

УДК 621.5:62-83

**ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА,
АДАПТИВНЕ ДО ВАРІАЦІЙ АКТИВНИХ ОПОРІВ СТАТОРА Й РОТОРА:
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**

С. М. Пересада, М. А. Коноплінський, С. М. Ковбаса

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: konoplinskyi@mail.ru

Надано результати експериментального дослідження нової, адаптивної до варіацій активних опорів статора й ротора, системи векторного керування моментом та потоком, побудованої з використанням нелінійного принципу розділення. Адаптивна система складається з глобально асимптотично стійкої підсистеми векторного керування моментом-потокосцеплення та локально асимптотично стійкої підсистеми ідентифікації активних опорів статора й ротора. Дослідження виконано при автономній роботі підсистем керування та ідентифікації параметрів, а також при їх сумісній роботі у складі адаптивної системи векторного керування. Досліджено чутливість адаптивної до варіацій активного опору ротора системи векторного керування до варіацій активного опору статора. Експериментально показано, що запропонована система адаптивного векторного керування, яка є динамічною системою 19 порядку, дозволяє забезпечити повну компенсацію впливу варіацій активних опорів статора й ротора на процеси керування координатами асинхронного двигуна й може бути реалізована в комерційних виробках із використанням існуючих на ринку цифрових сигнальних процесорів.

Ключові слова: асинхронний двигун, адаптивне векторне керування, принцип розділення.

**ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ,
АДАПТИВНОЕ К ВАРИАЦИЯМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАТОРА И РОТОРА:
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

С. М. Пересада, М. А. Коноплинский, С. Н. Ковбаса

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: konoplinskyi@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования новой, адаптивной к вариациям активных сопротивлений статора и ротора, системы векторного управления моментом и потоком, построенной с использованием нелинейного принципа разделения. Адаптивная система состоит из глобально асимптотически устойчивой подсистемы векторного управления и локально асимптотически устойчивой подсистемы идентификации активных сопротивлений статора и ротора. Исследование выполнено при автономной работе подсистем управления моментом-потокосцеплением и идентификации параметров, а также при их совместной работе в составе адаптивной системы векторного управления. Исследована чувствительность адаптивной к вариациям активного сопротивления ротора системы векторного управления к вариациям активного сопротивления статора. Экспериментально показано, что предложенная система адаптивного векторного управления, которая является динамической системой 19 порядка, позволяет обеспечить полную компенсацию влияния вариаций активных сопротивлений статора и ротора на процессы управления координатами асинхронного двигателя и может быть реализована в коммерческих изделиях с использованием существующих на рынке цифровых сигнальных процессоров.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, адаптивное векторное управление, принцип разделения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Системи векторного керування асинхронними двигунами (АД), адаптивні до варіацій активного опору ротора, здатні забезпечити асимптотичність полеорієнтації в умовах його зміни внаслідок нагріву двигуна [1–4]. Адаптація в таких системах відбувається за рахунок оцінювання активного опору ротора в реальному часі підсистемою ідентифікації. Ідентифіковане значення використовується замість фіксованого в системі векторного керування, завдяки цьому досягається компенсація впливу варіацій активного опору ротора на процеси керування АД.

Однак системи ідентифікації активного опору ротора зазвичай є чутливими до варіацій решти параметрів АД, що не ідентифікуються. Такими параметрами є індуктивності статора, ротора та намагнічуючого контуру, а також активний опір статора.

При неточній інформації про один або декілька із цих параметрів асимптотичність ідентифікації активного опору ротора порушується. Найбільш критичним збуренням для алгоритмів ідентифікації активного опору ротора є варіації активного опору статора, який змінюється внаслідок нагріву двигуна. Дану проблему дозволяє вирішити використання алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора й ротора [5, 6].

Існуючі системи векторного керування, адаптивні до одночасних варіацій активних опорів статора й ротора, мають достатньо складну структуру та потребують значних обчислень в реальному часі. Такі системи формуються шляхом заміни сталих значень активних опорів статора й ротора в неадаптивній підсистемі керування на їх оцінки, отримані за допомогою підсистеми ідентифікації. Причому система неадаптивного векторного керування, на основі

якої створюється підсистема векторного керування, повинна володіти властивостями робастності відносно варіацій активних опорів статора й ротора, щоб забезпечити стійкість адаптивної системи під час перехідних процесів у системі ідентифікації, викликаних початковими умовами. У той же час підсистема ідентифікації повинна забезпечувати асимптотичну оцінку параметрів в усіх робочих режимах роботи електропривода.

Експериментальне дослідження алгоритму одночасної ідентифікації активних опорів статора й ротора надано в [5] при його автономній роботі.

У [7] авторами запропонована нова система векторного керування моментом та потоком, адаптивна до варіацій активних опорів статора й ротора, для якої теоретично доведена локальна асимптотична стійкість. Адаптивну систему векторного керування [7] створено з використанням нелінійного принципу розділення [8] на основі неадаптивного робастного алгоритму векторного керування [9] та алгоритму ідентифікації активних опорів статора й ротора [6].

Властивості робастності відносно варіацій активного опору роторного кола неадаптивного алгоритму векторного керування було цілеспрямовано досягнуто при його проектуванні та експериментально підтверджено в [9], тоді як властивості його робастності відносно варіацій активного опору статора потребують додаткового дослідження.

