

УДК 621.34

**УМОВИ ПЕРСИСТНОСТІ ЗБУДЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ЗАДАНОГО ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ В СИСТЕМАХ БЕЗДАВАЧЕВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ**

**С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, В. О. Благодір**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

Надано результати розробки та експериментального тестування алгоритму формування заданого потокозчеплення в системах бездавачевого векторного керування асинхронними двигунами, який забезпечує виконання умов спостережуваності кутової швидкості ротора у всіх режимах роботи двигуна. Запропоноване рішення дозволяє розширити зону стійкої роботи систем бездавачевого керування асинхронними двигунами, в тому числі при генераторних моментах навантаження, а також підвищити показники якості регулювання механічних координат при роботі двигуна в зоні нульових швидкостей.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, бездавачеве векторне керування, персистність збудження.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Системи векторного керування асинхронними двигунами (АД) без вимірювання кутової швидкості на сьогодні сформувавши промисловий стандарт для технологічних використань з низькими й середніми вимогами до статичних та динамічних показників регулювання координат АД [1]. Одним із принципових факторів, які обмежують сфери застосування цих систем, є деградація якості керування в діапазоні низьких швидкостей та навіть втрата стійкості в генераторних режимах роботи. У [2] авторами надано загальнотеоретичне рішення проблеми бездавачевого керування АД, в якому вперше подано математичне формулювання персистентності збудження, що визначає необхідні умови для оцінювання кутової швидкості. Висновки [2] співпадають із результатами [3, 4] щодо загальних властивостей спостережуваності моделі АД. У [5] надано розвиток алгоритму [2] з метою підвищення властивостей робастності відносно немодельованої динаміки в контурах регулювання струму статора.

Метою даного дослідження є розробка методу формування умов персистентності збудження при бездавачевому керуванні за рахунок специфікації заданого потокозчеплення для розширення діапазону регулювання кутової швидкості.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Алгоритм бездавачевого керування [5]. Рівняння алгоритму керування кутовою швидкістю в полеорієнтованій системі координат (d-q) мають вигляд:

– регулятор потокозчеплення

$$\begin{aligned} i_d^* &= (\alpha\psi^* + \dot{\psi}^*) / \alpha L_m; \\ \omega_0 &= \hat{\omega} + \alpha L_m i_q^* / \psi^* + v_0 / \psi^*; \end{aligned} \quad (1)$$

– спостерігач польової компоненти струму статора

$$\dot{\hat{i}}_d = -\gamma \hat{i}_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi^* + \sigma^{-1} u_d + k_1 \tilde{i}_d; \quad (2)$$

– регулятор швидкості

$$\begin{aligned} i_q^* &= (\hat{\omega}^* + v\omega^* - k_\omega e_\omega + \dot{M}_c) / \mu \psi^*; \\ \dot{M}_c &= -k_{oi} e_\omega; \end{aligned} \quad (3)$$

– спостерігач кутової швидкості

$$\begin{aligned} \dot{\hat{i}}_q &= -\gamma \hat{i}_q - \omega_0 i_d - \beta \psi^* \hat{\omega} + \sigma^{-1} u_q + k_o \tilde{i}_q; \\ \dot{e}_\omega &= -k_{oi} \tilde{i}_q, \hat{\omega} = \omega^* + e_\omega; \end{aligned} \quad (4)$$

– регулятори струмів

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma(\gamma i_d^* - \omega_0 i_q^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_i \tilde{i}_d - x_d); \\ u_q &= \sigma(\gamma i_q^* + \omega_0 i_d^* + \beta \hat{\omega} \psi^* + \dot{i}_q^* - k_i \tilde{i}_q - x_q); \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d; \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\omega^*$  – задана кутова швидкість;  $\psi^*$  – задане потокозчеплення;  $i_d^*, i_q^*$  – задані значення для польової  $i_d$  та моментної  $i_q$  компонент струму статора;  $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*, \tilde{i}_q = i_q - i_q^*$  – похибки відпрацювання струмів;  $x_d, x_q$  – інтегральні складові регуляторів струму;  $\hat{i}_d, \hat{i}_q$  – оцінки струмів;  $\tilde{i}_d = i_d - \hat{i}_d, \tilde{i}_q = i_q - \hat{i}_q$  – похибки оцінювання струмів  $i_d, i_q$ ;  $u_d, u_q$  – компоненти вектора напруги статора;  $\hat{\omega}$  – оцінена кутова швидкість  $\omega$ ;  $\hat{M}_c$  – оцінене значення константи  $M_c/J$ ;  $M_c$  – момент навантаження;  $J$  – момент інерції; додатні константи  $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ , які залежать від електричних та механічних параметрів двигуна, визначено стандартним чином [4];  $L_m$  – індуктивність намагнічуючого контуру;  $(k_i, k_{ii}) > 0$  – коефіцієнти пропорційних та інтегральних складових регуляторів струму;  $(k_o, k_{oi}) > 0, k_1 > 0$  – параметри налаштування спостерігача кутової швидкості й польової компоненти струму статора;  $v_0$  – коригуючий зворотній зв'язок;  $\gamma_1 > 0$  – коефіцієнт налаштування; без втрати загальності в моделі АД прийнято одну пару полюсів.

