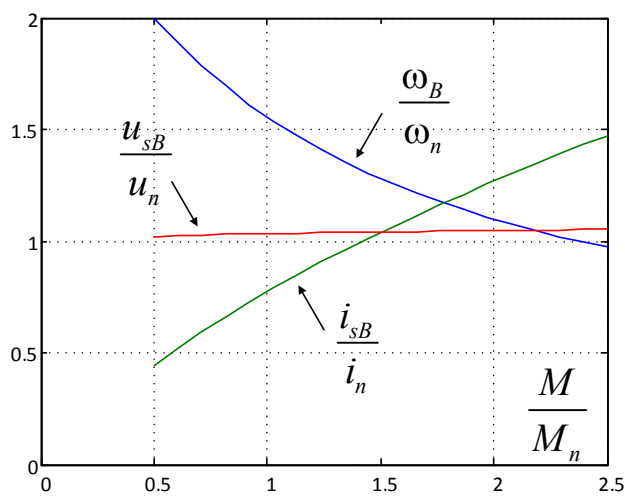


Рис. 2

Щоби визначити межу регулювання швидкості в другій зоні за постійного струму i_s , необхідно розрахувати координати точки D1 перетину кола максимального струму з параболою МТРВ за допомогою розв'язання нелінійного рівняння:

$$\sqrt{i_s^2 - i_{qD1}^2} + \frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} \cdot \left(2 - \frac{L_q}{L_d} \right) + \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qD1}^2} = 0 \tag{18}$$

щодо i_{qD1} , потім розрахувати i_{dD1} за формулою (12) і розрахувати межу другої зони за формулою:

$$\omega_{2m} = \omega_{D1} \approx \frac{u_n}{z_p \sqrt{[L_q i_{qD1}(M)]^2 + [\Psi_{pm} + L_d i_{dD1}(M)]^2}}. \tag{19}$$

Після визначення межі другої зони її порівнюють з максимальною швидкістю двигуна ω_{max} . У випадку, коли $\omega_{2m} \geq \omega_{max}$, регулювання швидкості в третій зоні не потрібно, і систему керування можна спростити, обмежившись двозонним регулюванням.

Якщо регулювання швидкості в другій зоні відбувається з постійним моментом, то ордината точки D2 перетину гіперболи моменту з параболою МТРВ знаходиться за допомогою розв'язання нелінійного рівняння:

$$\frac{M - k_m \Psi_{pm} i_{qD2}}{k_m \Delta L i_{qD2}} + \frac{\Psi_{pm}}{2\Delta L} \cdot \left(2 - \frac{L_q}{L_d}\right) + \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\Psi_{pm}^2}{4\Delta L^2} + i_{qD2}^2} = 0, \quad (20)$$

потім необхідно розрахувати i_{dD2} за формулою (12) і визначити амплітуду струму i_{sD2} у цій точці. Якщо отриманий струм виявиться більше максимально припустимого ($i_{sD2} > i_{s\lim}$), то треба розрахувати ординату точки $D3$ перетину кола максимального струму з параболою МТРВ i_{qD3} за допомогою розв'язання нелінійного рівняння (18) із аргументом i_{qD3} і максимально припустимим струмом $i_s = i_{s\lim}$, потім розрахувати i_{dD3} за формулою (12) і розрахувати межу другої зони за формулою:

$$\omega_{2m} = \omega_{D3} \approx \frac{u_n}{z_p \sqrt{[L_q i_{qD}(M)]^2 + [\Psi_{pm} + L_d i_{dD}(M)]^2}}. \quad (21)$$

Графік залежності межі другої зони під час розгону зі сталим моментом від величини цього моменту показано на рис. 3, а, а графік залежності межі другої зони під час розгону зі сталим струмом від величини цього струму – на рис. 3, б.

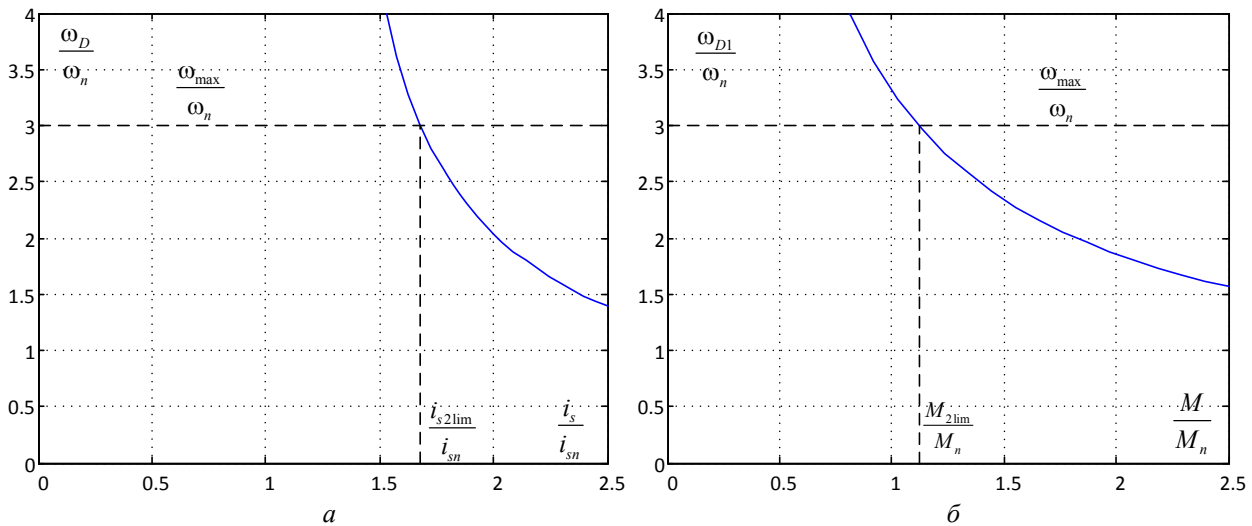


Рис. 3

Графіки залежностей $\bar{\omega}_D(\bar{i}_s)$, $\bar{\omega}_{\max}(\bar{i}_s)$ та $\bar{u}_{sB}(\bar{i}_s)$ наведено на рис. 3 ($\bar{\omega}_D = \omega_D / \omega_n$, $\bar{i}_B = i_B / i_{sn}$, $\bar{u}_{sB} = u_{sB} / u_{sn}$, $\bar{\omega}_{D1} = \omega_{D1} / \omega_n$, $\bar{M}_{2\lim} = M_{2\lim} / M_n$). З рис. 3 видно, що під час роботи зі сталим моментом максимальної швидкості можна досягти без застосування третьої зони у разі розгону з $M \leq M_{2\lim}$, а під час роботи зі сталим струмом – за умови $i_s \leq i_{s2\lim}$.

Залишилося тільки визначити, з яким моментом може працювати двигун в усталеному режимі.

З аналізу динамічних режимів видно, що під час регулювання швидкості в другій та третій зонах d -складова струму може перевищувати значення i_{d0} , яке відповідає повній компенсації цим струмом потокозчеплення постійних магнітів. Такого не можна допустити під час роботи в усталеному режимі, тому що це може призвести до безповоротного розмагнічування магнітів. Щоб цього не відбулося, абсолютна величина струму i_{d0} в усталеному режимі не мусить перевищувати приблизно половину струму повного розмагнічування:

$$|i_{d\lim}| \approx i_{d0} / 2. \quad (22)$$

Щоби дотриматися цього обмеження, гіпербола максимального статичного моменту на максимальній швидкості мусить перетинати еліпс максимальної швидкості за умови $i_d = -i_{d\lim}$ (точка на рис. 1).

З рівняння (8) розраховуємо

$$i_{qG} = \sqrt{(u_{s\lim}/\omega_{\lim})^2 - L_d^2(i_{d\lim} + i_{d0})^2} / L_q, \quad (23)$$

а потім

$$M_{c\lim} = k_m (\psi_{pm} i_{qG} + \Delta L i_{d\lim} i_{qG}). \quad (24)$$

Цю методику можна використати для визначення максимального навантаження на будь-якій іншій швидкості, а також для розв'язання зворотної задачі: визначити максимальну швидкість, на якій можлива тривала робота в усталеному режимі з бажаним навантаженням. Відповідні графіки для $|i_{d\lim}| = i_{d0}/2$ показано на рис. 4. ($\bar{M}_{c\lim} = M_{c\lim} / M_n$, $\bar{\omega}_{\lim} = \omega_{\lim} / \omega_n$).

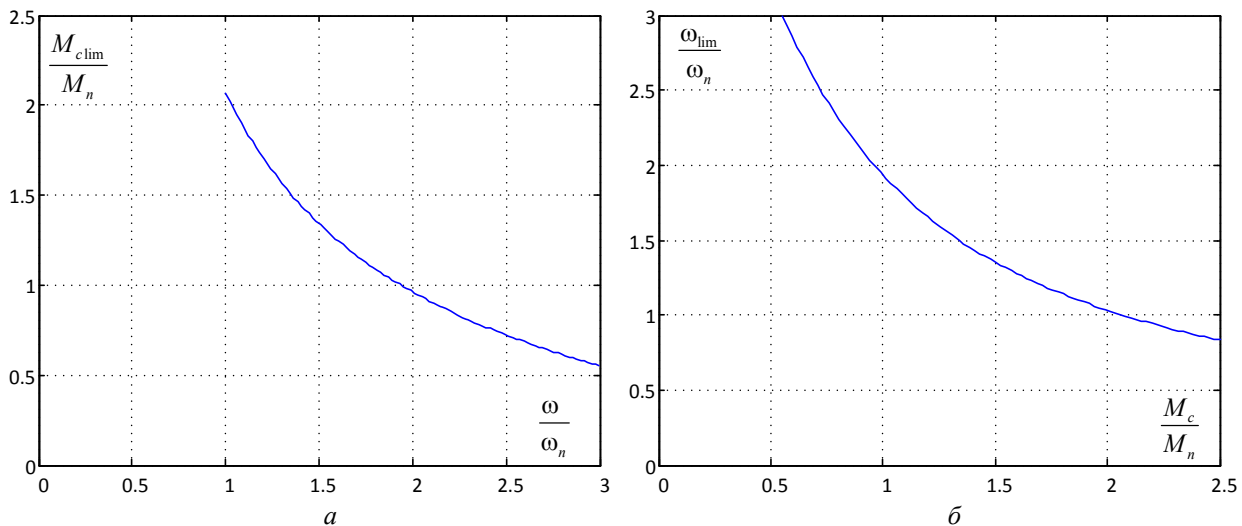


Рис. 4

Висновки. У роботі ретельно досліджено фазові траєкторії складових струму статора явнопольного синхронного двигуна з постійними магнітами за тризонного регулювання швидкості із застосуванням у першій зоні стратегії МТРА, у другій – стратегії FWC та в третій – стратегії МТРВ. На основі виконаного аналізу запропонована методика і наведені формули та рівняння для розрахунку меж першої та другої зон, які змінюються залежно від електромагнітного моменту, обмеження на струм і алгоритму роботи системи керування, а також методика визначення максимального статичного моменту, з яким двигун може працювати в усталеному режимі на будь-якій швидкості без ризику неповоротного розмагнічування постійних магнітів. Останню методику можна запропонувати і для розв'язання зворотної задачі: визначити максимальну швидкість, на якій можлива тривала робота в усталеному режимі з бажаним навантаженням.

Використання запропонованих методик на стадії синтезу системи керування дасть змогу уточнити, чи потрібно для досягнення максимальної швидкості регулювання її в другій та третій зонах, до якої швидкості можна розганяти двигун, щоб він міг надійно працювати в усталеному режимі із заданим навантаженням, і яке навантаження двигун може витримати на заданій швидкості.

1. Schröder D. Elektrische Antriebe. Regelung von Antriebssystemen. 3. bearbeitete Auflage. Springer: Berlin, Heidelberg; 2009. 1336 p.
2. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. CRC Press; 2010. 564 p.
3. Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. New Jersey: Prentice Hall PTR; 2002. 711 p.
4. Sul S.-K. Control of electric machine drive systems. Willey-IEEE Press; 2011. 424 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470876541>
5. Doncker R.D., Pulte D.W.J, Veltman A. Advanced electrical drives. Analysis, modeling, control. Berlin: Springer; 2011. p. 455. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0181-6>
6. Agrawa I.J., Bodkhe S. Steady-state analysis and comparison of control strategies for PMSM. Modelling and Simulation in Engineering; 2015. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/306787>
7. Naomitsu Urasaki, Yohei Noguchi, Abdul Motin Howlader, Yuri Yonaha, Atsushi Yona & Tomonobu Senjyu. Wide-speed Range Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Parameter Identifi-

- fication, *Electric Power Components and Systems*, 2009, 37:8, 847–865. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325000902817218>
8. Itani K., De Bernardinis A., Khatir Z. and Jammal A. Optimal traction and regenerative braking reference current synthesis for an IPMSM motor using three combined torque control methods for an Electric Vehicle, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2016. Pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520214>
 9. Yang N., Luo G., Liu W., and Wang K. Interior permanent magnet synchronous motor control for electric vehicle using look-up table, in *Proc. IEEE Power Electron. Motion Control Conf.*, 2012, Pp. 1015–1019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2012.6258940>
 10. Jung S., Hong J. and Nam K Current Minimizing Torque Control of the IPMSM Using Ferrari's Method, in *IEEE Transactions on Power Electronics*. Dec. 2013. Vol. 28. No. 12. Pp. 5603–5617. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2245920>
 11. Pan C. T. and Sue S. M. A linear maximum torque per ampere control for IPMSM drives over full-speed range, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Jun. 2005. Vol. 20. No. 2. Pp. 359–366. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.841517>
 12. Li J. et al. Deep flux weakening control with six-step overmodulation for a segmented interior permanent magnet synchronous motor, *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056517>
 13. Pan Ching-Tsai and Sue S.-M. A linear maximum torque per ampere control for IPMSM drives over full-speed range in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 2005 Vol. 20. No. 2. Pp. 359–366. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.841517>
 14. Tolochko O.I., Bovkunovych V.S., Sopiha M.V Structural Implementation of Three-Zone Speed Control System of Synchronous Motor with Permanent Magnets Using Optimal Control Strategies. *Visnik of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2017. No 5. Pp. 101–107. (Ukr)
 15. Chy M.M. I. and Uddin M.N. Analysis of Flux Control for Wide Speed Range Operation of IPMSM Drive. *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, Montreal, QC, Canada, 2007. Pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.1109/LESCPE.2007.4437388>
 16. Atashin S. A., Zarchi H. A. and Arab Markadeh G. R. Maximum Torque of IPMSM in Wide Speed Range Based on Current Angle Approach. *11th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, Iran, 2020. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDSTC49159.2020.9088458>
 17. Miguel-Espinar, C., Heredero-Peris, D., Gross, G., Llonch-Masachs, M., & Montesinos i Miracle D. Maximum Torque per Voltage Flux-Weakening strategy with speed limiter for PMSM drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3020029>
 18. Bolognani S., Petrella R, Prearo A. and Sgarbossa L. On-line tracking of the MTPA trajectory in IPM motors via active power measurement. *The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM*. 2010, Rome, Italy, 2010. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607843>
 19. Tolochko O., Energy Efficient Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. Chapter in the free-open book, *Applied Modern Control*, 2019. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80424>

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SWITCHING CONTROL STRATEGIES OF SALIENT SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

O.I. Tolochko, O.O. Burmelov, Ya.O. Kalenchuk

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: tolochko.ola@gmail.com, oleksii.burmelov@gmail.com

In this paper, a detailed analysis of the control algorithms for a permanent magnet synchronous motor in a wide range of speeds is carried out using the optimal strategies: "Maximum torque per ampere" (first zone), "Field weakening mode" (second zone) and "Maximum torque per volt" (third zone). A method for determining the boundaries of the first and second zones, as well as a method for determining the maximum static moment with which the motor can operate without the risk of irreversible demagnetization of permanent magnets, was proposed. It allows determining the maximum possible operating speed of the motor at a given load, the maximum motor load at a given speed, as well as the advisability of using the third control zone to achieve the maximum motor speed. References 19, figures 4.

Keywords: electric drive, synchronous motor, permanent magnets, maximum torque per ampere, field weakening, maximum torque per volt, coordinate restrictions.

Надійшла: 12.04.2021

Received: 12.04.2021