

*układ dwumasowy, obserwator Luenbergera,
tłumienie drgań*

Than TRAN VAN*

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH OBSERWATORA LUENBERGERA DLA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem obserwatora Luenbergera dla układu napędowego z połączeniem sprężystym. Po krótkim wprowadzeniu omówiono model matematyczny obiektu badań. Kolejno przedstawiono metodologię projektowania obserwatora Luenbergera. Przedstawiono podejście klasyczne w którym zakłada się istnienie podwójnych biegunów estymatora. Następnie zaproponowano zmodyfikowane rozłożenie biegunów systemu: na okręgu i na prostej. Porównano właściwości układu klasycznego z układem o innym rozłożeniu biegunów.

1. WPROWADZENIE

Drgania skrętne występują w różnych grupach napędów przemysłowych. Można zaliczyć do nich napędy walcarek, robotów, obrabiarek numerycznych, elektrowni wiatrowych i innych [1]–[12]. Prowadzą one do obniżenia jakości wytwarzanego produktu, a w szczególnych przypadkach mogą nawet doprowadzić do jego zniszczenia. W celu eliminacji drgań skrętnych stosuje się różne podejścia. Najbardziej zaawansowane bazują na implementacji specjalnych układów regulacji [11]–[17]. Struktury te wymagają informacji o wektorze zmiennych stanu układu dwumasowego. Ponieważ w standardowych układach napędowych dostępne są tylko sygnały momentu elektromagnetycznego i prędkości silnika napędowego konieczne jest zastosowanie specjalnych metod estymacji [15]–[23].

Jedną z najczęściej stosowanych metod estymacji jest obserwator Luenbergera. Do jego zalet zalicza się łatwość doboru parametrów estymatora i prostotę implementacji praktycznej. Jako wadę wymienia się małą odporność na zakłócenia pomiarowe i pa-

* Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: than.tran-van@pwr.wroc.pl

rametryczne [1]. Kolejną metodą estymacji jest filtr Kalmana [1]. Uważany jest on za optymalny estymator zmiennych stanu układu napędowego w obecności zakłóceń pomiarowych i parametrycznych. Wymaga on jednak określonego charakteru szumów co nie zawsze jest spełnione w układach rzeczywistych. W ostatnich latach zyskują na popularności estymatory neuronowe i rozmyte. Umożliwiają one projektowanie estymatorów bez znajomości modelu matematycznego obiektu; nie stawiają żadnych wymagań odnośnie charakteru szumów występujących w układzie. Ich wadą jest konieczność posiadania danych pomiarowych zarejestrowanych na obiekcie w różnych warunkach. Z reguły są one bardziej złożone obliczeniowo niż układy klasyczne. Dodatkowo badanie stabilności całego układu regulacji z estymatorem neuronowym (rozmytym) jest utrudnione. Z tych powodów nie są one popularne w układach przemysłowych [17]–[23].

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem obserwatora Luenbergera dla układu napędowego z połączeniem sprężystym. Po krótkim wprowadzeniu w tematykę artykułu przedstawiono model matematyczny obiektu badań. Następnie omówiono metodykę doboru parametrów obserwatora. Przeanalizowano wpływ zmiany klasycznego podwójnego rozłożenia biegunów obserwatora na jego właściwości dynamiczne.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU BADAŃ

Przedmiotem badań jest układ napędowy z połączeniem sprężystym. Składa się on z mas skupionych silnika i obciążenia rozmieszczonych na końcach sprężystego wału. Do rozważań przyjęto model układu mechanicznego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym [1]. Badany obiekt opisany jest następującym równaniem stanu (w jednostkach względnych):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d}{T_1} & \frac{d}{T_1} & -\frac{1}{T_1} \\ \frac{d}{T_2} & -\frac{d}{T_2} & \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_e \\ m_o \end{bmatrix}. \quad (1)$$

gdzie:

- m_e – moment elektromagnetyczny,
- ω_1 – prędkość silnika,
- ω_2 – prędkość maszyny obciążającej,
- m_s – moment skrętny,
- m_o – moment obciążenia,

- T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika,
- T_2 – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej,
- T_c – stała czasowa elementu sprężystego,
- d – współczynnik tłumienia wewnętrznego.