**Метод формування заданого потокозчеплення.** Теоретичний результат відносно стійкості системи бездавачевого керування АД, побудованої з використанням алгоритму (1)–(5), базується на умовах персистентності збудження, які формулюються наступним чином. Згідно з дослідженням [1], сигнал

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Omega_a(t) \\ \Omega_b(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \cos \varepsilon_0^* - \omega^* \sin \varepsilon_0^* & 0 \\ \alpha \sin \varepsilon_0^* + \omega^* \cos \varepsilon_0^* & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

є таким, що персистентно збуджує, якщо існують додатні константи  $T, k$ , які забезпечують виконання умови

$$\int_t^{t+T} \Omega(\tau) \Omega^T(\tau) d\tau \geq k \mathbf{I}_2 > 0, \forall t \geq 0, \quad (7)$$

де  $\dot{\varepsilon}_0^r = \omega_0^r = \omega^* + \alpha L_m i_q^r / \psi^*$ ;  $i_q^r = (\dot{\omega}^* + M_c J^{-1}) / \mu \psi^*$ .

Аналітичне дослідження умов (7) не може бути виконано при розгляді загальних режимів роботи АД, але принципи висновки можуть бути отримані з розгляду ustalених режимів. Припустимо, що задання для кутової швидкості  $\omega^*$ , потокозчеплення  $\psi^*$ , а також момент навантаження  $M_c$  є постійними. За цих умов в ustalеному режимі  $\omega_{0r}$  є постійною й тому  $\varepsilon_{0r} = \omega_{0r} t$ . Якщо  $\omega_{0r} = 0$ , що відповідає збудженню АД постійним струмом, то розрахунок матриці (7) дає

$$\int_t^{t+T} \Omega(\tau) \Omega^T(\tau) d\tau = \int_t^{t+T} \begin{bmatrix} \alpha^2 & \alpha \omega^* \\ \alpha \omega^* & (\omega^*)^2 \end{bmatrix} d\tau, \quad (8)$$

тобто матриця є напівдодатно визначеною й тому умови персистентності збудження не виконуються.

За умови, коли  $\omega_{0r} \neq 0$ , визначимо  $T = 2\pi / |\omega_{0r}|$ , тоді маємо:

$$\int_t^{t+T} \Omega(\tau) \Omega^T(\tau) d\tau = \frac{\pi}{|\omega_{0r}|} \begin{bmatrix} \alpha^2 + (\omega^*)^2 & 0 \\ 0 & \alpha^2 + (\omega^*)^2 \end{bmatrix} > \frac{\pi \alpha^2}{|\omega_{0r}|} \mathbf{I}_2, \forall \omega^*. \quad (9)$$

Таким чином, умови персистентності збудження виконуються в усіх сталих режимах за виключенням режиму збудження постійним струмом, що виникає при роботі на низьких швидкостях, коли до валу прикладається генераторний момент навантаження, а також при нульовій швидкості на холостому ходу.

Оскільки  $\omega_{0r}$  залежить від  $\omega^*$ ,  $M_c$  та  $\psi^*$ , то задання для потокозчеплення може бути використано як додатковий ступінь свободи для виключення умови  $\omega_{0r} = 0$ . Для досягнення цієї мети пропонується використовувати селекцію завдання для потокозчеплення так, щоб його максимізувати з урахуванням фізичних обмежень, що пов'язані з насиченням магнітної системи. Сформуємо для ustalеного режиму допоміжну синхронну швидкість обертання у вигляді

$$\omega_{0n} = \omega^* + \alpha L_m (v \omega^* + \hat{M}_c) / \mu \psi^{*2}. \quad (10)$$