Метою даної роботи є надання результатів експериментального дослідження алгоритму одночасної ідентифікації активних опорів статора й ротора [6], а також системи адаптивного векторного керування асинхронним двигуном, побудованої на його основі [7].

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1. Математичний опис підсистем векторного керування та ідентифікації. Алгоритм адаптивного векторного керування сконструйовано на основі неадаптивного алгоритму [9] шляхом заміни в ньому постійних параметрів $\alpha_1 = R_1 / \sigma$ та $\alpha_2 = R_2 / L_2$ на їх оцінені за допомогою підсистеми ідентифікації [6] значення $\hat{\alpha}_1$ та $\hat{\alpha}_2$, де R_1 , R_2 – активні опори статора й ротора; L_1 , L_2 – індуктивності статора й ротора; $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру.

Підсистема керування моментом та потоком, надана у полеорієнтованій системі координат $(d-q)$, включає:

– регулятор вектора потокозчеплення ротора у вигляді

$$\begin{aligned} i_d^* &= (\hat{\alpha}_2 L_m)^{-1} (\hat{\alpha}_2 \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad \hat{\alpha}_2 > 0; \\ i_d^* &= L_m^{-1} (\dot{\psi}^* + \hat{\alpha}_2^{-2} (\hat{\alpha}_2 \dot{\psi}^* - \dot{\hat{\alpha}}_2 \psi^*)); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + (\hat{\alpha}_2 L_m i_q + \gamma_{1r} \beta \omega \tilde{i}_d + \gamma_{2r} \beta \omega \tilde{i}_d) / \psi^*;$$

– регулятор моменту у вигляді

$$i_q^* = M^* / (\mu_1 \psi^*), \quad \dot{i}_q^* = (\dot{M}^* \psi^* - M^* \dot{\psi}^*) / (\mu_1 \psi^{*2}); \quad (2)$$

– регулятор струму по осі d у вигляді

$$u_d = \sigma \left[(\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 \beta L_m) \dot{i}_d^* - \omega_0 i_q - \hat{\alpha}_2 \beta \dot{\psi}^* + \dot{i}_d^* - k_{i1} \tilde{i}_d - z_d \right], \quad \dot{z}_d = k_{ii} \tilde{i}_d; \quad (3)$$

– регулятор струму по осі q у вигляді

$$u_q = \sigma \left[(\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 \beta L_m) \dot{i}_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \dot{\psi}^* + \dot{i}_q^* - k_{i1} \tilde{i}_q - z_q \right], \quad \dot{z}_q = k_{ii} \tilde{i}_q; \quad (4)$$

– спостерігач польової компоненти струму статора у вигляді

$$\dot{\hat{i}}_d = -(\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 \beta L_m) \hat{i}_d + \omega_0 i_q + \hat{\alpha}_2 \beta \dot{\psi}^* + \frac{u_d}{\sigma} + k_d \tilde{i}_d, \quad (5)$$

де $(i_d, i_q)^T$ – компоненти вектора струму статора;

$(i_d^*, i_q^*)^T$ – задані значення компонент вектору струму статора;

$\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$, $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ – похибки відпрацювання струмів;

$\psi^* > 0$ та M^* – задані траєкторії модуля вектора потокозчеплення ротора та моменту;

$(u_d, u_q)^T$ – компоненти вектора керуючої напруги;

ω – кутова швидкість ротора; ε_0 і ω_0 – кутове положення та кутова швидкість обертання системи координат $(d-q)$ відносно нерухомої системи координат $(a-b)$;

\hat{i}_d , $\tilde{i}_d = i_d - \hat{i}_d$ – оцінені значення й похибка оцінювання компоненти струму i_d ;

k_{i1} , k_{ii} – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;

k_d , γ_{1r} , γ_{2r} – додатні параметри налаштування;

$\mu_1 = 3L_m / (2L_2)$; $\beta = L_m / (\sigma L_2)$. Одна пара полюсів у моделі АД [7] і в алгоритмі керування (1)–(5) прийнята без втрати загальності.

Підсистема ідентифікації активних опорів АД [6, 7] у системі координат статора $(a-b)$ має вигляд:

$\dot{\hat{i}}_a = -(\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 \beta L_m i_b) \hat{i}_a + \hat{\alpha}_2 \beta \eta_a + \beta \omega \eta_b + \sigma^{-1} u_a + k_{i1} \tilde{i}_a + \omega \hat{z}_b - \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \xi_a - \omega \hat{\alpha}_1 \xi_b;$

$\dot{\hat{i}}_b = -(\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 \beta L_m i_b) \hat{i}_b + \hat{\alpha}_2 \beta \eta_b - \beta \omega \eta_a + \sigma^{-1} u_b + k_{i1} \tilde{i}_b, -\omega \hat{z}_a - \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \xi_b + \omega \hat{\alpha}_1 \xi_a;$

$\dot{\eta}_a = -\hat{\alpha}_2 \eta_a - \omega \eta_b + \hat{\alpha}_2 L_m i_a - k_2 \beta^{-1} \tilde{i}_a + \beta^{-1} (\hat{\alpha}_1 i_a - \omega \hat{z}_b + \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \xi_a + \omega \hat{\alpha}_1 \xi_b);$