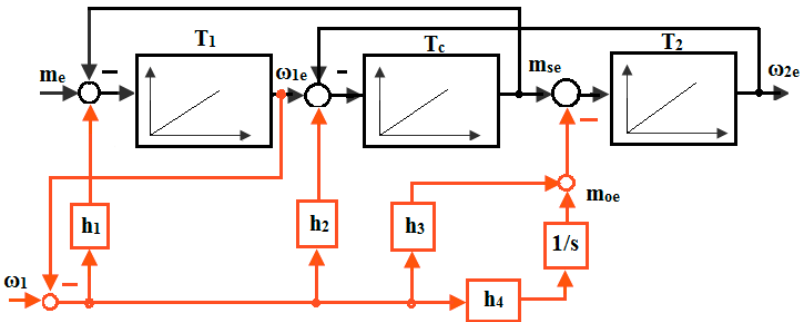
Ze względu na niewielką wartość współczynnika d pomija się go w dalszej analizie układu napędowego.

3. OBSERWATOR LUENBERGERA

W niniejszej sekcji przedstawiono metodologię doboru wzmacnień w obserwatorze Luenbergera. Za wielkość wejściową obserwatora przyjmuje się moment elektromagnetyczny m_e , natomiast wielkość wyjściową stanowi prędkość silnika ω_1 . Estymacji podlegają pozostałe zmienne stanu układu: moment skrętny m_s i prędkość maszyny obciążającej ω_2 . Dodatkowo, aby poprawić jakość estymacji, odtwarza się również niedostępny pomiarowo moment obciążenia m_o , który traktuje się jako dodatkową zmienną stanu. Równanie obserwatora w przestrzeni stanu przyjmuje następującą postać:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_1(t) \\ \hat{\omega}_2(t) \\ \hat{m}_s \\ \hat{m}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega}_1(t) \\ \hat{\omega}_2(t) \\ \hat{m}_s \\ \hat{m}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot m_e + \begin{bmatrix} \frac{h_1}{T_1} \\ \frac{h_3}{T_2} \\ \frac{h_2}{T_c} \\ k_o \end{bmatrix} \cdot (\omega_1 - \hat{\omega}_1) \quad (2)$$

Schemat blokowy obserwatora odpowiadający powyższym równaniom przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy obserwatora Luenbergera dla układu dwumasowego
Fig. 1. The block diagram of the Luenberger observer

Na właściwości dynamiczne układu regulacji wykorzystującego zmienne stanu pochodzące z obserwatora jak i samego estymatora decydujący wpływ mają współczynniki wzmacnień układu. Ich dobór jest możliwy za pomocą metody rozłożenia biegunów równania charakterystycznego [1]. Zgodnie z metodą sterowania modalnego traktuje się obserwator jako zamknięty układ regulacji. Wykorzystując zależność:

$$p(s) = \det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{G} \cdot \mathbf{C}))$$

$$= \det \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{h_1}{T_1} \\ \frac{h_3}{T_2} \\ \frac{h_2}{T_c} \\ h_4 \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0 \ 0 \ 0] \right) \right) \quad (3)$$

uzyskuje się wielomian charakterystyczny estymatora w postaci następującego równania:

$$p(s) = s^4 + \frac{h_1}{T_1} s^3 + \frac{1}{T_c} \left(\frac{1}{T_2} + \frac{1-h_2}{T_1} \right) s^2 + \frac{h_1 + h_3}{T_1 T_2 T_c} s - \frac{h_4}{T_1 T_2 T_c} \quad (4)$$

W niniejszej pracy przyjęto, że transmitancja układu odniesienia składa się z dwóch członów oscylacyjnych II rzędu połączonych szeregowo:

$$p(s) = (s^2 + 2\xi_{r1}\omega_{r1}s + \omega_{r1}^2)(s^2 + 2\xi_{r2}\omega_{r2}s + \omega_{r2}^2) \quad (5)$$

Należy zwrócić uwagę, że przyjęta postać umożliwia uzyskanie dowolnego położenia biegunów układu zamkniętego. Ponieważ $\omega_{r1,2}$ i $\xi_{r1,2}$ mogą występować przy analizie kaskadowej struktury sterowania układu dwumasowego, przyjmuje się, że $p_1 = \omega_{r1}$, $p_2 = \omega_{r2}$ oraz $a_1 = \xi_{r1}$, $a_2 = \xi_{r2}$ w celu odróżnienia obu wielkości. Wielomian obserwatora przyjmuje więc następującą postać:

$$p(s) = s^4 + s^3(2a_1p_1 + 2a_2p_2) + s^2(p_1^2 + p_2^2 + 4a_1a_2p_1p_2) + s(2a_1p_2^2p_1 + 2a_2p_1^2p_2) + p_1^2p_2^2 = 0 \quad (6)$$

gdzie :

p_1, p_2 – miara szybkości obserwatora,

a_1, a_2 – współczynnik tłumienia obserwatora.

