

*napęd dwumasowy, filtr Kalmana,
odporna estymacja zmiennych stanu*

Piotr J. SERKIES*
Krzysztof SZABAT*

ADAPTACYJNY FILTR KALMANA DLA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z estymacją zmiennych stanu napędu z połączeniem sprężystym w przypadku zmiennego momentu bezwładności maszyny roboczej. We wstępie krótko scharakteryzowano problematykę drgań skrętnych w napędzie elektrycznym. W kolejnych rozdziałach przedstawiono modele napędu z połączeniem sprężystym oraz filtru Kalmana. Następnie rozpatrzono różne przypadki pracy estymatora z niedokładnie wyznaczonymi parametrami modelu, na tej podstawie zaproponowano algorytm dostrajania filtru. Rozważania teoretyczne zostały poparte badaniami symulacyjnymi.

1. WPROWADZENIE

Problematyka tłumienia drgań skrętnych była pierwotnie rozpatrywana w ciężkich napędach przemysłowych [1], [2]. Wraz z rozwojem energoelektroniki, który umożliwił praktycznie bezinercyjne sterowanie momentem silnika, skończona sztywność wału zaczęła być zauważalna w innych grupach napędów [3], [4]. Jedną z najefektywniejszych metod tłumienia drgań skrętnych jest zastosowanie odpowiedniej struktury sterowania [1]–[5]. Jednak większość z zaawansowanych metod sterowania wymaga informacji o wektorze stanu napędu wraz z dodatkowymi wielkościami (np. moment obciążenia). Do estymacji zmiennych stanu można wykorzystać metody algorytmiczne bądź neuronowe [5]–[6]. W przypadku napędów dwumasowych, w których zmianie ulega stała czasowa maszyny roboczej istnieje duża grupa algorytmów sterowania [7], [8]. W przypadku zaawansowanych struktur o odporności całego algorytmu sterowa-

* Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.serkies@pwr.wroc.pl; krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl

nia decyduje również wrażliwość obserwatora. W przypadku podstawowych metod algorytmicznych istnieje możliwość zastosowania zaawansowanej optymalizacji do ich strojenia [5], możliwe jest zastosowanie również postępowania dwuetapowego w którym najpierw następuje estymacja parametrów, a następnie estymacja zmiennych stanu [9]. W pracy [5] przedstawiono zastosowanie rozszerzonego nieliniowego filtru Kalmana, który na bieżąco wyznacza wartość stałej T_2 . Algorytm ten jest jednak skomplikowany obliczeniowo.

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z opracowaniem adaptacyjnego filtru Kalmana, który będzie odporny na zmianę stałej czasowej maszyny roboczej. Do rozważań wykorzystano model liniowego filtru Kalmana. Adaptacja prowadzona jest, przez rozmyty system na podstawie informacji o błędzie estymacji momentu obciążenia podczas nawrotów.