$\dot{\eta}_b = -\hat{\alpha}_2 \eta_b + \omega \eta_a + \hat{\alpha}_2 L_m i_b - k_2 \beta^{-1} \tilde{i}_b + \beta^{-1} (\hat{\alpha}_1 i_b + \omega \hat{z}_a + \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \xi_b - \omega \hat{\alpha}_1 \xi_a);$

$\dot{\hat{z}}_a = -\gamma_{1a} \tilde{i}_a - \gamma_{2a} \omega \tilde{i}_b;$

$\dot{\hat{z}}_b = -\gamma_{1b} \tilde{i}_b + \gamma_{2b} \omega \tilde{i}_a;$

$\dot{\hat{\xi}}_a = i_a;$

$\dot{\hat{\xi}}_b = i_b;$

$\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma_3 [\tilde{i}_a (i_a + \omega \xi_b + \hat{\alpha}_2 \xi_a) + \tilde{i}_b (i_b - \omega \xi_a + \hat{\alpha}_2 \xi_b)];$

$\dot{\hat{\alpha}}_2 = \gamma_4 [\tilde{i}_a (\beta (\eta_a - L_m i_a) - \hat{\alpha}_1 \xi_a) + \tilde{i}_b (\beta (\eta_b - L_m i_b) - \hat{\alpha}_1 \xi_b)];$

$\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma_3 [\tilde{i}_a (i_a + \omega \xi_b + \hat{\alpha}_2 \xi_a) + \tilde{i}_b (i_b - \omega \xi_a + \hat{\alpha}_2 \xi_b)];$

$\dot{\hat{\alpha}}_2 = \gamma_4 [\tilde{i}_a (\beta (\eta_a - L_m i_a) - \hat{\alpha}_1 \xi_a) + \tilde{i}_b (\beta (\eta_b - L_m i_b) - \hat{\alpha}_1 \xi_b)];$

$\dot{\hat{z}}_a = -\gamma_{1a} \tilde{i}_a - \gamma_{2a} \omega \tilde{i}_b;$

$\dot{\hat{z}}_b = -\gamma_{1b} \tilde{i}_b + \gamma_{2b} \omega \tilde{i}_a;$

$\dot{\hat{\xi}}_a = i_a;$

$\dot{\hat{\xi}}_b = i_b;$

$\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma_3 [\tilde{i}_a (i_a + \omega \xi_b + \hat{\alpha}_2 \xi_a) + \tilde{i}_b (i_b - \omega \xi_a + \hat{\alpha}_2 \xi_b)];$

$\dot{\hat{\alpha}}_2 = \gamma_4 [\tilde{i}_a (\beta (\eta_a - L_m i_a) - \hat{\alpha}_1 \xi_a) + \tilde{i}_b (\beta (\eta_b - L_m i_b) - \hat{\alpha}_1 \xi_b)];$

$\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma_3 [\tilde{i}_a (i_a + \omega \xi_b + \hat{\alpha}_2 \xi_a) + \tilde{i}_b (i_b - \omega \xi_a + \hat{\alpha}_2 \xi_b)];$

де \hat{i}_a, \hat{i}_b – оцінені значення струмів статора i_a, i_b ; $\eta_a, \eta_b, \xi_a, \xi_b$ – додаткові змінні; \hat{z}_a, \hat{z}_b – оцінені значення змінних $z_a = \tilde{i}_a + \beta \tilde{\eta}_a + \alpha_1 \xi_a$, $z_b = \tilde{i}_b + \beta \tilde{\eta}_b + \alpha_1 \xi_b$, $\tilde{\eta}_a = \psi_a - \eta_a$, $\tilde{\eta}_b = \psi_b - \eta_b$; $\tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a$, $\tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b$ – похибки оцінювання компоненту струму; $k_1, k_2, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – додатні параметри налаштування, $\gamma_1 = k_1 - k_2$.

Входами підсистеми ідентифікації (6) є кутова швидкість ротора ω , напруги u_a, u_b та струми i_a, i_b статора, а виходами – ідентифіковані значення $\hat{\alpha}_1$ і $\hat{\alpha}_2$, що дозволяють визначити активні опори статора й ротора за виразами $\hat{R}_1 = \sigma \hat{\alpha}_1$ і $\hat{R}_2 = L_2 \hat{\alpha}_2$ відповідно.

2. *Результати експериментального дослідження та математичного моделювання.* Дослідження динамічних процесів керування й ідентифікації параметрів в адаптивній системі векторного керування (1)–(5) проведено методом математичного моделювання та на експериментальній установці [10] із використанням АД типу 4АО80В2 потужністю 0,75 кВт, який має наступні параметри: номінальна кутова швидкість $\omega_n = 300$ рад/с; номінальний момент $M_n = 2,5$ Н·м; активні опори статора й ротора $R_1 = 11$ Ом, $R_2 = 5,51$ Ом; індуктивності статора й ротора $L_1 = L_2 = 0,95$ Гн; індуктивність намагнічувального контура $L_m = 0,91$ Гн; момент інерції $J = 0,0036$ кг·м².

Дослідження проведено в чотири етапи. Перша серія тестів присвячена дослідженню робастності неадаптивного алгоритму векторного керування до варіацій активного опору статора.

