

Stanisław TRZCIONKA
Główny Instytut Górnictwa
Kopalnia Doświadczalna "Barbara"

IDENTYFIKACJA SKŁADU GAZOWYCH MIESZANIN WIELOKOMPONENTOWYCH

Streszczenie. Autor w referacie podejmuje problem selektywności pomiarów gazowych składników atmosfery kopalnianej. Ograniczona selektywność czujników stosowanych w aparaturze gazometrycznej jest przyczyną błędnych wyników pomiarów, co jest równoznaczne z błędną oceną poziomu zagrożeń gazowych. Problem staje się szczególnie istotny w warunkach pożaru z powodu złożonego składu gazów pożarowych. Poprawę selektywności pomiarów można osiągnąć poprzez przetwarzanie sygnałów wieloczujnikowych głowic bazujących na konwencjonalnych sensorach gazów. Przedstawione w referacie koncepcje identyfikacji składu ilościowego gazów pożarowych, wykorzystują metody matematyczne i technikę sztucznych sieci neuronowych.

IDENTIFICATION OF MULTICOMPONENT GAS MIXTURE COMPOSITION

Summary. This paper discusses a problem of measurement of mine atmosphere components. The limited selectivity of detectors used in gas measurement equipment yields faulty measurement results which is equivalent to false assessment of gas hazard level. This problem becomes particularly important in fire conditions, because of a complex composition of fire gases. An improvement of measurement selectivity may be achieved by conversion of signals from multidetector heads, based on conventional gas sensors. This paper includes the general concepts of identification of fire gas quantitative composition that use mathematical methods and artificial neural networks technique.

1. WPROWADZENIE

Kontrola składu atmosfery kopalnianej wykonywana przez służby wentylacyjne za pomocą stacjonarnej i przenośnej aparatury kontrolno-pomiarowej oraz analiz chromatograficznych prób pipetowych prowadzona jest pod kątem szybkiej detekcji stanów zagrożeń bezpośrednich i rozpoznania symptomów powstających niebezpieczeństw. Do

podstawowych zagrożeń wykrywanych metodami kontroli składu atmosfery kopalnianej należą:

- zagrożenia wybuchowe, powodowane najczęściej obecnością metanu, a w warunkach pożaru również innych gazów palnych,
- zagrożenia toksyczne, których najczęstszym powodem są nagromadzenia tlenu węgla,
- zagrożenia atmosferą zubożoną w tlen, powstającą w wyniku procesów utleniania lub wyparcia tego gazu z powietrza nadmiarem dwutlenku węgla albo metanu.

W warunkach normalnej eksploatacji przedstawione zagrożenia występują najczęściej oddzielnie, a techniki ich detekcji są dobrze znane. Z punktu widzenia problemów metrologicznych najtrudniejszym przypadkiem jest ich równoczesne występowanie, co ma miejsce w czasie pożaru w podziemiach kopalń. W powietrzu wentylacyjnym pojawiają się wówczas tlenek węgla i wodór, wzrasta stężenie dwutlenku węgla i metanu, maleje zaś stężenie tlenu. Zmiany składu atmosfery kopalnianej intensyfikują się wraz z rozwojem pożaru.

Działania służb gazometrycznych koncentrują się wówczas na dwóch zadaniach:

- śledzeniu zmian śladowych stężeń tlenu węgla w celu obliczenia tzw. wskaźników pożarowych [1], których wartości warunkują podjęcie prac profilaktycznych i rozpoczęcie akcji przeciwpożarowej,
- kontroli poziomu zagrożeń gazowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi pracujących w monitorowanych rejonach kopalni.

Obecnie danych pomiarowych do obliczeń wskaźników pożarowych dostarczają, wykonywane w laboratoriach kopalni, analizy chromatograficzne prób pipetowych powietrza pobieranego okresowo w monitorowanych rejonach. Doraźna kontrola zagrożeń gazowych prowadzona jest z użyciem konwencjonalnych przyrządów przenośnych i systemów stacjonarnych, pomimo że nie są one przewidziane do pracy w mieszaninach wieloskładnikowych. Ich podstawową wadą w omawianym zastosowaniu jest ograniczona selektywność zastosowanych czujników i brak - nawet w wielogazowych przyrządach najnowszej generacji - rozwiązań eliminujących tę wadę. Opracowanie przenośnego przyrządu mierzącego selektywnie składniki gazów pożarowych umożliwi nadążne obliczanie wskaźników pożarowych i ocenę poziomu zagrożeń gazowych „in situ”, eliminując konieczność wykonywania analiz chromatograficznych i związane z nimi niedogodności.

