

## PROBLEM ŚLEDZENIA SYGNAŁU ZADANEGO W NAPĘDACH ELEKTROHYDRAULICZNYCH

### Streszczenie

Przedstawiono wyniki identyfikacji parametrycznej i sterowania nadążnym układem elektrohydraulicznym z zaworem proporcjonalnym. Do identyfikacji parametrycznej liniowego modelu matematycznego układu typu wejście-wyjście zastosowano numeryczną metodę optymalizacji statycznej Box'a. Dokładność śledzenia za zadaniem sygnałem analizowano w układzie z regulatorami: klasycznymi, stanu, deadbeat oraz rozmytym. Wyniki analizy teoretycznej weryfikowano na stanowisku laboratoryjnym.

### WSTĘP

Układy elektrohydrauliczne mają szerokie zastosowanie przemysłowe, głównie jako układy regulacji położenia, prędkości oraz układy śledzące, w tym synchronizacji ruchu elementów maszyn. Parametry ich modeli matematycznych są zwykle niestacjonarne wskutek zmiany ciśnienia zasilania, mas i sił obciążenia, temperatury oleju, prędkości ruchu tłoka itd. [5, 6]. Do osiągnięcia wysokiej jakości sterowania niezbędna jest aktualna i dokładna informacja o ich bieżących wartościach. Układy elektrohydrauliczne wykazują także nieliniowości, wynikające z nieliniowego charakteru przepływu oleju przez suwak sterujący zaworu proporcjonalnego, strefy nieczułości wzmacniacza elektronicznego oraz z występowania luzów w połączeniach mechanicznych.

Podstawowym zadaniem układu śledzącego jest nadążanie jego wielkości wyjściowej za sygnałem zadaniem z minimalnym uchylem dynamicznym i statycznym. W większości układów śledzących zadowalające własności statyczne i dynamiczne otrzymuje się poprzez zastosowanie klasycznych algorytmów regulacji typu PI lub PID. Regulatory te są proste w realizacji cyfrowej układu sterowania i stosunkowo mało wrażliwe na zmiany wartości parametrów oraz nieliniowość obiektu. Odporność ww. układów na zmiany wartości ich parametrów jest zróżnicowana i może być zwiększana poprzez odpowiedni dobór metody sterowania lub zastosowanie sterowania adaptacyjnego [6, 8]. Oprócz klasycznych są także stosowane inne regulatory, np.: stanu, wykorzystujące logikę zbiorów rozmytych, oparte na teorii sztucznych sieci neuronowych lub typu deadbeat [1, 2, 3, 4, 5, 9].

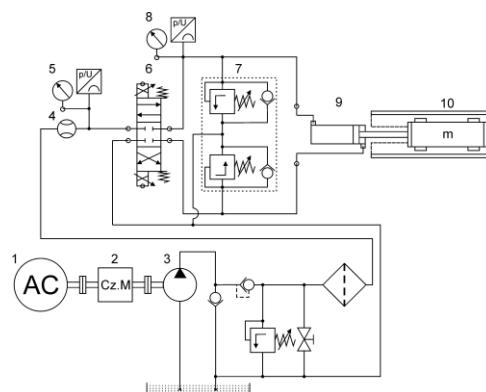
W pracy przedstawiono aspekty teoretyczne oraz wyniki regulacji dla wybranych metod sterowania elektrohydraulicznym układem śledzącym z zaworem proporcjonalnym. Analizowano własności dynamiczne oraz dokładność śledzenia dla zadanej wartości wejściowej układu z regulatorami: PID, stanu, rozmytym oraz typu deadbeat. Parametry modelu matematycznego wyznaczono poprzez zastosowanie metody optymalizacji Box'a dla przyjętego kryterium identyfikacji. Oprócz analizy teoretycznej zamieszczono także wyniki badań laboratoryjnych.

### 1. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU

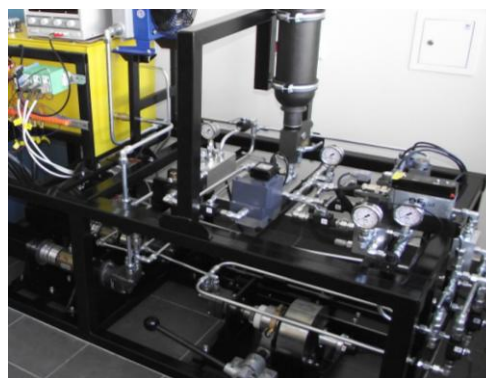
Schemat struktury i widok stanowiska badawczego ilustruje rys. 1. Silnik indukcyjny (AC) 1 (o małym momencie bezwładności i dużej przeciążalności momentem, 2,6 kW, 2300 obr/min) jest zasilany z falownika i napędza pompę zębatą 3 o objętości geometrycznej 6 cm<sup>3</sup>/obrót poprzez sprzęgła i układ pomiaru momentu

obrotowego 2. Sterowanie przepływem lub ciśnieniem może odbywać się poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika 1 lub poprzez odpowiednie sterowanie proporcjonalnym zaworem regulacyjnym 6. Członem wykonawczym układu jest siłownik hydrauliczny 9, obciążony masą wózka 10. Siłownik zabezpieczono układem antykawitacyjno-przeciążeniowym 7. Pomiar wielkości hydraulicznych układu jest dokonywany za pomocą przetworników ciśnienia 5 i 8 oraz przepływomierza 4.

a)



b)



Rys. 1. Schemat (a) i widok stanowiska badawczego (b)

Do wyznaczania prędkości ruchu siłownika zastosowano enkoder impulsowy (rozdzielczość 3  $\mu$ m) oraz układ z przetwornikiem częstotliwość-napięcie, natomiast do pomiaru położenia – kartę pomiarową z licznikiem impulsów. Sterowanie i rejestrację wielkości mierzonych realizowano z zastosowaniem karty pomiarowej z przetwornikami A/C i C/A oraz komputera.

