

УДК 62-52 : 621.313.33

**ВПЛИВ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З МАКСИМІЗАЦІЄЮ МОМЕНТУ В РЕЖИМІ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ****Б.І. Приймак**, канд. техн. наукНаціональний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна  
e-mail: bp-08@ukr.net

*Досліджується вплив на характеристики векторно-керованих асинхронних двигунів з максимізацією моменту в режимі ослаблення поля варіацій активних опорів двигуна та напруги ланки постійного струму приводу. Встановлено, що параметричні збурення значно змінюють межову (базову) швидкість, що розділяє зони номінального та зниженого потоку, а також деформують криву оптимального потокозчеплення ротора. У рушійному режимі найгірше впливають варіації опорів та напруги різних знаків, а у генераторному режимі – одного знаку. Показано, що зміни параметрів можуть призвести до непрацездатності приводу, тому необхідне самонастроювання системи автоматичного керування до змінних параметрів. Для обчислень використано дані двигунів потужністю 1,5 та 30 кВт. Бібл. 9, рис. 13, табл. 2.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, векторне керування, ослаблення поля, оптимізація, варіації параметрів.

**Вступ.** Векторно-керовані асинхронні електроприводи (АЕП) металообробних верстатів, електромобілів, трамваїв, тролейбусів тощо повинні працювати як на нижчих, так і на значно вищих від номінальної швидкостях ротора. Забезпечення необхідних динамічних показників АЕП значною мірою залежить від максимально допустимого короткотривалого струму статора АД, який обмежується можливостями силового перетворювача. Оскільки в області номінальної швидкості асинхронного двигуна (АД) напруга на виході силового перетворювача обмежується напругою живильної мережі, то досягнення вищих швидкостей потребує ослаблення поля двигуна. Класичний алгоритм ослаблення поля полягає у зміні потокозчеплення ротора зворотно пропорційно до швидкості двигуна, що має на меті підтримання на постійному рівні ЕРС обертання ротора [8]. Проте цей алгоритм за обмежень струму та напруги статора не дає змоги повною мірою використати енергетичні ресурси приводу. Тому для досягнення граничних показників АЕП перспективно застосовувати принципи екстремального керування [3].

На сьогодні запропоновано варіанти алгоритмів керування АЕП у зоні високих швидкостей двигуна з оптимізацією його моменту [4-7, 9]. У [1] для розширеної моделі АД отримано граничні характеристики при максимізації моменту в зоні високих швидкостей та показано істотне зростання перевантажувальної здатності приводу. Проте на сьогодні далеко не всі особливості побудови АЕП з максимізацією моменту двигуна висвітлено в літературних джерелах. Зокрема, важливим і актуальним є вивчення проблеми параметричної чутливості систем з екстремальним керуванням моментом АД, чому присвячена ця стаття.

**Метою роботи** є дослідження впливу варіацій опорів статора і ротора та напруги ланки постійного струму силового перетворювача на характеристики асинхронних двигунів з максимізацією моменту в режимі зниження поля за обмеження струму і напруги статора.

**Математичний опис АД та схема АЕП.** Електромагнітні процеси короткозамкненого АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  координатах  $(d, q)$  при врахуванні втрат у залізі й кривої намагнічування можна описати системою рівнянь [1]

$$\begin{aligned} dI_{sd}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[ -(R_s + R_z) I_{sd} - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_{sd} \right] + \omega_0 I_{sq}; \\ dI_{sq}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[ -(R_s + R_z) I_{sq} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_{sq} \right] - \omega_0 I_{sd}; \\ d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \\ d\Psi_{md}/dt &= R_z \left( I_{sd} + \Psi_{rd} / L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} \right) + \omega_0 \Psi_{mq}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$d\Psi_{mq}/dt = R_z (I_{sq} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq}) - \omega_0 \Psi_{md},$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора  $\bar{U}_s$ , струму статора  $\bar{I}_s$ , потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$ ; головного потокозчеплення  $\bar{\Psi}_m$ ;  $\omega_0$  – швидкість обертання координат  $(d, q)$ ;  $z_p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – швидкість ротора;  $R_s, R_r$  – активні опори фаз статора та ротора;  $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$  – еквівалентний опір, що відображає втрати потужності у залізі двигуна;  $L_m = L_m(\Psi_m)$  – індуктивність намагнічування;  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  – індуктивності від полів розсіювання;  $L_r = L_m + L_{r\sigma}, T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r, T_z = L_m/R_z$ ;  $M, M_L$  – моменти двигуна та навантаження відповідно;  $J$  – сумарний момент інерції. Враховуючи те, що в зорієнтованих координатах  $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$ , електромагнітний момент двигуна та швидкість координат в (1) обчислюються як

$$M = 1,5 z_p L_{r\sigma}^{-1} \Psi_r \Psi_{mq}; \quad \omega_0 = z_p \omega + \Psi_{mq} / (T_{r\sigma} \Psi_r). \quad (2)$$

Насичення магнітопроводу в (1) враховується за рахунок нелінійної функції  $L_m = L_m(\Psi_m)$ , отриманої на основі кривої намагнічування двигуна та апроксимованої поліноміальним виразом

$$L_m = L_{mn} \sum_{i=0}^k a_i \Psi_m^{k-i}, \quad (3)$$

де  $a_i$  – коефіцієнти полінома;  $k$  – степінь полінома;  $L_{mn}$  – номінальне значення індуктивності намагнічування (індексом  $n$  далі позначатимуться номінальні значення величин);  $\Psi_m = |\bar{\Psi}_m|$ . Магнітний опір в (1) визначається за виразом

$$R_z = \left( K_h (1 + |s|) / f_0 + K_e (1 + s^2) \right)^{-1}, \quad (4)$$

де  $K_h, K_e$  – коефіцієнти втрат від гістерезису та вихрових струмів;  $f_0 = |\omega_0| / 2\pi$  – частота живлення АД;  $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$  – ковзання двигуна.

