

Wielowarstwowy miękko przełączalny predykcyjny regulator prędkości napędu dwumasowego o zmiennych parametrach

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowy odporny na zmianę mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej predykcyjny regulator prędkości z miękko przełączanym sterowaniem. Proponowana struktura sterowania bazuje na predykcyjnym regulatorze obliczanym off-line dla różnych wartości nieznanego parametru, następnie w zależności od estymaty tego parametru następuje miękkie przełączanie pomiędzy poszczególnymi prawami sterowania MPC. We wstępie omówiono problematykę sterowania napędami z połączeniem sprężystym i zmiennym momentem bezwładności. W kolejnych rozdziałach przedstawiono model napędu i proponowaną strukturę sterowania. Rozważania teoretyczne zostały poparte badaniami symulacyjnymi.

Abstract. The paper presents a new robust predictive speed controller with soft-switched controls. The proposed control structure is based on the predictive controller off-line calculated (based on mpQP) for different values of the unknown parameter. Then, depending on the parameter estimates soft switching approach follows between the MPC control laws. A preliminary point discusses the problems of motion control of the drive with elastic coupling and variable parameters. In the following chapters presents a model of the drive and the proposed control structure. Theoretical considerations are supported by simulation studies. (Multilayer soft switchable predictive speed controller for the drive with elastic coupling and variable dynamics).

Słowa kluczowe: sterowanie odporne, sterowanie predykcyjne, napęd dwumasowy, napęd o zmiennej dynamice

Keywords: robust control, predictive control, two-mass drive system, drive with variable dynamics

doi:10.12915/pe.2014.12.02

Wstęp

Problem sterowania napędami o zmiennym momencie bezwładności jest zagadnieniem szeroko rozpatrywanym w literaturze [1]-[6]. Zagadnienie to cieszy się szczególnym zainteresowaniem ze względu na wiele praktycznych napędów w jakich jest ono rozpatrywane. Można tu wyróżnić napędy przewijakowe [1], napędy robotów [2], czy turbiny wiatrowe [3]. W wielu przypadkach problem zmiennej bezwładności napędu łączy się z występowaniem elastyczności połączenia pomiędzy silnikiem a maszyną roboczą [6]-[11]. W tak złożonym układzie napędowym niezbędne jest zastosowanie specjalnego układu sterowania tak aby zapewnić stabilną pracę. W praktyce stosuje się wiele rozbudowanych struktur sterowania takich jak: sterowanie rozmyte [6], neuronowe [10], odporne [11], czy predykcyjne [6]. W przypadku sterowania napędami z połączeniem sprężystym dodatkowo dochodzi potrzeba ograniczenia amplitudy momentu skrętnego [6],[12] tak aby zabezpieczyć napęd przed uszkodzeniem sprzęgła.

W przypadku wykorzystania regulatora predykcyjnego do sterowania prędkością, czy położeniem rozpatrywanej grupy napędów istnieją dwa podejścia. Pierwsze zakłada wykorzystanie sterowania predykcyjnego obliczanego on-line gdzie na podstawie informacji o aktualnej wartości mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej przestrzajany jest model regulatora [13]. Złożoność obliczeniowa takiego algorytmu jest bardzo duża. Drugim podejściem jest wykorzystanie sterowania predykcyjnego obliczanego z wykorzystaniem programowania wieloparametrycznego (multi parametric Quadratic Programming mpQP), w którym w specjalny sposób dobrano macierze wagowe Q tak aby zapewnić poprawną pracę napędu [14]. W tym przypadku złożoność obliczeniowa jest znacznie mniejsza, jednak algorytm predykcyjny nie pracuje w sposób optymalny. W przypadku wykorzystania zaawansowanych struktur sterowania pojawia się również problem estymacji wektora stanu. Do tego celu można wykorzystać jedną z kilku znanych metod takich jak: nieliniowy rozszerzony filtr Kalmana [15], sztuczne sieci neuronowo-rozmyte [16], czy odporne algorytmy estymacji bazujące na logice rozmytej i liniowym filtrze Kalmana [17].

