

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОМЕНТУ НАВАНТАЖЕННЯ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Шен Гоцін, магістрант, Желінський М. М., к.т.н., ст. викл.

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

**Вступ.** В останні десятиліття явнополюсні синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) широко застосовувалися в різних мехатронних сервосистемах [1]. Момент навантаження СДПМ має велике значення для покращення конструкції регуляторів у промислових застосуваннях. Однак, момент навантаження, зазвичай, невідомий. У деяких реальних електромеханічних системах з СДПМ навантаження змінюється у часі і його важко безпосередньо вимірювати. У цьому випадку не забезпечується ефективне керування кутовою швидкістю системи електроприводу. З цієї причини було розроблено низку алгоритмів ідентифікації моменту навантаження.

Методи ідентифікації моменту навантаження переважно включають reference adaptive control (MRAC), Kalman filter, reduced-order observer, sliding mode observer (SMO) [2]. Оскільки SMO має переваги простоти реалізації та стійкості до невизначеностей та збурень, йому приділяється дедалі більше уваги. Проте більшість існуючих методів SMO з ідентифікацією моменту навантаження зосереджені на тому, як придушити явище вібрації, і нехтують впливом невідповідності параметрів на характеристики ідентифікації.

В статтях стійкість розроблених спостерігачів не завжди доводиться, що не дозволяє використовувати запропоновані рішення в електроприводах. Тому проблема ідентифікації моменту навантаження СДПМ залишається не повністю вирішеною.

**Мета роботи.** Синтезувати алгоритм ідентифікації моменту навантаження явнополюсного СДПМ з використанням другого методу Ляпунова, виконати дослідження синтезованого алгоритму шляхом математичного моделювання.

**Матеріали і результати досліджень.** В якості базової моделі використовуємо модель явнополюсного СДПМ в системі координат ротора [3]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} (\psi_M + (L_d - L_q) i_d) i_q - \frac{\nu}{J} \omega - \frac{T_L}{J}, \\ \dot{i}_d &= -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p_n \omega i_q + \frac{1}{L_d} u_d, \\ \dot{i}_q &= -\frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p_n \omega i_d + \frac{1}{L_q} u_q,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора;  $T_L$  – момент навантаження;  $J$  – момент інерції;  $\nu$  – в'язке тертя;  $R$  – опір статора;  $\psi_M$  – потік від постійних магнітів;

$(i_d, i_q)$  та  $(u_d, u_q)$  – струми та напруги статора по осям  $(d - q)$ ;  $(L_d, L_q)$  – індуктивності по осям  $(d - q)$ .

Під час синтезу алгоритму ідентифікації вважаємо, що виконуються наступні припущення:

A.1. Всі параметри двигуна СДПМ вважаються постійними.

A.2. Струми і кутова швидкість двигуна вимірюються.

A.3. Всі параметри двигуна відомі.

Метою керування є виконання умови:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{x}) = 0, \quad (2)$$

де  $\tilde{x} = x - \hat{x}$  – похибка оцінювання параметру,  $\hat{x}$  – оцінка параметру.

Момент навантаження  $T_L$ , який необхідно ідентифікувати, присутній в рівняннях динаміки кутової швидкості, ідентифікуємо цей параметр на основі рівняння (1):

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{3}{2} \frac{P_n}{J} (\psi_M + (L_d - L_q) i_d) i_q - \frac{v}{J} \omega - \frac{\hat{T}_L}{J} + k_\omega \tilde{\omega}, \\ \tilde{\omega} &= \omega - \hat{\omega}. \end{aligned} \quad (3)$$

де  $k_\omega > 0$  – коефіцієнт налаштування,  $\tilde{\omega}$  – похибка оцінювання кутової швидкості,  $\hat{\omega}$  – оцінка кутової швидкості,  $\hat{T}_L$  – оцінка моменту навантаження.

Похідна похибки кутової швидкості має наступний вигляд:

$$\dot{\tilde{\omega}} = \dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}} = -\frac{\tilde{T}_L}{J} + \frac{\hat{T}_L}{J} - k_\omega \tilde{\omega}. \quad (4)$$

Похибка оцінювання моменту навантаження:

$$\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L. \quad (5)$$

Після підстановки (5) в (4) динаміка похибки швидкості буде:

$$\dot{\tilde{\omega}} = -\frac{\tilde{T}_L}{J} - k_\omega \tilde{\omega}. \quad (6)$$

В компактній формі (6) приймає наступну форму:

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + W\tilde{\Phi} \Rightarrow \dot{\tilde{\omega}} = -\frac{\tilde{T}_L}{J} - k_\omega \tilde{\omega}. \quad (7)$$

де  $\tilde{x} = \tilde{\omega}$ ,  $W = -\frac{1}{J}$  – матриця регресор,  $A = [-k_\omega]$  – матриця стійкості,  $\tilde{\Phi} = \tilde{T}_L$ .

