

СПОСТЕРІГАЧ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ БЕЗДАВАЧЕВИХ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ПОЛЕОРІЄНТОВАНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

С. М. Ковбаса, М. М. Желінський, С. С. Димко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація. Розроблено адаптивний спостерігач кутової швидкості ротора для бездавачевих систем генерування електроенергії на основі полеорієнтованого асинхронного генератора. Запропоноване рішення базується на структурі спостерігача Матсусе і завдяки теоретично обґрунтованим коригуючим зв'язкам забезпечує локальне експоненційне оцінювання постійної кутової швидкості та компонент вектора потокозчеплення ротора асинхронної машини. Синтезований спостерігач досліджено методом математичного моделювання та показано, що при виконанні умов персистентності збудження похибки оцінювання потокозчеплень та постійної кутової швидкості асимптотично сходяться до нуля.

Ключові слова: полеорієнтоване векторне керування, спостерігач кутової швидкості, асинхронний генератор.

Вступ

Системи генерування електричної енергії на базі полеорієнтованого асинхронного генератора з короткозамкненим ротором, функціональну схему якої показано на рис. 1, знаходять широке застосування для автономного живлення різних об'єктів [1–5]. Найбільш доцільною сферою використання таких систем є споживачі, що потребують живлення постійною напругою, тобто в яких навантаження може підключатися безпосередньо до ланки постійного струму, як показано на рис. 1, [6].

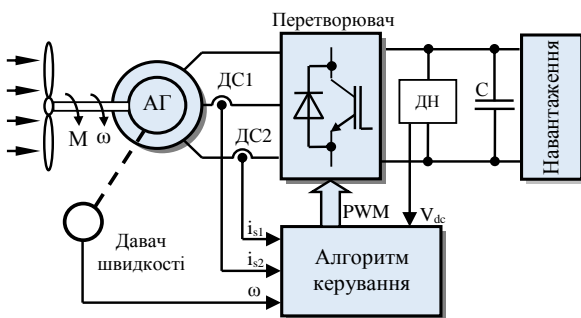


Рис. 1. Функціональна схема системи генерування електроенергії з полеорієнтованим асинхронним генератором

Вартість таких систем генерування є меншою за вартість систем на основі синхронних двигунів з постійними магнітами за рахунок застосування більш дешевої та надійної асинхронної машини [6], [7].

В класичних системах векторного керування полеорієнтованим генератором здійснюється

© Ковбаса С. М., Желінський М. М.,
Димко С. С., 2020

стабілізація напруги ланки постійного струму з використанням регулятора напруги [8], вихід якого формує завдання на моментоутворюючий струм статора генератора, як показано на рис. 2а. Така структура керування є аналогічною до випадку регулювання кутової швидкості, де регулятор швидкості також формує завдання на моментоутворюючий струм i_q , рис. 2б.

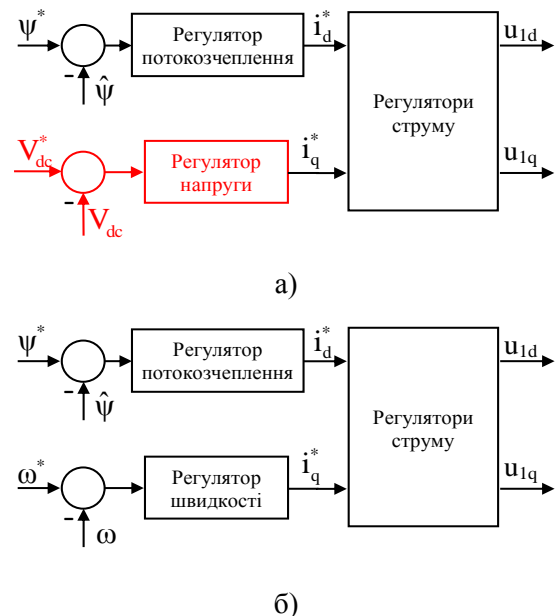


Рис. 2. Ідея побудови регулятора напруги

Важливою технологічною особливістю систем генерування енергії є те, що ротор генератора обертається або з постійною швидкістю, або з такою, що повільно змінюється. При цьому робота на низьких швидкостях як правило виключається, оскільки в таких режимах система гене-

