

УДК 62-52 : 621.313.33

Приймак Б. І.**ОПТИМІЗАЦІЯ МОМЕНТУ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В РЕЖИМІ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ ІЗ НИЗЬКОЮ ПАРАМЕТРИЧНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ**

У векторно-керованих асинхронних двигунах (АД) верстатів, електромобілів, трамваїв тощо діапазон регулювання швидкостей зазвичай повинен охоплювати як значно нижчі, так і в декілька разів вищі від номінальної швидкості ротора. При зростанні швидкості АД до номінальної напруга статора сягає свого обмеження, яке визначається напругою живлення інвертора, тому подальше підвищення швидкості потребує ослаблення магнітного поля двигуна. Згідно з класичним алгоритмом магнітний потік змінюється зворотно пропорційно до швидкості двигуна, що дозволяє підтримувати постійною е. р. с. обертання ротора [1]. Проте момент двигуна при цьому не підтримується на рівні свого екстремуму.

Відомі варіанти систем автоматичного керування (САК) АД з максимізацією ту в зоні ослаблення поля можна умовно розділити на два класи. До 1-го відносяться системи з прямим формуванням оптимального потоку, що визначається за деяким спрощеним виразом або за отриманою числовим способом залежністю [2–4]. У цих системах потенційно можна отримати високу точність екстремального керування. Проте зміни напруги живлення інвертора та опорів двигуна можуть різко погіршити точність оптимізації. До 2-го класу належать системи з непрямим формуванням оптимального потоку АД шляхом регулювання напруги статора, де підтримується кут між компонентами вектора напруги рівний 135° для рушійного та 45° для генераторного режимів [5–7]. В таких системах досягається інваріантність до змін напруги живлення інвертора. Проте в них принципово можлива лише наближена оптимізація, оскільки умова досягнення максимуму моменту отримана за нехтування опором статора.

Таким чином важливою і актуальною є задача зниження параметричної чутливості систем 1-го класу. У [8] побудована параметрично інваріантна екстремальна САК АД з нейронною мережею. Проте така система потребує досить значних обчислювальних затрат. У даній статті пропонується альтернативне рішення, яке є простішим у реалізації.

Метою роботи є побудова оптимізатора моменту двигуна (ОМД) в режимі ослаблення поля, який забезпечить високу точність функціонування за умов істотних змін напруги живлення інвертора та активних опорів АД і буде нескладним у практичній реалізації.

Короткозамкнений АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ координатах (d, q) при врахуванні втрат у залізі та насичення магнітопроводу можна описати системою рівнянь [9]

$$\begin{aligned}
 dI_d/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z)I_d - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_d \right] + \omega_0 I_q; \\
 dI_q/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[-(R_s + R_z)I_q + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_q \right] - \omega_0 I_d; \\
 d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \\
 d\Psi_{md}/dt &= R_z \left(I_d + \Psi_{rd}/L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} \right) + \omega_0 \Psi_{mq}; \\
 d\Psi_{mq}/dt &= R_z \left(I_q - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} \right) - \omega_0 \Psi_{md}; \\
 d\omega/dt &= J^{-1} (M_e - M_L),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_d, U_q]^T$, струму статора $\bar{I}_s = [I_d, I_q]^T$, потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T$; головного потокозчеплення $\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$; ω_0 – швидкість обертання поля ротора; z_p – кількість пар полюсів; ω – швидкість ротора; R_s, R_r – опори статора та ротора; $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$ – еквівалентний опір, що відображає втрати потужності у залізі двигуна; L_m – індуктивність намагнічування; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання; $L_r = L_m + L_{r\sigma}$, $T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r$, $T_z = L_m/R_z$; M_e, M_L – моменти двигуна та навантаження відповідно; J – сумарний момент інерції.

Враховуючи те, що в зорієнтованих координатах $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$, момент двигуна та швидкість координат в (1) обчислюються як

$$M_e = 1.5z_p L_{r\sigma}^{-1} \Psi_r \Psi_{mq}, \quad \omega_0 = z_p \omega + \omega_{sl}, \quad (2)$$

де $\omega_{sl} = \Psi_{mq} / (T_{r\sigma} \Psi_r)$ – швидкість ковзання.

Насичення магнітопроводу по головному магнітному шляху в (1) враховується за допомогою нелінійної функції $L_m = L_m(\Psi_m)$, де $\Psi_m = |\bar{\Psi}_m|$, яка отримана з кривої намагнічування двигуна та апроксимована поліномом [9].

