

ON THE POSSIBILITY OF FUZZY LOGIC IMPLEMENTATION IN THE AREA OF MACHINE AND DEVICES EXPLOITATION

Michał Pająk

*Radom University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
Department of Thermal Technology
Krasickiego 54, 26-600 Radom, Poland
tel. +48 48 361 71 49
e-mail: m.z.pajak@wp.pl*

Abstract

The exploitation phase consists from big number of different processes. Therefore the optimal management of this phase is very complicated. To make it easier the computerization could be implemented. Some software applications are already put into practice in this filed but they are partial solutions. The comprehensive computerization of the exploitation phase management faces a lot of difficulties. The main reason of the problems is the approximate character of the analyzed processes and factors. Additionally the inaccuracy appears not only on the input data level but also in the algorithms and procedures of the exploitation phase management and control. In the paper the implementation of the fuzzy sets theory is presented. The fuzzy logic is used to model the approximate character of the analyzed processes. During the industry studies there were identified the fields where the fuzzy logic implementation could solve the computerization problems. In the paper the results of the studies are presented in the form of the idea of fuzzy logic implementation in the area of machine and devices exploitation.

Keywords: *Exploitation, exploitation systems, fuzzy logic, fuzzy modelling , fuzzy sets*

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA LOGIKI ROZMYTEJ W DZIEDZINIE EKSPLOATACJI MASZYN I URZĄDZEŃ

Streszczenie

Podczas fazy eksploatacji maszyn i urządzeń zachodzi wiele procesów wykazujących odmienną charakterystykę. W związku z tym bardzo istotne jest poprawne kierowanie ich przebiegiem. Zadanie to jest zagadnieniem trudnym i złożonym, dlatego duże usługi na tym polu może oddać wprowadzenie komputeryzacji. Mimo, że na wielu obszarach eksploatacji maszyn i urządzeń pojawiło się wspomaganie komputerowe to jednak kompleksowa komputeryzacja kierowania fazą eksploatacji napotyka znaczne trudności. Trudności te związane są z występowaniem w licznych zagadnieniach eksploatacyjnych nieścislego i przybliżonego charakteru analizowanych zjawisk i czynników. Co więcej niedokładność i nieokreśloność pojawia się zarówno na poziomie parametrów wejściowych do procesów decyzyjnych kierowania fazą eksploatacji jak i występuje w algorytmach i procedurach ich przebiegu. W opracowaniu proponuje się zastosowanie elementów teorii zbiorów rozmytych do modelowania niedokładności występujących w procesach kierowania fazą eksploatacji. W trakcie badań przeprowadzonych na rzeczywistych obiektach przemysłowych wyodrębniono szereg miejsc gdzie zastosowanie modelowania rozmytego może przynieść poprawę możliwości wprowadzenia wspomaganie komputerowego procesów. W artykule przedstawiono wyniki badań w formie koncepcji zastosowania modelowania rozmytego w dziedzinie eksploatacji maszyn i urządzeń.

Słowa kluczowe: *Eksploatacja, systemy eksploatacyjne, logika rozmyta, modelowanie rozmyte, zbiory rozmyte*

1. Wstęp

Faza eksploatacji urządzenia określana jest jako przedział czasu od chwili wytworzenia maszyny do chwili jej likwidacji [1]. W fazie tej maszyna realizuje cele, dla których została zaprojektowana i wytworzona. Można zatem stwierdzić, że przebieg procesów fazy eksploatacji

określa przydatność maszyny do wypełniania jej zadań i celów eksploatacji. W związku z tym szalenie ważne jest, aby w sposób optymalny kierować przebiegiem procesów eksploatacyjnych.

Jednocześnie należy podkreślić, że w ramach fazy eksploatacji można wyróżnić szereg procesów wykazujących całkowicie odrębną charakterystykę. I tak w trakcie fazy eksploatacji zachodzą procesy przedużytkowe, użytkowe, zapewnienia zdatności, logistyczne, procesy likwidacji i procesy wspomagające sterownie. Wszystkie wymienione procesy zaliczane są do procesów sterowanych. Faza eksploatacji obejmuje również procesy niesterowane takie jak procesy zużycia tribologicznego i nietribologicznego [2]. Każdą z wymienionych grup procesów zajmuje się odrębna dziedzina wiedzy.

Duża liczba różnorodnych procesów zaliczanych do fazy eksploatacji powoduje komplikacje zadań optymalnego sterowania systemem eksploatacyjnym. Znaczną poprawę jakości sterowania można uzyskać dzięki wprowadzeniu na tym polu wspomaganie komputerowego. Jednakże jak wykazano podczas przeprowadzonych badań literaturowych i przemysłowych [3],[4] komputeryzacja sterowania procesami eksploatacyjnymi napotyka wiele trudności. Są one związane z pojawiającą się wielokrotnie niedokładnością określenia wartości sygnałów sterowania i parametrów eksploatacyjnych oraz przybliżonym charakterem funkcji celu sterowania. W celu optymalizacji kierowania i sterowania systemem eksploatacyjnym pojawiające się niedokładności muszą być uwzględnione w tworzonym modelu.