рування енергії матиме низький коефіцієнт корисної дії. Вказані особливості створюють сприятливі умови для застосування бездавачевих методів керування асинхронними генераторами [7], оскільки режими втрати умов персистентності збудження уникаються на технологічному рівні. Крім того, відмова від давача швидкості дозволяє додатково зменшити вартість системи генерування, особливо в пристроях малої потужності, в яких вартість двигуна є співрозмірною з вартістю давача швидкості.

Мета

Метою статті є розробка спостерігача кутової швидкості ротора асинхронної машини для систем бездавачевого векторного керування напругою ланки постійного струму та модулем вектора потокозчеплення асинхронного генератора.

1. Постановка задачі оцінювання

Розглянемо математичну модель електричної частини асинхронної машини у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta\omega\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - \omega\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + \omega\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \end{aligned} \quad (1)$$

де (i_{1a}, i_{1b}) , (ψ_{2a}, ψ_{2b}) , (u_{1a}, u_{1b}) – компоненти векторів струму статора, потокозчеплень ротора та напруг статора в стаціонарній системі координат $(a-b)$, ω – кутова швидкість ротора, $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$,

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad R_1, R_2 \text{ та}$$

L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора та ротора відповідно, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру. Без втрати загальності, в моделі (1) прийнято одну пару полюсів.

Нехай для моделі (1) виконуються наступні припущення:

A.1. Струми статора i_{1a}, i_{1b} доступні для вимірювання.

A.2. Сигнали $(i_{1a}, i_{1b}), (\psi_{2a}, \psi_{2b}), (u_{1a}, u_{1b})$, ω є обмеженими; сигнали i_{1a}, i_{1b} мають обмежену похідну.

A.3. Всі параметри в моделі (1) є відомими та постійними.

A.4. Кутова швидкість ω невідома але постійна або змінюється повільно, так що $\dot{\omega} \approx 0$.

В умовах припущень A.1 – A.4 для системи (1) необхідно синтезувати адаптивний асимптотичний спостерігач, який буде гарантувати виконання наступних цілей керування:

O.1. Асимптотичне оцінювання змінних стану, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b) = 0, \quad (2)$$

де $\tilde{i}_a = i_{1a} - \hat{i}_{1a}$, $\tilde{i}_b = i_{1b} - \hat{i}_{1b}$, $\tilde{\psi}_a = \psi_{2a} - \hat{\psi}_{2a}$, $\tilde{\psi}_b = \psi_{2b} - \hat{\psi}_{2b}$ – похибки оцінювання, $(\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b)$ – оцінені значення змінних $(i_{1a}, i_{1b}, \psi_{2a}, \psi_{2b})$.

O.2. Асимптотичне оцінювання невідомої кутової швидкості, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$, $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$, $\hat{\omega}$ – оцінена кутова швидкість.

2. Синтез спостерігача потокозчеплення ротора повного порядку за умови вимірювання кутової швидкості

Для моделі (1) виконаємо лінійне перетворення координат [9]

$$\begin{aligned} z_a &= i_{1a} + \beta\psi_{2a}, \\ z_b &= i_{1b} + \beta\psi_{2b}. \end{aligned} \quad (3)$$

В нових координатах модель електричної частини асинхронної машини (1) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \dot{z}_a &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1a} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{z}_b &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\ \dot{i}_{1a} &= -(\gamma + \alpha)i_{1a} - \omega i_{1b} + \alpha z_a + \omega z_b + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -(\gamma + \alpha)i_{1b} + \omega i_{1a} + \alpha z_b - \omega z_a + \frac{1}{\sigma}u_{1b}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для системи (4) сформуємо спостерігач повного порядку у формі

