

Analiza zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego na trasie przenośnika taśmowego

W artykule przedstawiono produkty powstające podczas rozwoju pożaru przenośnika taśmowego, a także rozmieszczenie detektorów mierzących wartości pojawiających się produktów spalania taśmy. Omówiono sposób wyznaczania wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego, do którego zastosowano mechanizmy wnioskowania rozmytego. Opisano model rozmyty wskaźnika zagrożenia pożarowego na podstawie wyników badań przeprowadzonych w sztolni próbnej. Zadaniem utworzonego modelu jest wyznaczanie wskaźnika zagrożenia na podstawie wstępnie przetworzonych sygnałów, otrzymanych z niezależnych detektorów. Do wyznaczenia parametrów modelu oraz organizacji jego struktury wykorzystano algorytmy klasteryzacji rozmytej.

1. WPROWADZENIE

W górnictwie podziemnym do transportu węgla stosuje się przenośniki taśmowe. Trudne warunki pracy maszyn mogą stać się przyczyną zagrożenia pożarowego. Źródłem pożaru może być tarcie podzespołów przenośnika, ściery taśmy powstające w wyniku tarcia o konstrukcję przenośnika. Tarcie mechanizmów przenośnika taśmowego powoduje zwiększenie się temperatury i wzrost zagrożenia pożarem. Z tego względu w kopalniach stosuje się trudnopalne taśmy przenośnikowe, ale nawet i one nie zapewniają wymaganego poziomu bezpieczeństwa [1, 2]. Wysoka temperatura (powyżej 400°C) może powodować zapalenie się materiałów palnych, takich jak: węgiel, drewno, guma, znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie przenośnika.

W ramach europejskiego projektu EDAFFIC w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG przeprowadzono badania w celu opracowania urządzeń pomiarowych oraz zasad wczesnego wykrywania zagrożenia pożarowego. Na podstawie uzyskanych wyników

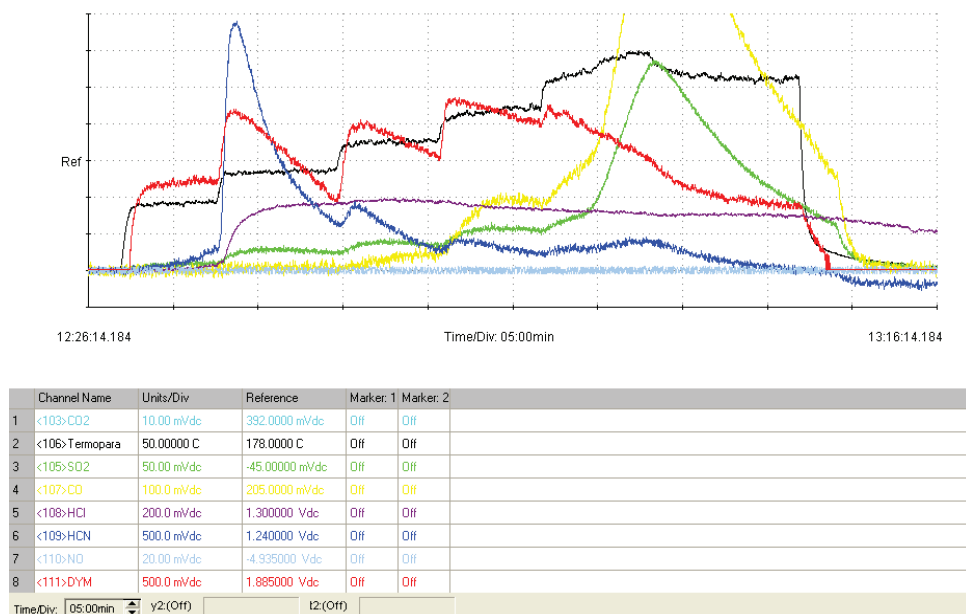
badania opracowano algorytm przetwarzania sygnałów dla wykrywania pożaru przenośnika taśmowego.

W procesie wykrywania pożaru czujnik dokonuje pomiarów i reaguje na rozwój źródła pożarowego, a następnie pożaru w następujących fazach [3]:

- I faza – wzrost temperatury elementów konstrukcyjnych przenośnika,
- II faza – pojawienie się produktów termicznego rozkładu taśmy przenośnikowej,
- III faza – pojawienie się produktów termicznego rozkładu taśmy oraz zapalenie materiałów będących w sąsiedztwie przenośnika.

2. BADANIE PRODUKTÓW GAZOWYCH CHARAKTERYSTYCZNYCH DLA ROZWOJU ŹRÓDŁA POŻARU PRZENOŚNIKA TAŚMOWEGO

Celem badań [3] był wybór detektorów o najwyższej skuteczności wykrywania produktów rozkładu termicznego taśmy przenośnikowej. Badania pole-



Rys. 1. Sygnały wyjściowe z czujników gazowych dla zmiennych skokowo wartości temperatur ($\sim 20^{\circ}\text{C} \div \sim 325^{\circ}\text{C}$) podczas zagrzewania gumy okładkowej taśmy trudnopalnej

gały na nagrzewaniu małych próbek taśm oraz na rejestrowaniu sygnałów z poszczególnych detektorów. W badaniach wykorzystano detektory tlenu węgla, chlorowodoru, dwutlenku siarki, tlenu azotu, cyjanowodoru, wodoru, dwutlenku węgla, temperatury oraz dymu. Na rysunku 1 przedstawiono sygnały wyjściowe z czujników gazowych dla zmiennych skokowo wartości temperatur podczas zagrzewania gumy okładkowej taśmy trudnopalnej.

Wyniki badań [3] pokazały kilka zależności. Sygnał dymu zwiększał się wraz ze wzrostem temperatury. Cyjanowódór, podobnie jak chlorowódór, osiągał swoje maksimum w temperaturze około 150°C , a następnie sukcesywnie malał. Wskazania chlorowodoru w całym cyklu pracy wykazywały dużą niestabilność. Dwutlenek siarki pojawiał się już w pierwszej fazie zagrzewania taśmy i maksymalną wartość osiągnął w temperaturze $250 \div 300^{\circ}\text{C}$. Tlenek węgla pojawił się w drugiej fazie zagrzewania i osiągnął maksymalne wartości w temperaturze około 300°C . Nie zaobserwowano natomiast wzrostu sygnałów z czujników dwutlenku węgla i tlenu azotu. Zauważono także, że sygnały zerowe z czujników cyjanowodoru, dwutlenku siarki, tlenu węgla oraz z czujnika dymu utrzymywały stabilnie swoje wartości, natomiast sygnał zerowy z czujnika chlorowodoru był niestabilny.

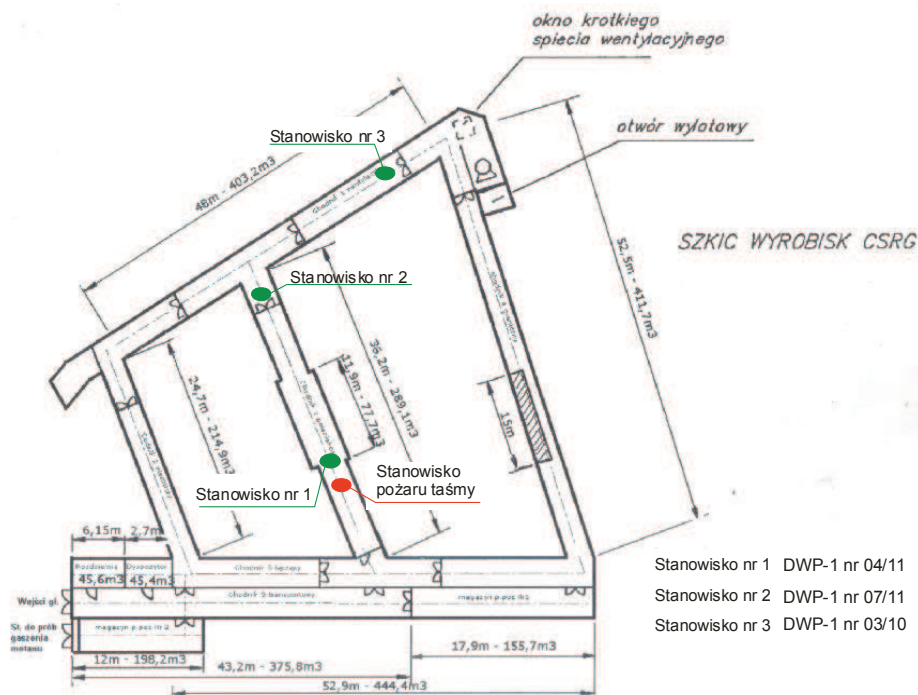
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań rozkładu termicznego taśm określono produkty powstające podczas zagrzewania taśmy, dzięki którym można najszybciej i najlepiej wykryć powstający pożar przenośnika taśmowego. Są to: dym, cyjanowódór i tlenek węgla.

3. BADANIA W SZTOLNI PRÓBNEJ

Celem badań [3] było określenie zakresów wskaźnika zagrożenia pożarowego obliczanego na podstawie pomiarów rozkładu termicznego taśmy. Do pomiarów wykorzystano czujniki DWP-1. Urządzenia zostały podłączone do systemu SMP-NT/*, opracowanego w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG, w celu monitorowania stężeń metanu i gazów pożarowych oraz prędkości przepływu i temperatury powietrza wentylacyjnego [3].

Zakres zastosowań systemu SMP-NT/* obejmuje pomiar ciągły i monitorowanie stężenia metanu w wyrobiskach i rurociągach sieci odmetanowania, a także pomiar ciągły i monitorowanie wybranych parametrów powietrza pod kątem wykrywania pożarów podziemnych bądź bieżącej analizy stanu wentylacji i prowadzenia działań profilaktycznych. Możliwe jest także monitorowanie stanu urządzeń wentylacyjnych oraz monitorowanie warunków klimatycznych w wyrobiskach i stanu urządzeń klimatyzacyjnych. Cały system ma budowę modułową (zarówno część pomiarowo-wykonawcza jak i część dyspozytorska). Umożliwia to konfigurację i rozbudowę systemu o funkcje, jakie aktualnie są oczekiwane w danej kopalni.

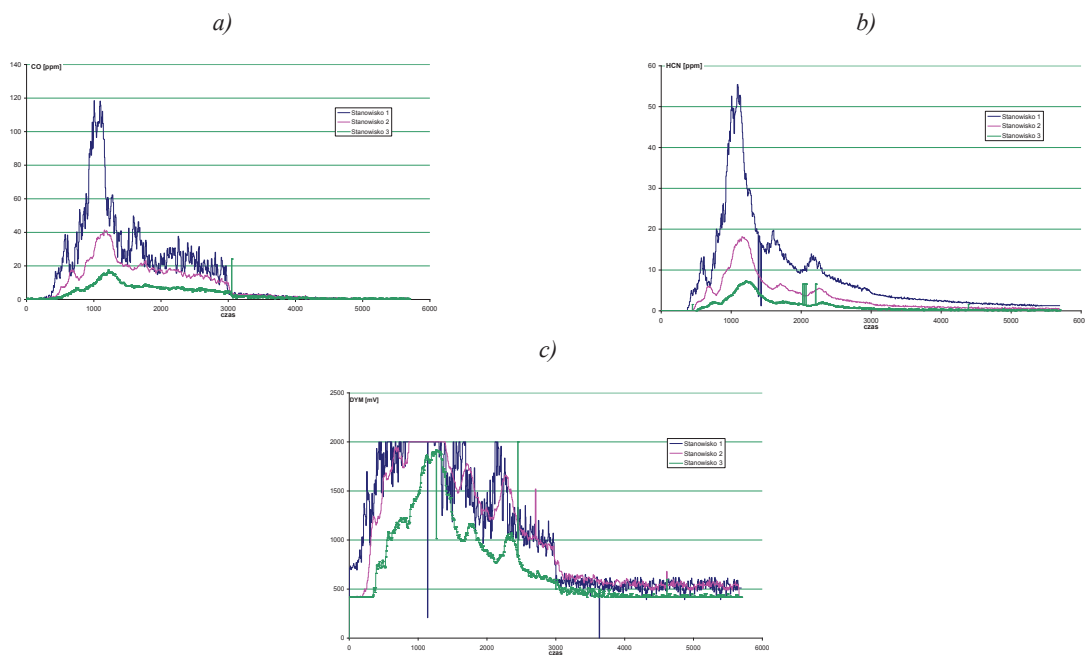
Na rysunku 2 przedstawiono strukturę wyrobiska sztolni próbnej (CSRG w Bytomiu). Zaznaczono w nim stanowisko pożaru taśmy oraz miejsca lokalizacji czujników DWP-1 do wykrywania zagrożenia pożarowego na wybranym odcinku przenośnika taśmowego.



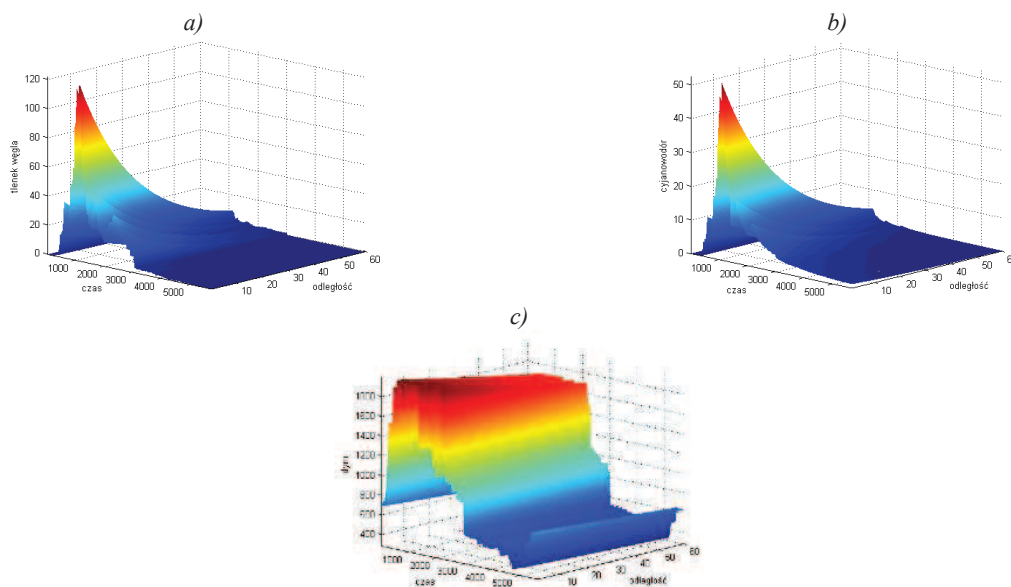
Rys. 2. Struktura wyrobiska sztolni próbnej wraz z lokalizacją czujników pomiarowych

W ramach testów [3] wykonano pomiary produktów wydzielanych podczas zagrzewania czterech rodzajów taśm przenośnikowych: trudnopalnej, trudnozapalnej, zwykłej ogólnego przeznaczenia oraz taśmy górniczej produkcji hiszpańskiej. Wykonano cztery testy zapalenia taśm dla stałej prędkości przepływu powietrza wynoszącej ~1 m/s. Po każdym teście wykonano przewietrzanie sztolni próbnej. Punktem odniesienia lokalizacji czujników DWP-1 było sta-

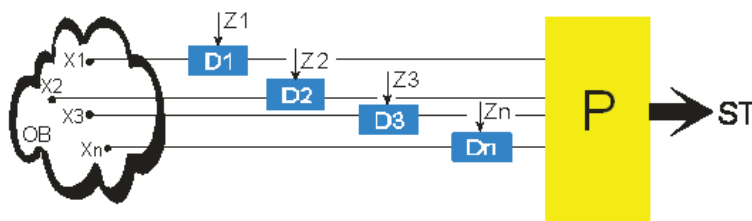
nowisko pożaru taśmy. Stanowisko 1 (DWP-1 nr 04/11) zlokalizowano w odległości ~3 m od źródła pożaru, stanowisko 2 (DWP-1 nr 07/11) w odległości ~25 m, natomiast stanowisko 3 (DWP-1 nr 03/11) w odległości ~60 m od źródła pożaru. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów oraz obliczony rozkład czasoprzestrzenny poszczególnych produktów źródła pożaru dla taśmy trudnozapalnej.



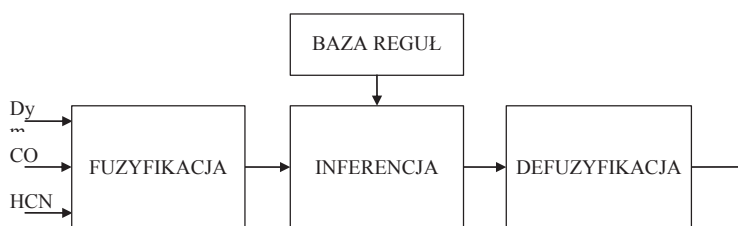
Rys. 3. Przebiegi poszczególnych produktów źródła pożaru – taśma trudnozapalna: a) tlenek węgla, b) cyjanowodór, c) dym



Rys. 4. Rozkład czasoprzestrzenny w wyrobisku dla taśmy trudnozapalnej:
a) tlenku węgla, b) cyjanowodoru, c) dymu



Rys. 5. Przetwarzanie sygnałów i informacji przez czujnik wielodetektorowy
OB – obiekt zabezpieczony, X_n – parametr mierzony, Z_n – zakłócenia pomiarowe,
 D_n – detektory pomiarowe, P – blok przetwarzania sygnałów, ST – stan obiektu zabezpieczonego i czujnika
(normalny, ostrzeżenie, alarm, awaria)



Rys. 6. Etapy wnioskowania rozmytego dla czujnika DWP-1

4. WYZNACZENIE WSKAŹNIKA ZAGROŻENIA POŻAROWEGO

Na podstawie badań opracowano algorytm przetwarzania sygnałów z czujnika DWP-1. Jego zadaniem jest wyznaczenie na podstawie niezależnych sygnałów analogowych stanów zagrożenia pożarowego obiektu zabezpieczonego. Na rysunku 5 przedstawiono przetwarzanie sygnałów i informacji przez czujnik wielodetektorowy.

Odpowiedni dobór detektorów oraz algorytm przetwarzania sygnałów umożliwi wykrywanie zagrożenia pożarowego w jego wczesnej fazie. System wykrywania pożarów powinien cechować się wysoką czułością oraz minimalną liczbą fałszywych alarmów, a najlepiej ich brakiem. Stan kontrolowanego obiektu wyznaczony powinien być na podstawie dużej liczby danych. W przypadku dokonywania pomiarów większej ilości parametrów (produktów źródła pożaru) możliwe jest wprowadzenie wspólnego wskaźnika pożarowego. Zakresy pomiarowe de-

tektorów, na podstawie których określa się wskaźnik zagrożenia pożarowego, są następujące:

- sygnał z czujnika CO – 0÷200 ppm,
- sygnał z czujnika HCN – 0÷20 ppm,
- sygnał z czujnika dymu – 0,4÷2,0 V.

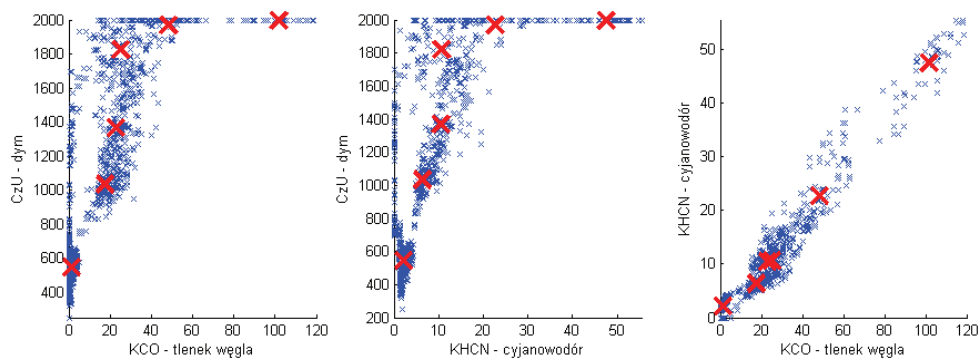
Do wyznaczania wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego wykorzystano mechanizm wnioskowania rozmytego. Modele oparte na logice rozmytej są modelami inteligentnymi i umożliwiają modelowanie bardzo złożonych zjawisk, które trudno opisać zależnościami matematycznymi. Przedstawiono przykład wyznaczania stanów obiektu kontrolowanego na podstawie przeprowadzonych testów w sztolni próbnej. Etapy wnioskowania przedstawiono na rysunku 6.

Wnioskowanie rozmyte można podzielić na trzy etapy. Pierwszym z nich jest fuzyfikacja, która polega na przyporządkowaniu stopnia przynależności wartości wejściowych (dym, CO, HCN) do zbiorów rozmytych. Drugim etapem wnioskowania jest inferencja, która odpowiada za obliczenie wynikowej funkcji przynależności na podstawie stopni wejściowych [5].

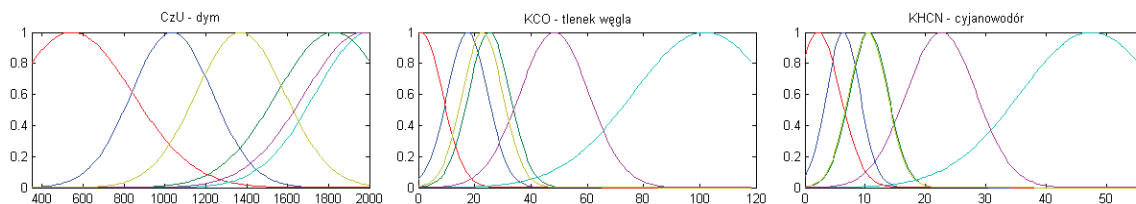
Do tego celu wykorzystuje się bazę reguł oraz mechanizm inferencyjny. Wyznacza się stopnie spełnienia przesłanek poszczególnych reguł. Następnie oblicza się stopnie spełnienia konkluzji poszczególnych reguł. Kończącym etapem jest wyznaczenie wynikowej funkcji przynależności konkluzji wszystkich reguł. Powstaje w ten sposób wynikowy zbiór rozmyty, który zostaje poddany procesowi defuzyfikacji, polegającej na przekształceniu otrzymanego zbioru rozmytego na wartość numeryczną.

Podstawowym zadaniem przy konstruowaniu modelu rozmytego jest określenie bazy reguł oraz liczby funkcji przynależności przyporządkowanych do poszczególnych wejść i wyjścia modelu.

Do zbudowania modelu wykorzystano wyniki testu dla taśmy trudnozapalnej. Do określenia parametrów modelu rozmytego wykorzystano rozmytą klasteryzację c-środków, która w sposób automatyczny dokonuje podziału przestrzeni danych na podprzestrzenie. Wynikiem procesu jest określenie środków klastrow, a przez to wyznaczenie parametrów modelu wraz z organizacją jego struktury. Liczba wejść mo-



Rys. 7. Położenie środków klastrow przestrzeni wejściowej

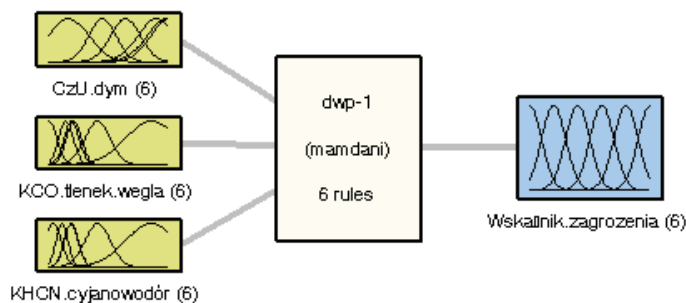


Rys. 8. Funkcje przynależności wejść modelu rozmytego

delu jest związana z liczbą czujników dokonujących pomiarów: czujniki dymu, tlenu węgla i cyjanowodoru – 3 wejścia, określenie stanu zagrożenia pożarowego – 1 wyjście. Uzyskane klastery reprezentują bazę reguł. Liczba klastrow odpowiada liczbie reguł modelu, natomiast położenie środków klastrow odpowiada parametrom funkcji przynależności poszczególnych wejść i wyjścia. Na podstawie wyznaczonych środków klastrow tworzona jest struktura modelu rozmyte-

go. Do dalszego opisu wybrano model typu Mamdani. Na rysunku 7 przedstawiono położenie środków klastrow przestrzeni wejściowej na podstawie przeprowadzonego badania.

W procesie klasteryzacji wyznaczono 6 klastrow, w związku z tym w przestrzeni wyjściowej umieszczono 6 funkcji przynależności. Założono, że wartości wyznaczonego wskaźnika będą zawarte w przedziale [0,1], gdzie 0 – brak zagrożenia pożarowego, 1 – pożar.



Rys. 9. Struktura modelu rozmytego

W procesie budowania modelu rozmytego bardzo ważny jest wybór operatorów wnioskowania. Stopnie przynależności wejść obliczono, stosując funkcje przynależności o kształcie funkcji Gaussa. Przesłanki w regułach rozmytych oraz stopień aktywacji konkluzji poszczególnych reguł obliczono, wykorzystując operator MIN (minimum). Wynikowa funkcja przynależności powstaje w wyniku agregacji konkluzji reguł modelu rozmytego. Do jej obliczenia wykorzystano operator MAX (maximum). Ostatnim etapem wnioskowania rozmytego jest defuzyfikacja wynikowego zbioru. W tym celu zastosowano metodę środka ciężkości. Proces budowania modelu rozmytego przewiduje także, w zależności od wymagań użytkownika, zastosowanie innych operatorów wnioskowania (np. model Larsena) czy kształtów funkcji przynależności (np. trójkątnych, dzwonowych). Jednakże każda zmiana parametrów wpływa na kształt wynikowego zbioru rozmytego, a co za tym idzie, zmianę wartości wyjścia modelu.

Powstała w wyniku procesu budowania modelu rozmytego baza reguł ma następującą postać:

If (CzU.dym is we1kl1) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl1) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl1) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl2) (1)

If (CzU.dym is we1kl2) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl2) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl2) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl4) (1)

If (CzU.dym is we1kl3) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl3) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl3) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl1) (1)

If (CzU.dym is we1kl4) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl4) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl4) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl6) (1)

If (CzU.dym is we1kl5) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl5) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl5) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl5) (1)

If (CzU.dym is we1kl6) and (KCO.tlenek.węgla is we2kl6) and (KHNC.cyjanowodór is we3kl6) then (Wskaźnik.zagrozenia is wy1kl3) (1)

W oparciu o wyznaczone środki klasterów tworzona jest struktura modelu rozmytego. Liczba wejść

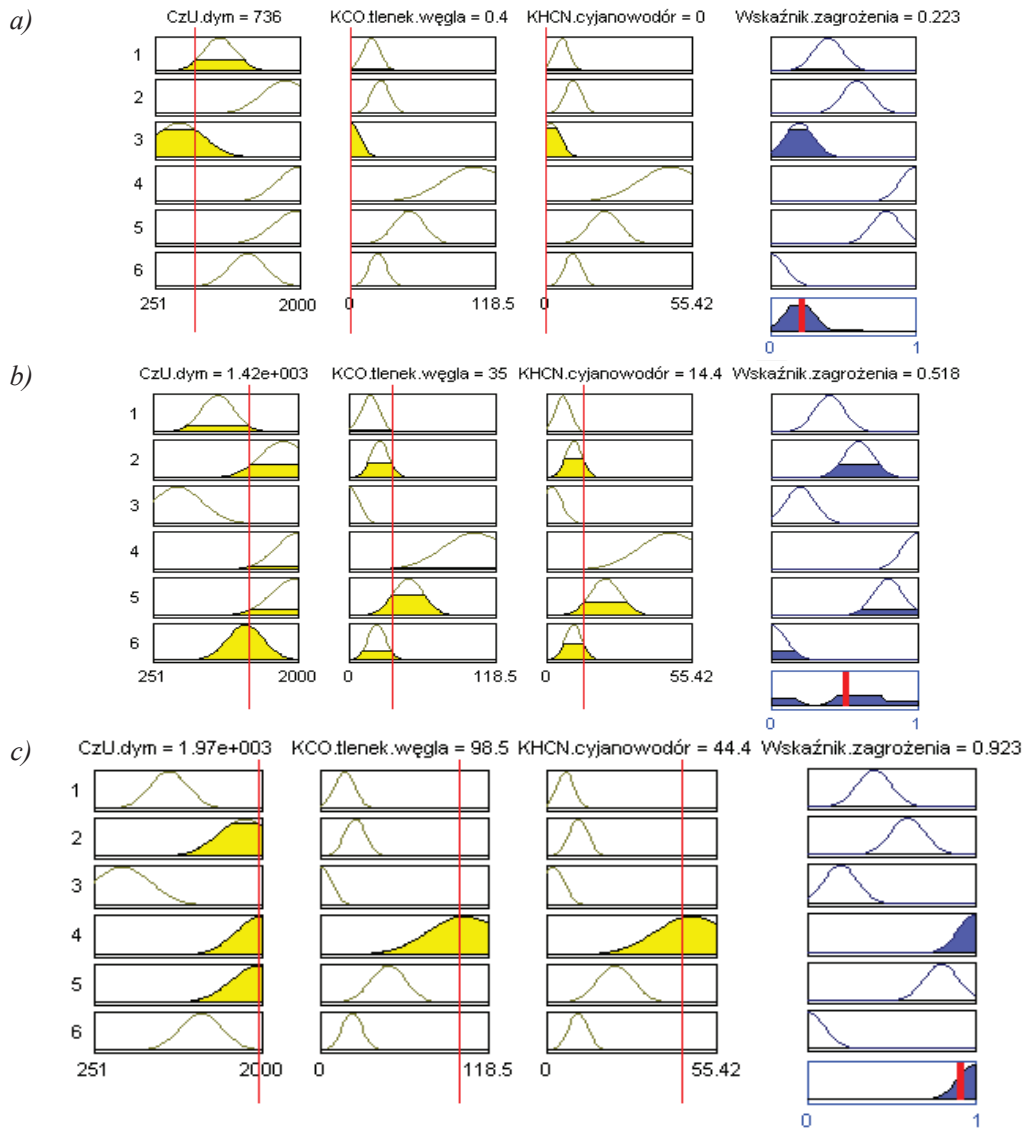
i wyjść modelu odpowiada wymiarowi danych pomiarowych: 3 wejścia modelu określają wartości zmierzone przez czujniki stężenia tlenu węgla i cyjanowodoru oraz dymu. Wartości na wyjściu określają wskaźnik zagrożenia pożarowego. Strukturę modelu rozmytego wykorzystanego dla omawianego problemu przedstawiono na rysunku 9.

Utworzoną strukturę modelu można poddać strojeniu w celu dalszej poprawy odwzorowania przedstawionego problemu. W tym celu można wykorzystać algorytm ANFIS [4]. Polega on na przekształceniu modelu rozmytego w rozmytą sieć neuronową. Podlega ona procesowi uczenia za pomocą zbioru uczącego (danych pomiarowych). W procesie budowania modelu rozmytego należy zwrócić uwagę na to, aby dążyć do upraszczania jego struktury i bazy reguł. Skomplikowana i rozbudowana baza reguł może powodować nieprawidłowe działania modelu (np. użycie reguł sprzecznych), a także brak możliwości jego dalszego strojenia.

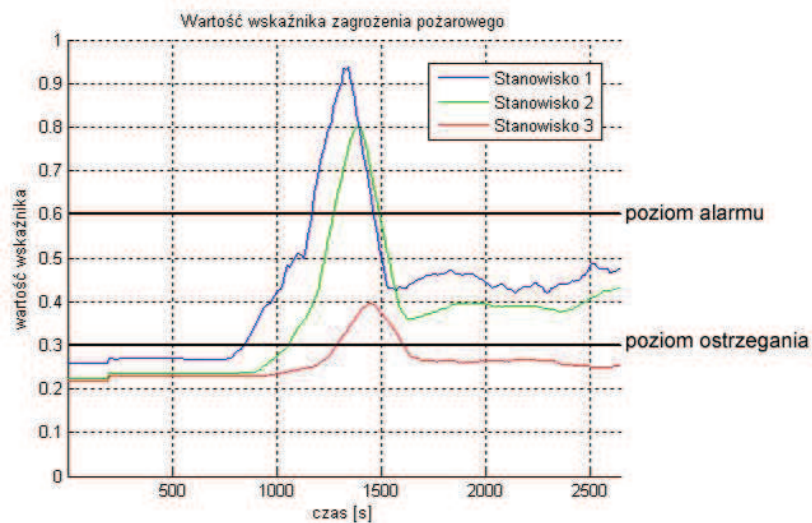
Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy schemat wnioskowania rozmytego dla trzech przypadków.

Rysunek 10a pokazuje wnioskowanie modelu dla zmierzonych wartości, które odwzorowują stan normalny przenośnika taśmowego, rysunek 10b wnioskowanie dla stanu ostrzegania, a rysunek 10c wnioskowanie dla stanu alarmu. Wartości wejściowe modelu (CzU.dym, KCO.tlenek.węgla oraz KHNC.cyjanowodór) aktywują przesłanki poszczególnych reguł, co zaznaczono kolorem żółtym. Stopień aktywacji konkluzji reguł zaznaczono kolorem niebieskim. Wynikowy zbiór rozmyty powstaje poprzez połączenie poszczególnych reguł z wykorzystaniem operatorów wnioskowania rozmytego. Na najniższym poziomie w przedziale [0; 1] znajduje się wynikowy zbiór rozmyty wraz z zaznaczoną na czerwono ostrą wartością wyjściową modelu.

Na rysunku 11 przedstawiono przebieg czasowy obliczonego wskaźnika pożarowego dla wyników otrzymanych podczas testu w sztolni próbnej.



Rys. 10. Wnioskowanie rozmyte dla stanów zagrożenia pożarowego:
 a) normalnego, b) ostrzegania, c) alarmu



Rys. 11. Przebieg czasowy wskaźnika pożarowego dla wyników otrzymanych w sztolni próbnej

Wykorzystując wyniki pomiarów dla taśmy trudnozapalnej, określono poziomy ostrzegania i alarmu pożarowego. Wskaźnik pożarowy zmieniał swoje wartości w zależności od wskazań poszczególnych czujników. W związku z tym, że stanowiska pomiarowe znajdowały się w określonych odległościach od źródła pożaru, wartości informujące o pożarze były coraz mniejsze, a także przesunięte w czasie, zgodnie z kierunkiem rozprzestrzeniania się produktów spalania taśmy przenośnikowej.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono produkty powstające podczas rozwoju pożaru przenośnika taśmowego, a wyniki badań wykorzystano do opracowania algorytmu przetwarzania sygnałów przez czujnik wielodetektorowy DWP-1, służący do wczesnego wykrywania źródeł zagrożenia pożarowego przenośnika taśmowego.

Możliwości metod sztucznej inteligencji wykorzystać można do budowy modelu na podstawie wyników przeprowadzonych badań.

Przykładowe działanie modelu dla stanu normalnego, ostrzegania i alarmu pożarowego wykorzystuje

techniki automatycznego wydobywania wiedzy dla określenia struktury modelu.

Tworzenie modeli rozmytych pozwala na opis złożonych zjawisk, trudnych do opisanego za pomocą metod konwencjonalnych, dlatego też zastosowanie metod sztucznej inteligencji może być uzupełnieniem konwencjonalnych metod pozyskiwania i wykorzystania wiedzy. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie modelowania rozmytego do wyznaczania wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego przenośnika taśmowego lub bieżącej analizy danych otrzymywanych z urządzeń pomiarowych.

Literatura

1. *Antoniak J.*: Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym, WPSI, Gliwice 2006,
2. *Hardygóra M. i inni*: Taśmy przenośnikowe, WNT, Fundacja Książka Naukowo-Techniczna, Warszawa 1999.
3. Dokumentacja projektu europejskiego Steel & Coal „EDAFFIC” Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2009-2011 (niepublikowana),
4. *Jang J.-S.R. Sun C.-T. Mizutani E.*: Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1997,
5. *Łęski J.*: Systemy neuronowo-rozmyte, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów

