

АЛГОРИТМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АКТИВНОГО ОПОРУ РОТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Анотація

Синтезовано спостерігач поточкозчеплення, який є адаптивним до варіацій активного опору ротора асинхронних двигунів. Завдяки надлишковому оцінюванню поточкозчеплень в структурі спостерігача забезпечуються властивості глобальної експоненціальної стійкості процесу оцінювання за умов виконання персистентності збудження. Синтезований спостерігач має простішу структуру у порівнянні з існуючими рішеннями з властивостями глобальної стійкості. За умови невиконання персистентності збудження асимптотичність оцінювання надлишкових змінних порушується, але активний опір оцінюється асимптотично. Дослідження динаміки спостерігача моделюванням підтверджує ефективність розробленого рішення.

Ключові слова: асинхронний двигун, ідентифікація, активний опір, надлишкове оцінювання.

Abstract

The flux observer which is adaptive to the active rotor resistance variations for induction motors is presented. Due to the fluxes overestimation in the observer structure, the global exponential stability properties of the estimation process are ensured under conditions of persistency of excitation. The proposed observer has a simpler structure compared to existing solutions with the global stability properties. If the conditions of persistency of excitation are not met, the asymptotical properties of the redundant variables estimation are violated, but the active resistance is estimated asymptotically. The study of the observer dynamics in simulation confirms the effectiveness of the developed solution.

Keywords: induction motor, identification, active resistance, overestimation.

Вступ

Векторно-керовані електроприводи на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АД) широко використовуються в промисловості, транспорті і т.д. Для забезпечення ефективної роботи систем векторного керування необхідною умовою є точне визначення параметрів двигуна. Активний опір ротора в моделі АД є таким параметром, який фізично неможна виміряти як активний опір статора і індуктивність статора, також він може суттєво змінюватися внаслідок тривалої роботи двигуна, що призводить до деградації динамічних і статичних характеристик регулювання механічних координат.

Розповсюдженим методом компенсації цього недоліку є використання адаптивних до змін активного опору ротора спостерігачів поточкозчеплення [1 – 3], які додатково до компонент вектора поточкозчеплення оцінюють активний опір ротора. Першим рішенням вважається адаптивний спостерігач поточкозчеплення Матсусе [1], проте строгого доведення локальної асимптотичної стійкості спостерігача не надано. Адаптивні спостерігачі, які синтезовано в [2, 3], мають строге теоретичне обґрунтування, що гарантує властивості глобальної асимптотичної експоненціальної стійкості, якщо момент є ненульовим або модуль вектора поточкозчеплення двигуна не є сталим. Структура спостерігачів [2, 3] є складною, має багато коефіцієнтів налаштування.

Метою роботи є синтез швидкодіючого алгоритму ідентифікації активного опору ротора АД на основі адаптивного спостерігача, який має просту структуру.

Математична модель

Математична модель АД в координатах струмів статора і поточкозчеплень ротора має вигляд

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \mu_1(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\
\dot{i}_{1a} &= -\gamma_1 i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \sigma^{-1}u_{1a}, \\
\dot{i}_{1b} &= -\gamma_1 i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \sigma^{-1}u_{1b}, \\
\dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
\dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
\end{aligned} \tag{1}$$

де $\mathbf{u} = (u_{1a}, u_{1b})^T$, $\mathbf{i} = (i_{1a}, i_{1b})^T$, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – вектори керуючих напруг, струмів статора та потокозчеплень ротора в системі координат (a-b); ω – кутова швидкість обертання ротора; M – момент двигуна; M_c – момент навантаження; J – повний момент інерції; p_n – число пар полюсів. Додатні параметри в (1) визначено наступним чином: $\alpha = R_2/L_2$; $\sigma = L_1 - L_m^2/L_2$; $\beta = L_m/\sigma L_2$; $\gamma_1 = R_1\sigma^{-1} + \alpha\beta L_m$, де R_1, R_2 – активні опори статора та ротора, L_1, L_2, L_m – індуктивності статора, ротора і намагнічуючого контуру відповідно; $\mu_1 = 1.5p_n L_m/L_2$.

Нехай виконуються припущення:

A.1. Струми статора i_a, i_b та кутова швидкість ω є обмеженими відомими функціями.

A.2. Електричні параметри $\gamma, \beta, \sigma, L_m$ відомі і постійні, параметр α невідомий постійний.