Po przyrównaniu wielomianu odniesienia (6) do równania charakterystycznego obserwatora (4), otrzymuje się następujący układ równań:

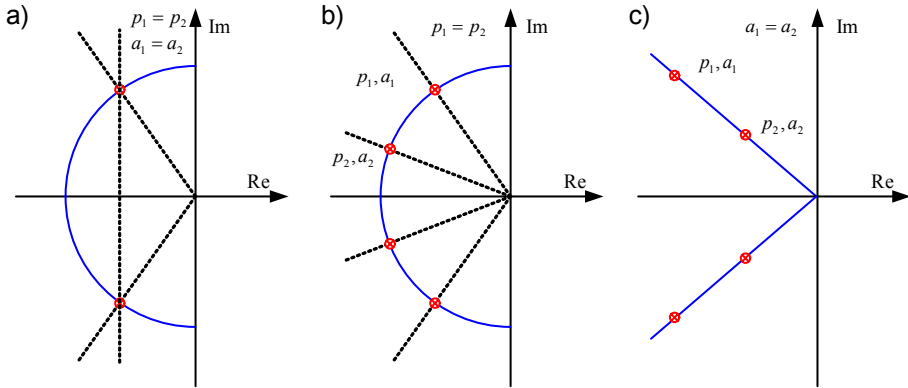
$$h_1 = 2T_1(a_1p_1 + a_2p_2) \quad (7a)$$

$$h_2 = \frac{T_1}{T_2} + 1 - T_1 T_c (p_1^2 + p_2^2 + 4a_1 a_2 p_1 p_2) \quad (7b)$$

$$h_3 = 2T_1 T_2 T_c (a_1 p_1 p_2^2 + a_2 p_2 p_1^2) - 2T_1 (a_1 p_1 + a_2 p_2) \quad (7c)$$

$$h_4 = -T_1 T_2 T_c p_1^2 p_2^2 \quad (7d)$$

Zgodnie z równaniami (7) istnieje całkowita dowolność w doborze położenia biegunów układu obserwatora Luenbergera. W celu odniesienia istniejących możliwości do rozwiązań znanych z literatury (podwójne położenie biegunów), w pracy przyjęto następującą metodologię. Jako pierwszy rozpatrywano układ z biegunami podwójnymi. Współczynniki obserwatora dobrano w sposób zapewniający najmniejsze błędy estymacji zmiennych stanu układu w obecności szumów pomiarowych i parametrycznych. Następnie rozpatrzono obserwator Luenbergera o alternatywnym rozłożeniu biegunów: na okręgu i na prostej. W pierwszym przypadku uzyskuje się jednakową pulsację rezonansową biegunów estymatora, w drugim jednakową wartość współczynnika tłumienia. Na rysunku 2 przedstawiono rozważane położenia biegunów obserwatora.



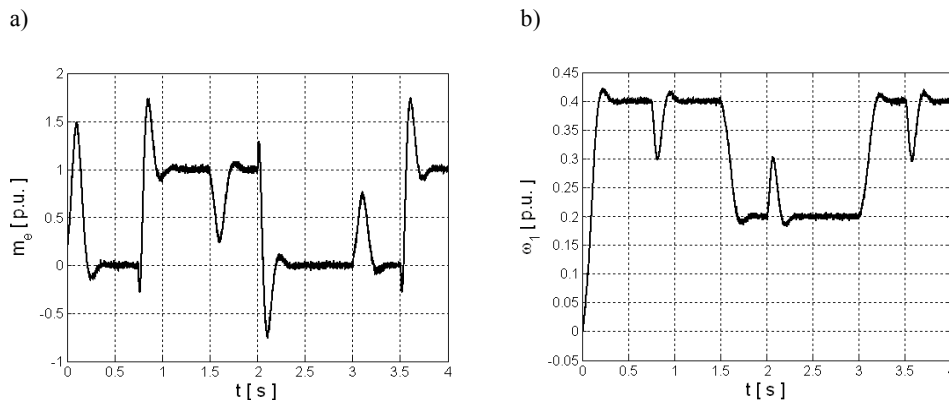
Rys. 2. Klasyczne i alternatywne rozłożenie biegunów obserwatora Luenbergera: rozłożenie klasyczne (a), na okręgu: (b) oraz na prostej (c)

