

## ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗАВДЯКИ МАКСИМІЗАЦІЇ МОМЕНТУ ЗА ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ

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

*Розглянуто шляхи поліпшення показників векторно-керованих високошвидкісних асинхронних електроприводів. Досліджені граничні характеристики асинхронного двигуна з максимізацією моменту за ослаблення поля в генераторному режимі. Моделювання екстремальної системи керування асинхронним двигуном показало істотне зменшення часу гальмування двигуна на високих швидкостях.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, векторне керування, ослаблення поля, максимізація моменту.

### Вступ

Асинхронні електроприводи металообробних верстатів, електромобілів, трамваїв, тролейбусів тощо повинні працювати як на нижчих, так на вищих від номінальної швидкостях ротора. В зоні високих швидкостей, де обмежується амплітуда напруги живлення асинхронного двигуна (АД), потокозчеплення ротора зазвичай змінюється обернено пропорційно до швидкості двигуна. Проте за такого способу зміни магнітного поля енергетичні ресурси приводу використовуються не повною мірою. Кращих результатів можна досягти шляхом екстремального керування моментом двигуна.

Аналіз літературних джерел [1—2] показав, що тематика максимізації моменту у векторно-керованих АД за ослаблення поля досліджується досить інтенсивно. Але на сьогодні не всі властивості екстремальних щодо моменту двигуна систем автоматичного керування (САК) АД є достатньо вивченими. Зокрема, потребує дослідження залежність оптимального потокозчеплення та переважувальної здатності двигуна від максимального струму живлення статора, а також можливості поліпшення показників динаміки системи. У роботі [3] розглядаються властивості екстремальної САК АД у русійному режимі, а у цій статті — в режимі рекуперативного гальмування (у генераторному режимі) двигуна.

*Метою роботи* є дослідження показників режиму рекуперативного гальмування асинхронного двигуна з максимізацією моменту за ослаблення поля та обмежень напруги і струму статора.

### Результати дослідження

З урахуванням втрат у залізі і криві намагнічування короткозамкненої АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  координатах  $(d, q)$  можна описати системою диференціальних рівнянь [3]

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

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора  $\bar{U}_s$ , струму статора  $\bar{I}_s$ , потоко-

зчеплення 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;  $L_m = L_m(\Psi_m)$  — взаємна індуктивність;  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  — індуктивності від полів розсіювання;  $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ ;  $T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r$ ;  $T_z = L_m/R_z$ ;  $M_e, M_t$  — 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

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

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 взаємної індуктивності (індексом  $n$  нижче позначатимуться номінальні значення величин);  $\Psi_m = |\bar{\Psi}_m|$ .

Магнітний опір можна визначати за виразом [3]

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

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.

Крім опису (1)—(4) слід ввести реально існуючі 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

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

В загальному вигляді задача максимізації електромагнітного моменту двигуна у статичній формуюється таким чином: для АД, що описується (1)—(4), за врахування обмежень (5) у русійному режимі для швидкостей  $0 \leq \omega \leq \omega_{\max}$ , а в генераторному режимі для швидкостей  $-\omega_{\max} \leq \omega \leq 0$  в інтервалі  $0 < \Psi_r \leq \Psi_{rn}$  знайти оптимальне потокозчеплення ротора за критерієм  $M_e \Rightarrow \max$ , де  $\omega_{\max}$  — максимально допустима швидкість двигуна.

Враховуючи високий порядок та суттєву нелінійність опису (1)—(5), очевидно, що точний розв'язок цієї задачі оптимізації можна отримати лише чисельно. У числових дослідженнях в статті використано типовий чотириполюсний АД потужністю 1,5 кВт, номінальні дані якого подані у табл. 1.

Таблиця 1

Номінальні дані асинхронного двигуна

1500 Вт	380/220 В	3,56 А	50 Гц	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

Стандартна залежність модуля вектора потокозчеплення ротора від швидкості має такий вигляд:

$$F_{st}(\omega) = \begin{cases} \Psi_{rn}, & \text{якщо } |\omega| \leq \omega_n; \\ \Psi_{rn} \omega_n / |\omega|, & \text{якщо } |\omega| > \omega_n. \end{cases} \quad (6)$$

Оптимальне потокозчеплення ротора  $\Psi_r = F_{\text{opt}}(\omega)$  для опису (1)—(5) отримано за допомогою генетичного алгоритму числової оптимізації. На рис. 1 зображені статичні характеристики АД за

стандартного, а на рис. 2 — за оптимального потокозчеплення ротора для  $U_{\max} = U_{sn}$ ,  $I_{\max} = 1,5I_{sn}$ , де змінні нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в. о.).