Rzeczywiste zjawiska zachodzące w analizowanym układzie elektrohydraulicznym są nieliniowe i niestacjonarne. Model nielini-

wy, ze względu na swą złożoność, wymaga w procesie identyfikacji pomiarów wielu wielkości, a w syntezie układu regulacji – zastosowania numerycznych metod wyznaczania parametrów regulatorów. Z wymienionych wyżej powodów w projektowaniu tego typu układów często stosuje się modele liniowe o zmiennych wartościach parametrów.

Dokonując linearyzacji nieliniowych równań napędu, przy odpowiednich założeniach upraszczających, otrzymuje się transmitancję operatorową obiektu regulacji o ogólnej postaci

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)} \quad (1)$$

gdzie:  $Y(s)$  – transformata Laplace'a przemieszczenia tłoczyska  $y$ ,  $U(s)$  – transformata Laplace'a napięcia  $u$  sterującego zaworem proporcjonalnym,  $K$  – współczynnik wzmocnienia,  $T$  – stała czasowa,  $\xi$  – współczynnik tłumienia.

W procesie identyfikacji parametrycznej analizowanego układu siłownik-masa przyjęto, że prędkość  $v$  przemieszczenia masy obciążenia stanowi jego wielkość wyjściową, tak więc liniowy model matematyczny opisujący analizowany układ ma postać

$$G(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (2)$$

Na podstawie analizy eksperymentalnej stanu nieustalonego przemieszczenia  $y$  tłoczyska siłownika stwierdzono, że zależność między sygnałem sterującym  $u$  zaworu proporcjonalnego a przemieszczeniem  $y$  tłoczyska siłownika, z wystarczającą dokładnością z punktu widzenia jakości sterowania, można aproksymować modelem matematycznym o postaci (1) lub (2). Model ten aproksymuje właściwości statyczne i dynamiczne układu w otoczeniu danego, stałego punktu pracy. Aby uzyskać pełny opis zjawisk nieliniowych w całym zakresie zmian prędkości i obciążenia zewnętrznego tłoczyska siłownika (zmiennego punktu pracy), parametry tego modelu należy uzależnić od wartości tych wielkości fizycznych [6].

Problem identyfikacji modelu matematycznego (2) układu elektrohydraulicznego polega na wyznaczeniu nieznanymi jego parametrów. W tym celu zastosowano numeryczną metodę optymalizacji statycznej Box'a do minimalizacji następującego wskaźnika jakości

$$Q_{id} = \sum_{i=1}^N [v(i) - \hat{v}(i)]^2 \quad (3)$$

gdzie:  $v$  – rejestrowana prędkość masy,  $\hat{v}$  – prędkość otrzymana z rozwiązania modelu matematycznego,  $N$  – liczba pomiarów. Metoda Box'a umożliwia uwzględnienie ograniczeń wartości identyfikowanych parametrów, co często zapobiega niestabilności rozwiązań modelu matematycznego napędu hydraulicznego w procesie minimalizacji funkcji (3).

## 2. STEROWANIE UKŁADEM ŚLEDZĄCYM

### 2.1. Klasyczne algorytmy regulacji

Problem projektowania liniowego układu regulacji z klasycznymi regulatorami o wielkości wyjściowej  $y$ , nadążającej za sygnałem wejściowym  $y_z$  jest ogólnie znany. Dla obiektu (1) ustalony uchyb śledzenia zależęć będzie od astatyizmu układu regulacji i typu sygnału wejściowego. I tak, dla regulacji stałowartościowej (stałego wejścia  $y_z$  układu) zerowy uchyb regulacji uzyska się przy astatyźmie układu regulacji pierwszego rzędu, co teoretycznie zapewnia już obiekt sterowania. W przypadku liniowo narastającego sygnału

$y_z$  należy podwyższyć rząd astatyizmu o jeden, a więc zastosować regulator PI lub PID. Dalsze zwiększanie stopnia wielomianu sygnału  $y_z$  powinno skutkować odpowiednim wzrostem liczby członów całkujących (rzędu astatyizmu) w torze głównym układu regulacji.

W dalszej analizie zastosowano regulator PID. Wykorzystując eksperymentalnie wyznaczone parametry modelu matematycznego obiektu, nastawy regulatora wyznaczono na podstawie iteracyjnej minimalizacji wskaźnika jakości

$$Q_{st} = \sum_{i=1}^N (y_z(i) - y(i))^2 \quad (4)$$

przy czym  $y$  jest położeniem wózka.

