ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: AUTOMATYKA z. 42 Nr kol. 568

Dorota CZAJA-POŚPIECH, Ernest CZOGAŁA,
Witold PEDRYCZ

METODA STEROWANIA OPARTA NA REGUŁACH LOGIKI ROZMYTEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę sterowania opartą na uogólnionych regułach logiki rozmytej. Podano algorytm rozmyty realizujący to sterowanie. Rozważanie zilustrowano wynikami numerycznymi badań symulacyjnych.

1. Wprowadzenie

W wielu procesach (obiektach) napotyka się na dość duże trudności w ich sterowaniu metodami konwencjonalnymi. Trudności te wynikają m.in. z faktu, że istniejące metody sterowania w większości opierają się na znajomości modelu matematycznego procesu oraz na założeniu adekwatności tego modelu z rzeczywistym procesem [7].

Istnieją obiekty (procesy), takie jak piece hutnicze, piece cementowe, pewne procesy w hutach szkła [7] i inne, gdzie modele prawie nie istnieją.

Wprawdzie stosuje się metody adaptacyjne, które częściowo kompensują brak modelu, ale jest oczywiste, że trudno mówić wtedy o zadowalających wynikach sterowania. O takich procesach mówimy, że są słabo poznane, a czynniki decydujące o ich przebiegu są trudne do określenia lub skwantyfikowania. W takich sytuacjach można powierzyć sterowanie procesem człowiekowi operatorowi, co powoduje, że nabiera znaczenia analiza systemów sterowania z czynnikiem ludzkim. Mimo że reakcje i sposób postępowania człowieka są nieraz bardzo trudne do określenia, rezultaty sterowania bywają na ogół dobre [4]. Strategia sterowania operatora opiera się głównie na doświadczeniu, intuicji i heurystycznym sposobie postępowania w celu rozpoznania pewnych stanów charakterystycznych procesu. Wynika stąd potrzeba ściślejszego ujęcia lingwistycznych reguł tworzących algorytm sterowania, opisujących postępowanie człowieka operatora. Zbiór tych reguł określony w oparciu o teorię zbiorów rozmytych [1], [5] oraz logikę rozmytą [1], [8] tworzy tzw. rozmytą strategię sterowania. Sterowanie rozmyte wykorzystujące tzw. algorytmy rozmyte [1] zastosowano dla szeregu złożonych procesów. Pierwsze prace zarówno teoretyczne jak i doświadczalne z tego zakresu zapoczątkował Mamdani [2], [5], [6], stosując algorytm sterowania rozmytego do sterowania ciśnieniem w kotle i prędkością silnika cieplnego. Z ważniejszych prac należy wymienić prace Kinga [2], Kickerta [6], [3], van Nauta Lemke [3], Tonga [7], Rutherforda, Ostergaarda i innych [7].

W niniejszej pracy zaproponowano pewne rozszerzenie metody sterowania rozmytego oraz zastosowanie tego sterowania do procesu z opóźnieniem.

2. Sformułowanie problemu

Podstawą naszych rozważań będzie rozmyty algorytm sterowania [6], opierający się na pojęciach wielokrotnej implikacji rozmytej i złożeniowej reguły wnioskowania [8], które to pojęcia przedstawimy poniżej.

Wielokrotną implikację rozmytą nazywamy wyrażenie [8],[1]:

$$R = \text{if } A_1 \text{ then if } A_2 \text{ then} \ldots A_n \text{ then } B \overset{df}{=} A_1 x A_2 x \ldots x A_n x B \tag{1a}$$

gdzie: $A_1,\ldots,A_n$ są formami (zbiorami) rozmytymi przestrzeni U, natomiast B jest formą (zbiorem) rozmytą przestrzeni V.

Funkcja przynależności wielokrotnej implikacji rozmytej R może być zdefiniowana zależnością:

$$\mu_R(u_1,\ldots,u_n,v) = \min\left[\mu_{A_1}(u_1),\ldots,\mu_{A_n}(u_n),\mu_B(v)\right] \tag{1b}$$

gdzie: $u_i \in U_i (i = 1,2,\ldots,n)$ a $v \in V$.

Wielokrotną złożeniową regułę wnioskowania i odpowiednią funkcję przynależności można ująć w postaci [8]:

$$B' = A'_n \circ \cdots \circ A'_2 \; A'_1 \circ (A_1 \times A_2 x \ldots x A_n \times B) \tag{2a}$$

$$\mu_{B'}(v) = \max_{u_n} \min\left[\mu_{A'_n}(u_n),\ldots,\max_{u_1} \min\left[\mu_{A'_1}(u_1),\mu_R(u_1,\ldots,u_n,v)\right] \ldots\right] \tag{2b}$$

Zbiór B' można interpretować jako wyjściowy zbiór dla zadanej implikacji $A_1 x \ldots x A_n \times B$ oraz zadanych wejściowych zbiorów $A'_1,\ldots,A'_n$ (zbiory $A'_1,\ldots,A'_n$ są zbiorami przestrzeni $U_1,\ldots,U_n$ odpowiednio, a zbiór B' zbiorem przestrzeni V).

Jeśli strategia sterowania rozmytego zawiera kilka reguł (np. k), wtedy należy znaleźć wynikowy zbiór B' jako

$$B' = \max_i(B'_1,B'_2,\ldots,B'_k) \tag{3a}$$

$$(i = 1,2,\ldots,k)$$

oraz

$$\mu_{B'}(v) = \max_i \mu_{B'_i}(v) \tag{3b}$$

gdzie $\mu_{B'_i}(v)$ jest określone wzorem (2b) oddzielnie dla każdej z reguł, tj.:

$$\mu_{B'_i}(v) = \max_{u_n} \min\left[\mu_{A'_n}(u_n),\ldots,\max_{u_1} \min\left[\mu_{A'_1}(u_1),\mu_{R_i}(u_1,u_2,\ldots,z_n,v)\right] \ldots\right] \tag{2c}$$

Ostateczną decyzję można wybrać w sposób deterministyczny kilkoma sposobami [6], np.:

$$\mu_{B'}(v_o) = \max_{v} \mu_{B'}(v) \tag{4}$$

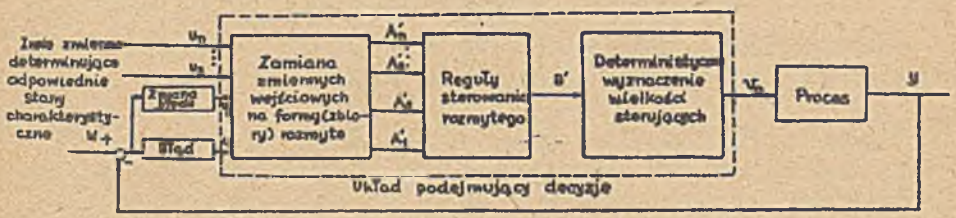
lub w przypadku, gdy otrzymany zbiór wyjściowy posiada więcej niż jedno maximum dla funkcji przynależności

$$v_o = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^{N} v_r \tag{5}$$

gdzie:

$$\mu_{B'}(v_r) = \max_{v} \mu_{B'}(v). \tag{6}$$

Traktując zbiory $A'_i (i = 1,2,\ldots,n)$ jako wejścia tzw. układu podejmującego decyzje, natomiast zbiór B' jako jego wyjście, można podać następujący schemat blokowy układu sterowania rozmytego (rys. 1). Należy tutaj zauważyć, że oprócz zmiennych mierzalnych można dokonywać klasyfikacji na stany charakterystyczne wg innych zmiennych niemierzalnych określających np. rodzaj konsystencji, kolor itp. Zmienne te zaznaczono na schemacie blokowym.



Rys. 1. Układ podejmujący decyzje

Rozpatrzmy teraz problem o dość dużym znaczeniu praktycznym, dla którego algorytm sterowania rozmytego posiada n wejść mierzalnych i jedno wyjście. Wejścia należy wtedy interpretować jako zbiory rozmyte "zdegenerowane", tj. zbiory, których wszystkie stopnie przynależności są równe zeru, z wyjątkiem jednego, równego jedności w mierzonym punkcie $u_{10}, u_{20}, \ldots, u_{n0}$.

Złożeniowa reguła wnioskowania w tym przypadku upraszcza się do postaci [8], [6]:

$$\mu_{B'_{ij\ldots k}}(v) = \min\left[\mu_{A_{1i}}(u_{10}), \mu_{A_{2j}}(u_{20}), \ldots, \mu_{A_{nk}}(u_{n0}), \mu_{B_{ij\ldots k}}(v)\right] \tag{7}$$

przy czym

$$\mu_{B'_{i0j0\ldots k0}}(v_r) = \max_v \max_i \max_j \ldots \max_k \mu_{B'_{ij\ldots k}}(v) \tag{8}$$

Wykorzystując prawa łączności i rozdzielności dla funkcji przynależności zbiorów rozmytych, układ równości (7), (8) można przekształcić

$$\mu_{B'_{i0j0\ldots k0}}(v_o) = \max_v \min\left[\max_i \mu_{A_{1i}}(u_{10}), \max_j \mu_{A_{2j}}(u_{20}), \ldots \right.$$

$$\left. \ldots \max \mu_{A_{nk}}(u_{n0}), \mu_{B_{i0j0\ldots k0}}(v)\right] \tag{9}$$

Nie zmniejszając ogólności rozważań, można założyć, że zbiory $A_{1i}, A_{2j}, \ldots, A_{nk}$ są normalne, co zapiszemy

$$\begin{aligned} &\max_i \mu_{A_{1i}}(u_{10}) = 1 \\ &\max_j \mu_{A_{2j}}(u_{20}) = 1 \\ &\vdots \\ &\max_k \mu_{A_{nk}}(u_{n0}) = 1 \end{aligned} \tag{10}$$

Zakładając ponadto, że $\mu_{B_{i0j0\ldots k0}}(v)$ jest symetryczne wokoło swego maksimum [6], otrzymuje się bezpośrednio z równania (9) algorytm sterowania rozmytego w postaci

$$\mu_{B'_{i0j0\ldots k0}}(v_r) = \max_v \mu_{B_{i0j0\ldots k0}}(v) \tag{11}$$

Powyższa równość będzie podstawą algorytmu oraz numerycznej ilustracji sterowania rozmytego, które przedstawimy w następnym punkcie.

3. Badania symulacyjne sterowania rozmytego i ich wyniki

Dla ilustracji sterowania opartego na przedstawionym regułach logiki wielowartościowej rozpatrzmy przebieg sterowania obiektem o operatorowej funkcji przejścia:

$$K(s) = \frac{e^{-s\tau}}{1+sT} \tag{12}$$

Taką postać transmitancji ma (lub może być nią aproksymowane) szereg obiektów przemysłowych [9], tzn. zależność pomiędzy wielkością sterującą obiektu a wielkością wyjściową y jest opisana następującym równaniem różniczkowym z zerowym warunkiem początkowym:

$$T\,\dot{y}(t) + y(t) = v(t-\tau),\ y(0) = 0 \tag{13}$$

gdzie $v(t)$ jest sterowaniem.

Celem sterowania jest stabilizacja wielkości wyjściowej na zadanym poziomie $w(t) = 0{,}5$, przy czym stan charakterystyczny przebiegającego procesu jest określony przez uporządkowaną parę (błąd ε, zmiana błędu Δe), gdzie dla błędu, zmian błędu oraz sterowania wyróżniono następujące zbiory rozmyte:

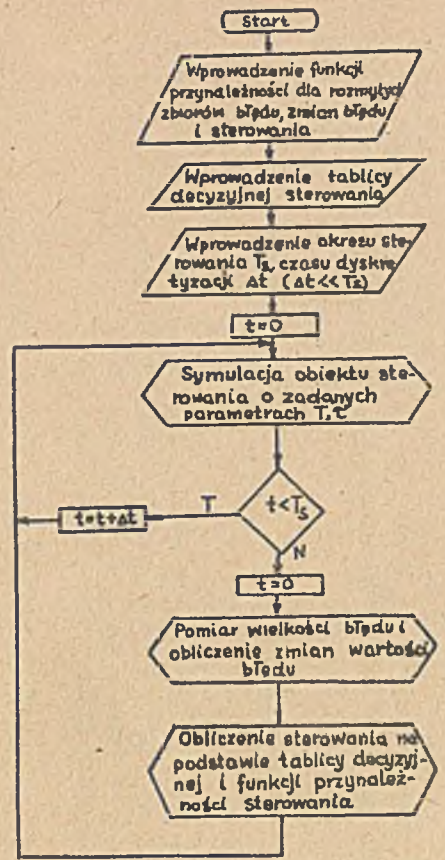
+L zbiór wartości dodatnich dużych,
+M zbiór wartości dodatnich średnich,
+S zbiór wartości dodatnich małych,
+O zbiór wartości dodatnich zerowych ("dodatnie" zero),
-O zbiór wartości ujemnych zerowych ("ujemne" zero),
-S zbiór wartości ujemnych małych,
-M zbiór wartości ujemnych średnich,
-L zbiór wartości ujemnych dużych,

a sterowanie jest realizowane na podstawie tablicy decyzyjnej podanej na rys. 2. Ogólny schemat blokowy ilustrujący ideę symulacji pokazano na rysunku 3.

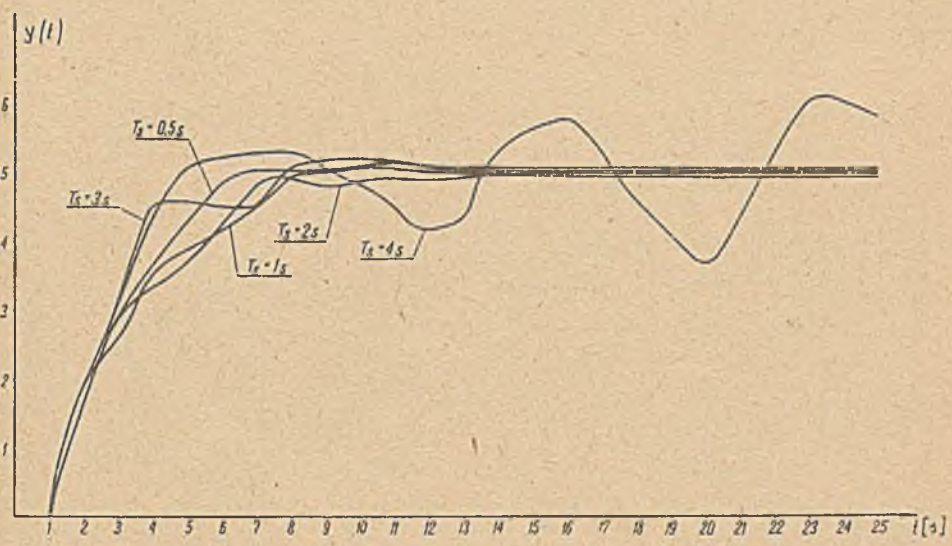
Rysunek 4 przedstawia przebieg w czasie wielkości wyjściowej obiektu dla ustalonych: stałej czasowej T i czasu opóźnienia τ, natomiast parametrem zmiennym jest tu okres sterowania T_s (rozumiany jako interwał czasowy pomiędzy podejmowaniem kolejnych decyzji dotyczących sterowania, wyznaczonych na podstawie pomiaru błędu i określonej wartości zmiany błędu dokonywanych co T_s). Można zauważyć wyraźną zależność pomiędzy okresem

e \ Δe	+L	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-L
-L	+0	+S	-M	-L	-L	-L	-L	-L
-M	+S	-0	-S	-M	-M	-M	-L	-L
-S	+M	+S	-0	-S	-S	-S	-M	-L
-0	+M	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-M
+0	+M	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-M
+S	+L	+M	+S	+S	+S	+0	-S	-S
+M	+L	+L	+M	+M	+M	+S	+0	+0
+L	+L	+L	+L	+L	+L	+M	+0	+0

Rys. 2. Tablica decyzyjna sterowania rozmytego



Rys. 3. Schemat blokowy symulacji cyfrowej sterowania rozmytego

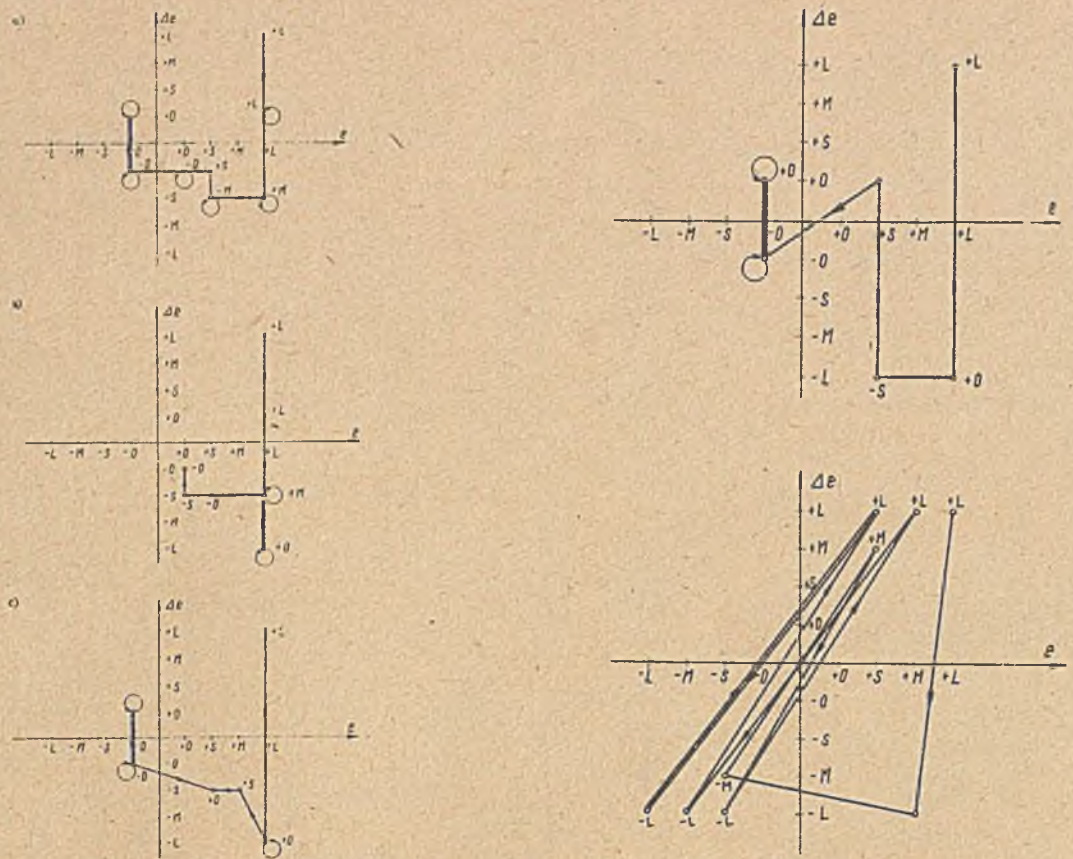


Rys. 4. Przebieg czasowy wielkości wyjściowej dla ustalonej stałej czasowej i czasu opóźnienia przy zmiennym okresie sterowania τ = 1[s], T = 5[s] T_s = 5, 1, 2, 3, 4 [s]

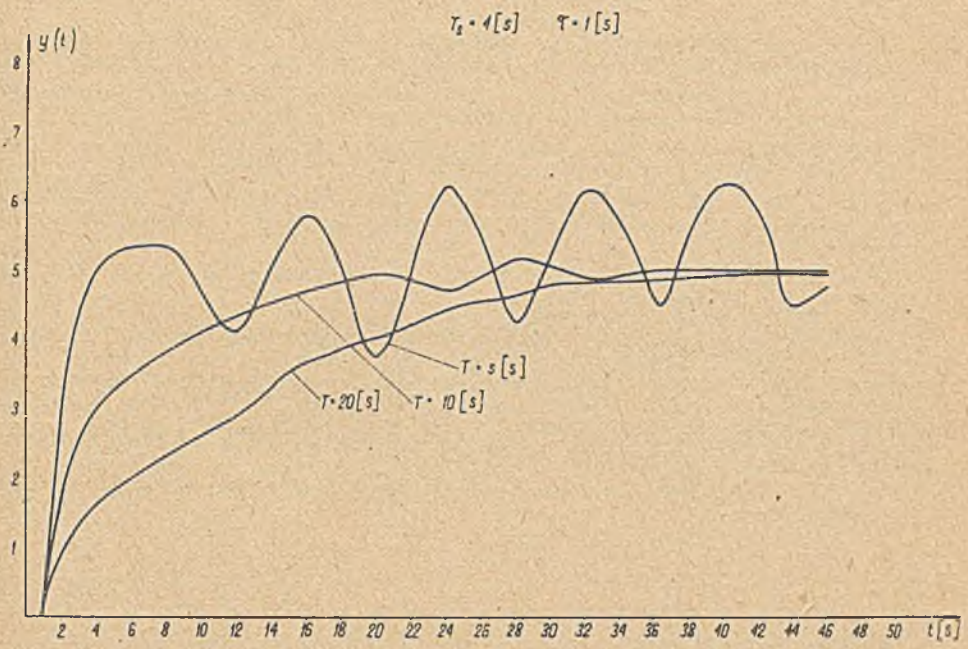
sterowania a jakością stabilizacji wielkości wyjściowej oraz, co jest zgodne z intuicją, że wraz ze wzrostem T_s zwiększają się wahania y(t) wokół wartości zadanej.

Ilustrują to wykresy przedstawione na rys. 5a-e, gdzie na "rozmytej" płaszczyźnie fazowej (e, Δe) przedstawiono uproszczoną "trajektorię" sterowanego obiektu wraz z zaznaczonymi sterowaniami rozmytymi (użyty znak $\circlearrowleft$ oznacza, że w ciągu kolejnych okresów sterowań obiekt nie zmienił swego stanu charakterystycznego). Dla odpowiednio małych T_s w stosunku do czasu opóźnienia w wyniku zastosowania ciągu sterowań układ dochodzi do stanu, w którym błąd i zmiana błędu są zerowe (w sensie określonych powyżej zbiorów rozmytych). Jednocześnie można zauważyć, że nie zawsze ma to miejsce (rys. 5e), gdzie obiekt podlega sterowaniom na przemian (+L, -L), przechodząc ze stanu (-L -L) do (+S, +L). Jest to spowodowane przyjęciem zbyt dużego okresu sterowania. Warto zauważyć, że w tym przypadku obserwuje się pewnego rodzaju niestabilność. Należy tu jednak zaznaczyć, że pojęcie stabilności musi być ujęte w kategoriach rozmytości.

Dokonano również badań wpływu stałej czasowej T na jakość stabilizacji wielkości wyjściowej. Można zauważyć, że ze wzrostem stałej czasowej maleją wahania y(t) wokół wartości zadanej (rys. 6). Również w tym przypadku zasadniczą rolę gra pojęcie stabilności w kategoriach rozmytości.



Rys. 5. Trajektorie układu sterowanego dla $T = 5$ [s], $\tau = 1$ [s]
a) $T_s = 5$ [s], b) $T_s = 1$ [s], c) $T_s = 2$ [s], d) $T_s = 3$ [s], e) $T_s = 4$ [s]



Rys. 6. Przebieg czasowy wielkości wyjściowej dla ustalonego okresu sterowania $T_s = 4$ [s] i opóźnienie $\tau = 1$ [s] i zmiennej stałej czasowej

4. Podsumowanie

Otrzymane w niniejszej pracy wyniki dotyczące sterowania rozmytego wskazują na celowość stosowania tego typu sterowania, wykorzystującego wiedzę operatora, sformalizowaną w oparciu o teorię zbiorów i logikę rozmytą, pozwalającego na zrezygnowanie z etapu budowy modelu sterowanego procesu (budowa modelu matematycznego nie zawsze jest możliwa).

Jednocześnie, co wynika z otrzymanych wyników symulacji, sterowanie to zapewnia dość dużą dokładność stabilizacji wielkości wyjściowej. Należy zwrócić uwagę, co nie jest bez znaczenia przy rosnącym zastosowaniu maszyn cyfrowych (głównie minikomputerów) do bezpośredniego sterowania procesami przemysłowymi, na przydatność tego rodzaju algorytmów sterowania wynikającą z małych nakładów obliczeń oraz wymaganej pojemności pamięci maszyny.

LITERATURA

[1] Zadeh L.A.: Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Trans. SMC SMC-3 (1) January 1973.

[2] King P.I. and Mamdani E.H.: The application of fuzzy control systems to industrial processes. Automatica, Vol. 13, 1977.

[3] Kickert W.J.M., van Nauta Lemke H.R.: Application of a fuzzy controller in a warm water plant. Automatica Vol 12, 1976.

[4] Kasprzyk J.: Całka rozmyta jako model operatora ludzkiego w złożonych systemach automatyki. Prace VIII Krajowej Konferencji Automatyki, Rzeszów 1977, tom I.

[5] MacVicar-Whelan PJ.: Fuzzy sets for man-machine interaction Int. J. Man-Machine Studies 8, 1976.

[6] Kickert W.J.M., Mamdani E.H.: Analysis of a fuzzy logic controller, Fuzzy Sets and Systems 1, 1978.

[7] Tong R.M.: A control Engineering Review of fuzzy Systems Automatica Vol 13, 1977.

[8] Czaja-Pośpiech D.: O pewnych regułach logiki rozmytej. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Mat.-Fiz. (w druku).

[9] Górecki H.: Analiza i synteza układów regulacji z opóźnieniem. WNT, Warszawa 1971.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРАВИЛАХ РАСПЛЫВЧАТОЙ ЛОГИКИ

Р е з ю м е

В работе представлен метод управленил, основанный на обобщённых правилах расплывчатой логики. Рассматривается расплывчатый алгоритм, реализирующий это управление. Решение проиллюстрировано цифровыми результатами симуляционных исследований.

A METHOD OF CONTROL BASED ON THE RULES OF FUZZY LOGIC

S u m m a r y

In the paper the method of control based on generalised rules of fuzzy logic has been presented. Also a fuzzy algorithm realising this control has been shown. Considerations are illustrated with numerical simulation results.