Опис (1)–(4) слід доповнити існуючими в АЕП обмеженнями 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

$$0 \leq U_s \leq U_{max}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{max}. \quad (5)$$

Спрощена функціональна схема векторно-керованого АЕП зображена на рис. 1. Призначенням приводу є стабілізація швидкості ротора АД із приєднаним до нього виробничим механізмом на рівні сигналу завдання  $\omega^*$  у широкому діапазоні як вниз, так і вгору від номінальної швидкості. У блок векторного керування БВК надходять сигнали зворотних зв'язків із давачів струмів фаз  $I_A, I_B$  та давача швидкості ДШ. Завдання швидкості  $\omega^*$  після його підсумовування з швидкістю ротора  $\omega$  подається на вхід регулятора швидкості, що знаходиться у БВК. У блоці формування потокозчеплення БФП залежно від  $\omega$  та згідно із заданим алгоритмом визначається завдання модуля вектора потокозчеплення ротора  $\Psi_r^*$ , яке разом зі зворотним зв'язком, отриманим у спостерігачі сигналом оцінки потокозчеплення, надходить на вхідний суматор розташова-

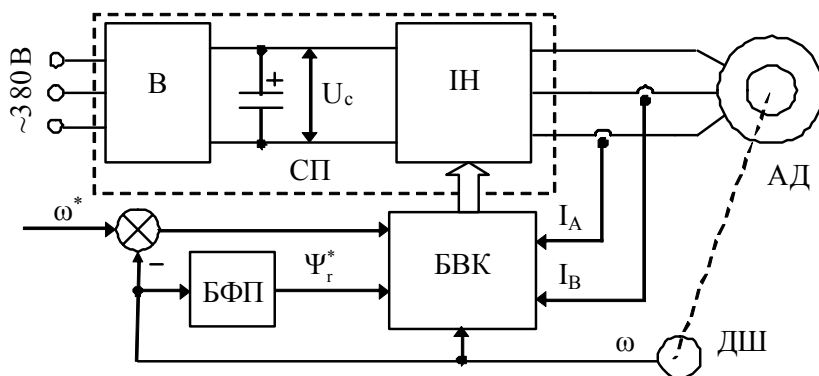


Рис. 1

ного у БВК регулятора потокозчеплення. Силовий перетворювач СП складається із випрямляча В, фільтрувального конденсатора та інвертора напруги ІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Напруга  $U_c$  ланки постійного струму СП живить ІН. У свою чергу ІН живить обмотки статора АД імпульсною напругою, амплітуда, частота та фаза першої гармоніки якої встановлюються відповідними сигналами керування, що надходять із БВК. Крім цього, у ланці постійного струму зазвичай встановлюють пристрій обмеження струму зарядження конденсатора та пристрій імпульсного розрядження конденсатора на гасильний резистор (на рис. 1 не показано). Перший з цих пристроїв служить для захисту випрямляча в момент пуску, а другий – для обмеження  $U_c$  на максимально допустимому рівні.

**Оптимізація моменту двигуна.** Класичний алгоритм формування модуля вектора потокозчеплення ротора має вигляд

$$\Psi_r = F_{cls}(\omega) = \begin{cases} \Psi_{rn} & \text{при } |\omega| \leq \omega_n, \\ \Psi_{rn}\omega_n/|\omega| & \text{при } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\Psi_{rn}$  – номінальне значення потокозчеплення ротора. Задача оптимізації електромагнітного моменту двигуна на високих швидкостях ротора може бути сформульована таким чином: для АД з описом (1)–(4) при врахуванні обмежень (5) за критерієм  $M \Rightarrow \max$  для  $0 \leq |\omega| \leq \omega_{\max}$ , де  $\omega_{\max}$  – максимально допустима швидкість двигуна, на інтервалі  $0 < \Psi_r \leq \Psi_{rn}$  знайти оптимальний алгоритм зміни потокозчеплення ротора в рушійному та у генераторному режимі (режим рекуперативного гальмування).

Враховуючи високий порядок та суттєву нелінійність опису (1)–(5), очевидно, що цю задачу оптимізації можна розв'язати лише чисельно. У числових дослідженнях у статті використано два типових чотириполюсних АД потужністю 1,5 та 30 кВт, які матимуть назву відповідно Д1 та Д2. Номінальні дані цих двигунів наведено у табл. 1, 2, де  $P$  – вихідна потужність;  $U$ ,  $I$  – напруга та струм фази статора (діючі значення);  $f$ ,  $n$  – частота живлення та кількість обертів вала двигуна.