Na podstawie analizy literaturowej [5],[6],[7],[8] zdecydowano się na wprowadzenie elementów teorii zbiorów rozmytych [9] jako narzędzia pozwalającego na modelowanie występujących przybliżeń. Wyodrębniono szereg miejsc gdzie wprowadzenie logiki rozmytej może przynieść podwyższenie jakości sterowania systemem eksploatacyjnym. Poniżej opisano zidentyfikowane możliwości implementacji teorii zbiorów rozmytych i zdefiniowano koncepcje wprowadzenia modelowania rozmytego.

2. Estymacja wartości zmiennych stanu

Decyzje kierujące procesami eksploatacyjnymi podejmowane są na podstawie estymacji stanu systemu eksploatacyjnego. Stan ten określany jest wartościami zmiennych stanu. Są to wartości mierzone lub określone w sposób kryterialny.

W przypadku, gdy wartości zmiennych stanu wyznaczane są na podstawie pomiarów, otrzymywana wartość określana jest z dokładnością urządzenia pomiarowego. Nie można zatem określić jej w sposób dokładny, a tylko zdefiniować przedział w jakim dana wartość jest zawarta:

$$X_o(t) \in \langle X_p(t) - \delta_u, X_p(t) + \delta_u \rangle, \quad (1)$$

gdzie:

$X_o(t)$ - wartość obliczeniowa zmiennej stanu,

$X_p(t)$ - wartość pomiarowa zmiennej stanu,

δ_u - błąd urządzenia pomiarowego.

Wartość jest dodatkowo obarczona błędem metody pomiarowej w przypadku wykorzystywania pomiarów pośrednich. Jest to źródłem powstawania przedziału tolerancji, który proponuje się zamodelować w postaci zbioru rozmytego typu *I* [10], dla którego jako wartość modalną przyjęto wartość pomiarową natomiast nośnik określono jako równy przedziałowi uwzględnianej tolerancji (2). W wypadku pomiarów zawierających strefy nieczułości, przedział tolerancji zamodelowano w postaci zbioru rozmytego typu *II* (3) [11].

W przypadku wartości ocenianych w sposób kryterialny ocena jest określana z przybliżeniem. Wynika ono z zadanej dyskretnej skali ocen stopnia spełnienia zdefiniowanego kryterium.

Powyżej opisywaną niedokładność proponuje się modelować przy pomocy zbiorów rozmytych typu $\Lambda(2)$. Dla zbioru tego przyjmuje się jako wartość modalną stopień spełnienia kryterium natomiast jako nośnik podwójną odległość pomiędzy dyskretnymi wartościami skali oceny.

$$FS_{\Lambda}(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq lrs \vee x \geq rrs \\ \frac{x - lrs}{lrk - lrs} & \text{dla } lrs < x \leq lrk \\ \frac{rrs - x}{rrs - lrk} & \text{dla } lrk < x < rrs \end{cases}, \quad (2)$$

gdzie:

- $FS_{\Lambda}(x)$ – funkcja przynależności dla zbioru rozmytego typu Λ ,
- lrk – najmniejsza wartość należąca do jądra zbioru rozmytego,
- lrs – najmniejsza wartość należąca do nośnika zbioru rozmytego,
- rrs – największa wartość należąca do nośnika zbioru rozmytego.

$$FS_{\Pi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq lrs \vee x \geq rrs \\ \frac{x - lrs}{lrk - lrs} & \text{dla } lrs < x \leq lrk \\ 1 & \text{dla } lrk < x \leq rrk \\ \frac{rrs - x}{rrs - rrk} & \text{dla } rrk < x < rrs \end{cases}, \quad (3)$$

gdzie:

- $FS_{\Pi}(x)$ – funkcja przynależności dla zbioru rozmytego typu Π ,
- lrk – najmniejsza wartość należąca do jądra zbioru rozmytego,
- lrs – najmniejsza wartość należąca do nośnika zbioru rozmytego,
- rrk – największa wartość należąca do jądra zbioru rozmytego,
- rrs – największa wartość należąca do nośnika zbioru rozmytego.

3. Identyfikacja istotnych danych wejściowych

Najważniejszymi procesami fazy eksploatacji są procesy użytkowe i procesy zapewnienia zdatności [12]. Decyzje dotyczące ich kierowania podejmowane są na podstawie estymacji stanów użytkowych i stanów zdatności. Estymacja stanów użytkowych przeprowadzana jest w oparciu o wartości parametrów eksploatacyjnych systemu natomiast estymacja stanów zdatności w oparciu o wartości cech systemu. Zarówno wartości parametrów eksploatacyjnych jak i cech systemu zawierają się w zbiorze zmiennych stanu. Dlatego w celu wprowadzenia komputeryzacji procesu podejmowania decyzji eksploatacyjnych niezbędna jest identyfikacja istotnych zmiennych, z punktu widzenia estymowanego stanu eksploatacyjnego. Proponuje się dokonanie wyboru istotnych zmiennych na bazie metody wykresów średnich rozmytych [13].

