

УДК 621.34

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ПРЯМОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З МАКСИМІЗАЦІЄЮ СПІВВІДНОШЕННЯ МОМЕНТ-СТРУМ

С.М.Пересада, докт.техн.наук, С.М.Ковбаса, канд.техн.наук, С.С.Димко, В.О.Благодір  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. Е-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*Представлено результати порівняльного аналізу енергетичної ефективності алгоритмів векторного керування моментом асинхронного двигуна з максимізацією співвідношення момент-струм. Аналіз виконано шляхом експериментального порівняння енергетичних характеристик систем векторного керування, які базуються на основі: традиційного векторного керування при постійному потокозчепленні; керування з максимізацією співвідношення момент-струм за класичним критерієм, коли моментна та польова компоненти струму статора формуються рівними одна одній; розробленого авторами керування з максимізацією момент-струм і врахуванням кривої намагнічування. Експериментально показано, що запропонований авторами алгоритм забезпечує підвищені показники енергетичної ефективності у порівнянні як з традиційним векторним керуванням при постійному потокозчепленні, так і з алгоритмами, що базуються на класичному критерії максимізації співвідношення момент-струм. Бібл. 9, рис. 4.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, полеорієнтоване керування, максимізація співвідношення момент-струм, крива намагнічування.

**Вступ.** Традиційні алгоритми векторного керування асинхронними двигунами (АД) з метою забезпечення високих динамічних показників якості регулювання моменту (кутової швидкості) передбачають роботу з постійним рівнем потокозчеплення незалежно від рівня моменту, що розвиває двигун [3]. За таких умов, робота двигуна з навантаженнями нижчими від номінального, призводить до зниження коефіцієнту корисної дії (ККД) системи векторного керування, оскільки для підтримання постійного потокозчеплення в статорі протікає номінальний струм збудження.

Разом з тим, існує значна кількість технологічних об'єктів, які не вимагають високої швидкості дії при відпрацюванні моменту (кутової швидкості), проте мають ряд апаратних обмежень, які стосуються первинного джерела енергії, максимального рівня вихідного струму напівпровідникового перетворювача тощо. Типовими прикладами таких об'єктів є транспортні засоби, особливо з живленням від гібридних енергетичних установок або акумуляторів. Необхідно також відзначити, що режими роботи з низькими навантаженнями є домінуючими в електромеханічних системах транспортних засобів, оскільки під час руху з постійною швидкістю на рівній ділянці момент опору складає близько 20 – 30 % від номінального.

Загальновідомим способом підвищення енергетичної ефективності електромеханічних систем з АД є регулювання рівня потокозчеплення в функції моменту двигуна з використанням різних методів оптимізації [5, 7, 9]: мінімізації активних втрат, максимізації коефіцієнта потужності, співвідношення момент-струм (Maximum Torque per Ampere – МТА) та інших. Керування з оптимізацією МТА забезпечує мінімальний струм статора для заданого значення генерованого моменту, а також підвищення енергетичної ефективності, оскільки даний критерій є наближеним до критерія мінімізації втрат [2]. Одним з відомих недоліків алгоритмів векторного керування з МТА, є те, що класичний критерій максимізації момент-струм [9] є дійсним лише при роботі двигуна на лінійній ділянці кривої намагнічування, в той час як при насиченні магнітного кола він стає несправедливим. Це призводить до того, що максимізація співвідношення момент-струм досягається лише в обмеженому діапазоні моментів двигуна, який складає близько 20 – 40 % від номінального значення, в залежності від параметрів двигуна.

Метою даної роботи є порівняльний аналіз показників енергетичної ефективності систем векторного керування, побудованих на основі алгоритмів традиційного векторного керування [8], а також на основі МТА алгоритмів з врахуванням кривої намагнічування [1] та при її лінеаризації [4].

**Матеріали дослідження.** Для синтезу алгоритму векторного керування з МТА, розглянуто модель насиченого АД [6], яка отримана з припущеннями про те, що насичується тільки головне маг-

нітне коло двигуна, а співвідношення між будь-якою парою  $L_1, L_2, L_m(i_d)$  є постійним, де  $L_m(i_d) \square \psi(i_d)/i_d$  – статична індуктивність намагнічування,  $\psi(i_d)$  – визначення для кривої намагнічування,  $i_d$  – польова компонента струму статора,  $L_1 = L_m(i_d) + L_{1\sigma}, L_2 = L_m(i_d) + L_{2\sigma}$  – індуктивності статора і ротора відповідно,  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$  – індуктивності розсіювання.

