

Karol WRÓBEL*
Piotr SERKIES*

PREDYKCYJNY REGULATOR POŁOŻENIA WAŁU W NAPĘDZIE Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

W artykule przedstawiono predykcyjną strukturę regulacji pozycji wału silnika indukcyjnego, wykorzystującą zależności obowiązujące w układzie FOC (Field Oriented Control). We wstępie pracy omówiono struktury sterowania stosowane w napędach z silnikami indukcyjnymi. W drugim rozdziale omówiono zagadnienie sterowania predykcyjnego. W trzecim rozdziale referatu przedstawiono strukturę sterowania pozycją wału silnika indukcyjnego, wykorzystującą zależności obowiązujące w strukturze połowo zorientowanej. Poprawność działania zaproponowanej struktury potwierdzono badaniami symulacyjnymi podczas, których sprawdzono, jaki wpływ na dynamikę układu regulacji mają zmiany ograniczeń nakładanych na zmienne stanu.

SŁOWA KLUCZOWE: silnik indukcyjny, regulator położenia, regulator predykcyjny

1. WPROWADZENIE

Silniki indukcyjne stosowane były do niedawna w aplikacjach wymagających stałej prędkości obrotowej. Ich liczne zalety oraz rozwój układów energoelektronicznych powodują, że regulacja obrotów, a w konsekwencji położenia, jest nie tylko możliwa, ale także stosunkowo łatwa. Pozwala to na możliwość stosowania silników indukcyjnych w wielu wymagających aplikacjach, w których wcześniej nie było możliwości ich zastosowania, oraz wpływa na rozwój metod sterowania tego typu napędów. Należy podkreślić, że pozycjonowanie elementów wykonawczych jest w szeroko rozumianym przemyśle podstawowym zadaniem, jakie stawiane jest przed układami sterowania. Podstawowym algorytmem sterowania pozycją wału, jest kaskadowa struktura bazująca na regulatorach typu PI i składająca się z trzech pętli regulacji połączonych szeregowo. Zewnętrzna, nadrzędna pętla odpowiada za stabilizację pozycji wału maszyny na wartości zadanej. Regulator położenia na wyjściu wystawia sygnał referencyjny dla podporządkowanego regulatora prędkości. Najbardziej wewnętrzną pętlę regulacji stanowi regulator momentu (prądu). Do strojenia regulatorów można zastosować znane kryteria doboru nastaw, takie jak kryterium modułu i symetrii, czy rozłożenia biegunów.

* Politechnika Wroclawska.

Połączenie wymienionych metod strojenia regulatorów (bazujących na liniowej teorii sterowania) z wprowadzonymi ograniczeniami może prowadzić do powstania niepożądanych przeregulowań, czy oscylacji zmiennych stanu. Jedną z popularniejszych i nadal stosowanych w układach regulacji silnikami indukcyjnymi jest metoda polowo-zorientowana (FOC - Field Oriented Control), zaproponowana w 1971 roku przez F. Blaschke [1]. Dzięki przekształceniu równań modelu silnika do układu współrzędnych prostokątnych wirujących zgodnie z wektorem strumienia magnetycznego, uzyskuje się dwa niezależne tory sterowania. Wymuszenie odpowiednich wartości składowej prądu stojana w osi y daje możliwość sterowania momentem, natomiast składową w osi x steruje się wartością strumienia wirnika. Wartość zadana prądu w osi y jest podawana przez regulator prędkości, który z kolei jest regulatorem podrzędnym w stosunku do regulatora położenia. Struktura polowo-zorientowana jest podstawową strukturą, dającą możliwość tworzenia różnych wariantów metody, np. z regulacją prądu: w układzie trójfazowym, w układzie z nieliniowym regulatorem histerezowym, z Δ - modulacją, czy też z regulatorem prądu z tabelaryzacją przełączeń [2]. Również metoda proponowana w niniejszym artykule, strukturalnie zbliżona jest do struktury polowo-zorientowanej.

Inną podstawową metodą sterowania jest metoda DTC (Direct Torque Control) zaproponowana przez Takahashi i Noguchi [3]. Pomimo wad (np. odkształcenia strumienia i prądu przy małych prędkościach) stanowiła konkurencję dla metod polowo-zorientowanych. Podobnie jak w przypadku metod FOC w literaturze dostępne są różnorodne warianty metody DTC [2].

W sterowaniu silnikami indukcyjnymi wykorzystuje się również metody z regulatorami rozmytymi (np. Takagi-Sugeno z mechanizmem dostrajania wykorzystującym algorytmy genetyczne [4]), układy adaptacyjne wykorzystujące podejście SPR [5], czy też regulatory predykcyjne [6].

W [2] autor podkreśla, że większość wad metody FOC wynika z użycia liniowych regulatorów prądu. Zastosowanie regulatorów nieliniowych niweluje częściowo wady, poprawiając dynamikę kształtowania momentu. Celowe zatem wydaje się stosowanie regulatorów predykcyjnych, wykorzystujących zależności obowiązujące w metodzie polowo-zorientowanej. Teoria sterowania predykcyjnego pozwala również na wprowadzenie ograniczeń sygnałów sterujących i wewnętrznych zmiennych stanu już na etapie projektowania regulatora. Umożliwia to uzyskanie, zgodnie z założonym kryterium, optymalnych przebiegów zmiennych stanu. Zależnie od doboru współczynników wagowych funkcji celu można w szerokim zakresie kształtować właściwości dynamiczne i statyczne. Możliwe jest zatem zapewnienie lepszych przebiegów niż w układzie z klasycznym regulatorem PI o stałych wzmocnieniach.

2. STEROWANIE PREDYKCYJNE

Pierwsze publikacje dotyczące sterowania predykcyjnego sięgają połowy lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia [7]. Ze względu na stosunkowo dużą złożoność obliczeniową, sterowanie predykcyjne stosowane było początkowo do procesów wolnozmiennych, głównie w przemyśle chemicznym i petrochemicznym [8]. Zwiększenie wydajności elementów mikroprocesorowych, pozwala obecnie na zastosowanie złożonych obliczeniowo algorytmów do układów o większej dynamice. Wśród wielu generacji algorytmów predykcyjnych, wyróżnić można regulatory wykorzystujące model w dyskretnej przestrzeni stanu.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

Gdzie: $x(k)$, $u(k)$, $y(k)$ to odpowiednio wektory: stanu, zmiennych wejściowych i wyjściowych, A , B , C to znane, niezmiennie w czasie macierze systemowe.

Strategia sterowania predykcyjnego zakłada, że wpływ przyszłych sygnałów sterujących na proces przewidywany jest w oparciu o aktualny stan, przy wykorzystaniu modelu. Na podstawie porównania przewidywanego i aktualnego stanu, wyznaczany jest optymalny, dostępny sygnał sterujący, uwzględniający założone ograniczenia [8]. Odbywa się to poprzez minimalizację wartości funkcji celu, określonej zależnością (2a) przy uwzględnieniu założonych ograniczeń (2b).

$$J_N^* = \min_{U=[u_0^T, \dots, u_{N_u-1}^T]^T} \left[\sum_{k=0}^{N_p} y_k^T Q y_k + \sum_{k=0}^{N_u-1} u_k^T R u_k \right] \quad (2a)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}; \quad \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max}; \quad x_{\min} \leq x(k) \leq x_{\max} \quad (2b)$$

gdzie: $Q \geq 0$ i $R > 0$ – macierze wagowe regulatora różnicujące odpowiednio wpływ poszczególnych uchybów regulacji oraz zmienności sygnałów sterujących na wartość funkcji celu, N_p , N_u – horyzonty predykcyjnego odpowiednio: wyjść i sygnałów sterujących, U – sekwencja sterowań (N_u wektorów m wymiarowych, gdzie m jest liczbą sygnałów sterujących). Zakłada się, że $N_u \leq N_p$, a $u_k = u_{N_u-1}$ dla każdego $k \geq N_u$

