

*sterowanie predykcyjne, sterowani adaptacyjne,  
napęd dwumasowy, filtr Kalmana*

Piotr J. SERKIES\*  
Krzysztof SZABAT\*

## **ADAPTACYJNA STRUKTURA STEROWANIA Z PREDYKCYJNYM REGULATOREM PRĘDKOŚCI DLA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM**

W pracy przedstawiono zagadnienia związane ze sterowaniem układu napędowego z połączeniem sprężystym. Omówiono adaptacyjną strukturę sterowania pośredniego z regulatorem predykcyjnym (MPC). Algorytm sterowania na podstawie estymowanej, przez nieliniowy filtr Kalmana, mechanicznej stałej maszyny roboczej przestraja parametry regulatora (wewnętrzny model regulatora MPC). W celu zapewnienia optymalnych właściwości dynamicznych adaptacji podlega również macierz wagowa  $Q$ . W artykule przedstawiono wyniki badań adaptacyjnej struktury sterowania obrazujące jej właściwości w różnych stanach pracy.

### **1. WPROWADZENIE**

Od nowoczesnych układów napędowych oczekuje się zapewnienia dobrych właściwości dynamicznych i statycznych obiektów w obecności zakłóceń pomiarowych i parametrycznych. Parametrem ulegającym znaczną zmianą w serwonapędach jest mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej [1]–[5]. Jest to szczególnie widoczne w napędach robotów gdzie momenty bezwładności zmieniają się wraz z wychyleniem ramienia oraz z przenoszoną masą. Podobne zmiany występują w innych grupach napędów [1]–[5].

W celu kompensacji zmiennego momentu bezwładności maszyny roboczej stosuje się różne podejścia. Mogą one polegać na zastosowaniu sterowania nieliniowego (rozmytego, ślizgowego) [6]–[8] czy adaptacyjnego (pośredniego, bezpośredniego) [9]–[13]. W niniejszym artykule zaproponowano w tym celu adaptacyjny predykcyj-

---

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

ny regulator prędkości [14]–[17] o parametrach zależnych od estymowanej stałej mechanicznej maszyny roboczej. W odróżnieniu od wcześniejszych prac autorów [18]–[20], gdzie wykorzystywano wersję regulatora MPC realizowaną *off-line*, w niniejszej pracy zaimplementowano regulator z rozwiązywanym *on-line* problemem optymalizacji [9]. Wartość zmieniającej się stałej czasowej maszyny roboczej jest estymowana przez nieliniowy rozszerzony filtr Kalmana (NRFK). W regulatorze MPC zmiana stałej czasowej maszyny roboczej jest uwzględniana w wewnętrznym modelu, który wykorzystywany jest do predykcji przyszłych zachowań napędu. Dodatkowo, aby zachować dobrą dynamikę wprowadza się adaptację wartości wagowych macierzy  $\mathbf{Q}$ .

## 2. MODEL MATEMATYCZNY ROZPATRYWANEGO NAPĘDU I PROPONOWANIA STRUKTURA STEROWANIA

W badaniach wykorzystano model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym opisany poniższymi równaniami [3]:

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

gdzie:

$m_e$  – moment elektromagnetyczny,

$\omega_1$  – prędkość silnika,

$\omega_2$  – prędkość maszyny obciążającej,

$m_s$  – moment skrętny,

$m_L$  – moment obciążenia,

$T_1$  – mechaniczna stała czasowa silnika,

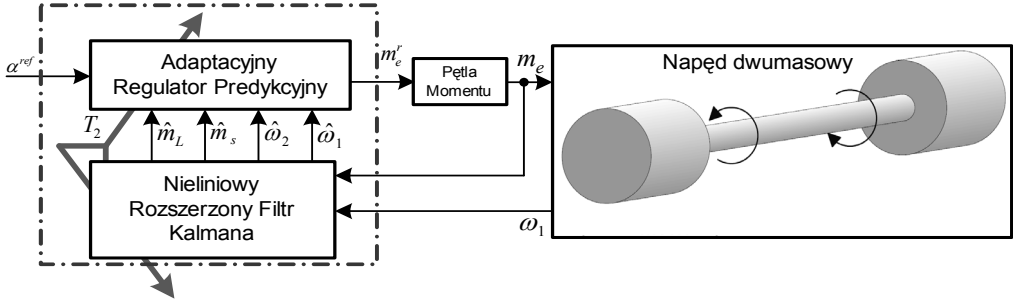
$T_2(t)$  – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej, ulega zmianie podczas pracy napędu,

$T_c$  – stała czasowa elementu sprężystego.

