

Piotr SERKIES*
Krzysztof SZABAT*

OCENA WPLYWU NIEDOKŁADNOŚCI WYZNACZENIA PARAMETRÓW NAPĘDU DWUMASOWEGO NA JAKOŚĆ ESTYMACJI ZMIENNYCH STANU PRZY WYKORZYSTANIU OBSERWATORA Z PRZESUWANYM OKNEM

W referacie przedstawiono analizę wpływu parametrów napędu dwumasowego na poprawność pracy estymatora z ruchomym oknem (Moving Horizon Estimation). We wstępie omówiono zagadnienia związane z potrzebą wyznaczenia niemierzalnych zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym oraz wykorzystywane do tego celu metody. W kolejnych rozdziałach omówiono model napędu oraz zasadę estymacji z przesuwającym oknem. W rozdziale trzecim zaprezentowano wpływ niedokładności wyznaczenia parametrów na jakość estymacji.

SŁOWA KLUCZOWE: estymatory z ruchomym oknem (MHE), napęd z połączeniem sprzężystym

1. WPROWADZENIE

Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej układów sterowania w obszarze napędu elektrycznego obserwuje się wzrost zainteresowania coraz to bardziej zaawansowanymi strukturami regulacji [1–3]. Duża część z nich wymaga precyzyjnej informacji o trudno mierzalnych bądź niemierzalnych zmiennych stanu [2, 3]. Z tego powodu do ich wyznaczenia wykorzystuje się coraz bardziej zaawansowane struktury estymacji. Można tu wyróżnić Filtry Kalmana [4], estymatory bazujące na logice rozmytej [5] czy metody hybrydowe bazujące na połączeniu obu tych technik [6].

Estymatory z ruchomym oknem (MHE) są zaawansowaną techniką regulacji bazującą na minimalizacji funkcji celu w skończonym oknie próbek [7]. Metoda ta jest szeroko stosowana w chemii i petrochemii [8]. Jednak w obszarze napędów elektrycznych nie ma prac opisujących jej wykorzystanie do estymacji zmiennych stanu.

W niniejszej pracy przedstawione zostanie wykorzystanie liniowego obserwatora z ruchomym oknem do estymacji mechanicznych zmiennych stanu

* Politechnika Wroclawska.

napędu z połączeniem sprężystym. Przeprowadzona zostanie analiza wpływu błędu wyznaczenia parametrów na jakość estymacji.

W literaturze znaleźć można wiele różnych modeli napędu z połączeniem sprężystym. W niniejszej pracy wykorzystano model z bezinercyjnym połączeniem sprężystym opisany poniższymi równaniami [1]:

$$\frac{d}{dt}\omega_1 = \frac{1}{T_1}(m_e - m_s) \quad (1a)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_2 = \frac{1}{T_2}(m_s - m_L) \quad (1b)$$

$$\frac{d}{dt}m_s = \frac{1}{T_c}(\omega_1 - \omega_2) \quad (1c)$$

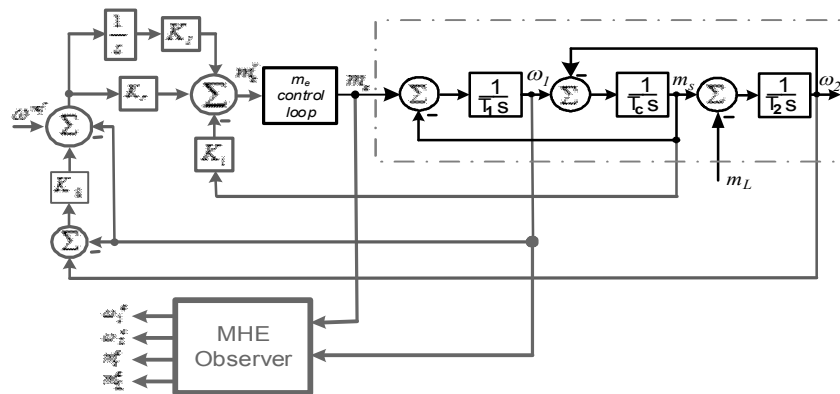
gdzie: m_e – moment elektromagnetyczny, ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość maszyny obciążającej, m_s – moment skrętny, m_L – moment obciążenia, T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej (roboczej), T_c – stała czasowa elementu sprężystego. Wartości znamionowe parametrów układu wynosiły ($T_1 = T_2 = 203$ ms, $T_c = 1.2$ ms).

