

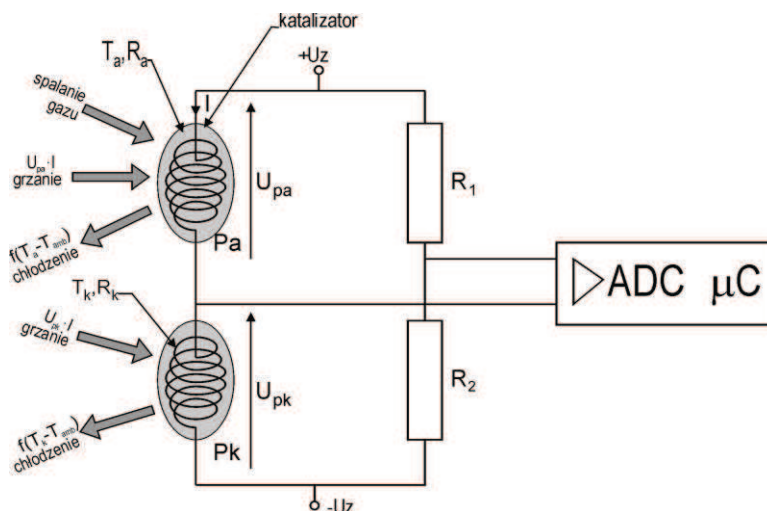
Eksplatacyjna zmienność właściwości metrologicznych metanomierzy

W artykule przypomniano, że pomiary zawartości metanu w wyrobiskach kopalń podziemnych wykonywane są najczęściej przez systemy gazometryczne, wyposażone z reguły w metanomierze dwuzakresowe, wykorzystujące metodę katalitycznego spalania. Metanomierze te wymagają okresowej kalibracji. Praca metanomierza w trakcie kalibracji jest rejestrowana w centrali metanometrycznej. W artykule przedstawiono wyniki analizy przebiegów kalibracyjnych metanomierzy. Tego rodzaju analiza pozwala na określenie, jak zmieniają się parametry metrologiczne metanomierza (głównie jego czułość) pomiędzy kolejnymi okresowymi (tygodniowymi) kalibracjami.

1. WPROWADZENIE

Zagrożenie wybuchem metanu obliguje kopalnie do stosowania systemów gazometrycznych [2], które między innymi dokonują pomiaru zawartości metanu w wyrobiskach, w miejscach określonych przez kierownika działu wentylacji. Najczęściej sto-

sowanymi metanomierzami są metanomierze dwuzakresowe, wykorzystujące metodę katalitycznego spalania dla pomiaru poniżej dolnej granicy wybuchowości oraz metodę termokonduktometryczną dla pomiaru powyżej dolnej granicy wybuchowości. W metodzie katalitycznego spalania wykorzystuje się mostek, w którego dwóch ramionach są pelistory [3]: aktywny Pa i kompensacyjny Pk (rys. 1).



Rys. 1. Schemat ilustrujący działanie mostka pelistorowego
Pa – pelistor aktywny, Pk – pelistor kompensacyjny

Prąd przepływający przez oba pelistory podgrzewa je do temperatury około 500°C. Temperatura pelistora wynika z bilansu mocy. W przypadku pelistora kompensacyjnego jest to moc grzania równa:

$$P_{ek} = U_{pk} \cdot I \quad (1)$$

oraz moc chłodzenia:

$$P_{ck} = f(T_k - T_{amb}) \quad (2)$$

która jest funkcją różnicy temperatury pelistora kompensacyjnego T_k i temperatury otoczenia T_{amb} . W stanie termicznie ustalonym pelistor kompensacyjny osiągnie temperaturę T_k , przy której obie moce są sobie równe ($P_{ek} = P_{ck}$).

W przypadku pelistora aktywnego w bilansie mocy występują:

– moc grzania równa:

$$P_{ek} = U_{pk} \cdot I \quad (3)$$

– moc spalania gazu (metanu) P_s wywołana obecnością katalizatora,

– moc chłodzenia:

$$P_{ck} = f(T_k - T_{amb}), \quad (4)$$

która jest funkcją różnicy temperatury pelistora aktywnego T_a i temperatury otoczenia T_{amb} .

