Ryszard BOGACZ Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechnika Śląska

MODEL MATEMATYCZNY DYFUZJI METANU PRZEZ OSŁONĘ OGNIOSZCZELNĄ CZUJNIKA PELISTOROWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z badaniem dyfuzyjnego przenikania metanu przez osłony ognioszczelne czujników pelistorowych. Opisano sposób zadawania skoku jednostkowego metanu na osłonę ognioszczelną, sposób zasilania mostka pelistorowego jako czynnik mający szczególnie istotny wpływ na proces dyfuzji, a także wpływ innych czynników, takich jak: położenie osłony, temperatura zewnętrzna, stężenie metanu, zapylenie osłony ognioszczelnej. Zaprezentowano wyniki przeprowadzonych pomiarów ilustrujące powyższe sytuacje. Ponadto przedstawiono uproszczony model fizyczny procesu dyfuzji oraz zastępczy model matematyczny.

MATHEMATICAL MODEL OF METHANE DIFFUSION THROUGHOUT FLAME-PROOF SHIELD OF PELLISTOR SENSOR

Summary. The paper presents the results of investigations of methane diffusion throughout flame-proof shields of pellistor sensors. The method of step function force $C \cdot 1(t)$, the power circuit and other factors determining the diffusion are described. The simple physical model of methane diffusion and the equivalent mathematical model are presented in this paper, as well.

1. WSTĘP

Jednym z czujników wykorzystywanych do pomiarów stężenia gazów palnych jest czujnik pelistorowy zabudowany w osłonie ognioszczelnej. Osłony ognioszczelne mają na celu zabezpieczenie przed wybuchem na skutek zapłonu metanu w trakcie pomiaru oraz stanowią ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi czujników pelistorowych. Niestety, dyfuzyjny proces przenikania metanu przez osłony znacznie wydłuża czas uzyskania wyniku pomiaru. Czasy reakcji obecnie produkowanych czujników, wynoszące od kilkunastu do kilkudziesięciu sekund, są o często za długie. Czujniki takie stosowane są w kopalniach węgla kamiennego, gdzie istnieje duże zagrożenie wyrzutami metanu, a długie czasy reakcji istotnie zwiększają zagrożenie wybuchem metanu. Poznanie dynamiki procesu przenikania ma na celu między innymi opracowanie algorytmów pozwalających na znaczne zwiększenie szybkości działania czujników.

2. METODA POMIARU

W celu przeprowadzenia badań skonstruowano moduł pomiarowy [1], który składa się z dwóch głównych elementów:

- układu pomiarowego zbudowanego w oparciu o mikrokontroler 80C32, umożliwiającego badania mostków pelistorowych,
- komory pomiarowej wypełnianej mieszanką metanu z powietrzem o znanym stężeniu metanu, w której umieszcza się badane czujniki pelistorowe w osłonach ognioszczelnych oraz elementy do zadawania skoku jednostkowego metanu.

Układ pomiarowy umożliwia precyzyjne ustalenie wartości napięcia zasilania mostka oraz czasu jego trwania, jednoczesny pomiar prądu płynącego przez mostek pelistorowy oraz napięcia wyjściowego z przekątnej mostka, tymczasowe przechowanie wyników pomiarowych, przesłanie wyników do komputera w celu wizualizacji i archiwizacji.





W komorze pomiarowej utrzymuje się w trakcie trwania pomiarów stabilne stężenie mieszanki. W celu zapewnienia stałego jej stężenia wewnątrz komory jest ona ciągle do niej dostarczana, dzięki czemu wewnątrz komory panuje niewielkie nadciśnienie. Przepływ mieszanki do komory musi być utrzymywany na niskim poziomie, aby nie zakłócić dyfuzyjnego przenikania mieszanki do wnętrza osłony ognioszczelnej. Stężenie metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej przed rozpoczęciem pomiarów jest równe 0%. Po rozpoczęciu pomiarów przez czujnik pelistorowy zdejmuje się z osłony ognioszczelnej osłonę gazoszczelną, wykonaną w postaci szczelnego kapturka teflonowego (rys.1), co skutkuje wytworzeniem skoku jednostkowego $C \cdot I(t)$ metanu na zewnętrznej ściance badanej osłony ognioszczelnej czujnika pelistorowego [3]. Komora pomiarowa nie jest izolowana termicznie od otoczenia, gdyż temperatura zewnętrzna jest znacznie niższa od temperatury pelistorów i w praktyce stała (szybkość zmian temperatury pelistorów wynosi kilkaset stopni K w czasie kilku dziesiątych sekundy).