Na rys. 1. przedstawiono analizowaną strukturę sterowania. Wymaga on informacji o niemierzalnych zmiennych stanu układu napędowego. Nastawy regulatora dobrano zgodnie z zależnościami przedstawionymi w [1]:

$$k_8 = \frac{1}{\omega_0^2 T_2 T_c} - 1; k_1 = \frac{T_1(4\xi_0^2 - k_8)}{T_2(1 + k_8)} \quad (2)$$

$$K_I = \omega_0^4 T_1 T_2 T_c; K_P = 4\xi_0 \omega_0^3 T_1 T_2 T_c$$

gdzie: k_1 – wsp. sprzężenia od momentu skrętnego, K_P – wzmacnienie regulatora, K_I – Wzmacnienie w torze całkowania, ξ_0 – żądany współczynnik tłumienia ω_0 – żądana pulsacja rezonansowa.



Rys. 1. Struktura sterowania

2. ESTYMATOR Z RUCHOMYM OKNEM

Rozważmy dyskretny system dynamiczny opisany równaniami stanu:

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= Ax_t + Bu_t + \zeta_t \\ y_t &= Cx_t + \eta_t\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie: $x_t \in R^{n_x}$, $u_t \in R^{n_u}$, $y_t \in R^{n_y}$, są wektorami stanu, wejść i wyjść mierzalnych. $\zeta_t \in R^{n_x}$ są niemodelowanymi zakłóceniami systemowymi, $\eta_t \in R^{n_y}$ są zakłóceniami sygnałów wyjściowych, t jest dyskretnym indeksem czasu.

MHE jest rekurencyjnym algorytmem estymacji zmiennych stanu rozpatrywanym na skończonym oknie danych. Wyznaczanie parametrów wektora stanu zachodzi w każdej chwili czasu $t = N, N+1, \dots$, z uwzględnieniem historycznych wartości estymaty wektora stanu $x_{t-N}, x_{t-N+1}, \dots, x_t$ na podstawie wstępnej estymaty $\bar{x}_{t-N,t}$ i na podstawie wektora informacji wejściowych $J_t = \text{col}(y_{t-N}, \dots, y_t, u_{t-N}, \dots, u_t)$, gdzie $N+1$ jest szerokością okna. Dla każdej chwili czasowej liniowy problem estymatora z ruchomym oknem [7] jest formułowany jako:

$$J(\hat{x}_{t-N,t}, \bar{x}_{t-N,t}, I_t) = \|y_{t-N,t} - \hat{y}_{t-N,t}\|^2 + \alpha \|\hat{x}_{t-N,t} - \bar{x}_{t-N,t}\|^2 \quad (4a)$$

Z uwzględnieniem:

$$\hat{x}_{i+1,t} = A\hat{x}_{i,t} + Bu_i, \quad i = t-N, \dots, t-1 \quad (4b)$$

$$\hat{y}_{i,t} = C\hat{x}_{i,t}, \quad i = t-N, \dots, t \quad (4c)$$

gdzie: $\alpha \geq 0$, $y_{t-N} = \text{col}(y_{t-N}, \dots, y_t)$, $\hat{y}_{t-N} = \text{col}(\hat{y}_{t-N}, \dots, \hat{y}_t)$.