Pelistor aktywny osiągnie temperaturę T_a , przy której spełniony będzie warunek:

$$P_{ea} + P_s = P_{ck} \quad (5)$$

Ze względu na moc wytworzoną przez spalanie mierzonego gazu temperatura pelistora aktywnego będzie wyższa od pelistora kompensacyjnego. Spalanie gazu (metanu) przy temperaturze mniejszej od temperatury zapłonu jest możliwe dzięki zastosowaniu w pelistorze aktywnym katalizatora. Intensywność spalania metanu (moc spalania) jest zależna od właściwości katalizatora. Wzrost temperatury pelistora aktywnego wywołany spalaniem metanu powoduje wzrost rezystancji pelistora aktywnego i pojawienie się napięcia nierównowagi mostka, które jest zależne od zawartości metanu w powietrzu.

Funkcjonowanie metanomierzy wykorzystujących metodę katalitycznego spalania zależy od właściwości (aktywności) katalizatora aktywnego pelistora. Niektóre substancje chemiczne występujące w powietrzu oddziałują na pelistory, zmieniając ich właściwości, co bezpośrednio wpływa na czułość metanomierza. Można wyróżnić następujące kategorie substancji chemicznych [9, 5]:

– inhibitory, które powodują czasowe obniżenie lub utratę czułości mostka pelistorowego,

– trucizny, które powodują stałe (nieodwracalne) obniżenie lub utratę czułości mostka pelistorowego.

Istnieją również substancje zwane kompensatorami trucizn [8], które powodują tworzenie katalizatora na powierzchni pelistora kompensacyjnego (przykładem jest acetylen). Stosowanie odpowiednich filtrów w komorach pomiarowych ogranicza wpływ inhibitorów i trucizn na pracę mostka pelistorowego. Przykłady wyników pomiarów wpływu różnych substancji na pracę mostka pelistorowego są podane w literaturze [1,4,6].

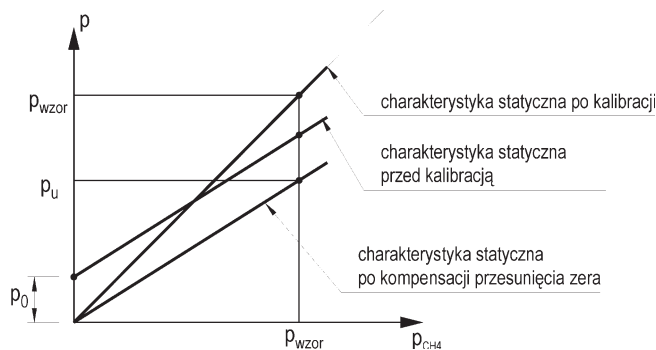
Zmiana czułości metanomierzy, spowodowana starzeniem się elementów czy zatruciem pelistorów, powoduje konieczność okresowej kalibracji metanomierzy z metodą katalitycznego spalania (najczęściej co 7 dni). Procedura kalibracji metanomierza jest rejestrowana w centrali gazometrycznej, a analiza przebiegów kalibracyjnych pozwala na ocenę zmian parametrów komory pelistorowej w kopalnianych warunkach eksploatacji metanomierzy [10].

