

*Ewa Wachowicz*  
*Katedra Systemów Sterowania*  
*Politechnika Koszalińska*

## **STEROWANIE POZIOMEM CIECZY W ZBIORNIKU Z WYKORZYSTANIEM REGULATORA ROZMYTEGO**

### **Sreszczenie**

W pracy omówiono układ regulacji poziomu cieczy, w którym zastosowano regulator rozmyty. Regulator ten został zaimplementowany w środowisku programowym MATLAB.

**Słowa kluczowe:** sterowanie, poziom cieczy, regulator rozmyty

### **Wykaz oznaczeń**

- $e$  – uchyb regulacji,
- $\Delta e$  – przyrost uchybu regulacji,
- $e_{ust}$  – uchyb regulacji w stanie ustalonym,
- $k_e$  – współczynnik skalowania sygnału uchybu regulacji,
- $k_{\Delta e}$  – współczynnik skalowania sygnału przyrostu uchybu regulacji,
- $k_u$  – współczynnik skalowania sygnału sterującego na wyjściu regulatora,
- $t_r$  – czas regulacji
- $u'$  – sygnał sterujący na wyjściu regulatora,
- $u$  – sygnał sterujący,
- $y_o$  – żądana wartość poziomu cieczy (wielkość zadana),
- $y$  – rzeczywista wartość poziomu cieczy (wielkość regulowana),
- $z$  – zakłócenie,
- $\chi$  – przeregulowanie.

### **Wprowadzenie**

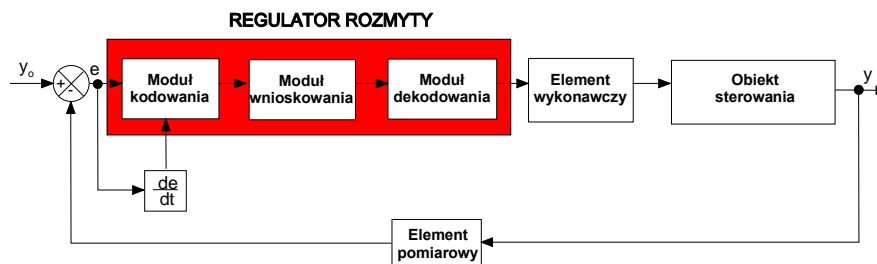
Podczas realizacji niektórych procesów technologicznych przemysłu spożywczego konieczne jest sterowanie poziomem cieczy w zbiorniku. Przykładowo układy takie znajdują zastosowanie w przetwórnictwie owoców, warzyw, ryb podczas

napełniania słoików z produktem zalewą, w mleczarniach podczas napełniania cystern mlekiem itd. Bardzo często pole powierzchni zbiornika zmienia się wraz z jego wysokością. Tym samym mamy wówczas do czynienia z nieliniowym procesem technologicznym (obiektem sterowania). Aktualnie najczęściej do sterowania procesami napełniania zbiorników cieczą wykorzystuje się regulatory dwupołożeniowe. Układy regulacji z regulatorami dwupołożeniowymi nie gwarantują jednak wymaganej jakości regulacji.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie układu sterowania, w którym do regulacji poziomu cieczy zastosowano zaprojektowany i zaimplementowany w środowisku programowym MATLAB regulator rozmyty (*Fuzzy Logic Controller* zwany także regulatorem lingwistycznym). Zaleca się stosowanie tych regulatorów do sterowania procesami nieliniowymi. Podczas syntezy regulatora rozmytego wykorzystano heurystyczną wiedzę operatora procesu technologicznego, wyniki badań eksperymentalnych tego procesu oraz elementy teorii zbiorów rozmytych. Regulatory takie nie są dotąd stosowane w przemyśle spożywczym.

