

EDWARD LISOWSKI, GRZEGORZ FILO*

ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ W INŻYNIERII MECHANICZNEJ NA PRZYKŁADZIE HYDRAULICZNEGO UKŁADU POZYCJONOWANIA ŁADUNKU

APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN MECHANICAL ENGINEERING ON EXAMPLE OF HYDRAULIC POSITIONING SYSTEM

Streszczenie

W artykule podjęto temat pozycjonowania platformy z ciężkim ładunkiem (rzędu kilkuset ton) za pomocą układu siłowników hydraulicznych z komputerowym sterownikiem wykorzystującym algorytmy logiki rozmytej. W ramach realizacji tematu zbudowano model układu hydraulicznego oraz układu w logice rozmytej w systemie Matlab-Simulink z pakietem Fuzzy Logic Toolbox. Model posłużył do przeprowadzenia badań symulacyjnych mających za zadanie ocenę zachowania układu pozycjonowania i jego dokładność przy założeniu nierównomiernego obciążenia poszczególnych siłowników.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, układ hydrauliczny, pozycjonowanie, sterowanie

Abstract

In this paper was undertaken a study of positioning heavy loaded platform (several hundred tons) using a system of hydraulic cylinders with computer controller. In the controller fuzzy logic algorithms were implemented. Simulation model of analyzed hydraulic system was created in Matlab-Simulink program, while model of fuzzy logic unit was built using Fuzzy Logic Toolbox. Computer simulations were carried out using these models. Main aim of the research was to estimate behavior of positioning system and its accuracy, when non-uniform load of individual hydraulic cylinder had been applied.

Keywords: fuzzy logic, hydraulic system, positioning, control

* Prof. dr hab. inż. Edward Lisowski, dr inż. Grzegorz Filo, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

i	– indeks służący do numerowania siłowników i rozdzielaczy, $i=1..6$
m_i, x_i, c_i	– masy siłowników zredukowane do tłoczków, przemieszczenia tłoczków siłowników, zastępcze współczynniki sztywności,
d, d_i	– średnica tłoka oraz tłoczyska siłownika,
α_i, h_i	– współczynniki oporów ruchu i wysokość szczeliny zastępczej w siłownikach,
S_{ci}, S_{ti}	– pola powierzchni czynnych tłoków siłowników oraz tłoków bez tłoczków,
S_{di}, μ_{di}	– pole powierzchni szczeliny rozdzielacza i współczynnik jego wydatku,
V_{ci}, V_{ti}, V_p	– objętości komór roboczych,
Q_p, Q_{ci}, Q_{ti}	– objętościowe natężenia przepływu przez pompę, rozdzielacz i siłownik,
Q_{p-p}, Q_{p-si}	– przeciek pompy oraz przecieki siłowników hydraulicznych,
ω_p	– prędkość obrotowa pompy,
A_p, z_p, x_p, y_p	– parametry zależne od konstrukcji pompy,
p_p, p_{ci}, p_{zl}	– ciśnienia, odpowiednio: na wyjściu pompy, w siłowniku i linii zlewowej,
B_{ci}, B_p	– zastępcze moduły sprężystości objętościowej,
F_{ob}, F_n, F_i	– całkowite obciążenie układu, nominalne i rzeczywiste obciążenie siłownika,
ρ, η	– gęstość i lepkość dynamiczna cieczy roboczej,
w_A, w_E	– gradienty ciśnienia w charakterystycznych punktach uszczelnienia siłownika,
ex_i, u_i	– uchyby przemieszczeń siłowników oraz sygnały sterujące,
x_{zi}, t_s	– założone, docelowe wysunięcia siłowników oraz czas symulacji.

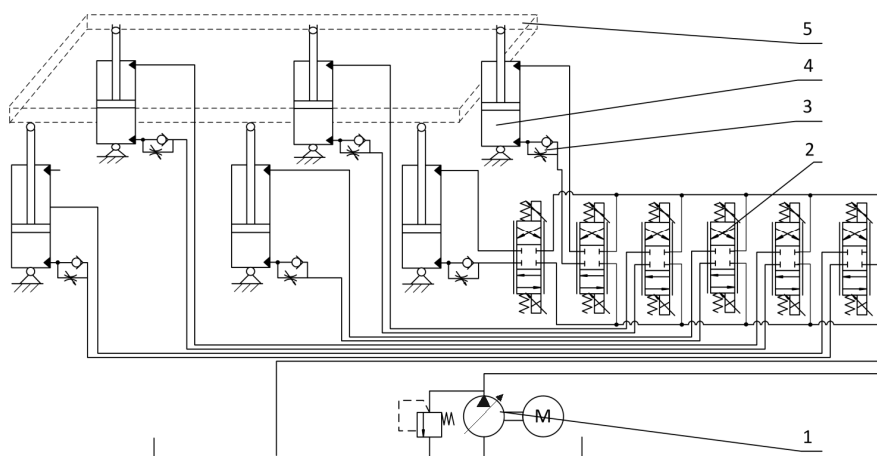
1. Wstęp

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pozycjonowania platformy z ciężkim ładunkiem za pomocą zespołu kilku siłowników hydraulicznych. Zrealizowane zadanie dotyczy fragmentu prac związanych z budową detektora cząstek elementarnych o nazwie Panda w ośrodku badawczym GSI w niemieckim mieście Darmstadt [6]. Detektor jest urządzeniem o masie rzędu 400 ton, które musi mieć możliwość kilkudziesięciomilimetrowego przesuwu w kierunku pionowym z położenia transportowego do położenia roboczego. Implikuje to zastosowanie siłowników hydraulicznych małego gabarytów, pracujących przy wysokim ciśnieniu roboczym, do 70 MPa. Główną trudność pozycjonowania wynikała z konieczności zastosowania kilku siłowników z synchronizacją ruchu przy wymaganych dokładnościach wysuwu poniżej 0.5 mm. W tym celu zaproponowano zastosowanie komputerowego układu wykorzystującego algorytmy logiki rozmytej. Ze względu na dużą liczbę parametrów mających wpływ na działanie układu [4, 7] przeprowadzono badania z różnymi rodzajami funkcji przynależności, operatorów rozmytych oraz algorytmów wyostrzania [1].

2. Model matematyczny analizowanego układu

Schemat analizowanego układu pozycjonowania przedstawiono w sposób uproszczony na rysunku 1. Głównymi składnikami układu hydraulicznego są: zasilacz hydrauliczny 1, zespół rozdzielaczy 2, zawory zwrotno-dławicowe 3 oraz siłowniki 4. W zespole zasilania

zastosowano jedną pompę wysokociśnieniową o ciśnieniu nominalnym 70 MPa i wydatku 60 dm³/min oraz sterowany elektromagnetycznie zawór przelewowy. Rozdzielacze proporcjonalne, których zadaniem jest kierowanie cieczy roboczej do siłowników [5], są sterowane elektromagnetycznie za pomocą sygnału napięciowego generowanego przez układ w logice rozmytej. Jako elementy wykonawcze zastosowano siłowniki hydrauliczne o średnicy tłoka $d = 150$ mm i nominalnej sile 1000 kN. Siłowniki zostały wyposażone w przetworniki przemieszczenia, generujące sygnały wejściowe dla układu w logice rozmytej oraz przeguby kulowe eliminujące siły boczne.



Rys. 1. Uproszczony schemat analizowanego układu: 1 – zasilacz hydrauliczny, 2 – rozdzielacze proporcjonalne, 3 – zawory zwrotno-dławiczące, 4 – siłowniki, 5 – pozycjonowana platforma

Fig. 1. Simplified diagram of analyzed system: 1 – supply unit, 2 – control valves, 3 – throttle check-valves, 4 – hydraulic cylinders, 5 – positioned platform

Do budowy modelu matematycznego układu przyjęto szereg założeń upraszczających [5]. W szczególności założono, że: układ znajduje się w stanie równowagi cieplnej, wartość zastępczego modułu sprężystości objętościowej w poszczególnych odcinkach linii hydraulicznej jest stała, przyjęto model cieczy o parametrach skupionych, platforma jest obciążona wyłącznie siłami pionowymi, pominięto opory ruchu cieczy w kanałach zaworów i przewodach, pominięto bezwładności elementów zaworów i układów elektronicznych, pominięto odkształcenia korpusów elementów hydraulicznych i zjawiska falowe. Model matematyczny obejmuje układ równań różniczkowych i algebraicznych (1)–(7). Równanie bilansu przepływu dla linii zasilania ma postać:

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{B_p}{V_p} (Q_p - \sum_1^4 Q_{ci}), \quad (1)$$

przy czym wydajność pompy wyznaczono przy uwzględnieniu pulsacji:

$$Q_p(t) = A_p \cdot \omega_p \cdot \sum_{k=0}^{z_p/2-1} \sin\left(\omega_p \cdot t + k \cdot \frac{2\pi}{z_p}\right) \quad (2)$$

oraz uwzględniono przecieki wewnętrzne pompy według zależności:

$$Q_{p-p} = x_p \cdot p_p + y_p \cdot \sqrt{p_p}. \quad (3)$$

Bilans przepływu linii pomiędzy i -tym rozdzielaczem i siłownikiem można zapisać:

$$\frac{dp_{ci}}{dt} = (Q_{ci} - S_{ci} \cdot \frac{dx_i}{dt}) \cdot \frac{B_{ci}}{V_{ci}}, \quad (4)$$

natomiast równanie przepływu przez szczelinę rozdzielacza:

$$Q_{ci} = \text{sign}(p_p - p_{ci}) \cdot \mu_{di} \cdot S_{di} \cdot \sqrt{\frac{2(p_p - p_{ci})}{\rho}}. \quad (5)$$

Równanie ruchu siłownika ma postać:

$$m_i \cdot \frac{d^2 x_i}{dt^2} + \alpha_i \cdot \frac{dx_i}{dt} + c_i \cdot x_i = F_i - S_{ci} \cdot (p_{ci} - p_{zi}). \quad (6)$$

W modelu uwzględniono przecieki siłowników:

$$Q_{p-si} = \pi \cdot d \cdot \frac{dx_i}{dt} \cdot \sqrt{\frac{2\eta}{9}} \cdot \left(\sqrt{\frac{dx/dt}{w_A}} - \sqrt{\frac{dx/dt}{w_E}} \right). \quad (7)$$

Model matematyczny układu w logice rozmytej typu FLC (ang. *Fuzzy Logic Controller*) wykonano przy założeniu trój etapowego wyznaczania sygnału wyjściowego, odpowiednio w blokach rozmywania, wnioskowania i wyostrzania [1, 2, 4].

W bloku rozmywania sygnały wejściowe są przekształcane w zbiory rozmyte przy wykorzystaniu funkcji przynależności. Zbiory rozmyte są definiowane jako pary liczb: każdej wartości x ze zbioru X jest przypisany stopień przynależności do zbioru Z_i :

$$Z_i = \{(x, \mu_Z(x)), \forall x \in X, \mu_Z(x) \in [0, 1]\} \quad (8)$$

Modelowany układ FLC posiada 12 sygnałów wejściowych oraz 6 sygnałów wyjściowych (układ typu MIMO [3]). Sygnały wejściowe, określone za pomocą zmiennych lingwistycznych stanowią: 6 wartości uchybów przemieszczeń siłowników ex_i oraz 6 pochodnych dex_i/dt . W przestrzeni numerycznej każdej zmiennej wejściowej zdefiniowano trzy zbiory rozmyte: N – ujemny (*Negative*), Z – zero i P – dodatni (*Positive*). W trakcie symulacji badano działanie układu z funkcjami przynależności określonymi za pomocą odcinków prostych (funkcje trójkątne i trapezowe) oraz funkcji Gaussa o stopniu przynależności określonym na zbiorze $\langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$:

$$\mu_Z(x) = \exp\left(\frac{4 \cdot (\lambda_2 - x) \cdot (x - \lambda_1) - (\lambda_2 - \lambda_1)^2}{4 \cdot (\lambda_2 - x) \cdot (x - \lambda_1)}\right) \quad (9)$$

Wyjściami układu są sygnały sterujące dla 6 rozdzielaczy proporcjonalnych. Przestrzeń numeryczna każdego sygnału wyjściowego została podzielona na 5 zbiorów rozmytych: NB – duży ujemny (*Negative Big*), NS – mały ujemny (*Negative Small*), Z – zero,

PS – mały dodatni (*Positive Small*) oraz PB – duży dodatni (*Positive Big*). Zastosowano funkcje przynależności analogiczne do użytych w rozmywaniu sygnałów wejściowych.

Wnioskowanie przeprowadzono według modelu Mamdani [1] na podstawie bazy reguł, w której zawarto 9 reguł dla każdego sygnału wejściowego, stąd cała baza zawiera 54 pozycje. W regułach wnioskowania występują rozmyte wersje operatorów sumy i iloczynu zbioru (*s* – normy i *t* – normy). Podczas badań sprawdzono dwa modele operatorów: MIN-MAX (10) oraz PROD-PROBOR (11):

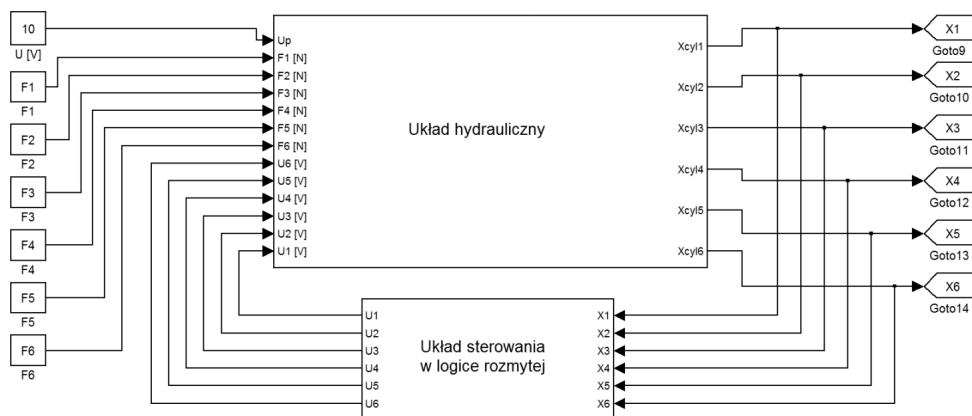
$$\begin{aligned} MIN : \mu_{A \cap B}(x) &= MIN(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ MAX : \mu_{A \cup B}(x) &= MAX(\mu_A(x), \mu_B(x)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} PROD : \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \\ PROBOR : \mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \end{aligned} \quad (11)$$

W procesie wyostrzania (wyznaczania numerycznych wartości sygnałów wyjściowych po wnioskowaniu) sprawdzono działanie trzech algorytmów [1, 7]: środka ciężkości (ang. *CoG* – *Center of Gravity, Centroid*), środka maksimum (ang. *MoM* – *Mean of Maximum*) oraz symetralnej (ang. *BM* – *Bisector Method*).

3. Budowa modelu symulacyjnego w programie Matlab-Simulink

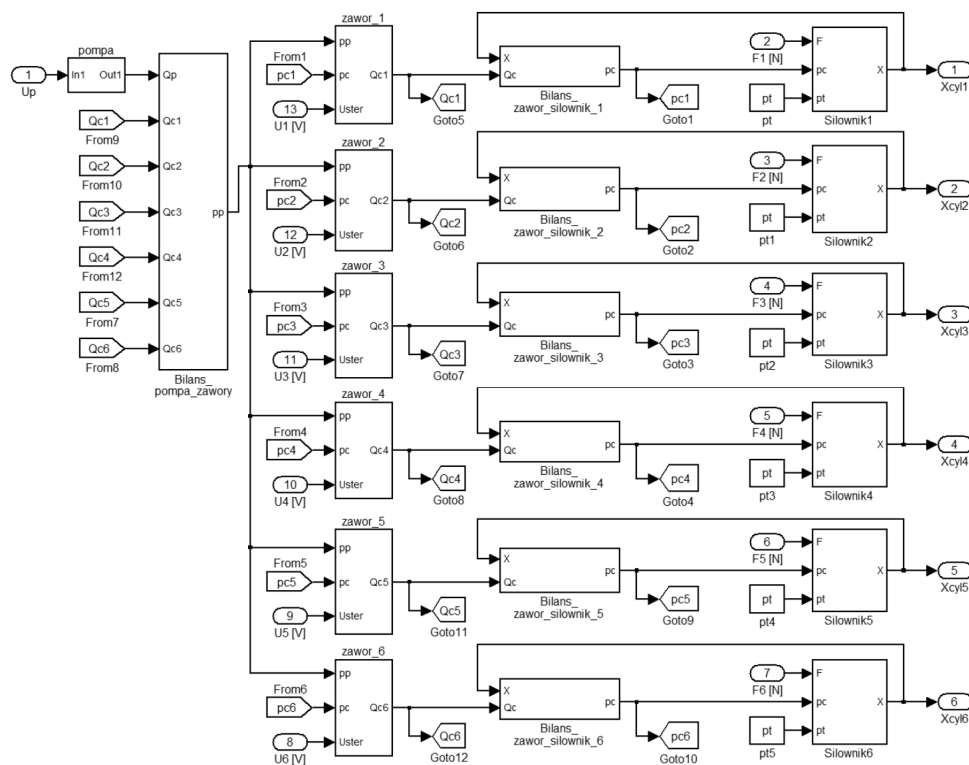
Model symulacyjny układu hydraulicznego zbudowano w programie Matlab-Simulink, natomiast model układu FLC wykonano w module Fuzzy Logic Toolbox z wykorzystaniem narzędzia Anfis Editor. Schemat blokowy modelu symulacyjnego pokazano na rysunku 2.



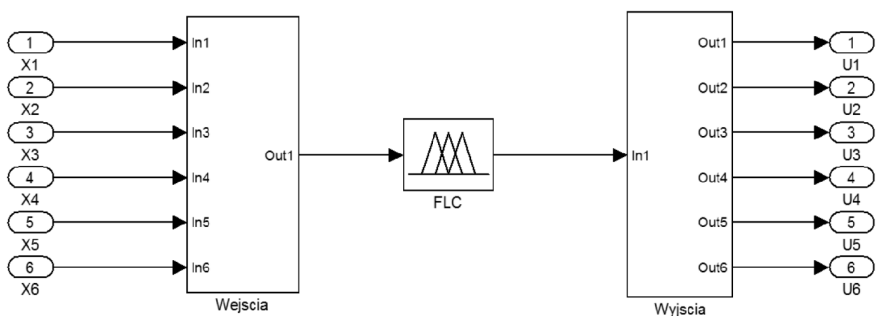
Rys. 2. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu w programie Matlab-Simulink
Fig. 2. Simulation model block diagram in Matlab-Simulink program

Model symulacyjny został zbudowany z dwóch głównych podsystemów: hydraulicznego i sterowania w logice rozmytej. Podsystem hydrauliczny ma 13 wejść: obciążenia

siłowników $F_1 .. F_6$, sygnały sterujące z układu w logice rozmytej $u_1 .. u_6$ oraz sygnał sterujący wydatkiem pompy u_p . Wyjścia tego podsystemu, będące równocześnie wejściami do układu w logice rozmytej, stanowią przemieszczenia siłowników $x_1 .. x_6$. Schemat blokowy podsystemu hydraulicznego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy podsystemu hydraulicznego
Fig. 3. Block diagram of hydraulic subsystem



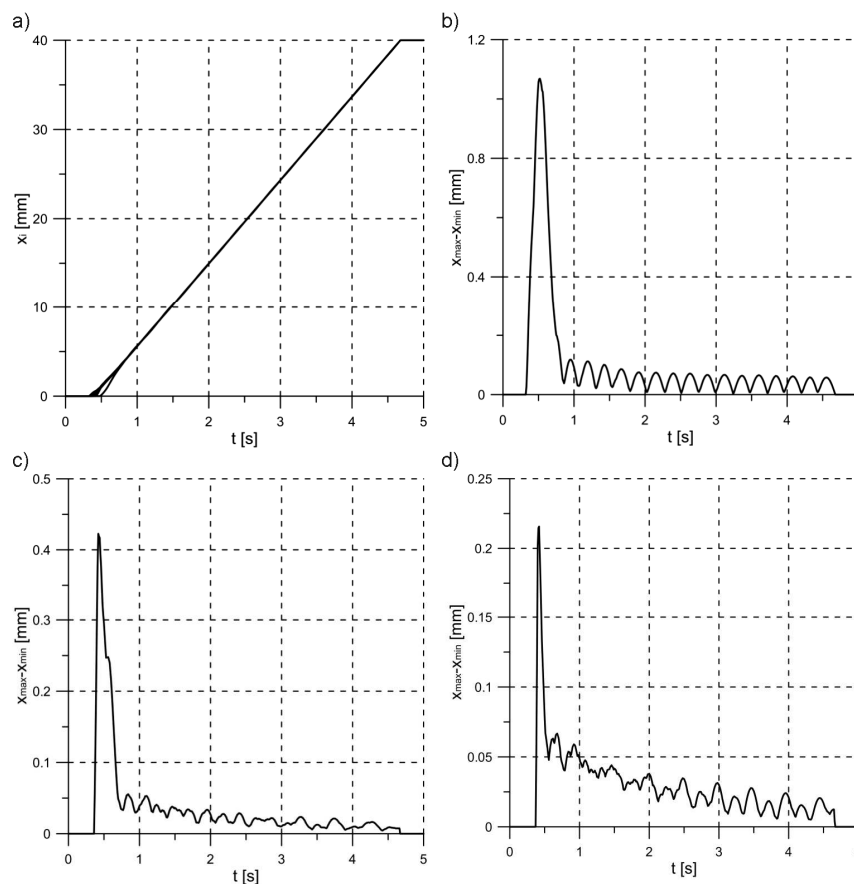
Rys. 4. Podsystem sterownika w logice rozmytej
Fig. 4. The fuzzy logic controller subsystem

Składnikami tego podsystemu są bloki modelujące elementy hydrauliczne, jak pompa, rozdzielacze, siłowniki oraz bilanse przepływu wyodrębnionych objętości. Bloki połączone sygnałami ciśnień, objętościowych natężeń przepływu i przemieszczeń.

W podsystemie układu sterowania w logice rozmytej (rys. 4) znajduje się blok sterownika FLC oraz dwa podukłady pomocnicze: *Wejścia* i *Wyjścia*. W pierwszym podukładzie następuje obliczanie uchybów ex_i i ich pochodnych dex_i/dt oraz multipleksowanie sygnałów do postaci wymaganej przez blok FLC. W drugim podukładzie następuje odwrotne przekształcenie wektora sygnałów wyjściowych z bloku FLC.

4. Plan oraz wyniki badań symulacyjnych

Przyjęty plan badań zakładał przeprowadzenie symulacji dla następujących parametrów układu w logice rozmytej: funkcje przynależności w zbiorach rozmytych:



Rys. 5. Wyniki symulacji dla parametrów f_2 , o_1 , w_1 : a) przemieszczenia siłowników (obciążenie l_1), b), c), d) maksymalna różnica wysuwu siłowników w przypadkach obciążenia l_1 , l_2 , l_3

Fig. 5. Simulation results in case f_2 , o_1 , w_1 : a) movement of hydraulic cylinders (load case l_1), b), c), d) maximum difference of hydraulic cylinders positions in case of l_1 , l_2 , l_3 load

złożone z odcinków prostych (f_1) oraz Gaussa (f_2), rozmyte operatory MIN-MAX (o_1) oraz PROD-PROBOR (o_2), algorytmy wyostrzania: środka ciężkości (w_1), środka maksimum (w_2) oraz symetralnej (w_3). Każda symulacja została przeprowadzona dla różnych wartości obciążeń siłowników, wyznaczonych na podstawie analizy możliwości ułożenia ładunku na platformie. Przyjęto następujące procentowe różnice najbardziej i najmniej obciążonego siłownika: 25% (l_1), 10% (l_2) oraz 5% (l_3). Stąd, pełny plan badań wymagał przeprowadzenia $N = 2 \times 2 \times 3 \times 3 = 36$ symulacji.

Zadano całkowite obciążenie układu $F_{ob}=4,5$ MN, początkowe wartości przemieszczeń siłowników $x_1(0) \dots x_6(0) = 0,0$ mm, początkowe wartości sygnałów sterujących $u_1(0) \dots u_6(0) = 5,0$ V, zadane położenia siłowników $x_{z1} \dots x_{z6} = 40,0$ mm. Zastosowano zmiennokrokową metodę całkowania równań różniczkowych 4 rzędu Dormand-Prince (ode45) oraz ustalono czas symulacji na $t_s = 5,0$ s. Do oceny jakości sterowania w każdym przypadku służył przebieg czasowy maksymalnej różnicy wysunięcia siłowników oraz wartość współczynnika całkowitego IAE (ang. *Integral Area Error*).

Najlepsze wyniki uzyskano dla zestawów parametrów f_2, o_1, w_1 ($IAE(l_1) = 0,469$), f_2, o_2, w_3 ($IAE(l_1) = 0,570$) oraz f_1, o_1, w_1 ($IAE(l_1) = 0,580$). Na rys. 5 pokazano przebiegi czasowe przemieszczeń siłowników oraz maksymalnych różnic wysuwu dla parametrów f_2, o_1, w_1 .

5. Wnioski

W artykule podjęto zagadnienie pozycjonowania ciężkich ładunków za pomocą układu hydraulicznego sterowanego z wykorzystaniem logiki rozmytej. Wyniki badań symulacyjnych wskazują, że zaproponowany układ pozwala na uzyskanie założonych parametrów. Uzyskana maksymalna różnica wysuwu siłowników, z wyjątkiem okresu rozruchu, zawierała się w granicach od 0,2 mm przy maksymalnej różnicy obciążeń siłowników 25% do 0,05 mm przy różnicy obciążeń 5%.

Literatura

- [1] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1996.
- [2] Filo G., *Modelling of fuzzy logic control system using the Matlab Simulink program*, Czasopismo Techniczne PK, 2-M, Wydawnictwo PK, Kraków 2010.
- [3] Jędrzykiewicz Z., *Teoria sterowania układów jednowymiarowych*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002.
- [4] Kwaśniewski J., *Programowalne sterowniki przemysłowe w systemach sterowania*, Wydawnictwo ROMA-POL, Kraków 1999.
- [5] Lisowski E., *Kształtowanie charakterystyk hydraulicznych zaworów hamujących układów napędowych maszyn roboczych*, Wyd. PK, Monografia 224, Kraków 1998.
- [6] Lisowski E., Filo G., *Pozycjonowanie ładunku podnośnikami hydraulicznymi z regulatorami w logice rozmytej*, Hydraulika i Pneumatyka, 1/2010.
- [7] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 1999.