

Piotr J. SERKIES*
Krzysztof SZABAT*

PREDYKCYJNY REGULATOR PRĘDKOŚCI NAPĘDU DWUMASOWEGO Z ADAPTACJĄ MACIERZY WAGOWEJ

W referacie przedstawiono adaptacyjną strukturę sterowania układu napędowego z połączeniem sprężystym opartą na algorytmach predykcyjnych. We wstępie zawarto krótki przegląd metod sterowania układu dwumasowego. Przedstawiono wady oraz zalety sterowania predykcyjnego. W kolejnych rozdziałach omówiono model matematyczny rozpatrywanego napędu oraz algorytm regulacji predykcyjnej. Następnie opisano proponowaną adaptacyjną strukturę sterowania. Rozważania teoretyczne zostały poparte badaniami symulacyjnymi.

1. WPROWADZENIE

Od nowoczesnych układów napędowych oczekuje się minimalizacji procesów przejściowych przy sterowaniu prędkością czy pozycją. Takie wymagania pociągają za sobą konieczność dopasowywania parametrów układów sterowania do zmiennych warunków pracy. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku występowania w układzie zakłóceń pomiarowych czy parametrycznych. Parametrem ulegającym znacznym zmianom w serwonapędach jest wartość mechanicznej stałej czasowej 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].

Zmienne parametry obiektu wymuszają zastosowanie zaawansowanych struktur sterowania odpornych na występujące zakłócenia. Należą do nich układy oparte na algorytmach sterowania nieliniowego, w tym ślizgowego [6]–[8], sterowania adaptacyjnego (zarówno bezpośrednie jak i pośrednie) [9]–[13]. Sterowanie predykcyjne jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną teorii sterowania mającą szereg udanych aplikacji przemysłowych. Zapewnia ono optymalną dynamikę obiektu ze względu na fakt przewidywania jego zachowania w przyszłości. Pociąga to za sobą dużą złożoność obliczeniową algorytmu. Znaczną redukcję złożoności obliczeniowej algorytmu osiąga się przez zastosowanie programowania

* Politechnika Wroclawska.

wieloparametrycznego jak przedstawiono w [17]-[20]. Zapewnienie odporności struktury sterowania predykcyjnego na zmianę parametrów obiektów może być osiągnięte przez odporni dobór wartości macierzy wagowej Q [19],[20]. Ponieważ jest to układ o stałych parametrach, odporność uzyskuje się jedynie dla pewnego zakresu pracy.

W niniejszej pracy rozważa się adaptacyjną strukturę sterowania pośredniego. Jako narzędzie identyfikacji stosuje się nieliniowy filtr Kalmana estymujący, oprócz zmiennych stanu obiektu, wartość mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. Wielkość ta wykorzystana jest do przestrojenia wewnętrznego modelu obiektu (na podstawie którego dokonuje się predykcji) oraz do zmiany wartości macierzy wagowej Q . Zapewnia to osiągnięcie założonej dynamiki obiektu w obecności zmian mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej.

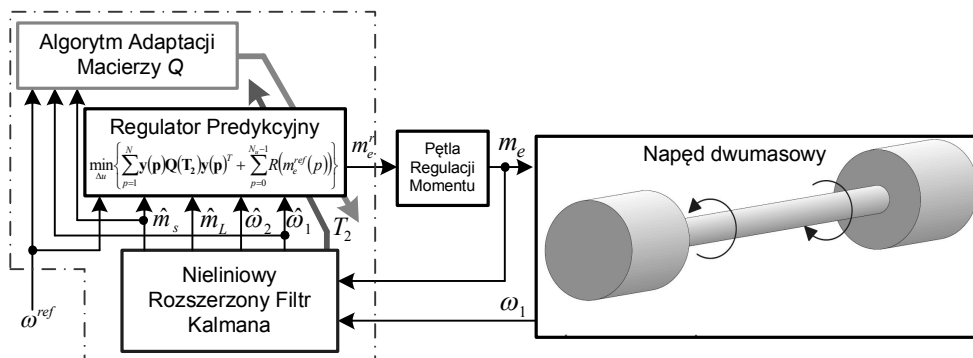
2. MODEL MATEMATYCZNY ROZPATRYWANEGO NAPĘDU I PROPONOWANA STRUKTURA STEROWANIA

W badaniach wykorzystano model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym 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, ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość maszyny obciążającej, m_s – moment skrętny, m_L – moment obciążenia, T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika, $T_2(t)$ – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej, ulega zmianie podczas pracy napędu, T_c – stała czasowa elementu sprzężystego. Wartości podstawowe parametrów układu wynosiły ($T_1=T_2=203\text{ms}$, $T_c=1.2\text{ms}$).