### Układ regulacji poziomu cieczy w zbiorniku

W Zakładzie Automatyki Przemysłowej Politechniki Koszalińskiej zaprojektowano, zmontowano i uruchomiono stanowisko laboratoryjne, umożliwiające przeprowadzenie badań nieliniowego układu regulacji poziomu cieczy w zbiorniku z regulatorem rozmytym. Schemat blokowy tego układu pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji poziomu cieczy z regulatorem rozmytym  
 Fig. 1. Schematic diagram of liquid level control system utilizing fuzzy controller

Obiektem sterowania jest proces wymiany masy w zbiorniku z cieczą. Regulator rozmyty zaimplementowano w toolboxie *FUZZY LOGIC* środowiska programowego MATLAB. Rzeczywista wartość  $y$  poziomu cieczy w zbiorniku mierzona jest przez element pomiarowy – ultradźwiękowy czujnik poziomu typu MIC-31 firmy Microsonic. Element wykonawczy stanowi odśrodkowa pompa wodna typu APS 25–053 firmy Aspa.

## Synteza regulatora rozmytego metodą Mamdaniego

Zadaniem regulatora rozmytego (rys. 1) jest wypracowanie sygnału sterującego  $u'$  na jego wyjściu. Dokonuje tego na podstawie znajomości sygnałów wejściowych w postaci: uchybu regulacji  $e$  oraz przyrostu uchybu regulacji  $\Delta e$ . Uchyb regulacji  $e$  jest równy różnicy pomiędzy żadaną  $y_o$  oraz rzeczywistą  $y$  wartością poziomu cieczy w zbiorniku  $e = y_o - y$ .

Podczas projektowania regulatora operowano znormalizowanymi wartościami zmiennych  $e$ ,  $\Delta e$  i  $u'$  procesu. Wartości znormalizowane w większości zastosowań, podobnie jak w prezentowanym poniżej, pokrywają się z przedziałem domkniętym  $[-1,1]$ . Aby uzyskać znormalizowane wartości sygnałów przyjęto następujące współczynniki skalowania: dla sygnału  $e - k_e = 0.1$ , dla sygnału  $\Delta e - k_{\Delta e} = 0.1$  i dla sygnału  $u' - k_u = 10$ .

Proces projektowania regulatora rozmytego składa się z trzech etapów [Yager, Filew 1995]:

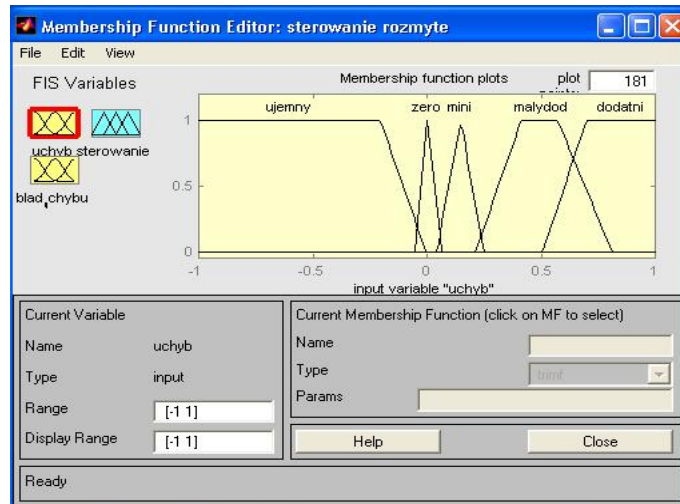
- Etapu kodowania lingwistycznego (rozmywania, fuzyfikacji),
- Etapu wnioskowania,
- Etapu dekodowania (wyostrzania, defuzyfikacji).

### Kodowanie lingwistyczne

Podczas realizacji kodowania lingwistycznego dokonujemy operacji przekształcania zmierzonych przez czujniki pomiarowe sygnałów uchybu regulacji  $e$  oraz przyrostów uchybu regulacji  $\Delta e$  w sygnały rozmyte. Sygnały  $e$  oraz  $\Delta e$  są sygnałami wejściowymi regulatora rozmytego.