В описі АД необхідно врахувати обмеження модуля вектора напруги статора $U_s = |\bar{U}_s|$ на рівні U_{\max} та модуля вектора струму статора $I_s = |\bar{I}_s|$ на рівні I_{\max} у вигляді:

$$0 \leq U_s \leq U_{\max}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{\max}. \quad (3)$$

Функціональна схема САК АД у спрощеному вигляді зображена на рис. 1.

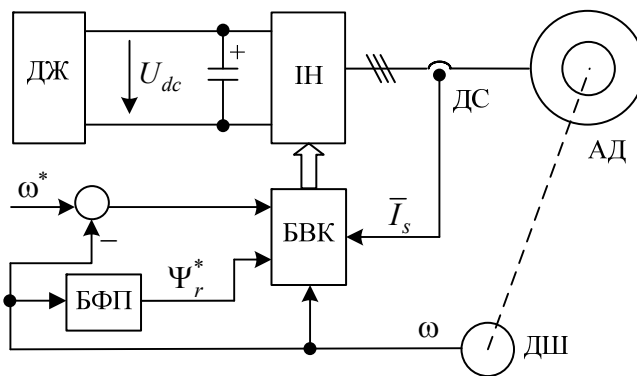


Рис. 1. Функціональна схема САК АД

Система призначена для регулювання швидкості АД із приєднаним до нього механізмом у широкому діапазоні як вниз, так і вгору від номінальної швидкості. У блок векторного керування БВК поступають сигнали зворотних зв'язків із давачів струму ДС та швидкості ДШ. Різниця завдання швидкості ω^* і швидкості ω подається на вхід регулятора швидкості, що знаходиться у БВК. У блоці формування потокозчеплення БФП за певним алгоритмом визначається завдання Ψ_r^* для розташованого у БВК контуру регулювання потоку, який

стабілізує $\Psi_r(t)$ на рівні $\Psi_r^*(t)$. Джерело живлення ДЖ може бути мережею змінного струму з випрямлячем або акумуляторною батареєю у поєднанні із суперконденсатором. Інвертор напруги ІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) живить обмотки статора АД імпульсною напругою, амплітуда, частота та фаза першої гармоніки якої встановлюються сигналами керування з БВК. Також у колі живлення інвертора розташовують ключ розрядження конденсатора на гасильний резистор. Він зазвичай вмикається коли U_{dc} сягне рівня 130 % від номіналу [10, с. 461].

У векторно-керованих приводах для формування модуля вектора потокозчеплення ротора широко застосовується класична залежність $\Psi_{rc}(\omega)$ у вигляді:

$$\Psi_{rc}(\omega) = \begin{cases} \Psi_{rn} & \text{при } |\omega| \leq \omega_n, \\ \Psi_{rn}\omega_n/|\omega| & \text{при } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \quad (4)$$

де ω_n, Ψ_{rn} – відповідно номінальні швидкість та потокозчеплення ротора АД (індексом “ n ” в статті позначатимуться номінальні значення величин).

Розглядаючи для спрощення лише рушійний режим роботи, сформулюємо задачу оптимізації моменту двигуна наступним чином: для АД з описом (1)–(2) при врахуванні обмежень (3) у діапазоні $0 \leq \omega \leq \omega_{\max}$ на інтервалі $0 < \Psi_r \leq \Psi_{rn}$ знайти оптимальну залежність $\Psi_{ro}(\omega)$ за критерієм $M_e \Rightarrow \max$, де ω_{\max} – максимально допустима швидкість двигуна.

Оскільки опис (1)–(2) є суттєво нелінійним та має високий порядок, то задачу оптимізації з досить високою точністю можна розв’язати лише числовим способом. У дослідженнях в статті використано типовий чотириполюсний АД потужністю 30 кВт. Номінальні дані цього двигуна подано у табл. 1, де P – вихідна потужність; U, I – напруга та струм фази статора (діючі значення); f, N – частота живлення та кількість обертів вала двигуна.

Таблиця 1

Дані асинхронного двигуна

$P = 30$ кВт	$U = 220$ В	$I = 56,8$ А	$f = 50$ Гц	$N = 1467$ об/хв	$I = 56,8$ А
$L_S = 43,14$ мГн	$L_r = 43,64$ мГн	$L_m = 41,83$ мГн	$R_S = 0,1376$ Ом	$R_r = 0,0862$ Ом	$R_Z = 187$ Ом

У статті за номінальні значення обмежень напруги та струму статора прийняті $U_{\max} = U_n = 311$ В (1 в.о.), $I_{\max} = 2I_n$ (2 в.о.), де U_n, I_n – номінальні напруга та струм фази статора; в.о. – відносні одиниці. Дослідження виконувалися на інтервалі швидкостей $\omega \in [0.25, 5]$ в.о. у рушійному режимі на основі генетичного алгоритму числової оптимізації.