2. METODA ANALIZY PRZEBIEGÓW KALIBRACYJNYCH

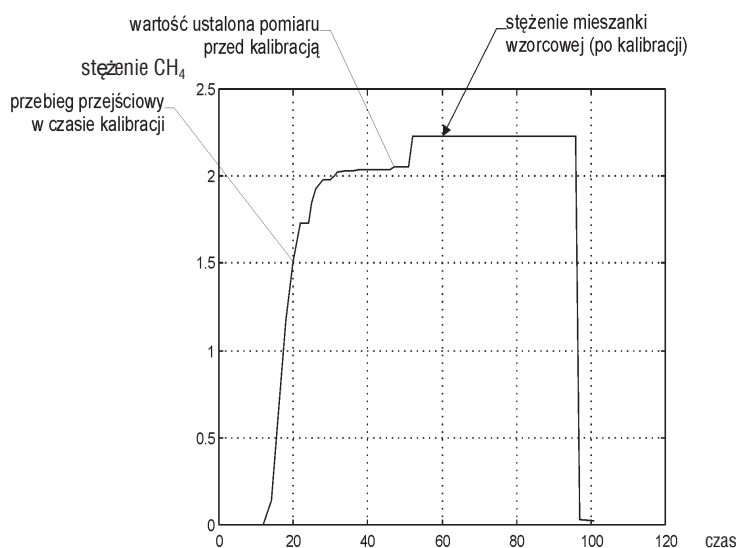
Zbadano przebiegi kalibracyjne metanomierzy typu MM-4 (EMAG) pracujących w systemie gazometrycznym typu SMP-NT/A [2]. Centrala telemetryczna systemu SMP współpracuje z komputerem utrzymanym z zainstalowanym oprogramowaniem typu SEMP. Oprogramowanie SEMP tworzy na dysku bazę danych zawierającą dane pomiarowe wszystkich mierników współpracujących z centralą SMP-NT/A z rozdzielczością czasową co 2 s. Oprogramowanie SEMP pozwala na edycję przebiegu czasowego wyników pomiarów dowolnego miernika w przedziale czasu do 1 miesiąca oraz na eksport fragmentu rejestracji do pliku w formacie *.csv. Plik ten jest plikiem tekstowym i zawiera:

- datę i czas pomiaru,
- wynik pomiaru stężenia metanu,
- status pomiaru (3 – właściwy pomiar, 4 – pomiar w trakcie kalibracji).

Rozdzielczość czasowa plików danych jest równa 2 s, jednak w przypadku, gdy kolejne wyniki pomiaru są takie same (z rozdzielczością 0,01% dla metanomierzy typu MM-4 i 0,1% dla metanomierzy typu MM-2P), to w pliku pamiętany jest tylko pierwszy pomiar. Z zarejestrowanych przebiegów wybierano fragmenty zawierające kalibrację mostka niskich stężeń metanu. Następnie dokonywano eksportu wybranych fragmentów do plików tekstowych w forma-



Rys. 2. Ilustracja procesu kalibracji metanomierza



Rys. 3. Przykład zarejestrowanego przebiegu kalibracyjnego metanomierza

cie*.csv. Otrzymane pliki tekstowe były analizowane z zastosowaniem autorskiego oprogramowania.

Przebieg kalibracji metanomierza pokazano na jego charakterystyce statycznej przedstawionej na rysunku 2.

Właściwości metanomierza można scharakteryzować, podając:

- parametry liniowej charakterystyki statycznej,
- parametry dynamiczne dla założonego modelu.

Przyjęto, że charakterystyka statyczna metanomierza może być opisana zależnością:

$$p = p_0 + k_{rel} \cdot p_{CH_4} \quad (6)$$

gdzie:

- p – wynik pomiaru,
- p_{CH_4} – stężenie metanu w powietrzu,
- p_0 – przesunięcie zera,
- k_{rel} – czułość metanomierza.

Proces kalibracji polega na realizacji dwóch czynności:

- podaniu na komorę pomiarową powietrza bez metanu i korekcja przesunięcia zera,

- podaniu na komorę pomiarową mieszkanki wzorcowej (bardzo często 2,2%) i korekcji czułości tak, by uzyskać wartość pomiaru równą stężeniu metanu w mieszkance wzorcowej.

Na rysunku 3 pokazano przykład typowego przebiegu kalibracyjnego. Można w nim wyróżnić:

- przebieg przejściowy po podaniu mieszkanki wzorcowej,
- wartość ustaloną pomiaru mieszkanki wzorcowej (przed kalibracją),
- wartość stężenia mieszkanki wzorcowej zastosowanej do kalibracji.

Proces kalibracji w postaci przebiegu wyników pomiarów w trakcie kalibracji (z rozdzielczością czasową 2 s) był zapamiętany w pliku kalibracyjnym. Otrzymane pliki z przebiegami kalibracyjnymi były przetwarzane przy użyciu autorskiego oprogramowania, które realizowało między innymi następujące funkcje:

- określenie wartości ustalonej p_u pomiaru mieszkanki wzorcowej,
- ustalenie wartości stężenia mieszkanki wzorcowej p_{wzor} ,

- identyfikacja parametrów krzywej narastania przebiegu dla dwóch modeli:
 - obiekt inercyjny 1. rzędu z opóźnieniem,
 - obiekt inercyjny 2. rzędu z opóźnieniem,
- obliczenie względnej czułości przed kalibracją $k_{rel} = p_u / p_{wzor}$.

