ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: AUTOMATYKA z. 133 Nr kol 1526

Paweł BOBROWSKI

BAZY WIEDZY MODELI ROZMYTYCH REGULATORÓW CIĄGŁYCH PI ORAZ PID

Streszczenie. W pracy zaproponowano modele rozmyte dla ciągłych regulatorów PI oraz PID. Na podstawie odpowiedzi czasowych układu otwartego i zamkniętego z regulatorem konwencjonalnym oraz jego modelem rozmytym zbadano wpływ użytych operatorów oraz liczby reguł na jakość sterowania. Zbadano też wpływ tych czynników na kształt charakterystyki przetwarzania modelu rozmytego.

KNOWLEDGE BASES OF THE FUZZY PI AND PID CONTROLERS

Summary. In the following work there was given a fuzzy models of PI and PID controlers. The fuzzy controlers based on the knowledge base derived in this paper were tested and compared with continuous controlers in time and input-output surface domains. This comparision helped to find the real cause of inaccuracy.

1. Wprowadzenie

Modelowanie rozmyte umożliwia rozwiązywanie problemów, którym nie mogą sprostać metody konwencjonalne [2, 3, 5]. W zakresie sterowania daje ono możliwość tworzenia układów regulacji na podstawie bazy wiedzy, którą można zdefiniować za pomocą pojęć lingwistycznych, będących zarówno zmiennymi lingwistycznymi, jak i wartościami lingwistycznymi.

Z reguły baza wiedzy w modelu rozmytym regulatora jest tworzona na podstawie doświadczenia eksperta. Następnie może być ona modyfikowana poprzez zmianę jej parametrów lub nawet reguł w niej występujących.

W przypadku kłopotów ze stworzeniem klasycznego układu regulacji spełniającego nasze oczekiwania można bezpiecznie „podmienić" klasyczny regulator na jego model rozmyty o znanych własnościach wiedząc, że nie spowoduje to znacznych zmian w działaniu układu. Następnie można zmodyfikować parametry funkcji przynależności wejścia oraz wyjścia modelu rozmytego.

Można też do stworzonej bazy wiedzy dodawać reguły lingwistyczne modyfikujące działanie bazy pierwotnej. Dodanie takiej wiedzy do regulatora konwencjonalnego w sposób lingwistyczny jest niemożliwe. Tak więc tworzenie modeli rozmytych nie jest pozbawione sensu praktycznego.

W literaturze można spotkać wiele metod tworzenia modelu rozmytego regulatora konwencjonalnego PID. Znane są między innymi metoda przyrostowa i bezpośrednia stosowane do modelowania regulatorów w wersji dyskretnej [4].

W niniejszym artykule prezentowane jest podejście bazujące na tworzeniu modelu rozmytego regulatora ciągłego na podstawie znajomości jego charakterystyki.

Porównanie działania regulatora ciągłego i jego modelu rozmytego będzie dokonane na podstawie odpowiedzi czasowych w układzie otwartym i zamkniętym.

Model rozmyty generuje charakterystykę przetwarzania rozumianą jako odwzorowanie sygnałów wejściowych na sygnał wyjściowy. Charakterystyka ta powinna pokrywać się lub być bardzo zbliżona do charakterystyki elementu modelowanego.

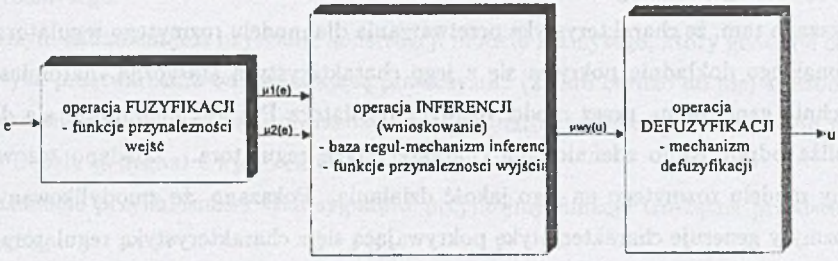
W ogólnym przypadku bardzo rzadko można znaleźć analityczną postać charakterystyki przetwarzania generowanej przez model rozmyty.

W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych z tego zakresu, wskazujące na pewne własności otrzymanych charakterystyk przetwarzania dla modeli rozmytych regulatorów PI oraz PID.

2. Charakterystyka przetwarzania modelu rozmytego

Rozpatrzmy obiekt o zadanej charakterystyce $u = f(e)$, gdzie e i u są odpowiednio sygnałem wejściowym oraz wyjściowym.

Naszym zadaniem jest zbudowanie odpowiedniego modelu rozmytego dla tego systemu. Na strukturę modelu rozmytego składają się bloki przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Struktura modelu rozmytego
Fig. 1. Fuzzy model structure

Na wejście modelu podawana jest konkretna wartość sygnału e.

W bloku **Fuzyfikacja** wyznaczane są wartości stopni przynależności $\mu_i(e)$, $i = 1, 2, ..., n$ na podstawie wcześniej zdefiniowanych funkcji przynależności charakteryzujących sygnał wejściowy e.

W bloku **Inferencja** wyznaczana jest tzw. wynikowa funkcja przynależności sygnału wyjściowego u oznaczona na rys. 1 przez $\mu_{wyn}(u)$. Do jej wyznaczenia niezbędna jest znajomość bazy reguł, mechanizmu inferencyjnego oraz funkcji przynależności wyjścia $\mu(u)$.