З метою порівняння були розраховані змінні АД без і з максимізацією моменту за описом (1)–(3). На рис. 2, а зображені отримані граничні характеристики при класичному (4), а на рис. 2, б – при оптимальному алгоритмі формування потокозчеплення, де змінні U_s (крива 1), I_s (крива 2), Ψ_r (крива 3), M_e (крива 4) та ω нормовані щодо своїх номіналів.

Зіставлення кривих 3 на рис. 2 засвідчує істотну відмінність між модулями вектора потокозчеплення ротора, що відповідають класичному та оптимальному алгоритмам. А порівняння кривих 4 на рис. 2 підтверджує суттєве зростання моменту АД завдяки оптимізації. Аналізуючи рис. 2 слід відмітити, що на граничних характеристиках АЕП наявні три зони оптимізації моменту, які названі A, B і C . У кожній із вказаних зон умови визначення максимуму є різними. Зокрема, в зоні A максимальний момент двигуна визначається за обмеження струму статора, в зоні B – за обмежень як струму так і напруги статора, а в зоні C –

за обмеження напруги статора. Межам зон A , B та B , C відповідають межові швидкості ω_A та ω_B , де ω_A – це швидкість, за якої оптимальне потокозчеплення ротора стає меншим ніж номінальне, а ω_B – це швидкість, за якої струм статора стає меншим від свого максимуму.

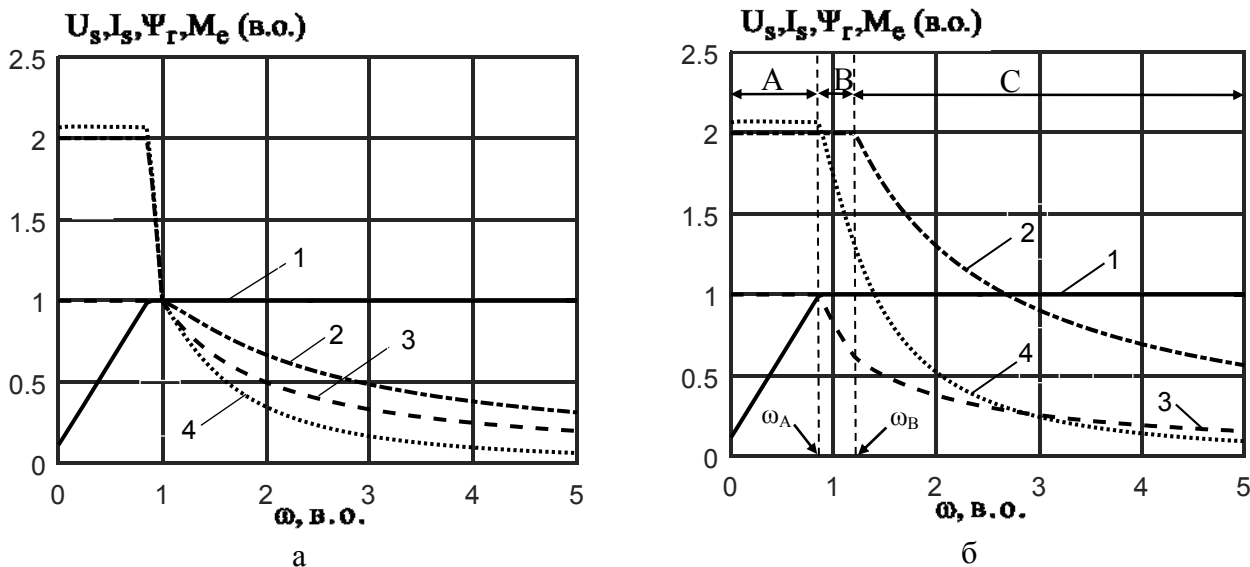


Рис. 2. Граничні характеристики двигуна за алгоритмів формування потокозчеплення ротора:

а – класичного $\Psi_r = \Psi_{rc}$; б – оптимального $\Psi_r = \Psi_{ro}$

Як показали проведені в [11] дослідження, основним чинником, що впливає на точність оптимізації моменту є зміни обмеження напруги статора U_{max} . В межах лінійної зони керування ІН з векторною ШІМ [1] обмеження напруги статора АД пов'язане із напругою ланки постійного струму привода U_{dc} , яка живить інвертор, пропорційною залежністю $U_{max} = U_{dc} / \sqrt{3}$. У цьому разі зміни U_{max} будуть пропорційні змінам U_{dc} . Перша причина відхилень U_{dc} від номінального значення $U_{dc,n} = 537 \text{ В}$ полягає у коливаннях напруги живильної мережі. Також значні і довготривалі відхилення U_{dc} вниз від номіналу характерні для тягових приводів, де ІН живиться від акумуляторних батарей. Для акумуляторних батарей зазвичай допускається розрядження до 30%. Друга причина варіацій U_{dc} пов'язана із інтенсивним відбором або поверненням енергії у фільтрувальний конденсатор ланки постійного струму силового перетворювача у процесах розгону-гальмування АД.