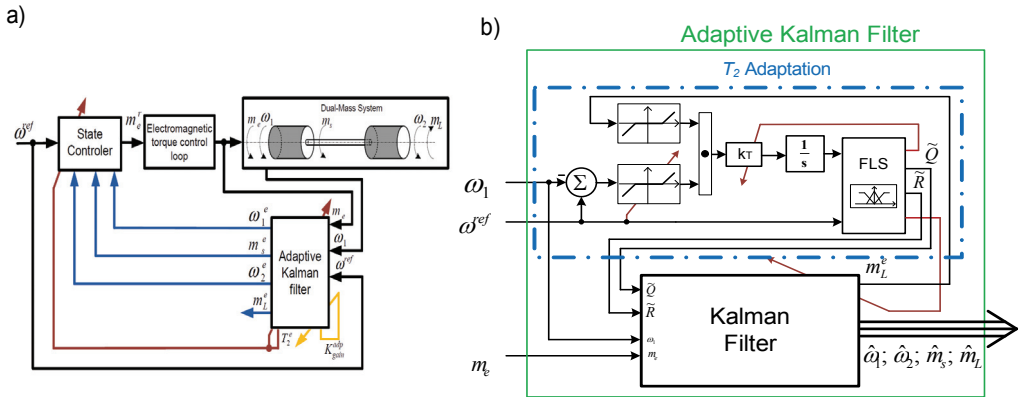
2. MODEL ROZPATRYWANEGO NAPĘDU I STRUKTURA STEROWANIA

Model matematyczny układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym można opisać poniższymi równaniami różniczkowymi [5]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \omega_1 = \frac{1}{T_1} (m_e - m_s) \\ \frac{d}{dt} \omega_2 = \frac{1}{T_2} (m_s - m_L) \\ \frac{d}{dt} m_s = \frac{1}{T_c} (\omega_1 - \omega_2); \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: m_e – moment elektromagnetyczny, ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość maszyny obciążającej, m_s – moment skrętny, m_L – moment obciążenia, T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej, T_c – stała czasowa elementu sprężystego, T_α – stała pozycjonowania. Wartości parametrów analizowanego układu wynosiły ($T_1 = T_2 = 0,203$ s, $T_c = 1,2$ ms).

Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy struktury sterowania. W niniejszych badaniach jako regulator zapewniający dowolne kształtowanie dynamiki przy jednoczesnym dobrym tłumieniu drgań skrętnych wykorzystano zmodyfikowany regulator stanu. Sposób projektowania takiego regulatora przedstawiono w pracy [5]. Regulator bazuje na informacji o pełnym wektorze zmiennych stanu oraz na całce z uchybu sterowania prędkością obciążenia. Zoptymalizowana pętla sterowania momentem elektromagnetycznym zawiera część elektromagnetyczną napędu wraz z wybranym regulatorem prądu/moment.



Rys. 1. Struktury: a) sterowania, b) proponowanego estymatora
Fig. 1. Proposed control structure (a), and estimator (b)

3. OPIS STRUKTURY OBSERWATORA

Na rysunku 1b przedstawiono schemat blokowy rozmytego filtra Kalmana. Można w niej wyodrębnić dwa podstawowe podukłady:

1. Liniowy filtr Kalman estymujący wektor zmiennych stanu. Algorytm filtru można przedstawić następująco [5]:

1) Obliczenie predyktora:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1/k) = \tilde{\mathbf{A}}(k)\hat{\mathbf{x}}(k/k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k)$$

2) Estymacja macierzy kowariancji błędu:

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \tilde{\mathbf{A}}(k)\mathbf{P}(k/k)\tilde{\mathbf{A}}(k)^T + \tilde{\mathbf{Q}}(k)$$

3) Kolejno oblicza się wzmacnienie filtru Kalmana:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}(k+1)^T [\mathbf{C}(k+1/k)\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}(k+1/k)^T + \tilde{\mathbf{R}}(k)]^{-1}$$

4) Następnie wyznacza się estymatę wektora stanu:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1/k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\hat{\mathbf{x}}(k+1/k)]$$

5) Na koniec obliczamy macierz kowariancji błędu estymaty:

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k)$$

6) Powrót do pierwszego kroku.

W powyższym algorytmie falką zaznaczono parametry które ulegają przestrojeniu podczas pracy układu.

2. Podukład adaptacji. Układ ten bazuje na uchybie estymacji momentu obciążenia w pierwszych chwilach czasu po nawrocie. Z przeprowadzonych badań wiadomo że błąd ten jest równy zero gdy nie występuje różnica w szacunku stałej czasowej ma-

szyny roboczej. Gdy stała mechaniczna jest przeszacowana błąd estymacji momentu obciążenia w czasie nawrotu jest ujemny. Natomiast gdy błąd estymacji momentu obciążenia jest dodatni oznacza to że mamy nieoszacowaną stałą mechaniczną maszyny roboczej. Aby zapewnić adaptację tylko w czasie nawrotu wartość błędu jest przemnażana przez uchyb regulacji prędkości ze strefą martwą zależną od prędkości zadanej. Wartość błędu wyznaczenia momentu obciążenia na podstawie której możliwa jest estymacja momentu obciążenia można przedstawić następująco:

$$er = \int [D_z(m_L^e) \cdot \tilde{D}_z((\omega^{ref} - \omega_1), \omega^{ref}) \cdot \tilde{k}_T] dt \quad (2)$$

gdzie: $D_z()$ – oznacza funkcję strefy martwej, $D_z((),)$ – oznacza strefę martwą zależną od drugiego parametru, m_L^e – estymowany moment obciążenia, ω^{ref} – prędkość zadana, ω_1 – mierzona prędkość silnika napędowego, k_T – rozmyte wzmocnienie normalizujące.

Błąd wyznaczony w równaniu (2) oraz prędkość referencyjna wprowadzana jest na wejście rozmytego systemu Mandaniego. Każde z wejść dzielone jest na trzy zbiory rozmyte po przez trójkątne funkcje przynależności (rys. 2a, b). Funkcje wyjściowe podzielone zostały na cztery i trzy funkcje przynależności (rys. 2c–f). W strukturze wykorzystano reguły postaci:

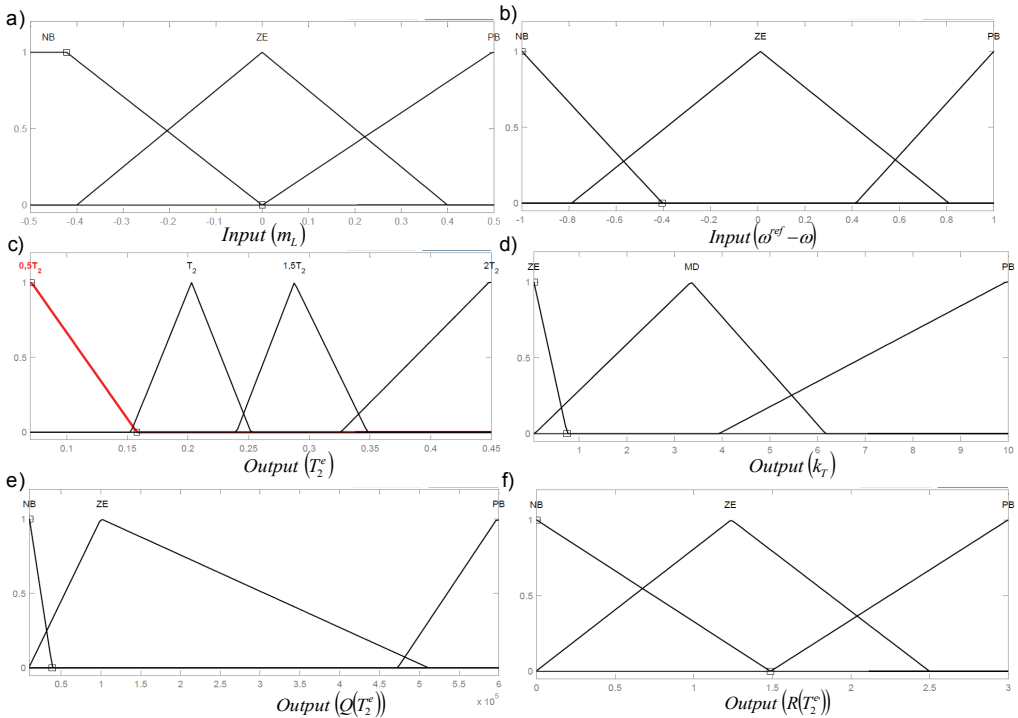
$$\underline{R_j} : \text{IF } er \text{ is } A_1^g \text{ AND } \omega^{ref} \text{ is } A_2^k \text{ THEN } k_T \text{ is } B_2^i \text{ AND } \tilde{Q} \text{ is } B_3^w \text{ AND } \tilde{R} \text{ is } B_4^z$$

gdzie: $A_{1,2}$ – zbiory wejściowe, $A_{1,2,3,4}$ – zbiory wyjściowe, k_T – wartość wzmocnienia, $Q(T_2)$, $R(T_2)$ – wartości macierzy kowariancji. Opisywany system składa się z 18 reguł. Agregacja odbywała się metodą sumy. Wartości wyjściowe wyznaczane były metodą środka ciężkości.

3. WYNIKI BADAŃ

W ramach badań symulacyjnych sprawdzono proponowaną koncepcję. Do rozważań przyjęto że regulator pracuje z poprawnymi parametrami. Napęd pracował w cyklu nawrotów z amplitudą 0,2 i okresem 4 s. Po ustaleniu się dodatniej prędkości następowało inercyjne załączenie momentu obciążenia na czas 1 s. Na rysunku 3 przedstawiono wybrane wyniki. Cykl pracy napędu przedstawiono na rys. 3e. Na pierwszym z prezentowanych przebiegów (rys. 3a) przedstawiono przebieg momentu obciążenia oraz jego estymaty przy zawyżonej i zaniżonej wartości stałej T_2 dla klasycznego filtru Kalmana. Z przebiegów tych widać że w zależności od błędu przyjętego parametru i kierunku zmian prędkości można jednoznacznie ocenić czy stała T_2 przyjęta w modelu filtru jest zaniżona, czy zawyżona (na rys. 3b przedstawiono same błędy estymacji momentu obciążenia). Na kolejnych dwóch prezentowanych przebiegach (rys. 3c, d) przedstawiono analogiczne sytuacje dla adaptacyjnego filtru Kalma-

na. Jak widać przy każdym z nawrotów następuje zmniejszenie błędu estymacji zarówno przy zwiększonej, jak i przy zmniejszonej stałej mechanicznej. Dodatkowo przedstawiono wpływ adaptacji na zmianę błędu estymacji prędkości obciążenia (rys. 3f). Jak widać zarówno w przypadku klasycznego, jak i adaptacyjnego estymatora błąd jest na niskim poziomie. Dodatkowo w przypadku układu adaptacyjnego następuje jego dalsze obniżenie.



Rys. 2. Funkcje przynależności systemu rozmytego wykorzystywanego w podukładzie adaptacji stałej mechanicznej maszyny roboczej: funkcje wejściowe (a, b), funkcje wyjściowe (c, d, e, f)

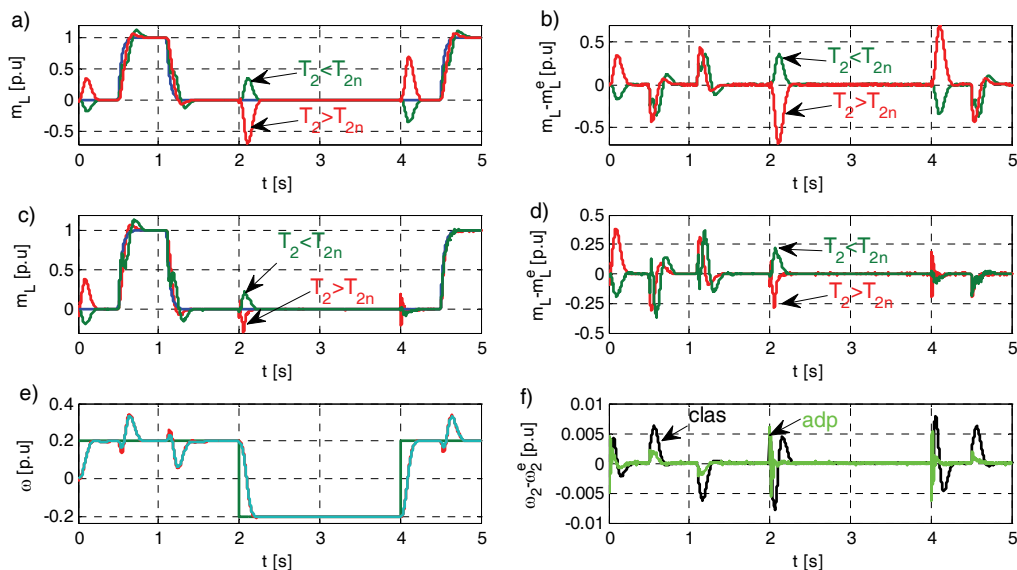
Fig. 2. Membership function of fuzzy system in subsystem of mechanical constant adaptation: a), b) input function, c), d), e) output function

4. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono wybrane zagadnienia projektowania adaptacyjnego filtra Kalmana dla napędu dwumasowego. Adaptacja ma na celu eliminację niekorzystnego wpływu błędu identyfikacji parametrów. Uzyskane wyniki porównanie zostały z klasycznym filtrem Kalmana. Z przeprowadzonych rozważań można przedstawić następujące wnioski.

Możliwa jest adaptacja parametrów modelu filtra na podstawie informacji o błędzie estymacji momentu obciążenia w początkowym czasie nawrotu. Zastosowanie powyższego algorytmu prowadzi do zmniejszenia błędu estymacji wszystkich zmiennych stanu. Niemożliwa jest natomiast równoczesna estymacja momentu obciążenia i adaptacja parametrów.

W dalszych pracach przewidziana jest eksperymentalna weryfikacja uzyskanych wyników.



Rys. 3. Przebiegi symulacyjne dla układu bez adaptacji (a, b), oraz z adaptacją (c, d), gdzie a), c) rzeczywisty i estymowany moment obciążenia, b), d) błąd estymacji momentu obciążenia, e) przebiegi prędkości, f) porównanie błędów estymacji prędkości obciążenia dla estymatora bez i z adaptacją

Fig. 3. Simulation study of the structure without adaptation (a, b), and with adaptation (c, d), where: a), c) real and estimation load torque, b), d) error of load speed estimation, e) speed waveform, f) comparison between error of load speed estimation in structure with and without estimation

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach umowy: UMO-2011/01/B/ST7/103500 (2011–2014).

LITERATURA

- [1] HACE A., JEZERNIK K., SABANOVIC A., *Improved Design of VSS Controller for a Linear Belt-Driven Servomechanism*, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2005, Vol. 10, No. 4, pp. 385–390.
- [2] VALENZUELA M.A., BENTLEY J.M., LORENZ R.D., *Evaluation of Torsional Oscillations in Paper Machine Sections*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, Vol. 41, No. 2, pp. 493–501.

- [3] HORI Y., SAWADA H., CHUN Y., *Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, 1999, Vol. 46, No. 1, pp. 162–168.
- [4] GUZIŃSKI J., ABU-RUB H., DIGUET M., KRZEMIŃSKI Z., LEWICKI A., *Speed and Load Torque Observer Application in High-Speed Train Electric Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, Iss. 2, pp. 565–574.
- [5] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 61, Wrocław 2008.
- [6] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAMIŃSKI M., *Application of the OBD method for optimization of neural state variable estimators of the two-mass drive system*, Neurocomputing, August 2009, Vol. 72, Iss. 13–15, pp. 3034–3045.
- [7] JAE SUNG BANG, HYUNGBO SHIM, SANG KYUN PARK, SEO J.H., *Robust Tracking and Vibration Suppression for a Two-Inertia System by Combining Backstepping Approach with Disturbance Observer*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, Iss. 9, pp. 3197–3206.
- [8] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Control of the Two-Mass Induction Motor Drive without Mechanical Sensors*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, Iss. 2, pp. 553–564.
- [9] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Application of the Kalman filters to the high performance drive system with elastic coupling*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2012, Vol. 1, Iss. 99.

ADAPTIVE KALMAN FILTER FOR THE DRIVE WITH ELASTIC COUPLING

The paper presents issues related to the estimation of state variables in drive with elastic coupling in case of a variable moment of inertia of the driven machine. The introduction briefly characterized problem of torsional vibrations in electric drive. In the next chapters presents model of the drive with elastic coupling and the Kalman filter. Then dealt with various cases of operation of the estimator to accurately set the parameters of the model, on the basis of proposed algorithm for tuning the filter. Theoretical considerations was supported by simulation studies.