Wartości znamionowe parametrów układu wynosiły ( $T_1 = T_2 = 203$  ms,  $T_c = 1,2$  ms).

Na rysunku 1 przedstawiono proponowaną strukturę sterowania. Regulator predykcyjny na podstawie informacji o zmiennych stanu oraz o aktualnej wartości mechanicznej stałej czasowej generuje sygnał zadanego momentu elektromagnetycznego. Rozszerzony nieliniowy filtr Kalmana na podstawie informacji o aktualnym momencie elektromagnetycznym oraz prędkości silnika napędowego odtwarza wektor stanu

rozszerzony o moment obciążenia oraz o aktualną wartość mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. Estymacja stałej  $T_2$  oraz momentu obciążenia odbywa się naprzemiennie zgodnie z [9].



Rys. 1. Adaptacyjna struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości współpracująca z NRKF  
Fig. 1. Adaptive Control Structure with predictive speed controller working with the ENKF

Zasada działania dyskretnych algorytmów predykcyjnych [14]–[15] polega na minimalizacji różnicy pomiędzy wartościami wielkości regulowanych  $y(k+p|k)$  predykowanych (przewidywanych) w chwili  $k$  na przyszłą chwilę  $k+p$  (przyszłe wartości w chwili  $k+p$  są wyznaczone z modelu na podstawie wartości z chwili  $k$ ), a wartościami zadanymi dla tych chwil  $y^{zad}(k+p|k)$  na horyzoncie predykcji  $N$  ( $p = 1, 2, \dots, N$ ). Optymalny ciąg przyrostów sterowań  $\Delta u(k|k)$ ,  $\Delta u(k+1|k)$ , ...,  $\Delta u(k+N_u-1|k)$  uzyskiwany jest w algorytmach predykcyjnych przez minimalizację funkcji kryterialnej (2) z uwzględnieniem ograniczeń nałożonych na sygnał sterujący i zmienne stanu.

$$\min_{\Delta u} \left\{ \sum_{p=1}^N q_1(T_2) \left[ (\omega_2(k) - \omega^{ref}(k)) \right]^2 + q_2 (m_s(k) - m_L(k))^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} R(m(p)_e^{ref}) \right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} |m_e| \leq m_e^{\max} \\ |m_s| \leq m_s^{\max} \end{cases}$$

gdzie:

$(\omega_2 - \omega^{ref})^2$  odpowiada za minimalizację różnicy pomiędzy prędkością zadaną i estymowaną,

$(m_s - m_L)^2$  zapewnia minimalizację wpływu momentu obciążenia,

$q_1, q_2$  – współczynniki różnicujące wpływ poszczególnych wyjść na wartość funkcji celu,

$R$  – współczynnik tłumiący zmienność sterowania.

Ograniczenia nakładane na zmienne stanu wynikają z możliwości przekształtnika zasilającego napęd, kwestii bezpieczeństwa oraz docelowych funkcji napędu. Problem

opisany funkcją jakości (1) można rozwiązać dwoma sposobami. Jednym z nich jest metoda *off-line* gdzie wykorzystywane jest programowanie wieloparametryczne [16]–[17]. Drugi sposób tzw. *on-line* polega na wyznaczaniu wartości sterowania w każdym kroku algorytmu [14], [15]. Ten sposób realizacji algorytmu został wybrany do realizacji adaptacyjnej struktury sterowania.

W celu zapewnienia optymalności pracy napędu wprowadza się adaptację wartości  $q_1$  w zależności od wartości estymowanej stałej mechanicznej  $T_2$ . W ramach badań symulacyjnych sprawdzono wpływ sposobu adaptacji tej wartości na właściwości dynamiczne napędu.

W tabeli 1. zestawiono wartości parametrów regulatora, jakie użyte były w prezentowanych badaniach. Ponieważ w badaniach wykorzystano metodę *on-line* bardzo istotne było dobranie właściwego kroku próbkowania.

Tabela 1. Parametry regulatora wykorzystanego w badaniach  
Table 1. The controller parameters used in the study

$N$	$N_c$	$m_s^{\max}$	$m_e^{\max}$	$q_2$	$R$	$T_s$
8	2	1,5	3,0	10	$2e^{-3}$	1 ms

W badaniach wykorzystano algorytm estymacji opisany szerzej w pracach [4], [9]. Wektor stanu obserwatora rozszerzony został o odwrotność stałej mechanicznej maszyny roboczej oraz o moment obciążenia:

$$X_R(t) = \left[ \omega_1(t) \quad \omega_2(t) \quad m_s(t) \quad m_L(t) \quad \frac{1}{T_2}(t) \right] \quad (2)$$

Estymowana wartość mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej wykorzystywana jest do przestrajania modelu w regulatorze predykcyjnym, wartości macierzy  $\mathbf{Q}$  algorytmu MPC oraz dodatkowo modyfikuje wartość macierzy kowariancji błędu filtru Kalmana [1]. Rozszerzone nieliniowe równania stanu można zapisać w następującej formie:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_R(t) &= A_R \left( \frac{1}{T_2}(t) \right) + B_R u(t) + w(t) \\ &= f_R(x_R(t), u(t)) + w(t) \\ y_R(t) &= C_R X_R(t) + v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

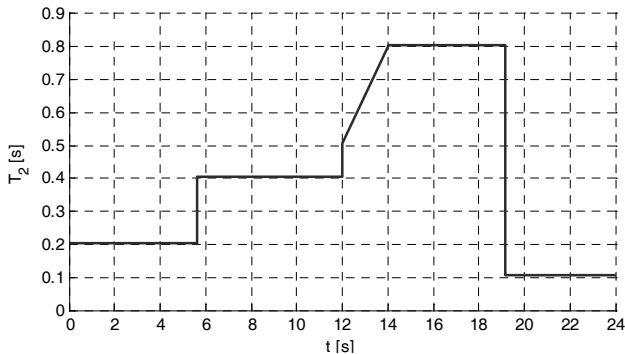
gdzie macierze układu zdefiniowane są następująco:

$$A_R \left( \frac{1}{T_2}(t) \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2}(t) & \frac{-1}{T_2}(t) & 0 \\ \frac{1}{T_C} & \frac{-1}{T_C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_R = \begin{bmatrix} 1 \\ T_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C_R = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Algorytm projektowania rozpatrywanego filtra Kalmana, jak również analiza jego własności jest szczegółowo przedstawiona w [9]. Wartości elementów macierzy kowariancji błędów  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  filtra Kalmana zostały dobrane za pomocą algorytmu optymalizacji globalnej wykorzystującego hybrydowe połączenie algorytmu genetycznego i metody przeszukiwania zbiorów.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