З використанням припущень про те, що струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання, а задана траєкторія моменту  $M^*$  та крива намагнічування  $\psi(i_d) > 0$  є гладкими обмеженими функціями з обмеженими першими похідними, в роботі [1] авторами синтезовано нелінійний алгоритм векторного керування моментом, який забезпечує:

– глобальне асимптотичне відпрацювання моменту  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0$  з обмеженням внутрішніх сиг-

налів, де  $\tilde{M} = M - M^*$  – похибка відпрацювання заданого моменту,  $M$  – момент двигуна;

– максимізацію співвідношення момент-струм статора  $\rho_M = M/I$  у статичних режимах, де  $I$  – модуль вектора струму статора.

Критерій МТА при врахуванні кривої намагнічування [1] сформовано на основі розгляду виразу для співвідношення момент-струм в усталеному режимі при ідеальному полеорієнтуванні

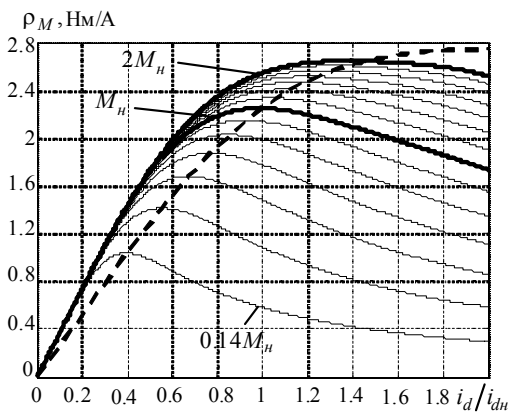


Рис. 1

$$\rho_M = \frac{M \mu_1 L_m(i_d) i_d}{\sqrt{i_d^4 \mu_1^2 L_m^2(i_d) + M^2}}, \quad (1)$$

де  $\mu_1 = 3L_m(i_d)/2L_2$ .

Умова  $\partial \rho_M / \partial i_d = 0$  визначає залежність польової компоненти вектора струму статора від моменту двигуна  $i_d = \eta(|M|)$ , яка забезпечує максимізацію співвідношення (1). Для уникнення виродженості величина польової компоненти вектора струму статора вибирається у вигляді

$$i_d = \eta_0 + \eta_1(|M|) > 0, \quad (2)$$

де  $\eta_1(0) = 0$ ,  $\eta_0$  – мінімальний струм збудження для первинного збудження двигуна.

На рис. 1 показано залежності співвідношення момент-струм  $\rho_M$  від струму збудження (у відносних одиницях) для АД потужністю 5.5 кВт (номінальний момент  $M_H = 35$  Нм), при різних значеннях моменту двигуна (від  $0.14M_H$  до  $2M_H$  з кроком  $0.14M_H$ ), які були розраховані за формулою (1) з використанням попередньо знятої кривої намагнічування. Пунктирна лінія, що з'єднує максимуми, визначає залежність  $\eta_1(|M|)$ .

Повний алгоритм прямого векторного керування з врахуванням кривої намагнічування задається [1]:

– регулятором модуля вектора потокозчеплення

$$i_d^* = \eta_0 + \eta_1(|M^*|) > 0; \quad (3)$$

спостерігачем вектора потокозчеплення

$$\hat{\psi} = -\alpha \hat{\psi} + \alpha L_m(i_d) i_d, \quad (4)$$

$$\hat{\epsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m(i_d) i_q / \hat{\psi} + \gamma_1 \beta_d \omega \tilde{i}_d / \hat{\psi};$$

– регулятором моменту

$$i_q^* = M^* / \mu_1 \hat{\psi}; \quad (5)$$

– регуляторами струмів по осях ( $d$ ) і ( $q$ )

$$u_d = \sigma_d (\gamma_d i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta_d \hat{\psi} + i_d^* - k_{id1} \tilde{i}_d), \quad (6)$$

$$u_q = \sigma_q (\gamma_q i_q^* + \omega_0 i_d + \beta_q \omega \hat{\psi} + i_q^* - k_{iq1} \tilde{i}_q + x_q), \quad (7)$$