Постановка задачі оцінювання

Необхідно синтезувати адаптивний спостерігач, який гарантує:

СО.1. Асимптотичне оцінювання змінних стану, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, \tilde{\psi}_{2a}, \tilde{\psi}_{2b}) = \mathbf{0},$$

де $\tilde{i}_{1a} = i_{1a} - \hat{i}_{1a}$, $\tilde{i}_{1b} = i_{1b} - \hat{i}_{1b}$ – похибки оцінювання струмів статора; $\tilde{\psi}_{2a} = \psi_{2a} - \hat{\psi}_{2a}$, $\tilde{\psi}_{2b} = \psi_{2b} - \hat{\psi}_{2b}$ – похибки оцінювання потокозчеплень ротора; $\hat{i}_{1a}, \hat{i}_{1b}, \hat{\psi}_{2a}, \hat{\psi}_{2b}$ – оцінені значення компонент струмів і потокозчеплень.

СО.2. Асимптотичне оцінювання активного опору ротора, який визначається параметром α , тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\alpha} = 0, \tag{2}$$

де $\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$ – похибка оцінювання; $\hat{\alpha}$ – оцінка параметра.

Зауважимо, що активний опір ротора (параметр α) не може бути ідентифікованим, якщо на деякому інтервалі часу

$$\psi_{2a} = L_m i_{1a}, \quad \psi_{2b} = L_m i_{1b}, \tag{3}$$

оскільки в цьому випадку рівняння (1) не залежать від нього. Умова (3) виконується, якщо модуль вектора потокозчеплення $|\boldsymbol{\psi}|$ є сталим, і одночасно момент M дорівнює нулю. Дана властивість визначається фізикою роботи АД і пов'язана з відсутністю протікання струму в роторних обмотках.

Синтез спостерігача

Для синтезу адаптивного спостерігача розглянемо наступне перетворення координат

$$\begin{aligned}
z_a &= i_{1a} + \beta\psi_{2a}, \\
z_b &= i_{1b} + \beta\psi_{2b}.
\end{aligned} \tag{4}$$

В нових координатах модель (1) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
\dot{z}_a &= -\frac{R_l}{\sigma} i_{1a} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
\dot{z}_b &= -\frac{R_l}{\sigma} i_{1b} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\
\dot{i}_{1a} &= -\frac{R_l}{\sigma} i_{1a} - \alpha(1 + \beta L_m) i_{1a} - p_n \omega i_{1b} + \alpha z_a + p_n \omega z_b + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
\dot{i}_{1b} &= -\frac{R_l}{\sigma} i_{1b} - \alpha(1 + \beta L_m) i_{1b} + p_n \omega i_{1a} + \alpha z_b - p_n \omega z_a + \frac{1}{\sigma} u_{1b}.
\end{aligned} \tag{5}$$

З (5) частина адаптивного спостерігача, яка оцінює струми статора, буде

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{i}}_{1a} &= -\frac{R_l}{\sigma} \hat{i}_{1a} - \hat{\alpha}(1 + \beta L_m) \hat{i}_{1a} - p_n \omega \hat{i}_{1b} + \hat{\alpha} \hat{\eta}_a + p_n \omega \hat{z}_b + \frac{1}{\sigma} u_{1a} + k_1 \tilde{i}_{1a}, \\
\dot{\hat{i}}_{1b} &= -\frac{R_l}{\sigma} \hat{i}_{1b} - \hat{\alpha}(1 + \beta L_m) \hat{i}_{1b} + p_n \omega \hat{i}_{1a} + \hat{\alpha} \hat{\eta}_b - p_n \omega \hat{z}_a + \frac{1}{\sigma} u_{1b} + k_1 \tilde{i}_{1b},
\end{aligned} \tag{6}$$

де $k_1 > 0$ – коефіцієнт зворотного зв'язку спостерігача; $\hat{\eta}_a, \hat{\eta}_b$ і \hat{z}_a, \hat{z}_b – розділені оцінки невідомих змінних z_a, z_b , які будуть визначені далі.

