

С. М. Пересада<sup>1</sup>  
В. М. Трандафілов<sup>1</sup>  
М. М. Желінський<sup>1</sup>

## ІНВАРІАНТНІСТЬ ДО ВАРІАЦІЙ АКТИВНОГО ОПОРУ РОТОРА В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

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

*Представлено результати порівняльного експериментального тестування алгоритму прямого векторного керування асинхронними двигунами, інваріантного до варіацій активного опору ротора, з алгоритмом поліпшеного непрямого векторного керування, який є робастним до цих варіацій. Експериментально показано, що на відміну від існуючих робастних алгоритмів, інваріантний алгоритм забезпечує збереження динамічних показників якості керування та зниження додаткових втрат у машині у разі впливу обмежених варіацій активного опору ротора в усіх робочих режимах електроприводу, включаючи малі швидкості обертання.*

**Ключові слова:** векторне керування, асинхронний електропривод, інваріантність, варіації активного опору ротора, показники якості керування, енергетична ефективність.

### Вступ

Показники якості векторно-керованих асинхронних електроприводів (ЕП) значною мірою визначаються робастністю алгоритмів векторного керування до варіацій активного опору ротора. Цей параметр в асинхронних двигунах (АД) з короткозамкненим ротором недоступний для безпосереднього вимірювання та може змінюватися в 1,5...2 рази під час роботи машини внаслідок нагріву [1]. В загальному випадку варіації активного опору ротора викликають порушення умов полеорієнтування, що призводить до погіршення показників якості регулювання механічних координат ЕП та збільшення втрат активної потужності в машині [2], яке вимагає завищення потужності АД та силового інвертора.

Для компенсації негативного впливу варіацій активного опору ротора в системах прямого векторного керування АД [1] в літературі представлено значну кількість робастних та адаптивних спостерігачів магнітного потоку, загальні переваги та недоліки яких добре відомі [3]. В [4, 5] розроблені та експериментально досліджені інваріантні спостерігачі з ковзним режимом, проте їх асимптотичність оцінювання суттєво залежить від величини залишкового намагнічування АД. До того ж спостерігач [5] додатково вимагає застосування фільтра Калмана. Вперше задача прямого векторного керування АД, інваріантного до обмежених варіацій активного опору ротора, розв'язана в [3]. Таке рішення отримане для випадку струмового керування машиною з використанням інформації про кутову швидкість та струми статора. Алгоритм, запропонований в [3], гарантує локальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення ротора в умовах невідомого статичного моменту навантаження, асимптотичну розв'язку підсистем регулювання модуля потокозчеплення та швидкості, а також асимптотичну лінеаризацію останньої. Важливою особливістю запропонованого алгоритму є збереження властивості інваріантності в усьому робочому діапазоні швидкостей обертання, що підтверджено теоретично та експериментально [3].

В роботі подано алгоритм інваріантного прямого векторного керування АД повного порядку (далі — ІВК), отриманий на основі результату [3], який забезпечує досягнення вищезгаданих цілей керування при живленні машини від джерела напруги, а також результати його експериментального тестування. З метою порівняльного аналізу тестування також проводилося для алгоритму поліпшеного непрямого векторного керування (ПВК) [6], який, на відміну від стандартних рішень, забезпечує поліпшені динамічні властивості та робастність до варіацій активного опору ротора. Для того, щоб очевидними були переваги алгоритму ІВК, дослідження проводилося в діапазоні малих швид-

костей обертання, коли вплив робастифікуючих зв'язків алгоритму ПВК послабляється [7].