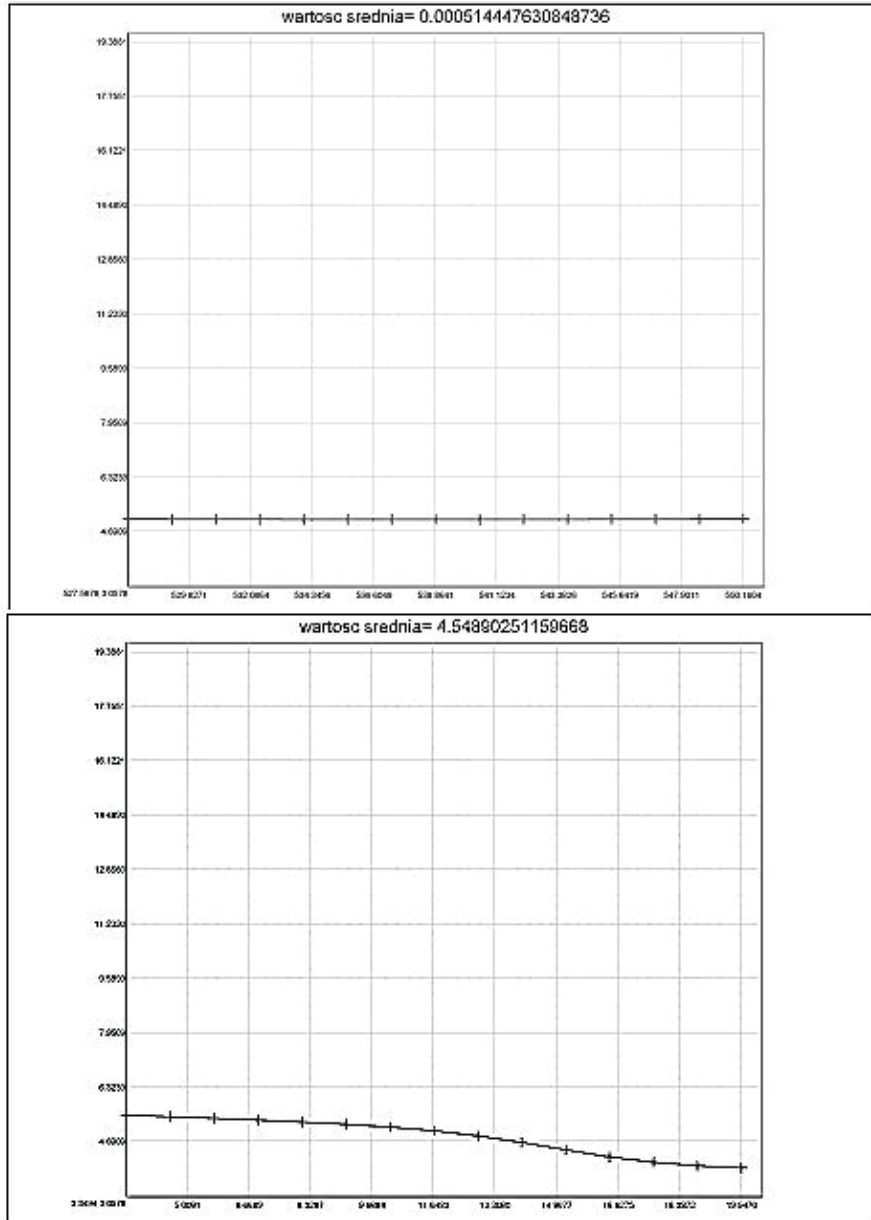
Dla wybranych wartości każdego z parametrów wyznaczany jest przekrój przez powierzchnię (4) dla ustalonego z_m^* .

$$y = f(z_1, \dots, z_n), \quad (4)$$

gdzie:

- y - analizowany parametr,
- z_i - parametr pomiarowy i ,
- n - liczba parametrów pomiarowych.

Powierzchnia rozwiązań $y=f(z)$ jest określona w przestrzeni $n+1$ wymiarowej. Wykonanie przekrojów powoduje przeniesienia zagadnienia do przestrzeni dwuwymiarowej. Jednakże należy podkreślić, iż rzeczywiste dane stanowią pewien zbiór punktów pomiarowych, z których tylko niewielka część posiada argument odwzorowania równy założonej wartości. W celu analizy należy dokonać zatem rozmycia wartości ustalonej dla przekroju, co umożliwi wyeliminowanie problemów związanych z nierównomiernym i nieciągłym pokryciem przestrzeni rozwiązań punktami pomiarowymi. Należy przyjąć, iż każdy punkt należy w jakimś stopniu do danego przekroju. Wartość przynależności opisuje się za pomocą krzywej przynależności. Kształt krzywej można zamodelować w postaci funkcji Gaussa (5) przy zadanej wartości parametru b określającego szerokość rozwarcia funkcji.



Rys. 1. Przykład krzywej utworzonej przez wartości średnie przekrojów rozmytych dla parametru nieistotnego (wykres górny) i dla parametru istotnego (wykres dolny)

Fig. 1. An example of the curve created by the mean values of fuzzy cuts for not important parameter (top diagram) and important one (bottom diagram)

$$\mu(z_m) = \exp\left(-\left(\frac{z_m^* - z_m}{b}\right)^2\right). \quad (5)$$

Dla każdego przekroju oblicza się wartość średnią ważoną (6). Wartości średnie przekrojów tworzą krzywą (Rys. 1), której rozrzut jest miarą stopnia zależności estymowanych stanów od wartości analizowanych parametrów.

$$y_{sr}(z_m) = \frac{\sum_{k=1}^t \mu_m(z_{mk}) \cdot y_k}{\sum_{k=1}^t \mu_m(z_{mk})}, \quad (6)$$

gdzie: m - numer zmiennej,
 k - numer pomiaru.