W artykule przedstawiona zostanie struktura predykcyjnego regulatora prędkości wykorzystującego wielowarstwową budowę uzyskaną przez rozwiązanie

zadania sterowania optymalnego (Model Predictive Control MPC) dla kilku wybranych mechanicznych stałych czasowych maszyny roboczej. Do miękkiego przełączania pomiędzy warstwami wykorzystany zostanie rozmyty system bazujący na funkcjach trapezowych. Jako sygnał wejściowy wykorzystana zostanie estymowana wartość mechanicznej stałej czasowej obciążenia, którą estymuje rozszerzony filtr Kalmana.

Model matematyczny rozpatrywanego napędu

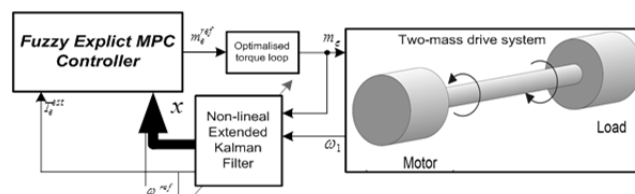
W niniejszym artykule wykorzystany został model z bezinercyjnym połączeniem sprężystym [21] zapisany w jednostkach względnych:

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

gdzie: ω_1, ω_2 – prędkości silnika napędowego i maszyny roboczej, m_e, m_s, m_L – moment elektromagnetyczny, skrętny i obciążenia, T_1, T_2 – mechaniczna stała czasowa silnika napędowego i maszyny roboczej, T_c – stała czasowa sprężystości ($T_1=T_2=0.2s$, $T_c=2.2ms$).

Struktura sterowania

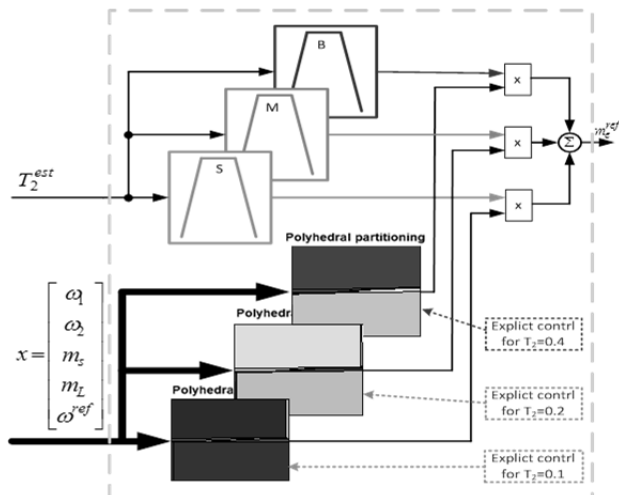
Proponowaną strukturę przedstawiono na rys. 1. Zbudowana jest z predykcyjnego regulatora z miękko przełączanymi funkcjami sterującymi, rozszerzonego nieliniowego filtra Kalmana oraz z pętli regulacji momentu elektromagnetycznego.



Rys. 1. Rozpatrywana struktura sterowania.

Miękko przełączalny regulator predykcyjny

Budow regulatora przedstawiono na rys. 2. Możemy ją podzielić na dwa podukłady: Pierwszy składa się z zestawu trzech obliczonych *off-line* multi-obszarów wraz z zapisanymi płaszczyznami sterowania (*Explicit Controler*). Drugi podukład zbudowany jest jako rozmyty regulator typu *TSK* (*Takagi - Sugeno - Kang'a*) o jednym wejściu. Układ ten odpowiada za miękkie przełączanie pomiędzy wartościami wyjściowymi z regulatorów predykcyjnych.



