

УДК 62-83

О.І. ТОЛОЧКО (д-р техн. наук, проф.), **Г.С. ЧЕКАВСЬКИЙ** (канд. техн. наук, доц.),
І.О. ЖУРОВ

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
master_1@ukr.net

АДАПТИВНИЙ СПОСТЕРІГАЧ СТАНУ ДЛЯ ПОТОЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВЕКТОРА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ РОТОРА І АКТИВНИХ ОПОРІВ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Виконано синтез адаптивного спостерігача стану, що оцінює модуль та кутове розташування у просторі вектору потокозчеплення ротора асинхронного двигуна для задач векторного керування. Синтезований спостерігач адаптується до зміни активних опорів обмоток статора і ротору асинхронного двигуна за рахунок їх ідентифікації в режимі реального часу. Приведені результати математичного моделювання системи векторного керування асинхронного електропривода з використанням розробленого спостерігача, що підтверджують високу точність оцінювання зазначених величин.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, адаптивний спостерігач стану, ідентифікація активних опорів, потокозчеплення ротора, функція Ляпунова.

Постановка проблеми. Відомо, що для якісної роботи алгоритмів векторного полеорієнтованого керування асинхронним двигуном (АД) необхідним є досить точно визначення параметрів вектора $\vec{\psi}_r$ потокозчеплення ротора, а саме – його модуля $|\psi_r|$ та просторового кутового положення $\theta_{\psi r}$. Безпосереднє вимірювання потокозчеплення за допомогою датчиків Холла має відомі недоліки, що пов'язані з ускладненням конструкції машини, а деколи – з неможливістю встановлення зазначених датчиків із технологічних причин.

Більш перспективним є непряме визначення вектора $\vec{\psi}_r$ за допомогою пристроїв ідентифікації (математичних моделей, спостерігачів стану), але при цьому для отримання достатньої точності оцінювання зазначених величин необхідним є наявність інформація про параметри об'єкта регулювання, тобто, АД. У більшості з пристроїв ідентифікації до таких параметрів відносяться активні та індуктивні опори статора та ротора (R_s, R_r), що змінюються в процесі роботи внаслідок нагріву, та індуктивність від основного потоку L_m , яка змінюється при насиченні магнітної системи. Часто (наприклад, за умови стабілізації $|\psi_r|$ на номінальному рівні) зміною L_m можна знехтувати, тоді основними змінними параметрами електромагнітних кіл АД залишаються зазначені активні опори.

Відомо, що при невірно заданих параметрах об'єкта регулювання ідентифікатор буде визначати $|\psi_r|$ та $\theta_{\psi r}$ із похибками. Це може привести до суттєвого погіршення динамічних та статичних характеристик системи електропривода, а при значних похибках в параметрах моделі система може навіть втратити стійкість. Отже, розробка пристрою ідентифікації модуля та кутового положення вектора $\vec{\psi}_r$ потокозчеплення ротора АД, що адаптується до зміни величин активних опорів обмоток асинхронної машини, є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. Один з найпростіших методів ідентифікації потокозчеплення ротору [1, 2 та ін.], пов'язаний із використанням моделі роторного кола АД, базується на таких виразах:

$$|\hat{\psi}_r| = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd}; \quad \hat{\omega}_{\psi r} = \frac{K_r R_r i_{sq}}{|\hat{\psi}_r|}; \quad \hat{\theta}_{\psi r} = \frac{\hat{\omega}_{\psi r}}{p},$$

де $T_r = L_r / R_r$ – стала часу роторного кола; $K_r = L_m / L_r$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора.

Недоліком такого методу ідентифікації можна вважати наявність операції чистого інтегрування, що призводить до накопичування помилки оцінювання кута повороту вектора $\vec{\psi}_r$. Окрім цього, така модель не придатна для побудови на її основі спостерігача стану через відсутність сигналу для корекції. Ідентифікація активних опорів в режимі реального часу також є проблематичною. Більш ефективними є методи ідентифікації, що базуються на використанні моделі АД в нерухомій системі координат статора α, β . На основі такої моделі спостерігачі стану здебільш синтезуються як нелінійні пристрої ідентифікації, що значно ускладнює їх синтез та структуру.

Метою статті є синтез на основі α, β -моделі електромагнітних кіл статора і ротора АД спрощеного спостерігача стану, що оцінює амплітуду і просторове положення вектору потокозчеплення ротору двигуна та адаптується до зміни активних опорів обмоток АД за рахунок їх ідентифікації в режимі реального часу.

Результати досліджень. Система диференціальних рівнянь у нормальній формі Коші, що є математичним описом АД в системі координат α, β без урахування механічної частини двигуна, яка закладається в основу спостерігача, має такий вигляд:

$$\begin{cases} p i_{s\alpha} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} \psi_{r\alpha} + \frac{K_r z_p \omega}{\sigma L_s} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha}; \\ p \psi_{r\alpha} = K_r R_r i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - z_p \omega \psi_{r\beta}; \\ p i_{s\beta} = -\frac{K_r z_p \omega}{\sigma L_s} \psi_{r\alpha} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) i_{s\beta} + \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta}; \\ p \psi_{r\beta} = z_p \omega \psi_{r\alpha} + K_r R_r i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta}, \end{cases} \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт розсіювання АД, L_s – індуктивність обмотки статора z_p – кількість пар полюсів;

Якщо в лівих частинах рівнянь (1) складові, в які входить множник ω , операцію множення двох сигналів замінити операцією множення сигналів $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ на змінний коефіцієнт ω , то математичний опис такої моделі у просторі станів матиме вигляд:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\mathbf{x} = [i_{s\alpha} \ \psi_{r\alpha} \ i_{s\beta} \ \psi_{r\beta}]^T$, $\mathbf{u} = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]^T$, $\mathbf{y} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} & 0 & \frac{z_p K_r \omega}{\sigma L_s} \\ \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & 0 & -z_p \omega \\ 0 & -\frac{z_p K_r \omega}{\sigma L_s} & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} \\ 0 & z_p \omega & \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

тобто модель матиме 2 входи, а до матриці стану входять 4 коефіцієнти, що змінюються пропорційно швидкості обертання двигуна.

На основі такої моделі синтезують нелінійний двоканальний взаємозв'язаний СС 4-го порядку.

Для спрощення синтезу СС запропонуємо дещо іншу трактовку моделі (1). Сигнал ω будемо вважати третім входом моделі, а сигнали $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ в зворотних зв'язках – змінними коефіцієнтами, на які помножується вхідний сигнал швидкості. При такому припущенні математичний опис досліджуваної моделі у просторі станів дещо зміниться, а саме:

$$\mathbf{u} = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta} \ \omega]^T;$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} & 0 & 0 \\ \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} \\ 0 & 0 & \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & \frac{z_p K_r \psi_{r\beta}}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 & -z_p \psi_{r\beta} \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{z_p K_r \psi_{r\alpha}}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 & z_p \psi_{r\alpha} \end{bmatrix}.$$

З виразу для матриці стану видно, що такий підхід дозволяє виконати декомпозицію моделі, тобто розділити її на 2 незалежні канали з однаковими лінійними матрицями стану та матрицями виходу. Оскільки коефіцієнти коригувальних зв'язків СС залежать тільки від елементів матриць стану та виходу, то для синтезу СС можна скористуватися лінійною моделлю рис. 1.