Zmianę czułości Δk_{dB} pomiędzy kolejnymi kalibracjami można wyrazić również w dB w formie:

$$\Delta k_{dB} = 20 \cdot \lg k_{rel} \quad (7)$$

W przypadku spadku czułości wartość Δk_{dB} jest ujemna, a w przypadku wzrostu czułości wartość Δk_{dB} jest dodatnia. Przy wielokrotnym przeprowadzeniu kalibracji można zdefiniować całkowitą zmianę czułości Δk_{dBc} w postaci zależności:

$$\Delta k_{dBc} = \sum_{i=1}^n \Delta k_{dB_i} \quad (8)$$

gdzie:

- i – kolejny numer kalibracji,
- n – liczba kalibracji,
- Δk_{dB_i} – zmiana czułości dla i -tej kalibracji.

Dla identyfikacji parametrów dynamicznych metanomierza założono, że w trakcie kalibracji na komorę pomiarową podawana jest skokowo mieszanka wzorcowa o stężeniu p_{wzor} (najczęściej 2,2% CH₄), a wynik pomiaru jest rejestrowany co 2 s. Dla obiektu 1. rzędu z opóźnieniem przyjęto przebieg pomiarowy w postaci:

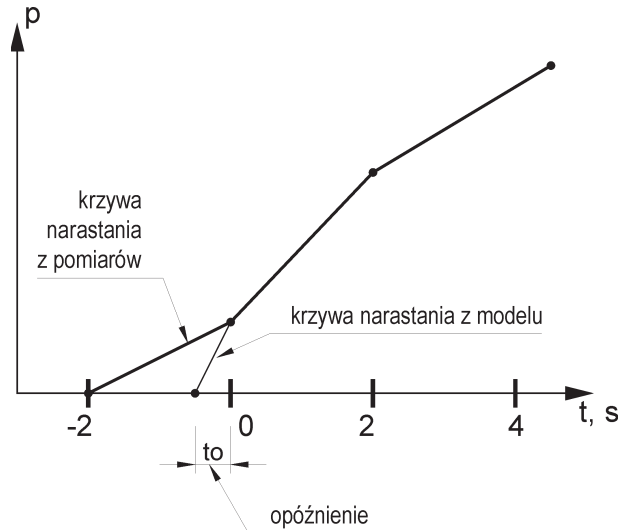
$$p = p_u \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_o}{T}} \right) \quad (9)$$

Dla obiektu 2. rzędu z opóźnieniem przyjęto przebieg pomiarowy w postaci:

$$p = p_u \cdot \left(1 + \frac{T_a}{T_b - T_a} e^{-\frac{t-t_{o1}}{T_a}} - \frac{T_b}{T_b - T_a} e^{-\frac{t-t_{o1}}{T_b}} \right) \quad (10)$$

gdzie:

- p_u – wartość ustalona przebiegu pomiarowego,
- T – stała czasowa modelu inercyjnego 1. rzędu,
- t_o – opóźnienie czasowe modelu inercyjnego 1. rzędu,
- T_a, T_b – stałe czasowe modelu inercyjnego 2. rzędu,
- t_{o1} – opóźnienie czasowe modelu inercyjnego 2. rzędu,
- t – czas,
- p – wartość obliczonego przebiegu pomiarowego dla czasu t .



Rys. 4. Ilustracja czasu opóźnienia przy identyfikacji parametrów narastania przebiegu pomiarowego

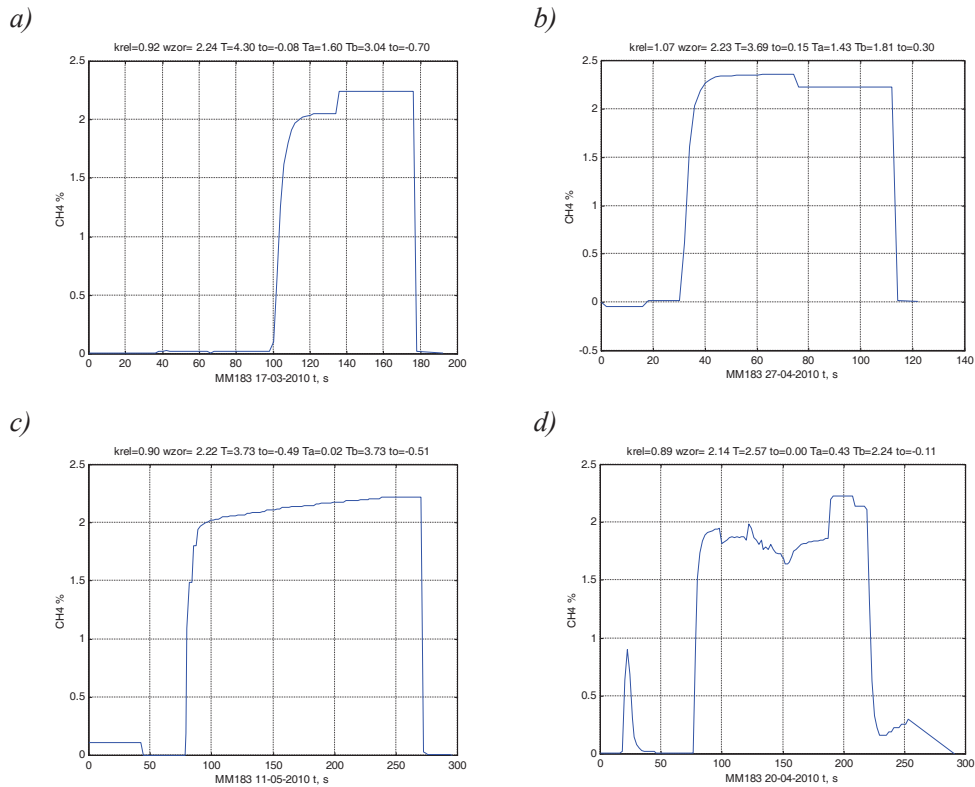
Konieczność uwzględnienia w modelach czasu opóźnienia wynika z tego, że wyniki pomiarów rejestrowane są co 2 s, a początek narastania przebiegu pomiarowego może znajdować się w dowolnym momencie czasu pomiędzy dwoma sąsiednimi wynikami pomiarów (rys. 4).

Parametry obu modeli dynamiki metanomierza otrzymano, korzystając z procedury **curvefit** oprogramowania matlab. Procedura **curvefit** tak dobiera parametry modelu, by uzyskać minimum sumy kwadratów różnic między wartościami uzyskanymi z pomiarów i wartościami obliczonymi z modelu. Procedura **curvefit** wykorzystuje algorytm **Levenberga-Marquardta** [7].

3. PRZEBIEGI KALIBRACYJNE METANOMIERZY

Zbadano przebiegi kalibracyjne wybranych metanomierzy typu MM-4 w jednej z kopalń. Na rysunku 5 pokazano wybrane przykłady przebiegów kalibracyjnych, uzyskane:

- gdy w wyniku kalibracji następuje zwiększenie czułości (rys. 5a),
- gdy w wyniku kalibracji następuje zmniejszenie czułości (rys. 5b),
- przy braku wyraźnej wartości ustalonej pomiaru mieszanki wzorcowej (rys. 5c),
- w przypadku kalibracji zakłóconej spowodowanej najprawdopodobniej niewłaściwym podawaniem mieszanki wzorcowej na komorę pomiarową (rys. 5d).

