

*sterowanie predykcyjne, dobór parametrów  
napęd z połączeniem sprężystym*

Piotr SERKIES\*

## **DOBÓR DŁUGOŚCI HORYZONTU PREDYKCJI WYJŚĆ I STEROWAŃ REGULATORA PREDYKCYJNEGO W NAPĘDZIE Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM**

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z analizą wpływu oraz doбором długości horyzontu predykcji wyjść i sterowań na właściwości dynamiczne napędu z połączeniem sprężystym. We wstępie przedstawiono przegląd metod sterowania napędami z połączeniem sprężystym. W kolejnych rozdziałach przedstawiono model rozpatrywanego napędu oraz zasadę sterowania predykcyjnego. W ramach badań symulacyjnych przebadano wpływ długości horyzontów predykcji wyjść i sterowań przy ustalonych parametrach mechanicznych, jak również przy ich zmianach. Przedstawiono również wyniki związane z wpływem kroku próbkowania na dobór długości okna predykcji wyjść. Kolejno przedstawiono eksperymentalną weryfikację uzyskanych wyników.

### 1. WSTĘP

Przed nowoczesnymi układami napędowymi stawiane są coraz ostrzejsze wymagania co do ich dynamiki i wymiarów fizycznych. Spełnienie powyższych wymagań spowodowało ujawnienie się drgań skrętnych w napędach w których połączenie mechaniczne uważane było wcześniej za sztywne. Drgania skrętne wynikające ze skończonej sztywności połączeń mechanicznych były pierwotnie rozpatrywane w przemyśle ciężkim i papierniczym [1]–[3], jednak obecnie są one rozpatrywane w nowych obszarach, takich jak: napędy robotów [4], napędy przepustnic [5], czy napędy wyposażone w sprężęła magnetyczne [6], [7].

Ujawnienie się w układzie napędowym skończonej sztywności wału, a co się z tym wiąże powstanie drgań skrętnych jest zjawiskiem niepożądanym, które powoduje degradację właściwości dynamicznych oraz może doprowadzić do niewłaściwej pracy napędu [6]–[9]. W związku z wymienionymi niekorzystnymi zjawiskami od układów

---

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

sterowania oczekuje się zarówno tłumienia drgań skrętnych, jak również zapewnienia trwałego połączenia między maszyną roboczą a silnikiem napędowym. Aby to uzyskać stosuje się zaawansowane metody sterowania takie jak: specjalne metody strojenia klasycznych regulatorów [10], regulatory *PI* z dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od wybranych zmiennych stanu [9], regulatory rozmyte [11], neuronowe regulatory adaptacyjne [12], sterowanie ślizgowe [13], a w ostatnich latach również sterowanie predykcyjne [5], [7], [14]–[26]. Ta ostatnia technika sterowania, zaliczana do metod sterowania optymalnego, cieszy się coraz większym zainteresowaniem [21]. Sterowanie predykcyjne z modelem w postaci dyskretnych równań stanu rozwinęło się pierwotnie w przemyśle chemicznym i petrochemicznym [22], obecnie jest coraz częściej wykorzystywane w obszarze napędu elektrycznego i energoelektroniki [21].

W tym zakresie można wyróżnić sterowanie z modelem wykorzystującym dyskretna równania różnicowe [23], sterowanie ze skończonym zbiorem rozwiązań [24], metody z dwu krokową predykcją [25] oraz metody z długim horyzontem i ograniczeniami nakładanymi na zmienne stanu [14]–[20]. W prezentowanych pracach odnoszących się do sterowania predykcyjnego z długim horyzontem predykcji wyjść brak jest zaawansowanej analizy wpływu horyzontów predykcji wyjść i sterowań na właściwości dynamiczne napędu. Z tego względu w niniejszej pracy zostanie przedstawiona analiza sposobu doboru długości okna predykcji wyjść oraz długości minimalizowanej sekwencji sterowań. Rozpatrzony zostanie predykcyjny regulator prędkości.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY ROZPATRYWANEGO NAPĘDU

Model matematyczny rozpatrywanego układu napędowego można opisać poniższymi równaniami [13]:

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

gdzie:

- $m_e$  – moment elektromagnetyczny,
- $\omega_1$  – prędkość silnika,
- $\omega_2$  – prędkość maszyny obciążającej,
- $m_s$  – moment skrętny,
- $\alpha$  – pozycja wału maszyny roboczej,
- $m_L$  – moment obciążenia,

- $T_1$  – mechaniczna stała czasowa silnika,  
 $T_2$  – mechaniczna stała czasowa maszyny obciążającej,  
 $T_c$  – stała czasowa elementu sprężystego.

Wartości parametrów analizowanego układu wynosiły ( $T_1 = T_2 = 0,203$  s,  $T_c = 1,2$  ms).

### 3. ZASADA STEROWANIA PREDYKCYJNEGO

W strategii sterowania predykcyjnego wykorzystuje się model matematyczny obiektu do wyznaczenia wyjścia układu w założonym okresie czasu (horyzoncie predykcji) dla przyjętych wartości sygnału (sygnałów) sterującego [22]–[26]. Właściwości dynamiczne układu dla danych wartości wymuszeń oceniane są przy użyciu funkcji celu:

X

$$J = \min_{\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} \left\{ \sum_{p=1}^N \|y(k+p|k)\|_Q^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \|\Delta u(k+p|k)\|_R^2 \right\} \quad (2)$$

$$u_{\min} \leq u(k+p|k) \leq u_{\max} \quad p = 0, 1, \dots, N_u$$

$$x_{\min} \leq x(k+p|k) \leq x_{\max} \quad p = 1, N_1+1, \dots, N$$

gdzie  $Q \geq 0$  and  $R > 0$  są macierzami wag,  $y_k$  jest wektorem (wektorami) wyjść układu,  $u_k$  jest odpowiednią sekwencją sygnałów sterujących. W każdym kroku próbkowania  $k$ , algorytm sterowania predykcyjnego dąży do minimalizacji wartości funkcji celu przez odpowiedni dobór sekwencji sygnału sterującego biorąc pod uwagę ograniczenia wielkości sterujących i wewnętrznych zmiennych stanu obiektu.

Algorytm sterowania predykcyjnego może być zaimplementowany na dwa sposoby. Sposób tradycyjny polega na rozwiązaniu problemu optymalizacji *on-line* dla danego stanu układu  $x(k)$  i przyjętej w algorytmie długości horyzontu predykcji. Należy podkreślić, że zwiększenie długości okresu przewidywania umożliwia uzyskanie lepszych właściwości dynamicznych obiektu jednakże w znacznym stopniu wpływa na komplikację algorytmu sterowania (zwiększa wymagany nakład obliczeniowy). W praktyce bardzo często przyjmuje się stałą wartość sygnału sterującego dla całego horyzontu predykcji. W znacznym stopniu redukuje to złożoność obliczeniową całego algorytmu. Po wyznaczeniu optymalnej wartości sygnału sterującego w chwili  $k$  jest ona podawana na sterowany obiekt. W kolejnej chwili obliczeniowej ( $k+1$ ) cała procedura jest powtarzana od nowa uwzględniając aktualne wartości wektora stanu obiektu  $x(k+1)$  (mierzone bądź estymowane). Opisana strategia sterowania wymaga zastosowania szybkich układów mikroprocesorowych i dlatego jest stosowane w przypadku obiektów o relatywnie dużych stałych czasowych.

W drugim przypadku problem optymalizacji dla danej postaci funkcji celu (1) jest rozwiązany *of-line* dla wszystkich kombinacji wektora stanu  $x \in X_f$  przy użyciu pro-

gramowania wieloparametrycznego (*multi-parametric programming*) [26]–[29]. Korzystając z niego można wykazać, że przestrzeń  $X_f$  może być podzielona na regiony, w których optymalizator jest wyrażony jako funkcja jawna dla danych wartości wektora  $x$ . Prawo sterowania może być traktowane jako kawałkami ciągle i wyrażone jako:

$$U(x) = K_r x + g_r, \quad \forall x \in P_r \quad (3)$$

gdzie  $P_r$  są wielościennymi zbiorami zdefiniowanymi jako:

$$P_r = \{x \in \mathfrak{R}^n | H_r x \leq d_r\}, \quad r = 1, \dots, N_r. \quad (4)$$

Algorytmy projektowania wielościennych zbiorów oraz wyliczenia prawa sterowania są opisane szczegółowo w [9]. W najprostszym przypadku prawo sterownia może być wyliczane przez przeszukiwanie po kolei wszystkich regionów aż do znalezienia aktywnego i kolejno zaimplementowania prawa sterownia zgodnie z (2). Należy zaznaczyć, że w literaturze można znaleźć bardziej efektywne algorytmy generacji bieżącej wartości prawa sterowania [30]. Zastąpienie optymalizacji wykonywanej *on-line* wersją *off-line* umożliwi praktyczną realizację sterowania predykcyjnego do układów o małych stałych czasowych takich jak napędy elektryczne.