Dla skokowego sygnału wejściowego układu regulacji minimalizacja wskaźnika jakości (4) prowadzi do minimalizacji uchybu regulacji, przy czym charakter jego stanu nieustalonego ściśle jest uzależniony od oscylacyjności obiektu sterowania. W przypadku regulacji stałowartościowej dobrą dokładność pozycjonowania uzyskuje się poprzez zastosowanie regulatora PI lub PID, natomiast w przypadku nadążania układu regulacji za sygnałem liniowo narastającym – poprzez szeregowo połączenie regulatorów PI lub PID. Zwiększenie o jeden liczby członów całkujących w stosunku do znanych zasad teoretycznych jest wynikiem nieliniowości układu oraz potrzebą szybkiej likwidacji uchybu regulacji.

### 2.2. Regulator stanu

Regulator stanu z teoretycznego punktu widzenia zapewnia przesuwanie biegunów układu zamkniętego w dowolne położenie, jednak brak całkowania uniemożliwia podwyższanie rzędu astatyizmu układu, a więc w niektórych przypadkach osiąganie dużej dokładności śledzenia. W praktyce ograniczenie amplitudy napięcia sterującego zaworem również ogranicza możliwość swobodnego kształtowania charakterystyk dynamicznych. Zasadniczą wadą regulatora stanu jest konieczność pomiaru pełnego wektora stanu. Gdy pomiar wszystkich zmiennych nie jest możliwy, wówczas niemierzalne zmienne stanu odtwarza się za pomocą obserwatora stanu. Regulator stanu dla modelu matematycznego obiektu regulacji (1) wymaga pomiaru położenia, prędkości i przyspieszenia wózka (prędkość i przyspieszenie można otrzymać także poprzez różniczkowanie).

Równanie charakterystyczne układu z regulatorem stanu  $K_r$ , wyrażone jest zależnością

$$\det(sI - A + BK_r) = 0 \quad (5)$$

$$\text{gdzie: } \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T^2} & -\frac{2\xi}{T} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K}{T^2} \end{bmatrix},$$

$I$  – macierz jednostkowa,  $\mathbf{K}_r = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$ .

Porównując współczynniki równania charakterystycznego (5) z odpowiednimi współczynnikami wielomianu zadanego, otrzymano równania określające współrzędne wektora  $\mathbf{K}_r$ ,

$$k_1 = \frac{T^2 p^3}{K}, \quad k_2 = \frac{3T^2 p^2 - 1}{K}, \quad k_3 = \frac{3T^2 p - 2\xi T}{K} \quad (6)$$

gdzie  $p$  jest zadaną wartością wielokrotnej wartości własnej układu z regulatorem.

Pewnym utrudnieniem w zastosowaniu regulatorów stanu jest zależność współczynnika wzmocnienia układu zamkniętego od

zadanego położenia wartości własnych (od wartości współczynnika wzmocnienia położenia  $k_1$ ). Wzmocnienie statyczne położenia układu zamkniętego jest często różne od jedności. Chcąc uzyskać wzmocnienie układu z regulatorem równe 1 należy odpowiednio dobrać zadane położenie wartości własnych  $p$ .

**2.3. Regulator deadbeat**

Od wielu lat w literaturze z zakresu projektowania układów sterowania powraca się do problemu sterowania typu deadbeat, co jest tłumaczone na język polski jako układy śledzące prawie idealnie sygnały zadane. Zagadnienie to rozpatrywane jest w różnych wariantach, zarówno dla układów ciągłych, jak i dyskretnych [2, 7]. Algorytmy sterowania typu deadbeat stosuje się do sterowania obiektem dynamicznym, gdy jego punkt pracy znajduje się daleko od pożądanego stanu końcowego. Charakterystyczną cechą układów sterowania z tymi regulatorami jest zdolność śledzenia sygnałów zadanych z zerowym uchybem po skończonym czasie (układy o skończonej odpowiedzi impulsowej), w przeciwieństwie do klasycznych układów śledzących, w których uchyb regulacji osiąga wartość zerową teoretycznie po nieskończonej długim czasie.

Stosując np. metodę operatorów całkowych Tustina, dla której

$$s^{-n} = \left[ \frac{T_p}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right]^n \tag{7}$$

model matematyczny (1) zapisano w postaci transmitancji dyskretnej o ogólnej postaci

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} \tag{8}$$

Niech  $y_z(k)$  będzie zadany sygnałem wejściowym układu regulacji prędkości w postaci skoku jednostkowego, tzn.  $y_z(k)=1(k)$  dla  $k=0, 1, 2, \dots$ . Czas regulacji będzie minimalny i uchyb regulacji zerowy, gdy spełnione zostaną warunki:

$$y(k) = y_z(k) \quad , \quad u(k) = u(n) \quad \text{dla} \quad k \geq n \tag{9}$$

przy czym  $n$  jest wymiarem modelu obiektu.