Визначимо похибки оцінювання невідомих змінних як

$$\tilde{z}_a = z_a - \hat{z}_a, \quad \tilde{z}_b = z_b - \hat{z}_b, \quad \tilde{\eta}_a = z_a - \hat{\eta}_a, \quad \tilde{\eta}_b = z_b - \hat{\eta}_b. \tag{7}$$

Система (5) у вигляді динаміки похибок оцінювання має вигляд

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{i}}_{1a} &= -\left(\frac{R_l}{\sigma} + k_1\right) \tilde{i}_{1a} - \tilde{\alpha}(1 + \beta L_m) \tilde{i}_{1a} - p_n \omega \tilde{i}_{1b} + \tilde{\alpha} \tilde{\eta}_a + \alpha \tilde{\eta}_a + p_n \omega \tilde{z}_b, \\
\dot{\tilde{i}}_{1b} &= -\left(\frac{R_l}{\sigma} + k_1\right) \tilde{i}_{1b} - \tilde{\alpha}(1 + \beta L_m) \tilde{i}_{1b} + p_n \omega \tilde{i}_{1a} + \tilde{\alpha} \tilde{\eta}_b + \alpha \tilde{\eta}_b - p_n \omega \tilde{z}_a, \\
\dot{\tilde{z}}_a &= -\frac{R_l}{\sigma} \tilde{i}_{1a} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} - \dot{\hat{z}}_a, \\
\dot{\tilde{z}}_b &= -\frac{R_l}{\sigma} \tilde{i}_{1b} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} - \dot{\hat{z}}_b, \\
\dot{\tilde{\eta}}_a &= -\frac{R_l}{\sigma} \tilde{i}_{1a} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} - \dot{\hat{\eta}}_a, \\
\dot{\tilde{\eta}}_b &= -\frac{R_l}{\sigma} \tilde{i}_{1b} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} - \dot{\hat{\eta}}_b.
\end{aligned} \tag{8}$$

З (5) маємо

$$\begin{aligned}
\hat{\psi}_{2a} &= \frac{1}{\beta} (\hat{z}_a - \hat{i}_{1a}), \\
\hat{\psi}_{2b} &= \frac{1}{\beta} (\hat{z}_b - \hat{i}_{1b}),
\end{aligned} \tag{9}$$

тобто

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_{2a} &= \frac{1}{\beta} (\tilde{z}_a - \tilde{i}_{1a}), \\
\tilde{\psi}_{2b} &= \frac{1}{\beta} (\tilde{z}_b - \tilde{i}_{1b}).
\end{aligned} \tag{10}$$

Для синтезу спостерігача розглянемо наступний кандидат функції Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2) + \frac{1}{2k_2}(\tilde{z}_a^2 + \tilde{z}_b^2) + \frac{\alpha}{2k_3}(\tilde{\eta}_a^2 + \tilde{\eta}_b^2) + \frac{1}{2\lambda}\tilde{\alpha}^2, \quad (11)$$

де $(k_2, k_3) > 0$, $\lambda > 0$ – коефіцієнти зворотного зв'язку спостерігача.

Похідна від (11) вздовж траєкторій (8) дорівнює

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\left(k_1 + \frac{R_1}{\sigma}\right)(\tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2) + \\ & + \tilde{i}_{1a}\tilde{\alpha}(\hat{\eta}_a - (1 + \beta L_m)i_{1a}) + \tilde{i}_{1b}\tilde{\alpha}(\hat{\eta}_b - (1 + \beta L_m)i_{1b}) + \\ & + \alpha\tilde{i}_{1a}\tilde{\eta}_a + \alpha\tilde{i}_{1b}\tilde{\eta}_b + p_n\omega\tilde{i}_{1a}\tilde{z}_b - p_n\omega\tilde{i}_{1b}\tilde{z}_a + \\ & + \frac{1}{k_2}(\tilde{z}_a\dot{\tilde{z}}_a + \tilde{z}_b\dot{\tilde{z}}_b) + \frac{\alpha}{k_3}(\tilde{\eta}_a\dot{\tilde{\eta}}_a + \tilde{\eta}_b\dot{\tilde{\eta}}_b) + \frac{1}{\lambda}\tilde{\alpha}\dot{\tilde{\alpha}}. \end{aligned} \quad (12)$$

З (12) частина спостерігача, яка оцінює невідомі змінні, а також параметр α , має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}}_a = -\dot{\tilde{z}}_a & = -\frac{R_1}{\sigma}i_{1a} + \frac{1}{\sigma}u_{1a} - k_2p_n\omega\tilde{i}_{1b}, \\ \dot{\tilde{z}}_b = -\dot{\tilde{z}}_b & = -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} + \frac{1}{\sigma}u_{1b} + k_2p_n\omega\tilde{i}_{1a}, \\ \dot{\tilde{\eta}}_a = -\dot{\tilde{\eta}}_a & = -\frac{R_1}{\sigma}i_{1a} + \frac{1}{\sigma}u_{1a} + k_3\tilde{i}_{1a}, \\ \dot{\tilde{\eta}}_b = -\dot{\tilde{\eta}}_b & = -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} + \frac{1}{\sigma}u_{1b} + k_3\tilde{i}_{1b}, \\ \dot{\tilde{\alpha}} = -\dot{\tilde{\alpha}} & = \lambda\left[(\hat{\eta}_a - (1 + \beta L_m)i_{1a})\tilde{i}_{1a} + (\hat{\eta}_b - (1 + \beta L_m)i_{1b})\tilde{i}_{1b}\right]. \end{aligned} \quad (13)$$