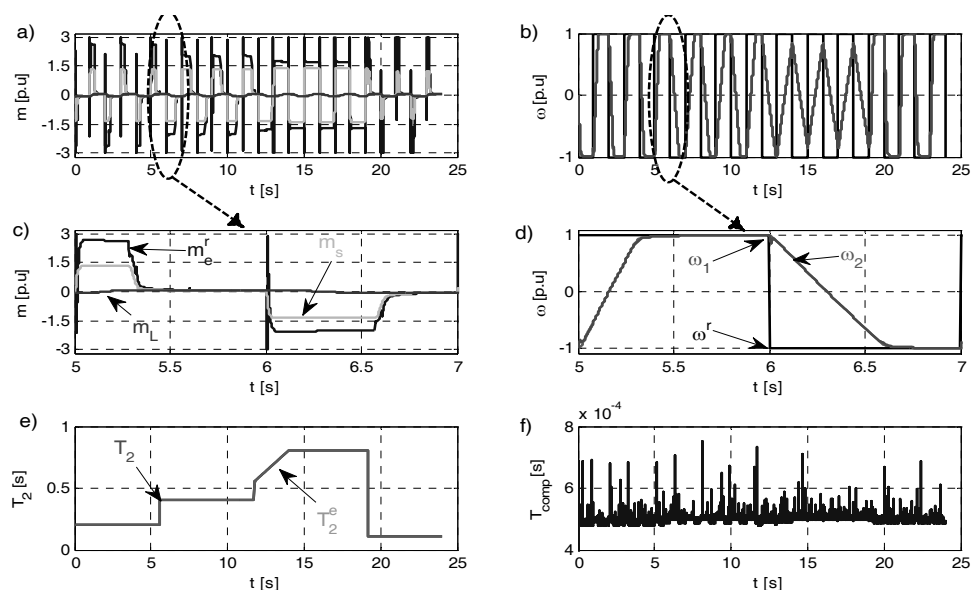
Badania zostały przeprowadzone w środowisku *Matlab-Simulink*. Regulator predykcyjny oraz filtr Kalmana zapisane zostały, jako oddzielne *s-funkcje* poziomu drugiego. Model napędu uwzględniał nieliniowe tarcie zarówno po stronie maszyny roboczej jak i po stronie silnika napędowego. Na wejścia Filtru Kalmana wprowadzono szum biały o amplitudach 2% i 1% odpowiednio dla momentu elektromagnetycznego i prędkości silnika napędowego. W czasie badań wyznaczano również czas wykonania poszczególnych kroków algorytmu sterowania. W badaniach założono zarówno skokowy jak i liniowy charakter zmian mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. Przyjęty przebieg zmian tej wielkości przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zmiany stałej mechanicznej maszyny roboczej  
Fig. 2. Changes in mechanical constant load machine

W pierwszej kolejności sprawdzono poprawność pracy struktury, w której informacja o zmiennych stanu oraz o mechanicznej stałej czasowej  $T_2$  pochodziła bezpośrednio z obiektu, natomiast estymator pracował w pętli otwartej. Parametry regulatora zestawiono w tab. 1.

Przebiegi wybranych zmiennych stanu i wielkości charakteryzujących badany układ przedstawiono na rys. 3. Jak wynika z analizy wyników przedstawionych na rys. 3 adaptacyjny układ sterowania MPC działa poprawnie. Założone ograniczenia zmiennych stanu są utrzymywane na zadanym poziomie. Informacja o zmianach  $T_2$  przestrajają model wewnętrzny oraz wartość macierzy  $\mathbf{Q}$ . Zmiana wartości momentu bezwładności maszyny roboczej widoczna jest w przebiegach momentów i prędkości układu napędowego (rys. 3a, b). Ze względu na ograniczenia przyjęte w układzie czasy narostu są różne dla zmiennych wielkości  $T_2$ . Istotną kwestią w przypadku implementacji regulatorów predykcyjnych jest dobór czasu próbkowania. Na rysunku 3f przedstawiono czas potrzebny na wyliczenie sterowania. W przypadku nawrotów, gdy układ pracuje w ograniczeniu momentu skrętnego czas potrzebny na wyznaczenie sterowania wyraźnie wzrasta.



Rys. 3. Praca regulatora w strukturze z bezpośrednim sprzężeniem od zmiennych stanu:  
 a), c) momenty, b), d) prędkości, e) zmiany stałej mechanicznej, f) czas obliczeń wyjścia regulatora  
 Fig. 3. Regulator operation in an open structure: a), c) torques, b), d) velocity,  
 e) changes the mechanical constant, f) controller output computation time