У (10) є ступінь свободи для селекції  $\psi^*$  так, щоб значення  $|\omega_{0n}|$  було максимальним, при  $\psi^* \in [\psi_m^*, \psi_M^*]$ . Обмеження  $\psi_m^*$  відповідає мінімальному значенню, а  $\psi_M^*$  – максимальному з урахуванням насичення магнітної системи АД. Наступний алгоритм дозволяє уникнути збудження АД постійним струмом:

$$\psi^* = \begin{cases} \psi_m^* & \text{if } (v \omega^* + \hat{M}_c) \rho \geq 0; \\ \psi_M^* & \text{if } (v \omega^* + \hat{M}_c) \rho < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$3 \frac{1}{\psi^{*2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\psi_m^{*2}} + \frac{1}{\psi_M^{*2}} \right); \rho = \left( \frac{\mu}{\alpha L_m} \omega^* + \frac{v \omega^* + \hat{M}_c}{\psi^{*2}} \right).$$

На рис. 1 показано, як необхідно вибирати заданий потік залежно від  $\omega^*$  та  $\hat{M}_c$ . Відмітимо, що мінімальний рівень потокозчеплення вибирається в

рушійному режимі, в той час як максимальне потокозчеплення вводиться тільки в генераторних режимах роботи АД. Рішення (11) гарантує уникнення умов збудження АД постійним струмом.

Стратегія селекції заданого потокозчеплення активується тільки при низьких частотах напруги живлення та високих значеннях моментного струму. При роботі з високими частотами живлення умови спостережуваності завжди забезпечуються, тому задане значення потокозчеплення встановлюється рівним номінальному значенню. Більш того, робота з малими моментними струмами при низьких частотах напруги живлення не є критичною з практичної точки зору, оскільки малий момент двигуна співвимірний з моментом тертя.

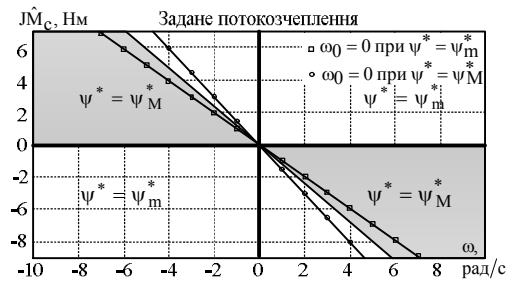


Рисунок 1 – Задане потокозчеплення

Результати експериментального тестування. При виконанні тестів алгоритму (11) було встановлено наступні параметри алгоритму вибору заданого потокозчеплення: мінімальне та максимальне потокозчеплення дорівнюють  $\pm 10\%$  від значення  $\psi^* = 0,86$  Вб, яке використовується при високих частотах живлення, тобто  $\psi_m^* = 0,77$  Вб,  $\psi_M^* = 0,95$  Вб. Результуючий сигнал завдання потокозчеплення формується нелінійним фільтром [5] з максимальними значеннями першої та другої похідних, що дорівнюють 2 Вб/с та 50 Вб/с<sup>2</sup>. Відповідно до рис. 2, для тесту використано послідовність операцій керування, яка включає відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості з ustalеним значенням  $\omega^* = 7,5$  рад/с (5% від номінальної) та компенсацію постійного номінального генераторного моменту навантаження на інтервалі часу 0,6–1,3 с.

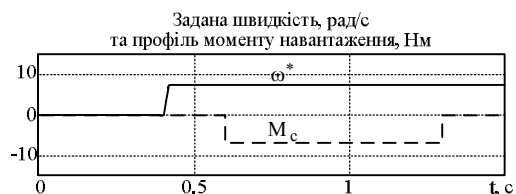


Рисунок 2 – Послідовність операцій керування

У першому тесті, графіки перехідних процесів якого показано на рис. 3,а, використовується задане потокозчеплення  $\psi^* = \psi_m^*$ , що призводить до  $\omega_0 \approx 0$ , тобто до втрати персистентності збудження під час компенсації генераторного моменту навантаження. З рис. 3,а видно, що кутова швидкість оцінюється некоректно, а тому виникають похибки відпрацювання кутової швидкості. При виконанні дру-

ного тесту (рис. 3,б) задане потокозчеплення формується відповідно до рівняння (11). У цьому випадку синхронна швидкість не дорівнює нулю, умови персистентності збудження виконуються, що дозволяє забезпечити нульові похибки оцінювання та відпрацювання кутової швидкості.