Ще одним важливим чинником, що погіршує точність оптимізації моменту є термозалежні варіації активних опорів статора R_s і ротора R_r [11]. Ці варіації залежать від нагріву двигуна і при оптимізації не враховуються. Вони можуть бути значними, особливо для тягових АД електротранспорту, який працює на відкритому повітрі. Слід зазначити, що варіації L_m при зміні магнітного стану двигуна на точність оптимізації моменту практично не впливають. Це пояснюється тим, що зміни параметрів моделі, пов'язаних з нелінійністю кривої намагнічування двигуна, враховуються в процедурі оптимізації при використанні опису (1).

Нижче у дослідженні відносні відхилення (варіації) величин обчислюються як

$$\delta x = (x_{var} - x_n) / x_n, \text{ в.о.}, \tag{5}$$

де x_{var} , x_n – відповідно варійоване та номінальне значення величини x .

Інтервали відносних варіацій напруги живлення інвертора δU_{dc} , опору ротора δR_r та опору статора δR_s були наступними: $\delta U_{dc} \in [-0.3, 0.3]$ в.о., $\delta R_r \in [-0.45, 0.45]$ в.о., $\delta R_s \in [-0.3, 0.3]$ в.о. При цьому, з метою спрощення у дослідженнях розглядалися квазістаціонарні теплові процеси двигуна, де відхилення опорів статора і ротора відносно своїх середніх значень мають однакові знаки, та була прийнята умова співвідношення варіацій опорів $\delta R_r \approx k_{rs} \delta R_s$, де коефіцієнт пропорційності k_{rs} знаходиться в діапазоні $k_{rs} = 1.25 \div 1.5$. За номінальні значення опорів статора і ротора вважались їх середні значення в інтервалах можливих змін.

Шляхом числової оптимізації моменту АД були отримані графіки оптимального потокозчеплення ротора $\Psi_{ro}(\omega)$ при номінальному, найменшому та найбільшому значеннях обмеження напруги статора, які зображені на рис. 3, а у вигляді кривих 1, 2 та 3 відповідно. Щоб краще оцінити ступінь деформації форми кривих оптимального потокозчеплення на рис. 3, б зображені ті ж самі графіки, що й на рис. 3, а, але зсунуті по горизонталі до суміщення межових швидкостей ω_A . Аналіз рис. 3 показує, що зміни U_{dc} призводять до двох наслідків.