Сформуємо функцію Ляпунова в наступній стандартній формі:

$$V = \frac{1}{2} (\tilde{x}^T \tilde{x} + \tilde{\Phi}^T \Lambda^{-1} \tilde{\Phi}) = \frac{1}{2} (\tilde{\omega}^2 + \frac{\tilde{T}_L^2}{\lambda}) = \frac{\tilde{\omega}^2}{2} + \frac{\tilde{T}_L^2}{2\lambda}, \quad (8)$$

де  $\Lambda = \lambda$  – коефіцієнт налаштування.

Похідна від рівняння (8) має наступний вигляд:

$$\dot{V} = -k_\omega \tilde{\omega}^2 - \frac{\tilde{T}_L}{J} \tilde{\omega} + \frac{\tilde{T}_L \dot{\tilde{T}_L}}{\lambda}. \quad (9)$$

Якщо похибка оцінювання моменту навантаження задається у наступному вигляді:

$$\dot{\hat{T}}_L = -\Lambda W^T \tilde{x} = \tilde{\omega} \frac{\lambda}{J}, \quad (10)$$

тоді рівняння (9) приймає наступний вигляд:

$$\dot{V} = -k_\omega \tilde{\omega}^2 \leq 0. \quad (11)$$

З умови  $V > 0$ ,  $\dot{V} \leq 0$  слідує, що для усіх  $t \geq 0$  вектори  $\tilde{\Phi}$ ,  $\tilde{x}$  обмежені. Застосовуючи лему Барбалат [4] встановлюємо, що

$$\int_t^{t+T} W^T(\tau) W(\tau) d\tau > 0, \quad (12)$$

$\forall t \geq 0$  – умова персистентності збудження, то для лінійної неавтономної системи положення рівноваги  $(\omega, \hat{T}_L)$  є глобально експоненційно стійким.

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + W\tilde{\Phi}, \quad (13)$$

$$\dot{\tilde{\Phi}} = -\Lambda W^T \tilde{x}.$$

Алгоритм ідентифікації моменту навантаження на основі (10) має наступний вигляд:

$$\dot{\hat{T}}_L = \dot{T}_L - \hat{T}_L = -\hat{T}_L \quad (14)$$

При виконанні умови (13), алгоритм гарантує досягнення  $\lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{T}_L) = 0$ .

Загальний вигляд спостерігача, який забезпечує ідентифікацію моменту навантаження, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}} &= \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} (\psi_M + i_d (L_d - L_q)) i_q - \frac{1}{J} \hat{T}_L - \frac{1}{J} v \omega + k_\omega \tilde{\omega}, \\ \dot{\hat{T}}_L &= -\frac{\lambda \tilde{\omega}}{J}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для дослідження спостерігача написано наступні параметри двигуна:  $P_n = 3 \text{ кВт}$ ,  $I_n = 5.4 \text{ А}$ ,  $p_n = 2$ ,  $J = 0.0155 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $R = 1.7 \text{ Ом}$ ,  $L_q = 58 \text{ мГн}$ ,  $L_d = 31 \text{ мГн}$ ,  $\psi_M = 0.615 \text{ Вб}$ . Коефіцієнти налаштування спостерігача є наступними:  $\lambda = 20$ ,  $k_\omega = 500$ . Результати моделювання алгоритму представлені на рис. 1.