Początkowo algorytmy predykcyjne realizowane były w czasie rzeczywistym. Oznacza to, że problem optymalizacji rozwiązywany był w każdym kroku obliczeń. Ten typ optymalizacji, nazywany *on-line*, ze względu na duży nakład obliczeniowy, stosowany może być jednak w układach o relatywnie niskiej dynamice. Dzięki wprowadzeniu optymalizacji *off-line* uzyskano możliwość zastosowania algorytmów predykcyjnych do obiektów o większej dynamice, takich jak układy napędowe. Metoda *off-line* wykorzystuje programowanie wieloparametryczne. W wyniku jego działania, przestrzeń stanu

dzielona jest na regiony (P_r), które opisane są nierównościami określającymi ich granice (3a). Do każdego regionu przypisane jest prawo sterowania, które jest kawałkami ciągłe i określone jako liniowa funkcja zmiennych stanu (3b). Szczegółowy opis wyznaczania regionów i obliczania praw sterowania podany jest w [9]

$$P_r = \{x \in \mathbf{R}^n \mid H_r x \leq K_r\} \quad (3a)$$

$$u(x) = F_r x(k) + g_r \quad \forall x \in P_r, r = 1, \dots, N_r \quad (3b)$$

3. MODEL MATEMATYCZNY, STRUKTURA STEROWANIA

Model matematyczny silnika indukcyjnego, wykorzystywany przez regulator predykcyjny, zapisany jest w układzie x - y , w jednostkach względnych, przy założeniu orientacji wektorów przestrzennych na strumień wirnika i uwzględnieniu powszechnie stosowanych założeń upraszczających. Ze względu na zasilanie z falownika napięcia w równaniu (5) oznaczono człony odprzęgające tory sterowania e_x i e_y [10], które pominięto w równaniach stanu regulatora (6). Zakłada się również, że układ pracuje w obszarze stałego momentu, a strumień stabilizowany jest na wartości znamionowej.

$$T_N \frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{r_r x_M}{x_r} i_{sx} - \frac{r_r}{x_r} \Psi_r; \quad 0 = T_N \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = \frac{r_r x_M}{x_r} i_{sy} - \omega_r \Psi_r \quad (4)$$

$$m_e = \frac{x_M}{x_r} (\Psi_r i_{sy}), \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_M} (m_e - m_L); \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{T_\alpha} \omega$$

$$u_{sx} = r_s i_{sx} + T_N x_s \sigma \frac{di_{sx}}{dt} - \underbrace{\omega_{s\psi} x_s \sigma i_{sy} + \frac{x_M}{x_r} T_N \frac{d\Psi_r}{dt}}_{e_x} \quad (5)$$

$$u_{sy} = r_s i_{sy} + T_N x_s \sigma \frac{di_{sy}}{dt} + \underbrace{\omega_{s\psi} x_s \sigma i_{sx} + \omega_{s\psi} \frac{x_M}{x_r} \Psi_r}_{e_y}$$

Gdzie: u_{sx} , u_{sy} , i_{sx} , i_{sy} – napięcia i prądy stojana w osiach x i y , $\Psi_r = \Psi_{rx}$, Ψ_{ry} – strumień wirnika w osiach x i y , ω_r – pulsacja poślizgu, T_N – stała czasowa odniesienia, r_s , r_r – rezystancje: stojana, wirnika, x_s , x_r , x_M – reaktancje: stojana, wirnika, magnesująca, σ – całkowity współczynnik rozproszenia silnika, $\omega_{s\psi}$ – pulsacja pola, T_M – mechaniczna stała czasowa silnika, m_e , m_L – moment elektromagnetyczny i obciążenia, ω – prędkość napędu, α – położenie wału, T_α – stała pozycjonowania