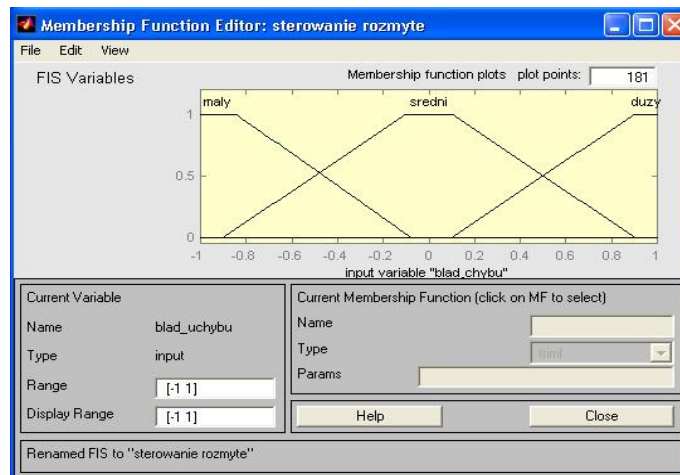
Operacja kodowania realizowana jest z wykorzystaniem funkcji przynależności elementów zbioru wartości sygnałów  $e$  oraz  $\Delta e$  do przyjętych przez projektanta – automatyka podzbiorów. Podczas syntezy regulatora zbiór wartości uchybu regulacji  $e$  podzielono na pięć podzbiorów wartości o nazwach: ujemne, zero, mini, małydod, dodatni. Na rysunku 2 pokazano, założony podczas projektowania regulatora, przebieg funkcji przynależności elementów zbioru  $e$  do poszczególnych podzbiorów.

Zbiór elementów zbioru wartości przyrostów uchybu regulacji  $\Delta e$  podczas syntezy regulatora podzielony został natomiast na trzy podzbiory wartości o nazwach: małe, średnie i duże. Na rysunku 3 pokazano, przyjęty przez projektanta regulatora, przebieg funkcji przynależności elementów zbioru  $\Delta e$  do poszczególnych podzbiorów.



Rys. 2. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru  $e$  do poszczególnych podzbiorów, zrealizowany w programie MATLAB

Fig. 2. Course of function of elements of the  $e$  set belonging to individual subsets, obtained in MATLAB application

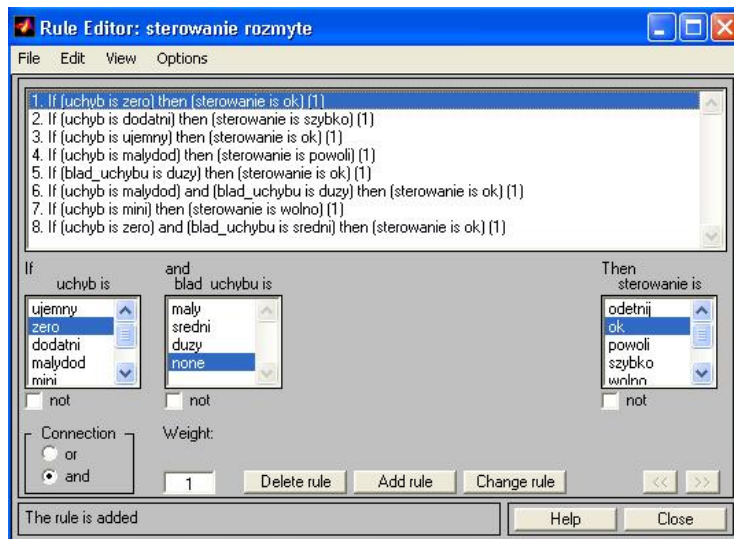


Rys. 3. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru przyrost uchybu regulacji  $\Delta e$  do poszczególnych podzbiorów, zrealizowany w programie MATLAB