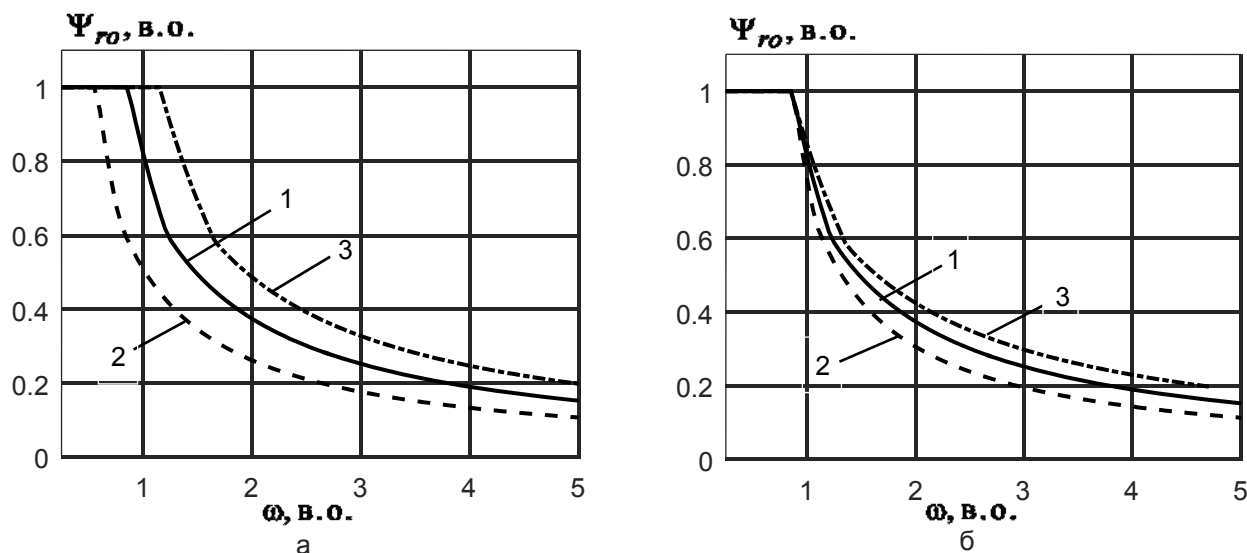


Рис. 3. Залежності $\Psi_{ro}(\omega)$ при значеннях напруги живлення інвертора $U_{dc} = 1.0$ в.о. (крива 1), $U_{dc} = 0.7$ в.о. (крива 2), $U_{dc} = 1.3$ в.о. (крива 3):

а – вихідні графіки; б – зсунуті по горизонталі графіки із суміщенням межових швидкостей ω_A

Перший наслідок – це зміни межової швидкості ω_A між зонами номінального та зменшеного потоку, а другий – це зміна форми кривої оптимального потокозчеплення ротора. Варіації опорів R_s та R_r також призводять до змін ω_A . При цьому, як показано в [11], залежності ω_A від варіацій обмеження напруги статора та опорів двигуна близькі до лінійних.

Точність оптимізації моменту при відхиленні змінних величин від своїх номінальних значень характеризується відносною помилкою:

$$\delta M_e = (M_e - M_{e0}) M_{e0}^{-1} \times 100\%, \quad (6)$$

де M_e – момент двигуна при $\Psi_r = \Psi_{ro}^n$;

Ψ_{ro}^n – оптимальне потокозчеплення ротора, розраховане для номінальних значень змінних величин;

M_{e0} – оптимальний момент двигуна для поточних значень змінних величин.

Після обчислення масиву значень цієї помилки на заданому інтервалі швидкостей визначається її максимум як $\delta M_{\max} = \max \{|\delta M_e(\omega)|\}$.

Щоб оцінити вплив на точність оптимізації моменту АД варіацій змінних величин були обчислені відносні помилки δM_e при варіаціях обмеження напруги статора та опорів двигуна, які представлені на рис. 4, а та 4, б відповідно. Аналіз цих рисунків дозволяє зазначити наступне. По-перше, за $\delta U_{dc} = -0.15$ в.о. та $\delta U_{dc} = 0.15$ в.о. максимальна помилка оптимізації моменту δM_{\max} дорівнює 22 % та 45 % відповідно. При $\delta R_r = -0.45$ в.о., $\delta R_s = -0.3$ в.о. та $\delta R_r = 0.45$ в.о., $\delta R_s = 0.3$ в.о. значення δM_{\max} дорівнює 6.4% та 7.3% відповідно. По-друге, характер графіків засвідчує, що великі значення помилок локалізовані у зоні оптимізації *B*. Проте у зоні *C* помилки від змін обмеження напруги статора стають постійними, а від варіацій активних опорів двигуна прямують до нуля.

Для підвищення точності оптимізації моменту запропоновано ОМД з компенсуванням впливу змінних величин на основі пошукових (переглядових) таблиць (look-up tables). Пошукова таблиця здійснює інтерполяцію між елементами заданих масивів аргументу та нелінійної функції і формує на виході значення функції відповідно до значення аргументу на її вході.