#### 4. UZYSKANE WYNIKI

Do oceny uzyskanych wyników wykorzystano podstawowe kryterium jakości ITAE, które zostało podzielone na dwie części: pierwsza związana jest z rozruchem napędu, druga odpowiada za reakcję na zmianę momentu obciążenia:

$$ITAE = \underbrace{\int_{t=0}^{t_1} t \cdot |\omega^{ref} - \omega_2|}_{ITAE(\omega_2)} + \underbrace{\int_{t=t_1}^{t_2} t \cdot |\omega^{ref} - \omega_2|}_{ITAE(m_1)}. \quad (5)$$

Taki podział umożliwia ocenę jakości regulacji zarówno przy rozruchu, jak również ocenę minimalizacji wpływu obciążenia.

Do rozważań przyjęto regulator minimalizujący trzy wyjścia opisane zależnością:

$$\begin{cases} y_1 = \omega_1 - \omega^{ref} \\ y_2 = \omega_2 - \omega^{ref} \\ y_3 = m_s - m_L \end{cases}. \quad (6)$$

Dwa pierwsze wyjścia zapewniają minimalizację błędu regulacji prędkości, natomiast wyjście trzecie zapewnia ograniczenie szybkości narostu prędkości obciążenia. Wartości macierzy wagowej  $Q = \text{diag}(10, 10, 1.5)$ .

Ograniczenia sygnału sterującego oraz momentu skrętnego przyjęto na poziomie:

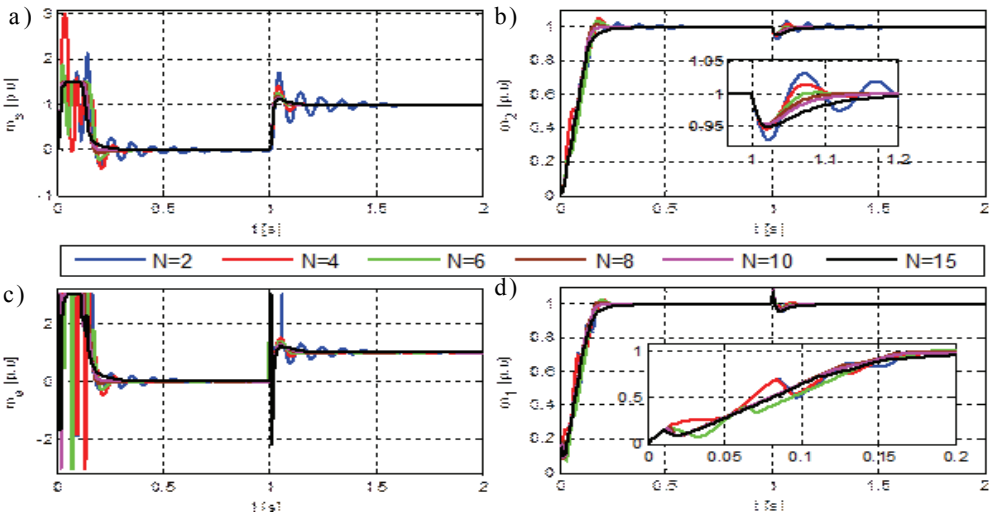
$$-3 \leq m_{er} \leq 3, \quad (7a)$$

$$-1.5 \leq m_s \leq 1.5. \quad (7b)$$

Z postaci funkcji celu (2) wynika, że przy ustalonych wartościach macierzy  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  przy zmianie długości horyzontów zmianie ulegać będzie oddziaływanie poszczególnych wyjść. Długość horyzontu predykcji wyjść ma decydujący wpływ na możliwość utrzymania ograniczeń wewnętrznych zmiennych stanu. Aby to wykazać rozpatrzono sześć wartości długości horyzontu predykcji wyjść przy stałej wartości pozostałych parametrów regulatora ( $N_c = 2$ ,  $\mathbf{Q} = \text{diag}(10, 10, 2)$ ,  $\mathbf{R} = 1 \cdot 10^{-5}$ ). W tabeli 1. zestawiono wyniki dla znamionowej prędkości zadanej. Dodatkowo na rys. 1. przedstawiono przebiegi wybranych zmiennych stanu napędu.