$$\dot{x}_q = -k_{iiq} \tilde{i}_q,$$

де  $(u_d, u_q)^T$  – компоненти вектора напруги статора в синхронній системі координат  $(d-q)$ ,  $i_q$  – моментна складова струму статора;  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  – задані значення польової та моментної компонент вектора струму статора;  $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ ,  $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$  – похибки відпрацювання струмів,  $\omega$  – кутова швидкість ротора;  $\varepsilon_0, \omega_0$  – кутове положення та швидкість обертання системи координат  $(d-q)$  відносно стаціонарної системи координат  $(a-b)$ ,  $\hat{\psi}$  – оцінене значення модуля вектора потокозчеплення ротора,  $\alpha = R_2 / L_2$ ,  $R_2$  – активний опір ротора;  $\beta_d, \beta_q, \gamma_d, \gamma_q, \sigma_d, \sigma_q$  – параметри моделі насиченого АД,  $k_{id1} > 0$  – коефіцієнт пропорційного регулятора польової компоненти струму статора,

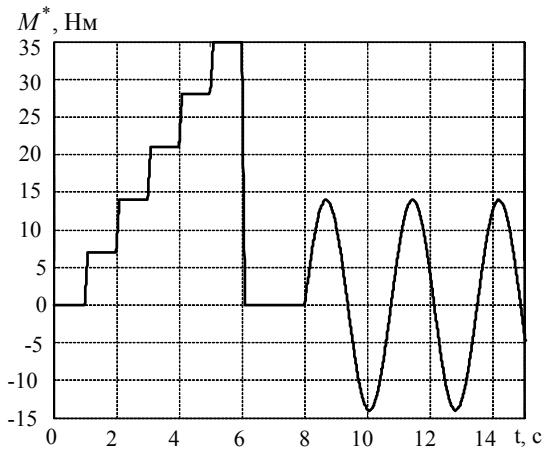


Рис. 2

$(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму по осі  $(q)$ ,  $\gamma_1$  – коригуючий коефіцієнт підсистеми потокозчеплення. Без втрати загальності в моделі двигуна прийнято одну пару полюсів.

Проведено порівняльне експериментальне тестування трьох алгоритмів векторного керування: традиційного з постійним потокозчепленням [8] (A1), векторного керування з МТА критерієм  $i_d = i_q$  без врахування кривої намагнічування [4] (A2), та запропонованого керування з МТА (A3). Програмну реалізацію досліджуваних алгоритмів керування виконано на уніфікованому контролері на основі цифрового сигнального процесора TMS320F28335. При тестуванні використовувався загальнопромисловий двигун потужністю 5.5 кВт з номінальним моментом 35 Нм. За умовами тесту двигун мав відпрацювати траєкторію заданого моменту  $M^*$ , показану на рис. 2. При виконанні тестів кутова швидкість ротора стабілізувалася на постійному рівні 10 рад/с за допомогою навантажувальної машини постійного струму, тому потужність на валу АД при відпрацюванні номінального моменту дорівнювала 350 Вт. Такий режим обрано цілеспрямовано з метою наочної демонстрації ефекту оптимізації втрат активної потужності в обмотках двигуна, які, в загальному випадку, не залежать від кутової швидкості, а при малих її значеннях є співрозмірними із споживаною потужністю. Східчаста частина заданої траєкторії моменту дає змогу проаналізувати, в якому діапазоні досягається максимізація співвідношення момент-струм, в той час як синусоїдальна частина траєкторії дозволяє оцінити якість перехідних процесів при знакозмінному завданні.

Під час проведення експериментів на основі динамічної поведінки струму навантажувальної машини та кутової швидкості ротора опосередковано встановлено, що всі три алгоритми векторного керування забезпечують відпрацювання заданої траєкторії моменту з близькими показниками якості. На рис. 3, 4 показано перехідні процеси польової та моментної складових струмів статора, а також активної потужності та спожитої енергії. Для наочного представлення графік потужності розкрито в різних масштабах на ділянках східчастої (рис. 4, а) та синусоїдальної (рис. 4, б) частин траєкторії заданого моменту навантаження.

При традиційному векторному керуванні A1 (рис. 3, а) компонента  $i_d$  з метою забезпечення постійного потокозчеплення підтримується на постійному рівні незалежно від моменту двигуна, який пропорційний моментній компоненті струму  $i_q$ . У цьому випадку навіть при роботі на холостому ході збудження двигуна потребує струму на рівні 30 – 40 % від номінального значення.

Алгоритм з класичним критерієм МТА A2 (рис. 3, б) забезпечує максимізацію співвідношення момент-струм в обмеженому діапазоні завдань, зокрема в розглянутому тесті до значень заданого моменту 14 Нм (40 % від номінального), що підтверджується перехідними процесами на рис. 4, а. При подальшому збільшенні заданого моменту польова компонента струму статора  $i_d$  залишається сталою і тому для цього режиму алгоритм A2 демонструє поведінку, яка не відрізняється від традиційного векторного керування A1.