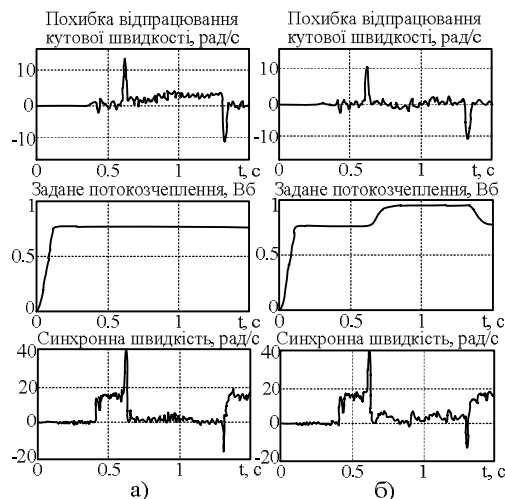


Рисунок 3 – Перехідні процеси

**ВИСНОВКИ.** На основі аналізу режимів роботи асинхронного двигуна в системі бездавачевого керування встановлено, що умови персистентності збудження, які визначають спостережуваність кутової швидкості, не виконуються для режимів збудження двигуна постійним струмом, які утворюються при роботі з генераторними моментами навантаження на малих швидкостях та при нульовій швидкості на холостому ході.

Запропонований алгоритм формування заданого потокозчеплення дозволяє уникнути режиму роботи з

постійним струмом у статорі й забезпечити стійкість системи у всьому діапазоні регулювання кутової швидкості. Результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого рішення.

ЛІТЕРАТУРА

- Holtz J. Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection? // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2006. – Iss. 53/2006 (1). – PP. 7–30.
- Montanary M., Peresada S., Tilli A. A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation // *Automatica*. – 2006. – Iss. 42/2006 (10). – PP. 1637–1650.
- Canudas De Wit C., Youssef A., Barbot J.P., Martin P., Malrait F. Observability conditions of induction motors at low frequencies // *Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. – Sydney, Australia, 2000. – Iss. 3/2000. – PP. 2044–2049.
- Ibarra-Rojas S., Moreno J., Espinosa-Perez G. Global observability analysis of sensorless induction motors // *Automatica*. – 2004. – Iss. 40/2004 (6). – PP. 1079–1085.
- Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Дымко С.С. Робастифицированное бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем на основе адаптивного наблюдателя пониженного порядка // *Техническая электродинамика*. – 2012. – Вып. 2. – С. 81–82.
- Zanasi R., Guarino Lo Bianco C., Tonielli A. Nonlinear filters for the generation of smooth trajectories // *Automatica*. – 2000. – Iss. 36/2000 (3). – PP. 439–448.

**PERSISTENCY OF EXCITATION CONDITIONS AND FLUX REFERENCE SELECTION ALGORITHM FOR SPEED SENSORLESS CONTROL OF INDUCTION MOTORS**

S. Peresada, S. Kovbasa, V. Blagodir

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: sergei.peresada@gmail.com

A new flux reference selection algorithm is developed with the aim of imposing the flux which maximizes the modulus of the synchronous speed, considering constraints on the minimum and maximum flux levels. Proposed solution guarantees persistency of excitation condition, which is related to observability properties of the induction motor model, in every operating point and therefore improves stability and speed tracking performances under regenerative loads at zero speed regions. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** induction motor, sensorless control, persistency of excitation.

REFERENCES

- Holtz, J. (2006), "Sensorless Control of Induction Machines – With or Without Signal Injection?", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, no. 1, pp. 7–30.
- Montanary, M., Peresada, S. and Tilli, A. (2006), "A speed-sensorless indirect field-oriented control for induction motors based on high gain speed estimation", *Automatica*, Vol. 42, no. 10, pp. 1637–1650.
- Canudas De Wit, C., Youssef, A., Barbot, J.P. and others (2000), "Observability conditions of induction motors at low frequencies", *Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 3, pp. 2044–2049.
- Ibarra-Rojas, S., Moreno, J. and Espinosa-Perez, G. (2004), "Global observability analysis of sensorless induction motors", *Automatica*, Vol. 40, no. 6, pp. 1079–1085.
- Peresada, S.M., Kovbasa, S.N. and Dymko, S.S. (2012), "Robustified sensorless vector control of induction motor based on adaptive reduced order observer", *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, Vol. 2, pp. 81–82. (in Russian)
- Zanasi, R., Guarino Lo Bianco, C. and Tonielli A. (2000), "Nonlinear filters for the generation of smooth trajectories", *Automatica*, Vol. 36, no. 3, pp. 439–448.