

## Korekcja błędów dynamicznych czujnika pelistorowego w osłonie ognioszczelnej realizowana w sposób programowy

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę korekcji błędów dynamicznych czujnika pelistorowego wnoszonych przez osłonę ognioszczelną tego czujnika. Metoda wykorzystuje algorytm odtwarzania. Opisano korekcję jednorową (model o stałych parametrach) i dwutorową (model o zmiennych parametrach). Porównano obie metody oraz zaakcentowano zalety metody korekcji dwutorowej.

**Abstract.** This paper presents a method of dynamic error correction of pellistor sensor with flameproof shield. The method uses an prediction algorithm. Described one-way correction (model with fixed parameters) and a two-way correction (model with variable parameters). Both methods was compared and highlighted the advantages of two-way correction method. A method of dynamic error correction of pellistor sensor with flameproof shield

**Słowa kluczowe:** metan, pelistor, korekcja, odtwarzanie.

**Keywords:** methane, pellistor, correction, prediction.

### Wstęp

Obiektem badań opisanym w niniejszej pracy jest osłona ognioszczelna czujnika pelistorowego służącego do pomiaru stężeń metanu oraz jej właściwości dynamiczne w procesie dyfuzyjnego przenikania metanu do komory pomiarowej, w której umieszczony jest czujnik [1, 2]. Celem badań było opracowanie algorytmów umożliwiających bieżące korygowanie błędów dynamicznych osłony w stopniu pozwalającym na znaczące skrócenie czasu oczekiwania na wynik pomiaru przy nagłych zmianach stężenia metanu. W wyniku prowadzonych prac wykazano, że możliwe jest zbudowanie modelu matematycznego procesu dyfuzyjnego przenikania gazu przez osłonę w sposób pozwalający na użycie tego modelu do korekcji błędów dynamicznego wnoszonego przez osłonę, realizowanej na bieżąco w sposób programowy [3, 4, 6].

Genezą pracy było dążenie do poprawy bezpieczeństwa pracy w kopalniach, ukierunkowane na zwiększenie szybkości reakcji czujnika gazu na zagrożenie metanowe. W warunkach występujących w kopalniach często dochodzi do znacznych i gwałtownych zmian stężenia metanu w powietrzu aż do wartości wybuchowych [9, 13, 14, 15, 21]. Pomiar stężenia metanu z reguły związany jest z wydzielaniem ciepła przez czujnik, co może spowodować zainicjowanie wybuchu [11, 15, 16, 17]. Aby się przed tym zabezpieczyć czujnik pelistorowy umieszcza się w osłonie ognioszczelnej, która zabezpiecza przed wydostaniem się płomienia do otoczenia, a zarazem chroni czujnik przed uszkodzeniami mechanicznymi [9, 12, 16, 17]. Osłona jest niezbędna, jednak jej użycie powoduje istotne pogorszenie dynamicznych właściwości głowicy, co skutkuje relatywnie długim czasem oczekiwania na wynik pomiaru [1, 2, 6, 22].

### Algorytm korekcji jednorowej

Błędy pomiaru mogą być błędami statycznymi lub dynamicznymi, przy czym błędy dynamiczne występują głównie w sytuacji gdy wielkość mierzona ulega gwałtownym zmianom. Korekcja błędów dynamicznych jest istotna z uwagi na fakt, że są to często największe błędy występujące w układzie pomiarowym [2, 6, 10]. Błędy te są spowodowane inercją elementów toru pomiarowego. Błąd dynamiczny powstaje w wyniku niewymuszonej dyfuzji gazu przez osłonę czujnika. Dodatkowo na wartość błędów wpływa zmienny współczynnik dyfuzji osłony spowodowany jej zabrudzeniem przez pył węglowy w trakcie pracy w kopalni. Zmiany tego współczynnika mogą być względnie bardzo duże i nieprzewidywalne [6, 7, 9, 13, 15]. Algorytm korekcji

błędów dynamicznych wymaga określenia współczynników modelu matematycznego opisującego tor pomiarowy w postaci różniczkowych równań liniowych, który może być stosowany dla toru pomiarowego z czujnikami pomiarowymi o zidentyfikowanych stałych czasowych [1, 4, 18, 20, 23].

