

dr inż. Adam Słota
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Politechnika Krakowska

MODEL KOORDYNACJI TRAJEKTORII EFEKTORÓW MANIPULATORÓW KARTEZJAŃSKICH – WERYFIKACJA STABILNOŚCI

W pracy przedstawiono koncepcję koordynacji trajektorii manipulatorów kartezyjskich z wykorzystaniem ruchu korekcyjnego. W modelu koordynacji do wyznaczania prędkości ruchu korekcyjnego wykorzystano regułę proporcjonalno-całkującą. Dla przyjętej struktury i wartości parametrów układów napędowych manipulatorów, przy założeniu liniowości układu, przeprowadzono weryfikację stabilności działania układu. Stosując metodę sprawdzania kolejnych wartości wyznaczono zakresy parametrów korektorów, dla których układ jest stabilny

A TRAJECTORY COORDINATION MODEL OF TWO CARTESIAN MANIPULATORS – STABILITY VERIFICATION

In the paper an idea of trajectory coordination of Cartesian manipulators is presented. In the coordination model for corrective motion speed calculation proportional-integral rule is used. For defined structure and values of parameters of manipulators' drives systems, assuming linearity of the system, stability feature is verified. For motion correctors' parameters ranges for which the system is stable are calculated.

1. WSTĘP

Wytwarzanie produktów we współczesnych zakładach produkcyjnych realizowane jest w coraz to większym stopniu z wykorzystaniem zautomatyzowanych systemów wytwarzania. W systemach takich często wykorzystywane są roboty przemysłowe zaangażowane bezpośrednio w proces produkcyjny, realizując operacje zgrzewania, spawania, montażu, lub spełniające funkcje usługowe np.: transportowo-manipulacyjne. Działanie robotów w systemach wytwarzania skoordynowane jest z działaniem pozostałych urządzeń systemu. Koordynacja taka może mieć charakter dyskretny (zapewnienie wymaganej kolejności realizacji wyodrębnionych etapów procesu) lub charakter ciągły. Koordynacja ciągła wymagana jest np. przy realizacji zadań takich jak: spawanie (w przypadku, gdy jeden z robotów manipuluje spawanym przedmiotem, a drugi realizuje zadanie spawania) czy transport dużego i ciężkiego przedmiotu za pomocą dwóch robotów.

2. ZARYS KONCEPCJI KOORDYNACJI TRAJEKTORII

W pracach [1, 2] zaproponowano algorytm koordynacji trajektorii dwóch manipulatorów kartezyjskich do realizacji zadań transportowych. Efektory manipulatorów realizują równocześnie ruch z bieżącego położenia początkowego do zaprogramowanego położenia docelowego z zadaną prędkością. Ze względu na występowanie w układach napędowych uchybu regulacji, nierównoczesne rozpoczęcie ruchu oraz różne warunki pracy manipulatorów (nierównomierne obciążenie), w trakcie ruchu występować będą zmiany

odległości między efektorami manipulatorów. Zaproponowany algorytm ma na celu minimalizację zmian odległości między efektorami manipulatorów Δl . Podstawą zaproponowanego algorytmu jest wprowadzenie korekcji wartości zadanych położenia w stosunku do wartości zaprogramowanych. Korekcja ta realizowana jest według tych samych reguł dla trajektorii efektorów obydwu manipulator i jest wyznaczana na bieżąco w trakcie realizacji ruchu. Prędkość ruchu korekcyjnego wyliczana jest na podstawie zmierzonej zmiany odległości między efektorami manipulatorów. Do wyznaczania wartości prędkości ruchu korekcyjnego wykorzystano regułę proporcjonalno-całkującą: prędkość ruchu korekcyjnego jest sumą części proporcjonalnej do Δl i części proporcjonalnej do całki z Δl . Wartość zadana położenia $Y_Z(t)$ dla układu napędowego manipulatora jest sumą wartości zaprogramowanej położenia $Y_P(t)$ i wartości korekcyjnej $Y_K(t)$.

$$Y_Z(t) = Y_P(t) + Y_K(t) \quad (1)$$

$$Y_K(t) = \int (k_k \Delta l(t) + \frac{k_k}{T_k} \int \Delta l(t) dt) dt \quad (2)$$

W pracy [1] przedstawiono, w oparciu o zaproponowany algorytm, model koordynacji trajektorii manipulatorów kartezjańskich oraz przeprowadzono symulację jego działania w uproszczonym przypadku – przy pominięciu dynamiki układów napędowych manipulatorów oraz występującego pomiędzy manipulatorami oddziaływania siłowego.

Korekcja trajektorii obliczana jest na podstawie wartości Δl , która wynika bezpośrednio z rzeczywistego położenia efektorów obydwu manipulatorów, a więc zależy od parametrów dynamicznych napędów manipulatorów. Działanie algorytmu korekcji zostało zweryfikowane dla modelu uwzględniającego parametry dynamiczne układów napędowych manipulatorów oraz oddziaływania siłowe pomiędzy manipulatorami [2].

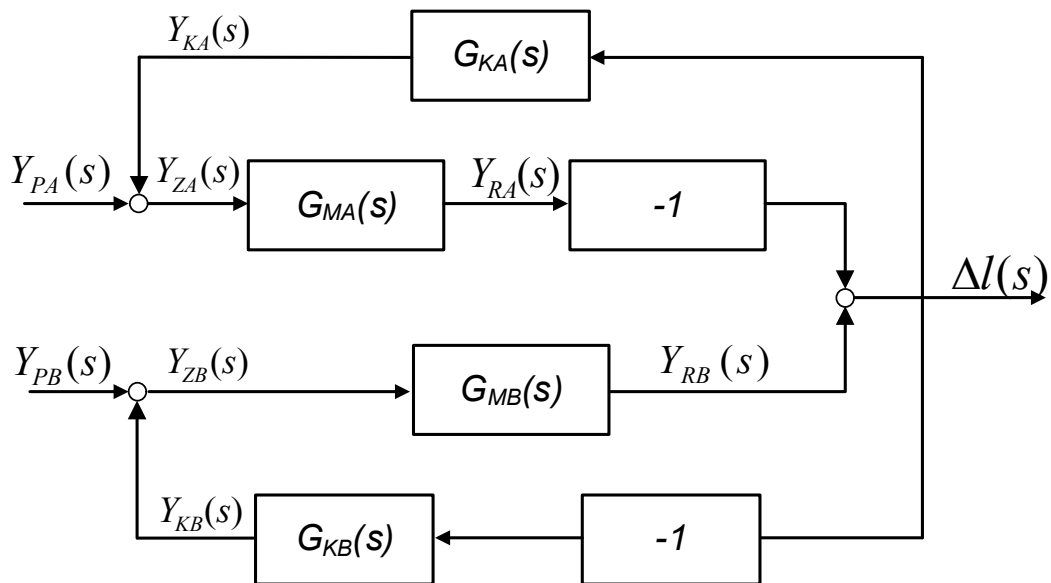
Podstawowym wymaganiem stawianym układom sterowania jest stabilność, w szczególności stabilność asymptotyczna w stanie swobodnym. Celem pracy jest określenie zakresów wartości parametrów korektorów trajektorii zapewniających stabilność asymptotyczną układu dla przyjętych wartości parametrów układów napędowych manipulatorów kartezjańskich.

3. STABILNOŚĆ UKŁADU KOORDYNACJI TRAJEKTORII

3.1 Struktura układu

Układ będzie stabilny, jeżeli każdy podukład składający się z osi napędowych manipulatora A i B , dla tego samego kierunku będzie stabilny. Dlatego weryfikację stabilności układu przeprowadzono dla dwóch manipulatorów jednoosiowych. W analizie stabilności układu pominięto oddziaływania siłowe pomiędzy manipulatorami oraz założono liniowość układu napędowego manipulatora. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy rozpatrywanego układu.

$G_{MA}(s)$, $G_{MB}(s)$ to funkcje przejścia odpowiednio osi manipulatora A oraz manipulatora B . $G_{KA}(s)$, $G_{KB}(s)$ to funkcje przejścia odpowiednio korektora manipulatora A oraz korektora manipulatora B . $Y_{PA}(s)$, $Y_{PB}(s)$ to transformaty Laplace'a sygnałów położenia zaprogramowanego efektorów manipulatorów A i B . $Y_{KA}(s)$, $Y_{KB}(s)$ to transformaty Laplace'a sygnałów korekcji położenia efektorów manipulatorów A i B . $Y_{ZA}(s)$, $Y_{ZB}(s)$ to transformaty Laplace'a sygnałów położenia zadanych układów napędowych manipulatorów A i B . $Y_{RA}(s)$, $Y_{RB}(s)$ to transformaty Laplace'a sygnałów położenia rzeczywistego efektorów manipulatorów A i B .

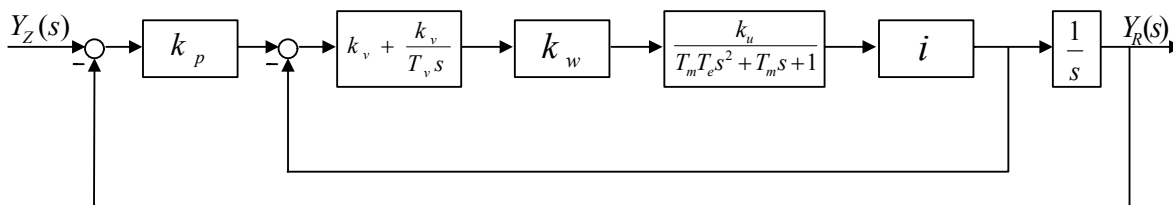


Rys. 1. Schemat blokowy układu koordynacji trajektorii

Macierz transmitancji operatorowych układu z rys. 1 przedstawia zależność:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-G_{MA}(s)}{1 + G_{MA}(s)G_{KA}(s) + G_{MB}(s)G_{KB}(s)} & \frac{G_{MB}(s)}{1 + G_{MA}(s)G_{KA}(s) + G_{MB}(s)G_{KB}(s)} \\ \frac{G_{MA}(s)}{1 + G_{MA}(s)G_{KA}(s) + G_{MB}(s)G_{KB}(s)} & \frac{-G_{KB}(s)}{1 + G_{MA}(s)G_{KA}(s) + G_{MB}(s)G_{KB}(s)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Przyjęto, że osie napędowe analizowanych manipulatorów mają identyczną strukturę i takie same wartości wszystkich parametrów. Do analizy przyjęto strukturę osi napędowej manipulatora przedstawioną na rys. 2



Rys. 2. Schemat blokowy układu napędowego manipulatora

Transmitancja układu napędowego manipulatora wynosi:

$$G_{MA}(s) = G_{MB}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

gdzie:

$$b_1 = k_p k_v T_v k_w k_u i \quad (5)$$

$$b_0 = k_p k_v k_w k_u i \quad (6)$$

$$a_4 = T_v T_m T_e \quad (7)$$

$$a_3 = T_v T_m \quad (8)$$

$$a_2 = T_v + k_v T_v k_w k_u i \quad (9)$$

$$a_1 = k_v k_w k_u i + k_p k_v T_v k_w k_u i \quad (10)$$

$$a_0 = k_p k_v k_w k_u i \quad (11)$$

Transmitancje korektorów wynoszą:

$$G_{KA}(s) = \frac{d_{A1}s + d_{A0}}{c_{A2}s^2 + c_{A1}s + c_{A0}} \quad (12)$$

$$G_{KB}(s) = \frac{d_{B1}s + d_{B0}}{c_{B2}s^2 + c_{B1}s + c_{B0}} \quad (13)$$

gdzie:

$$d_{A1} = k_{kA} T_{kA} \quad (14)$$

$$d_{A0} = k_{kA} \quad (15)$$

$$c_{A2} = T_{kA} \quad (16)$$

$$c_{A1} = c_{A0} = 0 \quad (17)$$

$$d_{B1} = k_{kB} T_{kB} \quad (18)$$

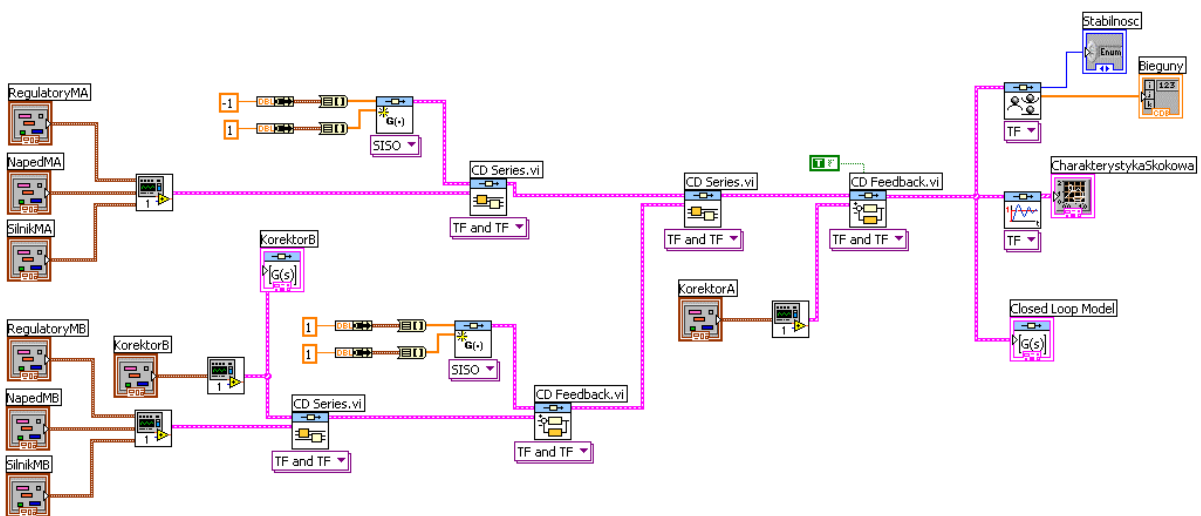
$$d_{B0} = k_{kB} \quad (19)$$

$$c_{B2} = T_{kB} \quad (20)$$

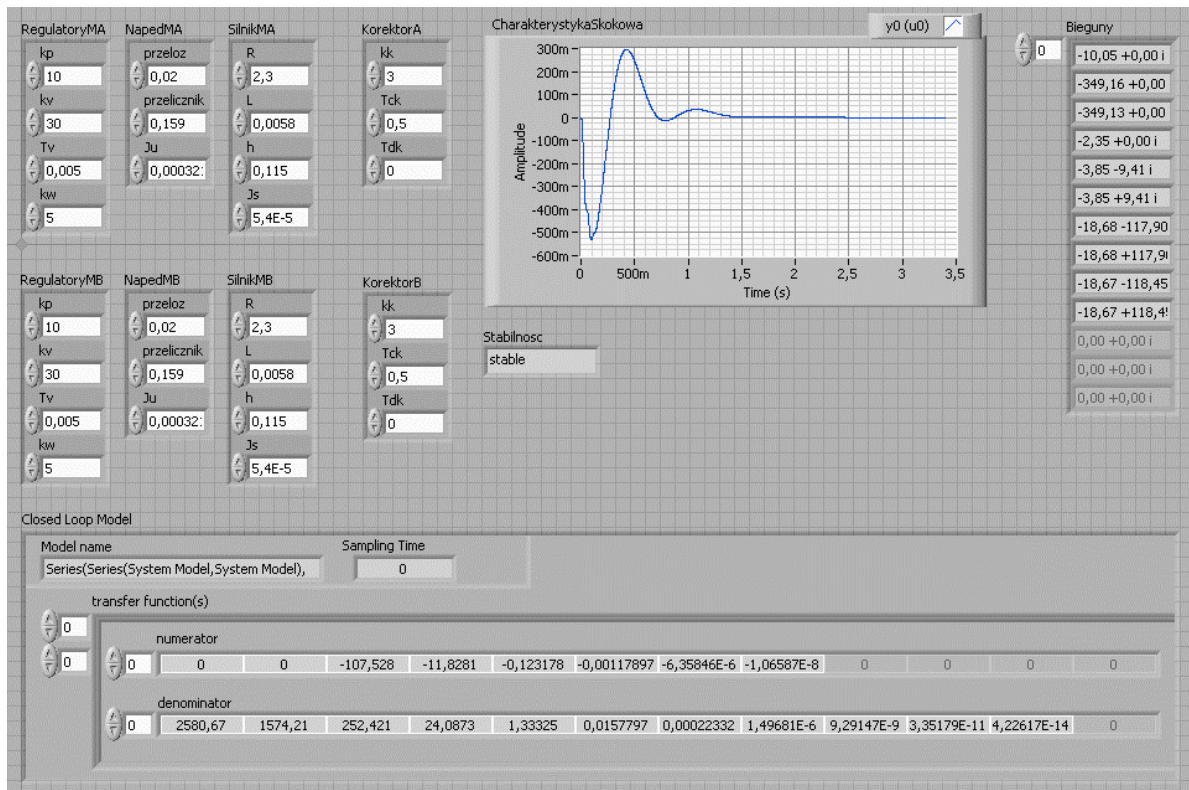
$$c_{B1} = c_{B0} = 0 \quad (21)$$

3.2 Model układu w programie LabView

Model układu przedstawionego na rysunku 1 wprowadzono do programu LabView firmy National Instruments. Przyjęto, że części mechaniczne manipulatorów to moduły liniowe z napędem śrubowo-tocznym firmy HIWIN [3]. Jako jednostki napędowe wykorzystano silniki prądu stałego firmy BALDOR - model MT-2250-A [4]. Widok modelu zbudowanego w module Control Design programu LabView przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Widok modelu w programie LabView – diagram blokowy



Rys. 4. Widok modelu w programie LabView – interfejs użytkownika

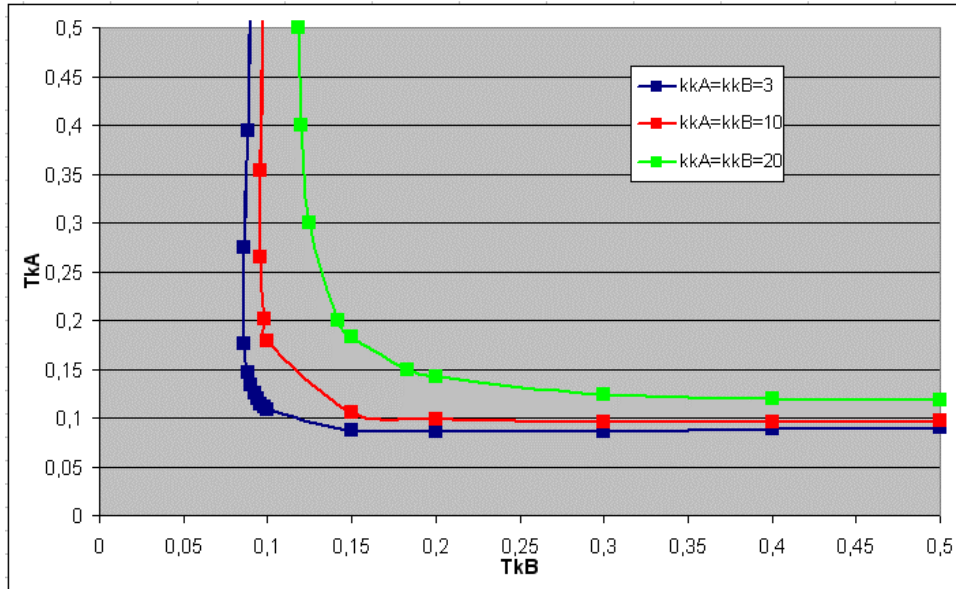
Zestawienie wartości parametrów zbudowanego modelu zamieszczono w poniższej tabeli.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu

L.p.	Nazwa parametru [jednostka]	Wartość
1	Model silnika	MT-2250-A
2	Stała momentowa h [Nm/A]	0,115
3	Stała napięciowa h [V/rad/s]	0,115
4	Moment bezwładności wirnika silnika J_s [kg*m ²]	0,000054
5	Rezystancja uzwojeń wirnika R [Ω]	2,3
6	Indukcyjność uzwojeń wirnika L [H]	0,0058
7	Dopuszczalny ciągły prąd wirnika I [A]	3,42
8	Współczynnik wzmocnienia k_u [rad/s*V]	8,696
9	Stała czasowa mechaniczna T_m [s]	0,0652
10	Stała czasowa elektryczna T_e [s]	0,0025
11	Współczynnik wzmocnienia regulatora położenia k_p [1/s]	10
12	Współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości k_v [1/s]	30
13	Czas zdwojenia regulatora prędkości T_v [s]	0,005
14	Współczynnik wzmocnienia wzmacniacza k_w	5
15	Przełożenie i [m/rad]	0,00318
16	Zredukowany na wał silnika moment bezwładności części mechanicznej J_u [kg*m ²]	0,000331

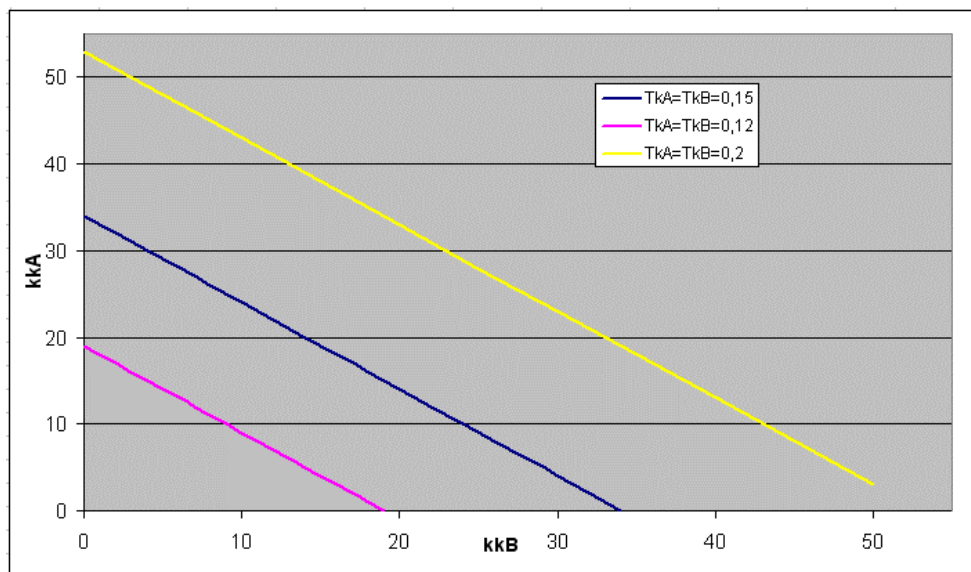
3.3 Weryfikacja stabilności

Na podstawie modelu zbudowanego w programie LabView przeprowadzono weryfikację stabilności układu. Dla manipulatorów opisanych zależnościami (4) do (11) przyjęto wartości parametrów z tabeli 1. Model z rys. 3 umieszczono w pętli i wykonywano cykliczne wyznaczanie biegunów układu dla zadanych wartości parametrów korektorów. Rys. 5 i rys. 6 przedstawiają zakresy wybranych parametrów, dla których układ jest stabilny.



Rys. 5. Zakresy wartości czasów zdwojenia korektorów

Rys. 5 przedstawia graniczne wartości czasu zdwojenia korektora manipulatora $A - T_{kA}$ w zależności od wartości czasu zdwojenia korektora manipulatora $B - T_{kB}$. Sprawdzenie przeprowadzono dla trzech różnych wartości współczynników wzmocnienia korektorów. Dla wartości czasów zdwojenia: T_{kA} , T_{kB} na prawo i powyżej krzywych przedstawionych na rys. 5 układ jest stabilny.



Rys. 6. Zakresy wartości współczynników wzmocnienia korektorów

Na rys. 6 przedstawiono graniczne wartości współczynnika wzmocnienia korektora manipulatora $A - k_{kA}$ w zależności od wartości współczynnika wzmocnienia korektora manipulatora $B - k_{kB}$. Sprawdzenie przeprowadzono dla trzech różnych wartości czasów zdwojenia korektorów. Dla wartości współczynników wzmocnienia: k_{kA}, k_{kB} na lewo i poniżej linii przedstawionych na rys. 6 układ jest stabilny.

4. PODSUMOWANIE

Stabilność jest podstawowym wymaganiem stawianym układom sterowania. W pracy wyznaczono zakresy wartości parametrów korektorów trajektorii przy założeniu liniowości układu oraz pominięciu oddziaływania siłowego pomiędzy manipulatorami. Dla przyjętych wartości parametrów układów napędowych manipulatorów sprawdzano dla kolejnych wartości parametrów korektorów czy układ jest stabilny. Kierunki dalszych prac to uwzględnienie oddziaływania siłowego pomiędzy manipulatorami oraz badanie wpływu parametrów układów napędowych manipulatorów na stabilność układu.

5. LITERATURA

- [1] Słota, A.: Model koordynacji trajektorii efektorów dwóch manipulatorów kartezyjskich dla zadań transportowych, *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 2/2008, s. 688-697.
- [2] Słota, A.: Model koordynacji trajektorii efektorów dwóch manipulatorów kartezyjskich z uwzględnieniem dynamiki układów napędowych, *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 2/2009, s. 569-576.
- [3] http://www.hiwin.pl/DownloadCenter/files/HN_PosSyst_eng.pdf, Katalog HIWIN, Positioning Systems.
- [4] http://www.baldor.com/pdf/literature/BR1202_F.pdf, Katalog BALDOR, DC Servo Motors & Drives for the automation industry.