### Матеріал та результати дослідження

*Інваріантний алгоритм векторного керування.* Алгоритм ІВК синтезовано для стандартної моделі АД [1] в умовах, коли задані траєкторії зміни кутової швидкості  $\omega^*(t)$  і потоку  $\psi^*(t) > 0$  є обмеженими та мають обмежені перші дві похідні за часом; струми статора  $i_d, i_q$  та кутова швидкість ротора  $\omega$  доступні для вимірювання; момент навантаження  $M_c$  постійний і обмежений, але невідомий; всі параметри машини відомі та сталі, окрім відхилення активного опору ротора  $\Delta R_2$ , яке невідоме, постійне та обмежене. За виконання цих умов алгоритм ІВК гарантує досягнення цілей [3], основними з яких є асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій потоку і швидкості, а також інваріантність до варіацій активного опору ротора. Алгоритм ІВК включає:

— спостерігач магнітного потоку

$$\begin{aligned} \dot{\hat{i}}_d &= -\gamma_n \hat{i}_d + \omega_0 i_q + \alpha_n \beta |\hat{\psi}| + u_d / \sigma + k_{ed1} e_d; & \dot{\hat{i}}_q &= -\gamma_n \hat{i}_q - \omega_0 i_d - \beta \omega |\hat{\psi}| + u_q / \sigma + \delta \text{sign}(e_q); \\ |\dot{\hat{\psi}}| &= -\alpha_n |\hat{\psi}| + \alpha_n L_m \hat{i}_d; & \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \left[ \alpha_n L_m \hat{i}_q - \beta^{-1} \delta \text{sign}(e_q) + v_\varepsilon \right] / |\hat{\psi}|, & |\hat{\psi}| &> 0; \end{aligned} \quad (1)$$

— регулятор потоку

$$i_d^* = \left( \alpha_n \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi \right) / (\alpha_n L_m); \quad \dot{x}_\psi = k_{\psi i} \tilde{\psi}; \quad (2)$$

— регулятор струму по осі  $d$

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma \left( \gamma_n \hat{i}_d^* - \omega_0 i_q - \alpha_n \beta |\hat{\psi}| - k_{id} \tilde{i}_d + i_d^* - x_d \right); & \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d; \\ i_d^* &= \left\{ \alpha_n \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[ -(\alpha_n + k_\psi) \tilde{\psi} - \alpha_n L_m e_d + \alpha_n L_m \tilde{i}_d - x_\psi \right] - \dot{x}_\psi \right\} / (\alpha_n L_m); \end{aligned} \quad (3)$$

— регулятор кутової швидкості

$$i_q^* = \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \dot{M}_c + \dot{\omega}^* \right) / (\mu \psi^*); \quad \dot{M}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}; \quad (4)$$

— регулятор струму по осі  $q$

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[ \gamma_n \hat{i}_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* - k_{iq} \tilde{i}_q + i_{q1}^* - \left( \dot{\psi}^* \tilde{i}_q + x_\eta \right) / \psi^* \right]; & \dot{x}_\eta &= k_{\eta i} \psi^* \tilde{i}_q; \\ i_{q1}^* &= \left[ -k_\omega \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{M}_c + \dot{\omega}^* \right] / (\mu \psi^*) - \dot{\psi}^* \tilde{i}_q / \psi^*, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\hat{i}_d, \hat{i}_q, e_d = i_d - \hat{i}_d; e_q = i_q - \hat{i}_q$  — оцінені значення та похибки оцінювання струмів статора;  $(u_d, u_q)^T$  — вектор керуючої напруги статора;  $\tilde{\psi} = |\hat{\psi}| - \psi^*$ ;  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$  — похибки відпрацювання оціненого потоку  $|\hat{\psi}|$  та кутової швидкості;  $\hat{M}_c$  — інтегральна оцінка постійної невідомої компоненти  $M_c / J$ ;  $\varepsilon_0, \omega_0$  — кутове положення та кутова швидкість системи координат ( $d$ — $q$ ) відносно стаціонарної системи координат ( $a$ — $b$ ),  $\varepsilon_0(0) = 0$ ;  $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*, \tilde{i}_q = i_q - i_q^*$  — похибки відпрацювання заданих струмів  $i_d^*, i_q^*$ ;  $v_\varepsilon = (\omega_0 + \gamma_1 \omega) e_d / \beta$ ,  $\gamma_1 = (R_1 / \sigma + k_{ed1}) / \alpha_n > 0$  — коригувальний зворотний зв'язок спостерігача;  $k_{ed1} > 0$  — коефіцієнт, що визначає динаміку похибки оцінювання струму по осі  $d$ ;  $\delta > 0$  — коефіцієнт, величина якого повинна бути достатньою для забезпечення ковзного режиму;  $k_\psi, k_{\psi i} > 0$ ;  $k_\omega, k_{\omega i} > 0$ ;  $k_{id}, k_{ii} > 0$ ;  $k_{iq}, k_{\eta i} > 0$  — коефіцієнти пропорційної (П) та інтегральної (І) складових регуляторів потоку, кутової швидкості та струмів по осях  $d$  і  $q$ , відповідно;  $L_m$  — індуктивність контуру намагнічування;  $L_2$  — індуктивність ротора,  $J$  — повний момент інерції;  $\gamma_n = R_1 / \sigma + \alpha_n L_m \beta$ ;  $\alpha = (R_{2n} / L_2 + \Delta R_2 / L_2) = \alpha_n + \Delta \alpha > 0$ ;  $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$ ;  $\beta = L_m / \sigma L_2$ ;  $R_1, L_1$  — активний опір та індуктивність статора;  $\mu = 3L_m / 2L_2 J$ ;  $R_2 = R_{2n} + \Delta R_2 > 0$ ,  $R_{2n}$  — номінальне значення активного опору ротора. Без втрати загальності в алгоритмі (1)—(5) прийнята одна пара полюсів.

## Результати експериментального дослідження

Метою експериментального тестування є порівняльне дослідження динамічних та енергетичних показників системи векторного керування магнітним потоком і кутовою швидкістю АД за використання алгоритмів ПВК та ІВК. Дослідження проводилось для заданої кутової швидкості 10 рад/с (3,33 % від номінальної), коли вплив робастифікуючих зв'язків алгоритму ПВК послабляється. Експериментальні дослідження виконувались на станції швидкого прототипного тестування, функціональна схема якої показана на рис. 1. До складу станції входять: керуючий контролер на основі 32-х розрядного цифрового сигнального процесора з плаваючою точкою, в якому реалізуються досліджувані алгоритми; трифазний інвертор 20А/380В з частотою ШІМ 10 кГц; персональний комп'ютер (ПК), призначений для програмування, налагодження та візуалізації перехідних процесів необхідних змінних; досліджуваний АД типу 4АО80В2 потужністю 0,75 кВт (номінальний момент 2,5 Нм; номінальна швидкість 300 рад/с;  $R_1 = 11$  Ом;  $R_2 = 5,51$  Ом;  $L_1 = L_2 = 0,95$  Гн;  $L_m = 0,91$  Гн;  $J = 0,0036$  кг·м<sup>2</sup>). Для навантаження застосовувався двигун постійного струму (ДПС) зі струмовим керуванням. Такт квантування при цифровій реалізації алгоритмів керування складав 200 мкс.