Uwzględniając warunki (9), transformaty sygnału wejściowego i wyjściowego obiektu można zapisać w postaci:

$$U(z) = u(0) + u(1)z^{-1} + u(2)z^{-2} + \dots + u(n) \left[ z^{-n} + z^{-(n+1)} + \dots \right] \tag{10}$$

$$Y(z) = y(0) + y(1)z^{-1} + y(2)z^{-2} + \dots + 1 \left[ z^{-n} + z^{-(n+1)} + \dots \right] \tag{11}$$

Przyjmując transformatę sygnału wejściowego  $y_z(k)$  układu regulacji

$$Y_z(z) = \frac{z}{z-1} \tag{12}$$

można zapisać

$$\frac{Y(z)}{Y_z(z)} = p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_n z^{-n} = P(z) \tag{13}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} p_0 &= y(0), & p_1 &= y(1) - y(0), \\ p_2 &= y(2) - y(1), & \dots & p_n = 1 - y(n-1) \end{aligned} \tag{14}$$

a także

$$\frac{U(z)}{Y_z(z)} = q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} + \dots + q_n z^{-n} = Q(z) \tag{15}$$

przy czym:

$$q_0 = u(0), \quad q_1 = u(1) - u(0), \quad \dots \quad q_n = u(n) - u(n-1) \tag{16}$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1 \quad \text{i} \quad q_0 + q_1 + \dots + q_n = u(n) \tag{17}$$

Na podstawie transmitancji układu zamkniętego

$$G_z(z) = \frac{Y(z)}{Y_z(z)} = \frac{G_r(z)G(z)}{1 + G_r(z)G(z)} \tag{18}$$

oraz równań (13) i (15) wyznaczono transmitancję regulatora

$$G_r(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{Q(z)}{1 - P(z)} \tag{19}$$

a stąd

$$G_r(z) = \frac{\frac{q_0}{1-p_0} + \frac{q_1}{1-p_0} z^{-1} + \frac{q_2}{1-p_0} z^{-2} + \frac{q_3}{1-p_0} z^{-3}}{1 - \frac{p_1}{1-p_0} z^{-1} - \frac{p_2}{1-p_0} z^{-2} - \frac{p_3}{1-p_0} z^{-3}} \tag{20}$$

przy czym:

$$\begin{aligned} q_0 &= \frac{1}{b_0 + b_1 + b_2 + \dots + b_n}, & q_1 &= a_1 q_0, & q_2 &= a_2 q_0, & q_3 &= a_3 q_0, \\ p_0 &= b_0 q_0, & p_1 &= b_1 q_0, & p_2 &= b_2 q_0, & p_3 &= b_3 q_0, \end{aligned}$$

W przypadku śledzenia za sygnałem, np. tylko liniowo narastającym, należy zmienić postać transformaty (12).

Problem regulacji układu elektrohydraulicznego można także rozwiązać stosując regulatory cyfrowe, które umożliwiają przesunięcie biegunów układu zamkniętego w dowolne położenie (przy pomiarze tylko wielkości wyjściowej układu regulacji) oraz uzyskanie wymaganego rzędu astatyzmu układu regulacji. Na podstawie zadanej transmitancji  $G_z(z)$  układu regulacji położenia oraz transmitancji  $G(z)$  obiektu regulacji można wyznaczyć transmitancję regulatora

$$G_r(z) = \frac{G_z(z)}{G(z)(1 - G_z(z))} \tag{21}$$

Właściwości statyczne i dynamiczne układu regulacji można kształtować poprzez przyjęcie odpowiedniej postaci  $G_z(z)$ .

**2.4. Regulator rozmyty**

W sytuacji braku opisu matematycznego procesu lub jego nieprecyzyjności pojawiają się przeszkody w syntezie klasycznych algorytmów sterowania. Do syntezy regulatora rozmytego nie jest konieczna informacja o modelu matematycznym obiektu lub informacja taka może być ewentualnie sformułowana w kategoriach rozmytych. Logika rozmyta opisuje sytuacje niepewne i nieprecyzyjne. Zmienne tworzą zbiory wartości, które są scharakteryzowane przez wyrażenia słowne, takie jak: MAŁY, ŚREDNI, DUŻY itd. Wyrażenia słowne są przedstawiane za pomocą zbiorów rozmytych, które są określone przez funkcje przynależności.

W przypadku regulatora rozmytego sygnałami wejściowymi są uchyb  $e$  regulacji położenia  $y$  (lub prędkości  $v$ ) oraz prędkość zmian  $de$  tego uchybu. Zmienne wejściowe  $e$  i  $de$  oraz zmienną wyjściową  $u$  regulatora wyrażono przez następujące zbiory określeń słownych:

$$\{e(i)\} = \{UW, UŚ, UM, Z, DM, DŚ, DW\}$$

$$\{de(i)\} = \{UW, U\acute{S}, UM, Z, DM, D\acute{S}, DW\} \quad (22)$$

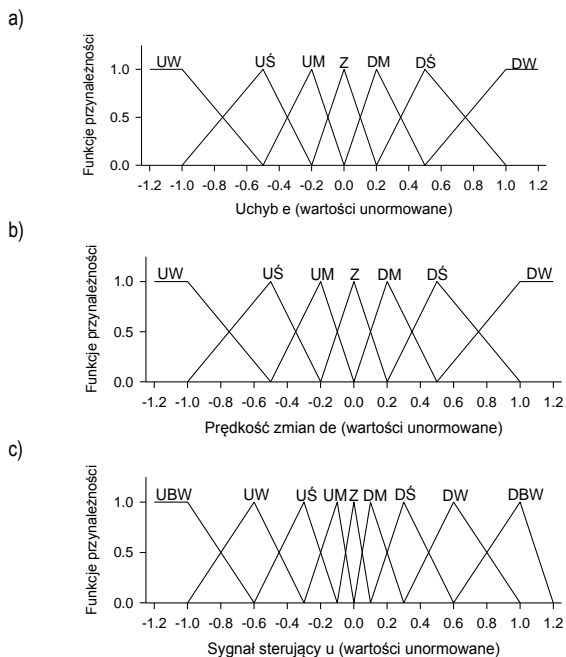
$$\{\hat{u}(i)\} = \{UBW, UW, U\acute{S}, UM, Z, DM, D\acute{S}, DW, DBW\}$$

