

## mgr inż. Maciej ROSÓŁ

Akademia Górniczo-Hutnicza  
Katedra Automatyki, Kraków

# Zastosowanie nieliniowych metod sterowania dla systemu zbiorników

Mgr inż. Maciej ROSÓŁ

Od 1993 roku Asystent w Katedrze Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania: systemy nieliniowe, „inteligentne” algorytmy sterowania, sterowanie w czasie rzeczywistym.



### Streszczenie

Celem tego artykułu jest porównanie dwóch metod sterowania: regulatora rozmytego Takagi-Sugeno i linearyzującego sprzężenia zwrotnego – do modelowania i sterowania nieliniowym systemem zbiorników. Obydwie metody transformują system nieliniowy w liniowy. Zostały zaprezentowane i porównane wyniki eksperymentalne uzyskane dla przykładowego układu dwóch zbiorników.

### Abstract

The purpose of this paper is to compare two control techniques: Takagi-Sugeno fuzzy logic controller and linearizing feedback – for modelling and control of non-linear N-tank system. Both methods transform the non-linear system model into a linear one. The controllers are designed using linear models obtained from the exact non-linear model. The results for two-dimensional laboratory tank system are presented and compared.

## 1. WSTĘP

Wiele procesów przemysłowych jest nieliniowych. Zachowanie większości z nich nie może być w prosty sposób opisane z wykorzystaniem nieliniowych lub liniowych równań. Sytuacja taka powoduje trudności związane z budową matematycznych modeli opisujących dynamikę badanego procesu i uniemożliwia użycie w sterowaniu klasycznych algorytmów sterowania. Natomiast pojedynczy liniowy model nie może być wykorzystany dla całego zakresu pracy.

W ostatnich latach zaproponowano kilka klasycznych i „inteligentnych” metod sterowania i modelowania, które próbują rozwiązać wyżej przedstawione problemy [2], [3], [5], [9]. Najważniejsze z nich to:

- logika rozmyta,
- sieci neuronowe,
- systemy sterowania wykorzystujące model procesu.

Powyższe techniki dają możliwości tworzenia modelu procesu zawierającego wiele liniowych submodeli, opisujących zachowanie procesu w odpowiednich punktach pracy. Model taki w efektywny sposób może uwzględniać nieliniowości występujące w systemie i adaptować się do zmieniających się warunków pracy.

W niniejszym artykule zaprezentowano dwie metody wykorzystujące klasyczny liniowo-kwadratowy algorytm sterowania:

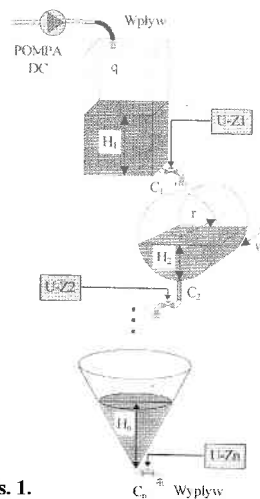
1. Sterownik rozmyty Takagi-Sugeno,
2. Linearyzujące sprzężenie zwrotne.

Metoda linearyzującego sprzężenia zwrotnego (LSZ) polega na zastosowaniu wyznaczonego w oparciu o model procesu sprzężenia zwrotnego, które transformuje system nieliniowy w liniowy dla całego rozważanego obszaru pracy.

Obydwie algorytmy zostały użyte do modelowania i sterowania kaskady  $N$  zbiorników. Model taki jest wykorzystywany jako podstawowy model w sterowaniu poziomem cieczy w przemyśle chemicznym i metalurgicznym [2], [3], [4], [12].

## 2. SYSTEM $N$ ZBIORNIKÓW

Układ  $N$  zbiorników zawiera skończoną liczbę zbiorników ułożonych jeden pod drugim (rys. 1). Niektóre z nich mają stałe pole przekroju, inne zmienne. Ciecz jest pompowana do najwyższego zbiornika. Przepływ cieczy między zbiornikami odbywa się tylko pod wpływem siły grawitacji.



Rys. 1.

Dopływ  $q$  stanowi sterowanie. Współczynniki wypływu  $C_1, C_2, \dots, C_n$  określają wielkość wypływu z poszczególnych zbiorników. Zadaniem sterowania jest stabilizacja poziomu cieczy w najniższym zbiorniku. Model procesu został wyznaczony z wykorzystaniem bilansu masowego cieczy dla całego układu [9]

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= \frac{1}{\beta_1(H_1)} q - \frac{1}{\beta_1(H_1)} C_1 \sqrt{H_1} \\ \dot{H}_2 &= \frac{1}{\beta_2(H_2)} C_1 \sqrt{H_1} - \frac{1}{\beta_2(H_2)} C_2 \sqrt{H_2} \\ &\dots \\ \dot{H}_n &= \frac{1}{\beta_n(H_n)} C_{n-1} \sqrt{H_{n-1}} - \frac{1}{\beta_n(H_n)} C_n \sqrt{H_n} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$H_i$  – poziom cieczy w  $i$ -tym zbiorniku,  $i = 1, \dots, n$ ,  
 $\beta_i(H_i)$  – przekrój poprzeczny  $i$ -tego zbiornika w  $H_i$ ,  
 $C_i$  – współczynnik wypływu dla  $i$ -tego zbiornika,  
 $q$  – sterowanie.

Zbiór stanów dopuszczalnych dla modelu (1) można określić jako

$$\mathcal{S}^M = \{H_i; \beta_i(H_i) \neq 0, H_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n\}$$

natomiast zbiór stanów dopuszczalnych dla procesu jako

$$N^s = \{H_i; 0 \leq H_i \leq H_i^{\max}, i = 1, 2, K, n\}$$

Zbiór sterowań dopuszczalnych opisany jest jako

### 2.1. Model laboratoryjny

Model laboratoryjny zawiera dwa zbiorniki ułożone jeden pod drugim. Poziomy cieczy  $H_1, H_2$  są mierzone. Pierwszy zbiornik ma stałe pole przekroju, drugi zmienne. Celem sterowania jest stabilizacja poziomu cieczy w dolnym zbiorniku.

Model matematyczny jest szczególnym przypadkiem układu  $N$  zbiorników (1) dla  $N=2$  gdzie

$$\beta_1(H_1) = A \text{ - stałe pole przekroju,}$$

$$\beta_2(H_2) = 2w\sqrt{r^2 - (r - H_2)^2} \text{ - zmienne pole przekroju.}$$

Zbiór sterowań dopuszczalnych dla modelu laboratoryjnego jest dany w postaci

$$\theta = \{q; 0 \leq q \leq q^{\max}\}, \text{ gdzie } q^{\max} = 230 \text{ cm}^3/\text{s}.$$

Maksymalne poziomy cieczy w zbiornikach wynoszą  $H_1^{\max} = 80 \text{ cm}, H_2^{\max} = 50 \text{ cm}.$

### 3. Sterownik rozmyty TAKAGI-SUGENO z regulatorem LQ

Rozważmy nieliniowy autonomiczny system otwarty opisany równaniem

$$\dot{x} = f(x, u), \tag{2}$$

gdzie  $f$  jest  $n \times 1$  wektorem funkcji nieliniowych,  $x$  jest  $n \times 1$  wektorem stanu i  $u$  jest  $m \times 1$  wektorem sterowań.

Sterownik rozmyty Takagi-Sugeno (T-S FLC, ang. *Takagi-Sugeno Fuzzy Logic Controller*) może być wykorzystany do uzyskania zbioru modeli liniowych aproksymujących nieliniowy proces (2). Mając modele liniowe można implementować odpowiadające im regulatory liniowe. W literaturze spotyka się dwa rodzaje T-S FLC: T-S FLC-1, T-S FLC-2 [8]. Różnica pomiędzy tymi dwoma typami sterowników występuje w części THEN reguł rozmytych i w równaniu opisującym globalny model dla danej pary  $(x(t), u(t))$ . W niniejszej pracy zostanie rozważony drugi przypadek, dla którego model jest dany jako zespół reguł

$$R_i^s: \text{ if } x^d = LX^s \text{ then } \dot{x} = f_i(x, x^d, x^i, u, u^d, u^i),$$

Odpowiadające modelowi reguły regulatorów są następujące

$$R_i^c: \text{ if } x = LX^c \text{ then } u = g_i(x, x^d, x^i, u, u^d, u^i),$$

gdzie:

- $x^d$  - wartość zadana,
- $R_i^s$  - liczba reguł rozmytych opisujących model liniowy,  $i=1, \dots, m$ ,
- $m$  - całkowita liczba reguł,
- $R_i^c$  - liczba reguł rozmytych opisujących regulator liniowy,  $i=1, 1$ ,
- $m, m$  - całkowita liczba reguł,

LXi - i-ty obszar rozmyty dla i-tej reguły. Dla tego obszaru definiowana jest funkcja przynależności  $i(x)$ ,

$x_i$  - punkt nazywany centrum obszaru rozmytego. Dla tego punktu  $i(x_i)=1$ ,

$f_i(x, x^d, x_i, u, u^d, u_i)$  - funkcja będąca liniową aproksymacją nieliniowego procesu (2) w punkcie  $(x^d, u^d)$ ,

$u = g_i(x, x^d, x_i, u, u^d, u_i)$  - funkcje reprezentujące liniowe sterowanie dla danego obszaru LXi.

Ogólnie liniowy model będzie opisany równaniem

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t),$$

gdzie  $A_i$  jest macierzą jacobianową  $n(n$  funkcji  $f(x,u)$  względem  $x$  oraz  $B_i$  jest macierzą jacobianową  $n(m$  funkcji  $f(x,u)$  względem  $u$ . Niech  $i(x)$  będzie funkcją przynależności dla obszaru LXi i niech

$$w^i(x^d) = \frac{\mu^i(x^d)}{\sum_j \mu^j(x^d)}, \quad \sum_j w^j(x^d) = 1,$$

$$u = Kix(t)$$

gdzie:  $K_i$  - współczynniki regulatora od stanu,  $w_i(x^d)$  - współczynnik wagowy określony dla LXi.

Dla danych par  $(x(t), u(t))$ , globalny model rozmyty jest wyznaczany jako średnia ważona lokalnych modeli liniowych i przyjmuje formę

$$\dot{x} = \sum_i w^i(x^d) \cdot f_i(x, x^d, x^i, u, u^d, u^i). \tag{3}$$

Takie same rezultaty mogą być uzyskane dla globalnego sterowania rozmytego

$$u = \sum_i w^i(x^d) \cdot g_i(x, x^d, x^i, u, u^d, u^i). \tag{4}$$

Można zauważyć, że dynamika globalnego modelu rozmytego (3) i globalnego sterowania rozmytego (4) jest liniowa w całym obszarze LXi. Własność ta wynika ze stałej wartości  $w_i(x^d)$  w LXi, która zależy tylko od stałego  $x^d$ .

Analiza stabilności modelu i systemu zamkniętego może być przeprowadzona z wykorzystaniem odpowiedniej funkcji Lapunowa [6], [10].

#### 3.1. T-S FLC-2 dla układu dwóch zbiorników

W rozdziale tym zaprezentowano procedurę, umożliwiającą konstrukcję modelu i sterownika T-S FLC-2 dla przykładowego układu dwóch zbiorników.

Rozważmy nieliniowy model układu dwóch zbiorników przedstawionych w rozdziale 2.1.

Niech sterowanie będzie postaci i realizuje algorytm liniowo kwadratowy (LQ), przy czym  $K$  jest wektorem współczynników wzmocnienia dla których osiągane jest minimum wskaźnika jakości

$$J = \int_0^{\infty} (h(t)^T Q h(t) + u(t)^T R u(t)) dt,$$

$Q, R$  stałe macierze rzeczywiste,  $QT=Q(0), RT=R>0$ .

Korzystając z linearyzacji Lapunowa można obliczyć lokalny model liniowy w postaci

$$\dot{h} = J_H(H_d, q_d) \cdot h + J_q(H_d, q_d) \cdot u.$$

lokalne liniowe sterowanie

$$u = K_i(H_d) \cdot h$$

i określić model systemu zamkniętego jako

$$\dot{h} = [J_H(H_d, q_d) + J_q(H_d, q_d) \cdot K_i(H_d)] \cdot h.$$

gdzie:

$u=q-q_d, h=H-H_d, H_d$  - punkt pracy,  $q_d$  - sterowanie odpowiadające  $H_d$ ,

$$J_H = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_1} & \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \end{bmatrix}_{H=H_d} = \begin{bmatrix} -C_1^2 & 1 & 0 \\ 2q_0 & \beta_1(H_1) & 0 \\ C_1^2 & 1 & -C_2^2 & 1 \\ 2q_0 & \beta_2(H_2) & 2q_0 & \beta_2(H_2) \end{bmatrix}_{H=H_d}$$

$$J_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q} \end{bmatrix}_{H=H_d} = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta_1(H_1) \\ 0 \end{bmatrix}_{H=H_d}$$

Globalny rozmyty model (określony dla wszystkich rozważanych obszarów LXi) T-S FLC-2 dla układu dwóch zbiorników jest dany jako

$$\dot{x} = \sum_i w_i(H_d) \cdot [J_{H_i}(H_d, q_d) \cdot h + J_{u_i}(H_d, q_d) \cdot u]$$

oraz globalne liniowe sterowanie

$$u = \sum_i w_i(H_d) \cdot K_i(H_d) \cdot h,$$

gdzie  $i$  oznacza liczbę punktów linearyzacji.

#### 4. Linearyzujące sprzężenie zwrotne

Metoda linearyzującego sprzężenia zwrotnego jest wykorzystywana do transformacji systemu nieliniowego w system liniowy poprzez użycie nieliniowego sprzężenia zwrotnego. Istnieje kilka wersji LSZ. W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana metoda linearyzacji typu wejście-wyjście. Metoda ta wykorzystuje pełny wektor stanu i może być użyta dla nieliniowych, minimalnofazowych systemów typu SISO lub MIMO [1].

Poniżej przedstawiono tylko krótki opis LSZ. Szczegółowo, metoda ta jest rozważana w pracach [1], [7].

Rozważmy nieliniowy system typu SISO

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i, \quad (5)$$

$$y = h(x),$$

gdzie:  $x \in R^n$  – wektor stanu,

$$u_i \in R \text{ – sterowanie,}$$

$f, g_i$  - funkcje gładkie określone na  $R^n$ ,

$h=(h_1, 1, h_p)$  i  $h_i$  funkcje gładkie określone na  $R^n$ .

Zapisać pochodne Lie'go w postaci

$$L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x), \quad L_g h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x). \quad (6)$$

Jeżeli  $L_g h(x) \neq 0$  dla wszystkich  $x \in R^n$  otrzymujemy sterowanie

$$u = \frac{1}{L_g h(x)} (r - L_f h(x)), \quad (7)$$

określające liniowy system w postaci

$$\dot{x} = r.$$

Jeżeli  $L_g h(x) = 0$  należy kontynuować obliczenia pochodnych Lie'go wyższych rzędów

$$y^{(i)} = \frac{\partial (L_f^{i-1} h(x))}{\partial x} \cdot (f(x) + g(x) \cdot u) \quad (8)$$

$$= L_f^i h(x) + L_g L_f^{i-1} h(x) \cdot u.$$

Jeżeli istnieje liczba naturalna  $\gamma$  (taka, że

$$\forall_{i \in \{0, \dots, \gamma-2\}} L_g L_f^i h(x) = 0 \text{ for } i = 0, \dots, \gamma-2, \quad L_g L_f^{\gamma-1} h(x) \neq 0,$$

wtedy sprzężenie zwrotne

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{\gamma-1} h(x)} (r - L_f^\gamma h(x)), \quad (9)$$

daje system liniowy

$$y^{(\gamma)} = r.$$

Liczba  $\gamma$  nazywana jest względnym stopniem układu sterowania [7].

#### 4.1. Użycie LSZ dla układu N zbiorników

Rozważmy nieliniowy model układu N zbiorników (1). Niech wyjście będzie określone jako:

$$y = Hn. \quad (10)$$

Porównując (1), (10) z (5) otrzymujemy

$$h(H) = H_n,$$

$$g(H) = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta_1(H_1) & 0 & K & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$f(H) = \begin{bmatrix} -\frac{C_1 \sqrt{H_1}}{\beta_1(H_1)}, & \frac{C_1 \sqrt{H_1}}{\beta_2(H_2)} - \frac{C_2 \sqrt{H_2}}{\beta_2(H_2)}, & K, & \frac{C_{n-1} \sqrt{H_{n-1}}}{\beta_n(H_n)} - \frac{C_n \sqrt{H_n}}{\beta_n(H_n)} \end{bmatrix}^T.$$

Korzystając z zależności (6) możemy obliczyć pochodne Lie'go jak poniżej

$$L_f h(H) = \frac{\partial h(H)}{\partial H} f(H) = [0 \quad K \quad 0 \quad 1] \cdot f(H) = \frac{C_{n-1} \sqrt{H_{n-1}}}{\beta_n(H_n)} - \frac{C_n \sqrt{H_n}}{\beta_n(H_n)},$$

$$L_g h(H) = \frac{\partial h(H)}{\partial H} g(H) = [0 \quad K \quad 0 \quad 1] \cdot g(H) = 0.$$

Jeżeli  $L_g h(x) = 0$ , konieczne jest obliczenie pochodnych Lie'go (8). Można zauważyć, że każda kolejna  $i$ -ta pochodna dodaje niezerowy element do wektora w wierszu o indeksie  $(n-i+1)$ . Względny stopień układu wynosi zatem  $(=n)$ . Wtedy  $L_g L_f^{n-1} h(H) = 0$  i linearyzujące sprzężenie zwrotne jest postaci

$$q = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(H)} (r - L_f^n h(H)). \quad (11)$$

Jeżeli wyjście byłoby określone jako  $y = H_i$  należałoby obliczyć pochodne Lie'go  $i$ -tego rzędu.

**Przykład.** Rozważmy układ dwóch zbiorników z rozdziału 2.1. Celem jest uzyskanie modelu liniowego poprzez zastosowanie metody LSZ. Niech wyjście będzie  $y = H_2$ . Względny stopień układu wynosi 2. Oznacza to, że należy obliczyć pochodne Lie'go drugiego rzędu.

$$L_f h(H) = \frac{C_1 \sqrt{H_1}}{\beta(H_2)} - \frac{C_2 \sqrt{H_2}}{\beta(H_2)}, \quad L_g h(H) = 0, \quad L_g L_f h(H) = \frac{C_1}{2\beta(H_2)\sqrt{H_1}},$$

$$L_f^2 h(H) = \frac{-C_1^2}{2A\beta(H_2)} - \frac{C_1 \sqrt{H_1} - C_2 \sqrt{H_2}}{\beta^2(H_2)} \left[ \frac{4w^2(r-H_2)}{\beta^2(H_2)} (C_1 \sqrt{H_1} - C_2 \sqrt{H_2}) + \frac{C_2}{2\sqrt{H_2}} \right].$$

