

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СИСТЕМИ БЕЗДАВАЧЕВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

Пушніцина І.І., магістрант, Пушніцин Д.С., аспірант, Ковбаса С.М., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Більшість сучасних алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами (АД) оснований на лінійному представленні кривої намагнічування двигуна, при якому індуктивність намагнічуючого контуру  $L_m$  приймається незмінною. Однак, як добре відомо, крива намагнічування є нелінійною через ефект насичення магнітного кола. А отже, значення  $L_m$  варіюється в залежності від насиченості магнітопроводу двигуна, тобто  $L_m = f(i_m)$ , де  $i_m$  – струм намагнічування [1]. Нехтування цим фактом призводить до виникнення похибок регулювання поточозчеплення та моменту, особливо, в алгоритмах бездавачевого векторного керування швидкістю АД, що є чутливими до параметричної невизначеності [1], [2].

**Мета роботи.** Метою даної роботи є дослідження впливу кривої намагнічування на якість роботи бездавачевого алгоритму векторного керування швидкістю АД в режимі ослаблення поля.

**Матеріали і результати досліджень.** Розглянемо модель асинхронного двигуна, задану рівняннями динаміки кутової швидкості, струмів статора та поточозчеплень ротора в синхронній системі координат (d-q) з врахуванням кривої намагнічування [3], [4]

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \mu_m (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) - \frac{M_c}{J}, \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma_m i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha_m \beta_m \psi_{2d} + \beta_m p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma_m} u_{1d}, \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma_m i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha_m \beta_m \psi_{2q} - \beta_m p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma_m} u_{1q}, \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha_m \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha_m L_m(i_m) i_{1d}, \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha_m \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha_m L_m(i_m) i_{1q}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $R_1, R_2$  – активні опори статора і ротора,  $L_1(i_m) = L_{1\sigma} + L_m(i_m)$  та  $L_2(i_m) = L_{2\sigma} + L_m(i_m)$  – індуктивності статора і ротора,  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$  – індуктивності розсіювання статора і ротора  $(u_{1d}, u_{1q})^T, (i_{1d}, i_{1q})^T$  – компоненти векторів напруги і струму,  $(\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$  – компоненти вектора поточозчеплення ротора,  $\omega$  – кутова швидкість ротора,  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання синхронної системи

координат  $(d-q)$  відносно стаціонарної  $(a-b)$ ,  $M_c$  - момент навантаження,  $p_n$  - число пар полюсів, а також

$$\alpha_m = \frac{R_2}{L_2(i_m)}, \quad \sigma_m = L_1(i_m) + \frac{L_m^2(i_m)}{L_2(i_m)},$$

$$\beta_m = \frac{L_m(i_m)}{L_2(i_m)\sigma_m}, \quad \mu_m = \frac{3 L_m(i_m) p_n}{2 L_2(i_m) J}, \quad (2)$$

$$\gamma_m = R_1 \sigma_m^{-1} + \alpha_m \beta_m L_m(i_m),$$

На рис. 1 представлені приклади залежностей потокозчеплення ротора АД  $\psi_2$  та індуктивності намагнічування  $L_m$  від значення струму намагнічування  $i_m$ .