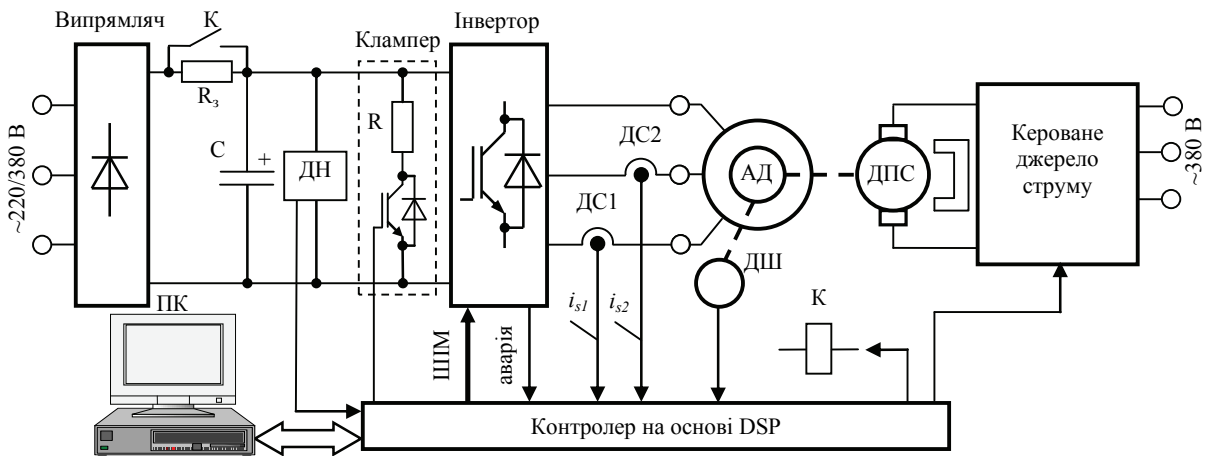


Рис. 1. Функціональна схема експериментальної установки

Послідовність операцій керування показана на рис. 2. Протягом інтервалу часу 0...0,25 с машина збуджувалася за заданою траєкторією магнітного потоку з початкового значення  $\psi^*(0) > 0,025$  Вб (для запобігання виродження в (4) і (5)) та досягала номінального значення 0,9 Вб з обмеженими першими двома похідними за часом. Починаючи з моменту часу  $t = 0,6$  с, навантажений АД розганявся за заданою траєкторією зміни кутової швидкості з нульового початкового значення до 10 рад/с з обмеженими першими двома похідними за часом. В момент часу  $t = 1$  с до валу двигуна стрибкоподібно прикладається та потім при  $t = 2$  с скидається постійний момент навантаження, який дорівнює номінальному значенню. Задана траєкторія кутової швидкості сформована таким чином, що при її відпрацюванні динамічний момент дорівнює половині номінального моменту АД.

Досліджувані алгоритми були налаштовані таким чином: коефіцієнти П та І складових регуляторів потоку —  $k_\psi = 100$ ,  $k_{\psi i} = k_\psi^2 / 4 = 2500$ ; коефіцієнти П та І складових регуляторів швидкості —  $k_\omega = 150$ ,  $k_{\omega i} = k_\omega^2 / 2 = 11250$ ; коефіцієнти П та І складових регуляторів струму —  $k_{id} = k_{iq} = k_i = 750$ ,  $k_{ii} = k_{\eta i} = k_i^2 / 2 = 281250$ ; параметри спостерігача (1) —  $k_{ed1} = 0$ ;  $\delta = 150$ . Початкові умови для всіх змінних встановлено нульовими, за винятком  $|\hat{\psi}(0)| = 0,025$  Вб (для запобі-

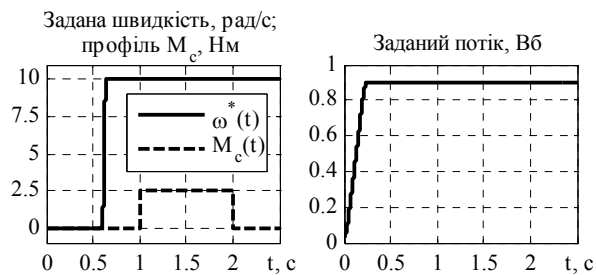


Рис. 2. Задані траєкторії кутової швидкості та потоку, профіль моменту навантаження

гання виродження в (1)). Оскільки досліджуваний АД має короткозамкнений ротор, то варіація активного опору роторного кола вводилася в досліджувані алгоритми: замість  $\alpha_n$  в них використовувався параметр  $\hat{\alpha} = k_\alpha \alpha_n$ . Під час проведення досліджень похибка регулювання потоку розраховувалась опосередкованим шляхом:  $\tilde{\psi} = \psi' - \psi^*$ , де  $\psi'$  — значення модуля вектора потокозчеплення ротора, оцінене за допомогою автономного розімкненого спостерігача зниженого порядку з коректними параметрами.