З урахуванням (13), похідна від функції Ляпунова (12) переписється як

$$\dot{V} = -\left(k_1 + \frac{R_1}{\sigma}\right)(\tilde{i}_{1a}^2 + \tilde{i}_{1b}^2). \quad (14)$$

З (11) і (14) слідує, що $(\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, \tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{\eta}_a, \tilde{\eta}_b, \tilde{\alpha}) \forall t \geq 0$ є обмеженими. З (8) та (13) слідує, що похідні $(\dot{\tilde{i}}_{1a}, \dot{\tilde{i}}_{1b}, \dot{\tilde{z}}_a, \dot{\tilde{z}}_b, \dot{\tilde{\eta}}_a, \dot{\tilde{\eta}}_b, \dot{\tilde{\alpha}})$ також обмежені, а $(\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}, \tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{\eta}_a, \tilde{\eta}_b, \tilde{\alpha})$ - рівномірно безперервні.

Оскільки $V(t) \leq \left(k_1 + \frac{R_1}{\sigma}\right)^{-1} V(0)$, то сигнали $\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}$ є квадратично інтегрованими, і у відповідності з лемою Барбалат [4] з цього слідує, що

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b}) = \mathbf{0}. \quad (15)$$

Повні рівняння адаптивного спостерігача активного опору ротора задаються (6), (13).

Результуюча динаміка похибок оцінювання з (8) і (13) в матричній формі запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) & = \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{W}(t)\mathbf{D}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{z}}(t), \\ \dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) & = -\mathbf{\Gamma}(t)\mathbf{W}^T(t)\tilde{\mathbf{x}}(t), \end{aligned} \quad (16)$$

де $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{i}_{1a}, \tilde{i}_{1b})^T$; $\tilde{\mathbf{z}} = (\tilde{z}_a, \tilde{z}_b, \tilde{\eta}_a, \tilde{\eta}_b, \tilde{\alpha})^T$; а матриці дорівнюють

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -\left(k_1 + \frac{R_1}{\sigma}\right) & -p_n \omega \\ p_n \omega & -\left(k_1 + \frac{R_1}{\sigma}\right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}^{-1}(t) = \text{diag}(1, 1, \alpha, \alpha, 1),$$

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \text{diag}(k_2, k_2, k_3, k_3, \lambda),$$

$$\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} 0 & p_n \omega & 1 & 0 & \hat{\eta}_a - (1 + \beta L_m) i_{1a} \\ -p_n \omega & 0 & 0 & 1 & \hat{\eta}_b - (1 + \beta L_m) i_{1b} \end{bmatrix}.$$
(17)

Система (16) має стандартну форму згідно леми про персистність збудження [4] у формулюванні [5]. Оскільки $\mathbf{A}(t)$ є Гурвіцевою матрицею, $\mathbf{W}(t)$, $\dot{\mathbf{W}}(t)$ є обмеженими, і якщо існує позитивна константа T така, що умови персистності збудження

$$\int_t^{t+T} \mathbf{W}^T(\tau) \mathbf{W}(\tau) d\tau > 0$$
(18)

досягаються $\forall t \geq 0$, то $(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{z}})^T = \mathbf{0}$ є глобально експоненційно стійким положенням рівноваги системи (16). З чого слідує, що компоненти вектора потокозчеплення, а також активний опір ротора, який визначається параметром $\alpha = R_2/L_2$, оцінюються асимптотично з експоненціальним рівнем затухання похибок до нуля.

Дослідження динаміки спостерігача

Дослідження динамічних режимів адаптивного спостерігача (6), (13) проведено засобами моделювання на основі АД 0.75 кВт, параметри номінального режиму і параметри схеми заміщення якого наведено в Табл. 1.

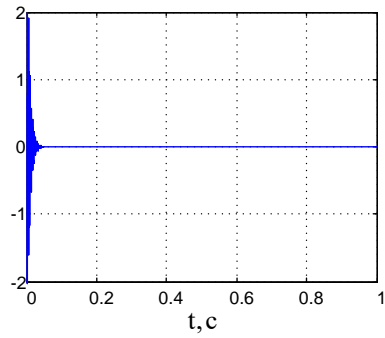
Таблиця 1 – Параметри досліджуваного асинхронного двигуна

Параметр	Значення
Номінальна потужність	0.75 кВт
Номінальна швидкість	300 рад/с
Номінальний момент	2.5 Нм
Частота	50 Гц
Номінальний струм збудження	1 А
Активний опір статора	$R_1 = 11$ Ом
Активний опір ротора	$R_2 = 5.8$ Ом
Індуктивність намагнічуючого контуру	$L_m = 0.91$ Гн
Індуктивність статора	$L_1 = 0.95$ Гн
Індуктивність ротора	$L_2 = 0.95$ Гн
Число пар полюсів	$p_n = 1$

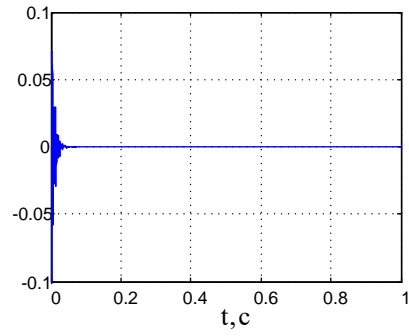
В умовах тестування АД здійснює прямий пуск підключенням до мережі, спостерігач працює в автономному режимі з наступним налаштуванням коефіцієнтів зворотного зв'язку: $k_1 = 120$, $k_2 = 3$, $k_3 = 270$, $\lambda = 450$.

Графіки перехідних процесів похибок оцінювання компоненти струму статора \tilde{i}_{1a} , компоненти потокозчеплення ротора $\tilde{\psi}_{2a}$, модуля вектора потокозчеплення $|\tilde{\psi}| = \sqrt{\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2}$ і параметра $\tilde{\alpha}$ в умовах прямого пуску двигуна для двох значень початкових умов оцінювання параметру $\hat{\alpha}_1(0) = 0.5\alpha = 2.8 \text{ c}^{-1}$ та $\hat{\alpha}_2(0) = 2\alpha = 12 \text{ c}^{-1}$ показано на рис. 1 і рис. 2, відповідно. Початкові умови інших змінних нульові.

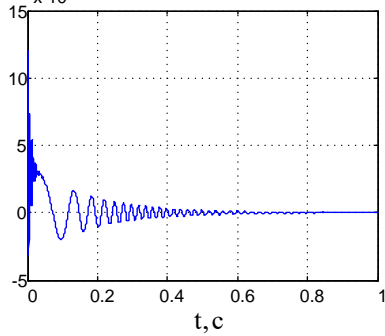
Похибка оцінювання компоненти
струму статора \tilde{i}_a, A



Похибка оцінювання
параметру $\tilde{\alpha}, 1/\text{с}$



Похибка оцінювання компоненти
потокосцеплення ротора $\tilde{\psi}_a, \text{Вб}$
 $\times 10^4$



Похибка оцінювання модуля
потокосцеплення ротора $|\tilde{\psi}|, \text{Вб}$

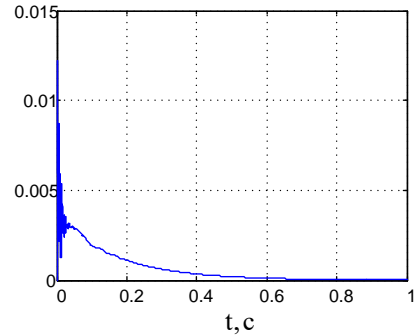
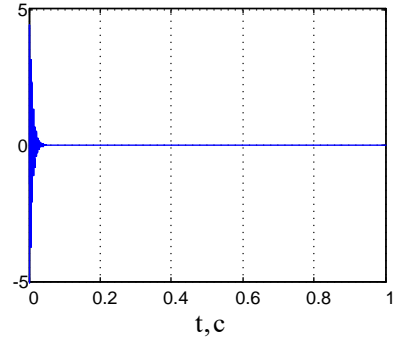
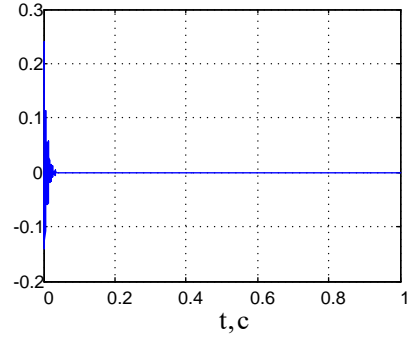