Tabela 1. Porównanie wpływu horyzontu predykcji wyjść na właściwości dynamiczne napędu

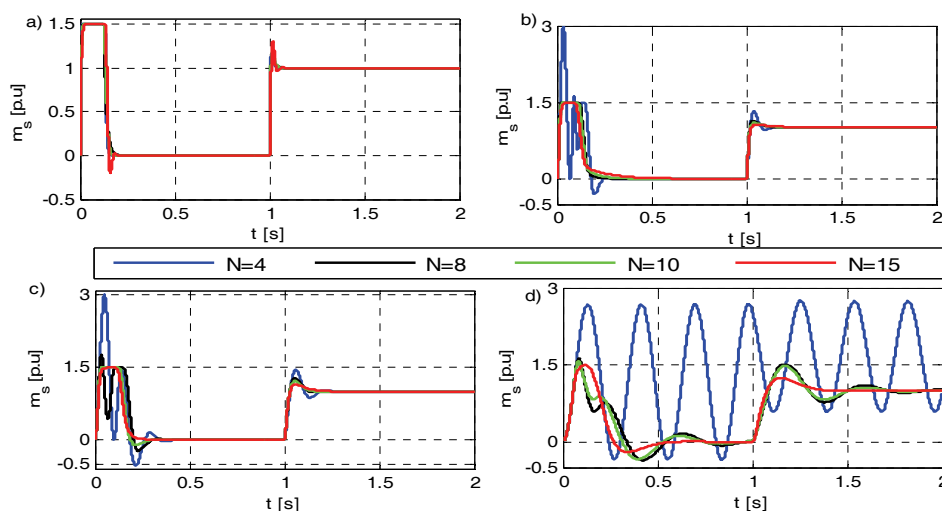
N	2	4	6	8	10	15
Regiony	15	47	67	85	105	155
ITAE( $\omega_2$ ) ( $10^{-3}$ )	5,7	5,8	5,4	4,2	4,18	5,29
ITAE( $m_L$ ) ( $10^{-3}$ )	1,1	0,112	0,0653	0,0803	0,1307	0,321
ITAE ( $\omega_1$ ) ( $10^{-3}$ )	6,8	4,9	5,5	4,25	4,31	5,6
Msmax	1,5	1.5	0.33	0	0	0



Rys. 1. Wpływ wartości horyzontu predykcji wyjść na przebiegi zmiennych stanu:  
a) moment skrętny, b) prędkość obciążenia, c) moment elektromagnetyczny,  
d) prędkość silnika napędowego

Z przedstawionej analizy wynika, że dla ustalonych parametrów mechanicznych napędu wartość ograniczeń zmiennych stanu utrzymywana jest po przekroczeniu pewnej wartości horyzontu predykcji wyjść. Natomiast w przebiegu wartości kryterium jakości sterowania można zauważyć minimum wartości przy  $N = 8$ . Jest to najlepsza wartość horyzontu zarówno pod względem utrzymywania ograniczeń, jak również pod względem dynamiki.

Kolejno sprawdzono jak wartość horyzontu predykcji wyjść wpływa na utrzymywanie ograniczeń zmiennych stanu przy różnej wartości stałej sprężystości. Wyniki zostały zaprezentowane na rys. 2. Do badań przyjęto cztery wartości stałej sprężystości ( $T_c = 0,1$  ms,  $T_c = 1,2$  ms,  $T_c = 2,6$  ms,  $T_c = 20$  ms) oraz cztery wartości horyzontów predykcji wyjść ( $N = 4$ ,  $N = 8$ ,  $N = 10$ ,  $N = 15$ ). Model regulatora dyskretyzowany był z czasem  $T_s = 1$  ms. Z zaprezentowanych przebiegów wynika, że długość horyzontu predykcji wyjść ma decydujący wpływ na utrzymywanie ograniczeń nałożonych na zmienne stanu. Im większa jest stała sprężystości tym horyzont predykcji wyjść musi być dłuższy. Przy zbyt krótkim horyzoncie predykcji wyjść regulator nie jest w stanie utrzymać ograniczenia momentu skrętnego.

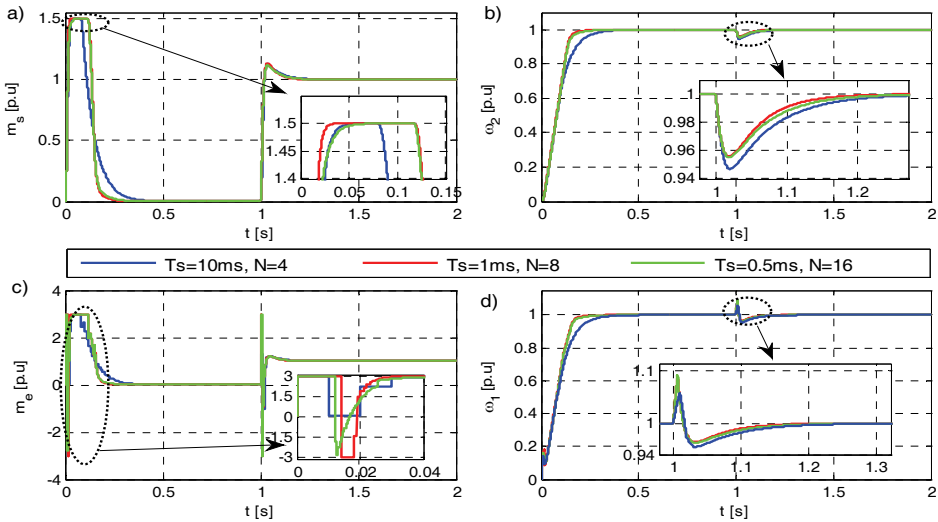


Rys. 2. Wpływ wartości horyzontu predykcji wyjść przy różnej wartości stałej sprężystości na utrzymywanie ograniczenia momentu skrętnego:

a)  $T_c = 0,1$  ms, b)  $T_c = 1,2$  ms, c)  $T_c = 2,6$  ms, d)  $T_c = 20$  ms

Wartość horyzontu predykcji wyjść zmienia się z krokiem próbkowania  $T_s$ . Wraz ze zmniejszaniem kroku próbkowania horyzont predykcji wyjść należy zwiększyć, oraz przy zwiększeniu próbkowania horyzont można obniżyć, w celu utrzymania tej samej długości okna predykcji. Na rys. 3. przedstawiono porównanie trzech kroków próbkowania przy równoczesnej zmianie długości horyzontu predykcji wyjść. Stała

sprężystości została przyjęta na poziomie 1,2 ms. Zaprezentowane przebiegi potwierdzają rozważania przeprowadzone wcześniej. Należy tu zwrócić uwagę, że wraz ze zwiększaniem okresu próbkowania pogorszeniu ulega dynamika (Rys. 3.b). Wiąże się to z faktem, że regulator „nie widzi dokładnie” jak zmieniać się będą wartości zmiennych stanu, ze względu na skrócony horyzont i długi okres próbkowania, który również zmniejsza wymuszenie. Opisane zjawisko widoczne jest na rys. 3.c) gdzie w przypadku krótkiego kroku próbkowania duża wartość zadanego momentu elektromagnetycznego jest dłużej utrzymana niż dla kroku długiego (linie czerwona i niebieska).



Rys. 3. Przebiegi: a) momentu skrętnego, b) prędkości obciążenia, c) momentu elektromagnetycznego zdanego, d) prędkości silnika napędowego, przy różnym kroku obliczeniowym regulatora  $T_s$

W zaprezentowanych powyżej badaniach przyjęto horyzont predykcji sterowań równy 2. Wartość ta jest w zasadzie niezmienna przy sterowaniu prędkością. Obniżając ją do 1 nie da się zmieniając pozostałe parametry, doprowadzić do utrzymania ograniczenia momentu skrętnego. Zwiększanie tej wartości ma natomiast bardzo duży wpływ na złożoność obliczeniową regulatora, przy czym poprawa jakości sterowania jest niewielka. W tabeli 2 zestawiono porównanie wpływu zmian horyzontu sterowań na złożoność obliczeniową regulatora oraz na jakość sterowania. W przypadku pary  $N = 10$  i  $N_c = 6$  nie dało się wyznaczyć rozwiązania z powodu złego uwarunkowania macierzy. Zwiększając czterokrotnie horyzont predykcji sterowań uzyskano poprawę kryterium jakości sterowania o 4%, natomiast złożoność regulatora wzrosła ponad 45 razy. Prezentowane wyniki potwierdzają tezę zawartą powyżej. Zarówno przy niskiej prędkości zadanej jak i znamionowej można przyjąć, że para  $N = 10$ ,  $N_c = 2$  jest optymalnym kompromisem, pomiędzy jakością sterowania a złożonością obliczeniową.

## 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na stanowisku zbudowanym z silnikami prądu stałego o mocy 500W, które połączone były ze sobą długim wałem ( $l = 0.6$  m,  $\Phi = 6$  mm).