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_a &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1a} + \frac{1}{\sigma}u_{1a} + v_a, \\ \dot{\hat{z}}_b &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} + \frac{1}{\sigma}u_{1b} + v_b, \\ \dot{\hat{i}}_{1a} &= -(\gamma + \alpha)i_{1a} - \omega i_{1b} + \alpha \hat{z}_a + \omega \hat{z}_b + k_1 \tilde{i}_a + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{\hat{i}}_{1b} &= -(\gamma + \alpha)i_{1b} + \omega i_{1a} + \alpha \hat{z}_b - \omega \hat{z}_a + k_1 \tilde{i}_b + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \end{aligned} \quad (5)$$

де k_1 – коефіцієнт зворотного зв'язку, v_a, v_b – коригуючі сигнали, які будуть синтезовані далі.

Визначивши похибки оцінювання змінних z_a, z_b у вигляді

$$\begin{aligned}\tilde{z}_a &= z_a - \hat{z}_a, \\ \tilde{z}_b &= z_b - \hat{z}_b,\end{aligned}\quad (6)$$

запишемо рівняння динаміки оцінювання

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{z}}_a &= -v_a, \\ \dot{\tilde{z}}_b &= -v_b, \\ \dot{\tilde{i}}_a &= \alpha\tilde{z}_a + \omega\tilde{z}_b - k_I\tilde{i}_a, \\ \dot{\tilde{i}}_b &= \alpha\tilde{z}_b - \omega\tilde{z}_a - k_I\tilde{i}_b.\end{aligned}\quad (7)$$

Для синтезу коригуючих зворотних зв'язків v_a і v_b розглянемо наступну функцію Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{z}_a^2 + \tilde{z}_b^2 + \tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2) > 0. \quad (8)$$

Похідна від (8) вздовж траєкторій (7) дорівнює

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -\tilde{z}_a v_a - \tilde{z}_b v_b + \alpha\tilde{z}_a \tilde{i}_a + \omega\tilde{z}_b \tilde{i}_a - \\ &- k_I \tilde{i}_a^2 + \alpha\tilde{z}_b \tilde{i}_b - \omega\tilde{z}_a \tilde{i}_b - k_I \tilde{i}_b^2.\end{aligned}\quad (9)$$

Після формування коригуючих зв'язків у вигляді

$$\begin{aligned}v_a &= \alpha\tilde{i}_a - \omega\tilde{i}_b, \\ v_b &= \omega\tilde{i}_a + \alpha\tilde{i}_b,\end{aligned}\quad (10)$$

похідна (9) дорівнюватиме

$$\dot{V} = -(k_I + \alpha)(\tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2) \leq 0. \quad (11)$$

З (8), (11) слідує, що змінні $(\tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{z}_a, \tilde{z}_b)$ є обмеженими, а відповідно й змінні $(\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b, \hat{z}_a, \hat{z}_b)$ також обмежені. Оскільки $V_I(t) \leq \frac{V_I(0)}{k_I + \alpha}$, то сигнали \tilde{i}_a, \tilde{i}_b є квадратично інтегрованими, і, відповідно, з леми Барбалат [10] отримаємо $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b) = 0$.

Запишемо систему (7) з врахуванням (10) в наступній стандартній формі [10]:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{i}} + \boldsymbol{\lambda}^T(t)\tilde{\mathbf{z}}, \\ \dot{\tilde{\mathbf{z}}} &= -\boldsymbol{\lambda}(t)\tilde{\mathbf{i}},\end{aligned}\quad (12)$$

де $\tilde{\mathbf{i}} = (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b)^T$, $\tilde{\mathbf{z}} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b)^T$, $\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -k_I & 0 \\ 0 & -k_I \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{\lambda}^T = \begin{bmatrix} \alpha & \omega \\ -\omega & \alpha \end{bmatrix}$, при цьому

$$\int_t^{t+T} \boldsymbol{\lambda}(\tau)\boldsymbol{\lambda}^T(\tau)d\tau > 0 \forall t \geq 0, T > 0. \quad (13)$$

Використовуючи методи теорії адаптивних систем [10], встановлюємо, що, якщо умови персистентності збудження (13) виконуються, то положення рівноваги

$$(\tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{z}}) = 0, \quad (14)$$

є глобально експоненційно стійким, тобто похибки оцінювання компонент вектора потокозчеплення ротора $\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b$ експоненційно згасають в нуль.

Тобто рівняння (5) з коригуючими зв'язками (10) визначають асимптотичний спостерігач з властивостями експоненційної стійкості для електричної підсистеми асинхронної машини.

3. Синтез адаптивного спостерігача при невідомій кутовій швидкості ротора

В системі бездавачевого векторного керування інформація про реальну кутову швидкість ω є недоступною для вимірювання. Тому модифікуємо спостерігач заданий рівняннями (5), (10) замінивши реальну швидкість ω на її оцінене значення $\hat{\omega}$

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}_a &= -\frac{R_I}{\sigma} \hat{i}_{Ia} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{Ia} + \alpha\tilde{i}_a - \hat{\omega}\tilde{i}_b, \\ \dot{\hat{z}}_b &= -\frac{R_I}{\sigma} \hat{i}_{Ib} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{Ib} + \hat{\omega}\tilde{i}_a + \alpha\tilde{i}_b, \\ \dot{\hat{i}}_a &= -(\gamma + \alpha)\hat{i}_{Ia} - \hat{\omega}\hat{i}_{Ib} + \alpha\hat{z}_a + \hat{\omega}\hat{z}_b + k_I\tilde{i}_a + \frac{\mathbf{u}_{Ia}}{\sigma}, \\ \dot{\hat{i}}_b &= -(\gamma + \alpha)\hat{i}_{Ib} + \hat{\omega}\hat{i}_{Ia} + \alpha\hat{z}_b - \hat{\omega}\hat{z}_a + k_I\tilde{i}_b + \frac{\mathbf{u}_{Ib}}{\sigma}.\end{aligned}\quad (15)$$

У відповідності до рівнянь (1), (15), а також визначення похибки оцінювання кутової швидкості $\tilde{\omega}$, динаміка похибок оцінювання електричних змінних запишеться у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{z}}_a &= -\alpha\tilde{i}_a + \hat{\omega}\tilde{i}_b, \\ \dot{\tilde{z}}_b &= -\hat{\omega}\tilde{i}_a - \alpha\tilde{i}_b, \\ \dot{\tilde{i}}_a &= \alpha\tilde{z}_a + \hat{\omega}\tilde{z}_b - \tilde{\omega}\hat{i}_{Ib} + \tilde{\omega}\hat{z}_b + \tilde{\omega}\tilde{z}_b - k_I\tilde{i}_a, \\ \dot{\tilde{i}}_b &= \alpha\tilde{z}_b - \hat{\omega}\tilde{z}_a + \tilde{\omega}\hat{i}_{Ia} - \tilde{\omega}\hat{z}_a - \tilde{\omega}\tilde{z}_a - k_I\tilde{i}_b.\end{aligned}\quad (16)$$

Для синтезу спостерігача кутової швидкості розглянемо для системи (16) наступну функцію Ляпунова

$$V = \frac{1}{2} \left(z_a^2 + z_b^2 + \tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2 + \frac{1}{\gamma_\omega} \tilde{\omega}^2 \right) > 0. \quad (17)$$