W równaniu (4c) $\hat{x}_{i+1,t}$ jest predykcją wektora stanu. Aby ograniczyć wpływ niestabilnej dynamiki obiektu, lub niedokładności wyznaczenia modelu proponuje się wprowadzenie korekcji przewidywanej wartości wektora stanu z wykorzystaniem obserwatora Luenbergera, bądź filtra Kalmana [7, 9] w równaniu (4b). Po uwzględnieniu powyższego założenia problem wyznaczenia estymaty stanu z wykorzystaniem obserwatora z ruchomym oknem można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned}J(\hat{x}_{t-N,t}, \bar{x}_{t-N,t}, I_t) &= \|W(y_{t-N,t} - \hat{y}_{t-N,t})\|^2 \\ &+ \alpha \|\hat{x}_{t-N,t} - \bar{x}_{t-N,t}\|^2\end{aligned}\quad (5a)$$

Z uwzględnieniem:

$$\hat{x}_{i+1,t} = A\hat{x}_{i,t} + Bu_i + L(y_{i,t} - \hat{y}_{i,t}), \quad i = t-N, \dots, t-1 \quad (5b)$$

$$\hat{y}_{i,t} = C\hat{x}_{i,t}, \quad i = t-N, \dots, t \quad (5c)$$

gdzie: $W \in R^{n_x(N+1)n_y}$ jest macierzą wag różnicujących wpływ poszczególnych próbek historycznych na wartość funkcji celu, $L \in R^{n_x n_y}$ jest macierzą wzmocnień obserwatora.

Wartość optymalnej sekwencji estymowanego wektora stanu, która minimalizuje funkcję (5), można oznaczyć przez $\hat{x}_{t-N,t}$. Na tej podstawie predyktowany stan z równania (3b) można zapisać jako:

$$\bar{x}_{t-N,t} = A\hat{x}_{t-N,t-1}^o + Bu_{t-N-1} + L(y_{t-N-1} - \hat{y}_{t-N-1,t-1}^o) \quad (6a)$$

$$\hat{y}_{t-N-1,t-1}^o = C\hat{x}_{t-N-1,t-1}^o, \quad i = t - N, \dots, t \quad (6b)$$

Dla celów estymacji zmiennych stanu model napędu (1) należy przekształcić do postaci (3) oraz wektor stanu rozszerzyć o moment obciążenia.

$$x^e = \begin{bmatrix} \omega_1^e \\ \omega_2^e \\ m_s^e \\ m_L^e \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} & \frac{-1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T; C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (7)$$

Powyższy model został poddany dyskretyzacji z czasem $T_s = 1ms$ i ekstrapolacją zerowego rzędu. Postać funkcji celu, która minimalizowana jest w każdym kroku estymacji można przedstawić jako:

$$J = (\Omega_1^N - C \cdot X^N) \mathbf{W} (\Omega_1^N - C \cdot X^N)^T + \alpha (X^N - \bar{X}^N) \cdot (X^N - \bar{X}^N)^T \quad (8a)$$

$$x_{i+1}^e = Ax_i^e + Bm_{ei} + L(\omega_{li} - C \cdot x_i^e) \quad (8b)$$

$$\Omega_1^N = [\omega(i-N) \ \omega(i-N+1) \ \dots \ \omega(i)]^T \quad (8c)$$

$$X^N = [x^e(i-N) \ x^e(i-N+1) \ \dots \ x^e(i)]^T \quad (8d)$$

$$\bar{X}^N = [x^e(i-N-1) \ x^e(i-N) \ \dots \ x^e(i-1)]^T \quad (8e)$$

gdzie: Ω_1^N – wektor sygnałów wyjściowych zdefiniowanych na horyzoncie N , X^N – wektor zmiennych stanu zdefiniowany na horyzoncie okna N , \bar{X}^N – wektor predyktowanych z poprzedniego kroku obliczeniowego zmiennych stanu zdefiniowany na horyzoncie okna N , \mathbf{W} – macierz wagowa różnicująca wpływ poszczególnych próbek historycznych na wartość funkcji celu.

3. UZYSKANE WYNIKI

Badania przeprowadzono w programie *Matlab-Simulink*. Obserwator zapisany został jako *S-funkcja* typu drugiego. Jako procedurę minimalizacji wykorzystano algorytm gradientowy bez ograniczeń. W badaniach przeprowadzono analizę

wpływu zmian parametrów obiektu na jakość estymacji zmiennych stanu przy różnych wartościach wag W . Regulator nadrzędny został nastrojony z uwzględnieniem dużej dynamiki pętli regulacji prędkości ($\omega_0 = 90,7$, $\zeta_0 = 0,95$). Algorytm badania był następujący: W pierwszej chwili wartości 0.3. Następnie po jej ustaleniu w czasie 0.2 s następowало przyłożenie znamionowego momentu obciążenia. Całość symulacji trwała 0.5 s. Na wejścia obserwatora wprowadzono zakłócenia o amplitudzie 0.2%. Struktura obliczana była z kokiem 800 μ s.