W bloku **Defuzyfikacja** na podstawie postaci wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(u)$ i zdefiniowanego sposobu defuzyfikacji obliczana jest konkretna wartość sygnału wyjściowego u.

Tak więc dla zadanych wartości sygnału wejściowego e model rozmyty generuje nierozmyte wartości sygnału wyjściowego u. Powstaje zatem odwzorowanie $u = f_r(e)$, zwane też charakterystyką przetwarzania.

Zaprojektowany model rozmyty powinien charakteryzować się tym, że jego charakterystyka przetwarzania $u = f_r(e)$ pokrywa się lub jest bardzo zbliżona do charakterystyki regulatora $u = f(e)$.

W ogólnym przypadku wyznaczenie analitycznej postaci charakterystyki przetwarzania jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Ponadto przy nieznajomości charakterystyki regulatora trudno jest również ocenić jakość działania zaprojektowanego modelu rozmytego.

W pracy [1] podano analityczne postaci charakterystyk przetwarzania dla regulatora proporcjonalnego oraz regulatora PD.

Pokazano tam, że charakterystyka przetwarzania dla modelu rozmytego regulatora proporcjonalnego dokładnie pokrywa się z jego charakterystyką statyczną, natomiast powierzchnia generowana przez model rozmyty regulatora PD jest nieliniowa, ale dobrze przybliża odpowiednio zdefiniowaną charakterystykę regulatora. Zbadano też wpływ zmiany modelu rozmytego na jego jakość działania. Pokazano, że zmodyfikowany model rozmyty generuje charakterystykę pokrywającą się z charakterystyką regulatora.

W niniejszym artykule zostaną zaproponowane modele rozmyte dla regulatora PI i PID oraz zbadane ich własności metodą numeryczną.

3. Model rozmyty regulatora PI

Podstawę do stworzenia bazy wiedzy dla regulatora rozmytego modelującego działanie elementu PI jest jego równanie opisujące zależność między sygnałem wejściowym e a sygnałem wyjściowym u w postaci:

$$u = k_P e + k_I \int e dt = k_P e + k_I e_c, \tag{1}$$

gdzie k_P oraz k_I są znanymi współczynnikami, zaś $e_c = \int e dt$.

Z równania (1) wynika, że charakterystyka elementu PI, rozumiana jako zależność $u = f(e, e_c)$, jest płaszczyzną w układzie współrzędnych kartezjańskich (e, e_c, u), która przechodzi przez początek układu współrzędnych.

W dalszych rozważaniach przyjmiemy, dla ułatwienia rozważań, że k_P oraz k_I w równaniu (1) są równe jedności.

Będziemy więc rozważać element PI opisany równaniem

$$u = e + \int e dt = e + e_c \tag{2}$$

W przyjętym układzie współrzędnych jest to równanie płaszczyzny przedstawionej na rys. 2. Płaszczyzna ta przechodzi między innymi przez punkty $A(-1, -1, -2)$, $B(0, -1, -1)$,

$C(1,-1,0)$, $D(-1,0,-1)$, $E(0,0,0)$, $F(1,0,1)$, $G(-1,1,0)$ oraz $H(1,1,2)$. Wartości współrzędnych tych punktów zostaną wykorzystane przy tworzeniu konkluzji reguł modelu rozmytego.

Naszym zadaniem jest uzyskanie konstrukcji modelu rozmytego, który generuje charakterystykę przetwarzania odpowiadającą płaszczyźnie (2) lub bardzo do niej zbliżoną.

Równanie (2) sugeruje nam potrzebną liczbę sygnałów wejściowych do modelu rozmytego. Będzie to sygnał e i jego całka e_c.

Za funkcje przynależności tych sygnałów przyjmijmy funkcje trójkątne przedstawione na rys. 3.

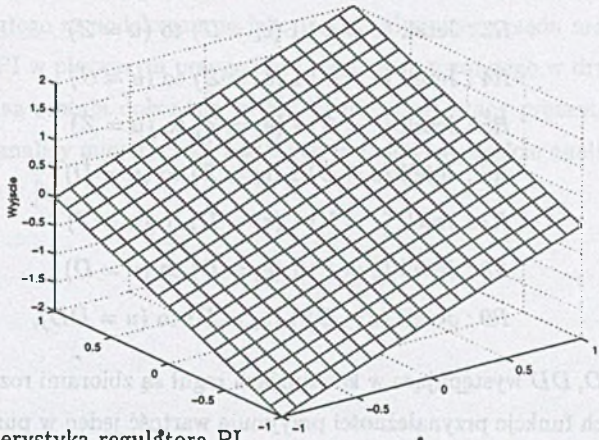
Założymy też, że

1. operator implikacji rozmytej $A \to B$ jest typu Mamdaniego, tzn., że $\mu_{A\to B}(x,y) = Min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$,

2. wnioskowanie oparte jest na operatorach Min dla iloczynu oraz Max dla sumy zbiorów rozmytych, tzn., że
   $\mu_{A\cap B}(x) = Min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ oraz
   $\mu_{A\cup B}(x) = Max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$,

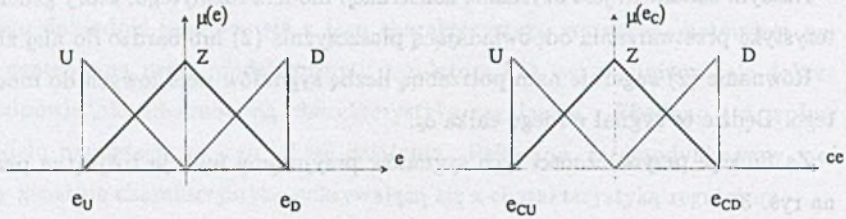
3. agregacja przesłanek dokonywana jest za pomocą operatora Max,

4. defuzyfikacja dokonywana jest metodą środka ciężkości [4].



Rys. 2. Charakterystyka regulatora PI
Fig. 2. PI- controler characteristic

Przy założeniu, że funkcje przynależności wejść mają kształt przedstawiony na rys. 3, liczba reguł konieczna do określenia kompletnego modelu rozmytego wynosi dziewięć.



Rys. 3. Funkcje przynależności wejść modelu rozmytego
Fig. 3. Input membership functions of the fuzzy model

Sposób tworzenia reguł polega na ustaleniu ich konkluzji dla wartości sygnałów wejściowych, odpowiadających jądrom ich funkcji przynależności, tzn. dla $e = e_c = -1$, $e = e_c = 0$ oraz $e = e_c = 1$.

Współrzędnym tym odpowiadają punkty $(A - H)$ płaszczyzny opisanej równaniem (2). Tak więc reguły mają postać:

$$
\begin{aligned}
&R1: \text{Jeżeli } (e = U) \text{ I } (e_c = U) \text{ to } (u = UU)\\
&R2: \text{Jeżeli } (e = Z) \text{ I } (e_c = U) \text{ to } (u = U)\\
&R3: \text{Jeżeli } (e = D) \text{ I } (e_c = U) \text{ to } (u = Z)\\
&R4: \text{Jeżeli } (e = U) \text{ I } (e_c = Z) \text{ to } (u = U)\\
&R5: \text{Jeżeli } (e = Z) \text{ I } (e_c = Z) \text{ to } (u = Z)\\
&R6: \text{Jeżeli } (e = D) \text{ I } (e_c = Z) \text{ to } (u = D)\\
&R7: \text{Jeżeli } (e = U) \text{ I } (e_c = D) \text{ to } (u = Z)\\
&R8: \text{Jeżeli } (e = Z) \text{ I } (e_c = D) \text{ to } (u = D)\\
&R9: \text{Jeżeli } (e = D) \text{ I } (e_c = D) \text{ to } (u = DD),
\end{aligned}
\tag{3}
$$

gdzie UU, U, Z, D, DD występujące w konkluzjach reguł są zbiorami rozmytymi typu singletonów, których funkcje przynależności przyjmują wartość jeden w punktach odpowiednio $-2, -1, 0, 1, 2$.

Tak stworzoną bazę reguł możemy symbolicznie zapisać w formie przedstawionej na rys. 4.

e_C			
D	Z	D	DD
Z	U	Z	D
U	UU	U	Z
	U	Z	D

e

Rys. 4. Baza reguł modelu rozmytego o dziewięciu regułach
Fig. 4. Knowledge base of the fuzzy model -nine rules

Opisany model rozmyty będziemy dalej nazywać modelem rozmytym typu pierwszego. Przy założeniach (1 – 4) proponowany model rozmyty generuje charakterystykę przetwarzania zgodną z charakterystyką regulatora w punktach odpowiadających jądrom (maksymalnym wartościom) funkcji przynależności sygnałów wejściowych i wyjściowych.

Jest to cecha systemu Mamdaniego przy założeniach (1 – 4). Cechą charakterystyczną funkcji przynależności wejścia jest spełnienie przez nie warunku podziału jedności [4].

W dalszej części zostanie dokonana analiza porównawcza pracy układów składających się z obiektu ciągłego zamodelowanego jako inercja pierwszego rzędu oraz konwencjonalnego regulatora PI w pierwszym przypadku i regulatora rozmytego w drugim przypadku.

Podobna analiza została dokonana w [6]. W niniejszej pracy prezentowane są wyniki możliwie pełnej analizy numerycznej badanych układów. Podejście analityczne przedstawiono natomiast w [1].

3.1. Odpowiedzi czasowe układu z regulatorem konwencjonalnym i jego modelem rozmytym

Jedną z podstawowych metod badania układów regulacji jest analiza odpowiedzi układu na skok jednostkowy. Struktura badanego układu przedstawiona jest na rys. 5.

Na rys.6 przedstawiono odpowiedzi czasowe układów na skok jednostkowy, natomiast na rys. 7 wykres różnicy sygnałów wyjściowych generowanych przez oba układy.

Jak widać, odpowiedzi czasowe niewiele różnią się od siebie.

Na rys.8 przedstawiono strukturę układów do badania ich zgodności podczas pracy w pętli otwartej, natomiast na rys. 9, 10 odpowiednio odpowiedzi oraz ich różnicę na wymuszenie sinusoidalne o częstotliwości jednego Hz.

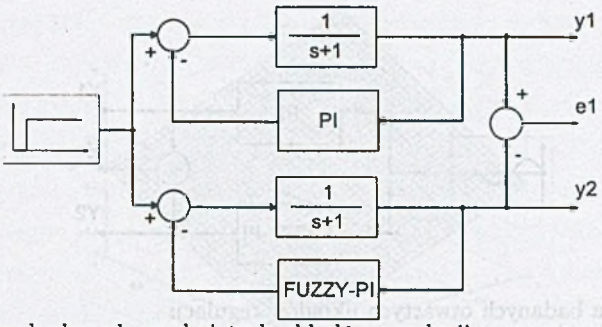
Na wykresach widać niewielką różnicę w zachowaniu układów. Źródłem błędu może być system wnioskowania. Zgodnie bowiem z założeniami (1 – 4) przyjętymi przy konstrukcji modelu rozmytego system ten spełnia warunek „mówienia prawdy przez reguły". Oznacza to, że w punktach określonych przez reguły wartości wyjścia są takie same jak konkluzje reguł. Nie posiadamy natomiast gwarancji, że w innych punktach będzie się on zachowywał tak jak system z regulatorem konwencjonalnym. Do analizy zachowania się układu z modelem rozmytym wykorzystamy charakterystykę przetwarzania generowaną przez model.

Charakterystykę przetwarzania wyznaczoną numerycznie przedstawia rys.11.

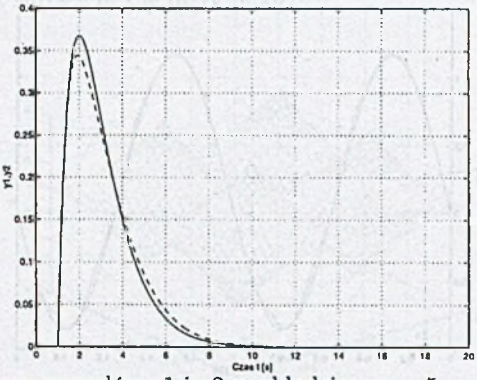
Wizualnie można stwierdzić, że jest ona bardzo podobna do charakterystyki regulatora konwencjonalnego.

Różnica obu charakterystyk, będąca powierzchnią, przedstawiona jest na rys. 12. Porównanie obu charakterystyk nasuwa wnioski dotyczące źródła błędów w przebiegach czasowych dla obu modeli.

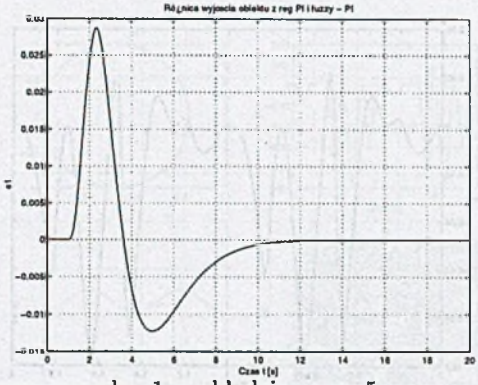
Powierzchnia odwzorowania modelu rozmytego mimo założeń i konstrukcji reguł takich, aby dokładnie odpowiadała ona płaszczyźnie, nie jest płaszczyzną. Dokładnie obie powierzchnie pokrywają się w punktach, w których przesłanki reguł spełnione są w stopniu jeden oraz na liniach łączących te punkty. Zatem źródłem niedokładności odwzorowania jest system wnioskowania i defuzyfikacji. Dokładniejsza analiza błędu odwzorowania możliwa jest poprzez analizę trajektorii wejścia przedstawionej na rys. 13 a, która po-



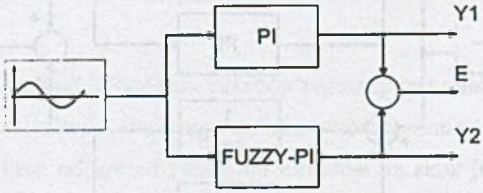
Rys. 5. Struktura badanych zamkniętych układów regulacji
Fig. 5. Tested closed loop systems



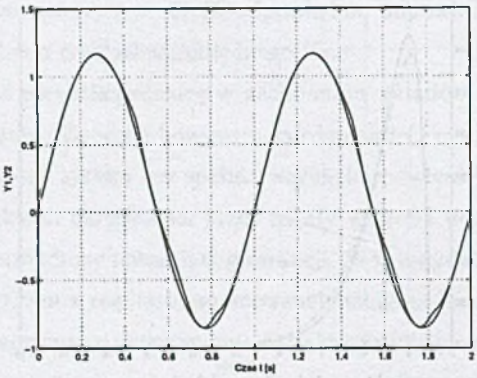
Rys. 6. Przebiegi czaowe sygnałów y1 i y2 w układzie z rys. 5
Fig. 6. Time response of y1 and y2 signal - fig.5



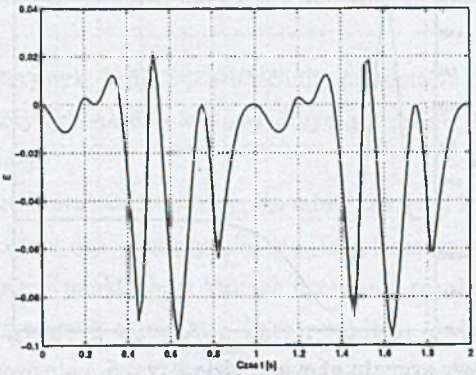
Rys. 7. Przebieg czasowy sygnału e1 w układzie z rys. 5
Fig. 7. Time response of signal e1 - fig.5



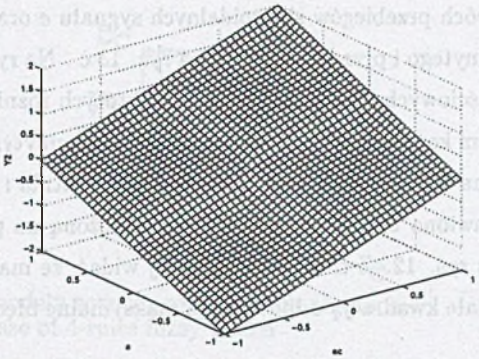
Rys. 8. Struktura badanych otwartych układów regulacji
Fig. 8. Tested open loop structure



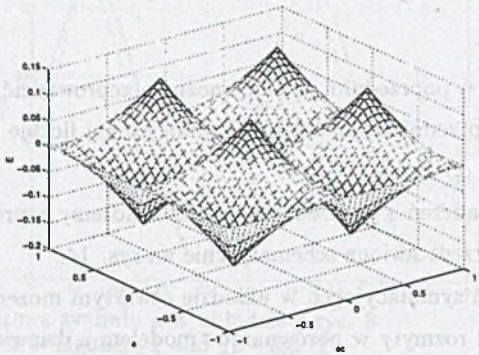
Rys. 9. Przebiegi czasowe wyjścia w układzie z rys. 8
Fig. 9. Time responses of signals y1 and y2



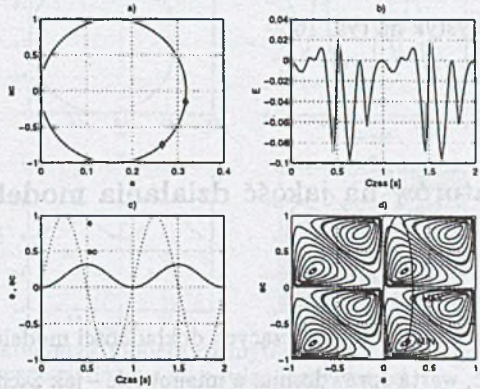
Rys. 10. Przebieg czasowy różnicy sygnałów z rys. 8
Fig. 10. Time response of signal e



Rys. 11. Charakterystyka przetwarzania modelu rozmytego
Fig. 11. Input-output surface of the fuzzy model



Rys. 12. Przebiegi czasowe wyjścia w układzie z rys. 8
Fig. 12. Surface of the difference between continuous controler and it's fuzzy model



Rys. 13. Zestaw charakterystyk modelu rozmytego o dziewieciu regulach
Fig. 13. Full set of characteristics of nine rules fuzzy model

wstała po złożeniu dwóch przebiegów sinusoidalnych sygnału e oraz jego całki, podanych na wejście modelu rozmytego i przedstawionych na rys. 13 c . Na rys.13 a wskazano też te wartości sygnałów wejściowych (małe kwadraty), dla których różnica odpowiedzi układu otwartego z regulatorem konwencjonalnym i jego modelem rozmytym na pobudzenie sinusoidalne (przedstawiona na rys. 13 b jest maksymalnie dodatnia i maksymalnie ujemna. Na rys. 13 d przedstawiono trajektorię z rys. 13 a nałożoną na poziomice powierzchni błędu odwzorowania z rys. 12. Z charakterystyki tej widać, że maksymalnym błędom w odpowiedzi układu (małe kwadraty) odpowiadają maksymalne błędy powierzchni odwzorowania.

4. Model rozmyty regulatora PI z bazą czterech reguł

Podobną analizę jak w poprzednim punkcie można przeprowadzić dla modelu rozmytego zbudowanego przy poprzednich założeniach i zmniejszonej liczbie funkcji przynależności sygnałów wejściowych do dwóch.

Na podstawie doświadczeń z poprzedniego punktu możemy zaproponować bazę wiedzy dla takiego modelu, przedstawioną schematycznie na rys. 14.

Na podstawie badań symulacyjnych w układzie otwartym możemy stwierdzić w sensie jakościowym, że model rozmyty w porównaniu z modelem z dziewięcioma regułami jest o wiele bardziej niedokładny.

Odpowiedzi czasowe na pobudzenie sinusoidalne przedstawiono na rys. 15, natomiast pełny zestaw charakterystyk na rys. 16.

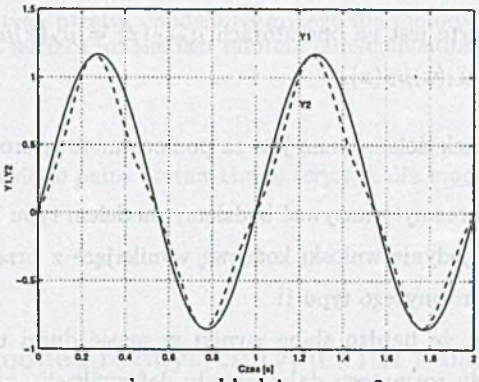
5. Wpływ operatorów na jakość działania modelu rozmytego regulatora PI

Wnioski z poprzednich punktów dotyczących dokładności modelu rozmytego nasuwają następną ewentualność, wartą sprawdzenia, a mianowicie - jak zachowałby się model rozmyty przy zastosowaniu innych operatorów, które go definiują.

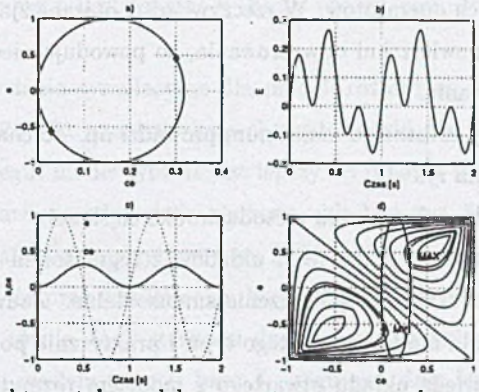
e_C		
D	Z	D
U	U	Z
	U	D

e

Rys. 14. Baza reguł modelu rozmytego o czterech regułach
Fig. 14. Knowledge base of 4-rules fuzzy model



Rys. 15. Przebiegi czasowe sygnału e w układzie z rys. 8
Fig. 15. Time responses of signals y1 and y2 - fig. 8



Rys. 16. Zestaw charakterystyk modelu rozmytego o czterech regułach
Fig. 16. Full set of characteristics for four rules fuzzy model

Dalej zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych dla modelu rozmytego regulatora PI, różniącego się od jego modelu rozmytego typu I rodzajem operatorów definiujących go.

Z przebadanych modeli rozmytych najlepsze efekty (w sensie dokładności) uzyskano dla modelu rozmytego, w którym w miejsce założeń (1−3) z punktu 3 wprowadzimy założenia w postaci:

1. operator implikacji rozmytej $A \to B$ jest typu Larsena tzn., że $\mu_{A\to B}(x,y) = \mu_A(x)\mu_B(y)$,

2. wnioskowanie oparte jest na operatorach $\mu_{A\cap B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x)$ oraz $\mu_{A\cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$,

3. agregacja przesłanek dokonywana jest za pomocą metody środka ciężkości.

Tak określony model rozmyty nazywać będziemy modelem typu II.

Dalej przedstawiono jedynie wnioski końcowe, wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych modelu rozmytego typu II.

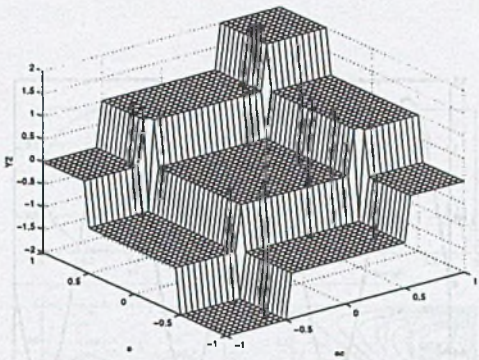
Badania te pokazały, że bardzo słabe wyniki w sensie dużej rozbieżności charakterystyk obiektu i modelu rozmytego dają metody defuzyfikacji: pierwszego maksimum, ostatniego maksimum oraz środka maksimum [4]. Spowodowane jest to głównie przez „nieciągłe" działanie tych operatorów. W rzeczywistości opisane zjawiska sprowadzają się do „dyskretyzowania" powierzchni odwzorowania, co powoduje niedopuszczalne błędy w zagadnieniach modelowania.

Zastosowanie metody ostatniego maksimum prowadzi np. do charakterystyki przetwarzania przedstawionej na rys. 17.

Najlepsze wyniki dała defuzyfikacja metodą środka ciężkości.

Na rys. 18 przedstawiono odpowiedzi układów z regulatorem i z jego modelem rozmytym w układzie otwartym na pobudzenie suinusoidalne. Zauważmy, że odpowiedzi czasowe podobnie jak dla modelu rozmytego typu I praktycznie pokrywają się.

Tym niemniej odpowiedź układu otwartego z modelem rozmytym typu II na pobudzenie sinusoidalne jest lepsza w porównaniu z odpowiedzią modelu rozmytego typu I przedstawioną na rys. 9.



Rys. 17. Charakterystyka przetw. modelu rozmytego dla metody ostatniego maksimum
Fig. 17. Input-output surface for the last minimum defuzification method

Na rys. 19 przedstawiono pełny zestaw charakterystyk dla modelu typu II z dziewięciu regułami.

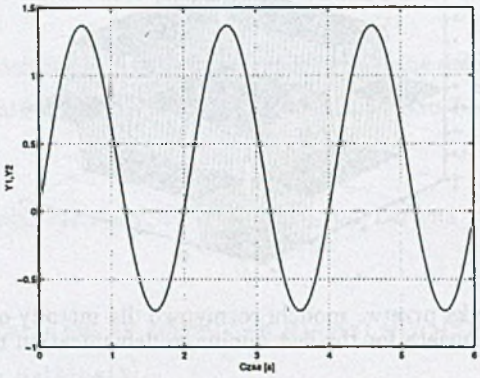
6. Porównanie modeli rozmytych typu I i II z bazą czterech reguł

Wydaje się, że mniejsza liczba reguł w bazie wiedzy zmniejsza dokładność modelu rozmytego.

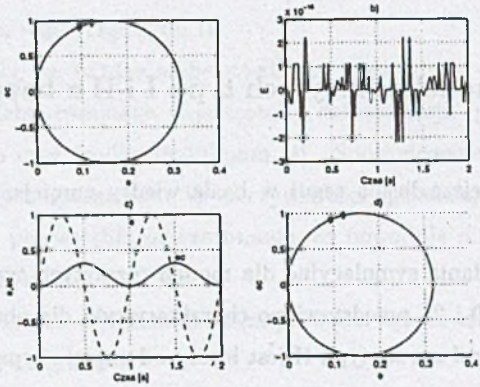
Przeprowadzono badania symulacyjne dla modeli rozmytych typu I i II z bazą czterech reguł. Na rys. 20 i 21 przedstawiono charakterystyki dla obu modeli. Również w przypadku czterech reguł model typu II jest lepszy od modelu typu I.

Na rys. 22 przedstawiono odpowiedzi skokowe układu z rys. 5 z regulatorem konwencjonalnym oraz regulatorami rozmytymi typu I i II z czterema regułami.

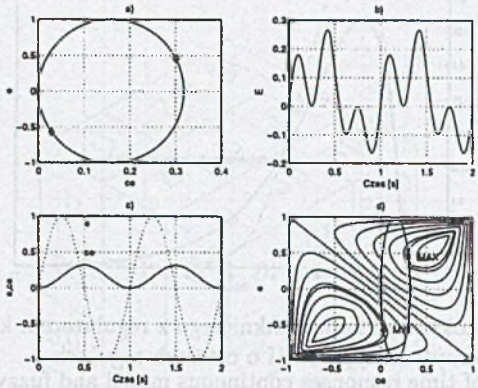
Możemy zauważyć, że przy zmniejszonej liczbie reguł odpowiedzi skokowe w układzie zamkniętym niewiele różnią się w stosunku do bazy wiedzy składającej się z dziewięciu reguł, a w przypadku modelu typu II baza 4 - regułowa daje lepsze efekty od bazy 4 - regułowej dla modelu typu I.



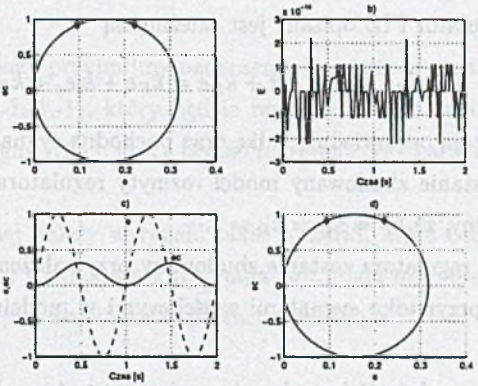
Rys. 18. Przebiegi czasowe sygnału e w układzie z rys. 8
Fig. 18. Time responses of signal e - fig. 8



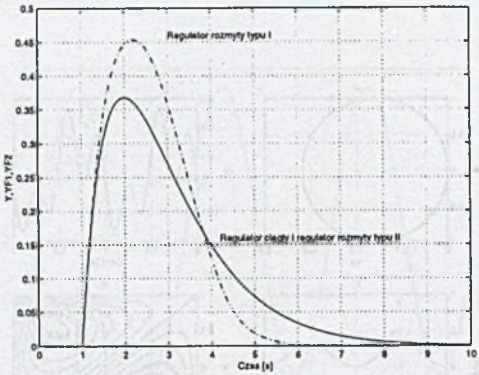
Rys. 19. Charakterystyki modelu rozmytego typu I z dziewięcioma regulami
Fig. 19. Full set of characteristics for nine rules model type I



Rys. 20. Charakterystyki modelu rozmytego typu I o czterech regułach
Fig. 20.Full set of characterystics of 4-rule fuzzy model type I



Rys. 21. Charakterystyki modelu rozmytego typu II o czterech regułach
Fig. 21. Full set of characterystics of 4-rule fuzzy model type II



Rys. 22. Odpowiedzi skokowe układu zamkniętego z regulatorem konwencjonalnym oraz z regulatorami rozmytymi typu I i II o czterech regułach
Fig. 22. Comparision of time responses continuous model and fuzzy models type I and II

7. Model rozmyty regulatora PID

Konwencjonalny regulator PID opisany jest zależnością

$$u = k_P e + k_I \int e dt + k_D \dot{e} = k_P e + k_i e_c + k_D e_d, \tag{4}$$

gdzie e_c oraz e_d oznaczają odpowiednio całkę oraz pochodną sygnału e.

W dalszej części zostanie zbudowany model rozmyty regulatora PID, w którym, dla uproszczenia przyjmiemy, że $k_P = k_C = k_D = 1$.

Model rozmyty tego regulatora zostanie zbudowany przy założeniach z punktu 2.

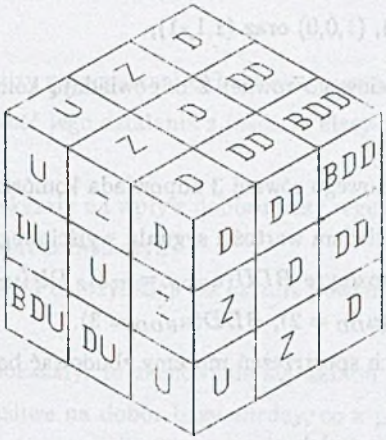
W rozpatrywanym przypadku sygnałami wejściowymi w modelu będą: sygnały e, e_d oraz e_c.

Jeżeli każda ze zmiennych wejściowych opisana jest przez trzy zbiory rozmyte, to baza wiedzy składać się będzie z 27 reguł.

W przypadku regulatora PI zbudowanie bazy wiedzy opierało się na dokładnym odwzorowaniu charakterystyki przetwarzania w dziewięciu punktach charakterystyki regulatora. Postać reguł mogła być schematycznie przedstawiona na rys. 4.

W przypadku regulatora PID możemy wyobrazić sobie schematycznie bazę reguł w postaci sześcianu z komórkami, do których należy wstawić pojęcia lingwistyczne opisujące dla danej „kombinacj" sygnałów wejściowych odpowiadający im stan wyjścia układu.

Powstaje więc „przestrzenna" baza wiedzy przedstawiona schematycznie na rys. 23.



Rys. 23. Baza reguł dla modelu rozmytego regulatora PID
Fig. 23. Knowledge base of PID fuzzy controler

Aby ułatwić opis bazy przyjmijmy oznaczenia komórek w postaci „adresów" (e, e_c, e_d), począwszy od rogu (-1,-1,-1), który będzie reprezentował „bardzo duży ujemny" (BDU) wniosek reguły, do rogu (1,1,1), który będzie reprezentował „bardzo duży dodatni" (BDD) wniosek reguły.

W kostce sześciennej należy wyróżnić takie komórki, które będą reprezentować różne wartości wyjść modelu wynikajace z równania (4). Będą im odpowiadać zbiory rozmyte sygnału wyjściowego przedstawione w postaci singletonów.

Tak więc:

1. wartości sygnału wyjściowego równej -3 odpowiada komórka o adresie (-1,-1,-1),

2. wartości sygnału wyjściowego równej -2 odpowiadają komórki o adresach (-1,-1,0), (-1,0,-) oraz (0,-1,-1),

3. wartości sygnału wyjściowego -1 pięć odpowiadają komórki o adresach (-1,-1,1), (-1,1,-), (-1,0,0), (0,-1,0), (0,0,-1), (1,-1,-1),

4. wartości sygnału wyjściowego równej 0 odpowiadają komórki o adresach (-1,0,1), (-1,1,0), (0,-1,1), (0,0,0), (0,1,-1), (1,-1,0) oraz (1,0,-),
5. wartości sygnału wyjściowego równej 1 odpowiadają komórki o adresach (-1,1,1), (0,0,1), (0,1,0), (1,-1,1), (1,0,0) oraz (1,1,-1),
6. wartości sygnału wyjściowego równej 2 odpowiadają komórki o adresach (0,1,1), (1,0,1) oraz (1,1,0),
7. wartości sygnału wyjściowego równej 3 odpowiada komórka o adresie (1,1,1).

Widzimy, że możliwych jest siedem wartości sygnału wyjściowego. Przypiszmy im następujące singletonowe zbiory rozmyte $BDU(u_{BDU} = -3)$, $DU(u_{DU} = -2)$, $U(u_U = -1)$, $Z(u_Z = 0)$, $D(u_D = 1)$, $DD(u_{DD} = 2)$, $BDD(u_{BDD} = 3)$.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń możemy zbudować bazę wiedzy składającą się z 27 reguł.

Przytoczymy tylko niektore z nich.

$R1$: Jeżeli $(e = U)$ I $(e_c = U)$ I $(e_d = U)$ to $(u = BDU)$

$R2$: Jeżeli $(e = U)$ I $(e_c = U)$ I $(e_d = Z)$ to $(u = DU)$

.....

$R5$: Jeżeli $(e = U)$ I $(e_c = U)$ I $(e_d = D)$ to $(u = U)$

.....

$R11$: Jeżeli $(e = U)$ I $(e_c = Z)$ I $(e_d = D)$ to $(u = Z)$

.....

$R18$: Jeżeli $(e = U)$ I $(e_c = D)$ I $(e_d = D)$ to $(u = D)$

.....

$R24$: Jeżeli $(e = Z)$ I $(e_c = D)$ I $(e_d = D)$ to $(u = DD)$

.....

$R27$: Jeżeli $(e = D)$ I $(e_c = D)$ I $(e_d = D)$ to $(u = BDD)$ (5)

Warto przy tym zwrócić uwagę, że następuje znaczne zwiększenie liczby reguł ze wzrostem sygnałów wejściowych przy tej samej liczbie funkcji przynależności opisujących te sygnały. Jest to tzw. przekleństwo wymiarowości [2].

Badania symulacyjne dotyczące dokładności opracowanego modelu rozmytego prowadzą do tych samych wniosków, jakie sformułowaliśmy przy okazji analizy modeli rozmytych regulatora PI.

8. Uwagi końcowe

W pracy dokonano analizy numerycznej układu sterowania z modelem rozmytym regulatora PI i porównano jakość jego działania z jakością klasycznego układu z regulatorem konwencjonalnym.

Badania numeryczne wskazały na wpływ doboru bazy reguł oraz mechanizmu inferencji na pracę układu z regulatorem rozmytym.

Zbadano też wpływ metod defuzyfikacji na kształt powierzchni odwzorowania modelu rozmytego.

Badania numeryczne pokazały, że zachowanie się układu zamkniętego z regulatorem rozmytym jest mniej wrażliwe na dobór bazy wiedzy, co z punktu widzenia zastosowań praktycznych jest bardzo dobrą własnością.

Literatura

1. Bobrowski P.: Problem równoważności charakterystyk wybranych regulatorów konwencjonalnych i rozmytych, ZN. Pol.Śl. s. Automatyka, z. 133, Gliwice 2002-02-11

2. Driankow D.,Hellendorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterownia rozmytego, Wtdawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1996

3. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000

4. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT , Warszawa 1999

5. Rutkowska D.: Inteligentne systemy obliczeniowe. Algorytmy genetyczne i sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1997

6. Yager R., Filew D.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT, Warszawa 1995

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Konrad Wojciechowski

Wpłynelo do Redakcji 15.06.2001 r.

Abstract

It is known from [4] , [2] ,[1] how to build the knowledge base for continuous controller. From [1] we know that we may expect errors in comparison to the continuous controller. For this paper a set of simulation were performed in time domain for the closed loop systems and next extended comparision in open loop , input-output surface and error surface of the PI controller. It was compared fuzzy model with 4-rules knowledge bas and 9-rules knowledge base and for different sets of operators. The most important part of this simulation shows on the full set of characteristics (fig.16 ..) the maximum time domain error happens in points of maximal input-output surface error. So the modeling error comes from the inference and defuzzification systems of the fuzzy model. Additionally this work shows a three dimentional knowledge base for PID controller and how it was created.