Dynamiczne właściwości czujnika mogą być opisane liniowym równaniem różniczkowym n-tego rzędu [1, 18, 20]. W wyniku przeprowadzonych prac [4] oraz na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że do opisu właściwości użytego czujnika gazu wystarcza równanie pierwszego rzędu opisane zależnością  $\dot{y} + a_0 y = b_0 x$ .

W sytuacji gdy równanie to jest idealnie statyczne  $a_0 = b_0$  można zapisać  $T \dot{y} + y = x$  lub  $y = x + \delta_{dyn}$  gdzie  $T = a_0^{-1}$  jest stałą czasową przetwornika, a wówczas błąd dynamiczny jest równy  $\delta_{dyn} = -T \dot{y}$ . Natomiast równanie odtwarzania opisuje zależność

$$(1) \quad \hat{x}(k) = A_{k+1} \tilde{y}(k+1) + A_k \tilde{y}(k),$$

a współczynniki równania (1) wynoszą odpowiednio:

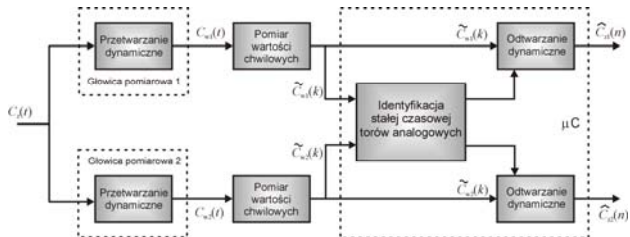
$$(2) \quad A_{k+1} = \frac{1}{1 - \varphi} \quad \text{oraz} \quad A_k = \frac{-\varphi}{1 - \varphi},$$

gdzie współczynnik  $\varphi = e^{-\frac{T_d}{T}}$ , a  $T_d$  jest okresem próbkowania. W równaniu (1)  $\hat{x}(k)$  jest wartością wejściowej wielkości chwilowej przetwornika w chwili  $k$ , a  $\tilde{y}(k)$  jest wartością wyjściowej wielkości chwilowej [7, 8].

### Algorytm korekcji dwutorowej

W sytuacji kiedy właściwości dynamiczne osłony ognioszczelnej zmieniają się w czasie pracy, np. na skutek zapylenia osłony, algorytm korekcji jednorowej może generować dodatkowe błędy wynikające z różnicy pomiędzy rzeczywistą aktualną wartością stałej czasowej osłony ognioszczelnej, a wartością stałej użytej w modelu. W takiej sytuacji konieczne staje się identyfikowanie wartości stałej czasowej osłony na bieżąco [8, 5]. Dobrą metodą okazuje się zastosowanie algorytmu korekcji dwutorowej zwanego też algorytmem korekcji w ciemno [4, 18, 19]. Istota tej metody polega na zastosowaniu dwóch równoległych torów pomiarowych, w których zastosowano głowice pomiarowe o różnych własnościach dynamicznych,

różniących się stałymi czasowymi, których wartości nie muszą być znane. Programowa realizacja algorytmu odtwarzania zamyka się w dwóch krokach. W pierwszym kroku zostaje zidentyfikowana stała czasowa (lub obie stałe, w obu torach), a w drugim kroku jest realizowana korekcja jak w przypadku jednotorowym. Ideę układu pomiarowego realizującego korekcję dwutorową pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Układ pomiarowy realizujący korekcję dwutorową

Działanie układu jest następujące. Sygnał pomiarowy dostarczany jest jednocześnie na wejścia obu kanałów pomiarowych. Osłony ognioszczelne czujników w obu torach mają różne współczynniki dyfuzji. Gaz przenika do wnętrza komór pomiarowych z różną szybkością na skutek różnych stałych czasowych. Przetworniki A/C mierzą jednocześnie wartości chwilowe stężeń gazu w obu komorach pomiarowych. Otrzymane wartości są używane w algorytmach korekcji do wyznaczenia wartości stałych czasowych, a następnie do odtworzenia wartości mierzonych, stężeń na zewnątrz osłon czujników. Oba torzy korzystają z tego samego modelu dynamicznego, ale z różnymi współczynnikami, wynikającymi z różnych stałych czasowych osłon. W każdym torze wyznaczane jest stężenie gazu podobnie jak przy algorytmie korekcji jednotorowej z użyciem wyznaczonych współczynników.

