

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

Ковбаса С. М., Пушніцина І. І.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

Представлено результати дослідження впливу кривої намагнічування на показники якості системи бездавачевого векторного керування асинхронними двигунами. Методом математичного моделювання показано, що при зміні потокозчеплення двигуна в системі бездавачевого керування виникає значна похибка регулювання кутової швидкості, для компенсації якої необхідно враховувати нелінійність кривої намагнічування в алгоритмі керування.

Постановка проблеми. Системи векторного керування асинхронними двигунами (АД) без вимірювання механічних координат (так звані бездавачеві системи) знаходять широке застосування в механізмах, які вимагають підвищеного моменту при роботі на низьких швидкостях, та середнього рівня точності стабілізації кутової швидкості ротора [1]. За рахунок відсутності давача швидкості, такі системи мають підвищені показники надійності та меншу вартість. Разом з тим, відомим недоліком бездавачевих систем керування є їх чутливість до зміни параметрів математичної моделі асинхронного двигуна та неідеальностей інвертора. Активні опори статора і ротора можуть змінюватися внаслідок нагріву двигуна при його роботі. Індуктивність намагнічуючого контуру, яку прийнято вважати постійною при постійному потокозчепленні, в загальному випадку буде змінюватися у випадку, коли необхідно регулювати магнітний потік, наприклад при роботі двигуна в другій зоні регулювання кутової швидкості, або з метою оптимізації співвідношення момент-струм чи зменшення втрат активної потужності.

Аналіз останніх досліджень. Більшість сучасних алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами базуються на лінійному представленні кривої намагнічування двигуна і не враховують зміну індуктивності намагнічуючого контуру, що призводить до погіршення показників якості керування [1], [2].

Мета статті. Метою даної роботи є дослідження впливу нелінійності кривої намагнічування на якість роботи системи бездавачевого векторного керування [3] в статичних режимах, коли задане потокозчеплення відрізняється від номінального значення.

Основні матеріали дослідження. Розглянемо модель АД, задану рівняннями динаміки кутової швидкості, струмів статора та потокозчеплень ротора в синхронній системі координат (d-q) з врахуванням кривої намагнічування [4], [5]

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \mu_m (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) - \frac{M_c}{J}, \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma_m i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha_m \beta_m \psi_{2d} + \beta_m p_n \omega \psi_{2q} + u_{1d} / \sigma_m, \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma_m i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha_m \beta_m \psi_{2q} - \beta_m p_n \omega \psi_{2d} + u_{1q} / \sigma_m, \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha_m \psi_{2d} + \omega_2 \psi_{2q} + \alpha_m L_m(i_m) i_{1d}, \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha_m \psi_{2q} - \omega_2 \psi_{2d} + \alpha_m L_m(i_m) i_{1q}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{i} = (i_{1d}, i_{1q})^T$, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$, $\mathbf{u} = (u_{1d}, u_{1q})^T$ – вектори струму статора, потокозчеплення ротора та напруги статора; ω – кутова швидкість ротора; ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної системи координат (a-b), $\varepsilon_0(0) = 0$; $\omega_2 = \omega_0 - p_n \omega$ – кутова швидкість ковзання; M – електромагнітний момент двигуна; M_c – момент навантаження; J – повний момент інерції, p_n – число пар полюсів. Додатні коефіцієнти (1) визначені наступним чином:

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{R_2}{L_2(i_m)}, \quad \sigma_m = L_1(i_m) + \frac{L_m^2(i_m)}{L_2(i_m)}, \quad \beta_m = \frac{L_m(i_m)}{L_2(i_m) \sigma_m}, \\ \mu_m &= \frac{3}{2} \frac{L_m(i_m)}{L_2(i_m)} \frac{p_n}{J}, \quad \gamma_m = R_1 \sigma_m^{-1} + \alpha_m \beta_m L_m(i_m), \end{aligned} \quad (2)$$

де R_1, R_2 – активні опори статора і ротора відповідно, $L_1(i_m) = L_{1\sigma} + L_m(i_m)$, $L_2(i_m) = L_{2\sigma} + L_m(i_m)$ – індуктивності статора і ротора відповідно, $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора відповідно, $L_m = f(i_m)$ – індуктивність намагнічуючого контуру, де i_m – струм намагнічування. На рис. 1 представлено залежності потокозчеплення АД ψ та індуктивності намагнічування L_m від величини струму намагнічування i_m для двигуна, параметри якого наведено в табл. 1.