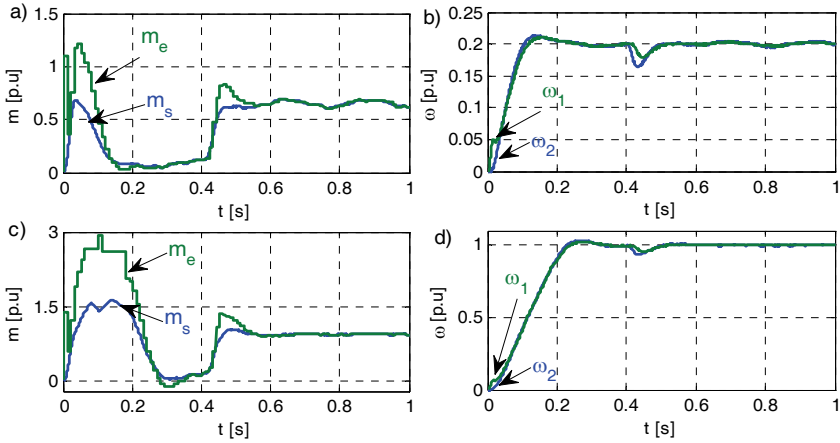
Tabela 2. Porównanie wpływu horyzontu predykcji sterowań na właściwości dynamiczne napędu

N	10	10	10	10	10	10	$\omega^{zad}$
Nc	1	2	4	6	8	9	
Regiony	23	105	638	–	4791	6609	
ITAE( $\omega_2$ ) $10^{-4}$	1249	2.06	1.97	–	1.98	1.98	0,25
ITAE( $m_L$ ) $10^{-5}$	96000	8.71	7.204	–	7.208	7.208	
ITAE $10^{-4}$	1089	2.93	2.7	–	2.7	2.7	
ITAE( $\omega_2$ ) $10^{-4}$	500	4.19	4.14	–	4.55	4.55	1
ITAE( $m_L$ ) $10^{-5}$	130000	8.717	7.204	–	7.208	7.208	
ITAE $10^{-4}$	1,84	4.28	4.22	–	4.62	4.62	

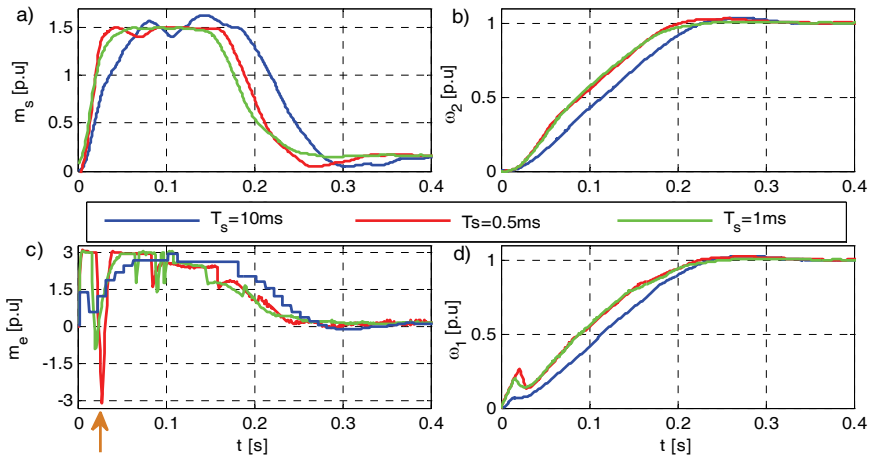
Silnik napędowy zasilany był z przekształtnika pracującego w konfiguracji mostka *H*. Mostek sterowany był przez sprzętowy modulator szerokości impulsów o częstotliwości nośnej 13 kHz. Prędkość silnika napędowego mierzona była przez enkoder inkrementalny *KUBLERA* o rozdzielczości 36000 impulsów na obrót. Prąd mierzony był za pomocą przetworników firmy *LEM*. Algorytm sterowania zaimplementowany został na karcie szybkiego prototypowania *DS1103* z procesorem sygnałowym. W celu zapewnienia optymalnej pracy całej struktury regulacji obwód regulacji momentu elektromagnetycznego pracujący z dyskretnym regulatorem *PI* obliczany był z częstotliwością 5 kHz. Estymator zmiennych stanu obliczany był z częstotliwością 1 kHz.

W celu praktycznej weryfikacji wpływu kroku próbkowania przebadano eksperymentalnie regulator, którego model poddany został dyskretyzacji z krokiem 10 ms. Uzyskane wyniki dla prędkości 0,25 i znamionowej przedstawiono na rys. 4. W przypadku próbkowania z mniejszą częstotliwością widać wyraźne zmniejszenie dynamiki w przebiegu zadanego momentu elektromagnetycznego (4. a,c). Związane jest to z mniejszą dokładnością dyskretnego modelu. W przypadku znamionowej prędkości zadanej, widoczne jest nieznaczne naruszenie ograniczenia momentu skrotnego. W takim przypadku regulator nie posiada aktywnych wzmocnień ponieważ nie wprowadzono zmiękczenia ograniczeń. Aby zapewnić poprawność pracy w takiej sytuacji (brak aktywnego rozwiązania wynikającego z naruszenia ograniczeń) wprowadza się specjalne procedury. W niniejszej pracy podaje się poprzednie sterowanie.





Rys. 4. Przebiegi: a),c) momentu elektromagnetycznego i skrętnego, b),d) prędkości silnika napędowego i obciążenia w układzie z regulatorem próbkowanym z krokiem 10 ms, przebiegi dla prędkości zadanej 0,25 (a,b), oraz znamionowej (c,d)



Rys. 5. Przebiegi: a) moment skrętny, b) prędkość obciążenia, c) moment elektromagnetyczny, d) prędkość silnika napędowego dla różnych kroków obliczeń regulatora predykcyjnego

Aby zweryfikować w jakim stopniu zmiana kroku próbkowania wpływa na dynamikę napędu, na rys. 5. przedstawiono przebiegi zmiennych stanu dla trzech kroków próbkowania. Na podstawie analizy przebiegów można wyciągnąć następujące wnioski. Zwiększenie okresu próbkowania regulatora dziesięciokrotnie (wartością odniesienia jest  $T_s = 1$  ms) powoduje wzrost czasu ustalenia prędkości o 50 ms. Natomiast zmniejszając czas próbkowania dwukrotnie uzyskuje się skrócenie czasu regulacji o około 15 ms. Przy analizowanym porównaniu widoczne jest również jak poszczególne

gólne regulatory wymuszają moment skrętny (rys. 5.c  $t = 0,015$  s brązowa linia pionowa). Im szybciej próbkowany regulator tym gwałtowniejsze przełączenia momentu elektromagnetycznego.

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono analizę wpływu kroku predykcji wyjść i sterowań regulatora predykcyjnego na właściwości dynamiczne napędu z połączeniem sprężystym. Z przedstawionej analizy wynika, że w przypadku sterowania prędkością napędu z połączeniem sprężystym wartość horyzontu predykcji wyjść należy dobierać w zależności od wartości sprężystości wału. Długość horyzontu predykcji sterowań jest wartością można traktować jako parametr stały (w rozpatrywanym napędzie). Zmniejszenie wartości poniżej dwóch kroków powoduje brak możliwości kontroli momentu skrętnego. Natomiast jego zwiększenie nie prowadzi do istotnych zmian właściwości dynamicznych a jedynie następuje wzrost złożoności obliczeniowej regulatora.

## LITERATURA

- [1] VALENZUELA M.A., BENTLEY J.M., LORENZ R.D., *Computer-Aided Controller Setting Procedure for Paper Machine Drive Systems*, IEEE Trans. Indust. Electronics, Vol. 45, No. 2, 2009, 638–650.
- [2] HORI Y., SAWADA H., CHUN Y., *Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system*, IEEE Trans. Indust. Electronics, Vol. 46, No. 1, 1999, 162–168.
- [3] WANG J., ZHANG Y., XU L., JING Y., ZHANG S., *Torsional Vibration Suppression Of Rolling Mill With Constrained Model Predictive Control*, 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Dalian 2006.
- [4] BROGLIATO B., ORTEGA R., LOZANO R., *Global tracking controllers for flexible-joints manipulators: a comparative study*, Automatica, Vol. 31, No. 7, 1995, 941–956.
- [5] VASAK M., BAOTIC M., PETROVIC I., PERIC N., *Hybrid Theory-Based Time-Optimal Control of an Electronic Throttle*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 3, 2007, 1483–1494.
- [6] MONTAGUE R., BINGHAM C., ATALLAH K., *Servo Control of Magnetic Gears*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 17, No. 2, 2012, 269–278.
- [7] MONTAGUE R.G., BINGHAM C., ATALLAH K., *Magnetic Gear Pole-Slip Prevention Using Explicit Model Predictive Control*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 5, 2013, 1535–1543.
- [8] LUCA A.D., BOOK W., *Robots with flexible elements*, Springer handbook of robotics' Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2008, 287–319.
- [9] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Wrocław: Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 61, 2008.

- [10] MUSZYŃSKI R., DESKUR J., *Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, 2010, 544–552.
- [11] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 87, No. 4, 2011, 160–163.
- [12] KAMIŃSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *FPGA Implementation of ADALINE-based Speed Controller for the Drive System with Elastic Joint*, IEEE Trans. Indus. Informatics Early Access, 2012.
- [13] DODDS J., VITTEK J., PERRYMAN R., KUCHTA J., *Sliding Mode Control Of PMSM Electric Drives With Flexible Coupling*, International Conference of Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), High Tater 2007.
- [14] CYCHOWSKI M., SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Constrained Model Predictive Control of the Drive System With Mechanical Elasticity*, IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 56, No. 6, 2009, 1963–1973.
- [15] 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, No. 9, 2013, 3679–3688.
- [16] SERKIES P., SZABAT K., *Adaptacyjna struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości dla układu napędowego z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, 2011, Nr 31, 320–330.
- [17] STEPHENS M., MANZIE C., GOOD M., *Model Predictive Control for Reference Tracking on an Industrial Machine Tool Servo Drive*, IEEE Trans. Industrial Informatics, Vol. 9, No. 2, 2013, 808–816.
- [18] FUENTES E.J., SILVA C.A., YUZ J.I., *Predictive Speed Control of a Two-Mass System Driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor*, IEEE Trans. Indus Electronics, Vol 59, 7, 2012, 2840–2848.
- [19] SERKIES P., *Predykcyjna regulacja prędkości z silnikiem indukcyjnym w napędzie dwumasowym*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2012, 72, 149–156.
- [20] SERKIES P., SZABAT K., *Predykcyjny regulator położenia z warstwą rozmytych ograniczeń dla napędu dwumasowego*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 87, No. 8, 2011, 202–207.
- [21] RODRIGUEZ J., KAZMIERKOWSKI M., ESPINOZA J., ZANCHETTA ABU-RUB P.H., YOUNG H., ROJAS C., *State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics*, IEEE Trans. on Industrial Informatics, early access, 2013.
- [22] MACIEJOWSKI J.M., *Predictive Control With Constraints*, Harlow, U.K., Prentice Hall, 2002.
- [23] 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 Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 8, 2011, 3647–3657.
- [24] FUENTES E., KENNEL R., *Finite-set model predictive control of the two-mass-system*, Workshop on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Monachium, 2011.
- [25] DAVARI S.A., KHABURI, D.A., KENNEL R., *Using a weighting factor table for FCS-MPC of induction motors with extended prediction horizon*, IECON 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, 2086–2091.
- [26] BEMPORAD A., MORARI M., DUA V., PISTIKOPOULOS E.N., *The explicit linear quadratic regulator for constrained systems*, Automatica, Vol. 38, No. 1, 2002, 3–20.
- [27] PISTIKOPOULOS E.N., DUA V., BOZINIS N.A., BEMPORAD A., MORARI M., *On-line optimization via off-line parametric optimization tools*, Comput. Chem. Eng., Vol. 24, No. 2, (2000), 183–188.
- [28] TRNDEL P., JOHANSEN T.A., BEMPORAD A., *An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions*, Automatica, Vol. 39, No.3, 2003, 489–497.

- [29] KVASNICA M., GRIEDER P., BAOTIC M., MORARI M., *Multiparametric toolbox (MPT)*, [in:] ALUR R., PAPPAS G.J. (eds.), *Hybrid systems: Computation and Control*, Springer, 2004, 448–462.
- [30] TØNDEL P., JOHANSEN T.A., BEMPORAD A., *Evaluation of piecewise affine control via binary search tree*, *Automatica*, Vol. 39, No. 5, 2003, 945–950.

#### SELECTION OF THE OUTPUTS AND CONTROL PREDICTION HORIZON LENGTH FOR PREDICTIVE CONTROLLER IN THE DRIVE WITH ELASTIC COUPLING.

The paper presents issues related to the impact analysis and selection of the length of control and output horizon the prediction to dynamic properties of the drive with elastic coupling. In the frame study the impact of the length of control and output horizon were simulation examined in drive with different mechanical parameters. Were presented the results related to the effect of the sampling step for selecting the length of the prediction window outputs. Sequentially presented experimental verification of the results. Simulation results were verified by experimental research.