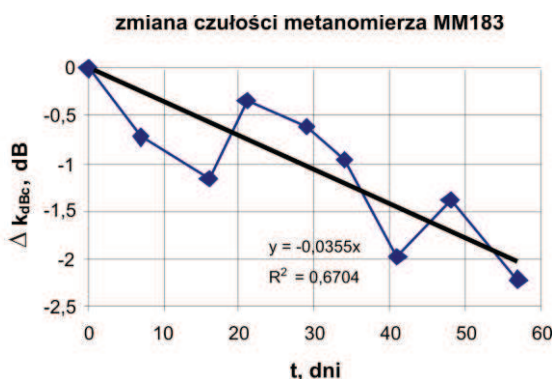


Rys. 5. Przykłady przebiegów kalibracyjnych metanomierza typu MM-4

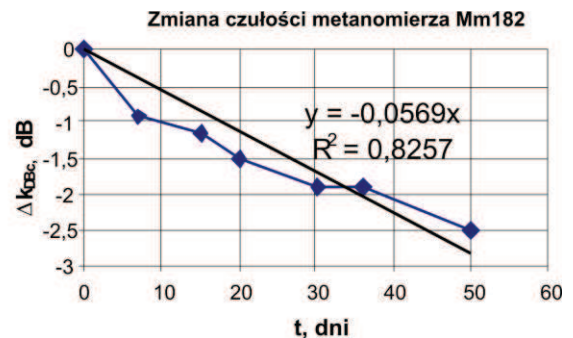
a – typowy przebieg w przypadku zwiększenia czułości w trakcie kalibracji, b – typowy przebieg w przypadku konieczności zmniejszenia czułości w trakcie kalibracji, c – nietypowy przebieg ze stopniowym narastaniem wartości mierzonej, d – nietypowy przebieg spowodowany prawdopodobnie nieprawidłowym podawaniem mieszanki wzorcowej na komorę pomiarową

Otrzymane przebiegi kalibracyjne dla kilku metanomierzy poddano analizie, otrzymując zmianę czułości Δk_{dB} dla każdej kalibracji oraz stałe czasowe modeli dynamicznych (inercyjny pierwszego rzędu i drugiego rzędu).

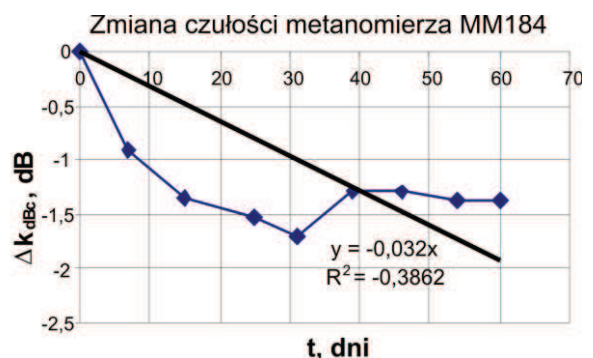
Na rysunkach 6a, 6b, 6c pokazano zależność całkowitej zmiany czułości Δk_{dBc} od czasu eksploatacji (liczby kalibracji). Na wykresach pokazano również linie trendu (dla funkcji liniowej), uzyskując wartości zmniejszenia czułości w zakresie od 0,032 do 0,056 dB na jeden dzień eksploatacji metanomierza przy współczynnikach korelacji od 0,38 do 0,82.



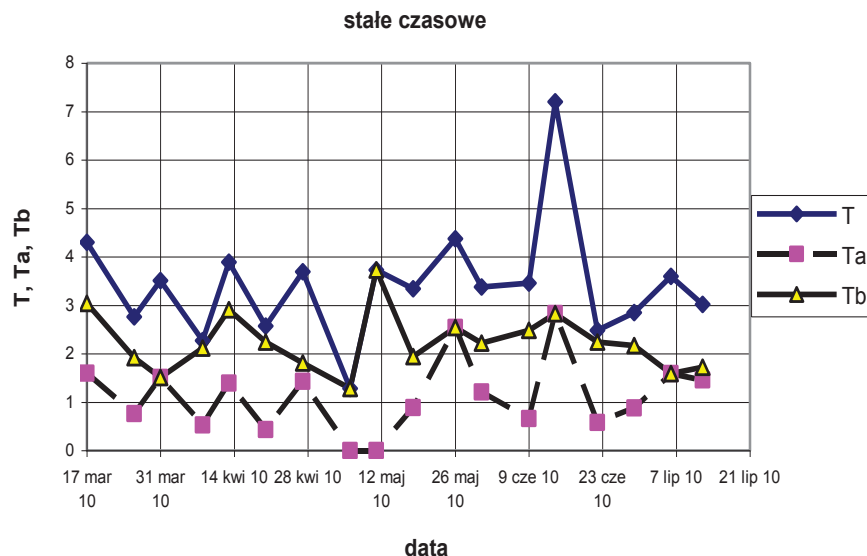
Rys. 6a. Przebieg zmian czułości metanomierza typu MM-4 nr 183 od czasu eksploatacji