На рис. 3 показано графіки перехідних процесів в системі векторного керування з досліджуваними алгоритмами без варіацій, тобто коли  $k_\alpha = 1$ . З графіків випливає, що обидва алгоритми забезпечують асимптотичність відпрацювання заданих траєкторій зміни вектора потокозчеплення ротора та кутової швидкості. При накиданні та скиданні моменту навантаження поведінка системи в обох випадках однакова. Максимальне значення похибки регулювання кутової швидкості становить близько 3,3 рад/с. Для компенсації моменту навантаження для обох алгоритмів необхідна однакова величина струму по осі  $q$  на рівні 2 А.

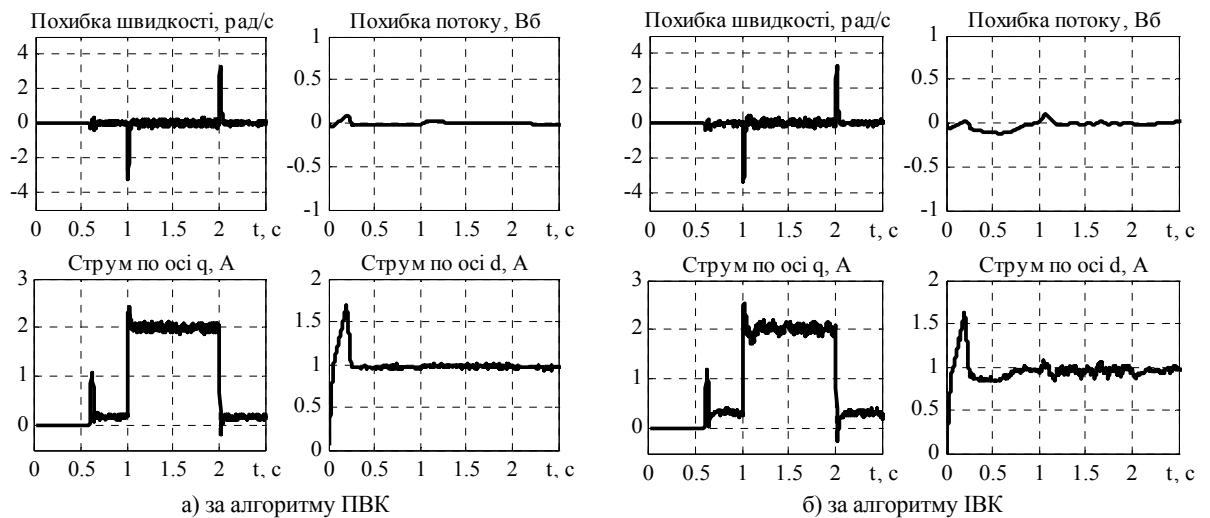
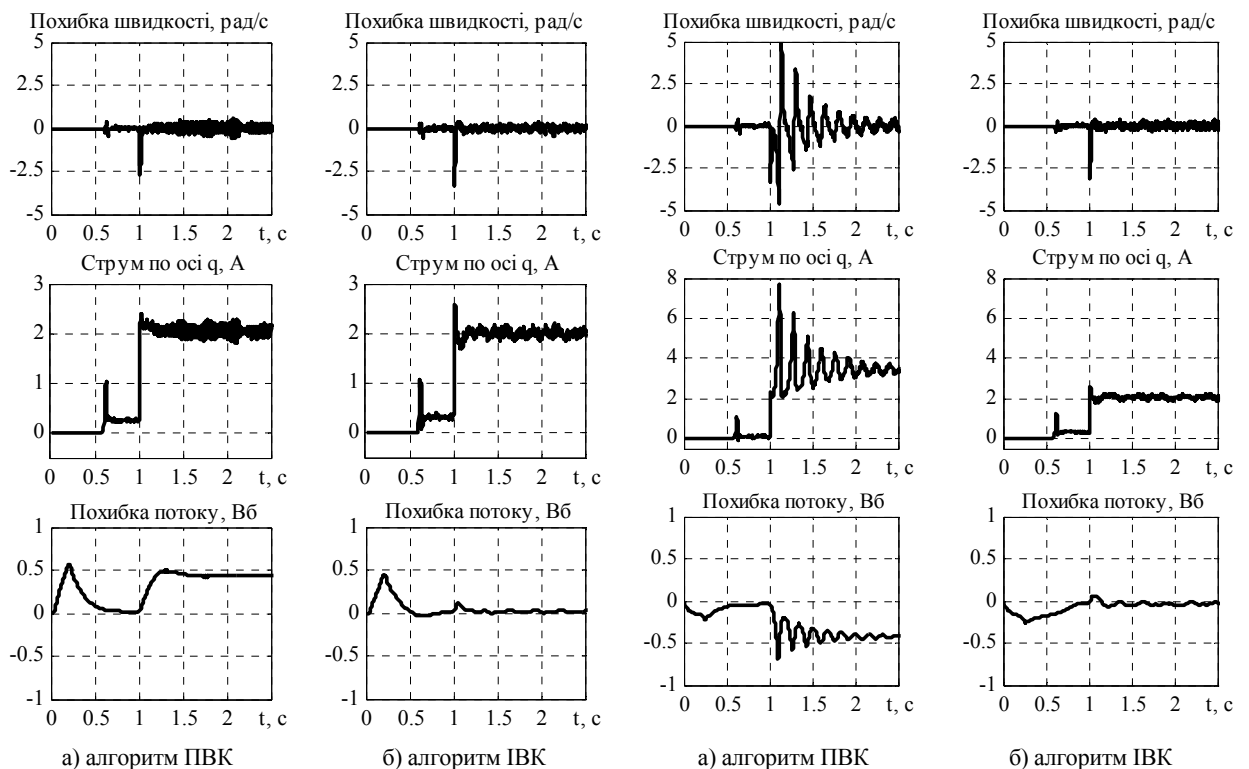