Gazometryczny przyrząd pomiarowy przeznaczony do wspomaganie procedur wczesnego wykrywania pożarów i zabezpieczania zastępów ratowniczych podczas prac profilaktycznych powinien zapewniać selektywną detekcję CO i H₂ w zakresie stężeń śladowych. Z uwagi na możliwość równoczesnego wystąpienia innych zagrożeń gazowych wskazana jest również możliwość pomiaru stężeń tlenu oraz niskich stężeń metanu i dwutlenku węgla. Przyrząd do zabezpieczania prac związanych z gaszeniem bezpośrednim

w początkowej fazie pożaru powinien zapewniać możliwość detekcji ww. gazów w szerszych zakresach stężeń.

2. PROBLEMY POMIAROWE WIELOSKŁADNIKOWYCH MIESZANIN GAZOWYCH

Główną przyczyną problemów pomiarowych podczas określania składu ilościowego mieszanin wieloskładnikowych jest ograniczona selektywność sensorów stosowanych w urządzeniach gazometrycznych. Jeżeli czujnik posiada niezerowe czułości cząstkowe S_k (skrośne) do innych niż mierzony składników mieszaniny gazów, to jego równanie przetwarzania staje się funkcją wielu zmiennych.

$$S_k = \frac{\partial \gamma}{\partial p_k |_{p_j \neq p_k = \text{const.}}} \quad (1)$$

gdzie: γ – sygnał wyjściowy czujnika,

p – stężenie k -tego składnika mieszaniny.

Pomiary stężeń gazów wybuchowych w zakresie niskich wartości są wykonywane z użyciem czujników katalitycznych (hot-wire lub pellistor). W mieszaninach zawierających kilka składników palnych czujnik wykazuje czułości skrośne do każdego z nich. W zależności od składu mieszaniny zmienia się jej dolna granica wybuchowości zgodnie z regułą Le Chateliera:

$$G_d = \frac{\sum_i p_i}{\sum_i \frac{p_i}{G_{di}}} \quad (2)$$

gdzie: G_d – dolna granica wybuchowości mieszaniny złożonej,

p_i, G_{di} – odpowiednio stężenie i dolna granica wybuchowości i -tego składnika palnego,

co dodatkowo utrudnia ocenę zagrożenia wybuchowego. Do jej wyznaczenia niezbędny jest selektywny pomiar stężeń składników mieszaniny. Z powyższego wynika, że wskazania eksplozometrów wyposażonych w czujniki katalityczne w mieszaninach kilku gazów palnych o porównywalnych stężeniach nie są wiarygodne.

Pomiary wysokich stężeń metanu wykonywane są z użyciem czujników termokonduktometrycznych. Obecność wodoru powoduje silne zawyżanie wskazań, natomiast obecność dwutlenku węgla istotnie zaniża wskazania. Dlatego w obecności tych

komponentów gazów pożarowych pomiar stężenia metanu z użyciem czujnika termokonduktometrycznego jest mało wiarygodny.

Śladowe i niskie stężenia tlenu węgla oraz wodoru w praktyce przemysłowej mierzone są z wykorzystaniem czujników elektrochemicznych. Niestety, najbardziej rozpowszechnione w polskim górnictwie czujniki tych gazów produkcji City Technology Ltd. wykazują wzajemne wpływy skrośne, tzn. obecność wodoru zawyża wskazania tlenu węgla, a obecność CO zawyża wskazania H₂.

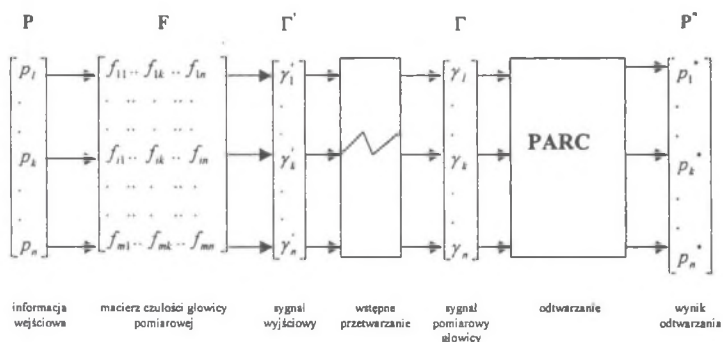
Pomiary stężenia tlenu są również wykonywane czujnikami elektrochemicznymi. Czujniki wykonane technologią City Technology Ltd. [2] posiadają dodatkia czulość skrośną na dwutlenek węgla, co powoduje zawyżanie wskazań tlenu w obecności tego gazu.

Dwutlenek węgla w warunkach ruchowych jest najczęściej mierzony czujnikami absorpcyjnymi (IR). Długość fali promieniowania elektromagnetycznego absorbowana przez ten gaz nie jest absorbowana przez inne składniki gazów pożarowych, czyli czujnik absorpcyjny jest selektywny w zbiorze tych gazów [8].

Przedstawione ograniczenia selektywności czujników stosowanych powszechnie w górnictwej aparaturze gazometrycznej prowadzą do konkluzji, że wykonywanie nieselektywnymi czujnikami pomiarów w mieszaninach wieloskładnikowych daje błędne wyniki, co w przypadku gazometrii jest równoznaczne z błędną oceną stopnia zagrożenia wybuchowego czy toksycznego.

3. METODY POPRAWY SELEKTYWNOŚCI POMIARÓW W MIESZANINACH WIELOSKŁADNIKOWYCH

Analiza problemu ograniczeń selektywności prowadzi do wniosku, że ich przyczyną jest równoczesność oddziaływania na czujnik gazu mierzonego i gazów zakłócających, powodujących wpływy skrośne. Dlatego najprostszym sposobem ich eliminacji jest tworzenie utrudnień dostępu do elementu detekcyjnego innych składników niż gaz mierzony, czyli selekcja informacji wejściowej. Może to być realizowane poprzez filtrację mieszaniny przed jej doprowadzeniem do czujnika przy użyciu filtrów chemicznych lub mechanicznych. Filtry chemiczne bywają zawodne, ponieważ ich czas aktywności zależy między innymi od stężeń pochłanianych gazów. Filtracja mechaniczna wymaga rozbudowanych układów pneumatycznych prowadzenia próby gazowej (chromatografia).



Rys. 1. Koncepcja analizy wieloskładnikowej mieszaniny gazowej macierzą czujnikową
 Fig. 1. Concept of a multicomponent gas analysis using a matrix of sensors

Inne podejście do problemu selektywności oparte jest na założeniu, że w odpowiedzi nieselektywnego czujnika, poddanego jednoczesnemu oddziaływaniu kilku gazów, znajduje się użyteczna informacja o ich stężeniach i należy skoncentrować się na sposobach jej odczytania [5],[7]. Takie podejście wymaga zastosowania głowic wieloczujnikowych i poszukiwania informacji o stężeniach składników we wzajemnych relacjach sygnałów wyjściowych (rys. 1).

Informację wejściową o n -składnikowej mieszaninie reprezentuje wektor stężeń $P = (p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n)$. Jest ona przetwarzana przez m -czujnikową głowicę gazometryczną (macierz czujników) na zbiór elektrycznych sygnałów wyjściowych reprezentowanych przez wektor $\Gamma' = (\gamma_1', \gamma_2', \dots, \gamma_k', \dots, \gamma_n')$. W ogólnym przypadku wektor sygnałów wejściowych P przetwarzany jest na wektor sygnałów wyjściowych Γ przez czujniki, których charakterystyki przetwarzania są funkcjami nieliniowymi, czyli czułości przetwarzania zależą od składu ilościowego mieszaniny. „Surowe” sygnały wyjściowe są często poddawane wstępnemu przetwarzaniu w celu wypracowania takiego wektora sygnałów pomiarowych Γ , który jest optymalny z punktu widzenia przyjętego algorytmu odtwarzania. Tak przygotowany wektor sygnałów pomiarowych poddawany jest procesowi odtwarzania w celu otrzymania wektora wyniku analizy P^* zawierającego informacje o składzie badanej mieszaniny.

W ogólnym przypadku czujniki nie są selektywne, czyli macierz czułości głowicy posiada niezerowe elementy poza przekątną główną. Wówczas sygnały wyjściowe czujników są funkcjami nieliniowymi wielu zmiennych, których charakter nieliniowości zależy od składu mieszaniny. Konieczne staje się przyjęcie modelu przetwarzania sygnałów wyjściowych zakłóconych skrośnymi oddziaływaniami gazów, który w sposób sprzętowy lub programowy umożliwi ekstrakcję informacji o rzeczywistym składzie ilościowym analizowanej mieszaniny. Możliwe do zastosowania w tym przypadku są metody oparte na koncepcji rozpoznawania wzorca (pattern recognition – PARC).

Wybór czujników do realizacji powyższych zadań pomiarowych wymaga rozeznania ich zachowania w spodziewanych zakresach zmienności stężeń i antycypacji możliwości uzyskania selektywnych informacji o składzie mieszaniny. W przypadku głowicy przeznaczonej do analizy wielokomponentowej mieszaniny gazów o znanym składzie jakościowym należy przeanalizować techniczne możliwości i ekonomiczne konsekwencje zastosowania następujących rozwiązań:

(A) Tam gdzie jest konieczne, należy zastosować czujniki nieselektywne, wykazujące czułości skrośne na te składniki mieszaniny, które są selektywnie mierzone innymi czujnikami zestawu. Umożliwia to bezpośrednią korekcję sygnałów czujników nieselektywnych w oparciu o, pozbawione wpływów skrośnych, sygnały czujników selektywnych. Jest korzystne, gdy czułości przetwarzania nieselektywnego czujnika są stałe zarówno dla gazu zakłócającego, jak mierzonego. Jeżeli to nie jest spełnione, wymaga się, by nachylenie charakterystyki przetwarzania czynnika zakłócającego było określone dla wszystkich wartości stężeń. Wówczas możliwa jest korekcja oparta na tablicy poprawek.

Realizacja tego rozwiązania prowadzi do szerszego zastosowania czujników absorpcyjnych [4]. Pociąga to za sobą istotny wzrost kosztu przyrządu, konieczność dodatkowych zabiegów, zmierzających do zapewnienia im warunków pracy zbliżonych do laboratoryjnych oraz relatywnie wysoki pobór mocy zestawu, utrudniający zastosowanie iskrobezpiecznej budowy przeciwwybuchowej przyrządu. Ponadto wymiary obecnie dostępnych czujników absorpcyjnych znacznie komplikują użycie ich zestawu w przyrządzie przenośnym.

(B) Głowicę lub jej część należy skompletować z czujników posiadających liniowe charakterystyki przetwarzania dla gazu mierzonego i gazów zakłócających. Ponadto ich sygnały wyjściowe powinny spełniać zasadę superpozycji przy jednoczesnym występowaniu kilku gazów. W procesie odtwarzania informacji wejściowej wykorzystać model regresji wielowymiarowej.

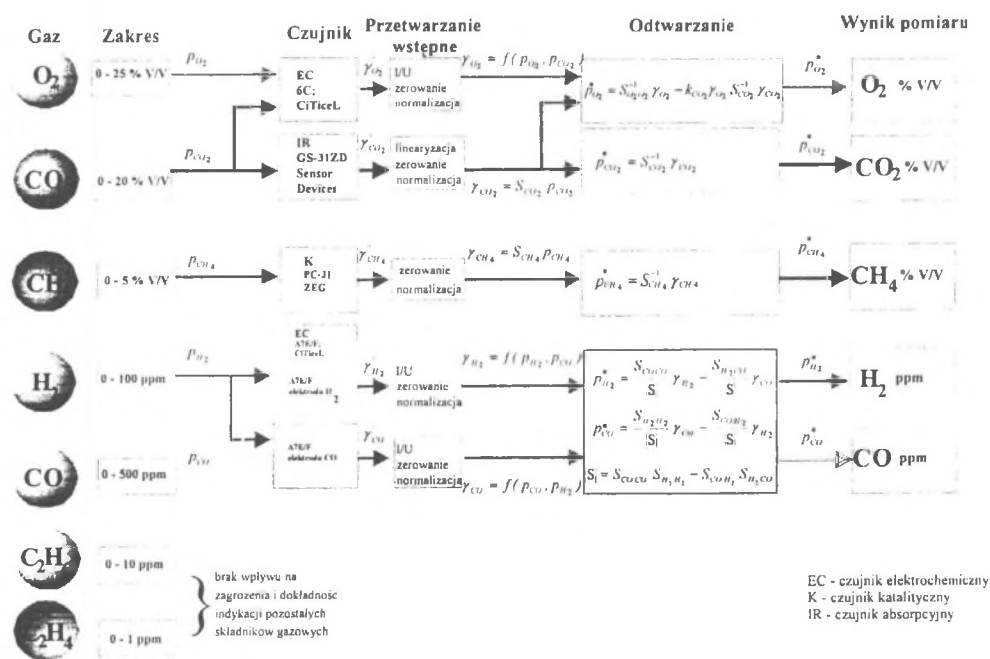
(C) Jeżeli z przyczyn technicznych lub ekonomicznych nie jest możliwe zestawienie głowicy wieloczujnikowej dla danego składu mieszaniny w oparciu o powyższe postulaty, należy wybrać czujniki nieselektywne i dobrać je tak, by przetwarzanie danego składu mieszaniny generowało unikalny wektor sygnałów wyjściowych (tzn. nie powinno dochodzić do sytuacji, że różne składy generują takie same wektory sygnałów wyjściowych lub ten sam skład generuje różne wektory, np. w wyniku histerezy pomiarowej). Nie jest w tym przypadku wymagana liniowość charakterystyk przetwarzania ani spełnienie zasady superpozycji oddziaływań gazów na czujnik. Proces kalibracji polega wówczas na takim „nauczeniu” wybranego układu odtwarzania umiejętności rozpoznawania poszczególnych wektorów sygnałów wyjściowych, by poprawnie rozpoznał również te, które nie brały udziału w procesie uczenia. Możliwą do zastosowania w tym przypadku techniką przetwarzania sygnałów jest technika sztucznych sieci neuronowych.

4. KONCEPCJE WIELOCZUJNIKOWYCH GŁOWIC PRZYRZĄDU DO ZABEZPIECZANIA PRAC PROFILAKTYCZNYCH I POCZĄTKOWEJ FAZY AKCJI PRZECIWOŻAROWEJ

Doboru czujników głowicy dokonano przyjmując następujące, podstawowe założenia:

- przyrząd powinien być możliwie tani, co ułatwi jego rozpowszechnienie,
- powinien cechować się niskim poborem mocy, umożliwiającym iskrobezpieczne wykonanie i co najmniej osmiogodzinną autonomię pracy,
- powinien zapewniać pomiar w zakresach stężeń składników gazów pożarowych występujących w początkowej fazie pożaru z wymaganą dokładnością indykacji.

Zestaw czujników i zasady korekcji wpływów skośnych przedstawiono na rys. 2. Pomiar śladowych stężeń CO i H₂ wykonywany jest czujnikami elektrochemicznymi o wzajemnie nakładających się czułościach. Możliwy do zastosowania jest również zintegrowany czujnik tych gazów, np. A7E/ CiTiceL [2].



Rys. 2. Schemat blokowy systemu gazometrycznego do zabezpieczania prac profilaktycznych
Fig.2. Block diagram of gas-measuring system for supporting fire prevention works

Równanie macierzowe czujnika ma postać:

$$\Gamma = \mathbf{S} \mathbf{P}, \quad (3)$$

gdzie Γ jest macierzą odpowiedzi czujników głowicy na kolejne składy mieszanin CO i H₂ z powietrzem, \mathbf{S} jest macierzą czułości głowicy, a \mathbf{P} macierzą stężeń składników w poszczególnych mieszaninach. Dla jednego składu mieszaniny macierze Γ i \mathbf{P} są wektorami:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{CO} \\ \gamma_{H_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{CO CO} & S_{CO H_2} \\ S_{H_2 CO} & S_{H_2 H_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{CO} \\ p_{H_2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie: $\gamma_{CO}, \gamma_{H_2}$ – sygnały wyjściowe odpowiednio czujników CO i H₂,

p_{CO}, p_{H_2} – stężenia odpowiednio tlenku węgla i wodoru,

$S_{A B}$ – czułość przetwarzania czujnika mierzącego gaz A na gaz B.

Ponieważ czujnik spełnia założenia liniowości i superpozycji oddziaływań gazów, proces kalibracji torów pomiarowych polega na ustaleniu wartości elementów macierzy czułości w mieszaninach o znanych stężeniach: p_{CO} i p_{H_2} .

Dobór zestawu czujników oraz wybór planu eksperymentu kalibracji powinien zapewniać uniknięcie kolinearności macierzy \mathbf{S} [9].

Odtwarzanie wymaga rozwiązania równania macierzowego:

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{B} \Gamma, \quad (5)$$

gdzie \mathbf{B} jest macierzą odwrotną macierzy czułości przetwarzania określoną w procesie kalibracji, a $\det \mathbf{S} = |\mathbf{S}| = S_{CO CO} S_{H_2 H_2} - S_{CO H_2} S_{H_2 CO}$.

Wówczas odtwarzanie sprowadza się do wykonania prostych działań na sygnałach wyjściowych zgodnie z równaniami:

$$p^*_{CO} = \frac{S_{H_2 H_2}}{|\mathbf{S}|} \gamma_{CO} - \frac{S_{CO H_2}}{|\mathbf{S}|} \gamma_{H_2}, \quad (6)$$

$$p^*_{H_2} = \frac{S_{CO CO}}{|\mathbf{S}|} \gamma_{H_2} - \frac{S_{H_2 CO}}{|\mathbf{S}|} \gamma_{CO}.$$

Czujniki elektrochemiczne podlegają procesom starzenia, wynikiem których są zmiany (najczęściej zmniejszanie się) czułości przetwarzania. Warunkiem skutecznego funkcjonowania modelu odtwarzania jest stałość stosunków:

$$\frac{S_{CO CO}}{S_{CO H_2}} \text{ i } \frac{S_{H_2 H_2}}{S_{H_2 CO}}, \quad (7)$$

w czasie eksploatacji, a co najmniej w okresach międzykalibracyjnych. Jeżeli stałość ta jest zachowana, proces okresowej rekalkibracji sprowadza się do korekcji elementów $S_{CO CO}$ i $S_{H_2 H_2}$ macierzy czułości do wartości ustalonych podczas kalibracji pierwotnej,

nastawami wzmocnienia torów pomiarowych. Jeżeli stałość ta nie jest zachowana, w procesie rekalkibracji wymagane jest ponowne określenie elementów macierzy **B**.

Pomiar stężenia tlenu czujnikiem elektrochemicznym 6C CiTiceL wymaga korekcji wpływu dwutlenku węgla. Może ona być wykonana w oparciu o sygnał czujnika absorpcyjnego, który jest selektywny w zbiorze komponentów gazów pożarowych. Sygnał wyjściowy czujnika tlenu w mieszaninach zawierających CO₂, określa równanie:

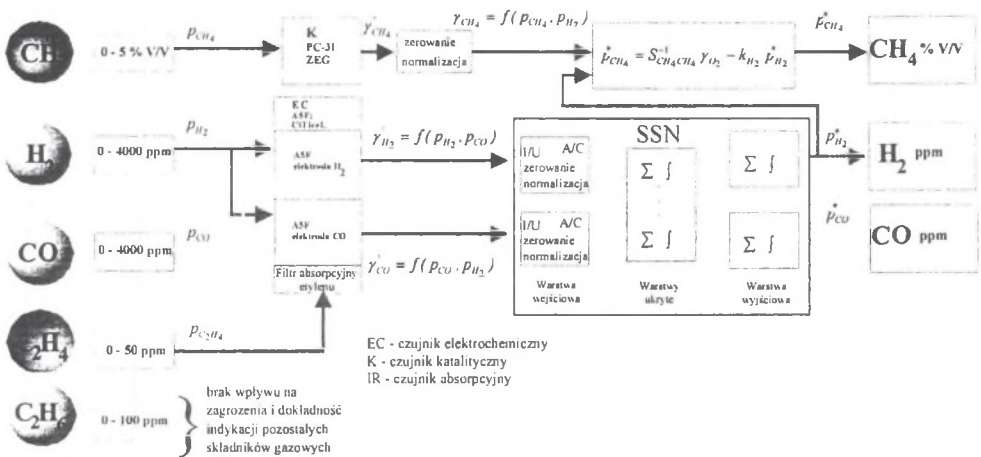
$$\gamma_{O_2} = S_{O_2O_2} p_{O_2} + s_{O_2CO_2} p_{CO_2}, \tag{8}$$

gdzie czułość skrośna $s_{O_2CO_2}$ jest nieliniową funkcją stężenia dwutlenku węgla. Zastosowanie liniowego modelu odtwarzania wymaga eliminacji tej nieliniowości. Ponieważ wpływ CO₂ na wskazania czujników tlenu wykonanych tą samą technologią (dominującą obecnie na rynku) ma identyczny charakter, można go wyeliminować na podstawie tabeli poprawek zawierającej współczynniki korekcyjne dla kilku przedziałów zmienności CO₂ lub w oparciu o jeden współczynnik korekcyjny obowiązujący dla całego zakresu zgodnie z równaniem:

$$p^*_{O_2} = \frac{1}{S_{O_2O_2}} \gamma_{O_2} - \frac{s_{O_2CO_2}}{S_{O_2O_2} S_{CO_2}} \gamma_{CO_2} = \frac{1}{S_{O_2O_2}} \gamma_{O_2} - \frac{k_{CO_2}}{S_{CO_2}} \gamma_{CO_2}, \tag{9}$$

gdzie k_{CO_2} jest uśrednionym współczynnikiem korygującym wpływ CO₂.

Pomiar niskich stężeń metanu jest wykonywany czujnikiem katalitycznym. Podczas pomiarów związanych z wykrywaniem i kontrolą procesów samozagrzewania węgla oraz pracami profilaktycznymi mogą wystąpić śladowe stężenia wodoru, etanu i etylenu. Ich wpływ na czujnik katalityczny jest pomijalnie mały, dlatego w tym obszarze zastosowania można go traktować jako selektywny.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu pomiarowego gazów wybuchowych w początkowej fazie rozwoju pożaru

Fig.3. Block diagram of explosive gases measurement system at the very beginning stage of fire

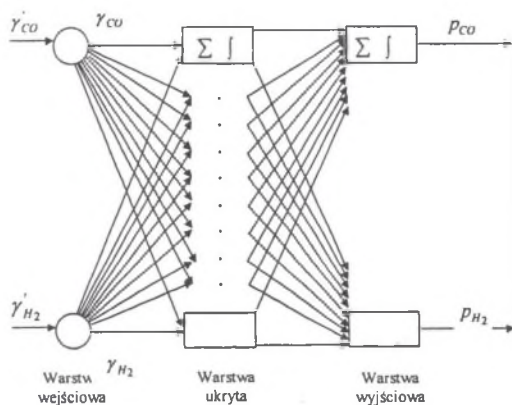
Rozwiązanie torów pomiarowych CO i H₂ w przedstawionej uprzednio koncepcji realizuje wymaganie dokładnej detekcji w początkowym przedziale zakresu zmienności tych gazów. Spowodowany rozwojem pożaru wzrost ich stężeń spowoduje nasycenie się czujników CiTiceL serii „safety” i brak możliwości ich dalszej kontroli. Dlatego w głowicy czujnikowej przyrządu do zabezpieczania prac wykonywanych w trakcie pożaru (rys.3.) należy zastosować czujniki o rozszerzonym do 2 000 ppm zakresie detekcji (z możliwością przeciążenia do 4 000 ppm CO), np. CiTiceL serii „emissions” [3]. Zachowanie liniowości przetwarzania w deklarowanym zakresie pomiarowym jest problematyczne, dlatego odtwarzanie informacji o stężeniach CO i H₂ zdecydowano zrealizować za pomocą sieci neuronowej.

W omawianym zastosowaniu zadaniem układu odtwarzania jest rozpoznawanie, z założoną dokładnością, wartości stężeń tlenu węgla p_{CO} i wodoru p_{H_2} w mieszaninach tych gazów z powietrzem w oparciu o sygnały γ_{CO} i γ_{H_2} otrzymane – po wstępnym przetwarzaniu – z czujników nieselektywnych w tej kompozycji gazów.

Sygnały pomiarowe czujnika – będące zarazem wejściowymi sygnałami sieci – są funkcjami dwóch zmiennych:

$$\gamma_{CO} = f(p_{CO}, p_{H_2}),$$

$$\gamma_{H_2} = f(p_{CO}, p_{H_2}).$$



Rys. 4. Wyjściowa struktura sieci neuronowej
Fig. 4. Initial structure of neural network

W omawianym zastosowaniu definicja zadania określa skład warstw: wejściowej i wyjściowej. Przyjmując arbitralne założenie, że zakres mierzonych stężeń CO i H₂ może być wystarczająco scharakteryzowany za pomocą 30 faktów uczących [6], jako strukturę

wyjściową do procesu uczenia przyjęto sieć przedstawioną na rys. 4, o następujących parametrach:

- ilość neuronów warstw: wejściowej NI i wejściowej NO równa 2,
- jedna warstwa ukryta zawierająca NH = 11 neuronów o sigmoidalnej funkcji aktywacji, brak połączeń między neuronami w obrębie warstwy, a połączenia między neuronami sąsiednich warstw typu „każdy z każdym”.

Weryfikując koncepcję wykonano pomiary niskich stężeń CO i H₂ w mieszaninach z powietrzem czujnikiem elektrochemicznym A5F CiTiceL[®], przeznaczonym do pracy w wyższych stężeniach tlenku węgla (do 4000 ppm CO) w obecności wodoru do 1 % V/V.

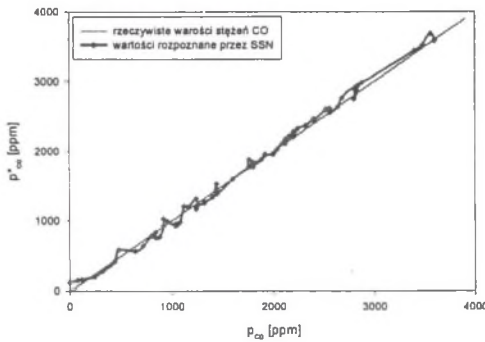
Przygotowano zbiór 106 mieszanin CO i H₂ z powietrzem o różnych koncentracjach składników mieszczących się w zakresie (0 ÷ 4000) ppm i dla każdej z nich określono sygnały wyjściowe czujnika γ_{CO} i γ_{H_2} . Drogą losowania wybrano 30 mieszanin i odpowiadające im sygnały, tworząc zbiór uczący (ZU-30). Pozostałych 76 mieszanin weszło w skład zbioru testowego (ZT-76).

W procesie projektowania, uczenia i testowania sieci neuronowej, przyjętej jako model odtwarzania informacji o składzie mieszaniny, wykorzystano program BrainMaker Professional firmy California Scientific Software. Przyjęto następujące parametry i strategię procesu uczenia:

- początkowy współczynnik uczenia $\eta = 1.0$, dekrementowany w miarę postępu procesu skokowo do nowej wartości 0.9η ,
- początkowy przedział tolerancji $\varepsilon = 10\%$ zakresu odtwarzanych wielkości (4000 ppm), dekrementowany po rozpoznaniu wszystkich elementów zbioru uczącego do nowej wartości 0.9ε ,
- prezentację wzorców w kolejności losowej z zachowaniem jednakowej częstotliwości prezentacji każdego z nich (losowanie bez zwracania).

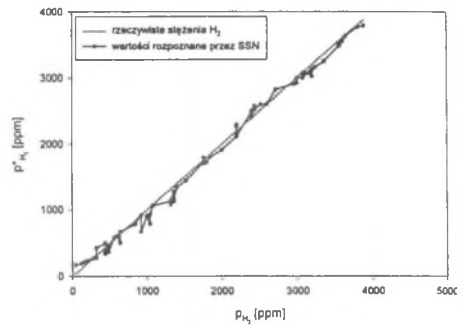
Omawiana sieć po wykonaniu 26 300 iteracji (jedna iteracja oznacza prezentację jednego wzorca) w czasie 6h 30min osiągnęła poziom tolerancji $\varepsilon = 0.059$ i przestała wykazywać postęp w procesie uczenia.

Uznając dokładność rozpoznawania wektorów wejściowych równą 5.9 % zakresu pomiarowego za niewystarczającą, zmieniono strukturę sieci dodając drugą warstwę ukrytą, zawierającą 10 neuronów losowo połączonych z neuronami warstwy pierwszej. Ponadto do danych wejściowych wprowadzono szum o rozkładzie jednostajnym i poziomie zmniejszonym w miarę postępu uczenia od 10 % do 1 % wartości podawanych do wejścia sieci.



Rys. 5. Odpowiedź wyjścia p_{CO}^* sieci neuronowej na elementy zbioru testowego

Fig. 5. Output response p_{CO}^* of neural network to the test set elements



Rys. 6. Odpowiedź wyjścia $p_{H_2}^*$ sieci neuronowej na elementy zbioru testowego

Fig. 6. Output response $p_{H_2}^*$ of neural network to the test set elements

Nowa struktura w podanych warunkach uczenia po wykonaniu 88080 iteracji osiągnęła poziom tolerancji 0.029, po czym proces uczenia zakończono. Następnie na wejście sieci podano elementy zbioru ZT-76. Wyniki ich rozpoznawania przedstawiają rys. 5 i 6. Błąd rozpoznania dla wszystkich mieszanin zbioru testowego nie przekracza wartości 116 ppm, odpowiednio dla CO lub H₂ stanowi to 2.9 % wartości zakresu detekcji składników mieszaniny.

Ponieważ sieć podczas testowania ponad dwukrotnie większą ilością wzorców nie przekracza tolerancji osiągniętej w procesie uczenia, należy przypuszczać, że stwierdzona podczas testu dokładność rozpoznawania jest zachowana w całych zakresach zmienności obydwu składników mieszaniny. Uzyskane rezultaty można poprawić, zwiększając liczebność zbioru uczącego.

5. PODSUMOWANIE

1. Układowa implementacja przedstawionej koncepcji daje możliwość opracowania wielogazowego przyrządu pomiarowego o parametrach dostosowanych do potrzeb monitorowania składu atmosfery podczas prac profilaktycznych i w początkowej fazie pożaru. Zapewni on selektywną detekcję występujących wówczas komponentów gazowych, co ułatwi ocenę trendów procesu samozagrzewania węgla oraz zwiększy bezpieczeństwo załóg uczestniczących w tych działaniach.

2. Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej w układach przetwarzania sygnałów pomiarowych przyrządów gazometrycznych wymaga opracowania, co najmniej, następujących zagadnień:
- metody szacowania niepewności pomiarów,
 - zasad doboru składu mieszanin tworzących zbiór uczący,
 - kryteriów optymalizacji struktury warstw ukrytych.

LITERATURA

1. Bystróż H.: State of the fire, ignition and explosion of gas during active and passive fire extinguishing. Archives of mining sciences, Volume 42, Issue 1; (1997).
2. City Technology Ltd.: Product data handbook. Volume I: Safety; (1997).
3. City Technology Ltd.: Product data handbook. Volume II: Emissions; (1995).
4. Fauth G., Hein N.: Fire gas measuring unit for monitoring underground fires. German Mining 1/89; Gütersloch: Bertelsmann; (1989).
5. Göpel W., Vaihinger S.: Multicomponent analysis in chemical sensing. Sensors, volumes 2/3; Chemical and biochemical sensors; VCH Weinheim; (1994).
6. Lawrence J.: Introduction to neural networks. Design, theory and applications. California Scientific Software Press. 6th edition; (1994).
7. Müller R.: „Multisensor signal processing”. Sensors, volume 1; Fundamentals and general aspects; VCH Weinheim; (1994).
8. OSHA Concentration Limits for Gases. Incorporating Infrared Analytical Data for compliance testing and other applications. PUB 522D. The Foxboro Company.
9. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2000).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Zakrzewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

Abstract

This paper discusses a problem of measurement of mine atmosphere components. These measures have to be performed in the aspect of detection of hazards caused by the presence of explosive, toxic and inertizing gases. The limited selectivity of detectors used in gas measurement equipment yields faulty measurement results which is equivalent to false assessment of gas hazard level. This issue becomes particularly important in fire conditions, because of a complex composition of fire gases. An improvement of measurement selectivity may be achieved by conversion of signals from multidetector heads, based on conventional gas sensors. This paper includes the general concept of identification of fire gas quantitative composition that uses mathematical methods and artificial neural network technique. They refer to the variability of gases component occurring at the prevention works and at the very beginning stage of a mine fire. This constitutes a basis for development of a portable and stationary gasometric apparatus for underground fire actions. Implementation of the discussed concept provides a possibility to develop a multigas measurement instrument with parameters adapted to the process of air composition monitoring, both during works related with prevention measures and in the very early phase of a fire. This will enable selective detection of gas components present in these situations. As a result, it will make easier to assess trends of coal self-heating and will contribute to an increased safety of rescue teams involved in these actions. Monitoring air composition can then be performed in a continuous way and directly at the places of fire hazard occurrence.