Відповідно до рис. 1, значення L_m відповідає номінальному значенню $L_{mн}$ лише при номінальному струмі збудження $i_{mн}$. Відповідно, при зміні струму збудження для регулювання потокозчеплення, на систему керування починає діяти параметричне збурення, викликане відхиленням величини L_m від номінального значення.

Дослідження виконано методом математичного моделювання з використанням алгоритму бездавачевого керування АД на основі адаптивного спостерігача кутової швидкості без врахування кривої намагнічування, представленого в роботі [3], та математичної моделі АД (1), яка враховує криву намагнічування. За умови роботи системи з постійним номінальним потокозчепленням, алгоритм керування

[3] забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення, а також асимптотичне оцінювання кутової швидкості. Як показано експериментально в [3], запропоноване рішення на практиці забезпечує діапазон регулювання швидкості на рівні 1:100, а показники якості регулювання кутової швидкості знаходяться на рівні, який існує в системах з датчиком швидкості.

Таблиця 1 – Параметри двигуна

Опір статора, R_1	3.8 Ом
Опір ротора, R_2	2.1 Ом
Індуктивність кола статора, L_1	0.265 Гн
Індуктивність кола ротора, L_2	0.265 Гн
Індуктивність контуру намагніч., L_m	0.257 Гн
Момент інерції, J	0.016 кг·м ²
Число пар полюсів, p	2
Потужність двигуна, P	2.2 кВт
Номинальний момент, M	15 Нм

Відповідно до процедури вибору коефіцієнтів налаштування регуляторів [3] було встановлено: $k_i = 500$, $k_{ii} = k_i^2 / 4 = 62500$, $k_\omega = 100$, $k_{\omega i} = k_\omega^2 / 2 = 5000$, $k_\psi = 100$, $k_{\psi i} = k_\psi^2 / 2 = 5000$ та коефіцієнти спостережачів: $k_{ido} = 500$, $k_{iqo} = 300$, $k_{oi} = 80000$. Параметри двигуна, який використано в роботі наведено в табл.1.

Тести виконувалися з використанням наступної послідовності операцій керування (рис. 2): на початковому інтервалі часу машина збуджується до заданого значення потокозчеплення ротора ψ^* , яке задавалося в діапазоні від 0,2 Вб до 0,96 Вб; після завершення процесу збудження двигун на холостому ходу розганяється до заданої швидкості (0 рад/с, 50 рад/с, 100 рад/с, 150 рад/с); при роботі з постійною швидкістю до валу двигуна прикладається постійний номінальний момент навантаження. Дослідження виконано як для рушійного так і генераторного режимів роботи АД.

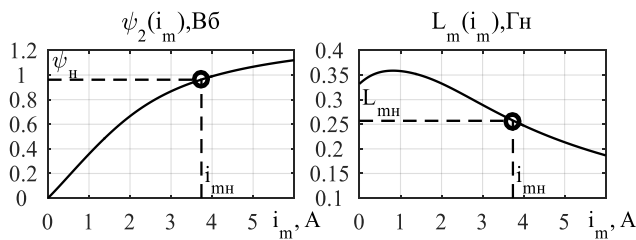


Рисунок 1 – Крива намагнічування та залежність L_m від струму збудження

При роботі на холостому ходу та під навантаженням фіксувалися значення похибки відпрацювання кутової швидкості $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$, де ω^* задане значення кутової швидкості. Результуючі залежності похибки відпрацювання кутової швидкості

від заданого потокозчеплення при різних швидкостях показані на рис. 3 – рис. 5.