Na rys. 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 bieżącym 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]. Algorytm adaptacji macierzy wagowej Q wykorzystuje informację o błędzie śledzenia prędkości, jego pochodnej oraz wartości momentu skrętnego. Wartości te przetwarzane są przez system rozmyty, który generuje przyrosty wartości elementów macierzy Q .



Rys. 1. Adaptacyjna struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości współpracującym z Nieliniowym Rozszerzonym Filtr Kalmana (ENKF) oraz rozmytym algorytmem adaptacji

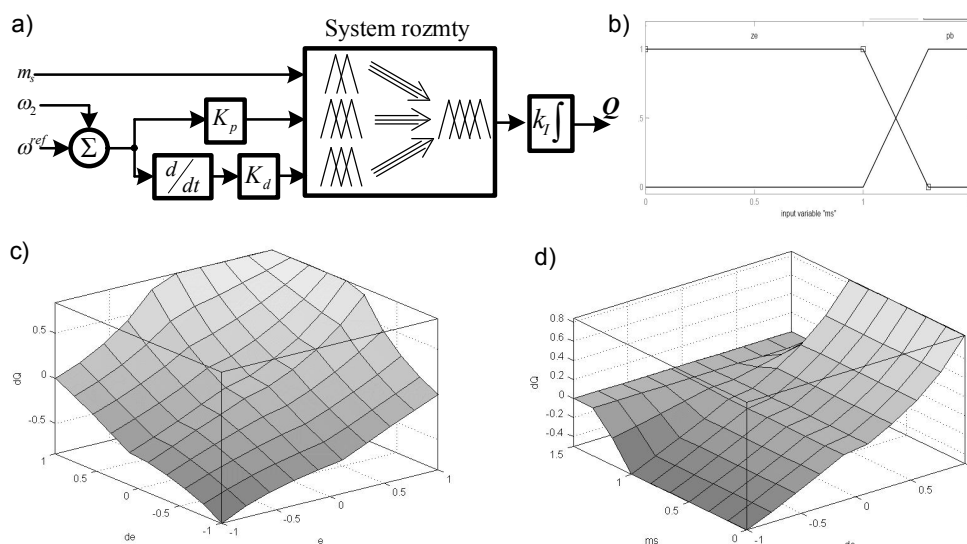
Zasada działania dyskretnych algorytmów predykcyjnych [16, 22, 23] polega na minimalizacji różnicy pomiędzy wartościami wielkości regulowanych $y(k+p|k)$ predykowanych (przewidywanych) w chwili k na przyszłą chwilę $k+p$ (przyszłe wartości w chwili $k+p$ są wyznaczone z modelu na podstawie wartości z 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 $\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)$ uzyskiwany jest w algorytmach predykcyjnych przez minimalizację funkcji kryterialnej (2) z uwzględnieniem ograniczeń nałożonych na sygnał sterujący i zmienne stanu.

$$\min_{\Delta u} \left\{ \sum_{p=1}^N \mathbf{y}(k+p|k) \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{y}(k+p|k)^T + \sum_{p=0}^{N_u-1} R(m(p)_e^{ref}) \right\} \quad (2)$$

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

Ograniczenia nakładane na zmienne stanu wynikają z możliwości przekształtnika zasilającego napęd, kwestii bezpieczeństwa oraz docelowego miejsca pracy napędu. Aby możliwa była adaptacja parametrów modelu i wartości macierzy Q zadanie optymalizacji (2) musi być rozwiązane *on-line* to znaczy w każdym kroku algorytmu [22],[23]. Sposób projektowania i dokładną analizę pracy rozszerzonego nieliniowego filtra Kalmana można znaleźć w pracach [9].

Na rys. 2. przedstawiono strukturę systemu rozmytego dokonującego adaptacji wartości macierzy Q . Algorytm bazuje na wartościach błędu śledzenia sygnału zadanego i jego pochodnej oraz na wartości momentu skrętnego. Dwie pierwsze zmienne wejściowe podzielone zostały na trzy symetryczne zbiory trójkątne. Natomiast wejście trzecie posiada dwa zbiory rozmyte (rys.2b). Wyjściowe funkcje przynależności podzielono symetrycznie na 5 zbiorów. Baza reguł zbudowana została z 18 reguł Mandaniego. Uzyskane powierzchnie zmian wartości macierzy Q przedstawiono na rys. 2 c,d.