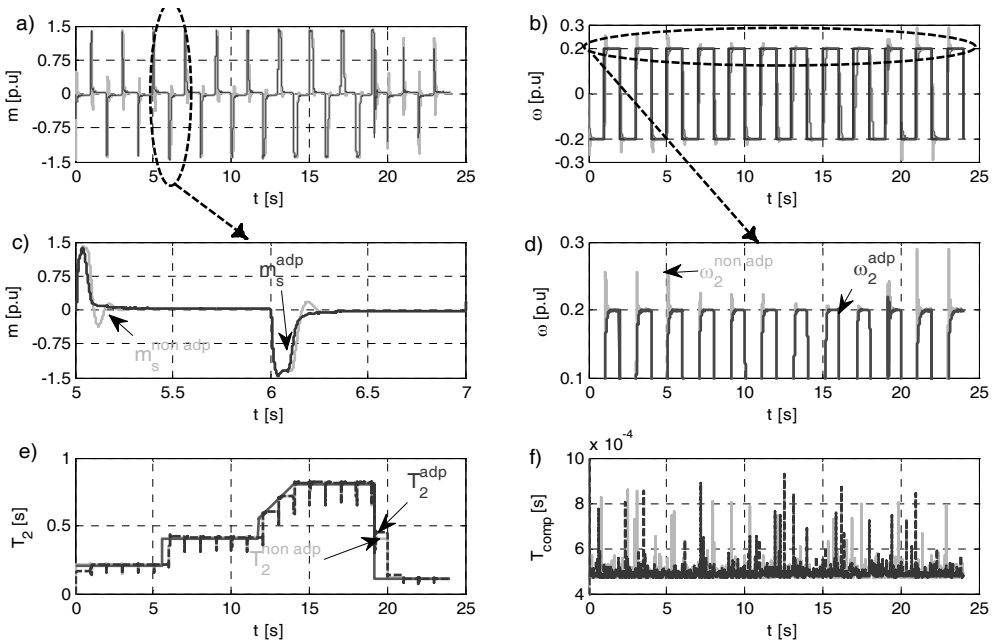
W dalszych badaniach rozważano strukturę sterowania, w której informacja o wszystkich zmiennych stanu dostarczana jest z filtru Kalmana.

Kolejno przeanalizowano wpływ adaptacji elementów macierzy wagowej  $\mathbf{Q}$  na właściwości dynamiczne układu. Jako algorytm adaptacji wartości wagowej  $q_1$  (wartość odpowiedzialna za minimalizację różnicy między prędkością maszyny roboczej a prędkością referencyjną) zastosowano prostą liniową zależność:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{145}{T_2} + 10 \\ 1.7 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Przebiegi wybranych zmiennych stanu układów bez oraz z adaptacją wartości  $q_1$  przedstawiono na rys. 4.

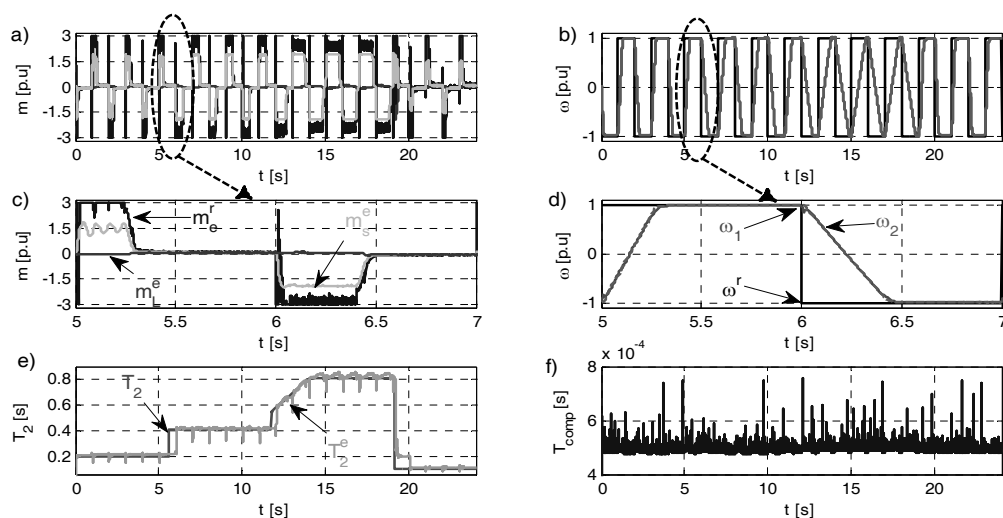
Jak wynika z ich analizy w przypadku braku adaptacji widoczne są zmiany przeregulowania w prędkości układu w zależności od wartości stałej mechanicznej (rys. 4b, d). W układzie z adaptacją wartości  $q_1$  nie występują przeregulowania; charakter dojścia prędkości napędu do sygnału zadanego jest aperiodyczny (zgodnie z założeniami projektowymi). W układzie tym również moment szybciej osiąga wartości ustalone (rys. 4c). Czas obliczeń sygnału sterującego jest podobny w obu przypadkach (rys. 4f).



Rys. 4. Porównanie układu z adaptacją wartości wagowych  $\mathbf{Q}$  oraz bez niej: a, c) przebiegi momentów, b, d) prędkości, e) estymowana oraz rzeczywista stała  $T_2$ , f) czas potrzebny na wyznaczenie sterowania.

Fig. 4. Comparison system of adaptation the weight  $\mathbf{Q}$ , and without it: a, c) torques, b, d) speed, e) estimated and actual constant  $T_2$ , f) the time required for the designation of control

Następnie sprawdzono wpływ poziomu ograniczenia momentu skrętnego na poprawność działania układu. Wyniki dla ograniczenia tej wielkości na poziomie 2.0 [p.u] zostały przedstawione na rys. 5, a dla wartości 1.5 na rys. 6. W przypadku ograniczenia momentu skrętnego na poziomie 2.0, dla małych wartości mechanicznej stałej czasowej  $T_2$  w przebiegu momentu skrętnego pojawiły się oscylacje o niewielkiej amplitudzie. Są one związane z niekorzystnym współczynnikiem  $R$  i małymi wahaniami prędkości maszyny roboczej. Ich eliminacja jest możliwa przez dodatkową zmianę innych wartości  $Q$  – prowadzi to jednak do wzrostu komplikacji algorytmu sterowania. Opisane oscylacje w przebiegu momentu skrętnego nie występują dla większej wartości mechanicznej stałej czasowej  $T_2$  (rys. 5a, c). Przy ograniczeniu momentu skrętnego na mniejszym poziomie opisane oscylacje w przebiegu momentu skrętnego (rys. 6a, c) nie występują. W tym przypadku regulator posiada zapas momentu elektromagnetycznego.



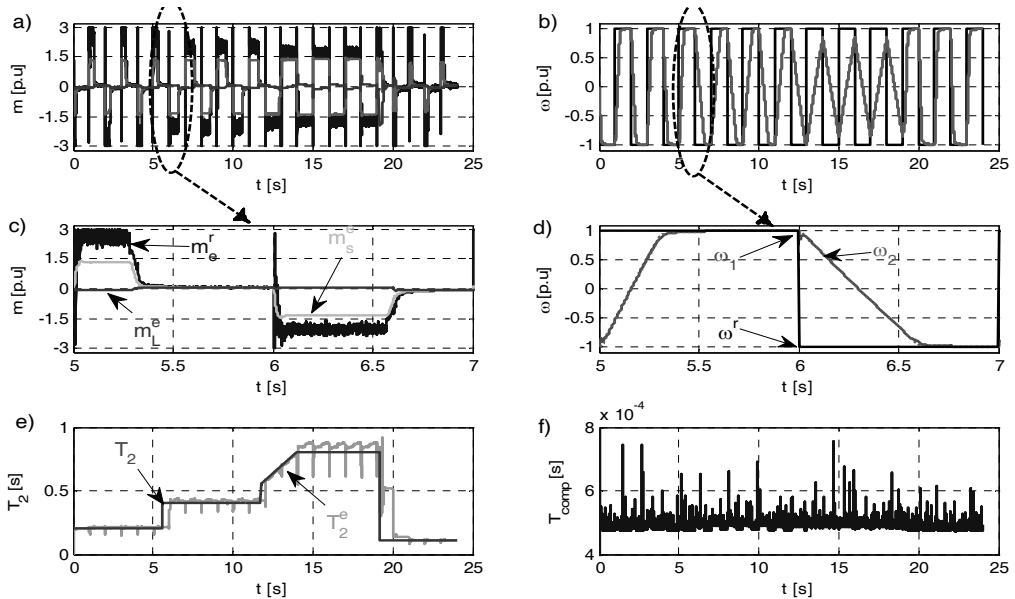
Rys. 5. Działanie układu dla wyższego poziomu ograniczenia momentu skrętnego: a, c) momenty, b, d) prędkości, e) estymowane i rzeczywiste wartości  $T_2$ , f) czas potrzebny na wyznaczenie sterowania  
 Fig. 5. Operation of the system for increased torsional torque limit: a, c) torques, b, d) speed, e) the estimated and actual values of  $T_2$ , f) the time required for the designation of control