gdzie wprowadzono oznaczenia: U – „ujemny”, D – „dodatni”, W – „wielki”,  $\acute{S}$  – „średni”, M – „mały”, Z – „zero” B – „bardzo”.

Zmienne  $e$  i  $de$  przedstawiono w postaci unormowanej:

$$e'(k) = e(k) / K_e, \quad de'(k) = de(k) / K_{de}, \quad u'(k) = \hat{u}(k) / K_u \quad (23)$$

gdzie  $K_e, K_{de}$  i  $K_u$  są współczynnikami wyznaczanymi eksperymentalnie. Parametry  $K_e$  i  $K_{de}$  dobiera się tak, aby wartości zmiennych  $e'$  i  $de'$  należały do przedziału  $[-1, 1]$ . Funkcje przynależności zbiorów rozmytych wielkości  $\{e'\}$ ,  $\{de'\}$  i  $\{u'\}$ , odpowiadające powyższym określeniom słownym, zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Funkcje przynależności dla: a) uchybu  $e'$ , b) zmiany uchybu  $de'$ , c) sygnału wyjściowego  $u'$

Każda rozmyta reguła sterowania może być opisana za pomocą zmiennych  $e', de'$  i  $u'$  w następujący sposób

$$\text{jeśli } (e'(k) \text{ jest } x) \text{ i } (de'(k) \text{ jest } y) \text{ to } (u'(k) \text{ jest } z) \quad (24)$$

gdzie  $x, y$  i  $z$  są rozmytymi elementami tego opisu. Zbiór reguł słownych regulatora zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Opis słowny regulatora rozmytego

$e'$	$de'$	UW	UŚ	UM	Z	DM	DŚ	DW
UW	UW	UBW	UBW	UBW	UW	UŚ	UM	Z
UŚ	UW	UBW	UBW	UW	UŚ	UM	Z	DM
UM	UW	UBW	UW	UŚ	UM	Z	DM	DŚ
Z	UW	UŚ	UM	Z	DM	DŚ	DW	
DM	UŚ	UM	Z	DM	DŚ	DW	DBW	
DŚ	UM	Z	DM	DŚ	DW	DBW	DBW	
DW	Z	DM	DŚ	DW	DBW	DBW	DBW	

Procedurę obliczania sygnału sterującego  $u'(k)$  sprowadzono do następujących etapów:

1. Próbkowanie sygnałów  $e(t)$  i  $de(t)$ .
2. Wyznaczenie uchybu  $e(k)$  i zmiany uchybu  $de(k)$  oraz ich wartości względnych  $e'(k)$  i  $de'(k)$  zgodnie z równaniami (23).

3. Obliczenie funkcji przynależności  $\mu_{e_i}(e'(k))$  i  $\mu_{de_i}(de'(k))$  zmiennych wejściowych  $e'$  i  $de'$  dla  $i$ -tej rozmytej reguły sterowania,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – liczba reguł sterowania (w analizowanym przypadku  $N=7^2=49$ ).

4. Obliczenie minimalnej wartości

$$\min[\mu_{e_i}(e'(k)), \mu_{de_i}(de'(k))] \quad (25)$$

5. Obliczenie funkcji przynależności sygnału wyjściowego  $u'$  z warunku

$$\mu(u') = \max\{\min[\alpha_i, \mu_{u_i}(u')]\}. \quad 1, \dots, N \quad (26)$$

6. Obliczenie sygnału wyjściowego  $u'(k)$  regulatora przez defuzyfikację, np. metodą środka ciężkości.

7. Wyznaczenie sygnału sterującego  $u(k)$  dla regulatora typu PI z zależności

$$u(k) = u(k-1) + K_u u'(k), \quad k = 0, 1, 2, \quad (27)$$

Realizacja algorytmu rozmytego regulatora w czasie rzeczywistym wymaga zastosowania systemów mikroprocesorowych o dużej mocy obliczeniowej. Innym rozwiązaniem jest stabilizowanie wartości sygnału  $u'(k)$ . W tym celu zakres zmian wartości zmiennych wejściowych  $e'$  i  $de'$  podzielono na  $L$  przedziałów, przy czym dla każdego przedziału przypisano wskaźniki, odpowiednio  $j$  i  $l$  ( $j, l=1, 2, \dots, L$ ). Następnie tabelę tę wpisano do pamięci regulatora. Wartości sygnału wyjściowego  $u'$  dla kombinacji wartości wskaźników  $j$  i  $l$ , które opisują przedziały wartości odpowiednio zmiennych  $e'$  i  $de'$ , zamieszczono w tab. 2 (przyjęto  $L=10$ ).

Tab. 2. Wartości sygnału wyjściowego  $u'$

$j \setminus l$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-0,86	-0,86	-0,76	-0,72	-0,56	-0,30	-0,18	-0,06	0,00	0,06
2	-0,86	-0,88	-0,76	-0,64	-0,38	-0,16	-0,12	0,00	0,08	0,12
3	-0,76	-0,76	-0,66	-0,58	-0,30	-0,10	0,00	0,12	0,18	0,22
4	-0,72	-0,64	-0,58	-0,32	-0,12	0,00	0,10	0,16	0,30	0,32
5	-0,56	-0,38	-0,30	-0,12	0,00	0,12	0,30	0,38	0,56	0,62
6	-0,30	-0,16	-0,10	0,00	0,12	0,32	0,58	0,64	0,74	0,90
7	-0,18	-0,12	0,00	0,10	0,30	0,58	0,68	0,78	0,76	0,88
8	-0,06	0,00	0,12	0,16	0,38	0,64	0,78	0,88	0,86	0,88
9	0,00	0,08	0,18	0,30	0,56	0,74	0,76	0,86	0,86	0,86
10	0,06	0,12	0,22	0,32	0,62	0,90	0,88	0,88	0,88	0,90

Równanie regulatora PI, dla wyznaczonej uprzednio wartości wskaźników  $j$  i  $l$ , ma wówczas następującą postać

$$u(k) = u(k-1) + K_u u'(j, l) \quad (28)$$

W konstrukcji regulatora rozmytego duże znaczenie ma eksperymentalny dobór wartości współczynników  $K_e$  i  $K_{de}$  i  $K_u$ . Regulatory rozmyte zapewniają prosty sposób sterowania układem elektrohydraulicznym, jednak trudno jest osiągnąć dużą dokładność regulacji. Stany nieustalone układów z regulatorami rozmytymi charakteryzują się dobrym tłumieniem oraz niewielkim opóźnieniem. Natomiast w stanach ustalonych występuje uchyb regulacji, zwykle większy niż w przypadku zastosowania regulatorów klasycznych. Regulatory rozmyte mogą być więc zastosowane w układach regulacji, w których nie jest wymagana duża dokładność regulacji.

### 3. BADANIA LABORATORYJNE

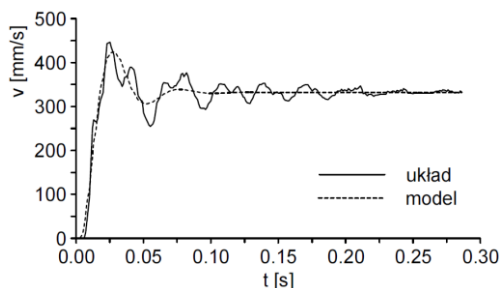
Badania laboratoryjne, weryfikujące identyfikację parametryczną i dokładność śledzenia układu elektrohydraulicznego za sygnałem zadanym zrealizowano na stanowisku badawczym, którego schemat i widok zamieszczono na rys. 1. Eksperyment identyfika-

cyjny polegał na pomiarze prędkości  $v$  wózka w odpowiedzi na skokową zmianę wartości sygnału  $u$ , sterującego otwarciem zaworu proporcjonalnego. W tab. 3 zestawiono wartości identyfikowanych parametrów modelu matematycznego (2) układu zawór-masa. W czasie eksperymentów identyfikacyjnych na wzmacniacz zaworu proporcjonalnego wprowadzano skokowe wartości napięcia  $u=2,5, 5, 7,5$  i  $10$  V, które steruje otwarciem zaworu, a mierzono prędkość  $v$  przemieszczenia masy. W procesie identyfikacji minimalizowano numerycznie funkcję (3). Dokładność aproksymacji zarejestrowanych odpowiedzi czasowych obiektu przez jego model matematyczny określono za pomocą współczynnika korelacji  $R^2$ .

**Tab. 3.** Wyniki identyfikacji modelu matematycznego (2)

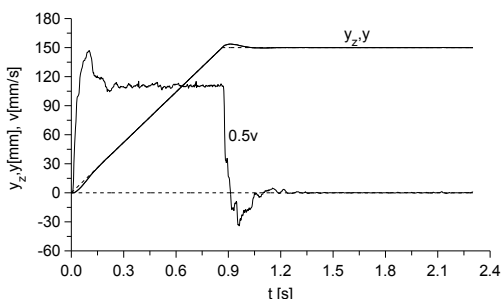
$u$ [V]	$T$ [s]	$\xi$	$K$ [mm/Vs]	$R^2$
2,5	0,0078	0,469	59,5	0,977
5,0	0,0080	0,446	63,0	0,968
7,5	0,0081	0,400	66,2	0,969
10,0	0,0075	0,320	66,3	0,929

Na rys. 3 zamieszczono przykład weryfikacji procesu identyfikacji, tj. porównanie odpowiedzi czasowej prędkości  $v$  przemieszczenia wózka i rozwiązania modelu matematycznego (2).



**Rys. 3.** Odpowiedzi czasowe obiektu regulacji i jego modelu matematycznego (2)

Przykładowy przebieg nadążania przemieszczenia wózka (łoczyska siłownika) za zadaniem sygnałem liniowym  $y_z$  dla regulatora PID przedstawiono na rys. 4. Dla dłuższego czasu rejestracji, tzn. po wytłumieniu drgań konstrukcji stanowiska badawczego, uzyskano dokładność regulacji na poziomie kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$ . Na wartość uchybu regulacji istotny wpływ ma w tym przypadku także sztywność i luzy występujące w konstrukcji stanowiska, dokładność i rozdzielczość układów pomiarowych i sterujących, a także masa wózka.

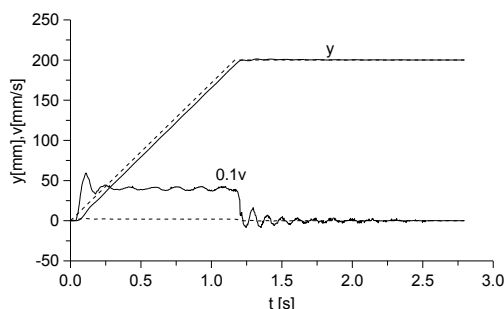


**Rys. 4.** Nadążanie układu z regulatorem PID za zadaniem sygnałem liniowym  $y_z$  (linia przerywana)

W przypadku regulatora PID – uśredniony uchyb statyczny  $Q_s$  (obliczany w stanie ustalonym śledzenia za sygnałem liniowo narastającym, tj. do chwili osiągnięcia wartości 150 mm) przyjmował wartości w granicach 0,03-0,04 mm. Z kolei uśredniony uchyb sta-

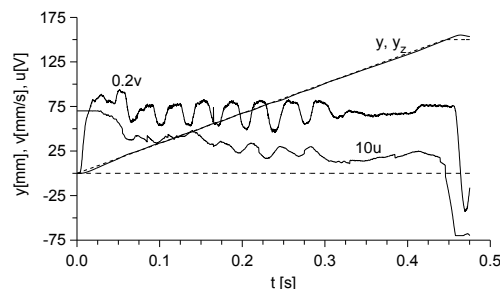
tyczny  $Q_{sp}$  (obliczany w stanie ustalonym dla stałej wartości sygnału  $y_z$ , równej 150 mm) wynosił około 0,02 mm. Najlepsze wyniki śledzenia za sygnałem  $y_z$  otrzymano, gdy w układzie zastosowano dwa szeregowo połączone regulatory PI (wskaźnik  $Q_s$  w granicach 0,02 mm).

Badania układu śledzącego analizowano także dla pozostałych rodzajów regulatorów, które omówiono w niniejszej pracy. Rysunek 5 pokazuje przykład śledzenia za liniowo-narastającym sygnałem  $y_z$  układu z regulatorem stanu. Ustalony uchyb śledzenia  $Q_s$  wynosił w granicach 0,08-0,1 mm. Wartość uchybu śledzenia zmienia się w zależności od położenia biegunów układu zamkniętego.



**Rys. 5.** Nadążanie za zadaniem sygnałem  $y_z$  (linia przerywana) układu z regulatorem stanu

Przykładowe przebiegi nadążania układu z regulatorem dead-beat za sygnałem  $y_z$  przedstawiono na rys. 6.



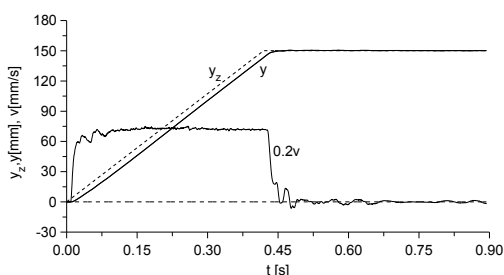
**Rys. 6.** Nadążanie za zadaniem sygnałem  $y_z$  (linia przerywana) układu z regulatorem deadbeat

W układzie laboratoryjnym zastosowano ograniczenie amplitudy sygnału sterującego  $u$  zaworem o wartości  $\pm 10$  V. Teoretycznie układ z regulatorem deadbeat osiąga stan ustalony położenia w ciągu trzech okresów próbkowania, przy czym amplituda sygnału  $u$  w stanie nieustalonym przyjmuje duże wartości, nawet rzędu kilkudziesięciu woltów. W eksperymencie laboratoryjnym, wobec wprowadzonego ograniczenia amplitudy  $u$ , czas trwania stanu nieustalonego jest znacznie dłuższy. Regulator typu deadbeat zapewnia szybsze narastanie wielkości regulowanej w początkowej fazie ruchu układu, niż ma to miejsce w przypadku klasycznego regulatora typu PI czy PID. Jest to wynikiem większej wartości amplitudy sygnału sterującego  $u$ . Regulatory typu deadbeat zapewniają dobre właściwości dynamiczne, małą wrażliwość na zmiany parametrów układu, ale osiągnięta dokładność regulacji położenia jest mniejsza niż w przypadku regulatorów PI. Szczególnie dotyczy to przypadku, gdy w fizycznym układzie występują zjawiska nieliniowe, takie jak strefa nieczułości wzmacniacza elektronicznego oraz luzy w połączeniach łoczyska z obciążeniem.

W badaniach laboratoryjnych układu z regulatorem deadbeat otrzymano uśredniony w stanie ustalonym uchyb śledzenia na poziomie  $0,03 \div 0,05$  mm, przy czym zastosowano algorytm stero-

wania otrzymany dla stałego sygnału wyjściowego układu. Przyjęcie docelowego kształtu sygnału  $y_z$  rozbudowuje algorytm sterowania, ale znacząco zmniejsza wartość uchybu śledzenia.