Rys. 2. Struktura proponowanego algorytmu adaptacji (a), funkcję przynależności dla momentu skrętnego (b), powierzchnia zmian Q od błęd i pochodnej błęd (c) i błęd i momentu skrętnego (d)

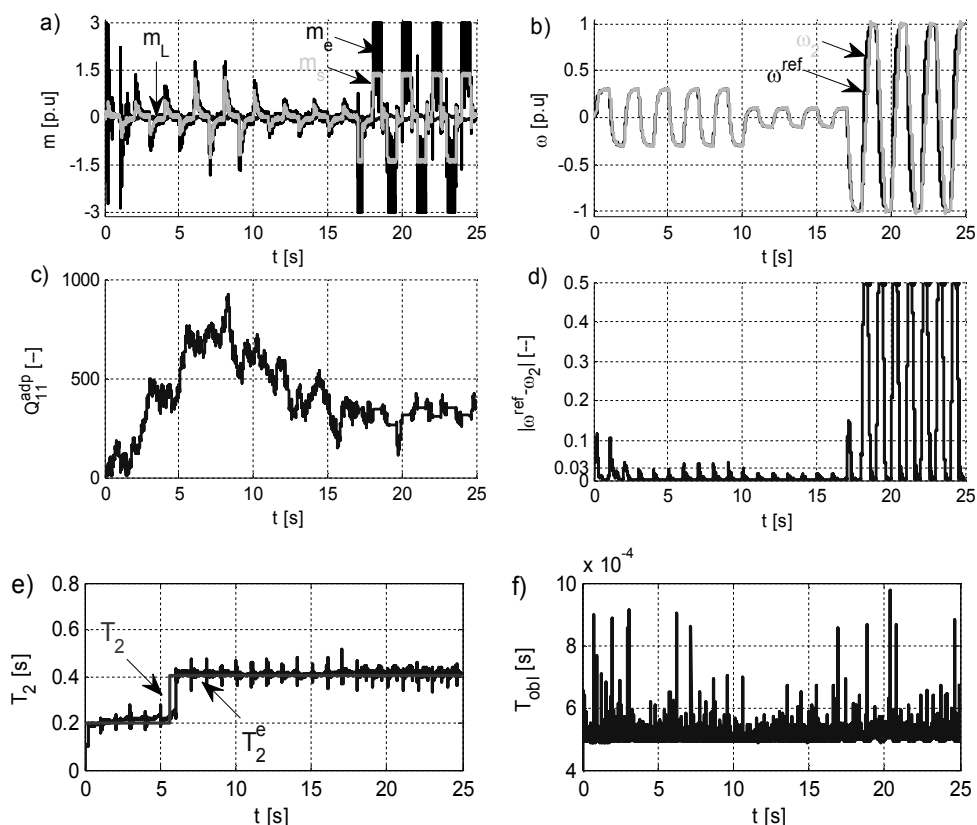
W przypadku pracy w ograniczeniu momentu skrętnego system zatrzymuje adaptację macierzy Q (rys. 2 d).

3. WYNIKI BADAŃ

Jako wyjścia podlegające minimalizacji przyjęto różnicę między prędkością zadaną a referencyjną, oraz różnicę między momentem skrętnym a estymowanym momentem obciążenia.

$$\begin{aligned} y_1 = \omega_2 &\Rightarrow y_1^{ref} = \omega^{ref} \\ y_2 = m_s &\Rightarrow y_2^{ref} = m_L^e \end{aligned} \quad (3)$$

Wartością podlegającą adaptacji był element macierzy Q_{11} , który odpowiada za minimalizację różnicy pomiędzy prędkością zadaną a prędkością obciążenia. Parametry regulatora były następujące: $N=8$, $Nc=2$, $Q_{22}=1.7$, $R=22e-4$. Okres próbkowania wynosił 1ms. Jako model referencyjny przyjęto transmitancję drugiego rzędu o parametrach $\zeta=1$; $\omega_0=10\text{rad/s}$. Sygnał zadany zmienia się z częstotliwością 0.5Hz. Przez pierwsze 10s amplituda wynosi 0.25, następnie przez kolejne 7s - 0.1 i na koniec przez 9s amplituda 1. Wybrane przebiegi zmiennych stanu układu przedstawiono na rys. 3. W piątej sekundzie dwukrotnie zwiększa się moment bezwładności maszyny roboczej.

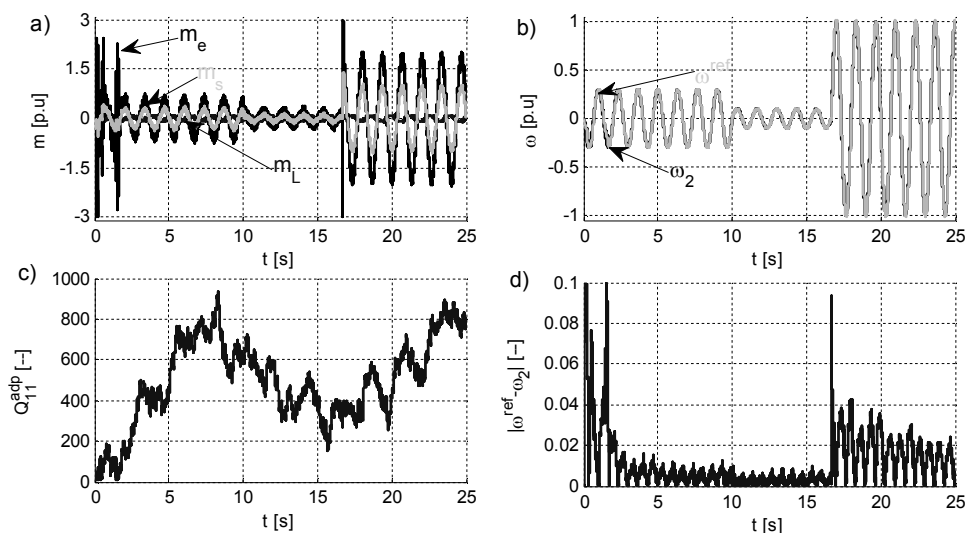


Rys. 3. Wyniki działania proponowanego algorytmu przy modelu drugiego rzędu: a) przebiegi momentów, b) przebiegi prędkości, c) wartość adaptowanego parametru, d) błąd śledzenia prędkości referencyjnej, e) estymowana stała T_2 , f) czas rozwiązania zadania optymalizacji (2)

Jak widać w zależności od poziomu amplitudy sygnału zadanego zmianie ulega wartość macierzy Q w sposób minimalizujący błąd regulacji. W pierwszej kolejności (od 0 do 5s) układ adaptacji minimalizuje błąd śledzenia. Po zmianie momentu bezwładności następuje wzrost wartości podlegającej adaptacji i jego ustalenie się. Około 10s następuje obniżenie amplitudy sygnału zadanego, a w konsekwencji następuje obniżenie poziomu wartości adaptowanej. W przypadku pracy struktury przy dużym poziomie sygnału zadanego, gdy regulator pracuje w obszarze ograniczenia amplitudy momentu skrętnego adaptowana waga nie podlega wzrostowi (sytuacja od chwili 17s na rys.3 c). Nieciągły charakter zmian wartości Q wynika z wprowadzenia do modelu szumu pomiarowego, który przenosi się na estymatę prędkości maszyny obciążenia i dalej wzmacniany jest przez pochodną w algorytmie adaptacji. Filtr Kalmana prawidłowo estymuje

wartość stałej T_2 (rys. 3 e). Dodatkowo na rys. 3 f) przedstawiono czas jaki regulator potrzebuje na rozwiązanie zadania optymalizacji 2.

Kolejno sprawdzono działanie proponowanego algorytmu przy pracy z sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 0.75Hz i identycznymi co w poprzednim teście zmianami amplitudy. Przyjęto stały poziom mechanicznej stałej czasowej T_2 . Wyniki przedstawiono na rys. 4. Podobnie jak w poprzednim przypadku w przebiegu adaptowanej wagi widać wyraźną cykliczność związaną z poziomem sygnału zadanego (rys. 4 c). W pierwszej kolejności wartość dostosowuje się do poziomu sygnału zadanego 0.25. Następnie wartość maleje ponieważ sygnał zadany zmniejszył swoją amplitudę do 0.1. Na koniec (od $t = 17s$) następuje wzrost wartości adaptowanego parametru ponieważ wzrosła wartość sygnału zadanego.