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

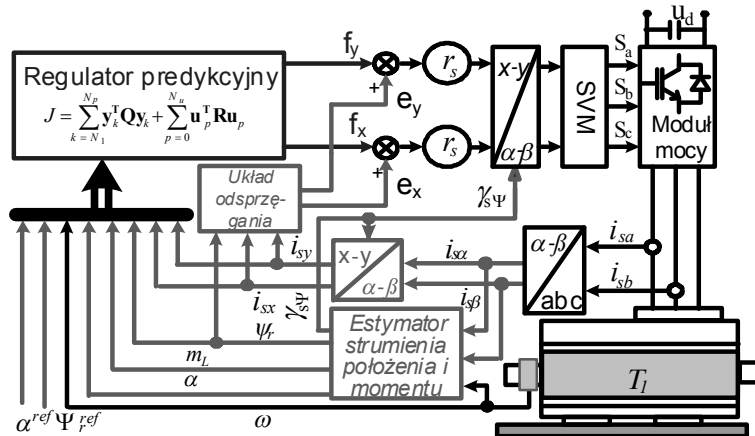
$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} i_{sx} \\ \psi_r \\ i_{sy} \\ \omega \\ \alpha \\ m_L \\ \psi_r^{ref} \\ \alpha^{ref} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \psi_r(k) - \psi_r^{ref}(k) \\ \alpha(k) - \alpha^{ref}(k) \end{bmatrix}, \\
 A &= \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sigma T_N x_s & & & & & & & \\ \frac{x_M r_r}{x_r T_N} & -\frac{r_r}{x_r T_N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_s}{\sigma T_N x_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\psi_r^{nom} x_M}{x_r T_M} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_\alpha} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma T_N x_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma T_N x_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

Strukturalnie proponowany układ sterowania zbliżony jest do układu polowozorientowanego. Przy czym funkcje czterech regulatorów PI oraz regulatora położenia, przejmuje regulator predykcyjny. W strukturze sterowania niwelowane są uchyby regulacji strumienia wirnika i położenia wału. Realizowane jest to poprzez minimalizację funkcji kryterialnej określonej wyrażeniem:

$$\min_{\substack{\Delta u_x \\ \Delta u_y}} \left\{ \sum_{k=1}^{N_p} \left[q_1 (\psi_r(k) - \psi_r^{ref}(k))^2 + q_2 (\alpha(k) - \alpha^{ref}(k))^2 \right] + \sum_{p=0}^{N_u-1} \left[r_1 (u_x^{ref}(p))^2 + r_2 (u_y^{ref}(p))^2 \right] \right\} \quad (7)$$

$$|u_{sx}| \leq u_{sx}^{max}; \quad |u_{sy}| \leq u_{sy}^{max}; \quad |i_{sx}| \leq i_{sx}^{max}; \quad |i_{sy}| \leq i_{sy}^{max}; \quad |\omega| \leq \omega^{max}$$

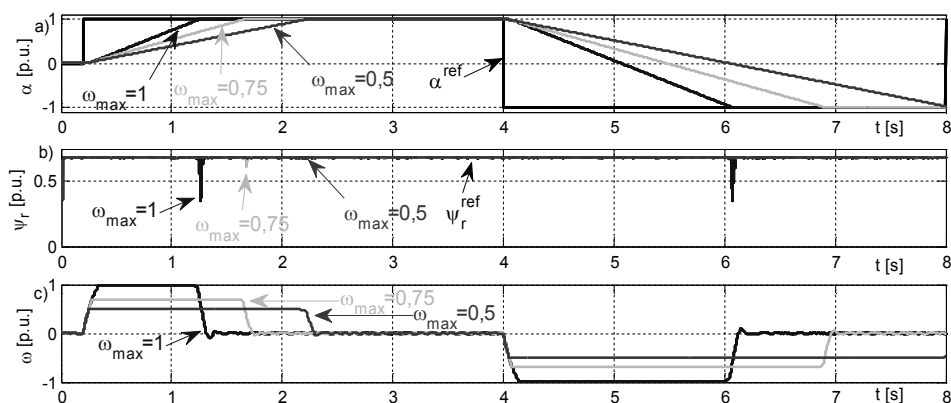
gdzie: N_p – horyzont predykcji wyjść, N_u – horyzont predykcji sterowań, q_1, q_2, q_3 – wagi różnicujące oddziaływanie poszczególnych wyjść na wartość funkcji celu, r_1, r_2 – wagi różnicujące wpływ zmienności sterowania na wartość funkcji celu.