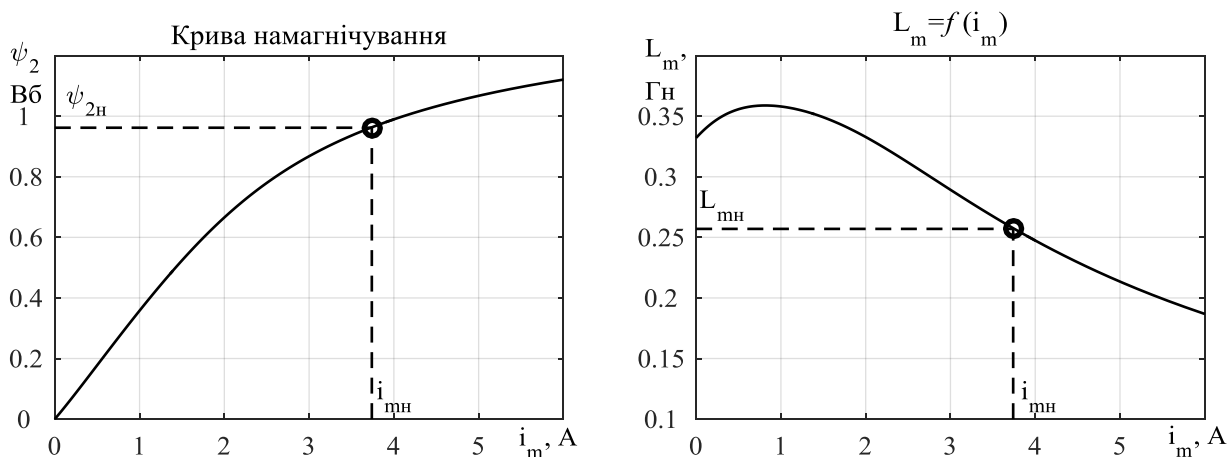


Рисунок 1 – Крива намагнічування та залежність  $L_m$  від струму збудження

На рис. 1 можна відмітити, що значення  $L_m$  відповідає номінальному значенню  $L_{mн}$  лише при номінальному струмі збудження  $i_{mн}$ . Відповідно, при ослабленні поля на систему керування додатково починає діяти параметричне збурення, викликане відхиленням  $L_m$  від номінального значення. Внаслідок цього в системі векторного керування, виникатимуть похибки регулювання координат.

Рівняння алгоритму робастного до варіацій активного опору ротора бездавачевого керування асинхронним двигуном на основі адаптивного спостерігача кутової швидкості без врахування кривої намагнічування наведено в роботі [5].

Для врахування кривої намагнічування використаємо в алгоритмі керування замість параметрів регуляторів  $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$  їх оцінені значення  $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \sigma_m$ , обчислені за допомогою виразів (2).

Для дослідження поведінки алгоритму бездавачевого керування в пакеті програм MatLAB Simulink розроблено моделюючу програму, що враховує криву намагнічування (1).

Порядок проведення тесту наступний: на початковому інтервалі часу машина збуджується до номінального потокозчеплення ротора  $\psi^* = 0.96$  Вб (до

$\psi^* = 0.7$  Вб в тесті при зменшеному потокозчепленні) за 0.45 с. Після збудження двигун розганяється до швидкості  $\omega^* = 50$  рад/с за 1 секунду. Далі до його валу прикладається ( $t = 2$  с), а через 0.5 с знімається, момент навантаження  $M_c = 15$  Нм (рис. 2).

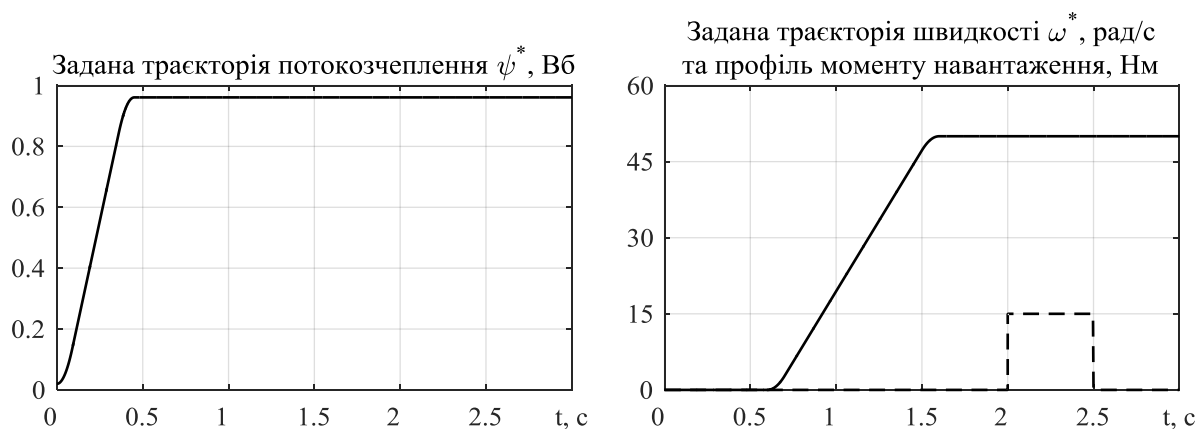


Рисунок 2 – Траєкторії завдань потокозчеплення, швидкості та профіль моменту навантаження

При дослідженні використано наступні параметри двигуна:  $R_1 = 3.8$  Ом,  $R_2 = 2.1$  Ом,  $L_1 = L_2 = 0.2655$  Гн,  $L_m = 0.257$  Гн,  $p_n = 2$ ,  $P_n = 2.2$  кВт,  $M_n = 15$  Нм,  $J = 0.016$  кг·м<sup>2</sup>. Коефіцієнти регуляторів:  $k_i = 500$ ,  $k_{ii} = k_i^2/4 = 62500$ ,  $k_\omega = 100$ ,  $k_{\omega i} = k_\omega^2/2 = 5000$ ,  $k_\psi = 100$ ,  $k_{\psi i} = k_\psi^2/2 = 5000$ . Коефіцієнти спостерігачів  $k_{ido} = 500$ ,  $k_{iqo} = 300$ ,  $k_{oi} = 80000$ .

На рис. 3 і 4 наведено графіки перехідних процесів алгоритму бездавачевого векторного керування швидкістю АД при номінальному і зниженому потокозчепленні ротора відповідно. З графіків можна зробити висновок про суттєвий вплив варіації індуктивності контуру намагнічування  $L_m$  на умови орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. При зниженому потокозчепленні ротора (рис. 4а) в алгоритмі, який не враховує кривої намагнічування, вже не виконуються умови орієнтації по вектору потокозчеплення ротора ( $\lim_{t \rightarrow \infty} (\psi_{2q}) \neq 0$ ). Кутова швидкість двигуна оцінюється з похибкою і, внаслідок цього, з'являється похибка регулювання швидкості:  $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\omega}) \neq 0$ ,  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ . Врахування кривої намагнічування в алгоритмі керування дозволяє усунути вказані недоліки (рис. 4б). В той же час, при номінальному потокозчепленні  $\alpha_m = \alpha$ ,  $\beta_m = \beta$ ,  $\gamma_m = \gamma$ ,  $\sigma_m = \sigma$ ,  $\mu_m = \mu$ , тому поведінка обох систем є ідентичною (див. рис. 3).

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження встановлено, що для алгоритму бездавачевого векторного керування, який не враховує криву намагнічування, при регулюванні потокозчеплення стає суттєвим негативний вплив нелінійності контуру намагнічування. Нехтування цим явищем при ослабленні поля, особливо в алгоритмах бездавачевого векторного керування АД, призводить до невиконання умов полеорієнтування за вектором потокозчеплення

ротора та погіршення показників якості керування координатами електромеханічної системи.