Rys. 4. Wyniki działania proponowanego algorytmu przy sinusoidalnej zmianie prędkości:
a) przebiegi momentów, b) przebiegi prędkości, c) wartość adaptowanego parametru,
d) błąd śledzenia prędkości referencyjnej

3. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono zagadnienia związane z adaptacją wartości macierzy wagowej Q mającej na celu minimalizację uchybu śledzenia sygnału zadanego. Do celów adaptacji wykorzystano system rozmyty, który zapewnia prócz minimalizacji błędu śledzenia również blokowanie zmian wartości macierzy Q w przypadku pracy napędu z ograniczeniami momentu skrętnego. Zastosowane rozwiązanie zapewniło uodpornienie się algorytmu sterowania na zmianę mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej przy jednoczesnym dobrym śledzeniu sygnału zadanego. Dodatkowo zmiana wartości wagowych Q zapewnia minimalizację wzmocnień szumów.

LITERATURA

- [1] Valenzuela M.A., Bentley J.M., Lorenz, R.D., Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 41, No. 2, March/April 2005 pp. 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.*, vol. 29, no. 5, pp. 919–925, Sep./Oct. 1993.
- [3] 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*, vol. 54, no. 2, pp.1193-1206, 2007.
- [4] Kamiński M., Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA. *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, no 2, s. 225-230, 2010.
- [5] Muszynski R., Deskur J., Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 544-552, 2010.
- [6] Hacı A., Jezernik K., Sabanovic A., SMC with disturbance observer for a linear belt drive, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3402–3412, Dec. 2007.
- [7] Brock S., Sterowanie ślizgowe napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, nr 4 s.134-137, 2010.
- [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*, vol. 57, no. 4, pp. 1309-1317, 2010.
- [9] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Performance Improvement of Industrial Drives With Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron* VOL. 55, NO. 3, MARCH 2008 pp. 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*, vol.54, no.1, pp. 228-240, 2007.
- [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*, Vol.56, No.7, 2009.
- [12] Lin F., Chou P., Adaptive Control of Two-Axis Motion Control System Using Interval Type-2 Fuzzy Neural Network, *IEEE Trans. On Industrial Elektrtronics*, vol.56, no.1, pp. 178-193, 2009.
- [13] Knychas S., Szabat K., Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkościami układu napędowego, *Przegląd Elektrotechniczny* vol. 87, no. 7, pp. 160–163, 2011.
- [14] Ilchmann A, Schuster H, PI-Funnel Control for Two Mass Systems, *IEEE Trans. On Automatic Control*, VOL. 54, NO. 4, APRIL 2009 pp. 918-923.
- [15] Schuster H., Westermaier C., Schroder D., Non-Identifier-Based Adaptive Speed Control for a Two-Mass Flexible Servo System: Consideration of Stability and Steady State Accuracy, 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2006.

- [16] Cychowski M., Szabat K., Efficient real-time model predictive control of the drive system with elastic transmission, *Control Theory & Applications, IET*, vol. 4 ,no. 1, 2010.
- [17] Szabat K., Serkies P. J., Zastosowanie sterowania predykcyjnego w napędzie elektrycznym, *Przegląd Elektrotechniczny* vol. 86, no. 2, pp. 380–383, 2010.
- [18] Serkies P.J., Szabat K., Predykcyjne sterowanie pozycją w napędzie elektrycznym z połączeniem sprężystym, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87 no. 2, pp. 276-279, 2011.
- [19] 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 pp. 489–506.
- [20] Serkies P., Szabat K., Projektowanie odpornego predykcyjnego regulatora prędkości dla układu napędowego z połączeniem sprężystym, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 87 NR 7 2011, str 115-118.
- [21] Serkies P., Szabat K., Adaptacyjny struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości dla układu napędowego z połączeniem sprężystym, *Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych* Nr 65 2011 (w druku).
- [22] Maciejowski J.M, *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, UK, 2002.
- [23] Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, struktury i algorytmy*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2002.

Praca finansowana ze środków na młodych pracowników nauki Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej w ramach umowy B10041/I29/W5.

PREDICTIVE SPEED CONTROLLER OF TWO-MASS DRIVE WITH ADAPTATION OF THE WEIGHT MATRIX

The paper presents issues related to the adaptation of the weight matrix Q in the predictive controller with the elastic coupling. Adaptation aims to minimizing the tracking error of the reference signal. In the introduction provides an overview of adaptive controllers used in the two-mass drive, and the advantages of predictive control. The subsequent chapters discuss the mathematical model of two-mass drive and the principle of predictive control. Then the fuzzy system adaptation of the Q matrix was characterized. Theoretical considerations are supported by simulation studies.