На другому етапі, з метою підтвердження властивостей, необхідних для використання нелінійного принципу розділення, експериментально досліджено незалежну роботу підсистеми ідентифікації, тобто коли ідентифіковані спостерігачем (6) значення використовуються лише для дослідження його показників якості.

Третя серія тестів спрямована на дослідження впливу варіації активного опору статора на роботу системи, адаптивної до варіацій лише активного опору ротора.

Роботу системи векторного керування, адаптивної одночасно до активних опорів статора й ротора, продемонстровано на четвертому етапі.

Для оцінки показників якості регулювання моменту при відсутності можливості його вимірювання прямим шляхом дослідження було проведено в замкненій системі регулювання кутової швидкості з ПІ регулятором, в якій внутрішній контур керування моментом та підсистему регулювання потоку реалізує досліджуваний алгоритм векторного керування. Показники точності відпрацювання моменту визначалися непрямим чином за динамічною поведінкою

похибки відпрацювання заданої кутової швидкості (ω^*) та моментної складової струму статора (i_q).

При проведенні експериментальних досліджень для оцінки модуля вектора потокозчеплення використовувався додатковий розімкнутий спостерігач зниженого порядку з коректними параметрами, що дозволило непрямим шляхом отримати графіки перехідних процесів похибки регулювання потокозчеплення.

Коефіцієнти налаштування підсистеми векторного керування в усіх тестах були вибрані наступними: коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості $k_\omega = 150$, $k_{oi} = k_\omega^2 / 2$; коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму $k_{i1} = 700$, $k_{ii} = k_i^2 / 2$; коефіцієнти робастифікуючих зворотних зв'язків $\gamma_{1r} = 0,1$, $\gamma_{2r} = 0,1$. Коефіцієнти налаштування підсистеми ідентифікації встановлено відповідно $k_1 = 20$, $k_2 = 10$, $\gamma_2 = 1$, $\gamma_3 = 1$, $\gamma_4 = 1$.

Під час тестів використовувалась наступна послідовність операцій керування (рис. 1): на інтервалі часу 0–0,25 с машина збуджується, траєкторія магнітного потоку починається з $\psi^*(0) = 0,02$ Вб і досягає значення 0,9 Вб з обмеженими першою та другою похідними; на інтервалі часу 0,6–0,7 с машина розганяється від нульової початкової швидкості до швидкості 50 рад/с (16,7 % від номінальної швидкості) з обмеженими першою й другою похідними; у момент часу $t = 1,2$ с відбувається ступінчасте прикладання номінального моменту навантаження M_c . Ініціалізація підсистеми ідентифікації відбувається одразу після розгону двигуна – в момент часу 0,7 с.

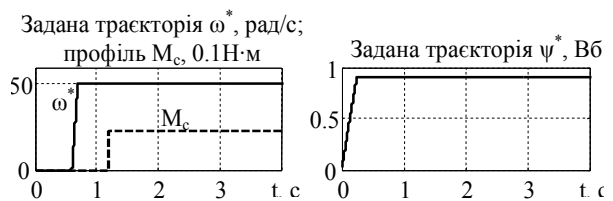


Рисунок 1 – Задані траєкторії швидкості, потоку та профіль моменту навантаження

2.1 *Дослідження робастності алгоритму неадаптивного векторного керування [9] до варіацій активного опору статора.* При виконанні тестів першого етапу дослідження в керуючому контролері замість істинного значення R_1 використовувалося відмінне від нього значення R_{1c} , тобто варіації вводилися в керуючий контролер, у той час як реальне значення опору статора двигуна залишається незмінним при виконанні тесту.

Графіки перехідних процесів похибок відпрацювання кутової швидкості ротора $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$, модуля потоку $\tilde{\psi} = |\psi| - \psi^*$, де $|\psi|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора (оцінений), струмів статора i_d, i_q ,

похибок відпрацювання потокозчеплення $\tilde{\psi}_d = \psi_d - \psi^*$, $\tilde{\psi}_q = \psi_q$ при відомих параметрах, отримані методом математичного моделювання, показано на рис. 2.

З графіків (рис. 2) можна зробити висновок, що алгоритм [9] за умови відомих параметрів забезпечує асимптотичність відпрацювання кутової швидкості та потокозчеплення ротора.

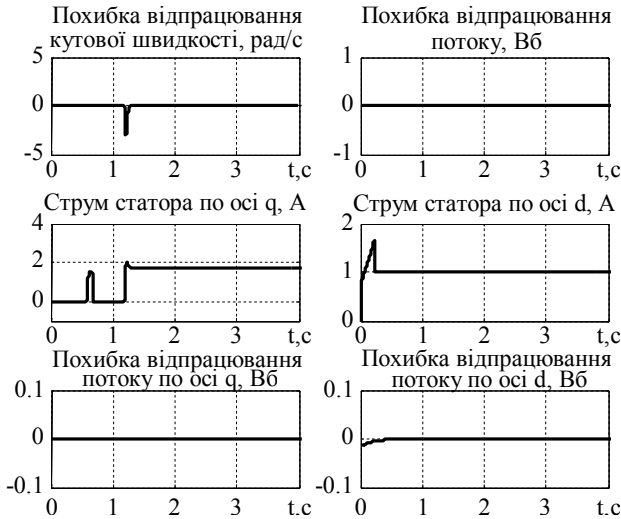


Рисунок 2 – Похибки регулювання потоку, відпрацювання швидкості та струми статора при $R_{1c} = R_1$ (моделювання)

Результати дослідження роботи неадаптивної системи векторного керування при значеннях $R_{1c} = 0,6R_1$ і $R_{1c} = 1,5R_1$ та номінальному значенні активного опору ротора показано на рис. 3, 4 відповідно.