Linearyzujące sprzężenie zwrotne zgodne z (11) wynosi

$$q = \frac{2A\beta(H_2)\sqrt{H_1}}{C_1} \{r - L_f^2 h(H)\}.$$

Jeżeli przyjmiemy nowe zmienne stanu jako

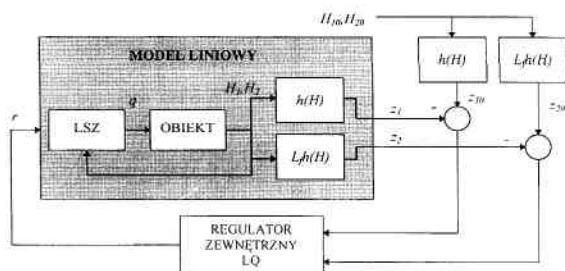
$$z_1 = h(H) = H_2,$$

$$z_2 = L_f h(H) = \frac{C_1 \sqrt{H_1}}{\beta(H_2)} - \frac{C_2 \sqrt{H_2}}{\beta(H_2)},$$

uzyskamy liniowy model układu

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= r \end{aligned} \quad (12)$$

Kompletny układ regulacji uwzględniający model liniowy (uzyskany przez zastosowanie metody LSZ) oraz zewnętrzny regulator LQ przedstawiono na rys. 2.

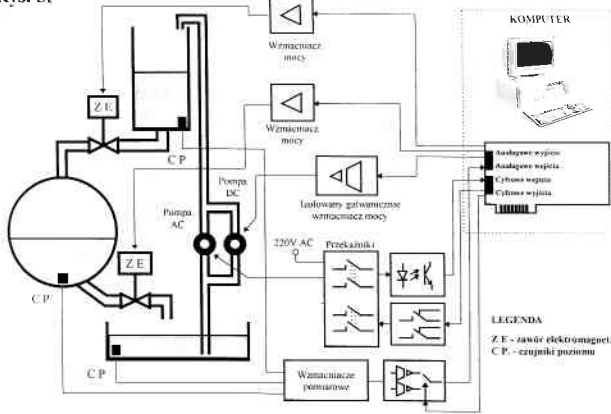


Rys. 2.

### 5. Eksperymenty

Eksperymenty zostały zrealizowane dla układu dwóch zbiorników przedstawionych w rozdziale 2.1. Schemat stanowiska laboratoryjnego, na którym przeprowadzono eksperymenty przedstawiono na rys. 3. Poziomy we wszystkich zbiornikach były mierzone. Jako element wykonawczy (sterowanie) wykorzystano pompę DC. Zawory służyły do ustalenia wielkości przepływu pomiędzy zbiornikami. Komunikację pomiędzy komputerem a procesem zrealizowano wykorzystując wielofunkcyjną kartę wejść/wyjść cyfrowych i analogowych. Eksperymenty przeprowadzono w środowisku czasu rzeczywistego wykorzystując środowisko programowe MATLAB/Simulink z przyborkami RTK/RTCon.

Rys. 3.

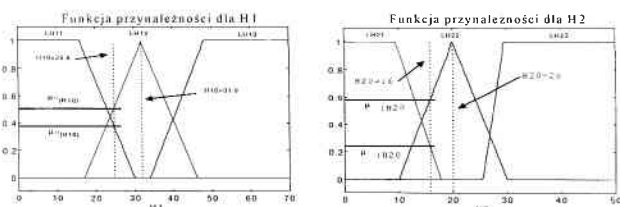


#### 5.1. Sterownik rozmyty Takagi-Sugeno z regulatorem LQ

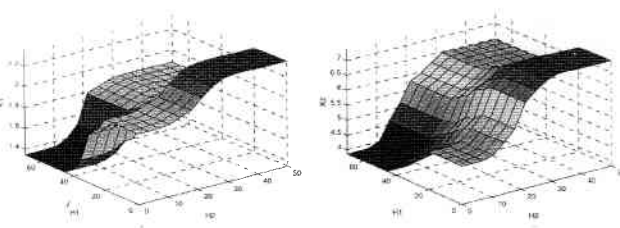
Korzystając z linearyzacji Lapunowa wyznaczono lokalne liniowe modele wokół następujących asymptotycznie stabilnych punktów równowagi układu (1) (n=2) (H1d, H2d) : (15.625, 10), (31.25, 20), (47.875, 30). Dla każdego lokalnego modelu liniowego obliczono parametry liniowo-kwadratowego regulatora LQ:

- (15.6, 10):  $K = [2.19 \ 5.7]$ , (31, 20):  $K = [2.02 \ 6.7]$ , (48, 30):  $K = [2 \ 7.1]$ .

Zaprojektowane funkcje przynależności dla wybranych punktów, otrzymane z wykorzystaniem przyborka Fuzzy Logic Toolbox MATLAB'a [11] przedstawia rys.4. Funkcje przejścia od wejścia do wyjścia dla K1 i K2 prezentuje rys. 5.



Rys. 4.

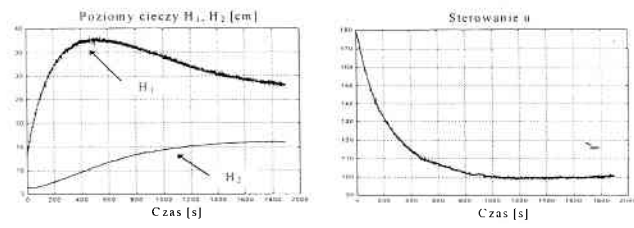


Rys. 5.

Eksperyment został przeprowadzony dla wartości zadanej poziomu cieczy w drugim zbiorniku H20=16 cm.

Wartość zadana jest asymptotycznie stabilnym punktem równowagi układu dwóch zbiorników. Wartości początkowe poziomów cieczy w zbiornikach wynosiły H1=15 cm, H2=7 cm.

Wyniki eksperymentu dla wartości zadanej H20=16cm przedstawia rys 6. Wartość zadana została osiągnięta po około 1500s. Sterowanie u i poziomy H1, H2 nie przekroczyły wartości dopuszczalnych.

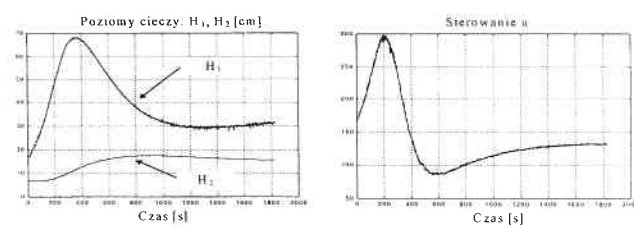


Rys. 6.

#### 5.2. Linearyzujące sprzężenie zwrotne z regulatorem LQ

Eksperyment został przeprowadzony dla wartości zadanej H20=16 cm, takiej samej jak dla sterownika T-S FLC-2. Parametry K1, K2 zewnętrznego regulatora LQ zostały dobrane dla systemu (12) i wynosiły: K1=0.0000498, K2=0.00998, dla macierzy występujących w kwadratowym wskaźniku jakości  $Q=[100 \ 0; \ 0 \ 100]$ ,  $R=4.0(1010)$ . Wartości początkowe poziomów cieczy w zbiornikach wynosiły H1=15 cm, H2=7 cm.

Wyniki eksperymentów przedstawiono na rys. 7. Wartość zadana została osiągnięta po około 1700 s. Sterowanie u i poziomy H1, H2 nie przekroczyły wartości dopuszczalnych.



Rys. 7.

Algorytm	Nakład obliczeniowy		Czas regulacji [s]	Całka z kwadratu błędu	Przeregulowanie [%]
	Synteza regulatora	Czas rzeczywisty			
LSZ	Duży. Skomplikowana postać sprzężenia zwrotnego.	Średni. Wynika ze złożoności sprzężenia zwrotnego <sup>1</sup> .	1650	27110	6,9
T-C FLC2	Duży. Związany z koniecznością określenia funkcji przynależności i reguł między nimi występujących.	Średni.	1550	37710	0,0

<sup>1</sup> Zależny od liczby zbiorników i złożoności funkcji  $\beta_i(H)$

### 6. WNIOSKI

Klasyczne liniowe algorytmy sterowania wykorzystują liniowe modele procesów. Użyte w sterowaniu modelu liniowego, uzyskane poprzez klasyczną linearyzację modelu nieliniowego, w punkcie

równowagi, umożliwia osiągnięcie korzystnych rezultatów tylko w niewielkim otoczeniu wokół punktu linearyzacji. Dlatego też konieczne staje się zastosowanie metod, które poprawnie działają dla większego obszaru pracy systemu nieliniowego. W artykule porównano dwie metody rozwiązujące problem stabilizacji poziomu cieczy dla układu dwóch zbiorników: sterownik rozmyty Takagi-Sugeno i linearyzujące sprzężenie zwrotne.

Obydwa regulatory zostały zaprojektowane i przetestowane. Zostały przeprowadzone eksperymenty w czasie rzeczywistym. Na podstawie danych eksperymentalnych dla każdego algorytmu zostały obliczone praktyczne wskaźniki regulacji. Zebrano je w tabeli 1. Najważniejsze wnioski wynikające z zastosowania rozważanych algorytmów sterowania dla układu zbiorników są następujące:

- Sterownik Takagi-Sugeno FLC2 charakteryzuje się lepszą jakością pod względem przeregulowania i czasu ustalania.
- Linearyzujące sprzężenie zwrotne jest metodą bardziej elastyczną i daje model liniowy, który może zostać wykorzystany do projektowania wybranego regulatora liniowego.
- Linearyzujące sprzężenie zwrotne jest bardziej wrażliwe na niedokładności identyfikacji parametrów modelu dwóch zbiorników.
- Implementacja obu algorytmów w czasie rzeczywistym jest prosta, wymaga jednak dużego nakładu obliczeń w trakcie ich projektowania.

## Literatura

[1] Dzieża J.A., O elementach geometrii różniczkowej w sterowaniu układami nieliniowymi, Komputerowe wspomaganie w obliczeniach naukowo-technicznych-przykłady zastosowań pakietów MATLAB i Maple V, Krakowskie Centrum Informatyki Stosowanej, pp. 339-356, Kraków, 1998

- [2] Galichet S., Foulloy L., Fuzzy logic control of a floating level in a refinery tank, Proc. Of 3rd IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems, Orlando, June 1994, pp. 1538-1542
- [3] Graebe S.F., Goodwin G.C., M.R. West and P. Stepien, An Application of Advanced Control to Steel Casting, The Proc. of The Third IEEE Conference on Control Application, Glasgow 1994, vol. 3, pp. 1533-1538
- [4] Graebe S.F., Goodwin G.C., Control Design and Implementation in Continuous Steel Casting, IEEE Control Systems, August 1995, pp. 64-71
- [5] Grega W., Schneider A., Model-reference linearizing control of a multi-tank system, Symposium on Control, Optimization and Supervision, CESA'96 IMACS Multiconference, Lille, France, July 9-12, 1996, pp. 593-598
- [6] Joongseon J., Ye-Haw Ch., Reza Langri, On the Stability Issues of Linear Takagi-Sugeno Fuzzy Models, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol.6, No.3, August 1998
- [7] Kadiyala Raja R., A Tool Box for Approximate Linearization of Nonlinear Systems, Control Systems, vol. 2, April 1993, pp. 47-57
- [8] Palm R., Driankov D., Model Based Fuzzy Control, Springer, New York, 1997
- [9] Rosół M., Model i sterowanie kaskadą zbiorników, Automatyka, Tom 2, Zeszyt 1, pp. 13-34, Kraków, 1998
- [10] Teixeira Marcelo C. M., Żak Stanisław H., Stabilizing Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems Using Fuzzy Models, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 7, no. 2, April 1999
- [11] The Mathworks Inc., Fuzzy Logic Toolbox, Technical documentation, Natick, 1995
- [12] Warren D. Carew, Karl J. Prince, Windows NT Workstation the VMEbus and Real-Time Control, IEEE Control Systems, August 1997, pp. 77-88