

Robert CZABAŃSKI

Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki

ZASTOSOWANIE STEROWANIA ROZMYTEGO W INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiony został przykład zastosowania regulatora rozmytego typu PID w procesie sterowania przepływową hodowlą bakterii. W mechanizmie wnioskowania regulatora zastosowany został destruktywny system wnioskowania, z rozmytą implikacją Reichenbacha wykorzystaną do reprezentacji reguł. Wartość liczbowa konieczną do sterowania procesem wyznaczano za pomocą zmodyfikowanej metody środka ciężkości $MICOG_{\alpha}$. Efektywność sterowania za pomocą tak opisanego regulatora potwierdzają przeprowadzone obliczenia.

FUZZY CONTROL APPLICATION IN BIOMEDICAL ENGINEERING

Summary. An application of fuzzy PID controller in the bacteria flow breed control process is presented in this paper. In the inference engine destructive (logical) type of approximate reasoning with Reichenbach fuzzy implication for the if-then rules interpretation has been applied. The discrete representative value (control signal) of the final membership function has been determined by means of a modified indexed center of gravity defuzzifier $MICOG_{\alpha}$. The effectiveness of this control method is shown by computer simulation.

1. Wprowadzenie

Sterowaniem nazywamy proces celowego oddziaływania na dane zjawisko tak, aby osiągnąć zamierzone cele. Sterownie może być realizowane „ręcznie”, tzn. przez człowieka, który na podstawie obserwacji regulowanego procesu oddziałuje na niego w sposób pozwalający osiągnąć pożądany efekt. Zastosowanie tego rodzaju sterowania jest jednak, dla większości regulowanych obiektów, niemożliwe. Człowiek zastępowany jest więc przez urządzenia, które realizują sterowanie na podstawie danych otrzymanych z pomiarów wybranych parametrów procesu (regulacja automatyczna).

Aby skonstruować efektywnie działający układ regulacji automatycznej, konieczne jest określenie dokładnego modelu matematycznego sterowanego procesu, na podstawie którego tworzona jest odpowiednia struktura układu regulacji. Procesy spotykane we współczesnej technice są jednak na ogół tak skomplikowane, że ich dokładne modelowanie nie jest możliwe, w związku z czym określenie struktury i parametrów układu regulacji jest bardzo utrudnione lub nawet niewykonalne. W takich przypadkach coraz powszechniej wykorzystywane są regulatory rozmyte. Ich działanie opiera się na modelowaniu sposobu sterowania prowadzonego przez operatora-człowieka, który pomimo braku znajomości modelu regulowanego układu potrafi zrealizować sterowanie wystarczająco dokładnie i wydajnie.

W celu przeprowadzenia regulacji rozmytej konieczne jest określenie struktury regulatora, zdefiniowanie mechanizmu wnioskowania oraz wyznaczenie bazy wiedzy. Wśród regulatorów rozmytych można wyróżnić struktury mające swe odpowiedniki w klasycznej teorii sterowania (regulatory rozmyte typu PI, PD oraz PID) [1]. W procesie sterowania większe znaczenie praktyczne mają regulatory rozmyte typu PI za względu na trudności wyeliminowania błędów w stanie ustalonym dla regulatorów typu PD [7]. Podstawową ich wadą jest jednak niska jakość sterowania w stanie przejściowym, szczególnie dla obiektów wyższych rzędów. Rozwiązaniem jest zastosowanie regulatora rozmytego typu PID, posiadającego zalety regulatorów typu PI oraz PD.

W regulatorach rozmytych wnioskowanie przeprowadzane jest najczęściej przy użyciu relacji rozmytej Larsena [8]. Możliwe jest jednak zastosowanie systemów wnioskowania, w których reguły interpretowane są jako implikacje rozmyte, i uzyskanie równoważnych rezultatów [3].

Dla prawidłowego działania regulatora rozmytego istotne znaczenie ma poprawnie skonstruowana baza wiedzy. Do tej pory nie powstała systematyczna procedura wyznaczania reguł rozmytych [6], w związku z tym powstają one najczęściej na podstawie praktycznego doświadczenia człowieka-operatora. Jest to metoda subiektywna, lecz prowadząca do satysfakcjonujących rezultatów.

W pracy przedstawiony został przykład zastosowania regulatora rozmytego typu PID do realizacji sterowania w bioinżynierii. Artykuł podzielony został na 7 części. Uwagi wstępne zgromadzono w części 1. Część 2 zawiera opis struktury regulatora rozmytego. Uwagi dotyczące projektowania regulatorów rozmytych zawarte zostały w części 3, a w 4 przedstawione zostały podstawowe typy regulatorów rozmytych. Matematyczny model przepływowej hodowli bakterii zaprezentowano w części 5. Wyniki symulacji procesu regulacji przedstawiono w części 6. Najważniejsze wnioski zostały zebrane w części 7.

2. Struktura regulatora rozmytego

Działanie regulatora rozmytego opiera się na modelowaniu sposobu regulacji realizowanego przez operatora-człowieka. Próby sformalizowania wiedzy operatora prowadzą do zapisania reguł w postaci:

$R^{(k)}$: JEŻELI warunki(k) TO akcje(k),

których skończony zbiór tworzy tzw. bazę reguł (*ang. rule base*).