Таблиця 1

|                 |                 |                 |                  |                  |                    |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|
| $P=1,5$ кВт     | $U=220$ В       | $I=3,56$ А      | $f=50$ Гц        | $n=1413$ об/хв   | $\cos\varphi=0,83$ |
| $R_s = 6,46$ Ом | $R_r = 3,87$ Ом | $R_z = 1380$ Ом | $L_s = 0,389$ Гн | $L_r = 0,398$ Гн | $L_m = 0,374$ Гн   |

Таблиця 2

|                   |                   |                |                   |                   |                    |
|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| $P=30$ кВт        | $U=220$ В         | $I=56,8$ А     | $f=50$ Гц         | $n=1467$ об/хв    | $\cos\varphi=0,88$ |
| $R_s = 0,1376$ Ом | $R_r = 0,0862$ Ом | $R_z = 187$ Ом | $L_s = 43,14$ мГн | $L_r = 43,64$ мГн | $L_m = 41,83$ мГн  |

Оптимальне потокозчеплення ротора для опису (1)–(5) отримано за допомогою генетичного алгоритму числової оптимізації [2] при  $U_{\max} = U_n = 311$  В,  $I_{\max} = 1.5I_n$  ( $U_n$ ,  $I_n$  – номінальні напруга та струм фази статора). На рис. 2 зображені граничні характеристики Д1 при класичному (6), а на рис. 3 – при оптимальному алгоритмах формування потокозчеплення ротора, де змінні  $U_s$  (крива 1),  $I_s$  (крива 2),  $\Psi_r$  (крива 3),  $M$  (крива 4) та  $\omega$  нормовані щодо своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

Порівняння кривих 3 на рис. 2 та 3 засвідчує істотну відмінність між модулями вектора потокозчеплення ротора, що відповідають класичному та оптимальному алгоритмам. А зіставлення кривих 4 на рис. 2 та 3 підтверджує суттєве зростання електромагнітного моменту АД завдяки оптимізації. Аналізуючи рис. 3, варто зазначити, що за максимізації моменту двигуна в умовах обмеження напруги та струму статора на площині механічної характеристики приводу доцільно розглядати не дві (як це робиться у класичній теорії електроприводу), а три зони регулювання швидкості, які можна назвати зонами А, В і С. Межовим значенням швидкості для зон А та В є швидкість, при якій за максимального струму напруга статора ся-

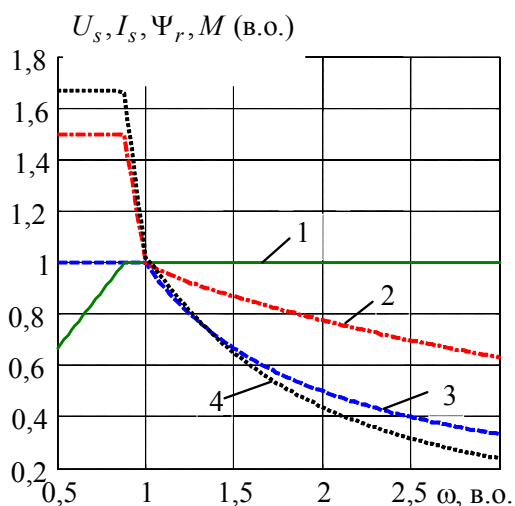


Рис. 2

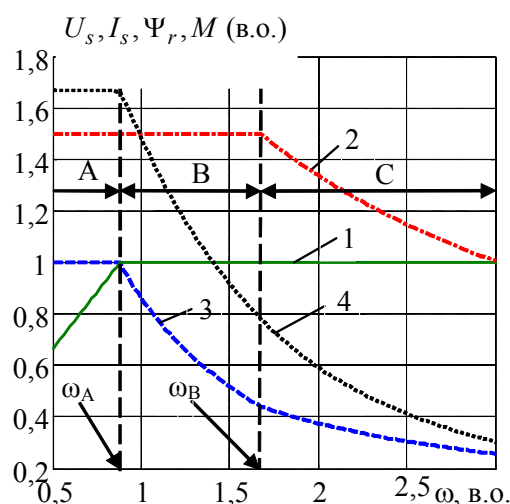


Рис. 3

гає свого обмеження, а для зон *B* та *C* – коли струм статора стає меншим від свого максимального значення. На рис. 3 ці межові швидкості позначено відповідно як  $\omega_A$  та  $\omega_B$ . Важливим є те, що в кожній із вказаних зон причини обмеження електромагнітного моменту двигуна є різними. Зокрема, в зоні *A* максимальний момент двигуна визначається обмеженням струму статора, в зоні *B* – обмеженнями як струму, так і напруги статора, а в зоні *C* – лише обмеженням напруги статора.

**Вплив змін параметрів на екстремальні характеристики АД.** У системах векторного керування АД основними параметричними збуреннями є варіації параметрів, що залежать від теплового та магнітного станів двигуна. Застосування опису (1)–(5) для числової оптимізації моменту АД дає змогу повною мірою врахувати зміни індуктивних параметрів, пов'язаних з нелінійністю кривої намагнічування двигуна. Проте варіації резистивних параметрів  $R_s$ ,  $R_r$  залежать від нагрівання двигуна і при оптимізації не враховуються. Ці варіації визначаються різницею між максимально допустимою температурою обмоток, згідно із класом їх ізоляції, та стартовою температурою двигуна. Для тягових АД в електротранспорті, який працює на відкритому повітрі, стартова температура в холодну пору року сягає від'ємних значень. Тому варіації опорів можуть бути істотними, і їх вплив на екстремальні властивості АД потребує детального вивчення.

Ще однією нестабільною величиною в АЕП є напруга  $U_c$  ланки постійного струму СП, з якою обмеження напруги статора  $U_{\max}$  пов'язане пропорційною залежністю  $U_{\max} = U_c / \sqrt{3}$ . Перша причина відхилень  $U_c$  від номінального значення полягає у коливаннях напруги у промисловій трифазній мережі, яка живить АЕП. Друга причина варіацій  $U_c$  пов'язана з інтенсивним відбором або поверненням енергії у фільтрувальний конденсатор ланки постійного струму в процесі розгону-гальмування АД. Вагомість цієї причини зростає у випадку живлення від спільної ланки постійного струму групи двигунів. Крім цього, значні довготривалі відхилення  $U_c$  вниз від номіналу характерні для бортових тягових АЕП, де ІН живиться від акумуляторних батарей, для яких зазвичай допускається зниження напруги на 30 % внаслідок розряджання. Таким чином, бачимо, що варіації напруги ланки постійного струму  $U_c$  можуть сягати істотних значень, а тому їх вплив на екстремальні властивості АД має бути детально вивченим.

Дослідження параметричної чутливості характеристик АД виконаємо за два етапи. На першому з них виявимо вплив варіацій параметрів на межову швидкість  $\omega_A$ , а на другому – на криві оптимальних поточкозчеплення та моменту АД.

Межова швидкість  $\omega_A$  відіграє важливу роль, оскільки при максимізації електромагнітного моменту саме з неї треба починати ослаблення поля АД. Цю швидкість можна отри-

мати числовим способом шляхом оптимізації моделі двигуна. Проте для задач аналізу властивостей АЕП та для налагодження параметрів алгоритму екстремального векторного керування корисно мати аналітичний вираз для визначення  $\omega_A$ , Щоб віднайти такий вираз, можна використати опис усталених електромагнітних процесів ідеалізованого АД у зорієнтованих за  $\bar{\Psi}_r$  координатах  $(d, q)$  у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R'_s I_{sd} - \omega_0 L'_s I_{sq} - K_r \Psi_r / T_r; \\ U_{sq} &= R'_s I_{sq} + \omega_0 L'_s I_{sd} + K_r \Psi_r z_p \omega; \\ \Psi_r &= L_m I_{sd}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_{sq} / \Psi_r$ ;  $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$ ;  $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$ ;  $K_r = L_m / L_r$ ;  $L_m = L_{mn}$ . В [2] на основі (7) отримано формулу для визначення  $\omega_A$ :

$$\omega_A = \left( -a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2} \right) / 2a_0, \quad (8)$$

де  $a_0 = b_2^2 + c_2^2$ ;  $a_1 = -2(c_1 c_2 - b_1 b_2)$ ;  $a_2 = b_1^2 + c_1^2 - U_{\max}^2$ ;  $b_2 = -z_p L'_s I_{sq}$ ;  $\Psi_r = \Psi_{rn}$ ;  
 $b_1 = \Psi_r (R'_s / L_m - K_r / T_r) - L'_s K_r R_r I_{sq}^2 / \Psi_r$ ;  $c_1 = -(R'_s + L'_s / T_r) I_{sq}$ ;  $c_2 = z_p (L'_s / L_m + K_r) \Psi_r$ ;  
 $I_{sq} = \pm \sqrt{I_{\max}^2 - (\Psi_{rn} / L_m)^2}$ . (9)

Формула (8) дає змогу визначити межу швидкості  $\omega_A$  як у рушійному, так і в генераторному режимі АД. Для цього при обчисленні  $I_{sq}$  за виразом (9) у першому разі слід брати додатні значення, а в другому – від'ємні.

Далі у дослідженні відносні відхилення (варіації) величин обчислюються як

$$\delta x = (x_{\text{var}} - x_n) / x_n, \text{ в.о.}, \quad (10)$$

де  $x_{\text{var}}$ ,  $x_n$  – відповідно варійоване та номінальне значення величини. Інтервали відносних варіацій змінюваних величин були такими:  $\delta R_s \in [-0,3 \ 0,3]$  в.о.,  $\delta R_r \in [-0,45 \ 0,45]$  в.о.,  $\delta U_c \in [-0,3 \ 0,3]$  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  $\delta R_r \approx 1,5 \delta R_s$ . Номінальними значеннями опорів статора і ротора вважались їх середні значення в інтервалах можливих змін.

Змінюючи опори та напругу ланки постійного струму привода у зазначених межах, за формулами (8)–(10) були обчислені залежності відносних відхилень  $\delta \omega_A$  межевої швидкості  $\omega_A$  від відносних варіацій параметрів. Графіки цих залежностей для рушійного режиму роботи двигунів представлені на рис. 4–6, а для генераторного режиму роботи – на рис. 7, де криві 1, 3 отримані для Д1, а криві 2, 4 – для Д2, причому криві 1, 2 відповідають  $I_{\max} = 1,5 I_n$ , а криві 3, 4 –  $I_{\max} = 2,5 I_n$ .

Аналізуючи рис. 4, 5, можна зазначити, що вплив на межу швидкості варіацій опорів досить істотний, причому він зростає при збільшенні максимального струму та зменшенні потужності двигуна. Але набагато більший вплив на  $\omega_A$  мають варіації  $U_c$ , за яких  $\delta \omega_A$  зростає в декілька разів. Притому, як видно з рис. 4, 5, від'ємні варіації опорів та додатні варіації напруги відповідають додатним значенням  $\delta \omega_A$  і навпаки. Звідси можна зробити висновки, що гіршими варіантами спільних варіацій параметрів є такі: 1) малі опори та велика напруга; 2) великі опори та мала напруга. Саме для таких різнознакових варіацій параметрів побудовано графіки на рис. 6, які засвідчують, що сукупний вплив варіацій  $R_s$ ,  $R_r$  та  $U_c$  на  $\omega_A$  може бути дуже значним –  $\delta \omega_A$  сягає 50 % (70 %) для Д1 та 37 % (40 %) для Д2 при  $I_{\max} = 1,5 I_n$  ( $I_{\max} = 2,5 I_n$ ).

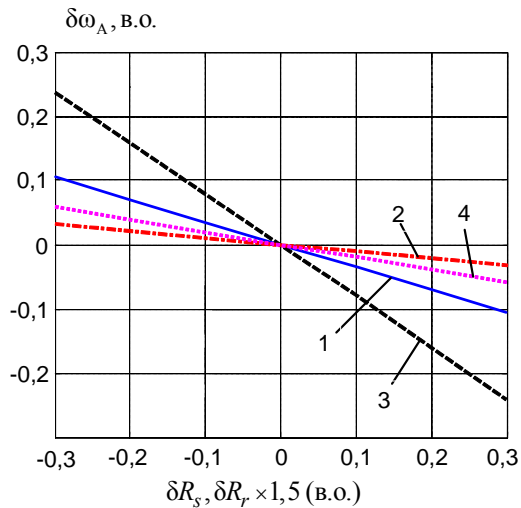


Рис. 4

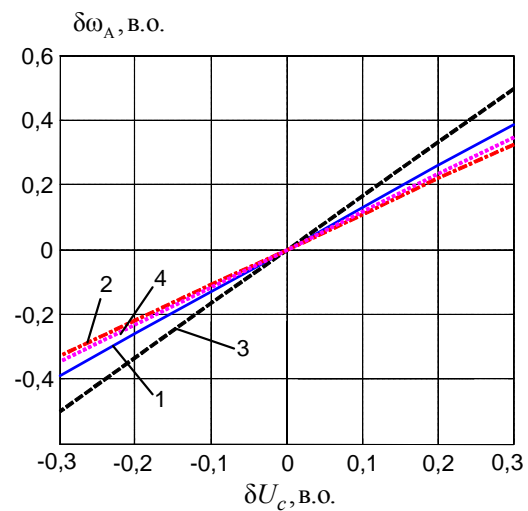


Рис. 5

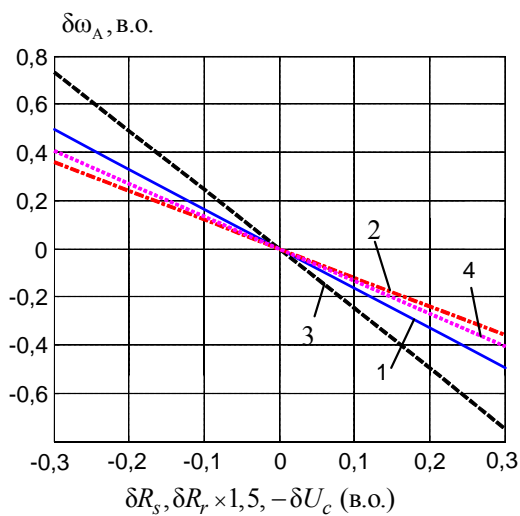


Рис. 6

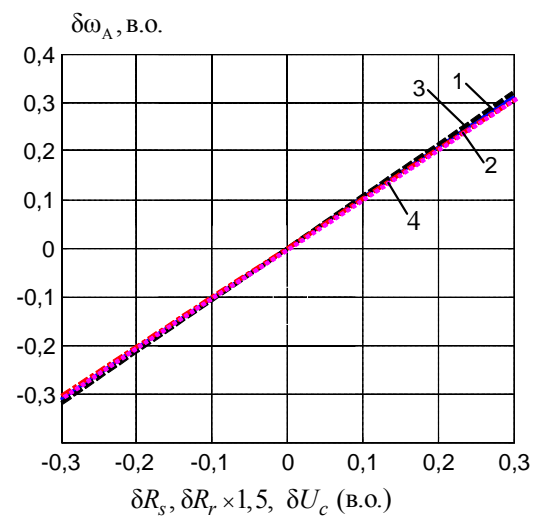


Рис. 7

Аналогічно до описаних вище були проведені дослідження у генераторному режимі роботи двигунів. При цьому тут виявлені дві якісні відмінності. По-перше, ефект від збільшення  $I_{\max}$  є протилежним при варіаціях  $R_s$ ,  $R_r$  та  $U_c$ : у першому разі  $\delta\omega_A$  збільшується, а у другому – зменшується. По-друге, додатні варіації опорів та напруги відповідають додатним значенням  $\delta\omega_A$  і навпаки. Звідси випливає, що гіршими варіантами спільних варіацій параметрів у генераторному режимі є такі: 1) малі опори та мала напруга; 2) великі опори та велика напруга. Саме для таких однознакових варіацій параметрів побудовано графіки на рис. 7. Вони засвідчують, що сукупний вплив варіацій  $R_s$ ,  $R_r$  та  $U_c$  на  $\omega_A$  може бути досить значним – значення  $\delta\omega_A$  сягають 30% для Д1 та Д2 при  $I_{\max} = 1,5I_n$  та  $I_{\max} = 2,5I_n$ . Практичне злиття на рис. 7 чотирьох кривих в одну лінію пояснюється взаємним компенсуванням ефекту від збільшення  $I_{\max}$  для варіацій опорів та напруги.

У цілому, порівняно з рушійним режимом роботи АД, сукупна дія варіюваних параметрів у генераторному режимі спричинює приблизно на 10...40 % менші значення  $\delta\omega_A$ , а відмінності у потужності двигунів та максимальному струмі проявляються значно менше. При цьому найбільше впливають на  $\omega_A$  у генераторному режимі поєднання однознакових варіацій параметрів. Також варто відмітити близький до лінійного характер залежностей відхилень межевої швидкості від варіацій параметрів.

Перейдемо до етапу досліджень екстремальних характеристик АД, для розрахунку яких здійснювалась числова оптимізація опису (1)–(5). Отримані результати для рушійного

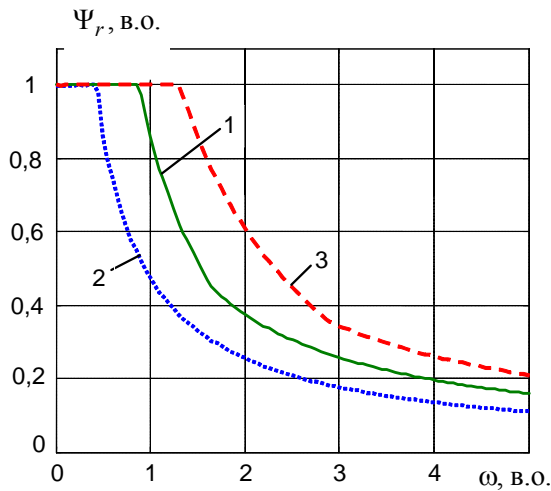


Рис. 8

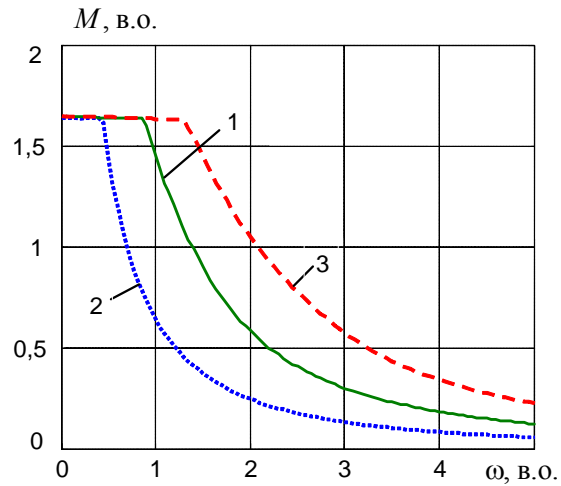


Рис. 9

режиму роботи Д1 представлено на рис. 8, 9. На рис. 8 представлено графіки оптимального потокозчеплення, а на рис. 9 – відповідні їм графіки максимального моменту АД, де криві 1 отримано для номінальних значень параметрів, криві 2 – для параметрів варіацій  $\delta R_s = 0,3$  в.о.,  $\delta R_r = 0,45$  в.о.,  $\delta U_c = -0,3$  в.о., а криві 3 – для варіацій параметрів  $\delta R_s = -0,3$  в.о.,  $\delta R_r = -0,45$  в.о.,  $\delta U_c = 0,3$  в.о.

Аналізуючи ці рисунки, бачимо, що внаслідок варіацій параметрів графіки оптимального потокозчеплення зазнають значних змін у вигляді зсуву по горизонталі, що підтверджує отримані вище результати досліджень щодо відхилень  $\omega_A$ , та деформації їх форми. Максимальне відхилення по вертикалі між кривими потокозчеплення сягає 40 %, а між кривими моменту – 50 %.

Результати дослідів для генераторного режиму роботи Д1 наведено на рис. 10, 11. На рис. 10 представлено графіки оптимального потокозчеплення, а на рис. 11 – відповідні їм графіки максимального моменту АД. Тут криві 1 отримано для номінальних значень параметрів, криві 2 – для варіацій параметрів  $\delta R_s = -0,3$  в.о.,  $\delta R_r = -0,45$  в.о.,  $\delta U_c = -0,3$  в.о., а криві 3 – для варіацій параметрів  $\delta R_s = 0,3$  в.о.,  $\delta R_r = 0,45$  в.о.,  $\delta U_c = 0,3$  в.о.

У цілому на основі представлених на рис. 8–11 результатів досліджень можна зазначити, що екстремальні характеристики АД значною мірою залежать від змін активних опорів двигуна і від варіацій напруги ланки постійного струму при домінуючому впливі останньої. Зменшення міри впливу варіацій параметрів спостерігається при роботі двигуна у генераторному режимі.

Проведемо чисельні дослідів для виявлення ступеня погіршення властивостей АД внаслідок варіацій параметрів. Для цього відтворимо ситуацію, коли в АЕП підтримується ви-

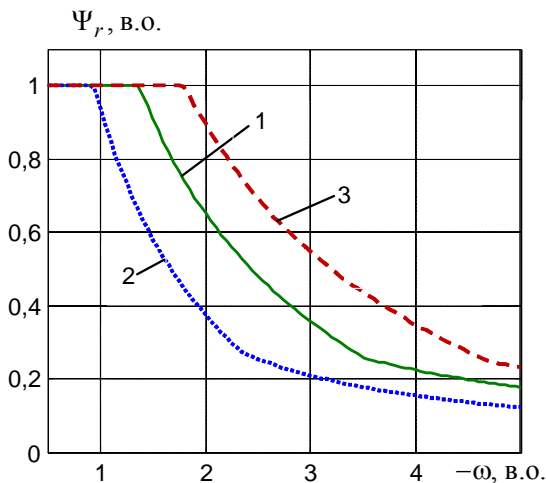


Рис. 10

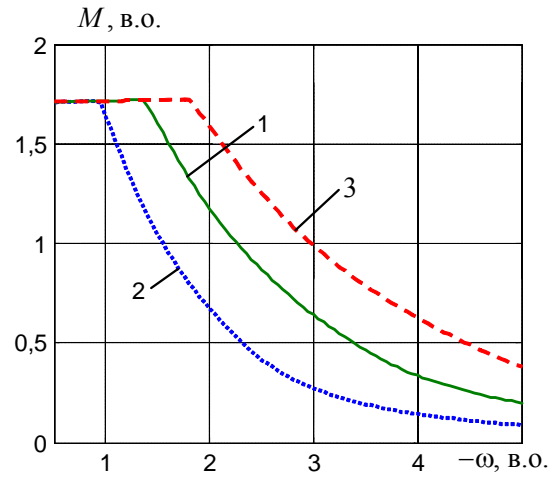


Рис. 11

значене для номінальних параметрів двигуна оптимальне потокозчеплення ротора  $\Psi_{ro,nom}$ , а в системі керування АД ніяких компенсувальних дій щодо зміни параметрів немає.

У першому випадку для Д1 з варіаціями параметрів  $\delta R_s = -0,3$  в.о.,  $\delta R_r = -0,45$  в.о.,  $\delta U_c = 0,3$  в.о., при  $\Psi_r = \Psi_{ro,nom}$  (рис. 8, крива 1) обчислимо момент, який назвемо  $M_{var1}$ . Порівняння цього моменту із визначеним вище (рис. 9, крива 3) для Д1 за цих же варіацій параметрів оптимальним моментом  $M_{o,var1}$  наведено на рис. 12, де крива 1 –  $M_{o,var1}$ , крива 2 –  $M_{var1}$ , крива 3 – відношення  $M_{var1}/M_{o,var1}$ , а крива 4 – аналогічне відношення  $M_{var1}/M_{o,var1}$ , але отримане для Д2. Графіки 3, 4 на рис. 12 засвідчують значне (близько 40 %) зменшення моменту АД.

У другому випадку для Д1 з варіаціями параметрів  $\delta R_s = 0,3$  в.о.,  $\delta R_r = 0,45$  в.о.,  $\delta U_c = -0,3$  в.о. при  $\Psi_r = \Psi_{ro,nom}$  (рис. 8, крива 1) обчислимо момент, який назвемо  $M_{var2}$ . На рис. 13 графік  $M_{var2}$  представлений у вигляді кривої 3. Як бачимо, на певному інтервалі швидкостей момент АД падає до нуля, що засвідчує непрацездатність АЕП.

Явище повного зникнення моменту в АД з варійованими параметрами можна пояснити тим, що напруги живлення не вистачає на підтримання заданого потокозчеплення та утворення моменту. Для аналізу таких ситуацій корисно отримати криву граничних значень потокозчеплення, при яких момент двигуна стає нульовим. Прирівнявши до нуля моментну складову струму статора  $I_{sq} = 0$  та врахувавши рівність  $U_{sd}^2 + U_{sq}^2 = U_{max}^2$ , із (7) дістанемо вираз

$$\Psi_{r,max}(\omega) = \frac{U_{max}}{\sqrt{(R'_s L'_m - K_r T_r^{-1})^2 + (\omega z_p)^2 (L'_s L'_m + K_r)^2}}. \quad (11)$$

Оскільки  $\Psi_{r,max}(\omega)$  обмежує зверху сімейство можливих у рушійному режимі кривих  $\Psi_r(\omega)$ , то логічно назвати  $\Psi_{r,max}$  мажорантою потокозчеплення ротора АД. На рис. 13 наведені  $\Psi_{ro,nom}$  (крива 1) та  $\Psi_{r,max}$  (крива 2), що визначена за виразом (11) при варіаціях  $\delta R_s = 0,3$  в.о.,  $\delta R_r = 0,45$  в.о.,  $\delta U_c = -0,3$  в.о. Як бачимо, момент АД стає нульовим саме на тих  $\omega$ , де крива 1 перетинає мажоранту потокозчеплення та проходить над нею.