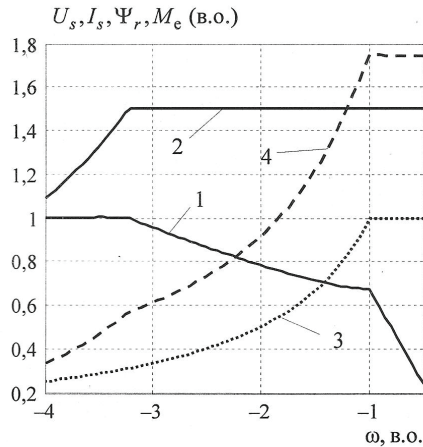


Рис. 1. Характеристики АД в генераторному режимі з потокозчепленням  $\Psi_r = F_{st}(\omega)$ :  
1 —  $U_s$ ; 2 —  $I_s$ ; 3 —  $\Psi_r$ ; 4 —  $M_e$

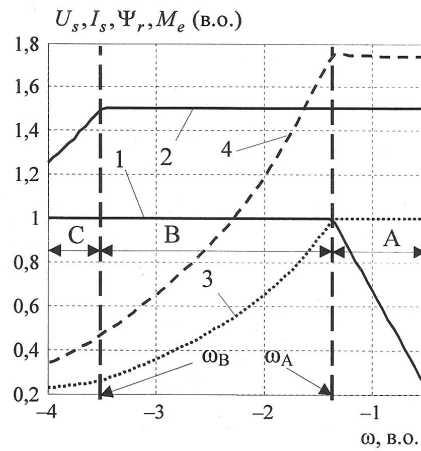


Рис. 2. Характеристики АД в генераторному режимі з потокозчепленням  $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$ :  
1 —  $U_s$ ; 2 —  $I_s$ ; 3 —  $\Psi_r$ ; 4 —  $M_e$

Аналізуючи рис. 2, слід відмітити, що за обмеження напруги та струму живлення двигуна існують якісно відмінні три зони регулювання швидкості, які можна назвати зонами А, В і С. Межовим значенням швидкості для зон А та В є швидкість, за якої напруга статора сягає свого обмеження, а для зон В та С — коли струм статора перестає обмежуватися. На рис. 2 ці межові швидкості позначено як  $\omega_A$  та  $\omega_B$ , відповідно. У кожній з вказаних зон швидкості причини обмеження електромагнітного моменту двигуна є різними. Зокрема, в зоні А максимальний момент двигуна визначається тільки  $I_{\max}$ , в зоні В — як  $I_{\max}$  так і  $U_{\max}$ , а в зоні С — лише  $U_{\max}$ .

На рис. 3 подані графіки стандартного та оптимальних потокозчеплень для трьох значень  $I_{\max}$ . Ці графіки показують, що для різних обмежень струму статора залежності  $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$ , а, відповідно, і максимізований момент двигуна відрізняються між собою лише в зоні швидкості В (для  $I_{\max} = I_{sn}$  межова швидкість  $\omega_B = 4,75$  в. о., за якої криві 2, 3, та 4 зливаються).

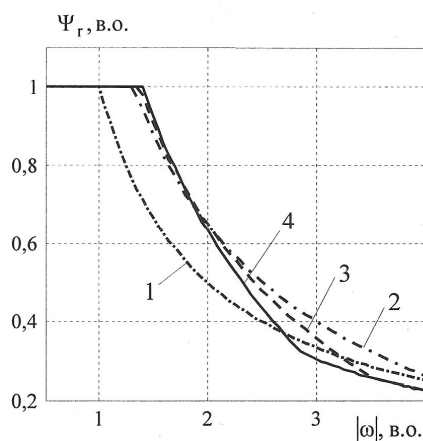


Рис. 3. Стандартне (крива 1) та оптимальні (криві 2—4) потокозчеплення:  
2 —  $I_{\max} = I_{sn}$ ; 3 —  $I_{\max} = 1,5I_{sn}$ ; 4 —  $I_{\max} = 2I_{sn}$