W większości regulatorów rozmytych sterowanie wyznaczone jest na podstawie zmierzonego błędu (e), czyli odchylenia bieżącej wielkości sterowanej od wartości zadanej oraz zmiany błędu w czasie (de). Odpowiednie reguły będą więc miały postać:

$R^{(k)}$: JEŻELI (błąd jest $E^{(k)}$) I (zmiana błędu jest $dE^{(k)}$) TO (sterowanie jest $U^{(k)}$)

gdzie:

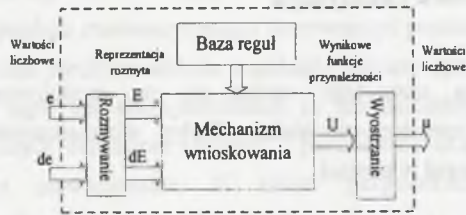
$k=1,2,\dots, K$ - oznacza numer reguły,

$U^{(k)}$ - to wielkość lingwistyczna wyznaczona na podstawie k -tej reguły.

Należy zwrócić uwagę, że wielkości występujące w powyższym zapisie (E , dE , U) nie są konkretnymi wartościami liczbowymi, a lingwistycznymi termami (np. „mały”, „duży”), którym odpowiadają zbiory rozmyte o określonej funkcji przynależności.

Regulator rozmyty wyznacza wartość wielkości sterującej na podstawie bazy reguł, wartości błędu oraz wartości zmiany błędu wykorzystując tzw. złożeniową regułę wnioskowania [11]. Proces wnioskowania oparty na złożeniowej regule wnioskowania, pozwalający na przetwarzanie nieprecyzyjnej wiedzy reprezentowanej w postaci zbiorów rozmytych, nazywany jest wnioskowaniem przybliżonym (wnioskowaniem rozmytym).

Ponieważ informacje uzyskiwane z obserwacji sterowanego procesu mają postać konkretnych liczb, w celu przeprowadzenia wnioskowania przybliżonego konieczne jest przekształcenie wielkości wejściowych na postać rozmytą. Również rozmytą wielkość wyjściową (sterowanie), będącą wynikiem wnioskowania przybliżonego, należy przekształcić na konkretną wartość liczbową. Operacje te wykonywane są przez odpowiednie bloki funkcjonalne regulatora rozmytego: układ rozmywania (*ang. fuzzyfication*) i wyostrzania (*ang. defuzzyfication*). Schemat regulatora rozmytego można przedstawić w następujący sposób:



Rys. 1. Schemat regulatora rozmytego
Fig. 1. The schematic of fuzzy logic controller

Wartości liczbowe (zmierzone) błędu e_0 i zmiany błędu de_0 są w procesie rozmywania przekształcane na odpowiadające im tzw. rozmyte impulsy jednostkowe:

$$\begin{aligned} E'(e_0) &= \delta_{e,e_0}, \\ dE'(de_0) &= \delta_{de,de_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$E'(e)$, $dE'(de)$ – oznaczają odpowiednio funkcję przynależności błędu oraz zmiany błędu,

$$\delta_{x,x_0} = \begin{cases} 1 & x = x_0 \\ 0 & x \neq x_0 \end{cases} \text{ - oznacza deltę Kroneckera.}$$

Stanowią one zmienne wejściowe dla procesu wnioskowania rozmytego. Wyniki wnioskowania zależą od wyboru odpowiedniego schematu wnioskowania. Ze względu na sposób interpretacji reguł, z którego wynikają różnice w metodach wyznaczania konkluzji końcowej, można wyróżnić dwa podstawowe systemy wnioskowania rozmytego: konstruktywne i destruktywne (logiczne). W systemach konstruktywnych wykorzystuje się koniunkcyjną interpretację reguł „jeżeli-to”, natomiast w systemach destruktywnych reguły interpretowane są poprzez rozmyte implikacje analogiczne do klasycznych implikacji logicznych. W każdym z wymienionych modeli wnioskowanie można przeprowadzić dwiema metodami: FITA (*ang. First Agregate Then Inference – najpierw agregacja, potem wnioskowania*) lub FATI (*ang. First Agregate Then Inference – najpierw wnioskowanie, potem agregacja*). W systemach konstruktywnych obie metody prowadzą do równoważnych wyników. W systemach destruktywnych rezultaty wnioskowania przybliżonego FATI są podzbiorem wyników uzyskiwanych metodą FITA. W przykładzie numerycznym przedstawionym w dalszej części artykułu wykorzystany został logiczny system wnioskowania typu FATI.

W systemach destruktywnych reguła:

JEŻELI E jest $E^{(k)}$ **I** dE jest $dE^{(k)}$ **TO** U jest $U^{(k)}$

interpretowana jest jako:

NIE (E jest $E^{(k)}$ **I** dE jest $dE^{(k)}$) **LUB** U jest $U^{(k)}$.

Jeżeli do reprezentacji wyrażenia „jeżeli-to” wykorzystamy rozmytą implikację Reichenbacha określoną równaniem

$$I^{(k)}[E^{(k)}(e), dE^{(k)}(e), U^{(k)}(u)] = 1 - E^{(k)}(e) *_{t} dE^{(k)}(e) + [E^{(k)}(e) *_{t} dE^{(k)}(e)] U^{(k)}(u) \quad (2)$$

gdzie:

$*_{t}$ - oznacza t-normę, czyli działanie $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, które jest: przemienne, łączne, monotoniczne i tożsame względem jedynki, operator sumy do agregacji reguł oraz produkt jako t-normę wynikową funkcję przynależności można określić za pomocą poniższej zależności:

$$U'(u) = \sum_k \{1 + E^{(k)}(e_0) dE^{(k)}(de_0) [U^{(k)}(u) - 1]\} \quad (3)$$

Do sterowania procesem konieczna jest pojedyncza wartość liczbowa. Otrzymujemy ją po przeprowadzeniu operacji wyostrzania na uzyskanym zbiorze rozmytym. Spośród różnych dostępnych metod wyostrzania w przykładzie numerycznym zastosowano metodę $MICOG_{\alpha}$ (*Modified Indexed Center Of Gravity*). W metodzie tej reprezentatywny element wynikowego zbioru rozmytego poszukiwany jest wśród elementów o wartościach funkcji przynależności wyższych od ustalonego progu (pomijana jest nieinformatywna część funkcji przynależności). Metoda $MICOG_{\alpha}$ określona jest następującą zależnością [3]:

$$u' = \frac{\int_u [U'(u) - \alpha] du}{\int_u [U'(u) - \alpha] du} \quad (4)$$

gdzie:

$\alpha = \min_u [U'(u)]$ - oznacza wartość progową funkcji przynależności

Tak uzyskane wyniki są równoważne z tymi, które otrzymujemy za pomocą wnioskowania przy użyciu relacji rozmytej Larsena [3], najczęściej stosowanego do wypracowywania wartości sterowania w regulatorach rozmytych [8].

3. Projektowanie regulatorów rozmytych

Proces projektowania regulatora rozmytego polega na określeniu bazy wiedzy, na której oparto wypracowywanie sterowania według wybranego algorytmu. Baza wiedzy składa się z bazy reguł oraz bazy danych. Choć istnieją metody projektowania bazy reguł na podstawie obserwacji dynamiki regulowanego procesu [1], [6], to reguły często tworzone są na podstawie wiedzy i doświadczenia człowieka-operatora. Jest to metoda wysoce subiektywna, lecz pozwalająca uzyskać zadowalające rezultaty. Bazę danych podzielić można na bazę rozmytych przesłanek i bazę rozmytych konkluzji. Wartości każdej z przesłanek i konkluzji są termami lingwistycznymi o określonej funkcji przynależności. Powszechnie wykorzystywane są następujące klasy funkcji przynależności: trójkątna (zastosowana w tej pracy), trapezowa, gaussowska, sigmoidalna i dzwonowa. Okazuje się jednak, że kształt funkcji przynależności nie ma istotnego wpływu na jakość regulacji [7].

Najważniejszym zadaniem związanym z projektowaniem bazy danych jest określenie stopnia rozmytości zmiennych wejściowych i wyjściowych. Zmianę stopnia rozmytości zmiennej można uzyskać przez liniowe jej przeskalowanie [6]. Współczynniki skalowania dobierane są metodami prób i błędów aż do uzyskania satysfakcjonujących wyników. Heurystyczne reguły strojenia regulatorów rozmytych podane zostały w pracy [7]. Dla regulatorów klasycznych również istnieją pewne zasady określania nastaw regulatorów bez konieczności znajomości własności dynamicznych sterownych obiektów (reguły Zieglera-Nicholsa, reguły Pessena [4]). Nastawy te nie zapewniają jednak określonego standardu jakości sterowania. Powoduje to, dla niektórych regulowanych obiektów, konieczność dostrojenia regulatora metodami doświadczalnymi.

4. Typy regulatorów rozmytych

Jednym z kryteriów podziału regulatorów klasycznych jest postać ich transmitancji operatorowej. Kryterium to wyróżnia następujące typy regulatorów rozmytych [5]:

- regulatory proporcjonalno-całkowe, zwane krótko regulatorami (typu) PI,
- regulatory proporcjonalno-różniczkowe, zwane krótko regulatorami PD,
- regulatory proporcjonalno-całkowo-różniczkowe, zwane krótko regulatorami PID.

Każdy z nich posiada swój „rozmyty” odpowiednik.

4.1. Regulator rozmyty typu PI

Klasyczny regulator PI opisywany jest poniższym równaniem różniczkowym:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right], \quad (5)$$

gdzie:

$e(t)$ - jest sygnałem błędu, zdefiniowanym jako różnica pomiędzy wartością zadaną a wartością wielkości sterowanej,

$u(t)$ - to wartość wielkości sterującej,

T_i - to czas zdwojenia (całkowania),

K_p - to współczynnik wzmocnienia regulatora.

Równanie to można zapisać w postaci dyskretnej:

$$u(n) = K_p \left[e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{n-1} e(j) \right], \quad (6)$$

gdzie:

T - oznacza okres próbkowania.

Wprowadzając oznaczenia:

$$\begin{aligned} \Delta u(n) &= u(n) - u(n-1), \\ \Delta e(n) &= e(n) - e(n-1) \end{aligned} \quad (7)$$

równanie (6) można zapisać w postaci:

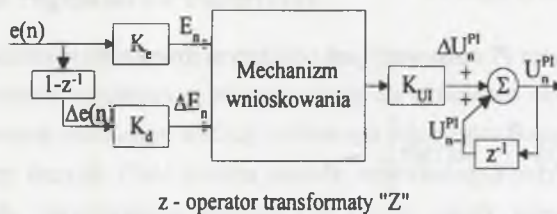
$$u(n) = u(n-1) + \Delta u(n) = u(n-1) + K_p \Delta e(n) + K_i e(n), \quad (8)$$

gdzie

$$K_i = \frac{K_p T}{T_i}, \quad (9)$$

to współczynnik wzmocnienia części całkującej.

Strukturę regulatora rozmytego PI opisanego równaniem (8) przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Struktura regulatora rozmytego typu PI

Fig. 2. The structure of fuzzy PI controller

Zależności pomiędzy współczynnikami skalującymi K_e , K_d , K_{UI} a współczynnikami wzmocnienia K_p i K_I określają poniższe równania [7]:

$$\begin{aligned} K_p &= K_{UI} F\{K_d\}, \\ K_I &= K_{UI} F\{K_e\}, \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie:

$F\{\}$ - oznacza funkcję reprezentującą operacje związane z przeprowadzaniem wnioskowaniem rozmytym.

4.2. Regulator rozmyty typu PD

Klasyczny regulator PD opisywany jest równaniem:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (11)$$

gdzie:

T_d - oznacza czas wyprzedzania (różniczkowania).

Poniżej przedstawiona została dyskretna postać równania (11).

$$u(n) = K_p \left[e(n) + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \right] \quad (12)$$

Wprowadzając oznaczenia (7) powyższe równanie można przedstawić w postaci:

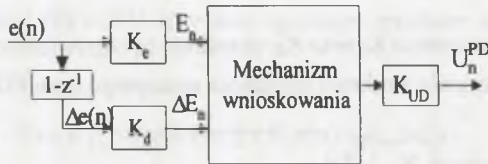
$$u(n) = K_p e(n) + K_D \Delta e(n), \quad (13)$$

gdzie

$$K_D = \frac{K_P T_d}{T}, \quad (14)$$

to współczynnik wzmocnienia części różniczkującej.

Równanie (13) opisuje regulator rozmyty PD, którego strukturę przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Struktura regulatora rozmytego typu PD
Fig. 3. The structure of fuzzy PD controller

Współczynniki wzmocnienia rozmytego regulatora PD określają poniższe równania [7]:

$$\begin{aligned} K_P &= K_{UD} F\{K_e\}, \\ K_D &= K_{UD} F\{K_d\} \end{aligned} \quad (15)$$

Operacja całkowania w regulatorze rozmytym PI pozwala na zmniejszenie do zera błędu sterowania w stanie ustalonym, lecz zapewnia dobrą regulację jedynie przy wymuszeniach wolnozmennych. Regulatory PD posiadają szersze pasmo regulacji niż regulatory PI, ale charakteryzują się gorszą jakością regulacji przy małych częstotliwościach wymuszeń. Zalety obu typów regulatorów łączy regulator typu PID.

4.3. Regulator rozmyty typu PID

Działanie klasycznego regulatora typu PID opisane jest następującym równaniem różniczkowo-całkowym:

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (16)$$

Przekształcając równanie (16) do postaci dyskretniej otrzymamy poniższą zależność:

$$u(n) = K_P \left[e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(n) + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \right]. \quad (17)$$

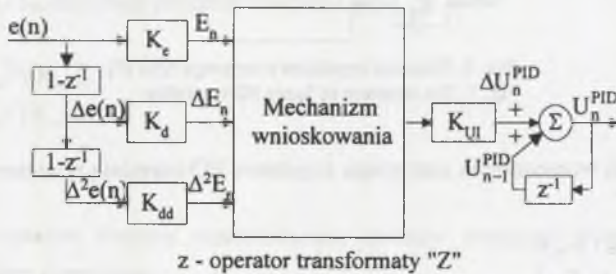
Wykorzystując równania (7) i oznaczając:

$$\Delta^2 e(n) = \Delta e(n) - \Delta e(n-1) \quad (18)$$

równanie (17) można przekształcić do postaci:

$$u(n) = u(n-1) + \Delta u(n) = u(n-1) + K_p \Delta e(n) + K_I e(n) + K_D \Delta^2 e(n). \quad (19)$$

Współczynniki wzmocnienia K_I oraz K_D określone są odpowiednio równaniami (9) i (14). Poniższy rysunek przedstawia strukturę regulatora rozmytego typu PID.



Rys. 4. Struktura regulatora rozmytego typu PID
Fig. 4. The structure of fuzzy PID controller

Współczynniki wzmocnienia regulatora rozmytego typu PID określają równania (20).

$$\begin{aligned} K_p &= K_{UID} F\{K_d\}, \\ K_I &= K_{UID} F\{K_e\}, \\ K_D &= K_{UID} F\{K_{dd}\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Wprowadzenie dodatkowej zmiennej wejściowej ($\Delta^2 e(n)$) nie powoduje istotnego polepszenia jakości regulacji [7], wymaga natomiast znacznego zwiększenia liczby reguł w bazie. Wpływa to na wzrost liczby wymaganych obliczeń i spadek szybkości działania regulatora. Dla regulatora PI (struktura dwuwejściowa) posiadającego dwa wejścia o siedmiu zbiorach rozmytych, liczba reguł kompletnej bazy reguł wynosi $7 \cdot 7 = 49$. Dodanie kolejnego wejścia o 7 zbiorach rozmytych w regulatorze PID zwiększa liczbę wymaganych reguł do $7 \cdot 7 \cdot 7 = 343$. W wielu pracach (m.in. [1, 6, 9]) przedstawione zostały zmienione struktury regulatorów rozmytych zachowujących cechy regulatora PID, których sterowanie wypracowywane jest bez tak istotnego wzrostu liczby reguł w bazie.

4.4. Dwuwęściowy regulator rozmyty typu PID

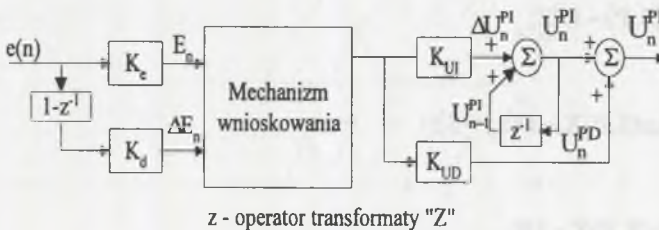
W rozdziale tym przedstawiona zostanie struktura regulatora PID zaproponowana w pracy [7]. Sygnał wyjściowy regulatora rozmytego typu PID można przedstawić jako sumę sygnałów sterujących regulatorów rozmytych typu PI oraz PD:

$$U_n^{PID} = U_n^{PI} + U_n^{PD}. \quad (21)$$

Uwzględniając zależności (8) i (13) równanie opisujące regulator rozmyty PID przyjmuje postać:

$$u^{PID}(n) = u^{PI}(n-1) + K_p[\Delta e(n) + e(n)] + K_I e(n) + K_D \Delta e(n). \quad (22)$$

Rysunek 5 przedstawia strukturę tak zdefiniowanego regulatora. Dla obu części regulatora (PI i PD) zastosowana została wspólna baza reguł co redukuje nakład pracy związany z fazą projektowania. Konstrukcja, w której zastosowane zostały dwa niezależne mechanizmy wnioskowania zaprezentowana została w pracy [10].



Rys. 5. Struktura dwuwęściowego regulatora rozmytego typu PID
Fig. 5. The structure of fuzzy PID controller with two inputs

Współczynniki wzmocnienia można określić równaniami [7].

$$\begin{aligned} K_p &= K_{UI}F\{K_d\} + K_{UD}F\{K_e\}, \\ K_I &= K_{UI}F\{K_e\}, \\ K_D &= K_{UD}F\{K_d\}. \end{aligned} \quad (23)$$

5. Przepływowa hodowla mikroorganizmów

Przepływowe hodowle bakterii wykorzystywane są od dawna na skalę przemysłową, ponieważ zapewniają one produkcję ciągłą jednorodnej masy komórek, wypływających z urządzenia zawierającego hodowlę [2]. Odpowiednia koncentracja biomasy osiągnięta jest

poprzez zmianę stężenia lub prędkości przepływu dostarczanego do układu substratu. Hodowla przepływowa, działająca na zasadzie homeostatu, charakteryzuje się istnieniem stabilnego stanu równowagi, w którym masa odprowadzanych z układu komórek jest równoważona przez masę nowo powstających. Szybkość wzrostu biomasy można w tym przypadku opisać za pomocą równania Monoda-Jeruzalimskiego [2].

$$\mu(S, P) = \frac{\mu_m S K_1}{(S + K_2)(P + K_1)}, \quad (24)$$

gdzie:

S - oznacza stężenie pożywki,

P - stężenie produktu,

μ_m , K_1 , K_2 - są wyznaczonymi eksperymentalnie stałymi.

Równania wyrażające koncentrację biomasy X, pożywki S oraz produktu P można zapisać w postaci:

$$\frac{dX}{dt} = [\mu(S, P) - D]X, \quad (25)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha\mu(S, P)X + D(S_0 - S), \quad (26)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha'\mu(S, P)X - DP. \quad (27)$$

W zapisanym powyżej układzie równań różniczkowych D oznacza prędkość wymywania (przepływu roztworu przez zbiornik), S_0 oznacza stężenie pożywki na wejściu zbiornika, wielkość α^{-1} nazywana jest współczynnikiem efektywności wskazującym, jaka część substratu zostaje wykorzystana jako budulec dla powstającej biomasy, natomiast α' to współczynnik proporcjonalności ($\alpha' \leq \alpha - 1$).

6. Symulacja procesu regulacji

Procesy regulacji modelowane były numerycznie poprzez rozwiązywanie układów równań różniczkowych (25)-(27) metodą Rungego-Kutty czwartego rzędu. Ponieważ przepływowa hodowla mikroorganizmów jest procesem wolnozmiennym (czas symulacji jest rzędu godzin) okres próbkowania wybrany został jako 0.01 godziny. Symulacja

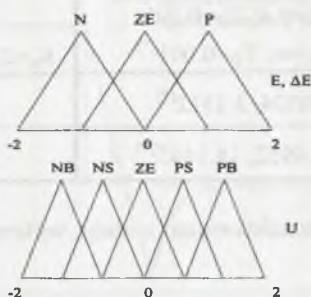
przeprowadzona została z wykorzystaniem klasycznego regulatora PID oraz regulatora rozmytego, którego struktura przedstawiona została w rozdziale 4.4. Baza reguł regulatora rozmytego przedstawiona została w tabeli 1. Postać funkcji przynależności zbiorów rozmytych związanych z lingwistycznymi terminami zmiennych wejściowych i zmiennej wyjściowej przedstawiono na rysunku 6.

Tabela 1

Baza reguł regulatora rozmytego

$\Delta E \setminus E$	N	ZE	P
N	PB	PS	ZE
ZE	PS	ZE	NS
P	ZE	NS	NB

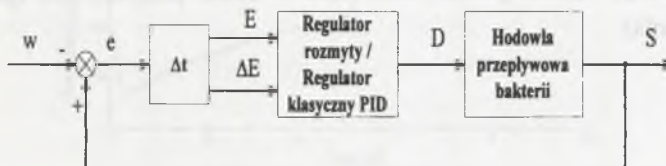
Skróty użyte w powyższej tabeli oznaczają: ZE – zero, P – dodatni, PB – dodatni duży, PS – dodatni mały, N – ujemny, NB – ujemny duży, NS – ujemny mały.



Rys. 6. Postać funkcji przynależności zmiennych wejściowych (błędu E , zmiany błędu ΔE) i zmiennej wyjściowej (sterowania U)

Fig. 6. The membership functions of inputs (error E , change in error ΔE) and output (control U)

Program symulacji zakładał stabilizację koncentracji pożywki na wylocie zbiornika na poziomie $27.4 \text{ [g/dm}^3\text{]}$, a po upływie 5 godzin - $17 \text{ [g/dm}^3\text{]}$. Warunki początkowe dla układu to $X=85.46 \text{ [g/dm}^3\text{]}$, $S=17.62 \text{ [g/dm}^3\text{]}$ i $P=0.1 \text{ [g/dm}^3\text{]}$. Czas symulacji wynosił 10 godzin. Schemat układu regulacji pokazany został na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat układu regulacji

Fig. 7. The schematic of the control system

Do oceny jakości sterownia wykorzystane zostały następujące całkowite wskaźniki jakości:

$$I_1 = \int e^2 dt, \quad (28)$$

$$I_2 = \int te^2 dt.$$

Wskaźnik I_1 jest ogólną miarą jakości sterowania, natomiast I_2 pozwala ocenić szybkość sterowania oraz jego jakość w stanie ustalonym. Wartości wskaźników wyznaczone dla symulowanych numerycznie procesów regulacji przedstawione zostały w tabeli 2. Symbolem (*) oznaczone zostały wyniki obliczeń dla nastaw regulatora pozwalających na osiągnięcie najmniejszych wartości wskaźników jakości oraz najmniejszych przeregulowań kosztem niezerowych błędów w stanie ustalonym.

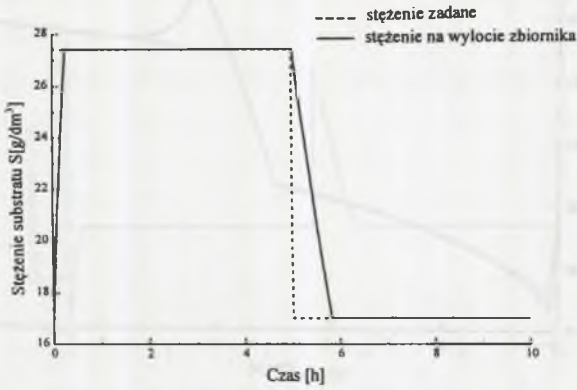
Tabela 2

Porównanie jakości sterowania

	Klasyczny regulator typu PID $K_P=2.2; T_I=0.4; T_D=0.001$ $K_P=2.5; T_I=\infty; T_D=0.001^{(*)}$	Rozmyty dwuwęściowy regulator typu PID $K_e=2; K_d=3.4; K_{UI}=0.61; K_{UD}=0.11$
I_1	4.6524, 3.1512 ^(*)	4.054
I_2	23.4952, 14.1445 ^(*)	15.047

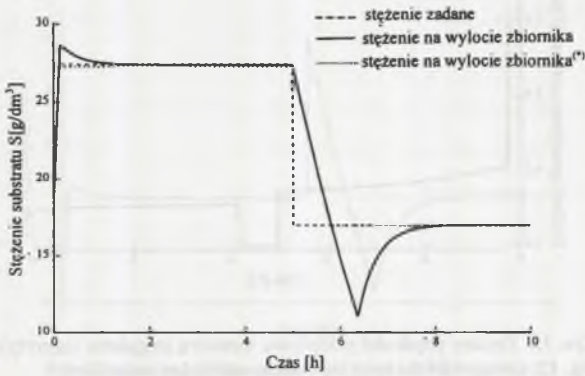
Na rysunkach 8-15 przedstawione zostały wykresy wybranych parametrów procesu regulacji.

Wykorzystanie regulatora rozmytego w procesie sterowania przepływową hodowlą bakterii pozwala na uzyskanie zadowalającej jakości sterowania zarówno w stanie ustalonym jak i przejściowym. Istnieje pewne opóźnienie odpowiedzi układu w stosunku do zmian wymuszenia spowodowane operacją całkowania. W układzie, w którym zastosowano klasyczny regulator PID, duże szybkości reakcji na zmiany wartości zadanej uzyskiwane są po redukcji struktury regulatora (wylimowanie części całkującej). Powoduje to jednak pojawienie się błędów regulacji w stanie ustalonym. Ich minimalizacja do wartości zerowej możliwa jest dopiero po zmniejszeniu stałej całkowania. Powoduje to jednak powstanie niedopuszczalnego spadku jakości sterowania w stanie przejściowym (powstają znaczne przeregulowania).



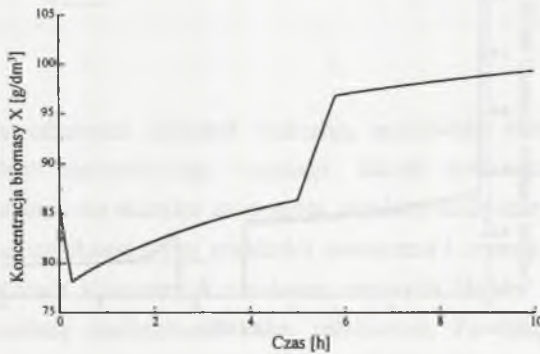
Rys. 8. Zmiany stężenia pożywki na wyjściu zbiornika (regulator rozmyty)

Fig. 8. The nourishment concentration changes in the output of the container (fuzzy controller)



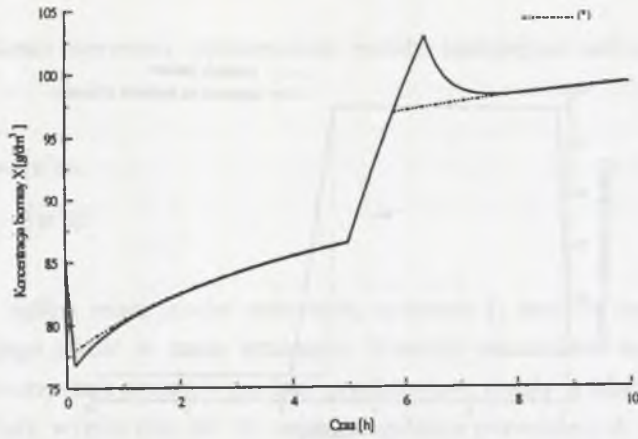
Rys. 9. Zmiany stężenia pożywki na wyjściu zbiornika (regulator klasyczny)

Fig. 9. The nourishment concentration changes in the output of the container (classical controller)



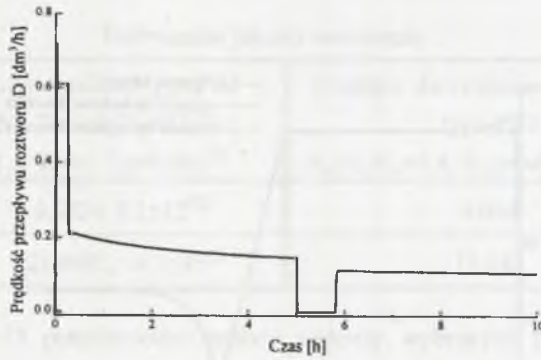
Rys. 10. Zmiany koncentracji biomasy (regulator rozmyty)

Fig. 10. Changes of the biomass concentration (fuzzy controller)



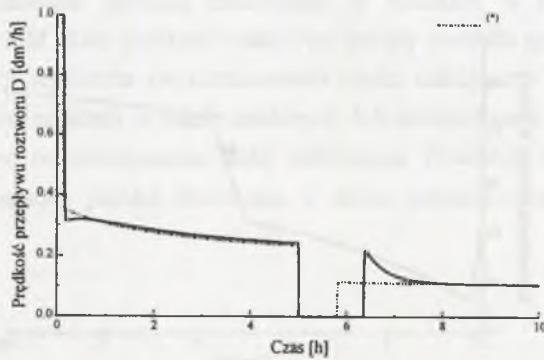
Rys. 11. Zmiany koncentracji biomasy (regulator klasyczny)

Fig. 11. Changes of the biomass concentration (classical controller)



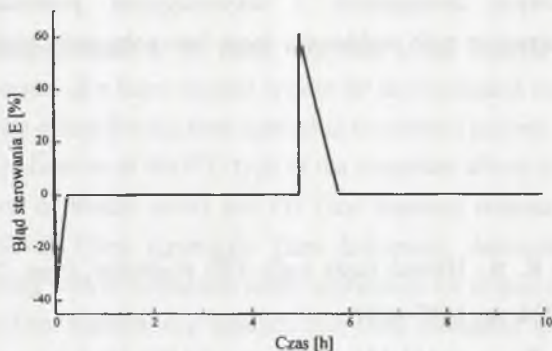
Rys. 12. Zmiany prędkości przepływu roztworu (regulator rozmyty)

Fig. 12. Changes of the solution flow speed (fuzzy controller)

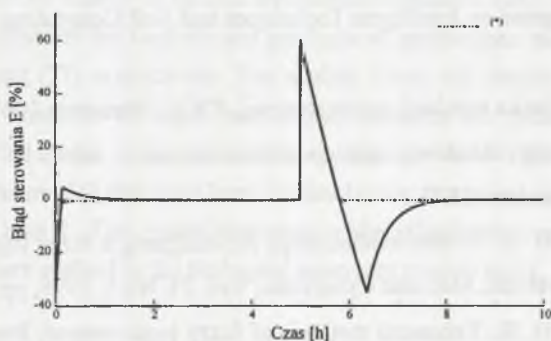


Rys. 13. Zmiany prędkości przepływu roztworu (regulator klasyczny)

Fig. 13. Changes of the solution flow speed (classical controller)



Rys. 14. Zmiany błędu sterowania (regulator rozmyty)
Fig. 14. Changes of the control error (fuzzy controller)



Rys. 15. Zmiany błędu sterowania (regulator klasyczny)
Fig. 15. Changes of the control error (classical controller)

7. Wnioski

Rezultaty przeprowadzonych obliczeń wskazują możliwość stosowania sterowania rozmytego w układach automatycznej regulacji. Jakość sterowania rozmytego jest porównywalna z wynikami uzyskanymi za pomocą regulacji klasycznej. Użycie regulatora rozmytego pozwala na uzyskanie dużej szybkości sterowania i zerowych błędów w stanie ustalonym. W regulatorach klasycznych uzyskanie zerowych błędów w stanie ustalonym wiąże się z koniecznością zmniejszenia czasu całkowania. Powoduje to powstanie w badanym układzie znacznych przeregulowań oraz dużego zmniejszenia szybkości regulacji, wynikiem czego jest istotny spadek jakości sterowania. Zasadnicze wady regulatora

rozmytego związane są z brakiem systematycznych metod projektowania bazy wiedzy oraz nakładem obliczeniowym zawiązanym z sekwencyjnym przetwarzaniem reguł i wyostrzaniem. Rozwiązaniem tych problemów może być połączenie logiki rozmytej i sieci neuronowych.

Literatura

1. Brehm T., Rattan K. S.: Hybrid fuzzy logic PID controller, Proc. 3rd IEEE Conf. on Fuzzy Systems, 1994, pp. 1682-1687.
2. Czernawski D. S., Romanowski J.M., Stiepanowa N.W.: Modelowanie matematyczne w biofizyce, PWN, Warszawa 1979.
3. Czogała E., Łęski J.: An equivalence of approximate reasoning under defuzzification using both conjunction and logical implication interpretation of fuzzy if-then rules, the 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Aachen 1998, pp. 669-673.
4. Findeisen W.: Technika regulacji automatycznej, PWN, Warszawa 1969.
5. Kaczorek T.: Teoria układów regulacji automatycznej - część I, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1973.
6. Li H.-X., Gatland H. B.: A new methodology for designing a fuzzy logic controller, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic, Vol. 35, No 3, 1995, pp. 505-512.
7. Li H.-X., Gatland H. B.: Enhanced methods of fuzzy logic control, Proc. 4th IEEE Conf. on Fuzzy Systems, 1995, pp. 331-336.
8. Lee C. C.: Fuzzy logic control systems: fuzzy logic controller – Part I/Part II, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic, Vol. 20, No 2, 1990, pp. 404-435.
9. Lee J.: On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 1, No 4, 1993, pp. 298-301.
10. Pivonka P., Sidlo M.: Fuzzy PI+PD controller, Busefal, 1997, pp. 93-97.
11. Zadeh L. A.: Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic, Vol. 3, 1973, pp. 28-44.

Recenzent: Dr hab. Józef Drewniak

Abstract

In this paper an application of the fuzzy controller in the bacteria flow breed control is considered. A schematic of a fuzzy control system for the regulation control task is shown in Fig. 7. The fuzzy PID controller has been applied in the control process. Its structure has been shown in Fig. 5. Application of the PID type of the controller allows to combine advantages of both PI (removal of steady error) and PD (fast transient response) controllers. In the inference engine FATI (First Aggregate Then Inference), destructive (logical) type of approximate reasoning with Reichenbach fuzzy implication for if-then rules interpretation has been applied. The final membership function has been calculated using formula (3). The crisp, representative value (control signal) has been determined using a modified indexed center of gravity defuzzifier $MICOG_{\alpha}$ (4). It allows to eliminate the non-informative part of the membership function. To show the performance of fuzzy logic control the application to the bacteria flow breed control process has been presented. The speed of the biomass growth has been calculated by means of Monod-Jeruzalimski equation (24). The concentrations of biomass, nourishment for the bacteria and products of metabolism may be expressed in the forms (25), (26) and (27) respectively. The applied fuzzy rule matrix is shown in Table 1. The membership functions of input and output variables are presented in Fig. 6. The experimental results of the computer simulation are shown in Figs. 8-15. Values of the control quality indexes (28) that have been obtained using fuzzy and classical PID controllers are presented in Table 2. The results demonstrate the effectiveness and competitiveness of fuzzy PID controllers applied in the biological processes control tasks.