Fig. 2. Classical and alternative location of the observer closed-loop poles: classical location (a), on the circle (b), on the line (c)

4. WYNIKI BADAŃ

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań ukazujących wpływ położenia biegunów układu zamkniętego na jakość estymacji zmiennych stanu za pomocą

obserwatora Luenbergera. Sygnały wejściowe estymatorów, tj. moment elektromagnetyczny i prędkość silnika, pobrano z zamkniętego układu regulacji i zakłócono szumami białymi odwzorowującymi szumy występujące w układzie rzeczywistym o wartości średniej 0,02 dla momentu elektromagnetycznego oraz 0,01 dla prędkości silnika (rys. 3). Znamionowe parametry układu napędowego wynosiły $T_1 = 203$ ms, $T_2 = 406$ ms, $T_c = 2,6$ ms. Aby uniknąć wchodzenia w ograniczenie momentu elektromagnetycznego, maksymalna wartość prędkości zadanej silnika wynosiła $0,4 \omega_N$.



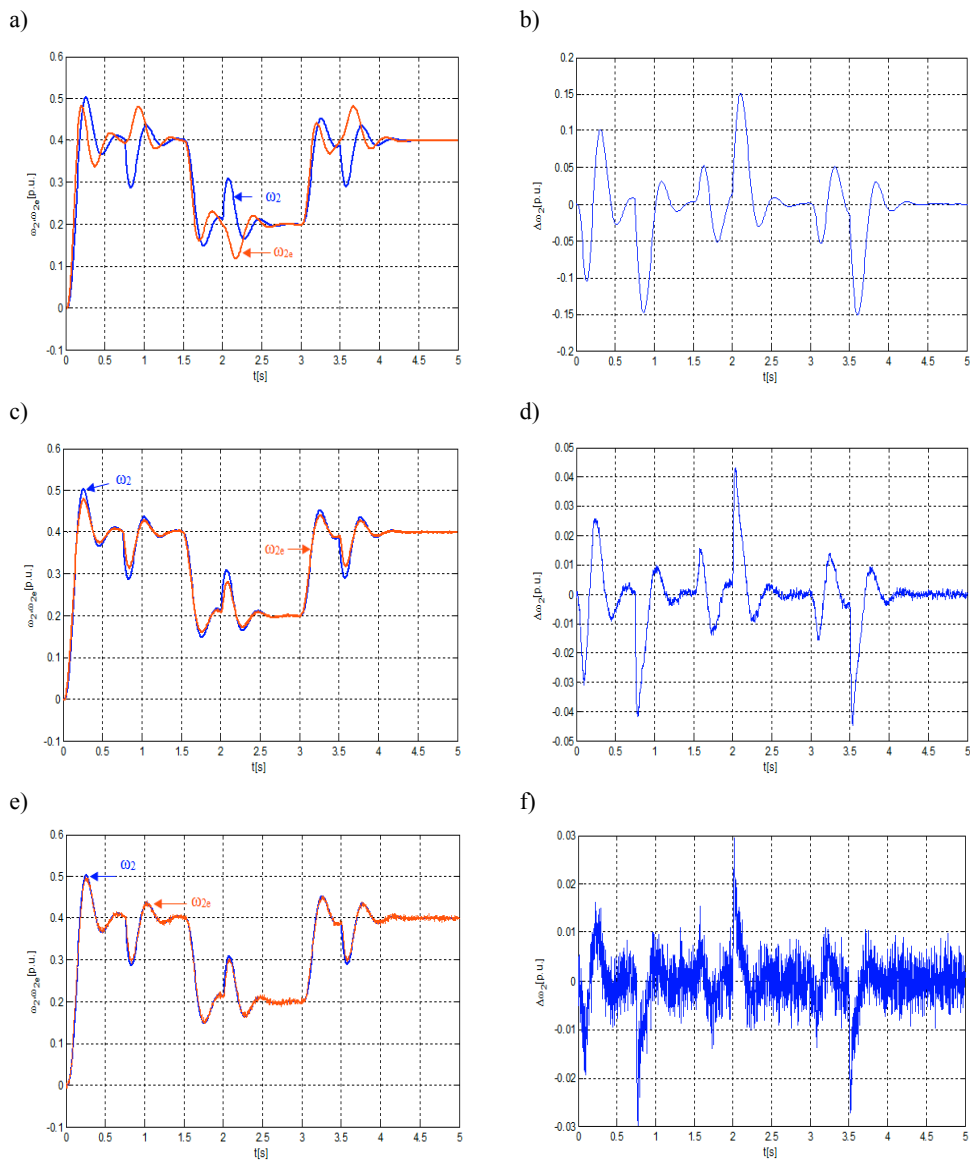
Rys. 3. Przebieg sygnałów wejściowych estymatorów: momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika (b)

Fig. 3. The transients of the input signal of the observer: electromagnetic torque (a), motor speed (b)

Jako zakłócenie parametryczne założono dwukrotnie większą wartość stałej czasowej T_2 w obserwatorze. Kolejno zbadano wpływ szybkości estymatora na jakość estymacji zmiennych stanu. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi estymowanej i rzeczywistej prędkości obciążenia dla szybkości estymatora $p = 1, 3, 5\omega_o$ (gdzie ω_o jest założoną szybkością układu regulacji).

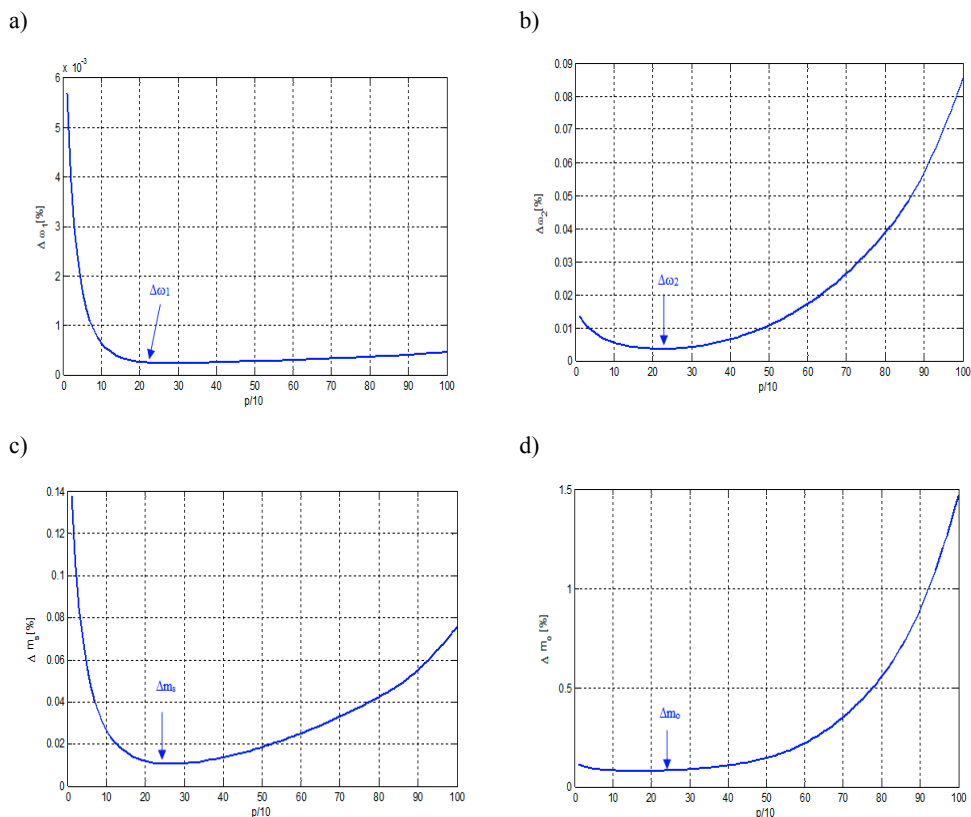
Jak wynika z analizy przebiegów przedstawionych na rys. 4 jakość estymacji prędkości obciążenia w decydującym stopniu zależy od szybkości obserwatora. Dla jej małych wartości w przebiegach prędkości układu występują znaczne różnice pomiędzy rzeczywistą i estymowaną zmienną. Wzrost szybkości estymatora minimalizuje różnice pomiędzy rzeczywistymi i estymowanymi zmiennymi (rys. 4 c,e). Jednakże zbyt duża wartość współczynników obserwatora prowadzi do wzmacniania szumów pomiarowych (rys. 4 e,f). Są one zwłaszcza widoczne w przebiegu błędu estymacji (rys. 4f). Podobne wnioski można wysnuć na podstawie przebiegów pozostałych zmiennych stanu układu napędowego. Na rys. 5 przedstawiono błędy estymacji wszystkich zmiennych stanu układu w zależności od pulsacji obserwatora. Dla danego układu istnieją optymalne wzmocnienia estymatora zapewniające minimalne błędy estymacji zmiennych stanu. Nastawy te są kompromisem pomiędzy szybkością reakcji

na zakłócenia a wzmacnianiem szumów pomiarowych obecnych w układzie rzeczywistym.



Rys. 4. Przebiegi prędkości ω_2 : rzeczywistej i estymowanej oraz błędy estymacji $p = \omega_o$, (a, b) dla $p = 3 \omega_o$, (c, d) dla $p = 5 \omega_o$, (e, f) w przypadku $T_2 = 2 * T_{2N}$

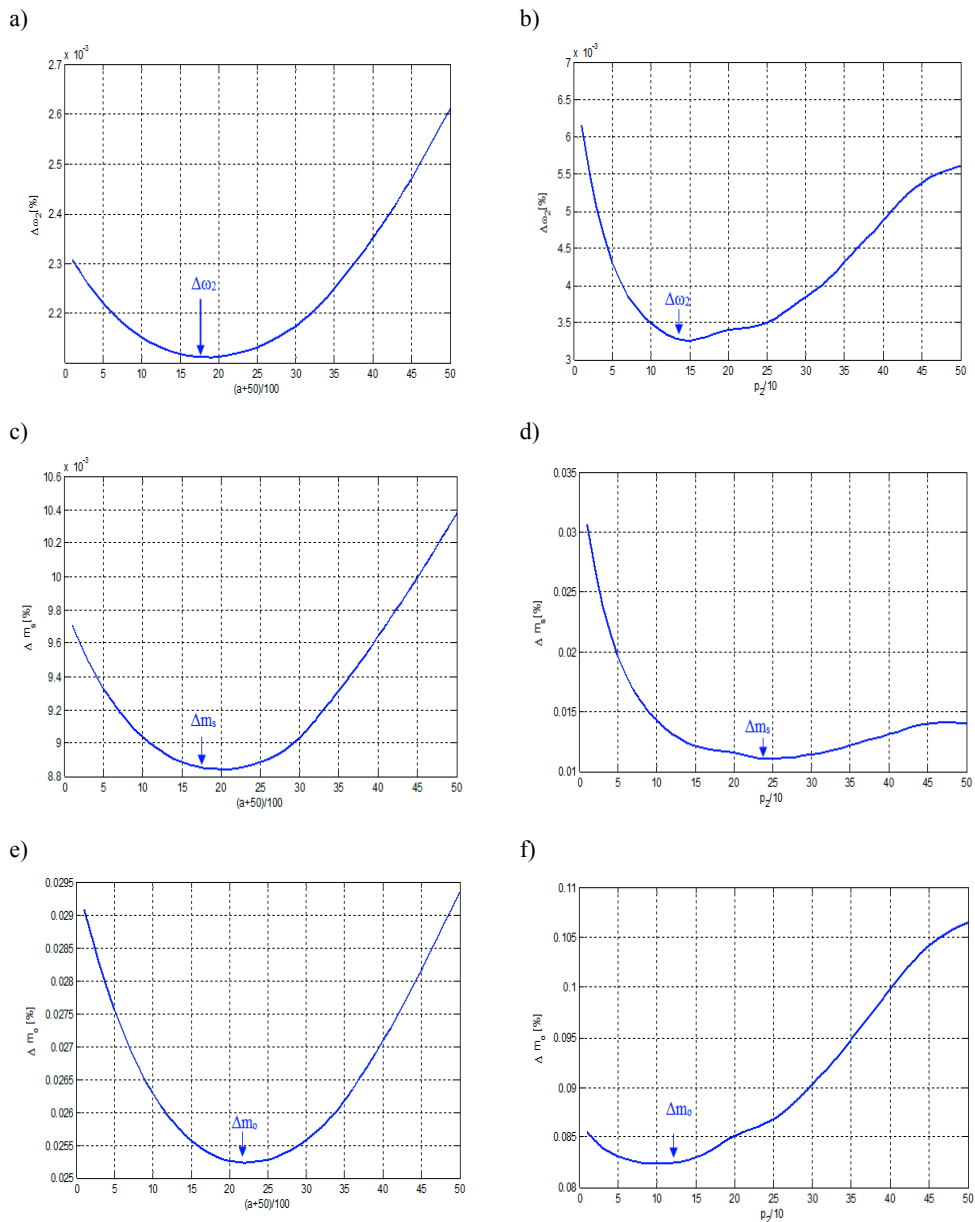
Fig. 4. Transients of the real and estimated load speed as well as the estimation errors for $p = \omega_o$, (a, b), $p = 3 \omega_o$, (c, d), $p = 5 \omega_o$, (e, f) in the case $T_2 = 2 * T_{2N}$



Rys. 5. Błędy estymacji zmiennych stanu w zależności od szybkości obserwatora: dla prędkości silnika napędowego $\Delta\omega_1$ (a), prędkości obciążenia $\Delta\omega_2$ (b), momentu skrętnego Δm_s (c), momentu obciążenia Δm_o (d), dla $T_2 = 2 * T_{2N}$

Fig. 5. Estimation errors of the drive state variables for different speed of the observer: for the motor speed $\Delta\omega_1$ (a), load speed $\Delta\omega_2$ (b), shaft torque Δm_s (c) and load torque Δm_o (d) in the case $T_2 = 2 * T_{2N}$

W dalszej części badań rozważono alternatywne rozłożenie biegunów estymatora Luenbergera (rys. 2). Jako pierwszy badano układ z rozłożeniem biegunów na okrąg. Jako początkową wartość wzmacnień obserwatora przyjęto wartości zapewniające minimalny błędy estymacji zmiennych stanu wyznaczone w poprzednich badaniach. Kolejno zmieniano współczynnik tłumienia jednej pary biegunów od wartości 1 do wartości 0,5. Wykresy obrazujące błędy estymacji zmiennych stanu przedstawiono na rys. 6a, c, e.



Rys. 6. Błędy estymacji w przypadku gdy $p_1 = p_2 = 3$, $a_1 = 1$, a_2 zmienia się z 1 do 0,5 (a, c, e) oraz w przypadku gdy $p_1 = 3$, $a_1 = a_2$ i p_2 zmienia się z 1 do 5 (b, d, f) dla prędkości obciążenia (a, b), momentu skrętnego (c, d) oraz momentu obciążenia (e, f)

Fig. 6. Estimation errors in the case $p_1 = p_2 = 3$, $a_1 = 1$, a_2 changes from 1 to 0,5 (a, c, e) and in the case $p_1 = 3$, $a_1 = a_2$ and p_2 changes from 1 to 5 (b, d, f) for load speed (a, b), shaft torque (c, d) and load torque (e, f)

Jak wynika z analizy charakterystyk pokazanych na rys. 6, zmniejszenie współczynnika tłumienia obserwatora powoduje zmniejszenie błędów estymacji zmiennych stanu. Kolejno rozważono rozłożenie biegunów na prostej o stałej wartości współczynnika tłumienia 0,7. Przebiegi błędów estymacji pokazano na rys. 6b, d, f. Podobnie jak w poprzednim przypadku rozłożenie biegunów obserwatora w sposób zapobiegający powstaniu biegunów podwójnych poprawia jakość estymacji zmiennych stanu. Jest to widoczne w błędach estymacji wszystkich zmiennych stanu.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski podsumowujące:

- Jakość estymacji zmiennych stanu zależy od szybkości obserwatora jak również poziomu zakłóceń pomiarowych i parametrycznych występujących w układzie.

- Wzrost poziomu szumów powoduje konieczność zmniejszenia wartości wzmocnień estymatora, wzrost poziomu zakłóceń parametrycznych wymaga zwiększenia tych wzmocnień.

- Rozłożenie biegunów obserwatora w sposób umożliwiający uzyskanie różnej lokalizacji biegunów równania charakterystycznego powoduje zmniejszenie błędów estymacji zmiennych stanu w porównaniu do rozkładu podwójnego.

- Estymację zmiennych stanu z najmniejszym poziomem błędów zapewnia rozłożenie biegunów obserwatora na okręgu.