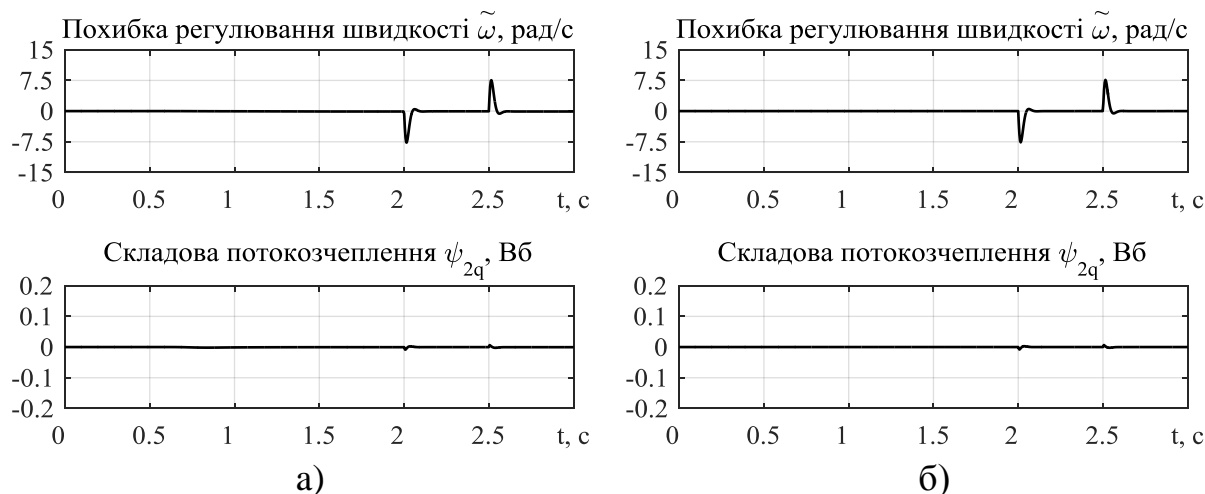


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів двигуна з бездавачевим керуванням при номінальному потокозчепленні без врахування кривої намагнічування (а) та при її врахуванні (б)

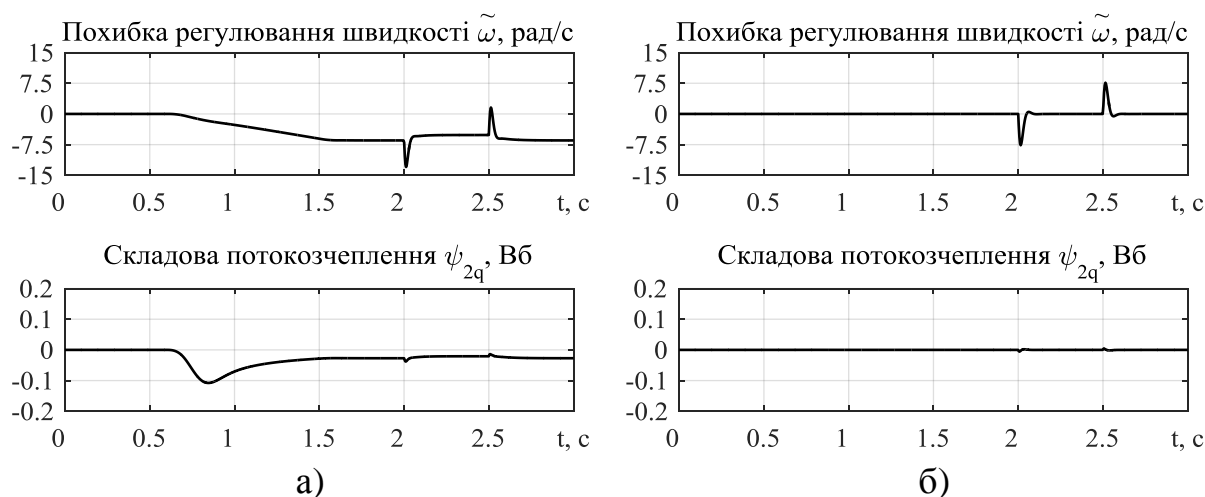


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів двигуна з бездавачевим керуванням при зниженому потокозчепленні без врахування кривої намагнічування (а) та при її врахуванні (б)

#### Перелік посилань

1. Bose B. Modern Power Electronics and AC Drives / Bimal K. Bose. – Knoxville, 2001. – 738 с.
2. Leonhard W. Control of Electrical Drives / Werner Leonhard., 2001. – 484 с.
3. Levi E. A Unified Approach to Main Flux Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Induction Machines / E. Levi. // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1995. – vol. 10, №3. – С. 455–461.
4. Levi E. Impact of Cross-Saturation on Accuracy of Saturated Induction Machine Models/ E. Levi // IEEE Trans. on Energy Conversion – 1997 – vol. 12, №. 3, – с 211-216.
5. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. Общетеоретическое решение задачи векторного управления асинхронными двигателями без измерения механических координат //Технічна електродинаміка. – 2016. – №1. – с. 26 – 33.