Równocześnie z zadaniem skoku jednostkowego metanu rozpoczyna się pomiar stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej. Pomiar jest wykonywany za pomocą mostka pelistorowego zasilanego impulsowo [2]. W celu zapewnienia minimalnej ingerencji pelistorów w proces przenikania metanu przez osłonę mostek pelistorowy jest zasilany napięciem impulsowym o czasie trwania będącym sumą czasu nagrzewania i czasu pomiaru (rys.2). Czas nagrzewania T_1 jest uzależniony przede wszystkim od początkowej temperatury pelistora oraz stężenia metanu. Czas zasilania powinien być krótki, aby zminimalizować wpływ czujnika na proces dyfuzji, tzn. ograniczyć wypalanie metanu oraz nagrzewanie gazu wewnątrz osłony (przepływ wymuszany termicznie). Chcąc skrócić ten czas, w trakcie nagrzewania kontrolowana jest na bieżąco temperatura pelistora aktywnego (obliczana na podstawie jego rezystancji) i w chwili osiągnięcia przez pelistor temperatury spalania katalitycznego rozpoczyna się pomiar chwilowego stężenia metanu. Czas trwania pomiaru wartości chwilowej stężenia metanu jest stały i wynosi $T_2 = 0,16$ s. Napięcie zasilające mostek pelistorowy U_z jest przez cały czas stałe i w celu skrócenia czasu nagrzewania wyższe od znamionowego U_{zn}.





Ważnym czynnikiem decydującym o dynamice przenikania metanu przez osłonę ognioszczelną jest oprócz czasu trwania pojedynczego pomiaru także częstotliwość powtarzania pomiarów. Zbyt duża częstotliwość wywołuje podobne skutki jak zbyt długi czas pomiaru.

3. WYNIKI POMIARÓW

Okazało się, że decydujący wpływ na otrzymane wyniki ma sposób zasilania mostka pelistorowego (rys.3). Przy małej częstotliwości próbkowania stężenia metanu wewnątrz osłony (impulsowe zasilanie mostka pelistorowego co 5 sekund) wartość zmierzonego stężenia wewnątrz niej w stanie ustalonym była taka sama jak na zewnątrz. Natomiast przy większej częstotliwości próbkowania stężenia metanu wewnątrz osłony (zasilanie pelistorów co 1 sekundę) zaobserwowano zwiększenie dynamiki przenikania metanu przez osłonę ognioszczelną (co jest spowodowane przenikaniem wymuszonym termicznie na skutek nagrzewania gazu wewnątrz osłony przez pelistory) oraz zmniejszenie wartości stężenia w stanie "ustalonym" (co może być spowodowane wypalaniem metanu wewnątrz osłony, a tym samym znacznym wydłużeniem czasu potrzebnego na wyrównanie stężeń po obu stronach osłony). Częstotliwość próbkowania powinna być tak dobrana, aby pomiar nie zakłócił procesu dyfuzji, a ilość punktów pomiarowych była wystarczająca do identyfikacji charakterystyki.



- Rys. 3. Wartości średnie stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej przy różnych częstotliwościach próbkowania stężenia metanu po zadaniu skoku jednostkowego metanu, t_m czas pomiędzy kolejnymi pomiarami
- Fig. 3. The average concentration of methane inside flame-proof shields after the step function l(t) of methane concentration for various frequencies of methane concentration measurement, t_m time between the successive measurements

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów pomiarowych dobrano odpowiednią częstotliwość próbkowania (co 2s), która nie zaburzyła procesu dyfuzji. Pozwoliło to na wykonanie pomiarów stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej czujnika pelistorowego po zadaniu skoku jednostkowego stężenia metanu na zewnętrznej stronie osłony z minimalną ingerencją w proces przenikania. Na rys. 4 przedstawiono zmierzone charakterystyki dla dwóch różnych stężeń metanu.



- Rys. 4. Charakterystyki stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej po zadaniu skoku jednostkowego dla 2 różnych stężeń metanu C_1 i $C_2 > C_1$
- Fig. 4. Characteristics of the methane concentration inside flame-proof shields after the step function 1(t) of methane concentration for various methane concentration C_1 i $C_2 > C_1$

W trakcie prowadzonych prac nie zauważono wpływu stężenia metanu na dynamikę przenikania przez osłonę ognioszczelną. Większe stężenia wymagają jednak krótszego czasu zasilania mostka pelistorowego, gdyż pelistory przy większym stężeniu szybciej osiągają temperaturę spalania katalitycznego. W tym celu wykonano odpowiednią korektę algorytmu pomiarowego.



Rys. 5. Różne położenia osłony ognioszczelnej Fig. 5. The various position of flame-proof shields

W czasie prowadzonych badań wykonano także serie pomiarów przy różnych położeniach osłony ognioszczelnej (rys. 5):

a: poziomym,

b: pionowym - pelistor aktywny nad pasywnym,

c: pionowym - pelistor pasywny nad aktywnym.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że przy założonej dokładności pomiarów położenie osłony ma pomijalnie mały wpływ na dynamikę przenikania metanu przez osłonę ognioszczelną oraz wartość stężenia wewnątrz osłony ognioszczelnej (rys. 6).



- Rys. 6. Wartości średnie stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej przy różnych położeniach osłony ognioszczelnej po zadaniu skoku jednostkowego metanu
- Fig. 6. The average concentration of methane inside flame-proof shields after the step function 1(t) of methane concentration for various position of flame-proof shields

Najbardziej niekorzystnym zjawiskiem, jakie zaobserwowano w trakcie pomiarów, był wpływ zabrudzenia osłony ognioszczelnej na dynamikę przenikania metanu przez osłonę. Nawet niewielkie zapylenie, zakurzenie, zawilgocenie, zaparowanie itp. znacząco zmienia współczynnik dyfuzji, co ma istotny wpływ na przebieg charakterystyki dyfuzji. Proces dyfuzji metanu przez osłonę przy symulowanym 50% zabrudzeniu osłony (osłona zaklejona gazoszczelną taśmą w 50%) przedstawia rys. 7.

Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone w warunkach pomijalnie małego przepływu metanu na zewnątrz osłony.

Przeprowadzone badania pozwalają ustalić, w jakich warunkach możliwy jest pomiar stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej. Z punktu widzenia dynamiki przenikania metanu przez osłonę ognioszczelną nie ma istotnego znaczenia położenie osłony jak również wartość stężenia metanu. Bardzo ważne są natomiast częstotliwość i czas trwania zasilania pelistorów wewnątrz osłony. Odpowiednio duża częstotliwość próbkowania stężenia metanu i związana z tym duża częstotliwość zasilania pelistorów zakłóca proces dyfuzji metanu przez osłonę ognioszczelną. Wydaje się, że głównym czynnikiem wpływającym na powtarzalność wyników pomiarowych jest stan osłony zdeterminowany współczynnikiem dyfuzji.



- Rys. 7. Charakterystyka zmian stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej po zadaniu skoku jednostkowego metanu przy symulowanym 50% zapyleniu osłony
- Fig. 7. Characteristics of the methane concentration inside flame-proof shields after the step function 1(t) of methane concentration for simulated shield dustiness of 50%

4. MODELE PROCESU DYFUZJI

Zaprezentowane wyniki pomiarowe miały na celu zweryfikowanie modelu fizycznego procesu dyfuzji oraz wyznaczenie rzeczywistej charakterystyki dyfuzji dla przykładowej osłony ognioszczelnej. Okazało się, że uproszczony model fizyczny [3] w wystarczająco dobrym stopniu oddaje istotę zjawiska. Model ten zakłada, że dyfuzja przebiega jednowymiarowo, co korzystając z prawa Ficka wyraża się wzorem:

$$\frac{\delta C_k}{\delta t} = D_{kj} \frac{\delta^2 C_k}{\delta x^2},\tag{1}$$

gdzie C_k jest koncentracją składnika dyfundującego, D_{kj} jest współczynnikiem dyfuzji wyrażonym w m²/s, który dla dyfuzji Knudsena (przyjęta geometria porów) opisuje się wzorem:

$$D_k = \frac{8\varepsilon_p}{3A_w} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M_j}},$$
(2)

gdzie: ϵ_p - objętość porów na jednostkę objętości materiału stałego, m³/m³, A_w - sumaryczna powierzchnia wewnętrzna porów na jednostkę objętości materiału stałego, m²/m³, R - stała gazowa, J/(kmol K), T - temperatura, K, M_j - masa molowa składnika dyfundującego, kg/kmol.

Rozwiązanie tego równania wymaga sprecyzowania warunków brzegowych i początkowych. Założono ciało półnieskończone, rozciągające się od powierzchni w miejscu x = 0 do nieskończoności, w którym występuje niezmienna w całej objętości koncentracja C_{k0} składnika k. Jeżeli w chwili t = 0 koncentracja tego składnika na powierzchni x = 0 ulegnie zmianie do wartości C_{kA}, wywoła to dyfuzję nieustaloną składnika k w ciele. Warunki początkowobrzegowe dla równania (1) mają zatem postać:

 $C_k(x,0) = C_{k0}$ - warunek początkowy,

 $C_k(0,t) = C_{kA}$ - warunek brzegowy na powierzchni ciała,

 $C_k(\infty,t) = C_{k0}$ - warunek brzegowy dla $x \rightarrow \infty$.

Rozwiązując równanie (1) metodą Laplace'a otrzymuje się się następującą zależność opisującą koncentrację składnika k w ciele

$$C_{k}(x,t) = C_{k0} + \left(C_{k0} - C_{k0}\right) \left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{kj}t}}\right)\right],$$
(3)

gdzie

$$erf(z) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{z} e^{-y^{2}} dy .$$
 (4)

Równanie (3) mimo przyjętych uproszczeń wystarczająco oddaje charakter procesu dyfuzji, jest jednak już zbyt złożone, aby wykorzystać je w dalszej analizie. Podjęto zatem próbę zbudowania zastępczego modelu matematycznego, który z wystarczającą dokładnością aproksymowałby dyfuzję metanu przez osłonę ognioszczelną. Z analizy tego równania oraz otrzymanych wyników pomiarowych wynika, że zastępczy model matematyczny powinien charakteryzować się inercją drugiego rzędu. Tor przetwarzania wygląda zatem następująco:



Tor przetwarzania dynamicznego opisuje zależność:



 T_1 i T_2 to stałe czasowe elementów inercyjnych dobrane w sposób symulacyjny. Przy założeniu, że bezwzględna niedokładność pomiaru nie przekracza 0,2 %, otrzymano wartości stałych T_1 i T_2 odpowiednio równe 0,3 s i 2,2 s. Zastępczy model matematyczny wygląda zatem następująco:

$$C = \left(1 - e^{-\frac{t}{0,3}}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{2,2}}\right)$$

Charakterystyki aproksymujące wykorzystujące powyższy model przedstawiono na rys. 8.





5. UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych prądu zasilającego mostek oraz napięcia z przekątnej mostka, przy ustalonym napięciu zasilania można odtworzyć wartości chwilowe stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej [2]. Otrzymane wyniki umożliwią weryfikację teoretycznego modelu procesu przenikania. Z analizy otrzymanej charakterystyki wynika, że proces dyfuzji powinien być opisany równaniem 2 rzędu (2 stałe czasowe), gdyż opis równaniem 1 rzędu może powodować zbyt duże błędy w procesie odtwarzania, a opis równaniami wyższych rzędów niż 2 wpływa niekorzystnie na szybkość korekcji. Dysponując tak przetworzonym modelem będzie można odtworzyć wartości chwilowe stężenia metanu na zewnątrz osłony, rozwiązując odwrotne modele procesu przenikania metanu przez osłony ognioszczelne [6].

LITERATURA

- Bogacz R., Jakubiec J., Roj J.: System pomiarowy do badań czujników do pomiarów stężeń mieszanek palnych w stanach dynamicznych. Materiały konferencyjne. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemyśle. Zielona Góra 1996.
- 2. Roj J.: Pomiar stężenia mieszanki palnej za pomocą mostka pelistorowego zasilanego impulsowo. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1998.
- 3. Bogacz R.: Badanie dyfuzyjnego przenikania metanu przez osłony ognioszczelne. Materiały konferencyjne. MWPPP. Gliwice 1998.
- Jakubiec J.: Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych. Monografia. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Elektryka z.111, Gliwice 1988.
- 5. Bogacz R.: Badanie dynamiki przenikania mieszanek palnych przez osłony ognioszczelne czujników pelistorowych. Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne 2000. Gliwice 2000.
- 6. Jakubiec J., Roj J.: Pomiarowe przetwarzanie próbkujące. Podręcznik Akademicki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Waldemar Minkina, prof. Politechniki Częstochowskiej Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

Abstract

The purpose of investigations dealing with methane diffusion throughout flame-proof shields pellistor sensors is to shorten the sensor time response. The methane diffusion through flame-proof shields was determined by forcing the methane step function outside the shield (Fig.1) and pulse measurement of the methane concentration inside the shield [2]. Pulse supply consists in short duration supply of pellistor bridge with a dc voltage higher than the rated one for the time equal to $T_1 + T_2$, where $T_1 = var$. is the time of pellistor heating up to the temperature of catalytic combustion, and T_2 =const is measurement time. The measurement showed that minimalisation of a single measurement time and reduction in measurement frequency disturb the diffusion (Fig.3). Experimental choice of the measurements proved that the shield dustiness influences essentially the diffusion (Fig.4). As the simplified physical model of diffusion (Eq.3) was too complex for further analysis, it was replaced with the equivalent mathematical model of second order (Eq.5) that is used in the analog processing chain. The reciprocal model should enable the reconstruction of instantaneous values of methane concentration outside the shield [6].