Używane modele wymagają identyfikacji jedynie stałej czasowej modelu pierwszego rzędu, a zatem

$$(3) \quad x(t_i) = y_1(t_i) + T_1 \cdot \dot{y}_1(t_i) = y_2(t_i) + T_2 \cdot \dot{y}_2(t_i),$$

gdzie  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  jest chwilą pomiaru sygnałów obu przetworników analogowych z częstotliwością  $f_p = T_d^{-1}$ , gdzie  $T_d$  jest okresem próbkowania. Wykorzystując wyniki z  $N$  kolejnych momentów próbkowania, otrzymuje się układ  $N-1$  równań [4, 5, 19], który pozwala wyznaczyć stałe czasowe  $T_1$  i  $T_2$  obu przetworników pomiarowych, przy czym wystarczające do rozwiązania są dwa dowolne równania. Dla każdego z dwóch torów pomiarowych układu z rysunku 1 stężenia na zewnątrz osłony ognioszczelnej są sobie równe, w związku z czym zachodzi

$$(4) \quad C_{z1}(t) = C_{z2}(t) = C_z(t),$$

gdzie  $C_{z1}(t)$  jest stężeniem metanu na zewnątrz osłony pierwszej, a  $C_{z2}(t)$  jest stężeniem metanu na zewnątrz osłony drugiej. Korzystając z zależności (3) i (4), można napisać

$$(5) \quad T_{01} \frac{dC_{w1}(t)}{dt} + C_{w1}(t) = T_{02} \frac{dC_{w2}(t)}{dt} + C_{w2}(t),$$

gdzie  $T_{01}$  i  $T_{02}$  są stałymi czasowymi osłon ognioszczelnych odpowiednio w torze pierwszym i drugim, natomiast  $C_{w1}(t)$  jest stężeniem metanu wewnątrz osłony pierwszej, a  $C_{w2}(t)$  drugiej. Równanie (5) jest prawdziwe dla każdej chwili, w związku z czym można utworzyć układ równań (6) dla dwóch dowolnych chwil  $t_1$  i  $t_2$

$$(6) \quad \begin{cases} T_{01} \frac{dC_{i1}(t_1)}{dt} + C_{i1}(t_1) = T_{02} \frac{dC_{i2}(t_1)}{dt} + C_{i2}(t_1) \\ T_{01} \frac{dC_{i1}(t_2)}{dt} + C_{i1}(t_2) = T_{02} \frac{dC_{i2}(t_2)}{dt} + C_{i2}(t_2) \end{cases}.$$

Przy założeniu stałego okresu próbkowania stężenia metanu wewnątrz osłony równego  $T_d$ , można przyjąć numerację chwil próbkowania za pomocą zmiennej  $k = 1, 2, \dots$ . Wartości stężenia metanu odtwarzane dla tych samych chwil próbkowania powinny być z założenia jednakowe w obu torach pomiarowych, w związku z czym, dla każdej chwili czasu  $k$ , prawdziwe jest także równanie

$$(7) \quad \hat{C}_{z1}(k) = \hat{C}_{z2}(k) = \hat{C}_z(k),$$

określające oceny wartości wielkości mierzonych (stężenia metanu na zewnątrz osłony) w obu torach pomiarowych. Korzystając z zależności obowiązujących dla korekcji jednotorowej można odtworzyć stężenie metanu w każdym torze pomiarowym niezależnie dla dowolnej  $k$ -tej chwili czasu. Dla  $i$ -tego toru pomiarowego, gdzie  $i = 1, 2$ , stężenie metanu można wyznaczyć korzystając ze wzoru

$$(8) \quad \hat{C}_{zi}(k) = A_{k+1,i} \tilde{C}_{wi}(k+1) + A_{k,i} \tilde{C}_{wi}(k),$$

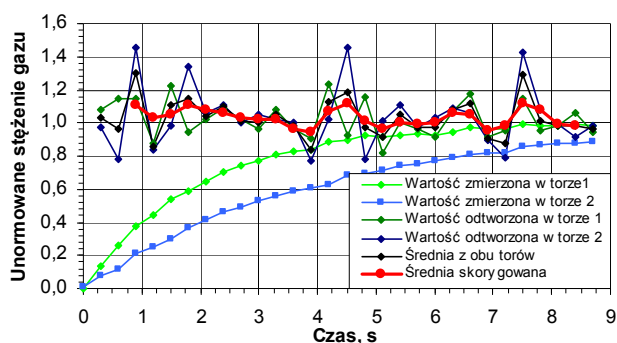
a współczynniki równania (8) wynoszą

$$(9) \quad A_{k+1,i} = \frac{1}{1 - \varphi_i} \quad \text{oraz} \quad A_{k,i} = \frac{-\varphi_i}{1 - \varphi_i},$$

w których  $\varphi_i = e^{-\frac{T_d}{T_{0i}}}$ .

Równanie (8) zostało użyte w celu wyznaczenia wartości mierzonych w każdym z torów pomiarowych. W celu minimalizacji błędów odtwarzania jako wynik końcowy przyjęto średnią wyników z obu torów w chwili  $k$ , a następnie przeprowadzono uśrednianie tak uzyskanych wyników pomiaru. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiaru stężenia metanu wewnątrz osłony ognioszczelnej oraz na zewnątrz osłony odtworzone zgodnie z równaniem (8) dla wyznaczonych wartości współczynników modelu dynamicznego  $A_{k+1}$  i  $A_k$  na podstawie zidentyfikowanych stałych czasowych. Mimo małej niepewności danych pomiarowych wynoszącej 0,2% występują duże błędy wartości odtworzonej, dochodzące do 20%, co jest spowodowane efektem wzmacniania błędów losowych przez algorytmy korekcji dynamicznej [4, 20]. Czas uzyskania wyniku pomiaru skrócił się do wartości nie przekraczającej 1 sekundy potrzebnej na uzyskanie dla celów filtracji trzech kolejnych wyników odtwarzania.

Wyniki pokazane na rysunku 2 ilustrują sytuację, gdy do korekcji używa się modelu o niezidentyfikowanej stałej czasowej. Jako miarę dokładności przyjęto maksymalną wartość błędu odtwarzania, która jest prosta i wygodna w użyciu, chociaż tak uzyskane wartości błędów są skrajnie duże [2]. W związku z tym można uznać, że błędy odtwarzania nie przekraczające wartości maksymalnych około 10% są dopuszczalne w warunkach, gdy pomiary mają na celu wykrycie wyrzutu metanu w kopalniach. Badania wykazały ponadto, że stosując proste algorytmy filtracji można uzyskać błędy odtwarzania o wartościach poniżej 5% wartości mierzonej [4]. Istotnym parametrem odtwarzania jest w opisanej sytuacji czas otrzymania wyniku pomiaru stężenia metanu na zewnątrz osłony [3].



Rys. 2. Odtwarzanie stężenia metanu dla korekcji dwutorowej i znanych stałych czasowych obu torów

## Wnioski

Opisane metody polegają na korekcji błędu dynamicznego powstającego na skutek inercji osłony ognioszczelnej czujników i realizowane są na zasadzie odtwarzania. Różnica między nimi polega na tym, że pierwsza metoda może być stosowana w przypadku, gdy zastępcza stała czasowa modelu osłony nie zmienia się w czasie lub zmienia się w czasie w niewielkim, dopuszczalnym stopniu, a druga w sytuacji relatywnie dużych zmian tej stałej. Mogą one być stosowane na bieżąco, co oznacza, że czas realizacji algorytmów odtwarzania jest na tyle krótki, że nie wprowadza to istotnego opóźnienia w uzyskiwaniu wyniku końcowego. W drugim przypadku występuje dodatkowe opóźnienie związane z potrzebą identyfikacji stałej czasowej, co jest związane z koniecznością wykorzystania większej liczby próbek, niż w pierwszym przypadku, a w małym stopniu ze złożonością samego algorytmu. Algorytmy korekcji dynamicznej znacząco wpływają na zmniejszenie błędu dynamicznego i tym samym pomagają znacząco skrócić czas uzyskania wyniku pomiaru przy skokowych zmianach mierzonego stężenia metanu, co może w istotnym stopniu wpłynąć na bezpieczeństwo pracy w kopalniach.

**Autorzy:** dr inż. Ryszard Bogacz, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl; dr inż. Beata Krupanek, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: beata.krupanek@polsl.pl.