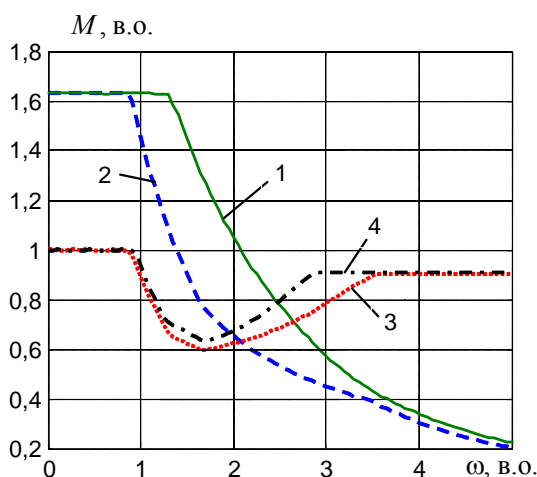


Рис. 12

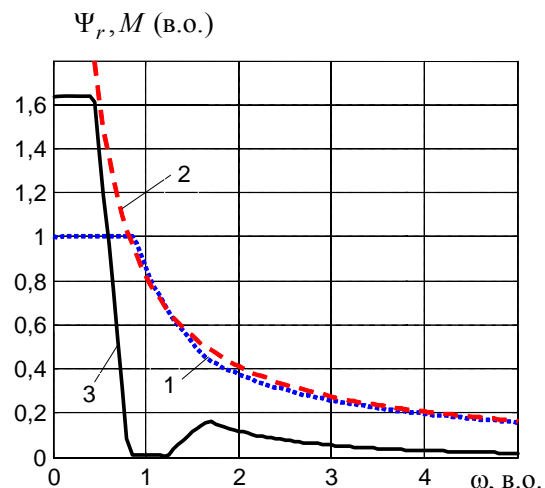


Рис. 13

**Висновки.** За результатами виконаних досліджень встановлено, що на характеристики векторно-керованих АД з максимізацією моменту в режимі ослаблення поля значний вплив мають варіації активних опорів двигуна та більшою мірою коливання напруги ланки постійного струму силового перетворювача приводу. Показано, що вплив зазначених параметричних збурень може або значно зменшити момент двигуна, або призвести до непрацездатності електроприводу. Тому потрібна побудова систем автоматичного керування АД з



властивістю самоналагоджування до поточних значень змінних параметрів, які можуть визначатися шляхом вимірювання або оцінювання за допомогою спостерігача.

1. *Приймак Б.І.* Властивості асинхронного електроприводу з максимізацією моменту у зоні високих швидкостей ротора // Вісник Нац. техн. ун-ту "Харківський політехн. ін-т". Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силова електроніка та енергоефективність». – 2015. – С. 142–146.
2. *Приймак Б.І.* Максимізація моменту асинхронного двигуна в зоні високих швидкостей ротора за допомогою генетичного алгоритму // Вісник Нац. техн. ун-ту "Харківський політехн. ін-т". Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – 2013. – № 36. – С. 493–494.
3. *Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А.* Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
4. *Bodson M., Chiasson J.N., Novotnak R.T.* A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors // IEEE Trans. on Control Sys. Technol., Vol.3, No.4, Dec. 1995. – P. 388–397.
5. *Casadei D., Mengoni M., Serra G., Tani A., Zarri L.* A control scheme with energy saving and DC-link overvoltage rejection for induction motor drives of electric vehicles // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2010. – Vol. 46, No 4. – P. 1436–1446.
6. *Harnefors L., Pietilainen K., Gertmar L.* Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection // IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 48, No.1, Feb. 2001. – P. 161–168.
7. *Kim S. H., Sul S. K.* Voltage control strategy for maximum torque operation of an induction machine in the field-weakening region. // IEEE Trans. Ind. Elec. – 1997. – Vol. 44, No. 4. – P. 512–518.
8. *Leonhard W.* Control of electrical drives, Springer Verlag, 1985. – 346 p.
9. *Wieser R.S.* Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region, Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS, 1997. – Vol. 1. – P. 401–409.

УДК 62-52: 621.313.33

**Б.І. Приймак**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",  
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

**Влияние изменений параметров на характеристики асинхронных двигателей с максимизацией момента в режиме ослабления поля**

*Исследуется влияние на характеристики векторно-управляемых асинхронных двигателей с максимизацией момента в режиме ослабления поля вариаций активных сопротивлений двигателя и напряжения звена постоянного тока привода. Установлено, что параметрические возмущения значительно изменяют граничную (базовую) скорость, что разделяет зоны номинального и сниженного потока, а также деформируют кривую оптимального потокосцепления ротора. В двигательном режиме наиболее влияют вариации сопротивлений и напряжения разных знаков, а в генераторном – одного знака. Показано, что изменения параметров могут привести к неработоспособности привода, поэтому необходима самонастройка системы автоматического управления к изменяемым параметрам. Для вычислений использованы данные двигателей мощностью 1,5 и 30 кВт. Библ. 9, рис. 13, табл. 2.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, ослабление поля, оптимизация, вариации параметров.

**В.І. Прумак**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",  
Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

**Impact of parameters changes on characteristics of the induction motors with the torque maximization in the field weakening regime**

*Study of the impact on the characteristics of vector-controlled induction motors with the torque maximization in the field weakening regime the variations of the active resistances and voltage of DC-link of drive. Found that parametric perturbation significantly alter the boundary speed (base speed), separating zone nominal and reduced flux and deform the curve of optimum rotor flux linkage. In driving mode, the worst impact resistances and voltage variations of different signs, and in generator mode - one sign. It is shown that parameter changes may cause disability drive, so you must self-tuning automatic control system to changing parameters. For calculations used data motors power of 1.5 kW and 30 kW. References 9, figures 13, tables 2.*

**Key words:** induction motor, vector control, field weakening, optimization, variation of parameters.

Надійшла 15.03.2016

Received 15.03.2016