Рис. 3. Перехідні процеси в системі векторного керування без варіацій

Рис. 4. Перехідні процеси, коли  $k_\alpha = 0,5$ Рис. 5. Перехідні процеси, коли  $k_\alpha = 2$

Наступний етап експериментальних досліджень включав порівняння алгоритмів при варіаціях активного опору. Під час проведення цього тесту номінальний момент навантаження прикладався в момент часу  $t = 1$  с і підтримувався постійним протягом усього експерименту. Рис. 4 та рис. 5 демонструють перехідні процеси, отримані коли  $k_\alpha = 0,5$  та  $k_\alpha = 2$ , відповідно. З рис. 4а та 5а випливає, що за алгоритму ПВК асимптотичність відпрацювання потоку порушується, що приводить:

– якщо  $k_\alpha = 0,5$  — до збільшення значення струму по осі  $q$  під навантаженням (на 11,4 %) і до появи додаткових пульсацій швидкості та струму, що свідчить про наближення системи до границі стійкості;

– якщо  $k_\alpha = 2$  — до значного росту струму по осі  $q$  (на 71 %) та до істотної деградації динамічних показників якості керування, що є неприпустимим для високодинамічних застосувань.

З графіків, показаних на рис. 4б та 5б, випливає, що в тих самих умовах, за алгоритму ІВК в системі не спостерігається суттєвих відмінностей у порівнянні з випадком без варіацій (рис. 3б). Виключення становить некритична ділянка намагнічування, на якій потік відпрацьовується з невеликою похибкою, яка потім затухає в нуль.