Рис. 1 – Графіки перехідних процесів спостерігача ($\hat{\alpha}_1(0) = 0.5\alpha = 2.8 \text{ с}^{-1}$)

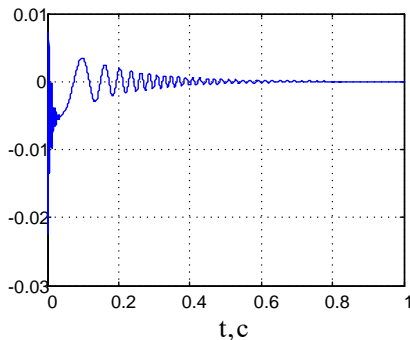
Похибка оцінювання компоненти
струму статора \tilde{i}_a, A



Похибка оцінювання
параметру $\tilde{\alpha}, 1/\text{с}$



Похибка оцінювання компоненти
потокосцеплення ротора $\tilde{\psi}_a, \text{Вб}$



Похибка оцінювання модуля
потокосцеплення ротора $|\tilde{\psi}|, \text{Вб}$

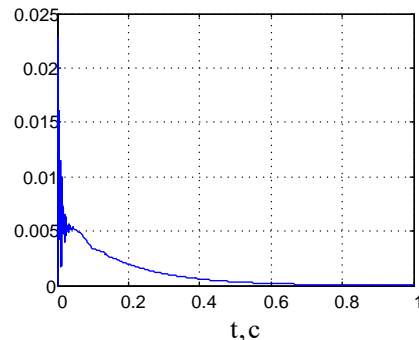


Рис. 2 – Графіки перехідних процесів спостерігача ($\hat{\alpha}_2(0) = 2\alpha = 12 \text{ с}^{-1}$)

З графіків перехідних процесів слідує, що спостерігач забезпечує асимптотичність оцінювання змінних стану і активного опору ротора, а також високі динамічні показники процесу оцінювання.

Висновки. Синтезовано спостерігач вектора потокозчеплення ротора, який є адаптивним до варіацій активного опору ротора. Спостерігач гарантує глобальну асимптотичну експоненціальну стійкість оцінювання вектора потокозчеплення ротора і невідомого активного опору ротора за виконання умов персистентності збудження. Для інших режимів асимптотичність оцінювання потокозчеплення може втрачатися, в той час як активний опір ротора оцінюється коректно, тому алгоритм спостерігача в цьому випадку може розглядатися як алгоритм ідентифікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kubota H., Matsuse K., Nakano T. New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives / *Proceedings of Annual Conference IEEE Industrial Electronics Society IECON90* – California, 1990. – pp. 921–926. DOI: 10.1109/IECON.1990.149262
2. Marino R., Peresada S., Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors / *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, no. 5. – pp. 508-515, Oct. 1995, DOI: 10.1109/41.464614.
3. Marino R., Peresada S., Tomei P. Output feedback control of current-fed induction motors with unknown rotor resistance / *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 4. – pp. 336-347, July 1996, DOI: 10.1109/87.508882.
4. Narendra K.S., Annaswamy A.M. *Stable adaptive systems* / New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1989. – 480 p.
5. Marino R., Peresada S., Tomei P. Nonlinear adaptive control of permanent magnet step motors / *Automatica*, vol. 31, no. 11, 1995. – pp. 1595-1604, ISSN 0005-1098, DOI: 10.1016/0005-1098(95)00087-D.

Пересادا Сергій Михайлович — докт. техн. наук, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Никоненко Євген Олексійович — аспірант, асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, *e-mail*: evgeniy.nykonenko@gmail.com.

Руденко Олександр Сергійович — студент групи ЕП-01мн кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, факультет електроенерготехніки та автоматики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Peresada Sergei — Sc.D. (Eng.), Professor of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives Department, National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, Kyiv.

Nikonenko Yevhen — Postgraduate Student, Assistant of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives Department, National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, Kyiv, *e-mail*: evgeniy.nykonenko@gmail.com.

Rudenko Oleksandr — Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives Department, Faculty of Electrical Power Engineering and Automatics, National Technical University of Ukraine ‘Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute’, Kyiv.