При МТА керуванні з врахуванням кривої намагнічування АЗ кожному значенню моменту відповідає своє значення струму  $i_d$ , тому в загальному випадку максимізація співвідношення момент-струм відбувається без виконання умови  $i_d = i_q$  та у всьому діапазоні заданих моментів, що демонструється графіками на рис. 3, в.

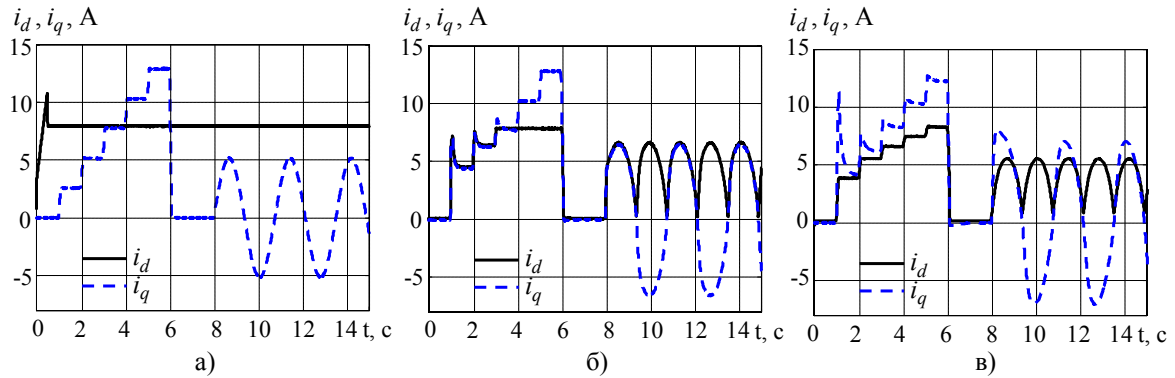


Рис. 3

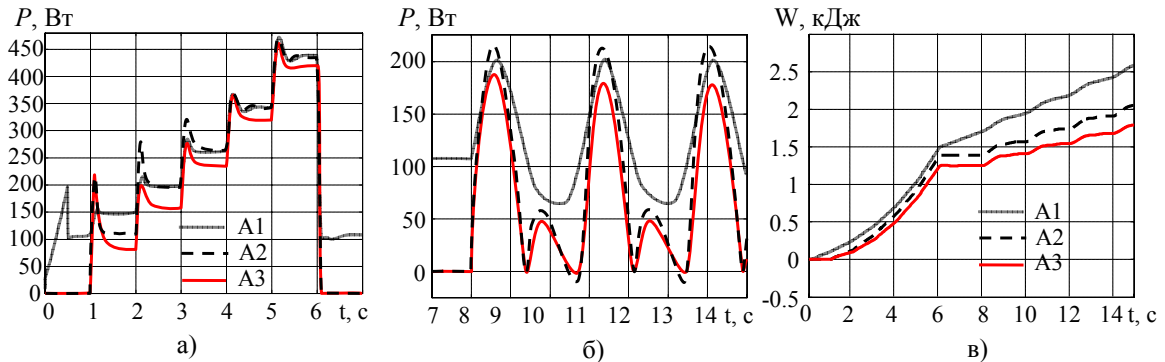


Рис. 4

Рис. 4 свідчить, що, при використанні розробленого алгоритму АЗ активна потужність  $P$ , яка необхідна системі для відпрацювання заданої траєкторії моменту, у переважній більшості режимів є меншою, ніж при використанні алгоритмів А1 та А2. Як результат, за час виконання тесту система векторного керування на основі запропонованого алгоритму спожила 1782 Дж енергії ( $W$ ), а при МТА без врахування кривої намагнічування – 2040 Дж, що менше, ніж при традиційному керуванні з постійним потокозчепленням на 31.5 % і 21.5 % відповідно. При відпрацюванні номінального моменту на швидкості 10 рад/с, коефіцієнт корисної дії (ККД) системи векторного керування, побудованої на основі А1, А2, склав 81.4 %, а на основі А3 – 86.4 %.

**Висновки.** Представлено результати розробки та порівняльного експериментального тестування алгоритму векторного керування моментом АД, який забезпечує глобальне асимптотичне відпрацювання його заданих траєкторій при максимізації співвідношення момент-струм. Експериментально показано, що на відміну від існуючих рішень за рахунок врахування кривої намагнічування максимізація досягається у всьому діапазоні регулювання моменту, а втрати активної потужності у двигуні при відпрацюванні номінального моменту можуть бути зменшені на величину до 30% від їхніх значень при традиційному керуванні з постійним потокозчепленням.

Запропоноване рішення є перспективним для електромеханічних систем, що не вимагають високих динамічних показників якості керування, а також мають апаратні обмеження по первинному джерелу живлення.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПРЯМОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МАКСИМИЗАЦИЕЙ СООТНОШЕНИЯ МОМЕНТ-ТОК**

**С.М.Пересада, докт.техн.наук, С.Н.Ковбаса, канд.техн.наук, С.С.Дымко, В.О.Благодир**  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*В статье представлены результаты сравнительного анализа энергетической эффективности алгоритмов векторного управления моментом асинхронного двигателя с максимизацией соотношения момент-ток. Анализ выполнен путем экспериментального сравнения энергетических характеристик систем векторного управления, которые базируются на основе: традиционного векторного управления при постоянном потокоцеплении; управления с максимизацией соотношения момент-ток по классическому критерию, когда моментная и полевая компоненты вектора тока статора формируются равными друг другу; разработанного авторами управления с максимизацией момент-ток и учетом кривой намагничивания. Экспериментально показано, что предложенный авторами алгоритм обеспечивает повышенные показатели энергетической эффективности по сравнению как с традиционным векторным управлением при постоянном потокоцеплении, так и с алгоритмами, базирующимися на классическом критерии максимизации соотношения момент-ток. Библи. 9, рис. 4.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, полеориентированное управление, максимизация соотношения момент-ток, кривая намагничивания.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS DIRECT FIELD-ORIENTED TORQUE CONTROLLERS WITH TORQUE PER AMPERE MAXIMIZATION**

**S.M.Peresada, S.M.Kovbasa, S.S.Dymko, V.O.Blagodir**  
National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*A comparative analysis of the energy efficiency of induction motor torque vector control algorithms with torque per Ampere ratio maximization is presented. The analysis is based on experimental comparison of three control systems: traditional vector control with constant flux; control with torque per ampere ratio maximization using classical criterion, when torque and flux components of stator current vector should be equal; developed by authors control with torque per ampere maximization taking into account the magnetization curve. Experimentally shown that proposed control algorithm provides better efficiency in comparison with traditional vector control with constant flux, and algorithms, based on the classical criterion of torque per Ampere maximization. References 9, figures 4.*

**Key words:** induction motor, field-oriented control, maximum torque per Ampere ratio, magnetizing curve.

1. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S., Peresada S. MTA Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results // Proceedings on 2015 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS-2015): Paper SS2.1.5. – Aachen, Germany, 2015. – 6 p.
2. Cacciato M., Consoli A., Scarcella G., Scelba G. Indirect Maximum Torque per Ampere Control of Induction Motor Drives // Proceedings on Power Electronics and Applications. –Aalborg, Denmark, 2007. – Pp. 1-10.
3. Chiasson J. Modeling and High Performance Control of Electric Machines – John Wiley & Sons, 2005. – 734 p.
4. Dymko S., Leidhold R., Peresada S. Induction motors torque control with torque per ampere ratio maximization // Proceedings of Magdeburger Maschinenbau-Tage; 11: Paper B5-1. – Magdeburg, Germany, 2013. – Pp. 1–8.
5. Famouri P., Cathey J.J. Loss minimization control of an induction motor drive // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27. – No 1. – Pp. 32-37.
6. Levi E. A unified approach to main flux saturation modelling in D-Q axis models of induction machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1995. – Vol. 10. – No 3. – Pp. 455-461.
7. Moreira J.C., Lipo T.A., Blasko V. Simple efficiency maximizer for an adjustable frequency induction motor drive // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27. – No 5. – Pp. 940-946.
8. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. New passivity based speed-flux tracking controllers for induction motor // Proceedings of IEEE Industrial Electronics Conference IECON-2000, Nagoya. – 2000. – Pp. 1099–1104.
9. Wasynchuk O., Sudhoff S.D., Corsine K., Tichenor J., Krause P., Hansen I., Taylor L. A maximum torque per Ampere control strategy for induction motor drives // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1998. –Vol.13. – No.2. –Pp. 163-169.

Надійшла 18.04.2015

Остаточний варіант 10.06.2015