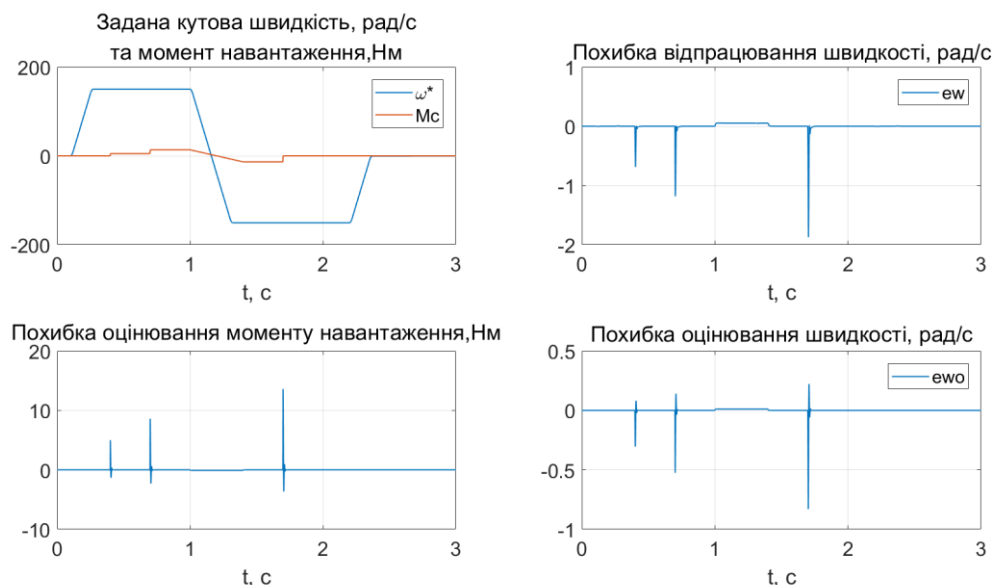


Рисунок 1 – Перехідні процеси оцінювання моменту навантаження

З рис. 1 видно, що похибка оцінювання моменту навантаження асимптотично прямує до нуля.

Перехідні процеси оцінювання моменту навантаження при різних коефіцієнтах налаштування зображені на рис. 2.

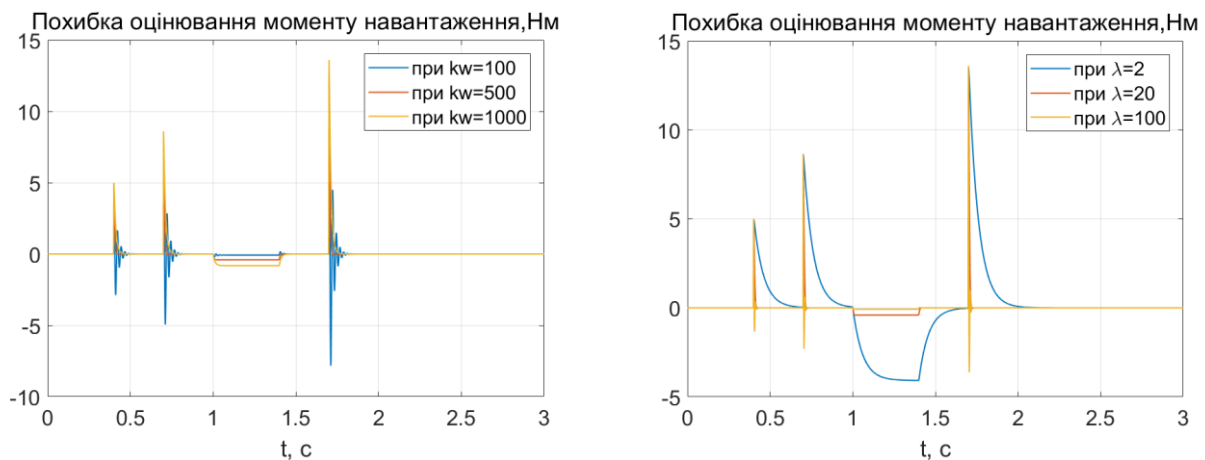


Рисунок 2 – Перехідні процеси оцінювання моменту навантаження при різних коефіцієнтах налаштування

З рис. 2 видно, що із зменшенням коефіцієнту  $\lambda$  погіршується оцінювання моменту навантаження. Коливання в системі залежать від коефіцієнту налаштування спостерігача  $k_{\omega}$  та можуть бути усунені при збільшенні  $k_{\omega}$ .

**Висновки.** Синтезовано спостерігач моменту навантаження для явнопольсного СДПМ за допомогою другого методу Ляпунова. Доведено стійкість спостерігача (15), який дозволяє ідентифікувати невідомий момент навантаження. Результати моделювання показують, що синтезований спостерігач забезпечує асимптотичну стійкість. Крім того, синтезований спостерігач моменту навантаження також має високу точність спостереження та високу швидкість збіжності.

Отримані навички в подальшому знадобляться при проектуванні складних систем з невідомими параметрами за рахунок впровадження спостерігача, що в свою чергу дозволяє виконувати опосередковане керування оціненим значенням.

#### Перелік посилань

1. A. Khlaief, M. Bendjedja, M. Boussak and M. Gossa, "A Nonlinear Observer for High-Performance Sensorless Speed Control of IPMSM Drive," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 6, pp. 3028-3040, June 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2175251.
2. C. Lian, F. Xiao, S. Gao and J. Liu, "Load Torque and Moment of Inertia Identification for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Sliding Mode Observer," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5675-5683, June 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2870078.
3. Основи мехатроніки: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, М.В. Пушкар. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с.
4. K. S. Narendra and A. M. Annaswamy. (1989), "Stable adaptive systems", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.