Rys. 1. Struktura sterowania

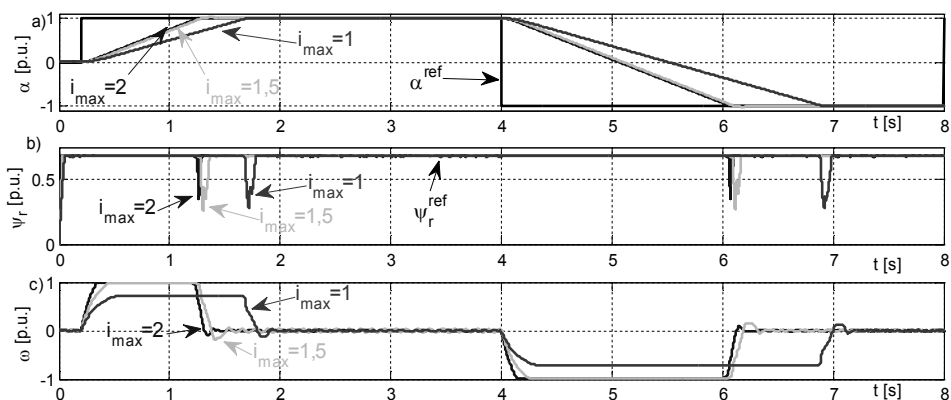
4. UZYSKANE WYNIKI

W pierwszej kolejności sprawdzono wpływ zmiany ograniczenia prędkości na dynamikę układu regulacji. Dobrane empirycznie parametry regulatora: $N = 8$, $N_u = 2$, $q_{11} = 200$, $q_{22} = 100$, $r_{11} = r_{22} = 0,001$. Założono następujące wartości ograniczeń: $u_{sy}^{max} = u_{sx}^{max} = 1$, $i_{sy}^{max} = i_{sx}^{max} = 2$. Przebieg symulacji przewidywał skokową zmianę strumienia do wartości zadanej ($\psi_r(t = 0s) = 0,68$ [p.u.]), następnie w chwili $t = 0,2s$ następowała skokowa zmiana położenia zadanego do wartości $\alpha^{ref} = 1$. W chwili $t=4s$ następowała skokowa zmiana położenia do wartości zadanej $\alpha^{ref} = -1$. Przebiegi zmiennych stanu dla różnych wartości ograniczenia prędkości ($\omega = 1; 0,7; 0,5$) przedstawiono na rysunku 2. Warto zauważyć, że forsowanie większej wartości maksymalnej prędkości, a tym samym zwiększanie dynamiki regulacji położenia, negatywnie wpływa na przebieg drugiej wielkości regulowanej strumienia wirnika. Zmniejszenie dynamiki ustalania prędkości poprzez zmniejszenie dopuszczalnej prędkości obrotowej osiągananej przez silnik, pozwala zniwelować zapady w przebiegu strumienia wirnika.

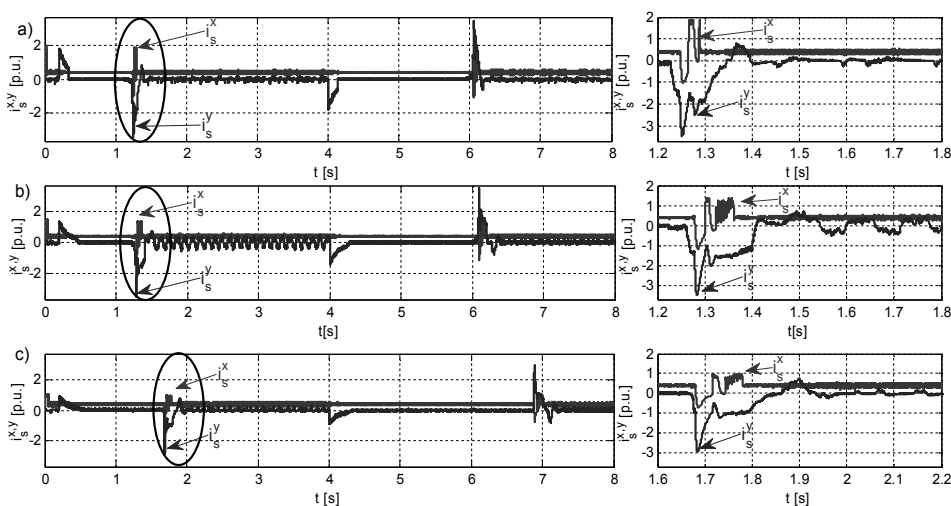


Rys. 2. Przebiegi zmiennych stanu układu napędowego: a) położenia, b) strumienia, c) prędkości, dla różnych wartości ograniczenia prędkości maksymalnej ($\omega_{max}=1; 0,75; 0,5$)