Do rozważań przyjęto następujące parametry obserwatora: $\alpha = 1000$, długość okna przyjęto na poziomie trzech próbek historycznych $N = 3$. Wartość wektora wzmocnień obserwatora dobrano z wykorzystaniem algorytmu filtru Kalmana przy kowariancji błędu $Q = \text{diag}(1, 20, 300, 50000)$ co po obliczeniu wzmocnień Kalmana dało wektor postaci $L = [1.055; 17.064; -76.89; -318.28]$. Wagi macierzy W dobrano odpowiednio do przyjętej długości okna estymacji z założeniem jednakowego oddziaływania próbek historycznych na wartość funkcji celu.:

$$W = W_0 \cdot \text{diag}(N) \quad (9)$$

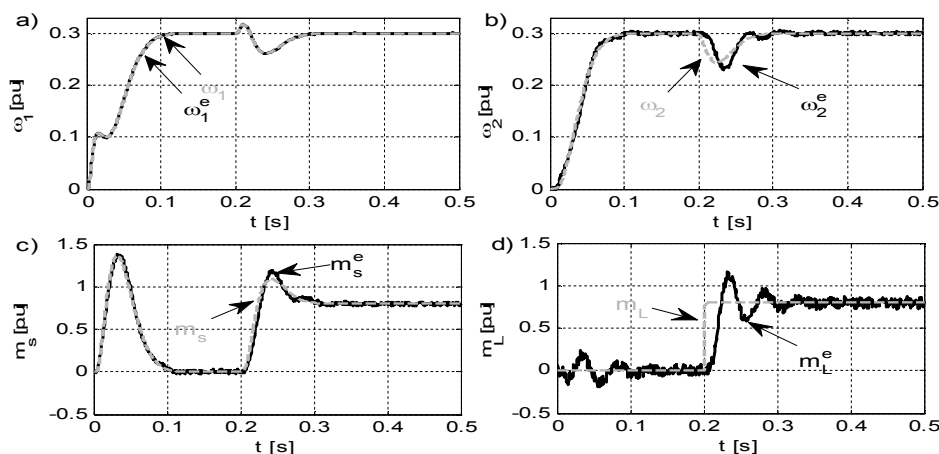
Do oceny działania algorytmu wykorzystano wskaźnik postaci:

$$\Delta(x(i)) = \frac{\sum_{k=1}^K (x(i) - x^e(i))}{K} \quad (10)$$

gdzie: K – ilość próbek, $x(i)$ oznacza daną zmienną stanu.

W pierwszej kolejności sprawdzono działanie estymatora przy znamionowych parametrach. Do badań przyjęto $W_0 = 1000$. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 2. W przypadku znamionowych parametrów estymator cechuje się bardzo szybkimi odpowiedziami i dobrym tłumieniem szumów. Jedynie w przebiegach estymowanego momentu obciążenia widoczne są oscylacje estymaty oraz zauważalne wzmocnienie szumów. W kolejnym kroku sprawdzono wpływ wagi W_0 na jakość estymacji w szerokim zakresie zmian mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. Do rozważań przyjęto zakres od 20% wartości znamionowej do 2.5 krotności jej wyjściowej wartości. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 3.

Zmniejszenie wagi W_0 poniżej wartości wagi α powoduje wzrost średniej wartości błędu estymacji prędkości silnika napędowego (rys. 3.a) w całym zakresie zmian rozpatrywanego parametru obiektu. W przypadku pozostałych zmiennych stanu widać brak oddziaływania na jakość estymacji, bądź w przypadku momentu skrętnego i prędkości obciążenia widać niewielką poprawę jakości estymacji w obszarze minimalnej wartości mechanicznej stałej czasowej (rys. 3. b, c). Zwiększenie wartości parametru W_0 powoduje zwiększenie średniej wartości błędu estymacji (rys. 3. b, c, d).