Fig. 3. Course of function of elements of the  $\Delta e$  set belonging to individual subsets, obtained in MATLAB application

## Etap wnioskowania

Na podstawie przeprowadzonego wnioskowania lingwistycznego oraz znajomości rozmytych wartości sygnałów uchybu regulacji  $e$  oraz przyrostu uchybu regulacji  $\Delta e$  wyznaczone zostają rozmyte wartości sygnałów sterujących. Wnioskowanie przeprowadza się posługując zbiorem rozmytych zdań warunkowych – reguł sterowania. Opracowany przez projektanta regulatora zbiór reguł sterowania stanowi bazę reguł, nazywaną też tablicą decyzyjną. Fragment bazy reguł zaimplementowanej w toolboxie *Fuzzy Logic* programu MATLAB pokazano na rysunku 4.

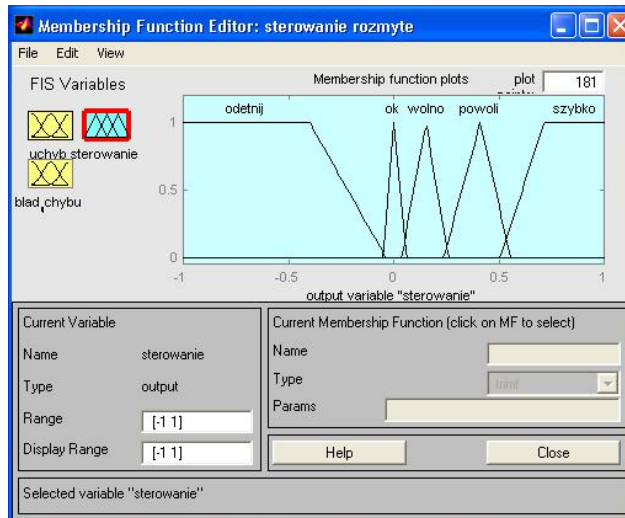


Rys. 4. Implementacja w toolboxie Fuzzy Logic programu MATLAB bazy reguł regulatora rozmytego

Fig. 4. Implementation of rule base of fuzzy controller in the Fuzzy Logic toolbox of the MATLAB application

## Etap dekodowania

Dekodowanie lingwistyczne to operacja polegająca na przekształceniu rozmytych wartości sygnałów sterujących w konkretne, liczbowe wartości sygnałów sterujących u' wyjściowych z regulatora. Podczas dekodowania wykorzystywana była funkcja przynależności elementów zbioru sygnałów sterujących u' do pięciu podzbiorów o nazwach: odetnij, ok, wolno, powoli, szybko. Przyjęty podczas projektowania regulatora przebieg funkcji przynależności elementów zbioru wartości sygnałów sterujących u' do podzbiorów pokazano na rysunku 5.



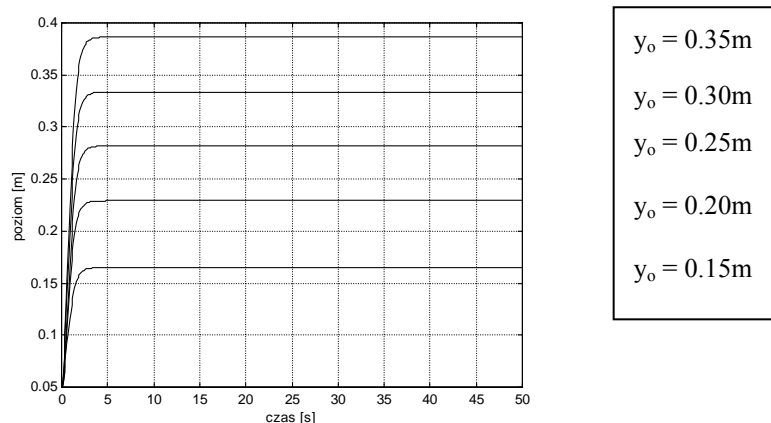
Rys. 5. Przyjęty podczas projektowania regulatora przebieg funkcji przynależności elementów zbioru wartości sygnałów sterujących  $u'$  do podzbiorów  
 Fig. 5. Course of function of elements of the control signal values  $u'$  set belonging to individual subsets, assumed while designing the controller

### Przykładowe wyniki badań układu regulacji poziomu cieczy z regulatorem rozmytym

Na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono badania, których celem było sprawdzenie poprawności funkcjonowania oraz jakość regulacji układu sterowania poziomem cieczy w zbiorniku z zaprojektowanym regulatorem rozmytym. Przyjęto, że układ posiada wymaganą jakość regulacji, gdy kryteria oceny jakości wynoszą:

- Uchyb regulacji w stanie ustalonym  $e_{ust} = \pm 3\%$ ,
- Przeregulowanie  $\chi = 0$ ,
- Czas regulacji  $t_r \leq 5s$ .

Poniżej przedstawione zostaną przykładowe wyniki badań układu. Na rysunku 6 pokazano zmiany w czasie poziomu cieczy w zbiorniku (sygnał  $y$  na rys. 1), uzyskane wówczas, gdy żądany poziom cieczy (sygnał  $y_o$  na rys. 1) miał postać skoku o wartościach:  $y_o = 0,35m$ ,  $y_o = 0,30m$ ,  $y_o = 0,25m$ ,  $y_o = 0,20m$ ,  $y_o = 0,15m$ . Przebiegi te noszą nazwę charakterystyk czasowych skokowych. Charakterystyki wyznaczono, nastawiając w programie MATLAB wartości współczynników skalowania równe:  $k_e = 0,1$ ,  $k_{\Delta e} = 0,1$  oraz  $k_u = 10$ .

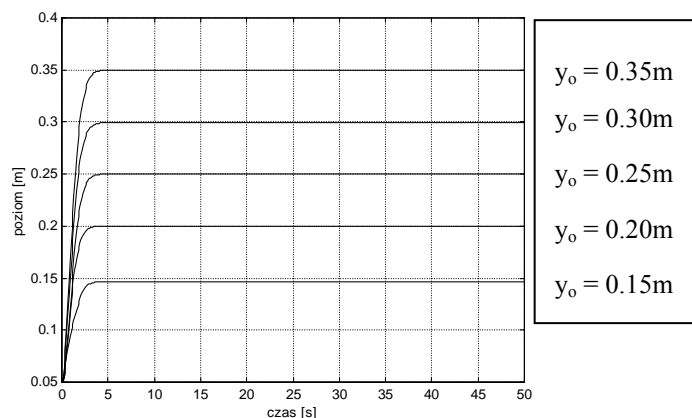


Rys. 6. Charakterystyki czasowe skokowe układu regulacji poziomu cieczy z regulatorem rozmytym, uzyskane po podaniu na wejście układu skoku wielkości zadanej równego:  $y_o = 0,35m$ ,  $y_o = 0,30m$ ,  $y_o = 0,25m$ ,  $y_o = 0,20m$ ,  $y_o = 0,15m$ , gdy współczynnik skalowania sygnału sterującego wynosił  $k_u = 10$  [Barszcz 2003]

Fig. 6. Time step characteristics of the liquid level control system utilizing fuzzy controller, obtained after the input of set step value equal:  $y_o = 0.35m$ ,  $y_o = 0.30m$ ,  $y_o = 0.25m$ ,  $y_o = 0.20m$ ,  $y_o = 0.15m$ , when the control signal scaling coefficient was  $k_u = 10$  [Barszcz 2003]

Prezentowane na rysunku 6 wyniki badań układu regulacji poziomu z regulatorem rozmytym pozwalają stwierdzić, że układ bez przeregulowania (tzn. przy  $\chi = 0$ ), z czasem regulacji krótszym od 5s osiąga stan ustalony. Maksymalną wartość uchybu regulacji układu w stanie ustalonym uzyskano w przypadku, gdy skok sygnału  $y_o$  wynosił 0,35m. Wartość ta była równa około 12%, podczas gdy wymagana wartość uchybu regulacji wynosiła 3%. A zatem dokładność układu w stanie ustalonym nie była zadawalająca.

Z badań układu wynika, że na jakość regulacji duży wpływ ma wartość współczynnika skalowania  $k_u$  sygnału wyjściowego z regulatora, nastawiana w *toolbox'ie Fuzzy Logic* programu MATLAB. Poprawę jakości regulacji w stanie ustalonym uzyskano po zmianie wartości współczynnika skalowania  $k_u$  sygnału na wyjściu regulatora z  $k_u = 10$  na  $k_u = 6,5$ . Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi charakterystyk czasowych skokowych układu regulacji poziomu cieczy, uzyskane wówczas, gdy żądany poziom cieczy miał postać skoku o wartościach:  $y_o = 0,35m$ ,  $y_o = 0,30m$ ,  $y_o = 0,25m$ ,  $y_o = 0,20m$ ,  $y_o = 0,15m$ , zaś współczynnik skalowania  $k_u$  ustawiony w układzie wynosił  $k_u = 6,5$ .



Rys. 7. Charakterystyki czasowe skokowe układu regulacji poziomu cieczy z regulatorem rozmytym, uzyskane po podaniu na wejście układu skoku wielkości zadanej równego:  $y_o = 0,35m$ ,  $y_o = 0,30m$ ,  $y_o = 0,25m$ ,  $y_o = 0,20m$ ,  $y_o = 0,15m$ , gdy współczynnik skalowania sygnału sterującego wynosił  $k_u = 6,5$  [Barszcz 2003]

Fig. 7. Time step characteristics of the liquid level control system utilizing fuzzy controller, obtained after the input of set step value equal:  $y_o = 0.35m$ ,  $y_o = 0.30m$ ,  $y_o = 0.25m$ ,  $y_o = 0.20m$ ,  $y_o = 0.15m$ , when the control signal scaling coefficient was  $k_u = 6.5$  [Barszcz 2003]

Jak to wynika z przebiegu charakterystyki skokowej pokazanej na rysunku 7, maksymalny uchyb regulacji  $e_{ust}$  w stanie ustalonym jest teraz równy 3% dla skoku wielkości zadanej  $y_o = 0,15m$ , przeregulowanie wynosi  $\chi = 0$ , zaś czas regulacji jest krótszy od 5 s. Zatem zaprojektowany układ spełnia postawione mu wymagania odnośnie jakości regulacji.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły przydatność regulatora rozmytego do sterowania poziomem cieczy w zbiorniku. Zaprojektowany układ zapewnia bowiem wymaganą, założoną jakość regulacji.

Podczas badań układu regulacji poziomu cieczy w zbiorniku z regulatorem rozmytym stwierdzono, że uchyb regulacji układu w stanie ustalonym zależy od wartości współczynnika skalowania  $k_u$  sygnału wyjściowego z regulatora. Podczas implementacji regulatora rozmytego w środowisku programowym MATLAB, poprzez dobór wartości tego współczynnika można wpływać na jakość regulacji w stanie ustalonym.



## **Bibliografia**

Yager R.R., Filev D.P. 1995. Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT Warszawa.

Barszcz K. 2003. Sterowanie procesem technologicznym z wykorzystaniem toolbox'a *fuzzy logic* programu LabView. Praca dyplomowa. Politechnika Koszalińska. Promotor E. Wachowicz.

## **CONTROLLING LIQUID LEVEL IN TANK USING THE FUSSY CONTROLLER**

### **Summary**

The paper presents liquid level control system utilizing fuzzy controller. The controller has been implemented in the MATLAB software environment.

**Key words:** controlling, liquid level, fussy controller