Похідна від (17) вздовж траєкторій (16) дорівнює

$$\dot{V} = -k_I \tilde{i}_a^2 - k_I \tilde{i}_b^2 - \tilde{\omega} i_{Ib} \tilde{i}_a + \tilde{\omega} i_{Ia} \tilde{i}_b + \tilde{\omega} \tilde{z}_b \tilde{i}_a + \tilde{\omega} \tilde{z}_a \tilde{i}_b - \tilde{\omega} \tilde{z}_a \tilde{i}_b - \tilde{\omega} \tilde{z}_b \tilde{i}_a + \frac{I}{\gamma_\omega} \dot{\tilde{\omega}} \tilde{\omega} \quad (18)$$

Після формування динаміки похибки оцінювання кутової швидкості

$$\dot{\tilde{\omega}} = -\gamma_\omega [(\hat{z}_b - i_{Ib}) \tilde{i}_a - (\hat{z}_a - i_{Ia}) \tilde{i}_b], \quad (19)$$

та нехтуючи членами високого ступеня малості $\tilde{\omega} \tilde{z}_b \tilde{i}_a$ та $\tilde{\omega} \tilde{z}_a \tilde{i}_b$, похідна (18) набуде вигляду

$$\dot{V} = -k_I \tilde{i}_a^2 - k_I \tilde{i}_b^2 < 0. \quad (20)$$

Повні рівняння динаміки оцінювання задаються виразами (16), (19), а спостерігач кутової швидкості визначається як

$$\hat{\omega} = -\dot{\tilde{\omega}} + \gamma_\omega [(\hat{z}_b - i_{Ib}) \tilde{i}_a - (\hat{z}_a - i_{Ia}) \tilde{i}_b]. \quad (21)$$

Слідуючи концептуальній лінії аналізу, що була застосована для неадаптивного спостерігача (5), з (17) і (20) встановлюємо, що сигнали $(\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{\omega})$ обмежені, а, відповідно і змінні $(\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b, \hat{\omega})$ будуть обмеженими. Система (16), (19) може бути представлена в формі (12) з $\tilde{\mathbf{z}} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{\omega})^T$, $\boldsymbol{\lambda}^T(t) = \begin{bmatrix} \alpha & \hat{\omega} & \gamma_\omega \zeta_a \\ -\hat{\omega} & \alpha & -\gamma_\omega \zeta_b \end{bmatrix}$, $\zeta_a = \hat{z}_a - i_{Ia}$, $\zeta_b = \hat{z}_b - i_{Ib}$, при цьому умова персистентності збудження (13) виконуються при $\hat{\psi}_a \neq 0, \hat{\psi}_b \neq 0$. В цьому випадку положення рівноваги лінеаризованої системи (16), (19) $\mathbf{x} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{i}_a, \tilde{i}_b, \tilde{\omega}) = 0$ є глобально експоненційно стійким, а, відповідно, нелінеаризована система (16), (19) буде локально експоненційно стійкою.

4. Дослідження динамічних процесів оцінювання кутової швидкості методом математичного моделювання

Адаптивний спостерігач кутової швидкості, заданий рівняннями (15), (21) досліджено методом математичного моделювання в автономному режимі у складі системи векторного керування кутовою швидкістю АД. Тобто інформація про оцінену спостерігачем кутову швидкість не використовується в системі керування.

Послідовність операцій керування, яку використано при дослідженні та проілюстровано на рис. 3, включає наступні етапи: на початковому

інтервалі часу відбувається збудження двигуна; починаючи з $t = 1$ с ненавантажений двигун розганяється до швидкості 100 рад/с; при $t = 2$ с до валу двигуна прикладається, а при $t = 2.5$ с знімається рушійний момент навантаження; при $t = 3$ с до валу двигуна прикладається, а при $t = 3.5$ с знімається генераторний момент навантаження.

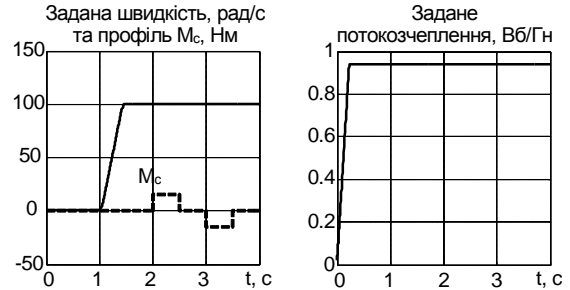


Рис. 3. Послідовність операцій керування

Графіки перехідних процесів оцінювання струмів, змінних z_a, z_b , а також кутової швидкості показано на рис. 4.

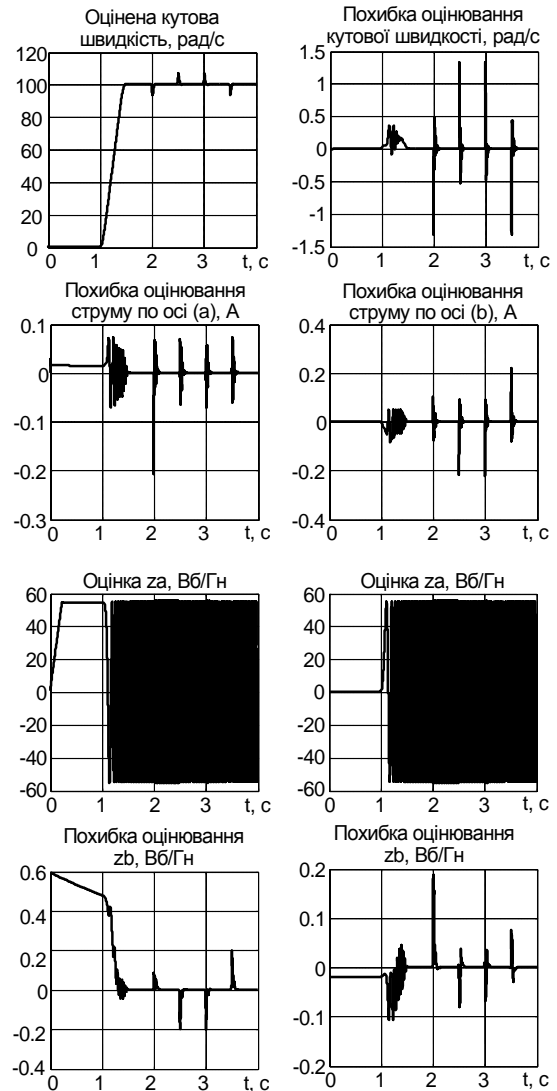


Рис. 4. Перехідні процеси в адаптивному спостерігачі кутової швидкості

Перехідні процеси оцінювання координат асинхронної машини наведено на рис. 4. Як слід з графіків на рис. 4, розроблений адаптивний спостерігач забезпечує асимптотичне оцінювання струмів, потокозчеплень та кутової швидкості за умови $\omega = const$. При зміні кутової швидкості при русі по заданій траєкторії, а також під час прикладання-зняття моменту навантаження, виникає незначна динамічна похибка її оцінювання, яка в умовах тесту не перевищує 1.5 рад/с.

Висновки

Розроблено адаптивний спостерігач кутової швидкості ротора асинхронної машини для систем генерування електричної енергії на базі асинхронного полеорієнтованого генератора. Завдяки теоретично обґрунтованим коригуючим зворотним зв'язкам, розроблений спостерігач забезпечує локальне асимптотичне оцінювання компонент модуля вектора потокозчеплення ротора та постійної кутової швидкості, що підтверджено результатами математичного моделювання. Запропоноване рішення може використовуватися також і в бездавачевих асинхронних електроприводах, які працюють з постійною, або такою, що повільно змінюється, швидкістю.

Список використаної літератури

1. Simões, M. G. Modeling and analysis with induction generators [Text] / M. G. Simões, F. A. Farret. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 468 p.
2. Carunaiselvane, C. Present trends and future prospects of asynchronous machines in renewable energy systems [Text] / C. Carunaiselvane, T. R. Chelliah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 74. – P. 1028–1041.
3. Lyra, R. O. C. Direct and indirect flux control of an isolated induction generator [Text] / R. O. C. Lyra, S. R. Silva, P. C. Cortizo // *Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95*. – IEEE, 1995. – Vol. 1. – P. 140–145.
4. Levi, E. Rotor flux oriented induction machine as a DC power generator [Text] / E. Levi, Y. W. Liao // *Proceedings of 8th European conference on power electronics and applications EPE'99*. – Lausanne, Switzerland: CD-ROM, Paper 001, 1999. – P. 1–8.
5. Cimuca, G. Design and control strategies of an induction-machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator [Text] / G. Cimuca, S. Breban, M. M. Radulescu, C. Saudemont, B. Robyns // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2010. – Vol. 25. – No. 2. – P. 526–534.

6. Peresada, S. Indirect field oriented output feedback linearized control of induction generator [Text] / S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, N. Zhelinskyi // 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kyiv, 2016. – P. 187–191.

7. Peresada, S. Speed sensorless direct field oriented control of induction generator [Text] / S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi, A. Duchenko // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Kyiv, 2017. – P. 548–553.

8. Peresada, S. Indirect field oriented control of the saturated induction generators with linear PI regulators [Text] / S. Peresada, M. Zhelinskyi, S. Kovbasa, S. Korol // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, 2019. – P. 138–143.

9. Пересада, С. М. Адаптивний наблюдатель Матсуе: новый синтез, гарантирующий асимптотичность оценивания вектора потокозчепления и активного сопротивления ротора асинхронного двигателя [Текст] / С. М. Пересада, В. С. Бовкунович, С. Н. Ковбаса // *Техническая электродинамика*. – 2010. – Вып. 3. – С. 28–32.

10. Narendra, K. S. Stable adaptive systems [Text] / K. S. Narendra, A. M. Annaswamy. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. – 496 p.

References

1. Simões, M. G., and Farret, F. A., (2015). Modeling and analysis with induction generators, 3 edition. Boca Raton: CRC Press, 468 p.
2. Carunaiselvane, C., and Chelliah, T., (2017). “Present trends and future prospects of asynchronous machines in renewable energy systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1028–1041. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.069
3. Lyra, R.O.C., Silva, S.R., and Cortizo, P.C. (1995). “Direct and indirect flux control of an isolated induction generator”. *Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95*, 1995, vol. 1, pp. 140–145. DOI: 10.1109/PEDS.1995.404933
4. Levi, E., and Liao, Y.W., (1999). “Rotor Flux Oriented Induction Machine as a DC Power Generator”. *Proceedings of 8th European Conf. on Power Electronics and Applications EPE*. Lausanne, Switzerland, CD-ROM, Paper 001, pp. 1–8.
5. Cimuca, G., Breban, S., Radulescu, M. M., Saudemont, C., and Robyns, B., (2010). “Design and control strategies of an induction-machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator”. *IEEE Transactions*

on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 526–534. DOI: /10.1109/TEC.2010.2045925

6. Peresada, S., Kovbasa, S., Korol, S., Pechenik, N., and Zhelinskyi, N., (2016). “Indirect field oriented output feedback linearized control of induction generator”. *2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, pp. 187–191. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521881

7. Peresada, S., Kovbasa, S., Zhelinskyi, M., and Duchenko, A., (2017). “Speed sensorless direct field oriented control of induction generator”. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, pp. 548–553. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100304

8. Peresada, S., Zhelinskyi, M., Kovbasa, S. and Korol, S., (2019). Indirect Field Oriented Control of the Saturated Induction Generators with Line-

ar PI Regulators. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, pp. 138–143. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764203

9. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N., Bovkunovich, V. S., (2010). “Adaptive observer Matsuse: a new synthesis that guarantees the asymptotics of estimating the flux linkage vector and the active resistance of the rotor of an induction motor” [Adaptivnyi nablyudatel Matsuse: novyyi sintez, garantiruyuschiy asimp-totichnost otsenivaniya vektora potokostsepleniya i aktivnogo soprotivleniya rotora asinhronnogo dvigatelya]. *Tekhnichna elektrodynamika*, №3, pp. 28–32.