Opracowany estymator, pracujący w strukturze sterowania z regulatorem stanu, został przetestowany na stanowisku rzeczywistym z silnikiem prądu stałego. Otrzymane wyniki potwierdziły badania symulacyjne. Jednakże ze względu na objętość artykułu badania te nie zostały zawarte w niniejszej pracy.

LITERATURA

- [1] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 61, Wrocław 2008.
- [2] VALENZUELA M.A., BENTLEY J.M., LORENZ, R.D., *Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections*, IEEE Trans. Ind. Appl., March/April 2005, Vol. 41, No. 2, 493–501.
- [3] VAŠAK M., BAOTIĆ M., PETROVIĆ I., PERIĆ N., *Hybrid Theory-Based Time-Optimal Control of an Electronic Throttle*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 43, No. 3, 1483–1494.
- [4] YOSHIOKA Y., HANAMOTO T., *Estimation of a Multimass System Using the LWTLs and a Coefficient Diagram for Vibration-Controller Design*, IEEE Trans. on Industrial Applications, 2008, Vol. 44, No. 2, 566–574.

- [5] MOLINAS M., SUUL J.A., UNDELAND T., *Extending the Life of Gear Box in Wind Generators by Smoothing Transient Torque With STATCOM*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, 476–484.
- [6] MUSZYNSKI R., DESKUR J., *Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, 544–552.
- [7] HACE A., JEZERNIK K., SABANOVIC A., *SMC with disturbance observer for a linear belt drive*, IEEE Trans. Ind. Electron., Dec. 2007, Vol. 54, No. 6, 3402–3412.
- [8] 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, 162–168.
- [9] GUZINSKI J., ABU-RUB H., DIGUET M., KRZEMINSKI Z., LEWICKI A., *Speed and Load Torque Observer Application in High-Speed Train Electric Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, 565–574.
- [10] SERKIES P.J., SZABAT K., *Przybliżone sterowanie pozycją w napędzie elektrycznym z połączeniem sprężystym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 2, 276–279.
- [11] CYCHOWSKI M., SZABAT K., *Efficient real-time model predictive control of the drive system with elastic transmission*, Control Theory & Applications, IET, 2010, Vol. 4, No. 1.
- [12] SZABAT K., SERKIES P.J., *Zastosowanie sterowania przybliżonego w napędzie elektrycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, 380–383.
- [13] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, 1193–1206.
- [14] THOMSEN S., HOFFMANN N., FUCHS F.W., *PI Control, PI-Based State Space Control, and Model-Based Predictive Control for Drive Systems With Elastically Coupled Loads – A Comparative Study*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, Vol. 58, No. 8, 3647–3657.
- [15] FUENTES E. SILVA C. YUZ J., *Predictive Speed Control of a Two-Mass System Driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor*, accepted to IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011.
- [16] CYCHOWSKI M.T., SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Constrained Model Predictive Control of the Drive System with Mechanical Elasticity*, IEEE Trans. Ind. Electronics, 2009, Vol. 56, No. 6, 1963–1973.
- [17] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAMINSKI M., SZABAT K., *Implementation of the Sliding Mode Controller with an Integral Function and Fuzzy Gain Value for Electrical Drive with Elastic Joint*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 4, 1309–1317.
- [18] LEONAND A.E., SOLSONA J.A., *On state estimation in electric drives*, Energy Conversion and Management, 2010, Vol. 51, No. 3, 600–605.
- [19] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Neural-Network Application for Mechanical Variables Estimation of a Two-Mass Drive System*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 3, 1352–1364.
- [20] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Performance Improvement of Industrial Drives with Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, Vol. 55, No. 3, 1075–1084.
- [21] ERENTURK K., *Gray-fuzzy control of a nonlinear two-mass system*, Journal of the Franklin Institute, 2010, Vol. 347, No. 7, 1171–1185.
- [22] KAMIŃSKI M., *Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, 225–230.
- [23] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., *Indirect Adaptive Control of Induction Motor Drive System With an Elastic Coupling*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, No. 10, 4038–4042.

ANALYZIS OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE LUENBERGER OBSERVER FOR THE DRIVE SYSTEM WITH ELASTIC JOINT

In the paper issues related to design of the Luenberger observer for the drive system with elastic joint is presented. After short introduce into the topic the mathematical model of the drive is presented. Next the methodology of the design of the Luenberger observer is shown in detail. The classical as well as the alternative location (on the circle as well as on the line) of the system closed-loop poles are considered. The dynamical properties of the designed estimator are examined under simulation tests.