Rys. 6b. Przebieg zmian czułości metanomierza typu MM-4 nr 182 od czasu eksploatacji



Rys. 6c. Przebieg zmian czułości metanomierza typu MM-4 nr 184 od czasu eksploatacji



Rys. 7. Przebieg stałych czasowych dla modeli inercyjnych 1. i 2. rzędu metanomierza typu MM-4 nr 182

Na rysunku 7 pokazano zmienność stałych czasowych modeli dynamicznych metanomierza od czasu eksploatacji w zakładzie górnym.

Przebiegi stałych czasowych wykazują pewną przypadkową zmienność i trudno w nich znaleźć jakiejś prawidłowości. Wartości średnie i odchylenia standardowe poszczególnych stałych czasowych są następujące:

	T	Ta	Tb
Wartość średnia	3,4	1,1	2,2
Odchylenie standardowe	1,2	0,7	0,6

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza przebiegów kalibracyjnych pozwoliła sformułować kilka wniosków.

- Jest możliwa ocena zmian czułości i przesunięcia zera metanomierza pomiędzy kolejnymi kalibracjami na podstawie analizy przebiegów kalibracyjnych zarejestrowanych w centrali metanometrycznej (przy rozdzielczości czasowej 2 s lub mniejszej).
- Otrzymane zmiany czułości metanomierza są w granicach od -1 dB do $+1$ dB, co powoduje powstanie błędu pomiaru stężenia metanu około 0,2% przy stężeniu 2%. Podane wartości liczbowe dotyczą jedynie wykonanych analiz. Dla pełnej wiedzy w tym zakresie należy wykonać analizy przebiegów kalibracyjnych dla większej grupy metanomierzy. Tego typu analizę można wprowadzić do oprogramowania obsługującego centralę metanometryczną (np. do oprogramowania

SEMP) o stosunkowo krótkim czasie odpytywania centrali (np. 2 s).

- Wprowadzono pojęcie całkowitej zmiany czułości. Ten parametr może ilustrować proces „zużycia” komory pomiarowej i sygnalizować potrzebę wymiany komory pomiarowej lub metanomierza.
- Jest możliwa ocena parametrów dynamicznych metanomierza według różnych modeli. Uzyskane rezultaty pokazują dużą przypadkową zmienność parametrów dynamicznych. Być może ta zmienność jest spowodowana sposobem podawania mieszanki wzorcowej na komorę pomiarową.

Literatura

1. *Bartczak M.*: Wpływ środków chemicznych stosowanych do uszczelniania i konsolidacji górotworu na pracę czujników gazów. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Systemy i urządzenia automatyzacji procesów technologicznych i kontroli bezpieczeństwa w przemyśle wydobywczym”. Szczawnica, maj 2006.
2. *Cierpisz S., Miśkiewicz K, Musiol K, Wojaczek A.*: Systemy gazometryczne w górnictwie. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice. 2007
3. [Clairair] A Discussion on Pellistor Gas Sensor Responses. www.clairair.co.uk/Pellistor_article.pdf
4. [e2v_AN3] E2v technologies limited. Pellistor Application Note 3. Pellistor Relative Responses
5. [e2v_AN6] E2v technologies limited. Pellistor Application Note 6. Pellistor Poisoning
6. [e2v_VQ21] E2v technologies limited. VQ21T Series Combustible Gas Sensor Elements.
7. Matlab. Optimization toolbox. Users Guide version 5. The MathWorks, Inc. 1997
8. NEMOTO (EUROPE) B.V. Technical Note: Pellistor Gas Sensors and Poisoning
9. Sensitron: Catalytic Sensors. <http://www.sensitron.it/wp-content/uploads/2010/07/CatalyticSensors.pdf>
10. *Wojtas P.*: Wpływ integracji systemów dyspozytorskich i konfiguracji sieci telekomunikacyjnych na ich niezawodność i funkcjonalność. Praca doktorska (niepublikowana). Gliwice 2010.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów