

Донецький національний технічний університет  
УкрНДІВЕ**ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ  
АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ  
МАГНІТАМИ**

*Визначено допустиму область застосування оптимальних алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами. Отримано універсальні вирази для рівнів обмеження завдань на складові струму статора з урахуванням втрат в сталі.*

*Определена допустимая область применения оптимальных алгоритмов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. Получены универсальные выражения для уровней ограничения заданий на составляющие тока статора с учетом потерь в стали.*

*Permissible application field of optimal control algorithms for permanent magnet synchronous motors was determined. Universal expressions for saturation levels of stator current components taking into account core losses were obtained.*

В наш час найбільш перспективним двигуном є синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ), який порівняно з асинхронними двигунами та двигунами постійного струму має ряд переваг. Підвищення енергетичної ефективності електроприводів на базі СДПМ можливо за рахунок застосування певних алгоритмів керування. В [1] наведено уніфікований алгоритм оптимального керування синхронними двигунами без електричного збудження, до яких також відноситься і СДПМ. Універсальність цього алгоритму полягає в тому, що зміною чисельного значення тільки одного параметра в аналітичному виразі для розрахунку закону зміни керуючого впливу можна, залежно від вимог до системи електропривода, задовольнити різним критеріям оптимізації. В результаті може бути досягнута мінімізація або тільки втрат в міді, або тільки втрат в сталі, або сумарних втрат, чи забезпечено роботу системи з максимумом моменту на ампер (ММА) або з максимумом моменту на вольт (ММВ).

Особливістю даного алгоритму керування є те, що він був отриманий, виходячи з рівнянь статки та без урахування фізичних обмежень на струм і напругу статора, які завжди мають місце в реальній електро-механічній системі. Найчастіше обмеження окремих фізичних величин на заданому рівні в системах з послідовною корекцією здійснюється шляхом обмеження сигналів завдання на входах замкнених контурів регулювання відповідних фізичних величин.

В [2] запропоновано обмежувати завдання на поздовжню складову струму статора, таким чином, щоб виключити перевищення напругою максимально допустимого рівня. Максимальне значення поперечної складової визначається в залежності від максимального струму та завдання на поздовжню складову. Однак при виведенні зазначених залежностей не враховані втрати в сталі, що вносить додаткову похибку в розрахунок рівнів обмеження складових струму статора. В результаті спостерігається значне перевищення

максимально припустимих значень як струмом, так і напругою статора.

Метою роботи є визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування СДПМ з різними критеріями мінімізації.

Схеми заміщення СДПМ в ортогональній системі координат, орієнтованій за полем ротора, наведено на рис.1.

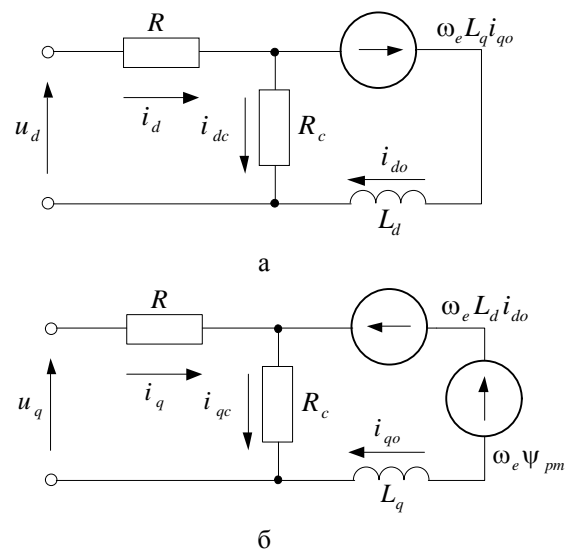


Рис.1. Схеми заміщення СДПМ:  
а – канал  $d$ ; б – канал  $q$

На рис.1 прийняті такі позначення:  $u_d, u_q, i_d, i_q$  – проєкції напруги і повного струму статора на осі  $d$  і  $q$ ;  $L_d, L_q$  – поздовжня і поперечна індуктивності статора;  $R, R_c$  – активний опір статора та опір, що характеризує втрати в сталі;  $i_{do}, i_{qo}$  – проєкції складової струму статора, яка створює магнітне поле;  $i_{dc}, i_{qc}$  – проєкції складової струму статора, яка витрачається на

втрати в сталі;  $\omega_e = Z_p \omega$  – електрична кутова частота ротора;  $Z_p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – механічна кутова частота ротора;  $\psi_{pm}$  – потік постійних магнітів.

На підставі схем заміщення (рис. 1) складемо математичний опис електричної частини СДПМ:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & -\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \\ \omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & R + pL_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p \frac{L_d}{R_c} & -\frac{\omega_e L_q}{R_c} \\ \frac{\omega_e L_d}{R_c} & 1 + p \frac{L_q}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \psi_{pm}}{R_c} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Вираз для електромагнітного моменту

$$M = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} + \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}. \quad (3)$$

Амплітудне значення напруги і струму статора

$$U = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}, \quad (4)$$

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (5)$$

Максимальна напруга статора обмежена максимальною вихідною напругою інвертора. Максимальний рівень обмеження струму, в свою чергу, визначається мінімальним значенням з допустимих струмів двигуна та перетворювача.

Система векторного полеорієнтованого керування СДПМ, що отримала найбільше поширення, являє собою двоканальну систему підпорядкованого регулювання координат з внутрішніми контурами поздовжньої і поперечної складових струму статора ( $i_d$ ,  $i_q$ ). Перехід від складових струму статора, які витрачаються на створення магнітного поля  $i_{do}$ ,  $i_{qo}$ , до  $i_d$ ,  $i_q$  можна виконати відповідно до (2). Завдання на  $i_{qo}$  визначається на основі завданого моменту і фактичного значення  $i_{do}$

$$i_{qo}^* = f(M^*, i_{do}), \quad (6)$$

а завдання на  $i_{do}$  – на основі бажаного алгоритму керування

$$i_{do}^* = f(i_{qo}^*, L_f), \quad (7)$$

де  $L_f$  – фіктивна індуктивність, значення якої визначається обраним алгоритмом керування [1].

З аналізу (1) та (2) випливає, що підтримання амплітуд напруги (4) і струму статора (5) можливе за рахунок обмеження завдань на струми  $i_{do}$  та  $i_{qo}$ . Для того, щоб не вийти за обмеження за напругою ( $U_{lim}$ ), величина завдання на полеутворюючу поздовжню складову струму статора не повинна перевищувати

деяке граничне значення  $i_{do\max}$ , яке може бути знайдено з (4) з урахуванням (1) та (2) за умови  $U = U_{lim}$ :

$$i_{do\max} = -\frac{L_d \psi_{pm} + L_f (L_d - L_q) i_{qo}}{L_f^2 + L_d^2} + \sqrt{\frac{L_f^2}{L_f^2 + L_d^2} \left(\frac{U_{lim}}{R}\right)^2 - \left(\frac{L_f \psi_{pm} + (L_f^2 + L_d L_q) i_{qo}}{L_f^2 + L_d^2}\right)^2}, \quad (8)$$

де  $L_f = R_c / \omega_e \cdot R / (R + R_c)$ .

Мінімальне значення  $i_{do}$  може вибиратися виходячи з різних міркувань, наприклад, з умов захисту постійних магнітів від безповоротного перемагнічування.

Для визначення допустимого значення  $i_{qo}$  треба виходити з необхідності обмеження як струму (5), так і напруги (4). Максимальне значення  $i_{qo}$  за умови обмеження струму може бути знайдено з (5) з урахуванням (1) та (2) за умови  $I = I_{lim}$ :

$$i_{qo\max I} = -\frac{L_f (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}{L_f^2 + L_q^2} + \sqrt{\frac{L_f^2}{L_f^2 + L_q^2} I_{lim}^2 - \left(\frac{L_q \psi_{pm} + (L_f^2 + L_d L_q) i_{do}}{L_f^2 + L_q^2}\right)^2}, \quad (9)$$

де  $L_f = R_c / \omega_e$ .

У випадку обмеження максимальної напруги,  $i_{qo\max U}$  повинно бути визначено з (4) з урахуванням (1) та (2) за умов  $U = U_{lim}$ ,  $i_{do} = i_{do\min}$

$$i_{qo\max U} = -\frac{L_f (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do\min})}{L_f^2 + L_q^2} + \sqrt{\frac{L_f^2}{L_f^2 + L_q^2} \left(\frac{U_{lim}}{R}\right)^2 - \left(\frac{L_q \psi_{pm} + (L_f^2 + L_d L_q) i_{do\min}}{L_f^2 + L_q^2}\right)^2}, \quad (10)$$

де  $L_f = R_c / \omega_e \cdot R / (R + R_c)$ .

Результуючим обмеженням слід приймати найменше з визначених за формулами (9) і (10).

На рис.2 для номінальної швидкості обертання наведені залежності  $i_q(i_d)$  для алгоритмів керування ММА, ММВ і МВ (мінімізація сумарних втрат) та залежності  $i_q(i_{d\max})$ ,  $i_{q\max I}(i_d)$  та  $i_{q\max U}(i_d)$ , які були отримані згідно (8), (9) та (10) з урахуванням (2).

В результаті робоча область визначається фігурою 0ABCD. Крива 0A відповідає роботі згідно алгоритму керування ММА. Крива АВ відповідає залежності (8). Робота вище даної ділянки буде супроводжуватися перевищенням рівня обмеження за напругою. Крива ВС визначається залежністю (9) і відповідає обмеженню струму на рівні  $I_{lim}$ , тобто робота лівіше ВС призведе до перевищення рівня струмообмеження. На ділянці CD двигун працюватиме згідно (10), де рівень обмеження  $i_{do\min}$  був обраний відповідно до ММВ, тому CD відповідає даному алгоритму.

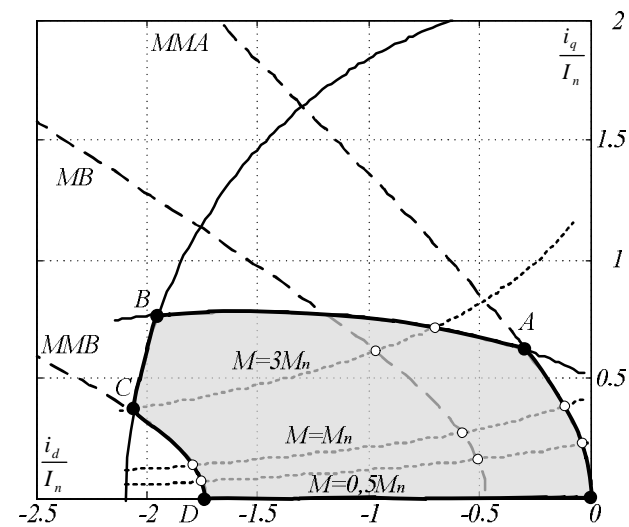


Рис.2. Алгоритми керування СДПМ і рівні обмеження координат

У цьому випадку збільшення абсолютного значення подовжньої складової струму призведе до перевищення рівня обмеження за напругою, а також до збільшення ризику безповоротного перемагнічування постійних магнітів.

На рис.2 зображені також лінії рівного моменту для випадків  $0,5M_n$ ,  $M_n$  та  $3M_n$ . В якості робочої точки може бути обрана будь-яка точка на лінії рівного моменту в межах робочої області. Вибір робочої точки на кривій алгоритму MMA або MMB забезпечить роботу СДПМ при мінімумі струму або напруги статора відповідно, а на кривій MB – мінімум сумарних втрат.

На рис.3 показана зміна робочої області в залежності від поточної швидкості: індекс «1» відповідає  $2\omega_n$ , «2» –  $\omega_n$ , «3» –  $0,5\omega_n$ .

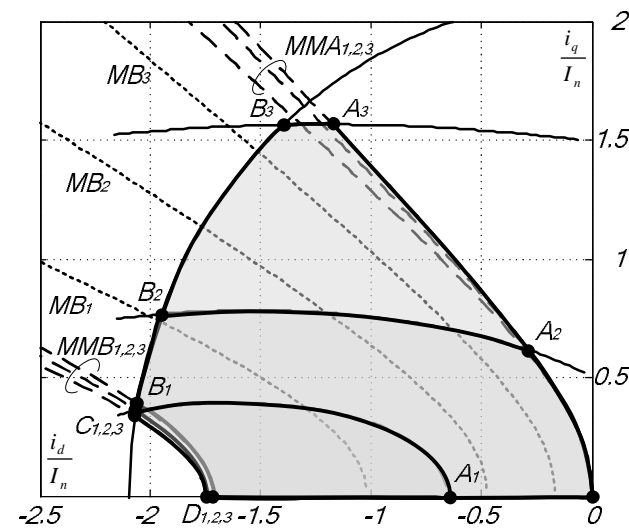


Рис.3. Робоча область при зміні  $\omega$

Для побудови наведених залежностей був використаний СДПМ з магнітами розташованими всередині ротора, який має наступні параметри:  $N_n=2000$  об/хв;  $I_n=5$  А;  $M_n=1,67$  Н·м;  $Z_p=2$ ;  $R=0,57$  Ом;  $R_c=240$  Ом;  $L_d=8,72$  мГн;  $L_q=22,78$  мГн;  $\psi_{pm}=0,1077$  Вб.

Таким чином, обмеження керуючих впливів відповідно до (8), (9) і (10) дозволяє усунути вихід координат, що обмежуються, за допустимі значення в статичних режимах і значно зменшити помилку в динамічних режимах. Для гарантованого забезпечення обмеження напруги в динаміці рекомендується все ж таки знизити рівень обмеження на 5-10 %.

Наведені вирази є найбільш загальним випадком, застосовним до СДПМ з магнітами, розташованими всередині ротора. Для СДПМ з магнітами, розташованими на поверхні ротора, досить прийняти рівними індуктивності за подовжньою і поперечною осями. Іншим окремим випадком є синхронний реактивний двигун, для якого характерна відсутність магнітів на роторі.

#### Список використаної літератури

1. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наук. Праці Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: „Ел.техніка і енергетика” – 2011. – № 11. – С. 392-395.
2. Schröder, Dierk. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – 1336 p.

Отримано 19.07.2011



Толочко  
Ольга Іванівна,  
д-р техн. наук,  
зав. каф. ЕАПУ,  
ДВНЗ «ДонНТУ»,  
вул. Артема, 58,  
062 301 03 35,  
toi@elf.dgtu.donetsk.ua



Вареник  
Євген Олександрович,  
канд. техн. наук,  
директор, УкрНДІВЕ,  
вул. 50-й Гвардійської дивізії,  
17,  
062 382 93 53



Божко  
Владислав Володимирович,  
аспірант каф. ЕАПУ,  
ДВНЗ «ДонНТУ»,  
вул. Артема, 58,  
062 301 09 48  
vladbozhko@mail.ru