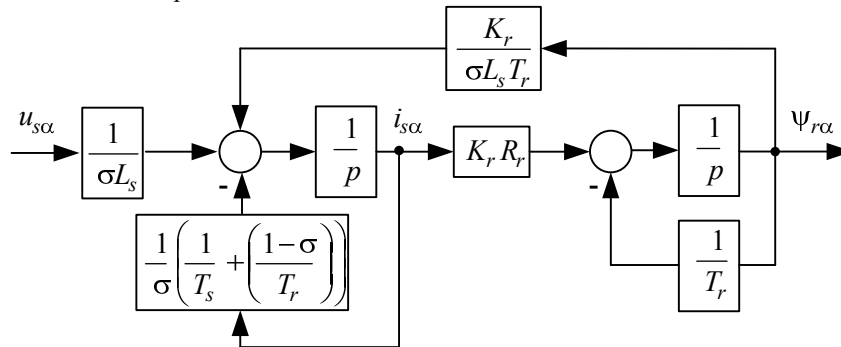


Рисунок 1 – Лінеаризована модель АД для синтезу СС за каналом α

Використовуючи стандартний підхід до синтезу СС, як SISO-системи, отримуємо коригувальні коефіцієнти, що забезпечують спостерігачу бажаний характеристичний поліном (ХП):

$$G_6(p) = p^2 + \alpha_1 \Omega_C p + \alpha_0 \Omega_C^2,$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma T_s T_r \alpha_1 \Omega_C + T_r - \sigma T_s - T_s (\sigma - 1)}{\sigma T_s T_r} \\ \frac{\sigma L_s \alpha_0 T_r^2 \Omega_C^2 - \sigma L_s \alpha_1 T_r \Omega_C + L_m K_r + \sigma L_s}{K_r T_r} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де α_0, α_1 – коефіцієнти бажаного характеристичного поліному (ХП) спостерігача, Ω_C – середньо-геометричний корінь ХП.

Наступним етапом є адаптація синтезованого спостерігача до зміни активних опорів двигуна за рахунок їх ідентифікації в режимі реального часу. Зазвичай їх визначають, використовуючи теплові моделі двигуна різного ступеня складності та точності. Один із альтернативних способів їх оцінювання пов'язаний із використанням методу Ляпунова.

Згідно із зазначеним методом, спочатку необхідно підібрати знаковизначену функцію Ляпунова для спостерігача, яка служить критерієм стійкості для нелінійної системи. Для асимптотичної стійкості спостерігача необхідним та достатнім буде знаковизначеність похідної від функції Ляпунова за часом і протилежність знаку цієї похідної самій функції Ляпунова.

У нашому випадку доцільно використати таку функцію Ляпунова [3]:

$$V = \tilde{\mathbf{i}}_s^T \tilde{\mathbf{i}}_s + \frac{(\hat{R}_r - R_r)^2}{a}, \quad (4)$$

де a – додатна константа. Відзначимо, що величина R_s при цьому вважається незмінною величиною.

У [3] отриманий вираз для оцінки активного опору ротора, використання якого є достатньою умовою стійкості спостерігача стану:

$$\frac{d\hat{R}_r}{dt} = \frac{a K_r}{\sigma L_s L_r} \left[(\hat{\Psi}_{r\alpha} - L_m \hat{i}_{s\alpha}) \tilde{i}_{s\alpha} + (\hat{\Psi}_{r\beta} - L_m \hat{i}_{s\beta}) \tilde{i}_{s\beta} \right]. \quad (5)$$

Як бачимо, у правому боці рівняння (5) містяться лише ті величини, які при синтезі СС приймалися незмінними. Інтегрування цього виразу дає можливість оцінювання активного опору ротора в реальному часі.

При використанні такого ж підходу можна отримати вираз для оцінки активного опору статора:

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = -\frac{a}{\sigma L_s} (\hat{i}_{s\alpha} \tilde{i}_{s\alpha} + \hat{i}_{s\beta} \tilde{i}_{s\beta}). \quad (6)$$

Отримані оцінки у моделі СС замінюють відповідні параметри активних опорів. Структурна схема запропонованого спостерігача має вигляд, зображений на рис. 2.

Проаналізуємо роботу розробленого спостерігача стану методом моделювання в середовищі *Simulink* пакету *MatLab*. В якості початкових умов ідентифікатору активних опорів були прийняті номінальні значення R_s, R_r , зменшені на 20%. При цьому в моделі двигуна значення активних опорів були збільшені на 20%. На рис. 3 приведені графіки перехідних процесів в СВК АД з адаптивним спостерігачем стану.