Слід зазначити, що у випадку  $k_\alpha = 0,5$  та  $M_c \neq 0$  за використання алгоритму ПВК електромагнітна система АД потрапляє на ділянку насичення, тому АД працює з майже сталим модулем потокозчеплення ротора, але з невірним полеорієнтуванням. За тих самих умов, алгоритм ІВК працює з потоком, що дорівнює заданому, тобто магнітна система АД не входить в зону насичення.

На заключному етапі з метою дослідження показників енергетичної ефективності алгоритмів

була виконана серія експериментів, в яких розглядалися усталені режими роботи ЕП. Дослідження проводились за фіксованої кутової швидкості 10 рад/с для різних значень моменту навантаження на валу АД, тобто для кожного значення навантаження механічна потужність була постійною. На рис. 6 показано залежності величини моментної компоненти струму статора (рис. 6а) та втрат активної потужності в машині (рис. 6б) від параметра  $k_\alpha$ . З показаних залежностей видно, якщо  $k_\alpha = 2$ , то активні втрати в системі за алгоритмом ПВК збільшуються майже у 2,5 рази за номінального моменту навантаження і майже в 2,7 рази за навантаження 125 % від номінального. За рахунок того, що алгоритм ІВК забезпечує стабілізацію модуля вектора потокозчеплення ротора, для компенсації моменту навантаження потрібне менше значення струму статора.

В системі з алгоритмом ПВК в міру зменшення моменту навантаження спостерігається зсув мінімуму характеристики моментної компоненти струму з області, в якій  $k_\alpha < 1$ , до області з  $k_\alpha > 1$ . Цей ефект виникає за рахунок порушення умов полеорієнтування: якщо  $k_\alpha > 1$ , то магнітний потік машини менше заданого. Цей результат підтверджує відомий факт [8] про те, що в режимі малих навантажень для підтримування максимального співвідношення  $H \cdot m/A$  необхідне зменшення модуля вектора потокозчеплення ротора.

## Висновки

Ефективність представленого в роботі інваріантного алгоритму прямого векторного керування магнітним потоком і кутовою швидкістю АД підтверджена результатами експериментальних тестів, які у порівнянні з існуючими робастними рішеннями продемонстрували сильні властивості робастності за варіацій активного опору ротора в діапазоні  $-50...+100$  %. Цей факт є важливим для створення електромеханічних систем з підвищеними вимогами до динамічних властивостей і показників енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії.

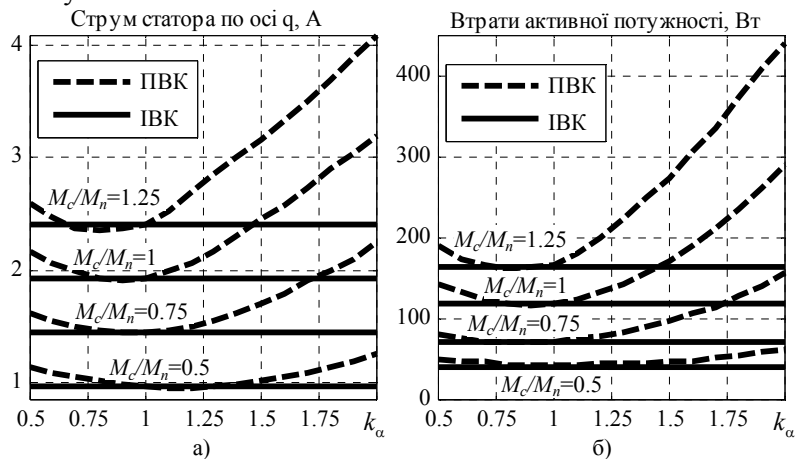


Рис. 6. Енергетичні характеристики при варіації параметру  $k_\alpha$

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Marino R. Induction motor control design / R. Marino, P. Tomei, C. M. Verrelli. — London : Springer, 2010. — 351 p.
2. Krishnan R. Electric Motor Drives. Modeling, Analysis and Control. / R. Krishnan. — New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. — 626 p.
3. Пересада С. М. Инвариантный к вариациям активного сопротивления ротора алгоритм прямого векторного управления асинхронными двигателями при питании от источника тока / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, В. Н. Трандафиллов // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. — 2014. — Вип. 3 (27). — С. 10—19.
4. A new current model flux observer insensitive to rotor time constant and rotor speed for DFO control of induction machine / H. Rehman, M. K. Guven, A. Derdiyok, L. Xu // Proceedings of the IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. — PECS'01. — Vancouver. — 2001. — Vol. 2. — P. 1179—1184.
5. Дроздов А. В. Унифицированная структура наблюдателя для двигателей переменного тока / А. В. Дроздов // Электричество. — 2008. — № 8. — С. 24—29.
6. Peresada S. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor / S. Peresada, A. Tonielli // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2000. — Vol. 14. — P. 177—200.
7. Пересада С. М. Робастність алгоритмов косвенного векторного управління асинхронними двигателями к вариациям активного сопротивления ротора / С. М. Пересада, В. С. Бовкунович // Наукові праці ДонНТУ. — 2011. — № 11 (186). — С. 296—300.
8. A maximum torque per Ampere control strategy for induction motor drives / [O. Wasynchuk, S. D. Sudhoff, K. A. Corsine and etc.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 1998. — Vol. 13, No. 2. — P. 163—169.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.12.2015

**Пересада Сергій Михайлович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: peresada@i.com.ua;

**Трандафілов Володимир Миколайович** — канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: v.trandafilov@kpi.ua;

**Желінський Микола Миколайович** — аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

**S. M. Peresada<sup>1</sup>**  
**V. M. Trandafilov<sup>1</sup>**  
**M. M. Zhelinskyi<sup>1</sup>**

## Invariance to Rotor Resistance Variations Infield-Oriented Control Systems of Induction Motors

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

*The experimental investigation results of direct field-oriented control algorithm of induction motors invariant to rotor resistance variations are presented. The results are compared with results for improved indirect field-oriented control algorithm which is robust to these variations. In contrast to existence robust algorithms it is experimentally shown that, invariant algorithm provides stabilization of dynamic performance and reduction of additional energy losses in induction motor under limited rotor resistance variations in all operation modes of electric drive, including low speed region.*

**Keywords:** field-oriented control, induction motor drive, invariance, rotor resistance variations, control performance, energy efficiency.

**Peresada Sergii M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: peresada@i.com.ua;

**Trandafilov Volodymyr M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: v.trandafilov@kpi.ua;

**Zhelinskyi Mykola M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com

**С. М. Пересада<sup>1</sup>**  
**В. Н. Трандафилов<sup>1</sup>**  
**Н. Н. Желинский<sup>1</sup>**

## **Инвариантность к вариациям активного сопротивления ротора в системах векторного управления асинхронными двигателями**

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

*Представлены результаты сравнительного экспериментального тестирования алгоритма прямого векторного управления асинхронными двигателями, инвариантного к вариациям активного сопротивления ротора, с алгоритмом улучшенного косвенного векторного управления, который является робастным к вариациям этого параметра. Экспериментально показано, что в отличие от существующих робастных алгоритмов, инвариантный алгоритм обеспечивает сохранение динамических показателей качества управления и снижение дополнительных потерь в машине при воздействии ограниченных вариаций активного сопротивления ротора во всех рабочих режимах электропривода, включая малые скорости вращения.*

**Ключевые слова:** векторное управление, асинхронный электропривод, инвариантность, вариации активного сопротивления ротора, показатели качества управления, энергетическая эффективность.

**Пересада Сергей Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: peresada@i.com.ua;

**Трандафилов Владимир Николаевич** — канд. техн. наук, ассистент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: v.trandafilov@kpi.ua;

**Желинский Николай Николаевич** — аспирант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com