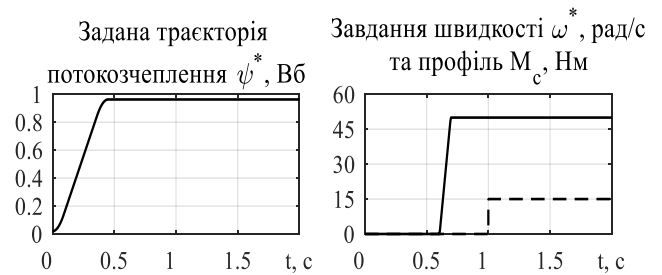


Рисунок 2 – Траєкторії завдань потокозчеплення, швидкості та профіль моменту навантаження

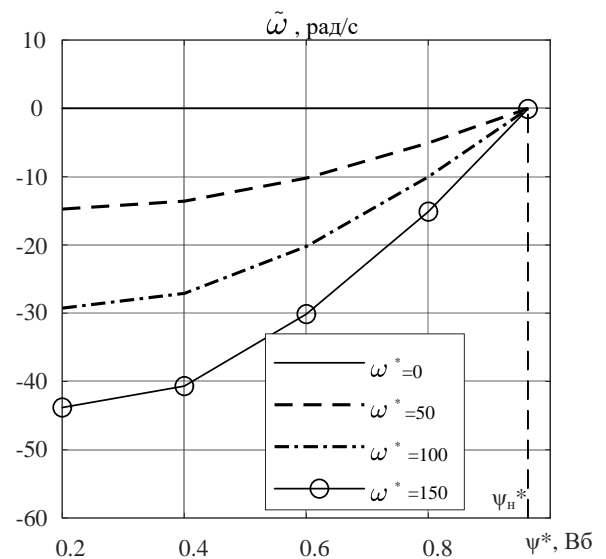


Рисунок 3 – Похибки відпрацювання швидкості на холостому ходу

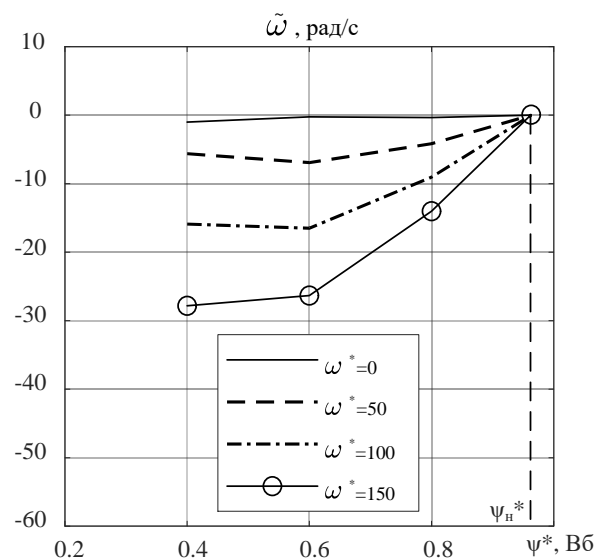


Рисунок 4 – Похибки відпрацювання швидкості при дії номінального рушійного моменту навантаження

З рис. 3 – рис. 5 встановлюємо, що неврахована нелінійність кривої намагнічування АД призводить до виникнення значних похибок відпрацювання кутової швидкості ротора, в тому числі на холостому ходу двигуна. Це пояснюється тим, що нелінійність кривої намагнічування призводить до виникнення похибки регулювання потокозчеплення, що, згідно теоретичного аналізу [3] порушує асимптотичність роботи спостерігача кутової швидкості.

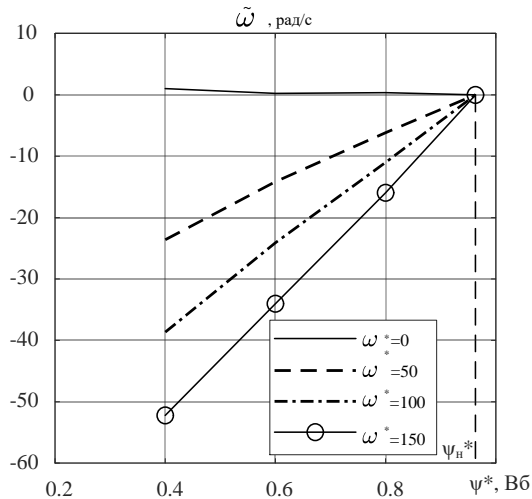


Рисунок 5 – Похибки відпрацювання швидкості при дії номінального генераторного моменту навантаження

Похибки відпрацювання кутової швидкості при дії рушійного моменту навантаження є меншими від похибок на холостому ходу, в той час як генераторний момент навантаження призводить до збільшення похибки регулювання кутової швидкості. Такий характер зміни похибки кутової швидкості пояснюється змінами потокозчеплення ротора при дії навантаження, коли при рушійному моменті навантаження реальний потік ротора зменшується, тим самим зменшуючи похибку регулювання потокозчеплення, зумовлену нелінійністю кривої намагнічування. При генераторному моменті навантаження відбувається збільшення потоку ротора, тобто похибка регулювання потокозчеплення по відношенню до режиму холостого ходу зростає, призводячи при цьому до зростання похибки регулювання кутової швидкості АД. Також необхідно відмітити, що при $\psi^* < 0.4$ Вб, при накиданні навантаження система втрачає стійкість.

Представлені на рис. 3 – рис. 5 графіки свідчать про те, що для ефективного використання алгоритму бездавачевого керування [3] в режимі ослаблення поля, врахування кривої намагнічування асинхронного двигуна є обов'язковим.

Висновки. В результаті проведеного дослідження встановлено, що для ефективної роботи систем бездавачевого керування в режимі ослаблення потокозчеплення ротора необхідно враховувати криву намагнічування асинхронного двигуна. Методом математичного моделювання показано, що нехтування нелінійністю кривої намагнічування в реальних системах буде призводити до виникнення похибок регулювання потокозчеплення та кутової швидкості.

Список використаних джерел

1. P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford, U.K.:Oxford Univ. Press, 1998.
2. A. Accetta, F. Alonge, M. Cirrincione, M. Pucci and A. Sferlazza, "Feedback linearizing control of induction motor considering magnetic saturation effects," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 4463-4470.
3. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. Общетеоретическое решение задачи векторного управления асинхронными двигателями без измерения механических координат // Технічна електродинаміка. – 2016. – №1. – с. 26 – 33.
4. Levi E. A Unified Approach to Main Flux Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Induction Machines // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1995. – vol. 10, № 3. – С. 455–461.
5. Levi E. Impact of Cross-Saturation on Accuracy of Saturated Induction Machine Models // IEEE Trans. on Energy Conversion – 1997. – vol. 12, № 3, – С. 211-216.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Ковбаса С. М., Пушницына И. И.

Представлены результаты исследования влияния кривой намагничивания на показатели качества системы бездатчикового векторного управления асинхронными двигателями. Методом математического моделирования показано, что при изменении потокозчепления двигателя в системе бездатчикового управления возникает существенная ошибка регулирования угловой скорости, для компенсации которой необходимо учитывать нелинейность кривой намагничивания в алгоритме управления.

Abstract

INVESTIGATION OF INDUCTION MOTOR MAGNETIZING CURVE INFLUENCE ON SENSORLESS CONTROL SYSTEM PERFORMANCES

S. Kovbasa, I. Pushnitsyna

This paper investigates the negative influence of induction motor magnetizing curve on sensorless control system performance in flux weakening mode. It is shown by simulations that changing of magnetic flux in sensorless control scheme leads to quality deterioration and significant speed regulation errors. In order to compensate this effect magnetizing curve should be considered in control algorithm.