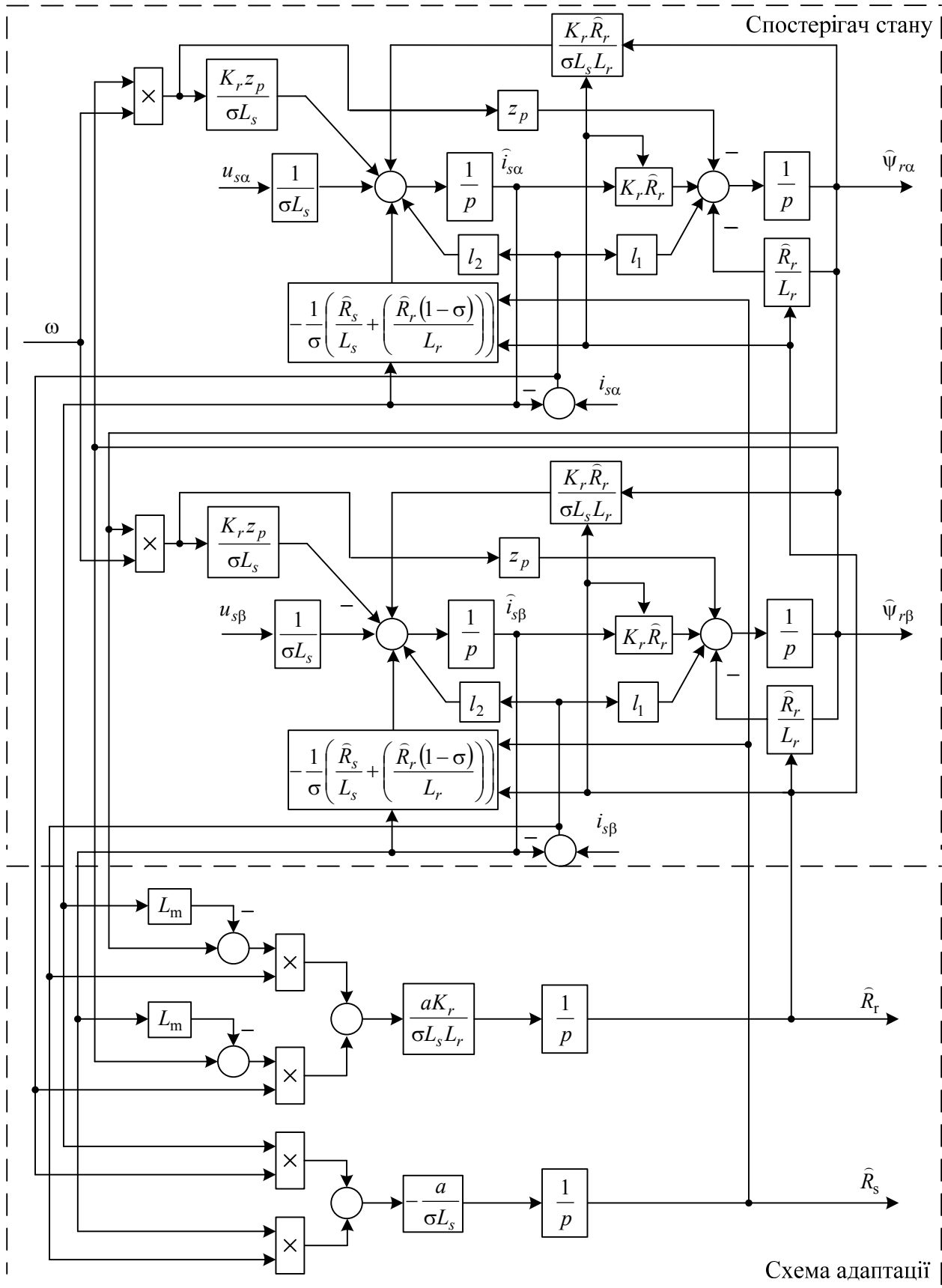


Рисунок 2 – Структурна схема синтезованого адаптивного спостерігача стану.