Zaprezentowano również jaki wpływ na dynamikę układu ma wprowadzanie ograniczeń poszczególnych zmiennych stanu oraz zmiana wartości wag regulatora. W przypadku ograniczenia prądu stojana (rysunki 3 i 4) najlepszą dynamikę przedstawia oczywiście regulator z najwyższą dopuszczalną wartością ($i_{max} = 2$ [p.u.]). Jednak jak pokazano na rysunkach układ działa poprawnie również z mniejszymi dozwolonymi wartościami prądu. Chwilowe przekroczenia wynikają z niedokładności modelu wykorzystywanego przez regulator względem obiektu badań.



Rys. 3. Przebiegi zmiennych stanu układu napędowego: a) położenia, b) strumienia, c) prędkości, dla różnych wartości ograniczenia prądu stojana ($i_{max}=2; 1,5; 1$)



Rys. 4. Przebiegi składowych prądu stojana w osiach x i y, przy różnych poziomach ograniczenia: a) $i_{max}=2$, b) $i_{max}=1,5$, c) $i_{max}=1$ oraz hodograf strumienia stojana dla $i_{max}=2$ (d)

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono przybliżony regulator pozycji wału silnika indukcyjnego. Badania symulacyjne potwierdzają poprawność działania zaproponowanej struktury. Proponowany algorytm szybko i bez przeregulowań stabilizuje wartość strumienia i położenia wirnika na wartościach zadanych, uwzględniając przy tym założone ograniczenia sygnałów.

LITERATURA

- [1] Blaschke F., Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine, Siemens Forsch. und Entwicklungsberichte, 1972, 184-193.
- [2] Sikorski A., Porównanie właściwości wektorowych metod regulacji momentu i strumienia maszyny indukcyjnej (DTC i FOC).
- [3] Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, 820-827, 1986.
- [4] Adeline Sneha J., Kumar K., Bens Joie Victor V., Aran Glenn J., Takagi-Sugeno Fuzzy Logic Speed Control of an Indirect Field Oriented Control Induction Motor Drive Using Genetic Algorithm, Intern. Journal of Innovative Research in Engineering&Science, no. 3 vol. 6, 74-82, 2014.
- [5] Hou-Tsan Lee, Adaptive speed/position control of induction motor based on SPR approach, International Journal of Control, nr 11, vol. 87, 2209-2222, 2014.
- [6] Serkies P., Wróbel K., Szabat K., Application of the long horizon model predictive control to an induction motor drive, Croatian Society for Communications, Computing, Electronics, Measurement and Control, 172-177, 2013.
- [7] Richalet J., Rault A., Testud J.L., Papon J., Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes, Automatica, 14, no. 5, 413-428, 1978.
- [8] Tatjewski P., Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych: struktury i algorytmy, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2002, 113-269.
- [9] Bemporad A., Morari M., Dua V., Pistikopoulos E.N., The explicit linear quadratic regulator for constrained systems, Automatica, Vol. 38, No. 1, 3-20, 2002.
- [10] Orłowska-Kowalska T., Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna Wydaw. PWr, Wrocław, 2003.

PREDICTIVE POSITION CONTROL SHAFT OF INDUCTION DRIVE

This paper present a structure of predictive control of the shaft position of induction motor. In the introduction the paper discusses the control structures used in induction motor drives. The second chapter discusses the wider issue of predictive control. In the third section of the paper presents the structure of the shaft position control of induction motor, which uses depending on the field-oriented structure. Correct operation of the proposed structure was confirmed during a simulation study.