10. Narendra, K. S., and Annaswamy, A. M., (1989). *Stable Adaptive Systems*. New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 496 p.

SPEED OBSERVER FOR SENSORLESS ENERGY GENERATION SYSTEMS BASED ON FIELD ORIENTED INDUCTION GENERATOR

S. Kovbasa, M. Zhelinskyi, S. Dymko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract. *The paper presents a novel adaptive speed – rotor flux linkage observer for sensorless field oriented control of induction generators. The proposed solution is based on Matsuse observer structure together with specially designed correction terms and utilize current measurement and calculated stator voltages for real-time flux and speed reconstruction. A special coordinate transformation is used to avoid non-linear parametrization in the right side of flux linkages differential equations. Adaptive observer is designed in two steps: at the first step nonadaptive flux linkage observer is designed under condition of speed measurement; at the second step adaptive to rotor speed version of the flux linkage observer is designed. Information about rotor speed for adaptive flux observer is calculated by developed speed observer. A second Lyapunov’s method together with adaptive control theory are utilized for observer’s correction terms synthesis and stability proof. Designed adaptive observer under persistence of excitation conditions guarantees local exponential estimation of constant rotor speed and flux linkage vector components of induction machine. From the practical point of view persistency excitation conditions are met if rotor flux linkages are nonzero. Proposed solution investigated by simulations. It is shown, that developed adaptive speed observer provides asymptotic estimation of induction motor currents, speed and flux linkage components under constant speed conditions. For varying speed proposed observer provides estimation of required variables with a small dynamic error. Proposed observer can be used in energy generation systems based on induction generators as well as in sensorless induction motor-based drive systems with constant or slowly varying rotor speed.*

Keywords: *field oriented vector control, speed observer, induction generator.*

НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПОЛЕОРИЕНТОВАННОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

С. Н. Ковбаса, Н. Н. Желинский, С. С. Дымко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Аннотация. *Разработан адаптивный наблюдатель угловой скорости ротора для бездатчиковых систем генерирования электроэнергии на основе полеориентованного асинхронного генератора. Предложенное решение базируется на структуре наблюдателя Матсусе и благодаря теоретически*

обоснованным корректирующим связям обеспечивает локальное экспоненциальное оценивание постоянной угловой скорости и компонент вектора потокосцепления ротора асинхронной машины. Методом математического моделирования показано, что синтезированный наблюдатель при выполнении условий персистентности возбуждения обеспечивает асимптотическое схождение в ноль ошибок оценивания постоянной угловой скорости и компонент вектора потокосцепления ротора.

Ключевые слова: полеориентированное векторное управление, наблюдатель угловой скорости, асинхронный генератор.

Отримано 11.03.2020



Ковбаса Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: skovbasa@ukr.net, тел. +38-067-435-18-81

Sergiy Kovbasa, Ph.D., Associate Professor of the department automation of electromechanical systems and the electrical drives, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: skovbasa@ukr.net, тел. +38-067-435-18-81

ORCID ID: 0000-0002-2954-455X



Димко Сергій Сергійович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: sdymko@ukr.net, тел. +38-067-362-36-64

Serhii Dymko, Ph.D., Senior Lecturer of automation of electromechanical systems and the electrical drives department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: sdymko@ukr.net, тел. +38-067-362-36-64

ORCID ID: 0000-0003-4996-6642



Желінський Микола Миколайович, асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com, тел. +38-098-646-10-34

Mykola Zhelinskyi, Research Assistant of the department automation of electromechanical systems and the electrical drives, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com, тел. +38-098-646-10-34

ORCID ID: 0000-0003-4862-1802