Дослідження проводились для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу МТК-11-6. Слід також відзначити, що при моделюванні перетворювач частоти був представлений аперіодичною ланкою зі сталою часу $T_{\mu} = 0,1$ мс. При цьому налаштування системи векторного керування АД виконувалося за модульним оптимумом. В якості бажаного ХП при синтезі СС прийнято поліном Баттерворта 2-го порядку ($\alpha_0 = 1$; $\alpha_1 = \sqrt{2}$) зі середньгеометричним коренем $\Omega_C = 10^4$ с⁻¹.

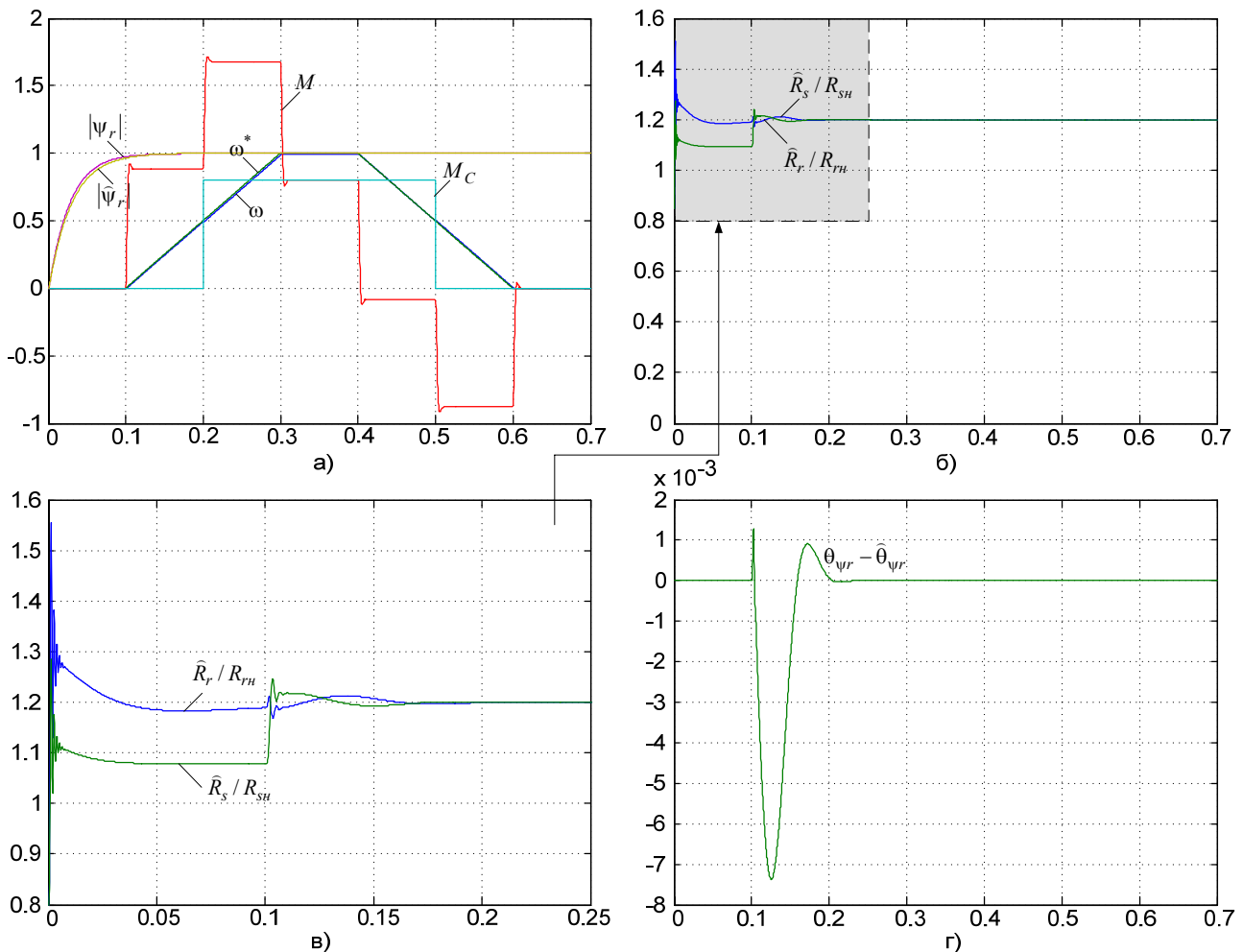


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів СВК зі спостерігачем стану при відпрацюванні трапецеїдальної тахограми а) задана та реальна швидкість обертання, момент двигуна та момент статичного опору, реальне та ідентифіковане значення модуля вектору потокозчеплення ротора; б) ідентифіковані значення активних опорів АД; в) виділена ділянка графік у б збільшеному масштабі; г) похибка оцінювання θ_{ψ_r}

Висновки. Розроблений спостерігач стану дозволяє досить точно оцінювати як параметри вектора потокозчеплення ротора, так і активні опори двигуна. Оцінювані параметри двигуна можуть служити також для адаптації регуляторів системи векторного керування до їх зміни. Особливістю запропонованого способу ідентифікації є необхідність використання точної інформації про швидкість обертання ротора двигуна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chiasson J.N. Modeling and high-performance control of electric machines / John Nelson Chiasson. – IEEE Press Series on Power Engineering. – New York: Wiley-Interscience, 2005. – 734 p.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: [Учебник для студ. высш. учебн. заведений] / Г.Г. Соколовский. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
3. H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano. New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives. – in Conf. Rec. of IEEE IECON90. – pp.921-926.

REFERENCES

1. Chiasson J.N. Modeling and high-performance control of electric machines / John Nelson Chiasson. – IEEE Press Series on Power Engineering. – New York: Wiley-Interscience, 2005. – 734 p.

2. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem* [AC Electric drives with frequency control] – Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. – 272 s.

3. H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano. New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives. – in Conf. Rec. of IEEE IECON90. – pp.921-926.

Надійшла до редакції 20.03.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

О.И. ТОЛОЧКО, Г.С. ЧЕКАВСКИЙ, И.О. ЖУРОВ