Regulatory rozmyte zapewniają prosty sposób sterowania układem elektrohydraulicznym, jednak trudno jest osiągnąć dużą dokładność regulacji, a także i śledzenia (wartość uchybu  $Q_s$ , poniżej 0,1 mm). Przykład śledzenia układu za zadaniem sygnałem liniowym  $y_z$  przedstawiono na rys. 7. W eksperymencie laboratoryjnym zastosowano regulator rozmyty typu PI. Zmniejszenie uchybu śledzenia można uzyskać poprzez wzrost wartości współczynnika  $K_u$ , jednak wówczas powstają znaczne oscylacje prędkości, szczególnie po zatrzymaniu ruchu siłownika. W czasie badań eksperymentalnych układu pozycjonowania z wymienionym regulatorem osiągnięto ustalony uchyb pozycjonowania  $Q_{sp}$  w granicach 0,05-0,1 mm.



Rys. 7. Nadążanie za zadaniem sygnałem  $y_z$  (linia przerywana) układu z regulatorem rozmytym typu PI

## PODSUMOWANIE

W pracy zamieszczono wyniki analizy teoretycznej i badań laboratoryjnych podstawowych metod sterowania w zastosowaniu do śledzenia przemieszczenia siłownika napędu elektrohydraulicznego za sygnałem zadaniem. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że model matematyczny analizowanego napędu elektrohydraulicznego można z wystarczającą dokładnością dla celu sterowania przedstawić w postaci quasi-liniowej typu wejście-wyjście. W modelach quasi-liniowych we współczynniku wzmocnienia, stałej czasowej i współczynniku tłumienia występują w sposób niejawni parametry konstrukcyjno-ruchowe obiektu. Współczynniki te nie są stałe, lecz są funkcjami sygnału  $u$  sterującego otwarciem zaworu proporcjonalnego oraz masy obciążenia.

Wynikiem badań laboratoryjnych oraz symulacji komputerowej są następujące wnioski:

- najwyższą dokładność śledzenia otrzymano przy zastosowaniu dwóch szeregowo połączonych regulatorów PI;
- większą dokładność śledzenia w stanach nieustalonych uzyskano poprzez zmianę wartości parametrów regulatorów w fazie śledzenia i zatrzymania ruchu siłownika (wózka);
- zmianę wartości nastaw regulatorów można uzależnić od chwilowej wartości uchybu śledzenia lub od prędkości sygnału zadanego; drugi sposób cechuje się bardziej "spokojną" pracą niż pierwszy z wymienionych;
- osiągnięcie wyższej dokładności pozycjonowania i śledzenia wymaga większej sztywności konstrukcji stanowiska oraz większej dokładności pomiaru położenia siłownika (wózka).

## BIBLIOGRAFIA

1. Driankow D., Hellendoorn H., Rainfrank M., *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
2. Emani-Naeini A., *Deadbeat control of linear multivariable generalised state-space systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, Vol. 37, No. 5, 648-652.
3. Filo G., *Pressure control in band-saw hydraulic system using the fuzzy logic*. Przegląd Mechaniczny, 2009, nr 5, 35-40.
4. Jianchen G., Weijun L., Zhilong Ch., Pingdong W., *An application of a fuzzy controller to the position control of an electrohydraulic servo cylinder*. The 2<sup>nd</sup> International Conference on Fluid Power Transmission & Control. Shanghai, 1995, 266-269.
5. Manring, N. D., *Hydraulic Control Systems*. John Wiley & Sons. New York, 2005.
6. Stefański T., Wilczkowski D., Zawarczyński Ł., *Regulacja położenia w układzie elektrohydraulicznym z niesztynnym połączeniem masy obciążenia*. Technika Transportu Szynowego, 2012, nr 9, 2075-2083.
7. Stefański T.: *Sterowanie typu deadbeat układem elektrohydraulicznym*. Maszyny Górnicze, nr 75, 1998, str. 116-129.
8. Woś P., Dindorf R., *Adaptive control of the electrohydraulic servo-system with external disturbances*. Asian Journal of control, 2013, Vol. 15, Issue 4, 1065-1080.
9. Xiudong P., Zhije W., Fan C., *Predictive Control of a Pump Controlled Motor Servo System with Time Varying Load*. Proceedings of the 1st International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Beijing, 1991, 421-426.

## THE PROBLEM OF SET SIGNAL TRACING IN THE ELEKTROHYDRAULIC DRIVE SYSTEM

### Abstract

*The problems of mathematical modelling, parametric identification and control of electrohydraulic system were analysed. Linear mathematical model of the input-output type of the electrohydraulic system is presented. For identification of mathematical model parameters a numerical static optimisation method was used. The structure of control systems with conventional PID, deadbeat, fuzzy and state controllers were also taken into consideration. The experimental verification was carried out for the laboratory model of the electrohydraulic system.*

Autor:

dr hab. inż. **Tadeusz Stefański** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, 25-314 Kielce, ul. Tysiąclecia P.P. 7, tel: +48 41 34 24 213, t.stefanski@tu.kielce.pl