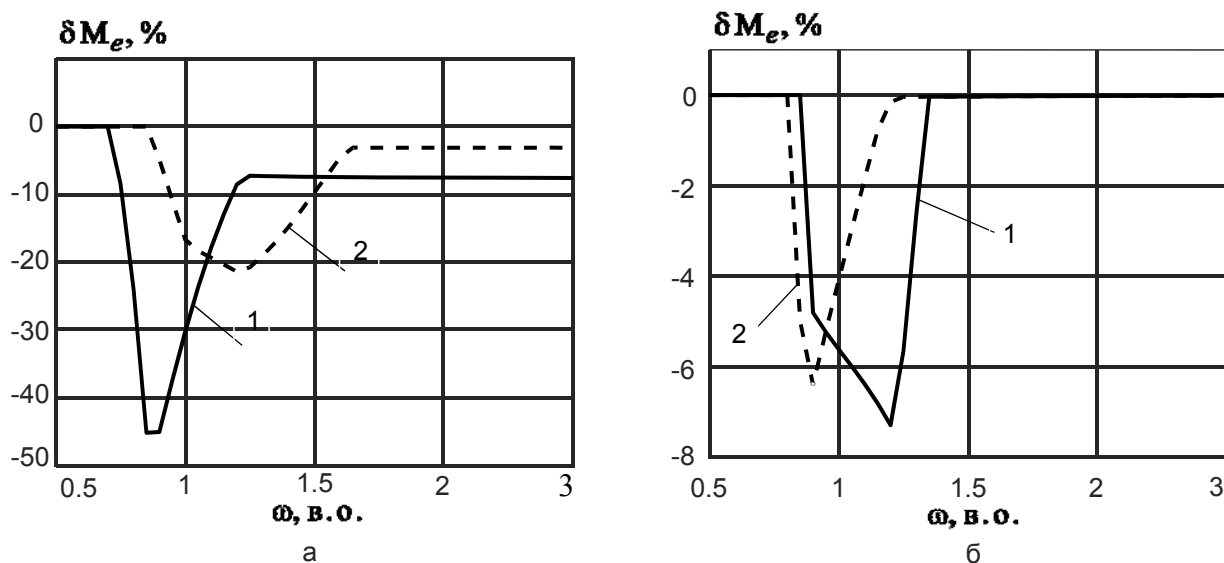


Рис. 4. Вплив на точність оптимізації моменту АД змінних величин:

а – напруги живлення інвертора при $\delta U_{dc} = -0.15$ в.о. (крива 1) та $\delta U_{dc} = 0.15$ в.о. (крива 2);

б – опорів двигуна при $\delta R_r = -0.45$ в.о., $\delta R_s = -0.3$ в.о. (крива 1) і $\delta R_r = 0.45$ в.о., $\delta R_s = 0.3$ в.о. (крива 2)

Принцип роботи ОМД наступний. На етапі налаштування у три пошукові таблиці заносяться три опорні криві $\Psi_{ro}^n(\omega)$, $\Psi_{ro}^-(\omega)$ та $\Psi_{ro}^+(\omega)$ з межовими швидкостями ω_A^n , ω_A^- , ω_A^+ , що є оптимальними залежностями потокозчеплення ротора від швидкості для номінальної ($\delta U_{dc} = 0$), мінімальної ($\delta U_{dc} = \delta U_{dc, \min}$) та максимальної ($\delta U_{dc} = \delta U_{dc, \max}$) напруги

живлення інвертора відповідно. При цьому криві $\Psi_{ro}^n(\omega)$ та $\Psi_{ro}^+(\omega)$ продовжені в область $\Psi_{ro} > \Psi_{rn}$ на інтервалах $\omega \in [\omega_A^-, \omega_A^n]$ та $\omega \in [\omega_A^n, \omega_A^+]$ відповідно. Далі, під час роботи САК АД в режимі on-line, за допомогою вказаних таблиць визначається оцінка оптимального потокозчеплення $\hat{\Psi}_{ro}$ як зважене середнє між Ψ_{ro}^n та Ψ_{ro}^- або між Ψ_{ro}^n та Ψ_{ro}^+ за від'ємних чи додатних δU_{dc} відповідно.

При $\delta U_{dc, \min} \leq \delta U_{dc} \leq 0$ оцінка оптимального потокозчеплення отримується як:

$$\hat{\Psi}_{ro} = [k_{u1} \Psi_{ro}^n + k_{u2} \Psi_{ro}^-] / 2, \quad (7)$$

де k_{u1}, k_{u2} – вагові коефіцієнти

$$k_{u1} = 2 - k_{\delta}; \quad k_{u2} = 2 - k_{u1}, \quad (8)$$

а k_{δ} обчислюється як:

$$k_{\delta} = 2\delta U_{dc} / \delta U_{dc, \min}. \quad (9)$$

При $0 < \delta U_{dc} \leq \delta U_{dc, \max}$ оцінка оптимального потокозчеплення дорівнює:

$$\hat{\Psi}_{ro} = [k_{u1} \Psi_{ro}^n + k_{u2} \Psi_{ro}^+] / 2, \quad (10)$$

де k_{u1}, k_{u2} обчислюється за (8), а k_{δ} визначається за формулою (11) як:

$$k_{\delta} = 2\delta U_{dc} / \delta U_{dc, \max}. \quad (11)$$

Як видно з (8), вагові коефіцієнти k_{u1}, k_{u2} є лінійними функціями δU_{dc} . Якщо $\delta U_{dc, \min} \leq \delta U_{dc} \leq 0$ і δU_{dc} зменшується, то крива оцінки оптимального потокозчеплення $\hat{\Psi}_{ro}(\omega)$ буде переміщуватися вліво по горизонталі від кривої 1 до кривої 2 і поступово втрачатиме форму кривої 1 та набуватиме форму кривої 2 (рис. 2, а), а в разі збільшення δU_{dc} все буде навпаки. Якщо $0 < \delta U_{dc} \leq \delta U_{dc, \max}$ і δU_{dc} збільшується, то $\hat{\Psi}_{ro}(\omega)$ буде переміщуватися вправо по горизонталі від кривої 1 до кривої 3 і поступово втрачатиме форму кривої 1 та набуватиме форму кривої 3, а в разі зменшення δU_{dc} все буде навпаки.

Таким чином, завдяки компенсуванню в ОМД впливу варіацій напруги живлення інвертора, крива оцінки оптимального потокозчеплення, змінюючи значення своєї межової швидкості і форму, наближатиметься до кривої оптимального потокозчеплення для поточного значення U_{dc} .

Компенсування впливу варіацій активних опорів АД здійснюється в частині зміни межової швидкості кривої оцінки оптимального потокозчеплення шляхом корегування вхідної величини пошукових таблиць. При цьому скорегований вхід таблиць визначається як:

$$\omega' = \omega + \Delta\omega_R, \quad (12)$$

де $\Delta\omega_R = k_R \delta R_r$, k_R – коефіцієнт пропорційності.

На останньому етапі алгоритму роботи ОМД отримується завдання Ψ_r^* для регулятора потокозчеплення САК АД шляхом обмеження $\hat{\Psi}_{ro}$ на номінальному рівні:

$$\Psi_r^* = \begin{cases} \hat{\Psi}_{ro} & \text{при } \hat{\Psi}_{ro} \leq \Psi_{rn}; \\ \Psi_{rn} & \text{при } \hat{\Psi}_{ro} > \Psi_{rn}. \end{cases} \quad (13)$$

Були проведені дослідження точності оптимізації моменту АД з використанням запропонованого ОМД. Результати досліджень представлені в табл. 2–4, де наведені в комірках дані мають вигляд дробу, чисельник та знаменник якого є значеннями δM_{\max} при додатних та від’ємних δU_{dc} відповідно.

Спочатку визначався вплив змін U_{dc} за нульових варіацій активних опорів двигуна. Отримані значення максимальної відносної помилка оптимізації моменту АД наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Максимальна помилка оптимізації моменту АД за $\delta U_{dc} = \text{var}$ та $\delta R_r = 0, \delta R_s = 0$

δU_{dc} , в.о.	± 0.0	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.25	± 0.3
δM_{\max} , %	$\frac{0.0}{0.0}$	$\frac{0.63}{1.01}$	$\frac{0.86}{1.54}$	$\frac{0.91}{1.59}$	$\frac{0.91}{1.15}$	$\frac{0.62}{0.97}$	$\frac{0.0}{0.0}$

Далі досліджувався сукупний вплив варіацій напруги живлення інвертора та активних опорів двигуна. При цьому діапазон змін R_s та R_r був дещо зміщений в сторону додатних варіацій, оскільки раніше було виявлено, що помилка оптимізації втрат більша в разі від’ємних варіацій опорів ніж у разі додатних варіацій (рис. 4, б). Результати дослідження точності оптимізації моменту АД при змінах U_{dc} в межах встановленого діапазону за граничних від’ємних варіацій опорів наведені в табл. 3, а за граничних додатних варіацій опорів наведені в табл. 4.

Таблиця 3

Максимальна помилка оптимізації моменту АД за $\delta U_{dc} = \text{var}$, $\delta R_r = -0.3$ в.о., $\delta R_s = -0.2$ в.о.

δU_{dc} , в.о.	± 0.0	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.25	± 0.3
δM_{\max} , %	$\frac{1.1}{1.1}$	$\frac{1.34}{1.04}$	$\frac{1.28}{1.73}$	$\frac{1.04}{1.91}$	$\frac{0.94}{1.55}$	$\frac{0.55}{1.6}$	$\frac{0.92}{1.28}$

Таблиця 4

Максимальна помилка оптимізації моменту АД за $\delta U_{dc} = \text{var}$, $\delta R_r = 0.5$ в.о., $\delta R_s = 0.33$ в.о.

δU_{dc} , в.о.	± 0.0	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.25	± 0.3
δM_{\max} , %	$\frac{0.85}{0.85}$	$\frac{0.57}{1.5}$	$\frac{0.55}{1.7}$	$\frac{0.96}{1.43}$	$\frac{1.17}{0.8}$	$\frac{1.1}{1.1}$	$\frac{0.81}{0.75}$

Аналіз отриманих результатів досліджень засвідчує, що максимальна відносна помилка оптимізації моменту δM_{\max} не перевищує 1–2 %. Отримана точність є досить високою, вона більше ніж на порядок перевищує точність оптимізації моменту без компенсування впливу змінних величин. При цьому алгоритм роботи ОМД є нескладним в обчислювальному відношенні та не вимагає значного об’єму комп’ютерної пам’яті. Для його роботи необхідно вимірювати напругу ланки постійного струму та отримувати інформацію про тепловий

стан двигуна за допомогою оцінювача (спостерігача) опору ротора або давача температури обмотки статора двигуна, що технічно не є складним. У зображеній на рис. 1 схемі ОМД буде розташований в БФП.

Варто зауважити, що після виконаних у цій статті досліджень ОМД в рушійному режимі роботи двигуна, планується дослідити ОМД в генераторному режимі роботи АД в одній із майбутніх статей.

ВИСНОВКИ

В статті розглядається проблема максимізації електромагнітного моменту векторно-керованих асинхронних двигунів в області ослаблення поля із врахуванням істотних коливань напруги живлення інвертора та варіацій активних опорів статора і ротора внаслідок змін теплового стану двигуна. Запропоновано новий оптимізатор моменту двигуна на основі пошукових таблиць, який має низьку параметричну чутливість завдяки компенсуванню впливу варіацій змінних величин і є досить простим для комп'ютерної реалізації. Для його роботи необхідно вимірювати напругу ланки постійного струму та оцінювати за допомогою спостерігача активний опір ротора двигуна. Проведені числові дослідження показали, що при застосуванні оптимізатора моменту двигуна максимальна відносна помилка оптимізації моменту двигуна не перевищує 1–2 %. Отримана точність оптимізації є досить доброю, вона більше ніж на порядок вища від точності систем автоматичного керування з максимізацією моменту асинхронного двигуна без компенсування впливу змінних параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Novotny D. W. *Vector control and dynamics of AC drives* / D. W. Novotny, T. A. Lipo // Oxford: Clarendon Press, 2005.
2. Bodson M. *A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors* / M. Bodson, J. N. Chiasson, R. T. Novotnak // *IEEE Trans. on Control Sys. Technol.* – 1995, Vol.3, no.4, pp. 388–397.
3. Casadei D. *Performance analysis of a speed-sensorless induction motor drive based on a constant-switching-frequency DTC scheme* / D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, F. Profumo // *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 2003, Vol. 39, no 2, pp. 476–484.
4. Lim S. *Loss-minimizing control scheme for induction motors* / S. Lim, K. Nam // *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 2004, Vol. 151, no. 4, pp. 385–397.
5. Gallegos-Lopez G. *Current control of induction machines in the field-weakened region* / G. Gallegos-Lopez, F. S. Gunawan, J. E. Walters // *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 2007, Vol. 43, no.4, pp. 981–989.
6. Mengoni M. *A comparison of four robust control schemes for field-weakening operation of induction motors* / M. Mengoni, L. Zarri, A. Tani, G. Serra, D. Casadei // *IEEE Trans. Power Elec.*, 2012, Vol. 27, no.1, pp. 307–320.
7. *Control schemes for field weakening of induction machines: A review* / L. Zarri, M. Mengoni, A. Tani, G. Serra, D. Casadei, J.O. Ojo // *Proc. IEEE Workshop in Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2015, pp. 146–155.
8. Приймак Б. І. *Керування асинхронними двигунами з параметрично інваріантною оптимізацією моменту в зоні ослаблення поля на основі нейронної мережі* / Б. І. Приймак // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* – Кременчук : КрНУ, 2016. – № 1 (33). – С. 32–41.
9. Pryymak B. *Characteristics of induction motor drives with torque maximization in field weakening region* / B. Pryymak, M. Moreno-Eguilaz // *Proc. IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, pp. 508–513.
10. Dong Z. *Optimized Flux-Weakening Control of Induction Motor for Torque Enhancement in Voltage Extension Region* / Y. Yu, B. Wang, Q. Dong, D. Xu // *Proc. IEEE Intern. Power Electronics Conf. (IPEC)*, 2018, pp. 459–465.
11. Приймак Б. І. *Вплив змін параметрів на характеристики асинхронних двигунів з максимізацією моменту в режимі ослаблення поля* / Б. І. Приймак // *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України.* – 2016. – Вип. 43. – С. 82–90.