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Адаптивный наблюдатель состояния для текущей идентификации вектора потокосцепления ротора и активных сопротивлений обмоток асинхронного двигателя. Выполнен синтез адаптивного наблюдателя состояния, оценивающего модуль и угловое положение вектора потокосцепления ротора асинхронного двигателя для задач векторного управления. Синтезированный наблюдатель адаптируется к изменению активных сопротивлений обмоток статора и ротора асинхронного двигателя за счет их идентификации в режиме реального времени. Приведены результаты математического моделирования системы векторного управления асинхронным двигателем с использованием разработанного наблюдателя, подтверждающие высокую точность оценки указанных величин.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, адаптивный наблюдатель состояния, идентификация активных сопротивлений, потокосцепление ротора, функция Ляпунова.

O. TOLOCHKO, G. CHEKAVSKYY, I. ZHUROV

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Adaptive State Observer For Online Identification Of Rotor Flux Linkage Vector And Induction Motor Windings' Resistances. An adaptive state observer with variable parameters, which evaluates module and angular position of the induction motor rotor flux linkage vector, has been developed. Using of the state observer assume that information about stator voltage and current and also about speed is presented. The structure of the observer based on mathematical description of electromagnetic circuits of the induction motor in stationary orthogonal coordinates frame α, β . Decomposition and linearization of the mentioned model of induction motor was used to simplify the synthesis of the observer's correction coefficients matrix, the synthesis became the one that use for linear systems. The observer adapts to changing of induction motor's stator and rotor windings resistances due to their on-line identification. The expression for estimating of the motor resistances values has been obtained according to the Lyapunov's method, so synthesized state observer is asymptotically stable. The simulation of field-oriented control system with developed observer has been carried out, the results showed, that observer allows reaching the high accuracy of the estimation of rotor flux linkage vector module and angle position. The lowest accuracy of identification of active resistance occurs when the motor speed value is zero. This observer can be used in induction motor field-oriented control algorithms.

Key words: induction motor, vector control, adaptive state observer, identification of motor resistances, rotor flux linkage, Lyapunov's function.