Rys. 2. Przebiegi czasowe rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu:

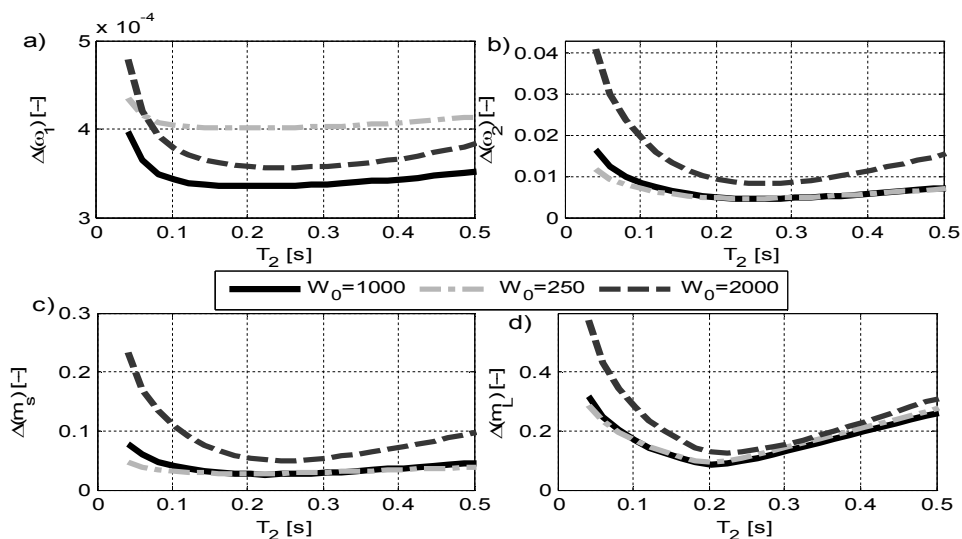
a) prędkości silnika napędowego, b) prędkości obciążenia, c) momentu elektromagnetycznego, d) momentu obciążenia

Kolejno przeanalizowano wpływ zmian struktury macierzy \mathbf{W} na właściwości estymatora. Do rozważań przyjęto trzy struktury wektora $\mathbf{W}_1 = \text{diag}(1 \ 1 \ 1 \ 1)$, $\mathbf{W}_2 = \text{diag}(1 \ 0.75 \ 0.5 \ 0.25)$, $\mathbf{W}_3 = \text{diag}(0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1)$.

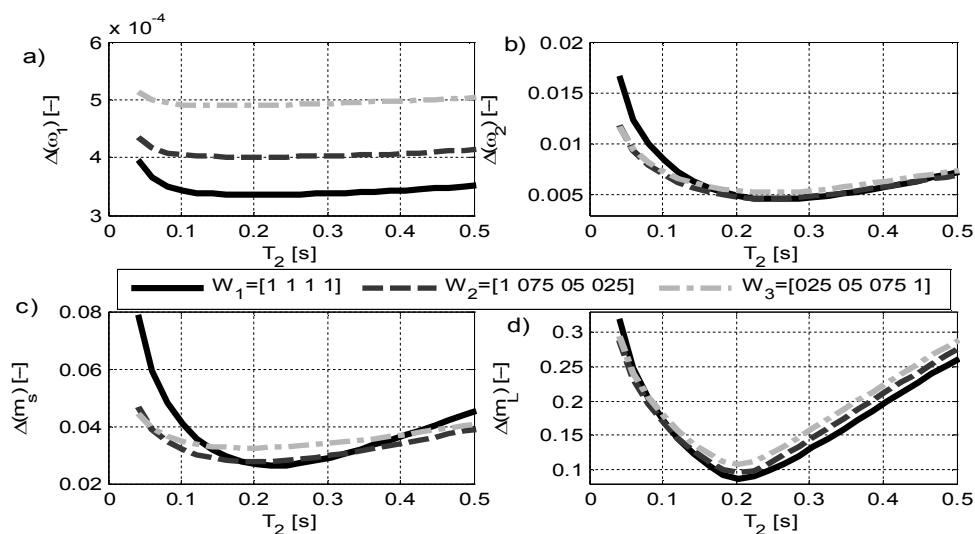
Pierwszy z przyjętych wektorów zakłada równomierne oddziaływanie próbek historycznych i aktualnych, drugi zakłada uwypuklenie informacji z próbek historycznych a trzeci sytuację odwrotną. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4. Jak widać uwypuklenie oddziaływania próbek historycznych znacząco poprawia jakość estymacji w przypadku zmian parametrów, szczególnie w przypadku prędkości obciążenia i momentu skrętnego (rys. 4. b,c). Natomiast w przypadku estymacji prędkości silnika napędowego i momentu obciążenia można zauważyć negatywny wpływ zmiany wektora różnicującego.

4. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono konstrukcję oraz wpływ niedokładności wyznaczenia parametrów obiektu na jakość estymacji obserwatora z ruchomym oknem (*MHE*). Przedstawiono analizę wpływu zmian jego parametrów na dokładność pracy w szerokim zakresie zmian mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. Z przeprowadzonej analizy wynika, że przyjęcie jednakowych wartości wsp. α i \mathbf{W}_0 daje najlepsze rezultaty. W przypadku uwypuklenia oddziaływania próbek historycznych można zauważyć zwiększenie jakości estymacji szczególnie w obszarze niedoszacowania rozpatrywanego parametru mechanicznego.



Rys. 3. Wpływ zmian T_2 na jakość estymacji: a) prędkości silnika napędowego, b) prędkości obciążenia, c) momentu elektromagnetycznego, d) momentu obciążenia, dla różnych wartości W_0



Rys. 4. Wpływ zmian T_2 na jakość estymacji: a) prędkości silnika napędowego, b) prędkości obciążenia, c) momentu elektromagnetycznego, d) momentu obciążenia, dla różnych konfiguracji wektora W

LITERATURA

- [1] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 54 (2007) 2, 1193-1206.
- [2] Serkies P., Szabat K., “Application of the MPC controller to the Position Control of the Two-Mass Drive System”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 60 (2013) no. 9, 3679 – 3688.
- [3] Bang J.S., Shim H., Park S. K., 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* 59(7): pp. 3197-3206, 2010.
- [4] Serkies P., Zagadnienia projektowania liniowego filtru Kalmana dla zaawansowanej struktury sterowania układu dwumasowego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*. 2011, nr 31, s. 341-354.
- [5] Kamiński M., Tran-Van T., Szabat K., Optymalizacja struktur neuronowo-rozmytych estymatorów zmiennych stanu układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny* 87 (2013), 7.
- [6] Szabat K., Tran-Va T., Kaminski M., A Modyfied Fuzzy Luenberger Observer For a Two-Mass Drive System, *IEEE Transactions on Industrial Informatics Early Access*.
- [7] Sui D. Johansen T. A. Feng L., Linear moving horizon estimation with pre-estimating observer. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 55 (2010) 10, 2363-2368.
- [8] Kühl P., Diehl M., Kraus T., Schlöder J. P., Bock H. G., A real-time algorithm for moving horizon state and parameter estimation. *Computers & che. engin*, 35 (2011) 1, 71-83.
- [9] Poloni T., Rohal'-Ilkiv B., Johansen T. A., Parallel numerical optimization for fast adaptive nonlinear moving horizon estimation. *10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2013 (pp. 40-47).

DETERMINE THE IMPACT OF THE DUAL MASS DRIVE PARAMETERS ON THE QUALITY OF THE ESTIMATION OF STATE VARIABLES USING THE OBSERVER WITH SLIDING WINDOW

The paper presents an analysis of the impact of the dual mass drive parameter estimator for the proper operation of the moving window. The introduction provides issues related to the need to appoint unmeasured state variables in drive with elastic coupling and used method for this purpose. In the following chapters, presents a model of the drive, and the principle of estimation of the sliding window. The third chapter presents the impact of inaccuracies designation parameters on the quality of the estimation.