## LITERATURA

- [1] Bogacz R., Krupanek B., Dynamic error correction of methane sensor, *IJET*, (2014), v.60, n.4, 287-289
- [2] Bogacz R., Krupanek B., Kilka słów o błędzie dynamicznym czujnika pelistorowego w osłonie ognioszczelnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), nr 11, 14-16
- [3] Bogacz R., Krupanek B., Wybrane metody przyspieszenia uzyskania wyniku pomiaru stężenia gazu w stanach nieustalonych, *PAK*, (2014), nr 11, 26-30
- [4] Bogacz R., Bieżąca korekcja błędów dynamicznych przenikania metanu przez osłony ognioszczelne czujników pelistorowych, *Praca doktorska*, (2013)
- [5] Bogacz R., Krupanek B., Double channel dynamic error correction of methane sensor, *XXI IMEKO World Congress*

- “Measurement in Research and Industry”, Prague, Czech Republic, (2015), mat. konf. 1763-1767
- [6] Bogacz R., Krupanek B., O błędach dynamicznych czujnika pelistorowego w osłonie ognioszczelnej, *Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle, X Konferencja naukowa*, Łagów, (2014), 11-14
  - [7] Bogacz R., Krupanek B., Correction of dynamics errors of measurements the methane concentration, *Advances measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety, 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics*, Warsaw, Poland, (2014), 157-161
  - [8] Bogacz R., Krupanek B., Programowa korekcja błędów dynamicznych czujnika pelistorowego w osłonie ognioszczelnej, *XLVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów. MKM'2015*, Zielona Góra - Łagów, (2015), Materiały konferencyjne, 7-10
  - [9] Cwięk B.: Podstawowe zasady bezpiecznego zachowania w wyrobiskach górniczych, Wyd. Górnicze, Katowice 2011.
  - [10] Gryś S., Minkina W., Fast temperature determination using two thermometers with different dynamical properties, (2002), *Sensors & Actuators A: Physical*, vol.A 10, No.2-3, 192-198
  - [11] Henderson R. E.: Understanding Combustible Sensor Performance, *International Fire Protection*, 2006, v.27, 55-59
  - [12] Ho Clifford K., Webb S. W.: Gas transport in porous media, Springer, 2006
  - [13] Frączek R.: Rozpoznanie i zwalczanie zagrożenia wyrzutami gazów i skał w kopalniach węgla kamiennego, Politechnika Śląska, Gliwice, 2007
  - [14] Kissell F. N.: Handbook for Methane Control in Mining, Department of Health and Human Services, Information Circular, 2006
  - [15] Krause E.: Ocena i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego, prace naukowe Główny Instytut Górnictwa, nr 878, Katowice, 2009
  - [16] Krawczyk M., Namiesnik J.: Application of a catalytic combustion sensor (pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen-air mixture in the upper explosive limit range, *Journal of Automated Methods & Management in Chemistry*, vol.25, no.5, 2003, 115-122
  - [17] Kumar A. et al: Application of gas monitoring sensors in underground coal mines and hazardous areas, *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, vol.3, Iss.3, 2013, 9-23
  - [18] Nabelecz J., Błąd metody w zadaniu identyfikacji właściwości dynamicznych czujnika, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2011), nr 12a, 99-103
  - [19] Nalepa J.: Correction of Dynamic Error by the „Blind” Method. A Differential Algorithm Simulation Study, *Proc. of 10th IMEKO TC7 Int. Symp. on Advances of Measurement Science*, 2004, 109-114
  - [20] Roj J., Neural Network Based Real-time Correction of Transducer Dynamic Errors, *Measurement Science Review*, Volume 13, No. 6, 2013, 286-291
  - [21] Taylor CH. D., Chilton J. E., Goodman G. V. R.: Guidelines for the Control and Monitoring of Methane Gas on Continuous Mining Operations, Department of Health and Human Services, Information Circular, 2010
  - [22] Urzędniczok H., Przetwornik do pomiaru stężeń gazów w mieszaninie gazowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010), v.86 nr 10, 114-117
  - [23] Urzędniczok H., Korekcja nieliniowości charakterystyk rezystancyjnych czujników gazów, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013), v.89, nr 4, 224-226