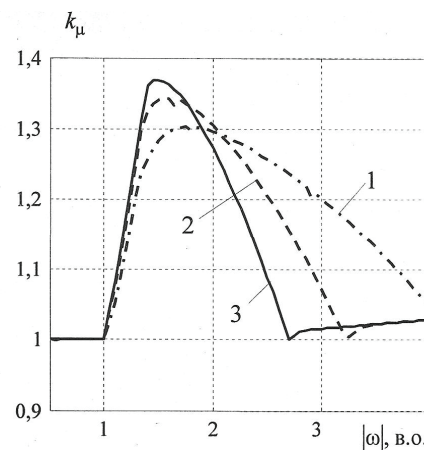


Рис. 4. Показники оптимальності гальмівного моменту двигуна для: 1 —  $I_{\max} = I_{sn}$ ; 2 —  $I_{\max} = 1,5I_{sn}$ ; 3 —  $I_{\max} = 2I_{sn}$

Для оцінювання ефекту від оптимізації обчислено показники оптимальності моменту двигуна  $k_{\mu}$ , що є відношенням оптимізованого до неоптимізованого моментів АД (рис. 4). Щоб проаналі-

зувати показники оптимальності розглянемо такі характеристики:  $\underline{k}_\mu = \text{mean}(k_\mu)$  — середнє значення;  $k_{\mu,\max} = \max(k_\mu)$  — максимальне значення;  $|\omega|_{\max}$  — швидкість, за якої досягається максимальне значення показника. Ці величини визначені для зображених на рис. 4 кривих  $k_\mu(|\omega|)$  на інтервалі швидкостей  $|\omega| \in [1, 4]$  в.о. і зведені в табл. 2.

Таблиця 2

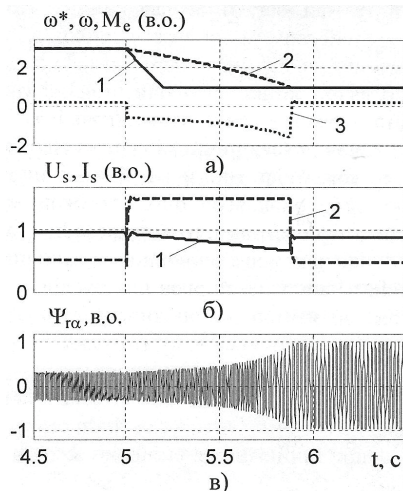
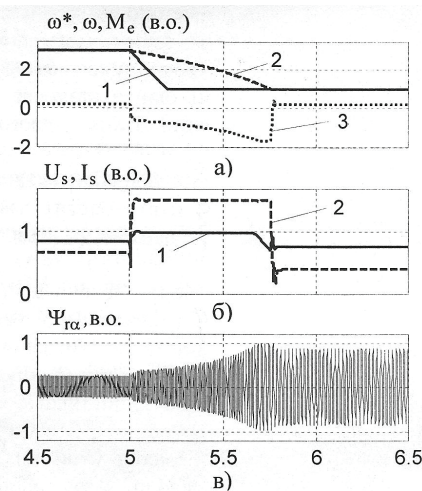
## Порівняння показників оптимальності моменту двигуна

$I_{\max}$	$I_{sn}$	$1,5I_{sn}$	$2I_{sn}$
$\underline{k}_\mu$	1,2	1,16	1,13
$k_{\mu,\max}$	1,3	1,34	1,37
$ \omega _{\max}$ , в.о.	1,8	1,55	1,5

Дані табл. 2 свідчать, що зі зміною  $I_{\max}$  від  $I_{sn}$  до  $2I_{sn}$ , максимум показника оптимальності моменту  $k_{\mu,\max}$  зростає з 1,3 до 1,37. Проте, швидкість досягнення максимуму  $|\omega|_{\max}$  та середнє значення  $\underline{k}_\mu$  цього показника зменшуються. Останнє є наслідком звуження інтервалу швидкості з істотним ефектом оптимізації. Згідно з рис. 4, цей інтервал приблизно становить  $(1, \omega_B)$  в.о.

Дослідження динаміки системи з максимізацією моменту АД здійснено за допомогою математичного моделювання. Модель екстремальної САК АД побудована за принципами прямого векторного керування з орієнтуванням рухомих координат за полем ротора двигуна. Для здійснення екстремального керування класичну частину системи розширено блоком формування потокозчеплення, де оптимальні залежності реалізовані таблично з інтерполяцією даних. В моделі використано параметри двигуна (див. табл. 1), за обмежень  $U_{\max} = U_{sn}$ ,  $I_{\max} = 1,5I_{sn}$ .

Графічні результати моделювання показані на рис. 5, 6. На рис. 5а, 6а зображені завдання швидкості  $\omega^*$  (крива 1), швидкість ротора  $\omega$  (крива 2) та момент двигуна  $M_e$  (крива 3).

Рис. 5. Перехідні процеси в АЕП при гальмуванні зі стандартним потокозчепленням  $\Psi_r = F_{sn}(\omega)$ Рис. 6. Перехідні процеси в АЕП при гальмуванні з оптимальним потокозчепленням  $\Psi_r = F_{opt}(\omega)$ 

На рис. 5б, 6б показані модулі векторів  $U_s$  (крива 1) та  $I_s$  (крива 2), а на рис. 5в, 6в зображена компонента  $\Psi_{r\alpha}$  вектора потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  у нерухомих координатах  $(\alpha, \beta)$ .

Сценарій дослідження динамічних процесів гальмування полягав у тому, що спочатку АД працював в усталеному режимі з швидкістю  $3\omega_n$  та навантаженням  $M_t = 0,2M_n$ , а, починаючи з часу  $t = 5$  с, завдання швидкості  $\omega^*$  змінювалося лінійно від  $3\omega_n$  до  $\omega_n$ . Порівняння рис. 5а та рис. 6а показує, що час гальмування приводу в першому випадку дорівнює 0,89 с, а в другому — 0,76 с.

Отже, результати моделювання свідчать, що завдяки використанню оптимального потокозчеплення ротора час гальмування АД зменшився на  $(0,89 - 0,76) \cdot 100 \% / 0,89 \approx 15 \%$ .

### Висновки

1. Завдяки максимізації моменту асинхронного двигуна у зоні ослаблення поля за значення  $I_{\max}$  від  $I_{sn}$  до  $2I_{sn}$  момент двигуна в режимі рекуперативного гальмування зростає на (30...37) %.
2. Збільшення  $I_{\max}$  супроводжується зменшенням середнього значення показника оптимальності моменту та інтервалу швидкості з істотним ефектом оптимізації.
3. Динамічний процес в екстремальній САК асинхронного двигуна характеризується зменшенням часу гальмування у зоні високих швидкостей на 15 %.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wieser R. S. Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region, Proc. IEEE Ind. Applicat / R. S. Wieser // Soc. Annu. Meeting IAS. — 1997. — Vol. 1. — Pp. 401—409.
2. Harnefors L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection / L. Harnefors, K. Pietilainen, L. Gertmar // IEEE Trans. Ind. Electron. — Feb. 2001. — Vol. 48, No. 1. — Pp. 161—168.
3. Приймак Б. І. Властивості асинхронного електропривода з максимізацією моменту у зоні високих швидкостей ротора / Б. І. Приймак // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». — Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силова електроніка та енергоефективність». — 2015. — С. 142—146.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.12.2015

**Приймак Богдан Іванович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода, e-mail: bp-08@ukr.net.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

**В. І. Pryymak**<sup>1</sup>

## Braking Mode Improvement in Induction Motor Drive Due to the Torque Maximization with Field Weakening

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

*The work is dedicated to improving the performance of vector-controlled high-speed induction motor drives. There have been studied the boundary characteristics of the induction motor with maximization of torque at field weakening in generator mode. Simulation of extreme induction motor control system has confirmed a significant reduction of the motor braking time at high speeds.*

**Keywords:** induction motor, vector control, field weakening, torque maximization.

**Pryymak Bogdan I.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive, e-mail: bp-08@ukr.net

**Б. И. Приймак**<sup>1</sup>

## Улучшение показателей режима торможения асинхронного электропривода путем максимизации момента при ослаблении поля

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

*Рассмотрены пути улучшения показателей векторно-управляемых высокоскоростных асинхронных электроприводов. Исследуются граничные характеристики асинхронного двигателя с максимизацией момента при ослаблении поля в генераторном режиме. Моделирование экстремальной системы управления асинхронным двигателем подтвердило существенное уменьшение времени торможения двигателя на высоких скоростях.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, ослабление поля, максимизация момента.

**Приймак Богдан Іванович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода, e-mail: bp-08@ukr.net