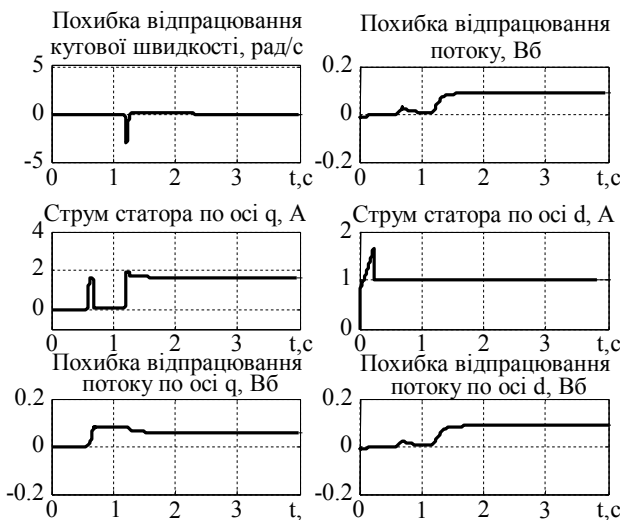


Рисунок 3 – Похибки регулювання потоку, відпрацювання швидкості та струми статора при $R_{1c} = 0,6R_1$ (моделювання)

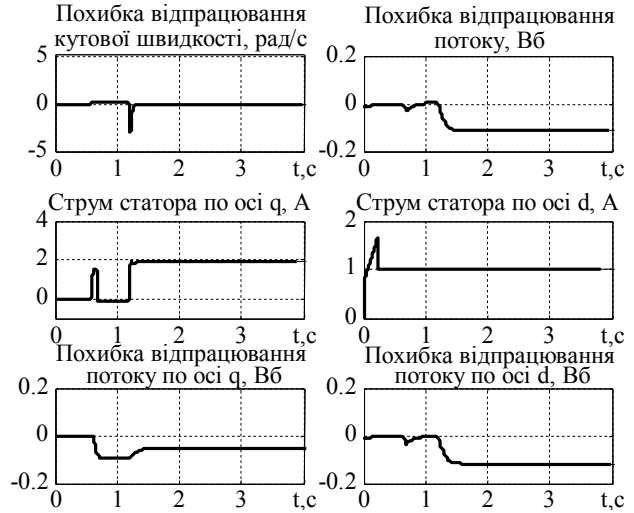


Рисунок 4 – Похибки регулювання потоку, відпрацювання швидкості та струми статора при $R_{1c} = 1,5R_1$ (моделювання)

Як видно з графіків (рис. 2–4), у випадку, коли значення активного опору в алгоритмі керування відрізняється від реального на -40% та 50% , спостерігається помітне порушення асимптотичності відпрацювання компонент потокозчеплення, проте система залишається стійкою та забезпечує асимптотичне регулювання кутової швидкості.

2.2 Дослідження підсистем керування та ідентифікації при їх автономній роботі. На другому етапі експериментально досліджено систему векторного керування та підсистему оцінювання при їх незалежній роботі, тобто коли в підсистемі керування координатами використовуються реальні значення параметрів, а отримані за допомогою підсистеми ідентифікації параметри використовуються лише для дослідження показників якості оцінювання.

Графіки перехідних процесів у підсистемі керування показано на рис. 5, а в підсистемі оцінювання за різними початковими умовами – на рис. 6–9.

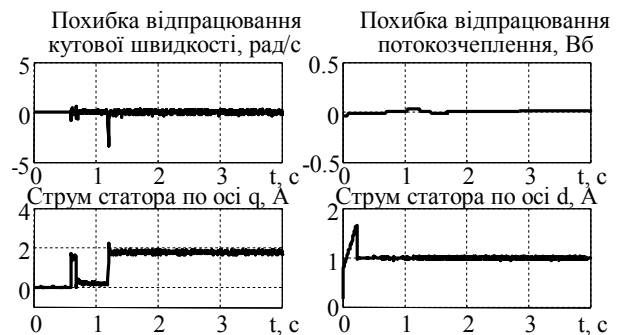


Рисунок 5 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми керування (експеримент)

На рисунках графіки перехідних процесів ідентифікації опорів показані суцільними лініями, а реальні значення опорів – пунктирними.

Як видно з графіків, показаних на рис. 5, неадаптивний алгоритм векторного керування при відомих параметрах забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості, нульову статичну похибку при компенсації постійного моменту навантаження та максимальну динамічну похибку на рівні 4 рад/с, яка затухає в нуль за 0,02 с. Динамічна поведінка компонент струмів статора, похибок відпрацювання кутової швидкості та поточкозчеплення при експериментальному дослідженні (рис. 5) співпадають із результатами моделювання (рис. 2) з високим ступенем точності.