4. Modelowanie złożonych cech systemu eksploatacyjnego

Zgodnie z tym co zostało stwierdzone w poprzednim punkcie identyfikacja stanów eksploatacyjnych systemu bazuje na wartościach cech systemu i wartościach parametrów eksploatacyjnych. Wielokrotnie jednak wartości te nie są dostępne pomiarowo. Zależą one jednak od innych mierzalnych czynników. Jeżeli zależności te są określone za pomocą przybliżonych formuł matematycznych to pomocnym na tym polu może być zastosowanie modelowania rozmytego. W celu wprowadzenia komputeryzacji niezbędne jest aby modelowanie przeprowadzane było w sposób automatyczny. W tym celu proponuje się zastosowanie automatycznej generacji modelu rozmytego na bazie próbek w postaci wejścia – wyjście [14].

Generacja modelu przeprowadzana jest jako proces iteracyjny wykonujący w każdym kroku określoną ilość obrotów algorytmu genetycznego. Wynikiem działania algorytmu jest reguła bazy wiedzy modelu rozmytego. Każda wygenerowana reguła pozwala określić stopień pokrycia próbek pomiarowych przez model rozmyty. Próbkę o stopniu pokrycia większym bądź równym zadanemu są usuwane ze zbioru uczącego. Algorytm wykonywany jest do momentu wykluczenia wszystkich istniejących wektorów pomiarowych. W momencie, gdy proces generacji modelu w danym kroku wytwarza regułę, dla której stopień pokrycia wynosił zero, reguła taka jest odrzucana, a prawdopodobieństwo mutacji algorytmu genetycznego procesu generacji jest zwiększane zgodnie ze wzorem (7) [15]:

$$P'_m = P_m + \frac{(1 - P_m)}{npm}, \quad (7)$$

gdzie:

- P_m - prawdopodobieństwo mutacji,
- P'_m - zmodyfikowane prawdopodobieństwo mutacji,
- npm - zadawana ilość dozwolonych kroków iteracji bez rezultatu.

$$Q(FMR) = CZ_{Zwp}(FMR) \cdot \acute{S}PZ(FMR) \cdot WWNZ(FMR) \cdot WIW(FMR), \quad (8)$$

gdzie:

- $Q(FMR)$ - funkcja przystosowania reguły rozmytej,
- FMR - reguła modelu rozmytego,
- CZ_{Zwp} - częstotliwość wyzwalania reguły modelu rozmytego na zbiorze wektorów pomiarowych,
- $\acute{S}PZ$ - średni współczynnik pokrycia zbioru wektorów pomiarowych zgodnych z regułą modelu rozmytego,
- WIW - współczynnik interakcji reguły zbioru rozmytego z regułami już wygenerowanymi,
- $WWNZ$ - współczynnik występowania wektorów pomiarowych niezgodnych z regułą modelu rozmytego.

W wypadku, gdy algorytm wytwarza regułę, dla której stopień pokrycia jest różny od zera, prawdopodobieństwo mutacji wraca do wartości początkowej i proces kontynuowany jest dalej.

Algorytm genetyczny stosuje się do populacji, w której każdy ciąg kodowy reprezentuje pojedynczą regułę. Ciągi kodowe poddawane procesowi genetycznemu są kodowane przy pomocy liczb rzeczywistych. Analizowane są pod kątem określonej funkcji przystosowania (8) z tym, że algorytm dąży do maksymalizacji jej wartości. W celu zwiększenia jakości algorytmu zastosowana jest również strategia ewolucyjna jako narzędzie lokalnego dostrajania wygenerowanych reguł.

Wynikiem procesu generacji jest zbiór reguł modelu rozmytego. Jednak z powodu iteracyjnego charakteru procesu może on zawierać reguły takie same lub sprzeczne. Dlatego też następnym krokiem analizy jest upraszczanie bazy wiedzy.

W celu wykonania procesu upraszczania bazę wiedzy koduje się binarnie w taki sposób, że poszczególne pozycje odpowiadają występowaniu lub nie poszczególnych reguł wniosowania. Generowana jest pula początkowa ciągów kodowych, z których pierwszy koduje otrzymaną w poprzednim kroku bazę wiedzy. Wartości na wszystkich jego pozycjach wynoszą jeden. Pozostałe ciągi kodowe w populacji generowane są losowo. Wygenerowaną populację poddaje się działaniu algorytmu genetycznego określoną ilość generacji. Krok algorytmu genetycznego składa się z mutacji i krzyżowania z uwzględnieniem selekcji elitarniej oraz przy zastosowaniu mechanizmu uniwersalnego losowego próbkowania. Jako operator mutacji używany jest operator mutacji zmieniający wartość na wybranej pozycji z 1 na 0 i z 0 na 1. W procesie krzyżowania zastosowany jest dwupunktowy operator krzyżowania prostego dzielący ciągi kodowe bazowe na trzy segmenty i zamieniający jeden z nich. Proces genetyczny opiera się na minimalizacji funkcji przystosowania, której wartości wyliczane są na podstawie wielkości błędu średniego kwadratowego odpowiedzi modelu w stosunku do wartości wzorcowej.

Ostatnim krokiem procesu jest strojenie wygenerowanych reguł. Odbywa się to również za pomocą algorytmu genetycznego jednak tym razem jest to algorytm działający na ciągach kodowanych liczbami rzeczywistymi. Każdy ciąg kodowy opisuje całą bazę reguł kodując na poszczególnych pozycjach wartości charakterystyczne dla zawartych w poszczególnych regułach zbiorów rozmytych będących wartościami lingwistycznymi zmiennych pomiarowych. Pula początkowa ciągów kodowych generowana jest losowo z tym, że pierwszy ciąg kodowy przedstawia bazę reguł uzyskaną jako wynik procesu strojenia. Algorytm genetyczny dąży do zminimalizowania wartości funkcji przystosowania przyjętej w takiej samej postaci jak w procesie strojenia.

5. Identyfikacja stanów eksploatacyjnych w przestrzeni cech systemu

Stan eksploatacyjny systemu określony jest wartościami cech systemu będących lub nie będących parametrami eksploatacyjnymi. Oznacza to, że stan można interpretować jako punkt w przestrzeni n -wymiarowej gdzie poszczególne wymiary są cechami systemu.

Wartości cech systemu zmieniają się w określonych zakresach. Można zdefiniować zakres wartości możliwych, dopuszczalnych i niedopuszczalnych. Wyznaczają one w przestrzeni cech systemu hiperprostokąty R^n stanów możliwych, stanów zdatności, stanów niezdatności oraz hiperpłaszczyznę stanów granicznych jako obwód hiperprostokąta R^n stanów niezdatności.

W przestrzeni cech systemu eksploatacyjnego można również opisać stany użytkowe układu. Stan użytkowy systemu opisany jest wartością chwilową cech systemu będących parametrami eksploatacyjnymi systemu. Jeżeli dla każdej z cech określimy wartości minimalną i maksymalną, wartości dopuszczalne minimalne i maksymalne oraz wartości minimalne i maksymalne suboptymalne to w przestrzeni cech powstaną obszary wyznaczone przez określone wielkości definiujące podprzestrzeń stanów awaryjnych, dopuszczalnych i suboptymalnych. Dodatkowo definiując wartości optymalne wyznaczony zostanie optymalny punkt użytkowania systemu.

Wprowadzony w punkcie pierwszym sposób modelowania wartości cech systemu wymusza konieczność przeprowadzenia transformacji hiperprostokątów stanów systemu eksploatacyjnego do postaci przestrzennych zbiorów rozmytych. Transformacje tę wykonuje się poprzez

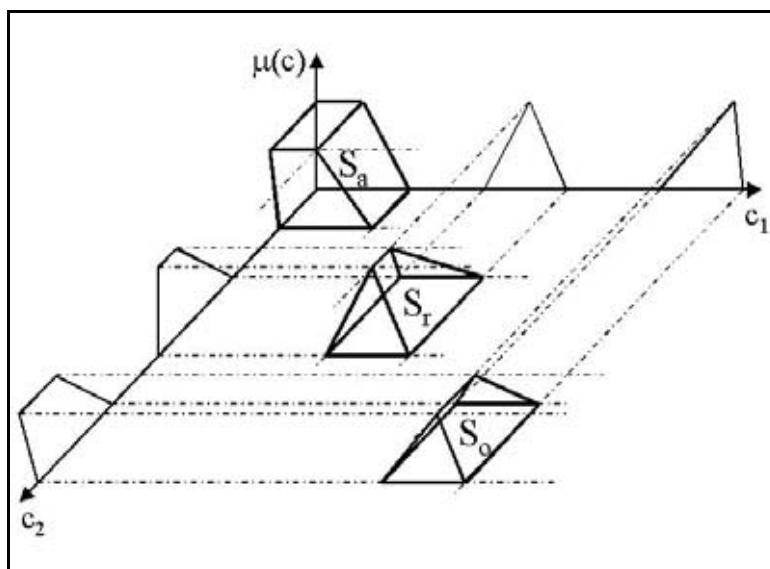
wyznaczenie relacji cylindrycznych rozszerzeń zbiorów rozmytych opisujących zakresy zmienności cech systemu i ich wartości chwilowe.

$$\begin{aligned}
 ce(FS_1; C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n) &= \int_{C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n} \mu_{FS_1}(C_1) | (C_1, C_2, \dots, C_n) \\
 ce(FS_2; C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n) &= \int_{C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n} \mu_{FS_2}(C_2) | (C_1, C_2, \dots, C_n) \\
 &\vdots \\
 ce(FS_n; C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n) &= \int_{C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n} \mu_{FS_n}(C_n) | (C_1, C_2, \dots, C_n)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

gdzie:

$ce(FS_i; C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n)$ - rozszerzenie cylindryczne i -tego zbioru rozmytego do przestrzeni n wymiarowej.

Otrzymuje się zatem hiperprostokąty R^{n+1} stanów zdatności, niezdatności, awaryjnych, optymalnych, dopuszczalnych i rzeczywistych systemu (Rys. 2). Należy podkreślić, że dzięki zastosowanej metodzie automatyzacja procesów decyzyjnych uwzględnia niedokładności występujące przy wyznaczaniu stanów systemu. Analizując odległości poszczególnych hiperprostokątów R^{n+1} można przeprowadzić w sposób automatyczny wnioskowanie dotyczące optymalnego sposobu prowadzenia użytkowania, optymalizacji okresu międzyremontowego oraz przewidywania wystąpienia stanu granicznego [16].



$n+1$

Rys. 2. Stany awaryjny S_a , rzeczywisty S_r i optymalny S_o w przestrzeni R^{n+1} cech systemu
 Fig. 2. Failure operating conditions S_a , real operating point S_r and optimal operating point S_o in R^{n+1} space of the system features

6. Planowanie procesów zapewnienia zdatności złożonego systemu eksploatacyjnego

Jednym z podstawowych czynników wpływających na niezawodność i jakość działania systemu eksploatacyjnego jest odpowiednia organizacja i plan obsług eksploatacyjnych. Zagadnienia te rozwiązywane są w procesie planowania w oparciu o szereg kryteriów. Stosowane kryteria wielokrotnie określane są w sposób przybliżony. Jednocześnie nie jest możliwe spełnienie wszystkich kryteriów w pełnym stopniu. Dodatkową komplikacją zagadnienia jest duża ilość możliwych wariantów harmonogramów odnowień urządzeń wchodzących w skład systemu. Ilość ta rośnie lawinowo wraz ze wzrostem liczby elementów systemu.

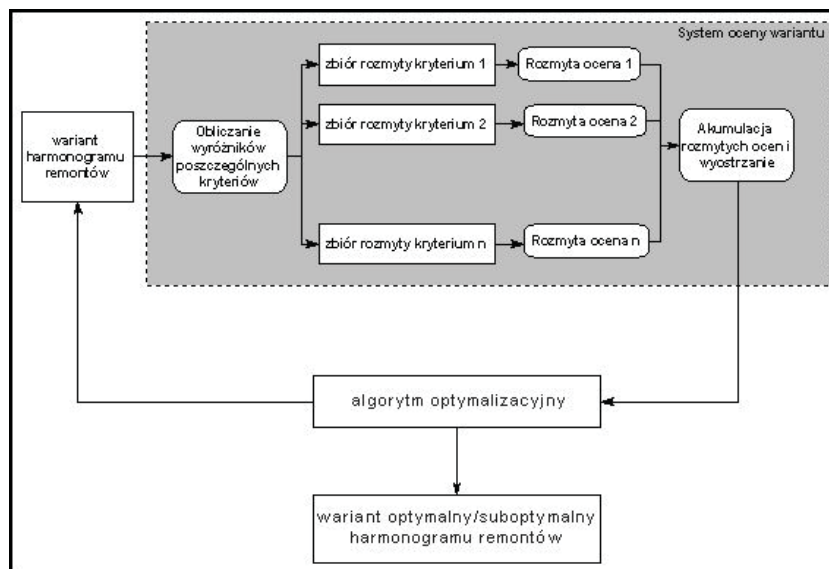
Automatyzacja procesu podejmowania decyzji dotyczącej planowania remontów umożliwia analizę większej ilości wariantów planów odnów, znalezienie wariantu optymalnego lub suboptymalnego harmonogramu oraz wykonanie optymalnej modyfikacji wariantu w przypadku sytuacji awaryjnej.

Proponowany automatyczny system ekspercki musi składać się z dwóch podstawowych części, systemu oceny harmonogramu remontów oraz techniki optymalizacyjnej zapewniającej wybór optymalnego lub suboptymalnego wariantu [17]. Zastosowanie logiki rozmytej w procesie wnioskowania służy do odwzorowania nieścisłego charakteru oddziaływań wewnętrznych i zewnętrznych systemu eksploatacyjnego. Na podstawie analizy procesu planowania odnów można wyróżnić dwie płaszczyzny zastosowań teorii logiki rozmytej.

Pierwsza z nich dotyczy odwzorowania braku precyzji określeń występujących w sformułowaniu poszczególnych kryteriów oceny planu remontów. Pojęcie okresu czasu wyraża się w postaci zbioru rozmytego typu Π (3) przy umożliwieniu zadawania długości okresu i kąta nachylenia prostych ukośnych odwzorowujących stopień rozmycia. Warunki odnoszące się do ograniczenia długości okresu międzyremontowego wyrazić można w postaci zbioru rozmytego typu Γ (10) lub L (11).

$$FS_{\Gamma}(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq lrs \\ \frac{x - lrs}{rrs - lrs} & \text{dla } lrs \leq x \leq rrs, \\ 1 & \text{dla } x > rrs \end{cases} \quad (10)$$

$$FS_L(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla } x \leq rrk \\ \frac{rrs - x}{rrs - rrk} & \text{dla } rrk \leq x \leq rrs. \\ 0 & \text{dla } x > rrs \end{cases} \quad (11)$$



Rys. 3. Schemat działania automatycznego systemu optymalizacji planów czynności obsługowych
 Fig. 3. The operation diagram of automatic system of maintenance optimisation

Druga płaszczyzna zastosowań logiki rozmytej w dziedzinie planowania procesów zapewnienia zdolności odnosi się do braku precyzji określenia wagi wpływu poszczególnych kryteriów na ocenę końcową wariantu planu remontów. W tym przypadku wprowadzono do procesu decyzyjnego wagi kryteriów w postaci liczb rozmytych. Są one zatem przedstawione jako normalne trójkątne zbiory rozmyte typu Λ (2) z wartością modalną równą opisywanej liczbie.

Ponieważ wartości wag poszczególnych kryteriów są wielkościami znormalizowanymi należy wprowadzić możliwość zmiany nośnika liczby rozmytej w granicach od 0 do 1. Przy czym przedział ten ogranicza również dziedzinę liczby rozmytej, co powoduje możliwość wystąpienia niesymetrycznych liczb rozmytych.

Zastosowane modelowanie rozmyte pozwala na zbudowanie systemu oceny wariantu planu odnów urządzeń wchodzących w skład systemu eksploatacyjnego. Projektowany system oceny może posłużyć do wypracowania wartości funkcji celu dla wybranej techniki optymalizacyjnej. Dzięki temu otrzymuje się automatyczny system optymalizacji planów procesów zapewnienia zdadności złożonego systemu eksploatacyjnego. Schemat działania systemu przedstawiony jest na rysunku (Rys. 3).

7. Wyznaczanie jakości działania systemu eksploatacyjnego

Automatyzacja zarządzania eksploatacją złożonych systemów przemysłowych musi posiadać mechanizm optymalizacji wypracowywanych decyzji. Podstawowym elementem algorytmu optymalizacji jest funkcja celu. Dla złożonych systemów eksploatacyjnych funkcją tą może być jakość działania. Jednakże zagadnienie określenia jakości w przypadku przemysłowego systemu eksploatacyjnego jest problemem bardzo trudnym. Jego komplikacja wynika z interdyscyplinarnego charakteru zagadnienia. Do oceny jakości działania systemu eksploatacyjnego wprowadza się metodę wielowymiarowego wektora jakości [18].

Punkt działania systemu eksploatacyjnego opisuje się Wielowymiarowym Wektorem Jakości (*WWJ*). Wektor ten jest określony w n-wymiarowej przestrzeni oceny jakości wyznaczonej przez cechy opisujące system, gdzie liczba wymiarów przestrzeni jest równa liczbie cech mierzalnych i niemierzalnych. Początek wektora znajduje się w początku układu współrzędnych przestrzeni, a koniec jest pozycjonowany przez wartości poszczególnych cech systemu. W wyznaczonej przestrzeni, poprzez zaznaczenie na poszczególnych osiach współrzędnych wartości pożądaných każdej z cech opisującej system, otrzymujemy punkt interpretowany jako koniec Kryterialnego Wektora Jakości (*KWJ*). Odległość zdefiniowanych wektorów określa stopień jakości działania systemu (12) [19]:

$$\Delta Q_{SGR} = \delta_m(\overline{WWJ}, \overline{KWJ}), \quad (12)$$

gdzie:

- ΔQ_{SGR} - stopień jakości działania systemu,
- δ_m - odległość określona w przestrzeni.

Zarówno kryterialny wektor jakości działania systemu jak i wektor wielowymiarowy jest definiowany w zależności od wartości cech charakteryzujących system. Wartości optymalne i chwilowe cech pozycjonują koniec wektorów jakości działania systemu w określonych punktach powierzchni jakości przestrzeni wielowymiarowej. Dzieje się tak w przypadku ostrej interpretacji wartości cech systemu. Sytuacja ta zmienia się w przypadku reprezentacji cech systemu w postaci zbiorów rozmytych. Wartość każdej z cech systemu przedstawiona jest w postaci zbioru rozmytego określonego dla innego uniwersum. W przypadku tym koniec wektorów jakości, wielowymiarowego i kryterialnego, jest relacją wielowymiarowych projekcji cylindrycznych, płaskich zbiorów rozmytych. Wynikiem omawianej relacji jest obszar w przestrzeni wielowymiarowej, którego kształt zależy od przyjętego operatora T-normy. W praktycznych zastosowaniach proponuje się wykorzystanie operatora minimum (13) lub iloczynu algebraicznego (14):

$$\min(FS_1, FS_2, \dots, FS_n) = \min(\mu_{FS_1}(c_{SGR}), \mu_{FS_2}(c_{SGR}), \dots, \mu_{FS_n}(c_{SGR})), \forall c_{SGR} \in U_{FS}, \quad (13)$$

gdzie:

- $\min(FS_1, FS_2, \dots, FS_n)$ - operator minimum zbiorów rozmytych.

$$\text{prod}(FS_1, FS_2, \dots, FS_n) = \prod_{i=1}^n \mu_{FS_i}(c_{SGR}) \cdot \mu_{FS_2}(c_{SGR}) \cdots \mu_{FS_n}(c_{SGR}), \forall c_{SGR} \in U_{FS}, \quad (14)$$

gdzie:

$\text{prod}(FS_1, FS_2, \dots, FS_n)$ - operator iloczynu algebraicznego zbiorów rozmytych.

W konwencjonalnym wariancie metody oceny jakości działania systemu jakość działania jest utożsamiana z odległością końców wektorów jakości kryterialnego i wielowymiarowego. Przy rozmytym rozszerzeniu metody końce wektorów przechodzą w wielowymiarowe obszary. Istnieje zatem konieczność wprowadzenia metody oceny jakości działania systemu. Analizując reprezentację graficzną wyników wariantu rozmytego metody określono trzy przypadki położenia względnego obszarów kryterialnego i wielowymiarowego. Obszary te mogą posiadać część wspólną, stykać się w punkcie lub też być rozdzielne. Najwyższą jakość reprezentuje przypadek obszarów posiadających część wspólną, a następnie w kolejności przypadek obszarów stycznych i rozdzielnych.

Tak więc dzięki zaprezentowanemu rozszerzeniu rozmytemu metody określania jakości działania systemu eksploatacyjnego można uwzględnić niedokładności oceny jakości wynikające z rozmytego charakteru wartości cech systemu.

8. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań obejmujących zarówno analizy teoretyczne zagadnienia jak i prace badawcze przeprowadzone na obiekcie przemysłowym sformułowano następujące wnioski:

- kierowanie przebiegiem procesów fazy eksploatacji określa przydatność maszyny do wypełniania jej zadań i celów eksploatacji,
- duża liczba różnorodnych procesów zaliczanych do fazy eksploatacji powoduje komplikacje zadań optymalnego sterowania systemem eksploatacyjnym,
- w celu automatyzacji sterowania systemem eksploatacyjnym konieczne jest stworzenie modelu procesów eksploatacyjnych wspomagającego proces decyzyjny uwzględniającego przybliżony charakter danych wejściowych i algorytmów zarządzania systemem,
- przybliżony charakter zmiennych stanu systemu może być zamodelowany jako zbiory rozmyte typy I i II ,
- proponuje się dokonanie wyboru istotnych zmiennych stanu systemu eksploatacyjnego na bazie metody wykresów średnich rozmytych,
- modelowanie wartości złożonych cech systemu możliwe jest do przeprowadzenia przy pomocy automatycznej generacji modelu na bazie próbek w postaci wejścia – wyjście,
- wprowadzenie identyfikacji stanu systemu w przestrzeni R^{n+1} cech systemu pozwala na automatyczne wnioskowanie dotyczące optymalnego sposobu prowadzenia użytkowania, optymalizacji okresu międzyremontowego oraz przewidywania wystąpienia stanu granicznego,
- wprowadzenie rozmytego systemu oceny w połączeniu z wybraną techniką optymalizacyjną umożliwia opracowanie optymalnego lub suboptymalnego planu procesów zapewnienia zdatności złożonego systemu eksploatacyjnego w sposób automatyczny,
- dzięki zastosowaniu rozmytego rozszerzenia metody określania jakości działania systemu eksploatacyjnego można uwzględnić niedokładności oceny jakości wynikające z rozmytego charakteru wartości cech systemu.

Literatura

- [1] Woropay, M., *Racjonalna eksploatacja maszyn*, ITE-PIB, Radom, 2001.
- [2] Kalotka, J., Pająk, M., *Gospodarka remontowa elektrowni cieplnych*, ITE-PIB, Radom 2006.
- [3] *Analiza dziedziny problemu Komputerowego Systemu Nadzoru Pracy Elektrowni Węglowej ERO_TKE*, Radom, TEKOM 1993.
- [4] Pająk, M., *Computerised system of ash removal activity monitoring*, Radom, ZP ITE Radom 2001, V Konferencja Komputerowe systemy wspomaganie nauki, przemysłu i transportu TRANSCOMP, Zakopane 2001.
- [5] Piegat, A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 1999.
- [6] Von Altrock, C., *Industrial applications of fuzzy logic control*. INFORM GmbH.
- [7] Pruessmann, D., *Fuzzy Logic Supervisory Control for Coal Power Plant*. INFORM, 1997.
- [8] von Altrock, C., *A Fuzzy Set Decision Model as Optimization Criterion*. EURO – European Conference on Operations Research, Aachen 1991.
- [9] Łachwa, A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, EXIT, Warszawa 2001.
- [10] Pająk, M., Kalotka, J., *Biblioteka narzędziowa do tworzenia oprogramowania rozmytego i jej zastosowanie*, Prace naukowe Elektryka 1(6) Radom, 2004.
- [11] Pająk, M., Muślewski, Ł., *Rozmyty model oceny jakości działania złożonego systemu eksploatacji*, Problemy Eksploatacji 3/2005, ITE-PIB, Radom 2005.
- [12] Hebda, M., Mazur, T., *Podstawy eksploatacji pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa, 1980.
- [13] Pająk, M., Kalotka, J., *Możliwość zastosowania logiki rozmytej w analizie parametrów przemysłowych gazów odlotowych*, IV Konferencja naukowa nt.: „Problemy prawne, techniczne i ekonomiczne zagospodarowania odpadów”, Radom, 2003.
- [14] Cordon, O., Herrera, F., Sanchez, L., *Evolutionary Learning Processes for Data Analysis in Electrical Engineering Applications*, John Wiley & Sons Ltd. 1997.
- [15] Pająk, M., *Optymalizacja harmonogramów remontów bloków energetycznych*, praca doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2004.
- [16] Pająk, M., *Fuzzy estimation of the maintenance management operation quality*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 4/2006, ITEe - PIB, Radom 2006.
- [17] Pająk, M., Kalotka, J., *Zastosowanie technik sztucznej inteligencji w modelowaniu procesu planowania remontów bloków energetycznych*, VII Konferencja naukowo – techniczna nt.: Problemy i innowacje w remontach energetycznych „PIRE”, Szklarska Poręba, 2004.
- [18] Muślewski, Ł., *Metoda oceny jakości działania systemu transportowego*, praca doktorska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2004.
- [19] Woropay, M., Muślewski, Ł., *Jakość w ujęciu systemowym*, ITE – PIB, Radom 2005.