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z adaptacyjnym sterowaniem predykcyjnym. Algorytm sterowania wykorzystuje informacje o estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej i przestrajają zarówno wewnętrzny model wykorzystywany do predyktowania przyszłych zachowań układu jak również przestrajają war-



tość macierzy wagowej  $\mathbf{Q}$ . Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski. Analizowana struktura sterowania działa poprawnie. Ograniczenia nałożone na sygnały zadanego momentu elektromagnetycznego oraz momentu skrętnego są utrzymywane na zadanych poziomach. Użyty w badaniach filtr Kalmana odtwarza wartość mechanicznej stałej czasowej z bardzo dużą dokładnością. Widoczne błędy estymacji nie mają wpływu na poprawność pracy adaptacyjnej struktury sterowania. W dalszych pracach planowane jest eksperymentalne zweryfikowanie zaproponowanego algorytmu.



Rys. 6. Działanie układu dla podstawowego poziomu ograniczenia momentu skrętnego: a, c) przebiegi momentów, b, d) przebiegi prędkości, e) estymowane i rzeczywiste wartości stałej  $T_2$ , f) czas potrzebny na wyznaczenie sterowania

Fig. 6. Operation of the system for a basic level of torsional torque limit: a, c) torques, b, d) speed, e) the estimated and actual value of the constant  $T_2$ , f) the time required for the designation of control

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] DHAOUADI R., KUBO K., TOBISE M., *Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drivers*, IEEE Trans. Ind. Appl., Sep./Oct. 1993, Vol. 29, No. 5, 919–925.
- [3] SZABAT K., ORLOWSKA-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.

- [4] KAMIŃSKI M., *Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, 225–230.
- [5] MUSZYŃSKI R., DESKUR J., *Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, 544–552.
- [6] 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.
- [7] BROCK S., *Sterowanie ślizgowe napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 4, 134–137.
- [8] 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.
- [9] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Performance Improvement of Industrial Drives with Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter*, IEEE Trans. Ind. Electron., March 2008, Vol. 55, No. 3, 1075–1084.
- [10] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Control of the Drive System With Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach*, IEEE Trans. Ind. Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, 228–240.
- [11] WAI R., LIU CH., *Design of Dynamic Petri Recurrent-Fuzzy-Neural-Network and its application to Path-Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot*, IEEE, 2009, Vol. 56, No. 7.
- [12] LIN F., CHOU P., *Adaptive Control of Two-Axis Motion Control System Using Interval Type-2 Fuzzy Neural Network*, IEEE Trans. On Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, No. 1, 178–193.
- [13] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 7, 160–163.
- [14] MACIEJOWSKI J.M., *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, UK, 2002.
- [15] TATJEWSKI P., *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, struktury i algorytmy*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2002.
- [16] BEMPORAD A., MORARI M., DUA V., PISTIKOPOULOS E.N., *The explicit linear quadratic regulator for constrained systems*, Automatica, 2002, Vol. 38, No. 1, 3–20.
- [17] 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.
- [18] SZABAT K., SERKIES P.J., *Zastosowanie sterowania predykcyjnego w napędzie elektrycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, 380–383.
- [19] SERKIES P.J., SZABAT K., *Predykcyjne sterowanie pozycją w napędzie elektrycznym z połączeniem sprężystym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 2, 276–279.
- [20] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SERKIES P.J., *Robust control of the two-mass drive system using Model Predictive Control*, Robust Control Theory and applications, ed. Andrzej Bartoszewski, InTech 2011, 489–506.

#### ADAPTIVE SPEED MODEL PREDICTIVE CONTROL STRUCTURE FOR THE DRIVE SYSTEM WITH ELASTIC JOINT

In the paper the adaptive model predictive control structure is proposed. The adaptation mechanism, on the basis on the estimated by nonlinear Kalman filter value of the mechanical time constant of the load machine retune the control structure parameters (internal model in MPC algorithm). In order to ensure the optimal responses of the plant the value of the matrix  $\mathbf{Q}$  is also adopted. In the paper the results of the simulation test showing the control structure properties are presented.