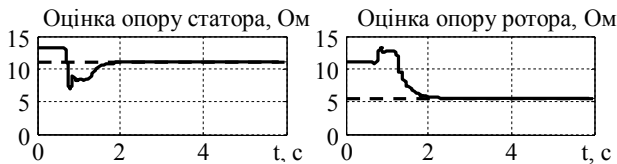


Рисунок 6 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми ідентифікації (моделювання) при початкових умовах $\hat{R}_1(0)=1,2R_1$, $\hat{R}_2(0)=2R_2$

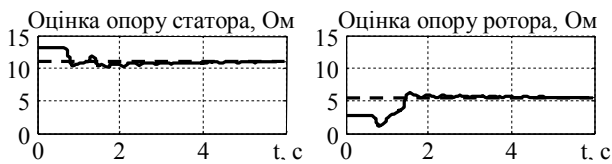


Рисунок 7 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми ідентифікації (моделювання) при початкових умовах $\hat{R}_1(0)=1,2R_1$, $\hat{R}_2(0)=0,5R_2$

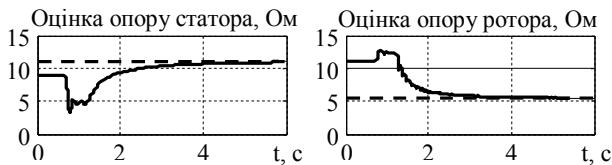


Рисунок 8 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми ідентифікації (моделювання) при початкових умовах $\hat{R}_1(0)=0,8R_1$, $\hat{R}_2(0)=2R_2$

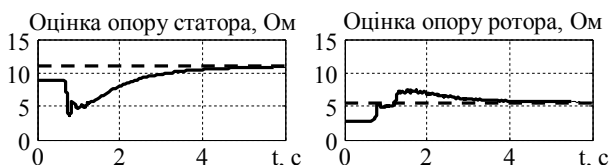


Рисунок 9 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми ідентифікації (моделювання) при початкових умовах $\hat{R}_1(0)=0,8R_1$, $\hat{R}_2(0)=0,5R_2$

Результати експериментального тестування підсистеми ідентифікації для початкових умов $\hat{R}_1(0)=0,8R_1$, $\hat{R}_2(0)=2R_2$ (найбільш критичний випадок) показано на рис. 10.

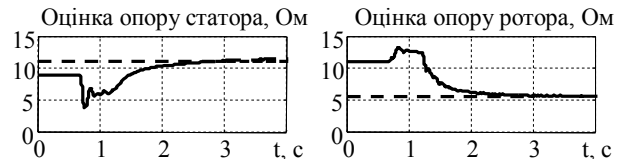


Рисунок 10 – Динамічні процеси при автономній роботі підсистеми ідентифікації (експеримент) при початкових умовах $\hat{R}_1(0)=0,8R_1$, $\hat{R}_2(0)=2R_2$

З аналізу графіків перехідних процесів одночасної ідентифікації активних опорів статора й ротора в автономному режимі при різних комбінаціях початкових умов, отриманих шляхом математичного моделювання та експериментально, встановлюємо, що при виконанні умов персистентності збудження спостерігач (6) забезпечує асимптотичне оцінювання активних опорів статора й ротора за час, що не перевищує 4 с.

2.3 Дослідження впливу варіації активного опору статора на систему векторного керування, адаптивну до варіації активного опору ротора. З метою оцінки впливу варіації активного опору статора на динамічні процеси адаптивної до R_2 системи векторного керування проведено третю серію тестів. Для цього в розробленій системі адаптивного керування була вимкнена адаптація до варіації активного опору статора, а в керуючому контролері замість R_1 використовувалося значення $\hat{R}_1=0,6R_1=const$ та встановлено нульові коефіцієнти робастифікуючих зворотних зв'язків.

Після завершення процесу ідентифікації R_2 (з похибкою, викликаною неточністю інформації про активний опір статора в керуючому контролері) на проміжку часу $t=0,25-0,75$ с до валу двигуна прикладається постійний момент навантаження, близький до номінального. На рис. 11 зображені експериментальні перехідні процеси при кутовій швидкості $\omega=50$ рад/с.

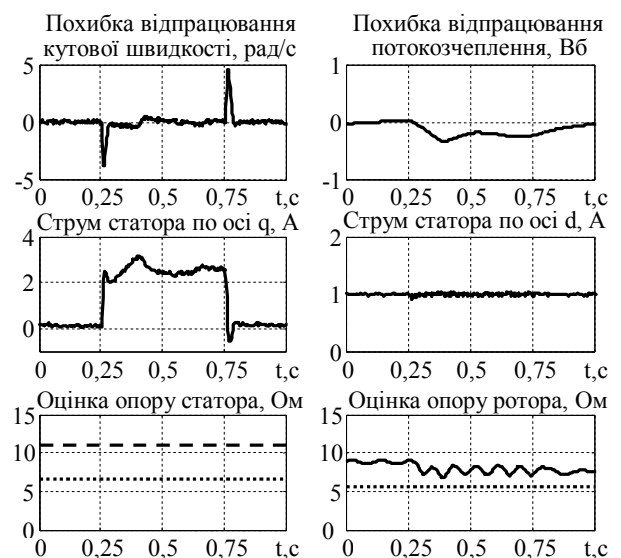


Рисунок 11 – Динамічні процеси в адаптивній системі (експеримент) при фіксованому $\hat{R}_1=0,6R_1$

Як видно з графіків перехідних процесів, через наявність варіації активного опору статора усталене значення оцінки R_2 відрізняється від реального приблизно на 60 % та має коливальний характер. Робота алгоритму векторного керування з такою варіацією активного опору ротора супроводжується погіршенням показників якості регулювання кутової швидкості, що проявляється у підвищеній коливальності процесів та завищеному значенні моментного струму i_q . З такої поведінки випливає, що некоректне значення активного опору статора, яке використовується в алгоритмі адаптивного керування, призводить до значних похибок оцінювання активного опору ротора і, як наслідок, до погіршення показників якості регулювання кутової швидкості (моменту). Необхідно відзначити, що похибка відпрацювання потоку, яка виникає при неправильному значенні активного опору ротора, призводить до збільшення втрат активної потужності внаслідок зростання моментної складової струму статора.

2.4 Дослідження властивостей системи векторного керування, адаптивної до варіацій активних опорів статора й ротора. Динамічна поведінка адаптивної системи при одночасному оцінюванні опорів статора й ротора показана на рис. 12 (моделювання) та рис. 13 (експериментальне дослідження) при наступній послідовності операцій керування: момент навантаження прикладається на інтервалі часу $t=0,7-2,5c$, на інтервалі часу $t=2,5-3c$ двигун працює на холостому ходу, а при $t=3-3,5c$ момент навантаження прикладається повторно.

Як видно з рис. 12, 13, під час першого прикладання моменту навантаження при $t=1,2c$ оцінювання опорів статора й ротора не завершилось, присутні похибки оцінювання, тому, як і у випадку попереднього тесту, показники якості регулювання кутової швидкості погіршуються.

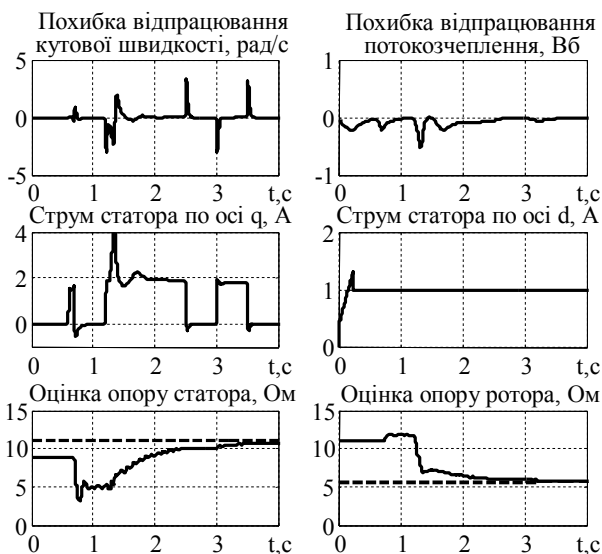


Рисунок 12 – Динамічні процеси в адаптивній системі векторного керування (моделювання)

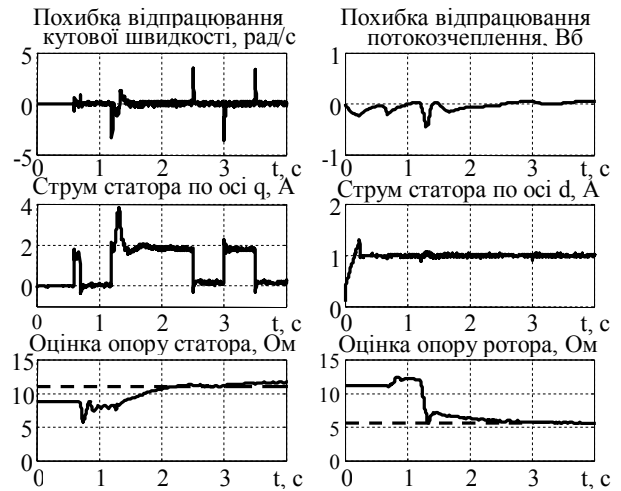


Рисунок 13 – Динамічні процеси в адаптивній системі векторного керування (експеримент)

При повторному накиданні моменту навантаження, коли спостерігач завершив оцінювання активних опорів статора й ротора, показники якості регулювання кутової швидкості повертаються до номінального рівня. Таким чином, показано, що запропонована система векторного керування з одночасною адаптацією до активних опорів статора й ротора дозволяє компенсувати вплив їх варіацій і завдяки цьому підвищити показники якості регулювання кутової швидкості (моменту) та потоку асинхронного двигуна.

ВИСНОВКИ. У результаті проведеного повномасштабного дослідження підтверджено властивості робастності алгоритму векторного керування [9] до варіацій активного опору статора. Результати експериментального дослідження алгоритму одночасної ідентифікації активних опорів статора й ротора також підтверджують достатньо сильні властивості стійкості підсистеми оцінювання. Це дозволяє застосувати до цих систем нелінійний принцип розділення для побудови адаптивної до варіацій активних опорів статора й ротора системи векторного керування асинхронним двигуном.

Уперше експериментально підтверджено, що композитна структура, яка складається з глобально експоненціально стійкої системи векторного керування моментом та потоком і локально експоненціально стійкого адаптивного спостерігача, дозволяє компенсувати негативний вплив варіацій активних опорів статора й ротора на динамічні та статичні показники якості керування. Підсистема ідентифікації активних опорів має досить високу швидкодію з часом збіжності, що не перевищує 4 с, як при автономній роботі, так і при роботі у складі адаптивної системи векторного керування. Результати експериментальних досліджень підтверджують можливість побудови адаптивних до варіацій активних опорів промислових систем асинхронного електроприводу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. – London: Springer, 2010. – 351 p.
2. Dawson D.M., Hu J., Burg T.C. Nonlinear Control of Electric Machinery. – Marcel Dekker Inc., 1998. – 533 p.
3. Hu J., Dawson D.M. Adaptive control of induction motor systems despite rotor resistance uncertainty // *Automatica*. – 1996. – Iss. 32/1996 (8). – PP. 1127–1143.
4. Wang K., Chiasson J., Bodson M., Tolbert L.M. An online rotor time constant estimator for the induction machine // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2007. – Iss. 15/2007 (2). – PP. 339–348.
5. Marino R., Peresada S., Tomei P. On-line stator and rotor resistance identification in induction motor // *IEEE Trans. on Control Systems Technology*. – 2000. – Iss. 8/2000. – PP. 570–579.
6. Пересада С.М., Коноплінський М.А. Ідентифікація активних опорів асинхронного двигуна за допомогою адаптивного спостерігача потокозчеплення // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – Вип. 1/2013. – С. 40–48.

7. Пересада С.М., Коноплінський М.А., Трандафілов В.Н. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора, побудоване на основі нелінійного принципу розділення // *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України*. – 2014. – № 39. – С. 44–51.

8. Jo N.H., Seo J.H. Local separation principle for non-linear systems // *International Journal of Control*. – 2000. – Iss. 73/2000 (4). – PP. 292–302.

9. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – Вип. 1/2010. – С. 60–66.

10. Ковбаса С.Н., Воронко А.Б. Высокопроизводительный унифицированный контроллер на основе DSP TMS320F28335 для электромеханических систем // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – Вип. 36/2013 (1009). – С. 293 – 297.

ADAPTIVE TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTORS WITH UNCERTAIN STATOR AND ROTOR RESISTANCES: RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

S. Peresada, M. Konoplynskiy, S. Kovbasa

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

prosp. Peremohy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: konoplynskiy@mail.ru

Experimental research results of novel adaptive to stator and rotor resistances variations torque-flux vector control system of induction motor are presented. System is designed on the base of local separation principle for nonlinear systems. Adaptive system is composed from globally exponentially stable torque-flux indirect field oriented subsystem and locally exponentially stable adaptive to stator and rotor resistances subsystem. The study was performed for autonomous operation of control and parameter identification subsystems and for adaptive controller with replacement of actual rotor and stator resistances by estimated ones, obtained in real time by identification subsystem. Robustness study shows that adaptive with respect to rotor resistance variation controller is sensitive to stator resistance uncertainties, while adaptation for both resistances allows to achieve local asymptotic torque-flux tracking, field orientation and asymptotic resistances estimation. Experiments show that adaptive controller (19-th order dynamic system) is implementable using available DSP-technology, achieved performances are suitable for commercial implementation.

Key words: induction motor, adaptive vector control, separation principle.

REFERENCES

1. Marino, R., Tomei, P. and Verrelli, C.M. (2010), *Induction motor control design*, Springer, London.
2. Dawson, D.M., Hu, J. and Burg, T.C. (1998), *Nonlinear Control of Electric Machinery*, Marcel Dekker Inc., N.J.
3. Hu, J. and Dawson, D.M. (1996), “Adaptive control of induction motor systems despite rotor resistance uncertainty”, *Automatica*, Vol. 32, no. 8, pp. 1127–1143.
4. Wang, K., Chiasson, J., Bodson, M. and Tolbert, L.M. (2007), “An online rotor time constant estimator for the induction machine”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, no. 2, pp. 339–348.
5. Marino, R., Peresada, S. and Tomei, P. (2000), “On-line stator and rotor resistance identification in induction motor”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 8, pp. 570–579.
6. Peresada, S.M. and Konoplynskiy, M.A. (2013), “Identification of induction motor active resistances using an adaptive flux observer”, *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 1, pp. 40–48. (in Ukrainian)

7. Peresada, S.M., Konoplynskiy, M.A. and Trandafilov, V.N. (2014), “Adaptive torque control of induction motors with uncertain stator and rotor resistances: design on the base of nonlinear separation principle”, *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, no. 39, pp. 44–51. (in Ukrainian)

8. Jo, N.H. and Seo, J.H. (2000), “Local separation principle for non-linear systems”, *International Journal of Control*, Vol. 73, no. 4, pp. 292–302.

9. Peresada, S.M., Kovbasa, S.N. and Bovkunovich, V.S. (2010), “Robust vector torque and flux control of induction motor”, *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 1, pp. 60–66. (in Russian)

10. Kovbasa, S.N. and Voronko, A.B. (2013), High-performance unified controller based on DSP TMS320F28335 for electromechanical systems, *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu “KhPI”. Zbirnik naukovikh prats. Seriya “Problemy avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika”*, Vol. 1009, no. 36, pp. 293–297. (in Russian)

Стаття надійшла 07.11.2014.