Rys. 2. Struktura proponowanego rozmytego regulatora predykcyjnego

Aby możliwa była budowa struktury, należy wcześniej przygotować zestaw trzech jawnych funkcji sterujących minimalizujących funkcję celu postaci:

$$(2) \quad \min_{u_1, u_2, \dots, u_{N_c-1}} \sum_{k=0}^N y(k) Q y^T(k) + \sum_{j=1}^{N_c-1} u(j) R u^T(j) \quad \left| m_e^{ref} \right| \leq 3 \quad \left| m_s \right| \leq 1.5$$

gdzie: $Q \geq 0$ i $R > 0$ są macierzami wag, $y(k)$ jest wektorem (wektorami) wyjść układu, $u(k)$ jest odpowiednią sekwencją sygnałów sterujących. N - horyzont predykcyjny wyjść, N_c - horyzont predykcyjny sterowań.

Jako wyjścia podlegające minimalizacji przyjęto wektor trzech różnic:

$$(3) \quad y(k) = \begin{cases} \omega_1 - \omega^{ref} \\ m_s - m_L \\ \omega_2 - \omega^{ref} \end{cases}$$

Dla tak przyjętego wektora wyjściowego i ograniczeń dobrano horyzonty predykcyjny wyjść i sterowań: $N=8$, $N_c=2$. Przykłady innego sposobu formułowania wektora wyjściowego przedstawiono w pracy [22].

Do wyznaczenia minimum funkcji sterującej regulatora predykcyjnego wykorzystano programowania wieloparametryczne (*mpQP*) [18] – [20].

Przy wykorzystaniu *mpQP* wartości sterowań zapisane są w sposób jawny jako sprzężenie od stanu:

$$(4) \quad U(x) = K_r x + g_r, \quad \forall x \in P_r$$

Gdzie P_r – są wielościenne multi obszarami:

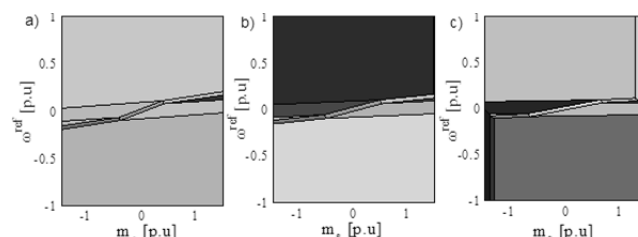
$$(5) \quad P_r = \{x \in \mathbb{R}^n | H_r x \leq d_r\}, \quad r = 1, \dots, N_r$$

Jak napisano wcześniej powyższy problem sterowania predykcyjnego (2) został rozwiązany dla trzech wartości

mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej $T_2 = 0.5 T_{2N}$, $T_2 = T_{2N}$, $T_2 = 2T_{2N}$. Przy takim podejściu otrzymujemy trzy jawne prawa sterowania zapisane przy pomocy wielościennej obszarów (wybrane fragmenty przedstawiono na rys. 2.). Przy projektowaniu tych regulatorów wykorzystano trzy różne zestawy macierzy wagowych.

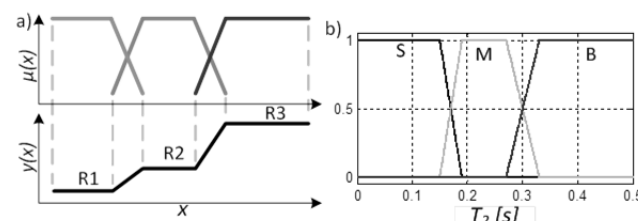
$Q_0 = \text{diag}(51, 3.8, 51)$ dla połowy znamionowej wartości T_{2N} , $Q_1 = \text{diag}(71, 3.8, 71)$ dla znamionowej wartości T_{2N} oraz $Q_3 = \text{diag}(101, 3.8, 101)$ dla dwukrotnej wartości T_{2N} . Dzięki zastosowaniu różnych wartości Q uzyskać można zbliżone przebiegi prędkości obciążenia.

Przykładowe konfigurację multi-obszarów (*Polyhedral partition*) przedstawiono na rys. 3. Obliczone regulatory zbudowane były sumarycznie z 179 obszarów.



Rys. 3. Wycinki multi-obszarów pomiędzy momentem skrotnym a prędkością zadaną, a) $T_2 = 0.5 T_{2N}$, b) $T_2 = T_{2N}$, c) $T_2 = 2 T_{2N}$.

Do miękkiego przełączania pomiędzy obszarami wykorzystano jednoweściowy system rozmyty bazujący na trapezowych funkcjach przynależności. Wykorzystanie takich funkcji powoduje, że w obszarze jej stałej wartości mam do czynienia z działaniem tylko jednego podukładu. Schematycznie przedstawiono to na rys. 4.a, natomiast na rys. 4.b przedstawiono rozłożenie przyjętych funkcji przynależności.



Rys. 4. Zmiany Reguł systemu rozmytego (a), Rozłożenie funkcji przynależności na rozpatrywanym obszarze zmian mechanicznej stałej czasowej (b).

Przy takiej budowie systemu rozmytego, w zależności od wartości estymowanej stałej mechanicznej następuje przełączanie pomiędzy wartościami sterowań z poszczególnych regulatorów rozmytych. Jeśli wartość T_2 mieści się w granicach przyjętych jako zakres poprawnej pracy regulatora predykcyjnego wówczas sygnał wyjściowy przyjmowany jest jako ta wartość (tylko jedna reguła jest spełniona). W obszarze, w którym wartość T_2 znajduje się pomiędzy dwoma zbiorami rozmytymi wówczas wartość sterowania jest obliczana jako ważona suma z dwóch regulatorów rozmytych. Aby zmniejszyć złożoność obliczeniową klasteryzacji z obszarami i sterowaniami który nie jest wykorzystywany nie jest przeszukiwany (np. jeśli T_2 mieści się pomiędzy $R2$ a $R3$ to obszar $R1$ nie jest przeszukiwany).

Rozszerzony nieliniowy filtr Kalmana

W badaniach wykorzystano algorytm estymacji opisany szerzej w pracach [21]. Wektor stanu obserwatora rozszerzony został o odwrotność stałej mechanicznej maszyny roboczej oraz o moment obciążenia:

$$(6) \quad X_R(t) = \begin{bmatrix} \omega_1(t) & \omega_2(t) & m_s(t) & m_L(t) & \frac{1}{T_2}(t) \end{bmatrix}$$

Estymowana wartość mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej wykorzystywana jest do miękkiego przełączania pomiędzy regionami regulatorów oraz dodatkowo modyfikuje wartość macierzy kowariancji błędów filtra Kalmana [21]. Rozszerzone nieliniowe równania stanu można zapisać w następującej formie:

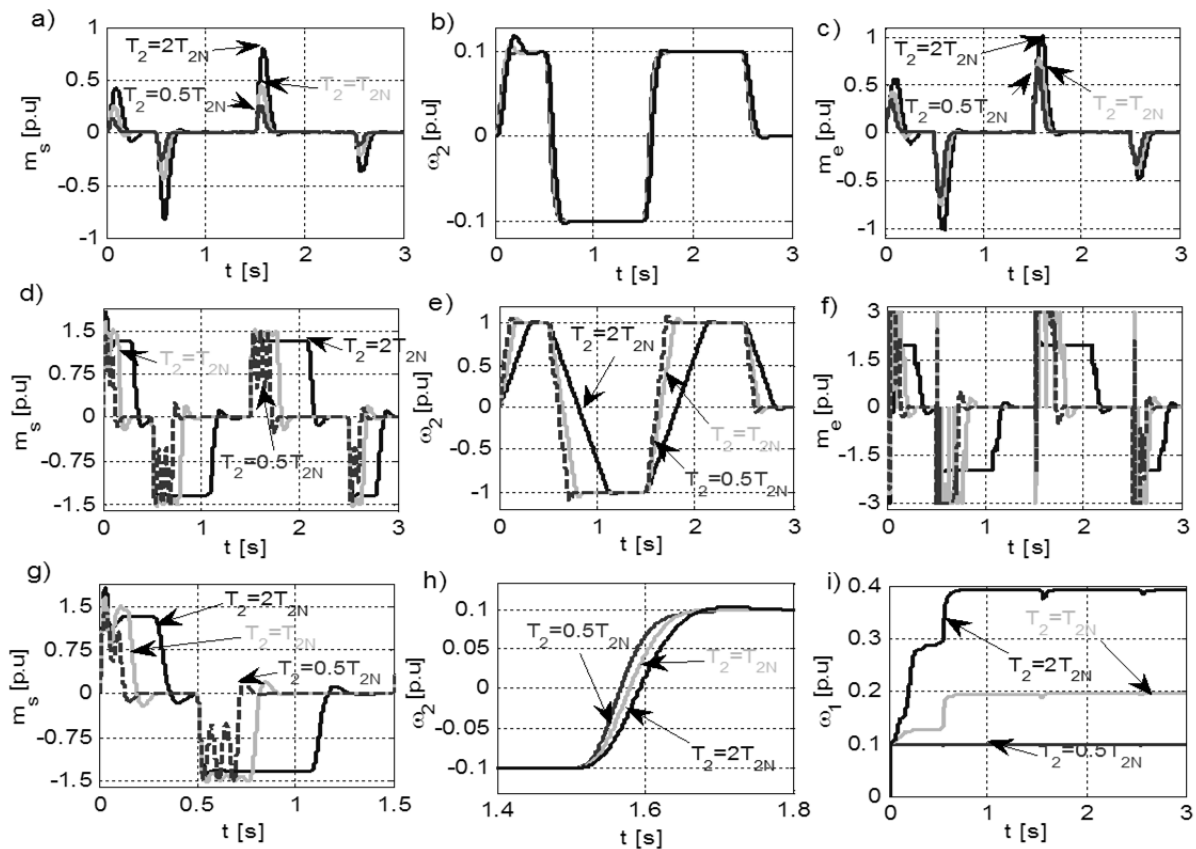
$$(7) \quad \begin{aligned} \frac{d}{dt} X_R(t) &= A_R \left(\frac{1}{T_2}(t) \right) + B_R u(t) + w(t) \\ &= f_R(x_R(t), u(t)) + w(t) \\ y_R(t) &= C_R X_R(t) + v(t) \end{aligned}$$

gdzie: macierze układu zdefiniowane są następująco:

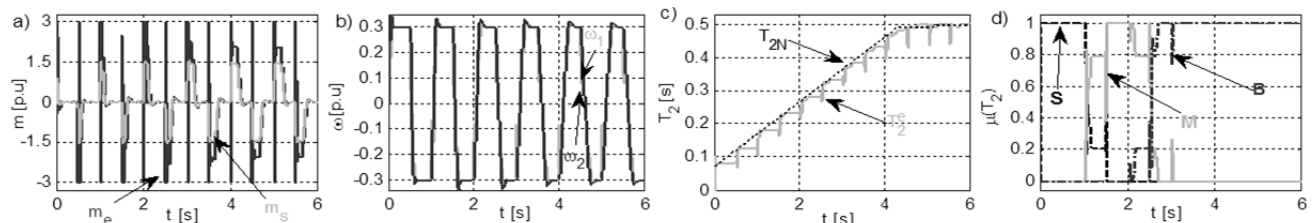
$$(8) \quad A_R \left(\frac{1}{T_2}(t) \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2}(t) & \frac{-1}{T_2}(t) & 0 \\ \frac{1}{T_C} & \frac{-1}{T_C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_R = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad C_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Algorytm projektowania rozpatrywanego filtra Kalmana, jak również analiza jego własności jest szczegółowo przedstawiona w [21]. Wartości elementów macierzy kowariancji błędów Q_R i R_R filtra Kalmana zostały dobrane za pomocą algorytmu optymalizacji globalnej wykorzystującego hybrydowe połączenie algorytmu genetycznego i metody przeszukiwania zbiorów.



Rys. 5. Przebiegi zmiennych stanu w układzie dla małej prędkości zadanej (a,b,c,h,i), oraz znamionowej (d,e,f,g). a),d),g) przebiegi momentu skrętnego, b),e),h) przebiegi prędkości obciążenia, c),f) przebiegi momentu elektromagnetycznego, i) przebiegi estymowanej mechanicznej stałej czasowej.



Rys. 6. Przebiegi: a) momentów, b) prędkości, c) mechanicznej stałej czasowej T_2 , d) funkcji przynależności systemu rozmytego, podczas pracy dla liniowo zmiennej mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej.

Wyniki badań

W niniejszym podpunkcie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych obrazujących działanie proponowanej struktury. Okres próbkowania pętli wymuszenia momentu wynosił $100\mu s$, natomiast krok obliczeń proponowanego regulatora rozmyto-predykcyjnego wynosił 1ms. Z tym samym krokiem próbkowany był rozszerzony filtr Kalmana. Do rozważań przyjęto trzy wartości mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej: odpowiednio połowę, znamionową oraz dwukrotną wartość. Przyjęto że układ wykonuje cykliczne nawroty, tak aby filtr Kalmana mógł estymować wartość T_2 .

W pierwszej kolejności sprawdzono działanie układu dla niskiej prędkości zadanej, tak aby regulator nie wchodził w ograniczenie momentu skrętnego. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.(a,b,c,h). Jak widać niezależnie od wartości mechanicznej stałej czasowej regulator zapewnia zbliżony przebieg prędkości obciążenia (Rys.5b,h). Przy pierwszym rozruchu, gdy filtr Kalmana nie ma jeszcze pełnej informacji o rzeczywistej wartości T_2 (Rys.5i) widoczne są różnice w przebiegach prędkości obciążenia.

Kolejno sprawdzono działanie układu sterowania dla znamionowej prędkości zadanej. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5 (d,e,f,g). W tym przypadku nie ma możliwości zapewnienia jednakowego przebiegu prędkości obciążenia (rys. 5.e), jednak wartość ograniczenia momentu skrętnego jest prawidłowo utrzymywana (Rys. 5.d). Podobnie jak w poprzednim przypadku w czasie rozruchu, gdy filtr Kalmana nie osiągnął prawidłowej wartości T_2 w przebiegach momentu skrętnego widoczne jest przekroczenie ograniczenia (Rys. 5.g). Pomimo tego przekroczenia cała struktura pracuje prawidłowo. W rozpatrywanym przypadku regulator pracuje z wartościami mechanicznej stałej czasowej na jakie był strojony.

Aby ukazać działanie układu miękkiego przełączania rozpatrzono przypadek, w którym mechaniczna stała czasowa zmienia się liniowo od wartości 0.07s do wartości 0.5s w czasie 4.5 sekundy a następnie utrzymywała stałą wartość. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6. Jak widać proponowany regulator zapewnia utrzymanie ograniczenia momentu skrętnego w całym zakresie rozpatrywanych zmian T_2 . Na rys. 6.d przedstawiono przebieg wyjściowej funkcji przynależności systemu rozmytego. Schodkowe przełączania wynikają z przebiegu estymaty T_2 .

Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcje nowego regulatora predykcyjnego bazującego na rozwiązaniu zadania sterowania predykcyjnego z wykorzystaniem kwadratowego sterowania wieloparametrycznego (mpQP) dla kilku wybranych wartości parametru a następnie dzięki rozmytemu systemowi miękko łączyć sterowania z otrzymanych regulatorów.

Z zaprezentowanych szerokich badań symulacyjnych widać że proponowana struktura zapewnia odporne sterowanie prędkością maszyny roboczej oraz gwarantuje utrzymywanie ograniczeń zmiennych stanu.

W dalszych pracach przewiduje się rozbudowę rozmytego systemu decyzyjnego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach umowy: UMO-2011/01/N/ST7/04544 (2011-2013)

LITERATURA

[1] Valenzuela M. A., Bentley J. M., Lorenz R. D., Computer-Aided Controller Setting Procedure for Paper Machine Drive Systems, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 45 (2009), 2, 638-650

[2] Chang Y.C. Yen H.M., Design of a robust position feedback tracking controller for flexible-joint robots, *IET Control Theory and Applications*, 5 (2011), 2, 351–363.

[3] Boukhezzar B., Siguerdidjane H., Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines, *Control Engineering. Prac.*, 18 (2010), 12, 1357–1368

[4] Pajchrowski T., Zakirski K., Application of artificial neural network for adaptive speed control of PMSM drive with variable parameters, *COMPEL* 32 (2013), 4, 1287-1299

[5] Khadija K., Benyounes M., Khalil B., Rachid B., A simple and robust Speed Tracking Control of PMSM, *Przegląd Elektrotechniczny* 87 (2011), 7, 202 – 207

[6] Serkies P., Szabat K., Projektowanie odpornego predykcyjnego regulatora prędkości dla układu napędowego z połączeniem sprzężystym, *Przegląd Elektrotechniczny* 87 (2013), 7, 115-118

[7] Knychas S., Szabat K., Adaptacyjny układ sterowania z rekurencyjnymi regulatorami rozmytymi dla układu napędowego o zmiennych parametrach, *Przegląd Elektrotechniczny* 89 (2013), 6, 155-158

[8] Derugo P., Dybkowski M., Szabat K., Adaptacyjne wektorowe sterowanie układem napędowym z połączeniem sprzężystym. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, (2012), nr 32, 67-76.

[9] Carriere S., Caux S., Fadel M., Alonge F., Velocity sensorless control of a PMSM actuator directly driven an uncertain two-mass system using RKF tuned with an evolutionary algorithm, *14th Inter. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2010, T5-213 - T5-220

[10] Orłowska-Kowalska T., Kamiński M., Adaptive Neurocontrollers for Drive Systems: Basic Concepts, Theory and Applications, *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives Vol. 531* (2014), 269 – 302.

[11] Karsten P., Vinogradski M., Tenhagen A., Joost M., Orlik B., Robust H_∞ -Optimal PI Cascade Control for Servo Drive Applications Solved by a Genetic Algorithm, *12th Inter Power Electronics and Motion Control Conf., EPE-PEMC 2006*.

[12] Serkies P., Szabat K., Application of the MPC controller to the Position Control of the Two-Mass Drive System, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 60 (2013), 9, 3679 – 3688

[13] Serkies P., Szabat K., Adaptacyjna struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości dla układu napędowego z połączeniem sprzężystym, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, (2011), nr 31, 320 – 330.

[14] Serkies P., Szabat K., Cychowski M., Application of the MPC to the robust control of the two-mass drive system, *IEEE Inter. Symp. on Industrial Electronics (ISIE) 2011*, 1901-1906.

[15] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Application of the Kalman filters to the high-performance drive system with elastic coupling, *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, 59 (2012), 11 4226-4235

[16] Kamiński M., Tran-Van T., Szabat K., Optymalizacja struktur neuronowo-rozmytych estymatorów zmiennych stanu układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny* 87 (2013), 7,

[17] Serkies P., Szabat K., Fuzzy adaptive Kalman filter for the drive system with an elastic coupling, *Archives of Electrical Engineering* 62 (2013) 2, 251-265

[18] Kvasnica M., Grieder P., Baotic M., Morari M., Multi-Parametric Toolbox (MPT), in *HSCC (Hybrid Systems: Computation and Control)*, pp. 448–462, 2004.

[19] Bemporad A., Morari M., Dua V., Pistikopoulos E.N., The explicit linear quadratic regulator for constrained systems, *Automatica*, 38 (2002), 1, 3–20.

[20] Kouramas K., Panos C., Faisca N., Pistikopoulos E., An algorithm for robust explicit/multi-parametric model predictive control, *Automatica* 49 (2013) 2, 381-389.

[21] Szabat K., Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 61*, Wrocław 2008

[22] Serkies P., Wpływ funkcji celu regulatora predykcyjnego na właściwości dynamiczne napędu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny* 90 (2014), 6, 133-137

Autor: dr inż. Piotr J. Serkies, E-mail: piotr.serkies@pwr.wroc.pl;
mgr inż. Karol Wróbel, E-mail karol.wrobel@pwr.wroc.pl,
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław