

Zastosowanie modelowania rozmytego bazującego na wiedzy ekspertów do modelowania procesu flotacji węgla

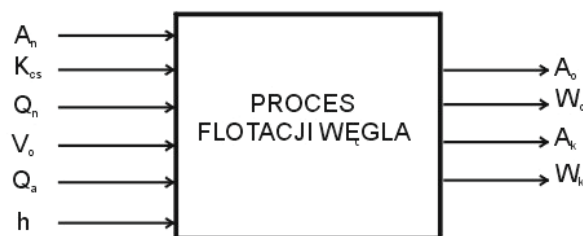
Modelowanie rozmyte pozwala zamienić wiedzę ekspertów na sformalizowany zapis matematyczny. Stwarza to możliwości w zakresie sterowania w przypadku procesów trudnych do zautomatyzowania lub o niepełnej informacji pomiarowej. W artykule przedstawiono wyniki zastosowania i ocenę metody modelowania rozmytego dla celów tworzenia modelu (modeli) na bazie wiedzy ekspertów przeznaczonego do sterowania procesem wzbogacania węgla. Zadania badawcze i modelowe przeprowadzono na przykładzie procesu flotacji węgla.

1. WSTĘP

Metoda modelowania rozmytego bazująca na wiedzy ekspertów może być z powodzeniem stosowana do modelowania dowolnego procesu obsługiwanego w pełni lub częściowo przez operatorów–ekspertów. Ekspert obserwując i obsługując dany proces pozyskuje wiedzę o nim. Wiedzę tę można wykorzystać przy projektowaniu układów sterowania procesami przeróbki węgla, gdyż zawiera ona w sobie praktyczny sposób postępowania (algorytm) przy zmianach określonych parametrów procesu, ważnych z punktu widzenia celu wzbogacania. Metoda modelowania rozmytego, bazująca na wiedzy ekspertów, pozwala na tworzenie modeli, które, przybliżając zależności sygnałów sterujących w funkcji zakłóceń pomiarowo dostępnych, mogą pełnić funkcje regulacyjne. Ankietyzacja jest jednym z narzędzi pozyskiwania wiedzy eksperckiej. Ankiety zawierają wiedzę intuicyjną oraz wiedzę wynikającą z doświadczenia zawodowego ekspertów–operatorów o poprawnym prowadzeniu procesu. Do tworzenia modeli rozmytych procesu flotacji węgla wykorzystano wypełnione przez trzech ekspertów gotowe ankiety [7].

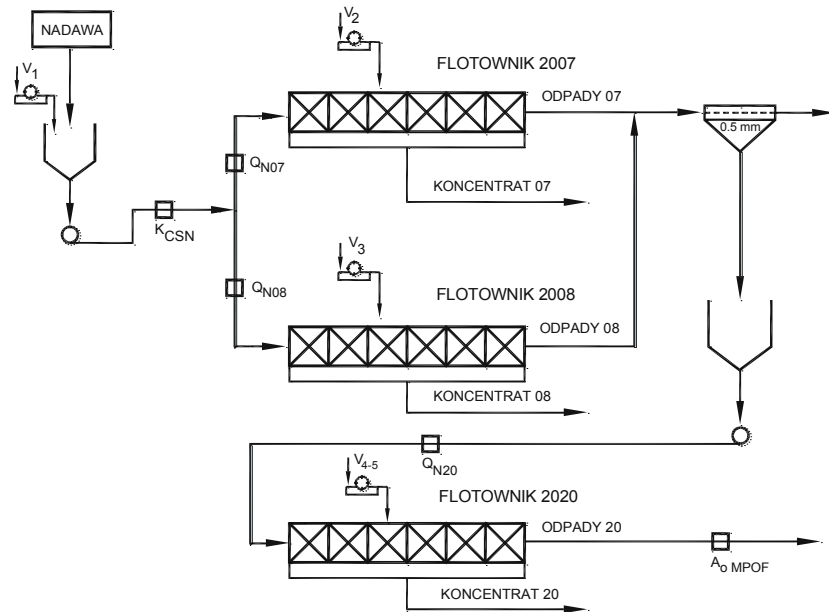
Flotacja należy do fizykochemicznych metod wzbogacania surowców mineralnych. W przypadku węgla kamiennych wzbogacanie tą metodą stosowane jest dla nadawy składającej się z ziaren mniejszych

od 0,5 mm (max <1 mm). Z punktu widzenia automatyzowania procesu, flotacja węgla jest wielowymiarowym, dynamicznym nieliniowym obiektem sterowania [1, 3]. Podstawowymi wielkościami wejściowymi procesu są: natężenie przepływu nadawy – Q_n o zawartości popiołu A_n i koncentracji części stałych w nadawie K_{cs} , natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego V_o , natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów Q_a oraz poziom zawiesiny w komorach flotownika h . Wielkościami wyjściowymi są: ilość (wychód) koncentratu W_k , zawartość popiołu w koncentracie A_k , ilość (wychód) odpadów W_o , zawartość popiołu w odpadach A_o – rys. 1.

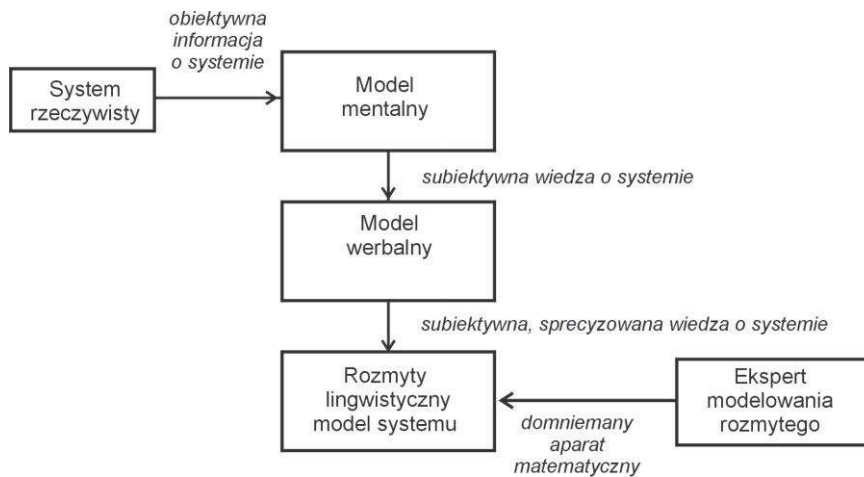


Rys. 1. Podstawowe wielkości wejściowe i wyjściowe procesu flotacji węgla

Model rozmyty opracowano na przykładzie obiektu flotacji KWK Sośnica (obecnie KWK Sośnica – Makoszowy). Jak widać na rys. 2, obiekt ten jest skomplikowany technologicznie i z natury rzeczy trudny



Rys. 2. Układ technologiczny procesu flotacji



Rys. 3. Proces tworzenia rozmytego lingwistycznego modelu procesu rzeczywistego [za 6]

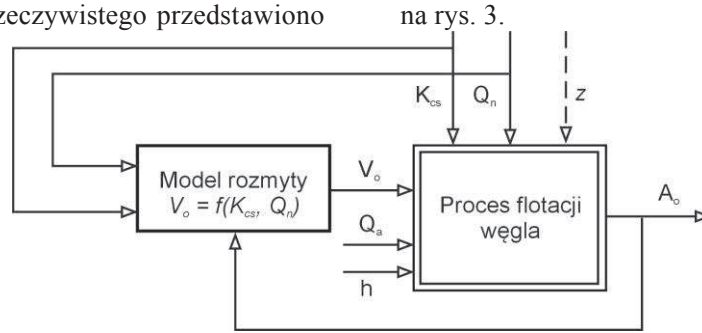
do zautomatyzowania. W układzie sterowania, zainstalowanym przez firmę MINTECH, mierzone były następujące wielkości: natężenie przepływu nadawy (Q_{n07} , Q_{n08} , Q_{n20}), koncentracja części stałych w nadawie (K_{cs}), poziomy zawiesiny w komorach flotowników (h_{07} , h_{08} , h_{20}), natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów (Q_{a07} , Q_{a08} , Q_{a20}), zawartość popiołu w odpadach flotownika wtórnego (na wyjściu układu).

2. METODYKA BUDOWY MODELU ROZMYTEGO PROCESU FLOTACJI

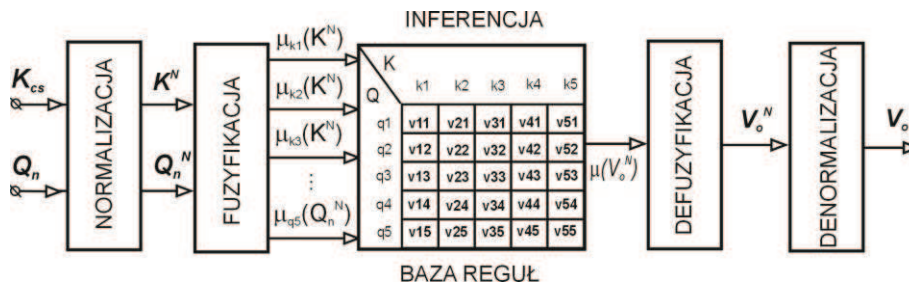
Człowiek obserwując lub obsługując proces nabywa wiedzę o tym procesie. Wiedza ta może być

świadoma lub podświadoma. Ta pierwsza daje się sformułować w jawny zapis lub przekaz ustny. Wiedzy podświadomej w taki sposób nie da się sformalizować. W zasadzie jedynym sposobem pozyskania tej wiedzy jest długookresowa obserwacja (rejestracja) pracy eksperta podczas obsługi procesu. Wiedzę o procesie (prowadzeniu procesu), jaką posiada ekspert określa się mianem modelu mentalnego (*ang. mental model*) [6]. Ekspert procesu nie jest w stanie przekazać całej swojej wiedzy, szczególnie intuicyjnej. Całą tę brakującą „część wiedzy”, niezbędną do stworzenia rozmytego modelu lingwistycznego uzupełnia się na zasadzie domniemania eksperta modelowania rozmytego [6]. Schemat obrazujący proces tworzenia rozmytego lingwistycz-

nego modelu systemu rzeczywistego przedstawiono



Rys. 4. Sterowanie procesem flotacji z użyciem modelu rozmytego zależności ilości odczynnika flotacyjnego od parametrów ilościowych nadawy z korektą sygnału sterującego w zależności od wartości A_o (z – zakłócenia pomiarowo niedostępne)



Rys. 5. Struktura modelu rozmytego – model o dwóch wejściach i jednym wyjściu z pięcioma zbiorami rozmytymi wejść. K^N – znormalizowana wartość koncentracji części stałych, Q^N – znormalizowana wartość natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego, $\mu_{uk}(U^N)$ – funkcja przynależności do k -tego zbioru rozmytego wejścia, U^N – K^N lub Q^N

Dostatecznie dokładne modele rozmyte udaje się skonstruować w przypadku procesów wolnozmiennych o najwyżej dwóch wejściach, nawet wówczas, gdy ilość informacji o systemie jest mała. Uzasadnia to użycie rozmytego modelowania bazującego na wiedzy ekspertów dla celów sterowania procesem flotacji. Zastosowanie modelu rozmytego do sterowania procesem flotacji stanowi rodzaj sterowania otwartego od zakłóceń pomiarowo dostępnych z korektą sygnału sterującego uwzględniającą wartość sygnału regulowanego A_o . Schemat blokowy układu sterowania z użyciem modelu rozmytego przedstawiono na rysunku 4.

W modelu rozmytym wyróżnić można następujące bloki:

- blok *normalizacji* – w bloku tym wejściowe sygnały modelu, czyli koncentracja części stałych w nadawie oraz natężenie przepływu nadawy, ulegają skalowaniu na zakres $[-1, 1]$,
- blok *fuzyfikacji* – w bloku tym następuje rozmywanie, czyli znajdowanie stopnia przynależności do zbiorów rozmytych $k_i, q_j, (i, j=1,2,3,4,5)$,
- blok *inferencji* – wyznacza funkcję przynależności wyjścia modelu,
- blok *defuzyfikacji* – oblicza ostrą wartość wyjścia modelu,

- blok *denormalizacji* – wykonuje operację odwrotną do normalizacji.

Fuzyfikator przekształca wektor wejściowy w zbiór rozmyty scharakteryzowany funkcją przynależności [6]. Jako funkcje przynależności do zbiorów rozmytych wejść przyjęto funkcje trójkątne (funkcja Λ) [2], gdyż zwykle przy małej ilości informacji stosuje się najprostsze funkcje przynależności, złożone z odcinków prostych [6]. Natomiast jako funkcje przynależności do zbiorów rozmytych wyjścia przyjęto funkcje typu *singleton*. Obliczone wartości stopni przynależności do zbiorów rozmytych wejść $\mu_{ki}(K_{cs}^N), \mu_{qj}(Q_n^N)$ są miarą tego jak wysoka jest przynależność wartości K_{cs}^N, Q_n^N do poszczególnych zbiorów rozmytych wejść.

Blok *inferencji* (wnioskowanie) oblicza w oparciu o wejściowe stopnie przynależności $\mu_{ki}(K^N), \mu_{qj}(Q^N)$ wynikową funkcję przynależności $\mu(v_o^N)$. Blok *inferencja* zawiera: bazę reguł, mechanizm inferencyjny oraz funkcję przynależności wyjścia modelu. *Baza reguł* reprezentuje wiedzę jakościową o modelowanej zależności wejść i wyjścia w postaci zbioru reguł **jeżeli – to**. Dla modelu o dwóch wejściach i jednym wyjściu mają one postać:

$$JE\acute{Z}ELI \left(\begin{array}{c} K^N = k_i \\ \text{poprzednik (przesłanki)} \\ \text{I} \\ Q^N = q_j \end{array} \right) TO \left(\begin{array}{c} V^N = v_{ij} \\ \text{następnik (konkluzja)} \end{array} \right) \quad (1)$$

W zaproponowanych modelach rozmytych o dwóch wejściach scharakteryzowanych pięcioma zbiorami rozmytymi wejść do agregacji przesłanek użyto operatora PROD, natomiast inferencję zrealizowano metodą MAX-MIN. Do obliczenia ostrej wartości wyjścia (defuzyfikacja) zastosowano *metodę wysokości*.

Przy tworzeniu modeli rozmytych procesu flotacji węgla przyjęto pewne założenia oraz uproszczenia, które zestawiono poniżej.

1. Model rozmyty jest modelem o dwóch (trzech) wejściach i jednym wyjściu.
2. Tworzenie struktury modelu rozmytego oparto o wiedzę jawną trzech ekspertów ujętą w ankietach, które zostały wypełnione indywidualnie.
3. Sygnałami wejściowymi są parametry ilościowe nadawy kierowanej do flotownika pierwotnego: $K_{cs}, Q_n = (Q_{n07} + Q_{n08})/2$
4. Sygnałem wyjściowym modelu jest natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego – sumaryczna ilość odczynnika podawanego do zbiornika i na czoło flotacji.
5. Przyjęto modele z pięcioma zbiorami rozmytymi wejść. Struktury zaproponowanych modeli rozmytych przedstawiono na rys. 10 i 11.
6. W oparciu o wiedzę ekspertów zdefiniowano przedziały zmian parametrów ilościowych nadawy dostępnych pomiarowo: $K_{cs} = [180, 260] \text{ g/dm}^3$, $Q_n = [180, 260] \text{ m}^3/\text{h}$.
7. Model powinien reagować na zmiany zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Do modelowania przyjęto określone przez ekspertów pięć przedziałów zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Przedziały te oznaczono od A_1 do A_5 . I tak: A_1 – zakres: $A_o \leq 75\%$, A_2 – zakres: $75\% < A_o \leq 80\%$, A_3 – zakres: $80\% < A_o \leq 85\%$, A_4 – zakres: $85\% < A_o \leq 90\%$, A_5 – zakres: $90\% < A_o$
8. Jako sygnał porównawczy przyjęto zarejestrowany przebieg natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego dozowanego podczas pracy procesu przemysłowego. Układ sterowania realizował dozowanie odczynnika przy stałej dawce.
9. Do analizy porównawczej wybrano zarejestrowane przebiegi pracy układu przemysłowego, podczas której sygnały sterujące takie jak natężenie przepływu powietrza oraz poziom zawiesiny w komorach flotowników miały wartości stałe w czasie.
10. Eksperti określili ilościową wartość odczynnika flotacyjnego dla pięciu wartości koncentracji części stałych w nadawie i pięciu wartości natężenia przepływu nadawy dla każdego z pięciu przedziałów zawartości popiołu w odpadach flo-

tacyjnych. Wartościom ostrym, na które podzielono zmiany koncentracji części stałych w nadawie K_{cs} , przyporządkowano miarę jakościową: 180 g/dm^3 – BM (bardzo mała), 200 g/dm^3 – M (mała), 220 g/dm^3 – S (średnia), 240 g/dm^3 – D (duża), 260 g/dm^3 – BD (bardzo duża). Powyższe wartości po znormalizowaniu zapisać można odpowiednio: $k_1^N = -1$ (BM), $k_2^N = -0,5$ (M), $k_3^N = 0$ (S), $k_4^N = 0,5$ (D), $k_5^N = 1$ (BD). Analogicznie w przypadku natężenia przepływu nadawy Q_n otrzymano: $180 \text{ m}^3/\text{h}$ ($q_1^N = -1$) – BM, $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ($q_2^N = -0,5$) – M, $220 \text{ m}^3/\text{h}$ ($q_3^N = 0$) – S, $240 \text{ m}^3/\text{h}$ ($q_4^N = 0,5$) – D, $260 \text{ m}^3/\text{h}$ ($q_5^N = 1$) – BD.

Kreowanie modelu procesu flotacji na bazie wiedzy ekspertów obejmuje kilka etapów.

Etapy tworzenia modelu:

1. Budowa baz reguł dla przedziałów zmian zawartości popiołu w odpadach w oparciu o wiedzę każdego eksperta z osobna polega na stworzeniu opisu reguł na podstawie informacji zawartych w ankietach, np.

$$R1: JE\acute{Z}ELI \ K=k_l \ I \ Q=q_l \ TO \ V_o=v_{ll}$$

2. Uzupełnienie poszczególnych *niekompletnych baz reguł* z kompletnym rozmytym podziałem podstawowego zbioru $U^N = K^N \times Q^N$ przestrzeni wejść. Zadanie to wypełnia ekspert modelowania rozmytego.
3. Określenie struktury modelu – zastosowano dwa modele: pierwszy polega na połączeniu równoległym trzech modeli (opracowanych dla każdego eksperta z osobna), a drugi to model wspólny (reguły opracowane na podstawie informacji z trzech ankiet). Pierwszy z nich w dalszej części artykułu zwany będzie: *model 1*, a drugi – *model 2*.
4. Dostrojenie modelu

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem programu autorskiego pracującego w środowisku Matlab. Obejmują one porównanie opracowanych modeli rozmytych w stosunku do algorytmu dozowania odczynnika flotacyjnego przy stałej dawce. Jako sygnał odniesienia przyjęto zarejestrowane przebiegi natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego dozowanego w układzie przemysłowym przy zastosowaniu tego algorytmu (równanie 2).

$$V_o(t) = k_o \cdot d_o \cdot K_{cs}(t) \cdot Q_n(t) \quad (2)$$

gdzie:

d_o – dawka odczynnika flotacyjnego [dm^3/Mg],
 K_{cs} – koncentracja części stałych w nadawie [g/dm^3],

Q_n – natężenie przepływu nadawy [m^3/h],
 k_o – współczynnik.

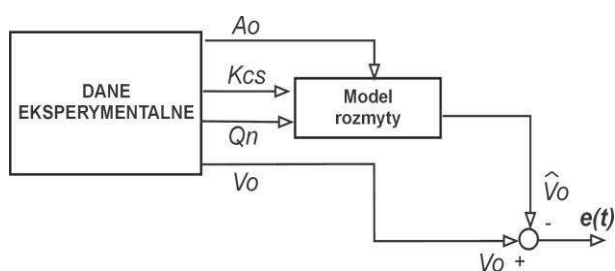
Sygnały w układzie przemysłowym rejestrowane były co $T_s=60$ s. O ile w takim czasie możliwa jest reakcja człowieka na określone zmiany sygnałów zakłócających, o tyle w rzeczywistości ekspert-operator procesu nie reaguje na zmiany w tak krótkich okresach. Praca operatora prowadzona jest raczej w dłuższych odstępach czasu, które zwykle nie są jednakowe. Modelowanie zmiennego czasu reakcji operatora jest dość trudne ze względu na znaczne problemy z ujęciem jakościowym takiej wiedzy. Ekspertowi trudno jest sformułować taką wiedzę w sposób jasny i logiczny. Dlatego zdecydowano się przeprowadzić badania symulacyjne, w których okres próbkowania modelu będzie stały i będzie krotnością T_s , czyli $T_r=b \times T_s$, gdzie $b \in N$. W badaniach symulacyjnych przyjęto $b=1, 5, 10, 20, 40$.

3. WERYFIKACJA MODELU ROZMYTEGO PROCESU FLOTACJI

Do celów porównawczych wykorzystano przebiegi zarejestrowane przez układ automatycznego sterowania procesem flotacji, który został opracowany i wdrożony w kopalni Sośnica przez firmę MINTECH Sp. z o. o.

Weryfikację modeli lub ewentualne ich dostrojenie przeprowadzono w następujący sposób:

- do wejść modelu doprowadzono zarejestrowane sygnały $K_{cs}(t)$, $Q_n(t)$ i porównano rzeczywisty sygnał sterujący (z układu przemysłowego) z sygnałem wyjściowym danego modelu,
- przeprowadzono analizę jakościową uzyskanych przebiegów sygnałów wyjściowych składowych modeli rozmytych (*model 1*),
- dokonano oceny dopasowania modeli rozmytych do danych empirycznych w sensie przyjętego kryterium (równanie 3).



Rys. 6. Porównanie sygnałów rzeczywistego i modelowego

Jako miarę oceny przyjęto wariancję resztową (3). Im wartość wariancji jest mniejsza tym dopasowanie jest lepsze.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{oi} - \hat{V}_{oi})^2 \quad (3)$$

gdzie:

N – liczba danych służących do wyznaczenia modelu,

V_{oi} – wartości obserwowane (dane pomiarowe),

\hat{V}_{oi} – wartości przewidywane przez model rozmyty.

Obliczenia dotyczące dostrajania modeli oraz symulacyjne badania porównawcze przeprowadzono dla dwóch serii pomiarowych obejmujących czas $t_A=216$ [min] (seria danych A) oraz $t_B=792$ [min] (seria danych B).

Ostateczną miarą dokładności modelu powinna być jakość sterowania realizowanego przy wykorzystaniu modelu. Modelem bardziej dokładnym będzie taki model, który umożliwi realizację lepszego sterowania [5].

4. MODELE ROZMYTE PROCESU FLOTACJI NA BAZIE WIEDZY EKSPERTÓW

Tworzenie baz reguł polega na zdefiniowaniu zestawu reguł zgodnie z wiedzą jawną zapisaną w ankietach. Wyniki tworzenia baz reguł z uwzględnieniem przedziałów zmian A_o przedstawiono graficznie na rysunku 7. Jak widać na tym rysunku wszystkie utworzone bazy reguł są niekompletne, a dla poszczególnych reguł przedziały nieciągłości się nie pokrywają. Oznacza to, że w pewnych warunkach system może pracować w zakresach nieciągłości modelu. Numerycznie kompletną bazą reguł jest baza, w której każdy z ostrych, numerycznych stanów wejść ($k1, \dots, k5$; $q1, \dots, q5$) aktywizuje co najmniej jedną regułę – konkluzję reguły [6].

Uzupełnienie baz reguł (eliminację zakresów nieciągłości modelu) przeprowadzono poprzez:

- 1) wprowadzenie nowych zbiorów rozmytych wyjścia, których wartości modalne są wynikiem interpolacji znanych modalnych wartości sąsiednich zbiorów rozmytych wyjścia,
- 2) nałożenie na siebie (złożenie) baz reguł określonych dla poszczególnych zakresów A_o utworzonych w oparciu o wiedzę wszystkich ekspertów. Wartość modalną danego zbioru rozmytego wyjścia obliczono jako średnią arytmetyczną tych wartości modalnych, które zostały określone na

podstawie ocen lingwistycznych podanych przez co najmniej dwóch ekspertów, a dotyczących tej samej reguły – model 2.

Dla pojedynczego składowego modelu rozmytego uzyskuje się zestaw pięciu baz reguł charakteryzujących pracę systemu według danego eksperta.

JEŻELI A_o jest z zakresu $A1$ to:

R1: JEŻELI ($K^N=k1$) I ($Q^N=q1$) TO ($V_o^N=v11$)

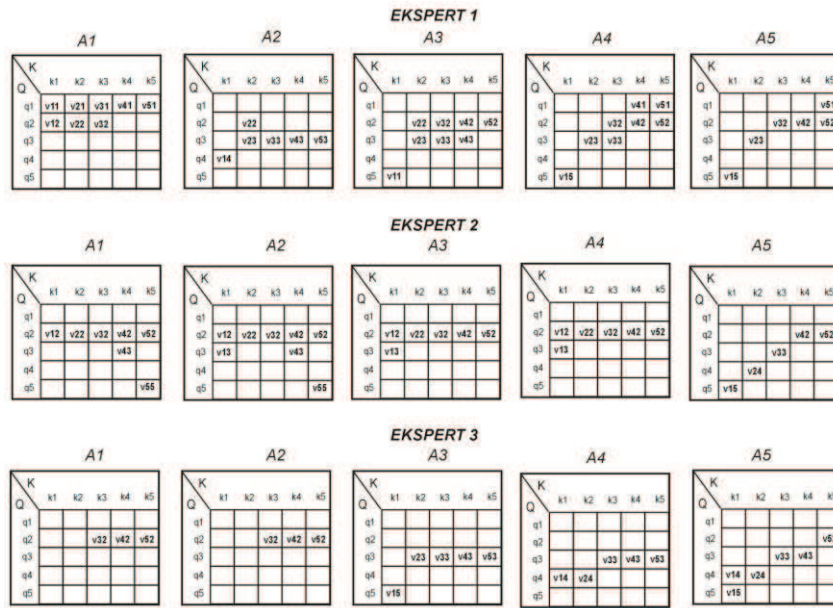
R2: JEŻELI ($K^N=k2$) I ($Q^N=q1$) TO ($V_o^N=v21$)

∩

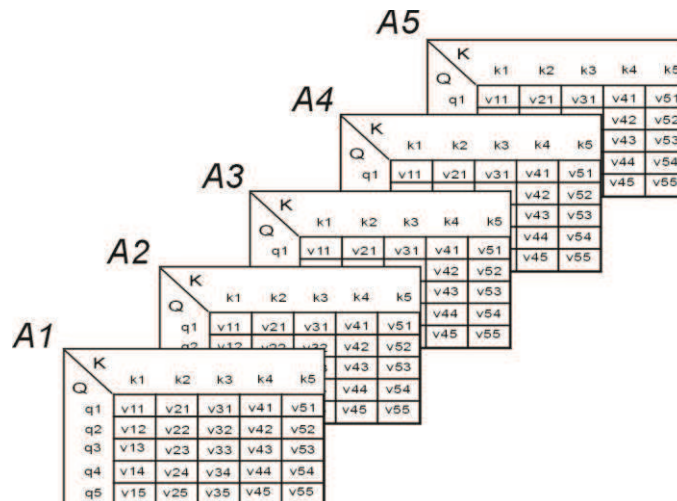
R25: JEŻELI ($K^N=k5$) I ($Q^N=q5$) TO ($V_o^N=v55$)

JEŻELI A_o jest z zakresu $A2$ to:

szczególnie w ujęciu ilościowym. Jest to spowodowane wieloma czynnikami ludzkimi, przez które rozumie się: zdolność eksperta do zapamiętywania, spostrzegawczość, doświadczenie, umiejętności precyzowania i przekazywania wiedzy, etc. Wstępna analiza rozmytych modeli składowych modelu 1 wykazała, że modele te dobrze odwzorowują przebieg sygnału rzeczywistego



Rys. 7. Niekompletne bazy reguł utworzone na podstawie wiedzy ekspertów dla przedziałów zawartości popiołu



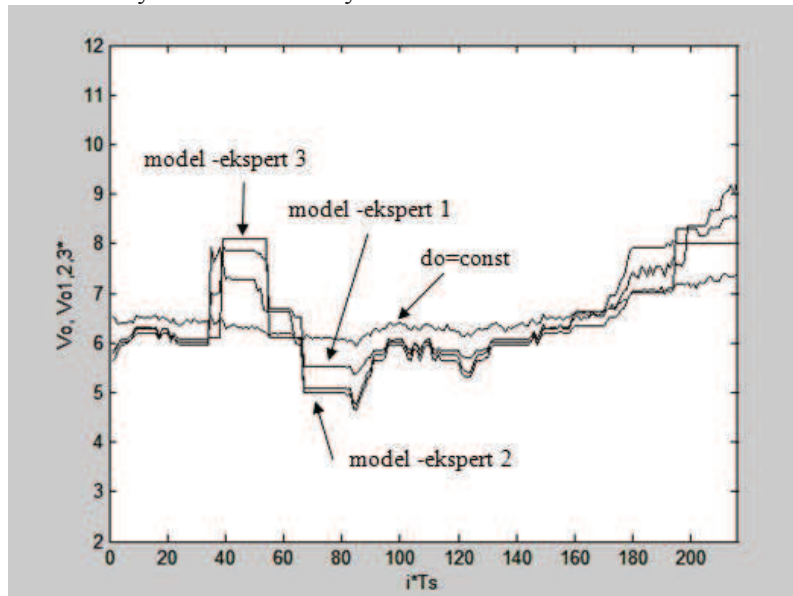
Rys. 8. Bazy reguł modelu rozmytego

Kompletne bazy reguł przedstawiono graficznie na rys. 8. Wartości modalne zbiorów rozmytych wyjścia dla poszczególnych zakresów A_o w ogólnym przypadku mają różne wartości, jedynie w przypadkach szczególnych mogą być równe.

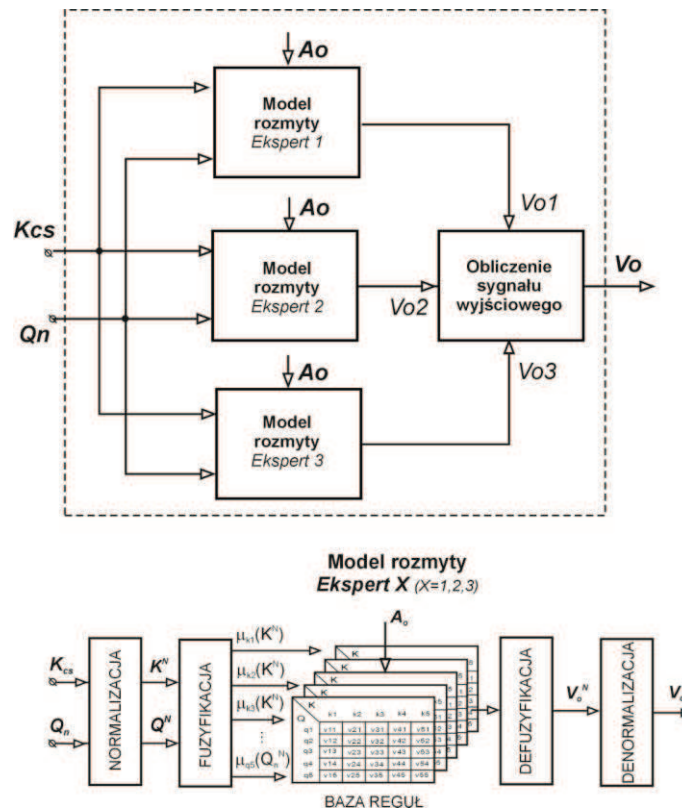
Modele utworzone na bazie wiedzy trzech operatorów tego samego procesu mogą się różnić,

w ujęciu jakościowym. Po ilościowym dostrojeniu wartości modalnych zbiorów rozmytych wyjścia uzyskano znaczną zbieżność sygnałów wyjściowych poszczególnych składowych modeli rozmy-

tych względem sygnału rzeczywistego (sygnału odniesienia), co obrazują przebiegi przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie sygnałów rzeczywistych (seria A) i wyjściowych dostrojonych modeli bazujących na wiedzy ekspertów ($T_s = 60$ s)



Rys. 10. Struktura modelu rozmytego – model 1

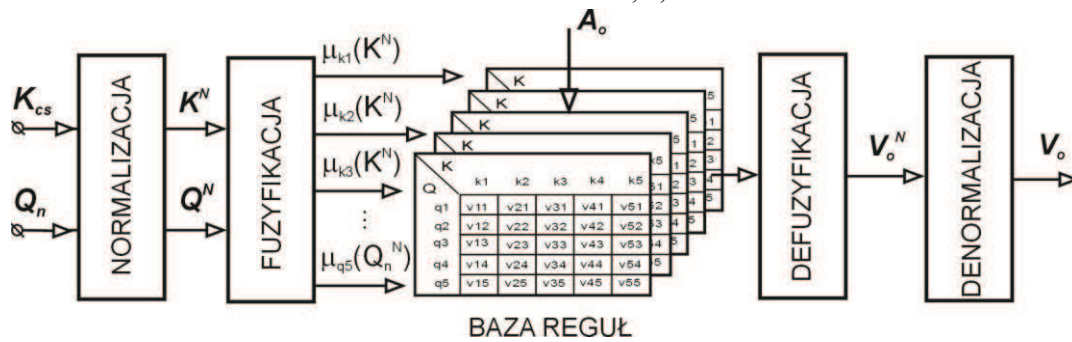
Model 1 jest połączeniem równoległym trzech modeli rozmytych (modeli składowych) utworzonych na bazie wiedzy każdego z ekspertów (rys. 10). Sygnał wyjściowy modelu 1 jest złoże-

niem trzech sygnałów wyjściowych z poszczególnych składowych modeli rozmytych. Wartość sygnału wyjściowego V_o obliczana jest z zależności:

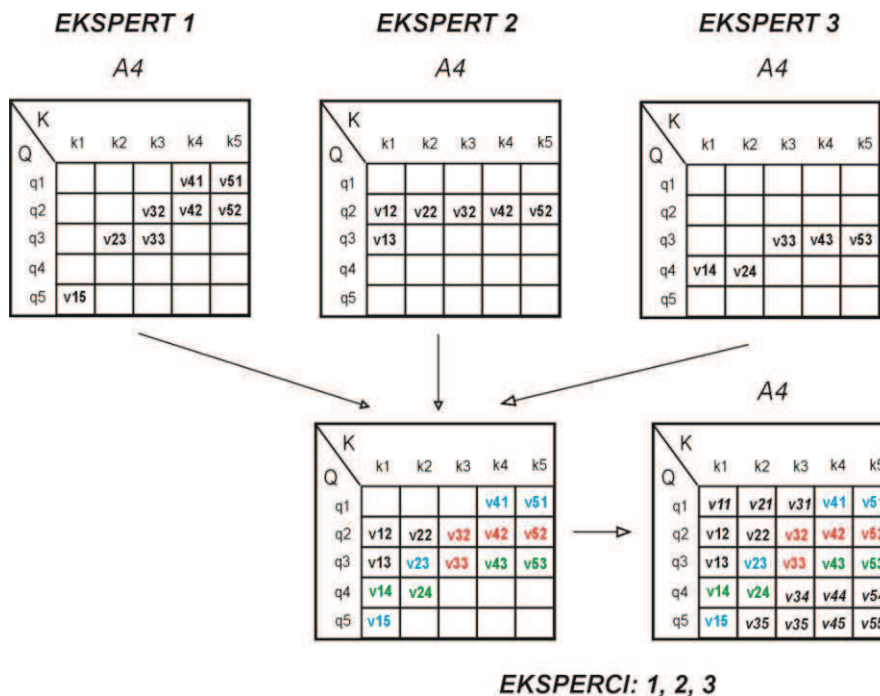
$$V_o(t) = \sum_{i=1}^3 (w_i \cdot V_{oi}) \quad (4)$$

gdzie:

V_{oi} – wartości ostre na wyjściu i -tego składowego modelu rozmytego,
 w_i – parametry równania,
 $i = 1, 2, 3$.



Rys. 11. Struktura modelu rozmytego – model 2



Rys. 12. Przykład tworzenia baz reguł modelu rozmytego – model 2

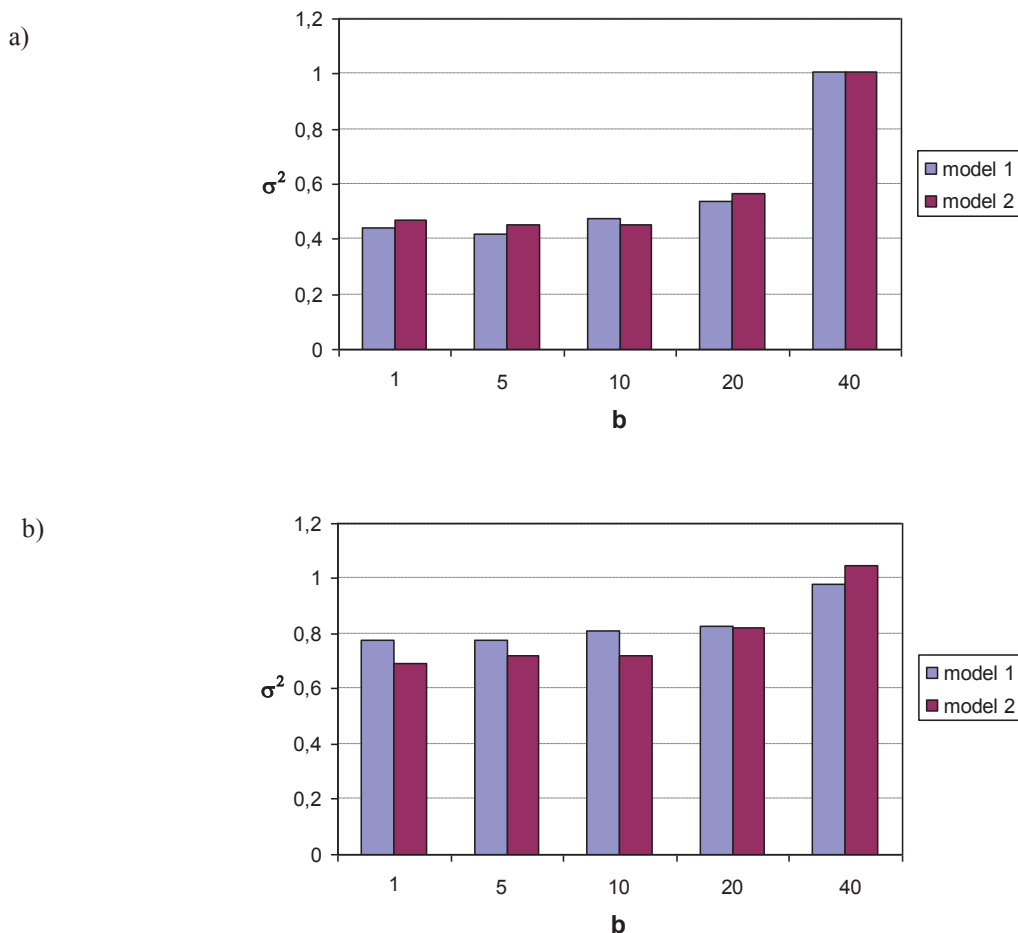
Wyznaczanie sygnału wyjściowego modelu 1 według równania (4) wiąże się z właściwym doбором parametrów w_1 , w_2 , w_3 . Łatwo zauważyć, że do celu obliczenia tych parametrów doskonale nadaje się jednowarstwowa sieć neuronowa z liniową funkcją aktywacji neuronów [4]. W efekcie zastosowania metody sztucznych sieci neuronowych uzyskano następujące wartości parametrów równania (3): $w_1 = 0,3277$, $w_2 = 0,3311$, $w_3 = 0,3309$.

Model 2 ma strukturę identyczną w porównaniu z pojedynczym modelem składowym modelu 1, z tym istotnym wyjątkiem, że kompletność modelu uzyskano przez złożenie baz reguł utworzonych na bazie wiedzy wszystkich ekspertów (rys. 11).

W modelu 2 bazy reguł są wynikiem złożenia niekompletnych baz reguł opracowanych w oparciu o wiedzę trzech ekspertów ze skorygowanymi wartościami modalnymi zbiorów rozmytych wyjścia. Idea tworzenia baz reguł została przedstawiona graficznie na rys. 12. Wartości modalne zbiorów rozmytych wyjścia, związanych z tymi regułami, których konkluzje określono w co najmniej dwóch różnych bazach reguł, obliczono jako średnie arytmetyczne. Brakujące wartości uzupełniono interpolując lub przepisując wartości modalne sąsiednich zbiorów rozmytych wyjścia (nasycenie). W ten sposób uzupełniona baza reguł stanowi główną część rozmytego modelu 2.

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne przeprowadzono w odniesieniu do dwóch serii danych pomiarowych (seria A i B) przy kilku wartościach T_r . Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono graficznie na rysunkach 13 a i b.



Rys. 13. Wartości wariancji resztowej dla dwóch modeli przy różnym czasie $T_r = b \times T_s$
a) seria A, b) seria B; $T_s = 60$ s

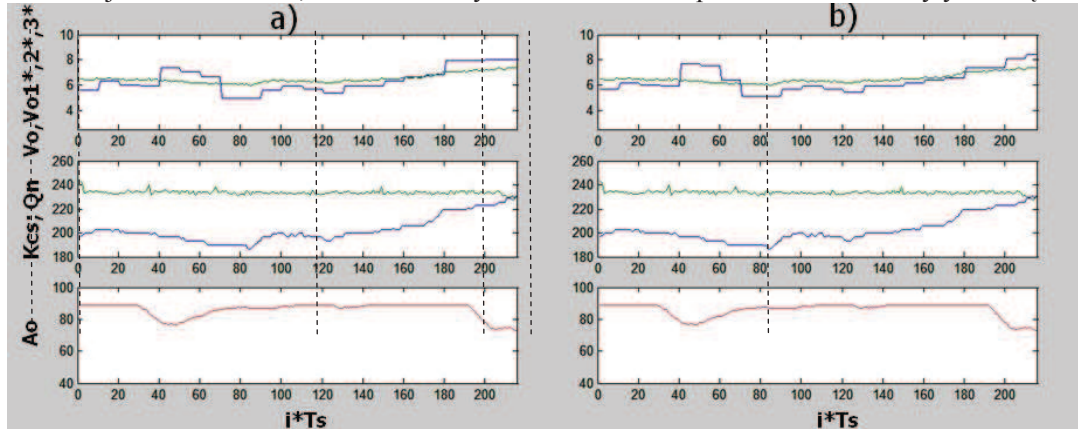
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że w większości przypadków lepsze dopasowanie do rzeczywistego przebiegu ilości odczynnika flotacyjnego posiada *model 2*. Trudno jest jednak jednoznacznie wskazać jeden z opracowanych modeli rozmytych jako wyraźnie lepszy w sensie przyjętego wskaźnika oceny, gdyż oba modele w przypadku serii pomiarowych dla poszczególnych T_r wykazują podobne dopasowanie do danych empirycznych.

Wyniki pokazują, że dla krotności okresu próbkowania T_s równych $b = 1, 5$ oraz 10 wartości wariancji nie różnią się znacząco. Dla poszczególnych serii pomiarowych obserwuje się jej wzrost przy krotnościach okresu próbkowania $b = 20$ i $b = 40$. Może to świadczyć o tym, że przy zastosowaniu modeli rozmytych, częsta zmiana wartości wyjściowej modelu (sygnału sterującego) w zależności od zakłóceń po-

miarowo dostępnych nie musi prowadzić do poprawy prowadzenia procesu. Z drugiej strony reakcja układu na zmianę parametrów ilościowych nadawy nie może być zbyt rzadka. Należy podkreślić, że lepsze dopasowanie modelu do danych empirycznych nie musi oznaczać lepszego realizowania kryterium sterowania (np. maksymalizacji zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych). Użyteczność przebiegów rzeczywistych V_o ujawnia się w przedziałach, w których poprawnie realizowany jest cel sterowania. Jeżeli za cel sterowania przyjęć maksymalizację zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych to wówczas można stwierdzić, że jeżeli model rozmyty $V_o = f(K_{cs}, Q_n)$ dla danych parametrów ilościowych nadawy wygeneruje zbliżoną wartość natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego jak przemysłowy układ sterowania, to w tym przedziale model spełnia stawiane wymagania odnośnie do jakości sterowania. Jeżeli natomiast cel

sterowania przy użyciu dozowania przy stałej dawce odczynnika nie był realizowany, czyli jakość sterowania była niska, a model dobrze odwzorowuje przebieg V_o (w sensie ilościowym i jakościowym), wówczas uprawnione jest stwierdzenie, że model w tym

zakresie jest bezużyteczny. W konsekwencji, jeżeli w zakresie, w którym sterowanie przy stałej dawce odczynnika nie zapewnia realizacji celu sterowania, a wartość natężenia przepływu odczynnika wyznaczona w oparciu o model rozmyty znacząco odbiega od



Rys. 14. Przebiegi czasowe zawartości popiołu w odpadach, parametrów ilościowych nadawy oraz sygnałów sterujących przy zastosowaniu sterowania przy stałej dawce odczynnika V_o i modelu rozmytego $V_o I^{*}, 2^{*}, 3^{*}$; a) model 1, b) model 2; $T_r = 10 T_s$

sygnału rzeczywistego (danych pomiarowych), to w takim przypadku można domniemywać, iż model ten może (ale nie musi) zapewnić poprawę jakości sterowania w sensie przyjętego kryterium.

Na rysunku 14 a i 14 b przedstawiono przebiegi czasowe natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego przy stałej dawce (dane empiryczne) oraz sygnały wyjściowe opracowanych modeli rozmytych. Zauważyć można, że przez większość czasu dozowanie odczynnika przy stałej dawce gwarantuje utrzymanie dużej zawartości popiołu w odpadach. Przy założeniu maksymalizacji zawartości popiołu w odpadach jako celu sterowania, należy stwierdzić spełnienie tego kryterium w tych zakresach. Na rysunkach 14 a i 14 b obserwuje się również okresy, w których cel sterowania nie jest realizowany w sposób zadowalający. Przedziały te oznaczono liniami kreskowanymi. Widać, że w pierwszym z tych przedziałów na skutek zmniejszania się koncentracji części stałych w nadawie następuje zmniejszanie odczynnika flotacyjnego zgodnie ze wzorem (2). Zawartość popiołu w odpadach zamiast pozostać na określonym poziomie również zaczyna się obniżać i to w sposób znaczący. W tym zakresie wyraźnie widać, że sterowanie przy stałej dawce nie zapewnia realizacji celu sterowania. Wszyscy eksperci stwierdzili, że w takiej sytuacji powinno nastąpić zwiększenie ilości odczynnika. Wiedza ta znajduje swoje odbicie w reakcjach układów sterowania z użyciem modeli rozmytych. Ocena słuszności takiego działania bez sprawdzenia tego algorytmu w warunkach przemysłowych jest trudna. Proces flotacji jest nieliniowym obiektem dynamicz-

nym i obniżenie zawartości popiołu w odpadach w rozważanym zakresie jest skutkiem oddziaływania zakłócenia w chwilach przeszłych. Spadek zawartości popiołu w odpadach w rozważanym przedziale czasu może być przyczyną wcześniejszego wzrostu koncentracji części stałych i/lub może świadczyć o tym, że na układ w chwilach poprzednich oddziaływało zakłócenie pomiarowo niedostępne. W takim przypadku optymalny punkt charakterystyki statycznej obiektu (np. maksymalna, możliwa do osiągnięcia w danych warunkach, zawartość popiołu w odpadach) mógł ulec zmianie. Można zatem zaryzykować stwierdzenie, że w tych warunkach zmiana powinna ulec wartość dawki d_o , co w rzeczywistości zachodzi w przypadku modeli rozmytych. Trudno jest jednak ocenić, czy reakcja układu w postaci znaczącego wzrostu odczynnika flotacyjnego obliczonego przy użyciu modeli rozmytych pozwoliłaby na szybsze sprowadzenie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych do akceptowalnej wartości.

Drugi z zaznaczonych przedziałów pokazuje, że wzrost ilości odczynnika flotacyjnego proporcjonalnie do narastania koncentracji części stałych w rozważanym zakresie nie zapewnia utrzymania dużej zawartości popiołu w odpadach. Obserwowana reakcja układów sterowania z wykorzystaniem modeli rozmytych objawia się znacznie większym wzrostem ilości odczynnika flotacyjnego, co w tym przypadku może doprowadzić do uzyskania wyższej wartości zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Należy również zaznaczyć, że w pozostałych przedziałach pracy układu cel sterowania realizowany jest w spo-

sób zadowolający, a sygnały z modeli rozmytych są zbliżone do danych empirycznych. Sterowanie przy stałej dawce odczynnika i sterowanie z użyciem modeli rozmytych w tych przedziałach czasu jest równoważne w sensie założonego celu sterowania. Oceniając modele rozmyte tworzone na bazie wiedzy ekspertów można sformułować wniosek dotyczący sterowania, że modele te ze względu na swoje wady nie stanowią alternatywy dla układów automatycznej regulacji, a co najwyżej mogą stanowić ich uzupełnienie. Natomiast modele te wykazują szereg zalet, które przemawiają na korzyść ich stosowania w miejsce algorytmu dozowania odczynnika przy stałej dawce.

6. PODSUMOWANIE

1. Jakościowa wiedza o procesie (choćby cząstkowa) pozyskana od eksperta umożliwia opracowanie struktury rozmytego modelu $V_o=f(K_{cs}, Q_n)$, co może znacząco ograniczyć nakład pracy na identyfikację modelowanej zależności innymi metodami. Ma to szczególne znaczenie przy modelowaniu określonych zależności w warunkach niepełnej informacji pomiarowej.
2. Modele rozmyte utworzone w oparciu o wiedzę trzech ekspertów tego samego procesu różnią się głównie w ujęciu ilościowym. Istnieje możliwość dostrojenia parametrów modelu w połączeniu z innymi metodami (w odniesieniu do nich).
3. Zastosowanie modelu rozmytego do sterowania procesem flotacji węgla stanowi rodzaj sterowania otwartego od zakłóceń pomiarowo dostępnych z korektą wartości sygnału sterującego zależną od wartości sygnału regulowanego A_o .

4. Zaproponowane modele rozmyte (*model 1, model 2*) zależności $V_o=f(K_{cs}, Q_n)$ odwzorowują podobnie wejścia na wyjście i w tym sensie są do siebie zbliżone.
5. Modele rozmyte na bazie wiedzy ekspertów stanowią alternatywę dla sterowania przy stałej dawce odczynnika. Sterowanie z użyciem rozmytych zależności $V_o=f(K_{cs}, Q_n)$ może dać lepsze wyniki niż sterowanie przy $d_o = \text{const}$.

Literatura

1. Cierpisz S., Joostberens J.: Simulation of fuzzy control of coal flotation, IFAC Workshop – MMM'2006, Automation in Mining, Mineral and Metal Industry, Proceedings of the IFAC Workshop, 20-22.09.2006, p. 210-214.
2. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. Wyd. Naukowo – Techniczne, Warszawa 1993.
3. Kalinowski K.: Sterowanie procesu flotacji węgla. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1991.
4. Korbicz J., Obuchowski A., Uciński D.: Sztuczne Sieci Neuronowe – Podstawy i Zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
5. Niederliński A.: Systemy i sterowanie. PWN, Warszawa 1983.
6. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 1999.
7. BK-235/RG1/2000/3.

Artykuł opublikowano w ramach pracy badawczej BW 473/RG-0/2008

Recenzent: dr hab. inż. Krystian Kalinowski, prof. nzw. W Pol. Śl.

