

# Optyczny miernik stężenia metanu o dużej prędkości z kompensacją pyłu w atmosferze kopalnianej

*Przedstawiono realizację testów optyczno-absorpcyjny miernik stężenia metanu do użytku w warunkach kopalnianych. Zbadano charakterystyki konwersji i dokonano oceny wydajności prędkości. Następnie zaproponowano metodę multiplikatywnej kompensacji zapyłonej atmosfery kopalnianej. Przedstawiono też wymagania dotyczące miernika stężenia metanu.*

*słowa kluczowe: miernik, wydajność prędkości, kompensacja multiplikatywna, charakterystyki konwersji, testy.*

## 1. ZAŁOŻENIA OGÓLNE

---

Coraz częstsze dynamiczne zjawiska pojawiania się gazów w atmosferze kopalnianej powodują konieczność opracowania nowych i polepszenia istniejących urządzeń do kontroli stężenia metanu. Należy więc wziąć pod uwagę niedogodności funkcjonujących obecnie analizatorów stężenia gazów oraz sprostać wymaganiom zawartym w normach, które dotyczą mierników stężenia gazu. Nasze opracowanie dotyczy analitycznego pomiaru stężenia składników gazu, głównie w atmosferze zapyłonej. Badania te mogą też znaleźć zastosowanie w systemach pomiaru i monitorowania gazu w przedsiębiorstwach przemysłowych i w monitorowaniu środowiska.

## 2. PROBLEMY BADAWCZE

---

W niniejszym artykule przedstawiono sposób ulepszenia mierników stężenia gazu za pomocą metody optyczno-absorpcyjnej, jej rozwój i wdrożenie sprzętowe.

Aby uzyskać założone cele, należało wcześniej:

- opracować optyczno-absorpcyjny miernik stężenia metanu z kompensacją pyłu w atmosferze kopalnianej,

- eksperymentalnie zdefiniować charakterystyki konwersji miernika,
- zbadać efektywność metody kompensacji multiplikatywnej zapyłonej atmosfery kopalnianej, która używana jest w pomiarach stężenia metanu,
- określić wydajność prędkości.

## 3. ROZWIĄZANIE PROBLEMU

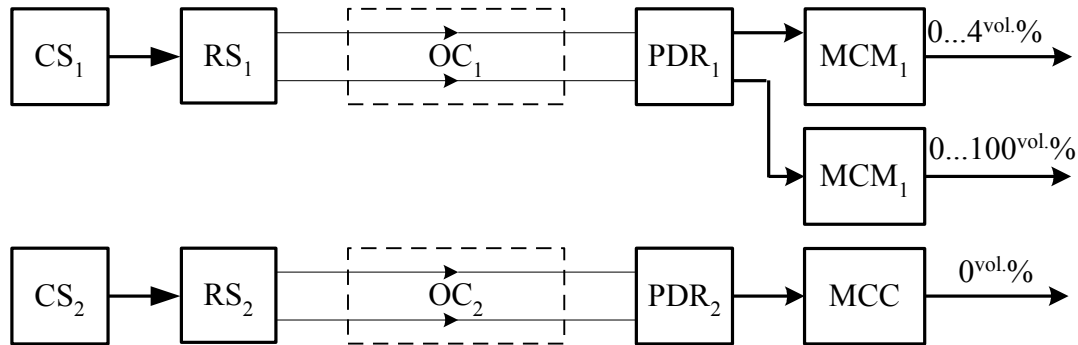
---

Doniecki Państwowy Uniwersytet Techniczny we współpracy z prywatnym przedsiębiorstwem „Data Express” (Donieck, Ukraina) zaprojektował i wykonał próbny egzemplarz optyczno-absorpcyjnego miernika stężenia metanu o dużej prędkości do zastosowania w kopalniach. Schemat blokowy miernika przedstawiono na rys. 1. [1, 2]. Podczas realizacji miernika stężenia metanu użyto diody LED34 (jako źródła promieniowania  $RS_1$ ) oraz fotodiody PD36 (jako fotodetektora PDR). Wzięto pod uwagę cyrkulację powietrza kopalnianego przez celkę pomiarową kanału optycznego ( $OC_1$ ). Aby uzyskać pożądaną wartość błędu bezwzględnego pomiaru stężenia metanu (poniżej  $0,2^{vol.\%}$ ) [3] w zapyłonym powietrzu kopalnianym, opracowano i zbadano metodę kompensacji multiplikatywnej zapyłonej atmosfery kopalnianej [4, 5], którą wdrożono w oparciu o miernik dwukanałowy. W celu implementacji sprzętowej

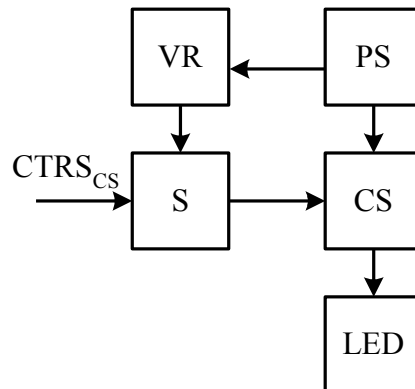
wymienionej wyżej metody wprowadzono dodatkowy kompensacyjny kanał  $OC_2$  z  $RS_2$  – LED LED29 i  $PDR_2$  – PD PD36 [4, 5].

Do zasilania pomiarów ( $RS_1$ ) i kompensacji ( $RS_2$ ) LED wykorzystano źródło prądu ( $CS$ ) sterowane napięciem. Schemat blokowy kontrolowanego źródła prądowego do zasilania LED pokazano na rys. 2., gdzie LED jest diodą emitującą światło,  $CS$  – źródłem prądowym kontrolowanym przez napięcie,  $PS$  – zasilaniem,  $VR$  – źródłem napięcia referencyjnego,

$S$  – przełącznikiem,  $CTRS_{CS}$  – sygnałem kontrolnym źródła prądu. LED jest bezpośrednio podłączona do źródła prądu. Napięcie wyjściowe  $VR$  jest na bieżąco dostosowywane przez dzielnik napięcia wyjściowego i na bieżąco dopasowuje aktualną amplitudę zasilania. Szereg impulsowy zasilania LED powstaje za pomocą sygnałów kontrolnych z mikrokontrolera ( $CTRS_{CS}$ ), emitowanych przez przełącznik analogowy, który odpowiedzialny jest za tryb impulsowy LED.



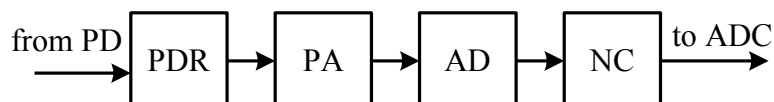
Rys. 1. Schemat blokowy miernika stężenia metanu



Rys. 2. Schemat blokowy źródła prądu zasilającego LED

Schemat blokowy kanałów pomiaru (MCM) i kompensacji (MCC) miernika stężenia metanu przedstawiono na rys. 3. Aby zapewnić fotowoltaiczny tryb działania PD PD36, użyto wzmacniacza typu TIA (przetwornik prąd-napięcie) – fotodetektora (PDR). Przedwzmacniacz (PA) sygnału wyjściowego PDR zwiększa amplitudę sygnału do poziomu wymaganego dla normalnego działania detektora amplitudy (AD). AD, biorąc pod uwagę stałą całkowania,

przekształca amplitudę wyjściowego szeregu impulsowego PA na sygnał napięcia prądu stałego, którego wartość jest proporcjonalna do zmierzonego stężenia metanu. Sygnał wyjściowy AD przechodzi do przetwornika normalizującego (NC), który realizuje dodatkowe dolnoprzepustowe filtrowanie sygnału wyjściowego AD i skaluje go, podając poziom wejściowy ADC.



Rys. 3. Schemat blokowy kanałów pomiaru (MCM) i kompensacji (MCC) mierników stężenia metanu

Podczas projektowania miernika stężenia metanu sformułowano wymagania dla następujących wielkości:

1. Źródło prądu do zasilania LED:

- obciążenie uziemione,
- impulsy prostokątne prądu obciążeniowego,
- zakres amplitud impulsów prądowych: od 1,4 do 1,6 A,
- częstotliwość powtarzania impulsów prądowych: 2 kHz,
- okres powtarzania impulsów prądowych: 500  $\mu$ s,
- zakres trwania impulsów prądowych: od 10 do 20  $\mu$ s,
- czas trwania czoła impulsu: poniżej 2  $\mu$ s,
- czas trwania recesji impulsu: poniżej 3  $\mu$ s,
- amplituda napięcia sterującego z mikrokontrolera  $U^0_{Ctrl}$ : plus (0,3...0,4)V;  $U^1_{Ctrl}$ , plus (4,8...4,9) V,
- napięcie zasilania:  $U_S$ ,  $\pm 9$  V,
- niestabilność napięcia zasilania:  $\pm 0,1\%$ .

2. Kanał analogowy miernika stężenia metanu:

- zakres amplitudy prądu PD: od 0,4 do 0,8  $\mu$ A,
- tryb PD blisko zwarcia,
- maksymalna różnica potencjału w PD: poniżej 1 mV,
- wzmacniacz operacyjny PDR z tranzystorami polowymi (FET) z przejściem typu p-n-na wejściach (wejście FET),

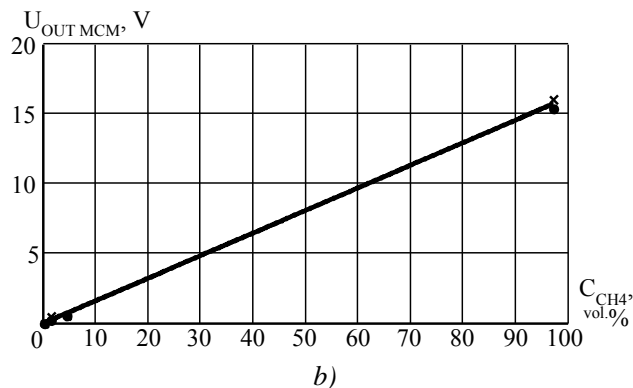
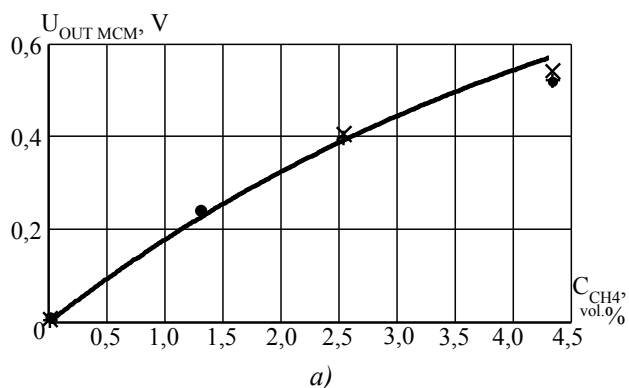
- liniowość charakterystyk transmisyjnych PDR,
- minimalny poziom hałasu PDR,
- maksymalny prąd wejścia PDR: poniżej 10 pA,
- minimalna wartość amplitudy napięcia wyjściowego PDR: poniżej 0,5 V,
- pasmo przepustowe PDR: poniżej 1,0 MHz,
- zakres amplitudy napięcia wejściowego AD: od + 2,5 do + 4,0 V,
- maksymalne napięcie wyjściowe AD: poniżej +7,5 V,
- zakres napięcia wyjściowego NC: od +0,2 do +4 V,
- pasmo przepustowe NC: poniżej 10 Hz,
- napięcie zasilania:  $U_S$ ,  $\pm 9$  V,
- niestabilność napięcia zasilania:  $\pm 0,1\%$ .

Miernik stężenia metanu został przetestowany w laboratorium zakładów Petrowski („Petrowsky Coal Engineering Plant”). Testy laboratoryjne zostały przeprowadzone za pomocą kalibracji mieszanek gazowych (GCM) w następujących typach butli:  $(1,30 \pm 0,15)\%$ ;  $(2,51 \pm 0,08)\%$ ;  $(4,30 \pm 0,15)\%$ ;  $(97,0 \pm 0,5)\%$ . Zdefiniowano charakterystyki konwersji miernika stężenia metanu poprzez pomiar średniego napięcia wyjściowego kanałów pomiarowych (MCM i MCC) w procesie dostarczania mieszanek gazowych z butli CGM w zamkniętej celce pomiarowej. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1.

Wyniki pomiarów charakterystyk konwersji miernika stężenia metanu

Stężenie metanu, $C_{CH_4}$ , vol.%	Średnia wartość napięcia wyjściowego miernika, $U_{OUT}$ , V		
	№ 1	№ 2	№ 3
0	0,01	0,005	0,003
1,30	0,24	–	–
2,51	–	0,406	0,398
4,30	0,52	0,540	0,522
97,0	15,4	16,01	–



Rys. 4. Charakterystyki konwersji miernika stężenia metanu w zakresach: a) od 0 do 4,3 vol.%; b) od 0 do 97,0 vol.%

Rys. 4. pokazuje uzyskane na drodze eksperymentów charakterystyki konwersji miernika, które odpowiadają następującym zakresom pomiarowym: a) od 0 do 4,3 vol.% [6] oraz b) od 0 do 97 vol.%. Użyto na nim następujących oznaczeń: • – № 1; × – № 2; + – № 3 – serie pomiarów; ——— – przybliżone wyniki charakterystyk konwersji.

Czułość miernika stężenia metanu jest zróżnicowana w następujących zakresach:

– od 0 do 4,3 vol.%:

$$S_{CH_4} = \frac{\Delta U_{OUT\ MCM}}{\Delta C_{CH_4}} = \frac{0,552 - 0,003}{4,3 - 0} = 0,128 \frac{V}{vol.\%};$$

– od 0 do 97 vol.%:

$$S_{CH_4} = \frac{\Delta U_{OUT\ MCM}}{\Delta C_{CH_4}} = \frac{15,4 - 0,003}{97 - 0} = 0,159 \frac{V}{vol.\%}.$$

Charakterystyki konwersji miernika są prawie liniowe w zakresie stężeń metanu od 0 do 4,0 vol.% oraz od 0 do 97 vol.%. Czułość miernika w zakresie stężeń metanu od 0 do 4,3 vol.% wynosi 0,128 V/vol.%, a w zakresie od 0 do 97 vol.% – 0,159 V/vol.%.

Aby zweryfikować metodę kompensacji multiplikatywnej zapylenia atmosfery kopalnianej, zdefiniowano charakterystyki konwersji MCM i MCC miernika przy zmianie takich wartości, jak: stężenie metanu w zakresie od 0 do 4,3 vol.% oraz współczyn-

nik transmitancji promieniowania optycznego od 1,00 do 0,30 w zakresie fali od 2,5 do 4,0 μm. Podczas przeprowadzania testów laboratoryjnych użyto specjalnych błon z różnymi współczynnikami transmitancji promieniowania optycznego: 100%; (90±1)%; (50±1)%; (30±1)%. Aby zbadać skuteczność metody, zdefiniowano składnik sygnału wyjściowego informacji Mux, który jest proporcjonalny do wysokości stężenia metanu z kompensacją efektu zapylenia, jako współczynnika napięcia wyjściowego kanałów pomiarowych:

$$Mux = \frac{U_{OUT\ MCM}}{U_{OUT\ MCC}},$$

gdzie  $U_{OUT\ MCM}$  i  $U_{OUT}$  są napięciami wyjściowymi kanałów pomiarowych MCM i MCC miernika.

Tab. 2. przedstawia wyniki testów laboratoryjnych miernika przy różnych wartościach gęstości optycznej stężenia pyłu i metanu. Rys. 5. pokazuje eksperymentalne charakterystyki konwersji miernika, które odpowiadają różnym wartościom optycznej gęstości pyłu i stężeń metanu – wartości eksperymentalne charakterystyk konwersji miernika z różnicą w optycznej gęstości pyłu: + – 100% (0 mg/m<sup>3</sup>); □ – 90% (158 mg/m<sup>3</sup>); ◇ – 50% (1039 mg/m<sup>3</sup>); ○ – 30% (1805 mg/m<sup>3</sup>); ——— – wyniki przybliżone charakterystyk konwersji.

Tabela 2.

Charakterystyki konwersji miernika z różnicą optycznej gęstości pyłu i stężenia metanu

$C_{CH_4}$ , vol.%	$U_{OUT\ CM}$ , V	Współczynnik transmitancji, T, % (stężenie pyłu węglowego, $C_C$ , mg/m <sup>3</sup> )			
		100 (0)	90 (158)	50 (1039)	30 (1805)
0	$U_{OUT\ MCM}$ , V	1,00	0,90	0,50	0,30
	$U_{OUT\ MCC}$ , V	1,01	0,90	0,51	0,30
	Mux	0,99	1,00	0,98	1,00
1,30	$U_{OUT\ MCM}$ , V	1,24	1,10	0,61	0,35
	$U_{OUT\ MCC}$ , V	1,02	0,89	0,50	0,29
	Mux	1,22	1,24	1,22	1,21
2,51	$U_{OUT\ MCM}$ , V	1,41	1,23	0,70	0,41
	$U_{OUT\ MCC}$ , V	1,03	0,89	0,51	0,30
	Mux	1,37	1,38	1,37	1,37
4,30	$U_{OUT\ MCM}$ , V	1,52	1,37	0,77	0,47
	$U_{OUT\ MCC}$ , V	1,01	0,91	0,51	0,31
	Mux	1,51	1,51	1,51	1,52

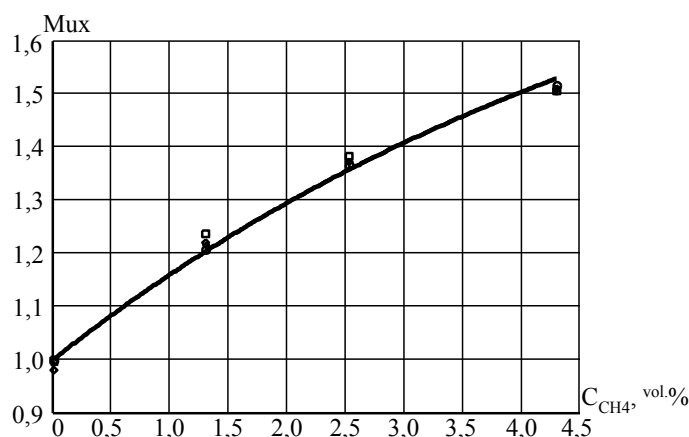
Analiza charakterystyk konwersji (przedstawiona na rys. 5.) pokazuje, że opracowana metoda kompensacji multiplikatywnej zapylenia atmosfery kopalnianej pozwala wyeliminować składnik uwarunkowany obecnością pyłu węglowego w kanale pomiarowym. W rezultacie podczas opracowywania miernika należy użyć dwukanałowego systemu optycznego, który weźmie pod uwagę i zrównoważy wpływ jednego z czynników destabilizujących atmosfery kopalnianej (wpływ pyłu węglowego). W ten sposób można uzyskać wymagane charakterystyki metrologiczne miernika.

Zaproponowano metody definiowania działania miernika oraz narzędzie implementacji tych metod, które wykorzystuje wirujący dysk z otworem. Posiada ono współczynnik transmitancji promieniowania

optycznego 100%. Przy zmieniającej się częstotliwości obrotów napędu dysku zdefiniowano długość procesu przejścia, kiedy napięcie wyjściowe kanału pomiarowego wynosiło 0,9 ustalonej wartości. W tym celu użyto oscyloskopu pomiarowego. Czas trwania procesu przejścia zdefiniowano następującą formułą:

$$t_{TR} = \sqrt{t_{TRM}^2 + t_{TRCSS}^2},$$

gdzie  $t_{TRM}$  jest czasem trwania procesu przejścia przy ustawianiu napięcia wyjściowego miernika metanu, a  $t_{TRCSS}$  – czasem trwania procesu przejścia systemu sterowania prędkością miernika (czas, w którym pokrywa się działanie wiązki optycznej i dysku obrotowego).



Rys. 5. Charakterystyki konwersji miernika stężenia metanu z uwzględnieniem kompensacji zapylenia atmosfery kopalnianej ( $M_{ux}$ )

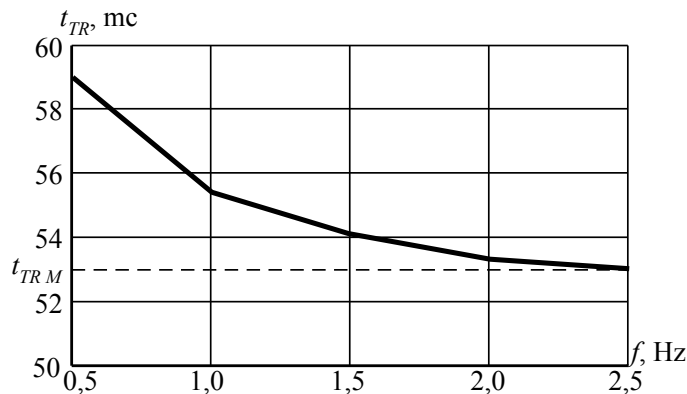
Wyniki testów laboratoryjnych dotyczących prędkości miernika przedstawiono w tab. 3. Rys. 6. natomiast przedstawia wykres czasu trwania procesu przejścia przy ustalaniu napięcia wyjściowego z częstotliwości obrotów dysku. Wraz ze wzrostem częstotliwości tych obrotów czas trwania procesu przejścia  $t_{TRCSS}$  zmniejsza się w porównaniu z  $t_{TRM}$  oraz zmniejsza się jego udział w całkowitym czasie trwania procesu. Eksperymenty pokazały, że przy często-

tliwości obrotów dysku powyżej 2,0 Hz czas trwania procesu przejścia (gdą stężenie metanu mierzone jest za pomocą opracowanego miernika) wynosi 53 ms, a jednocześnie udział tego czasu w czasie całkowitym trwania procesu  $t_{TRCSS}$  jest niewielki (patrz rys. 6.). Teoretyczne wyliczenie długości procesu przejścia w funkcji przejścia kanału pomiarowego to 47 ms [1, 2], co jest prawie całkowicie zgodne z wynikami eksperymentów.

Tabela 3.

**Wyniki testów laboratoryjnych dotyczących prędkości miernika**

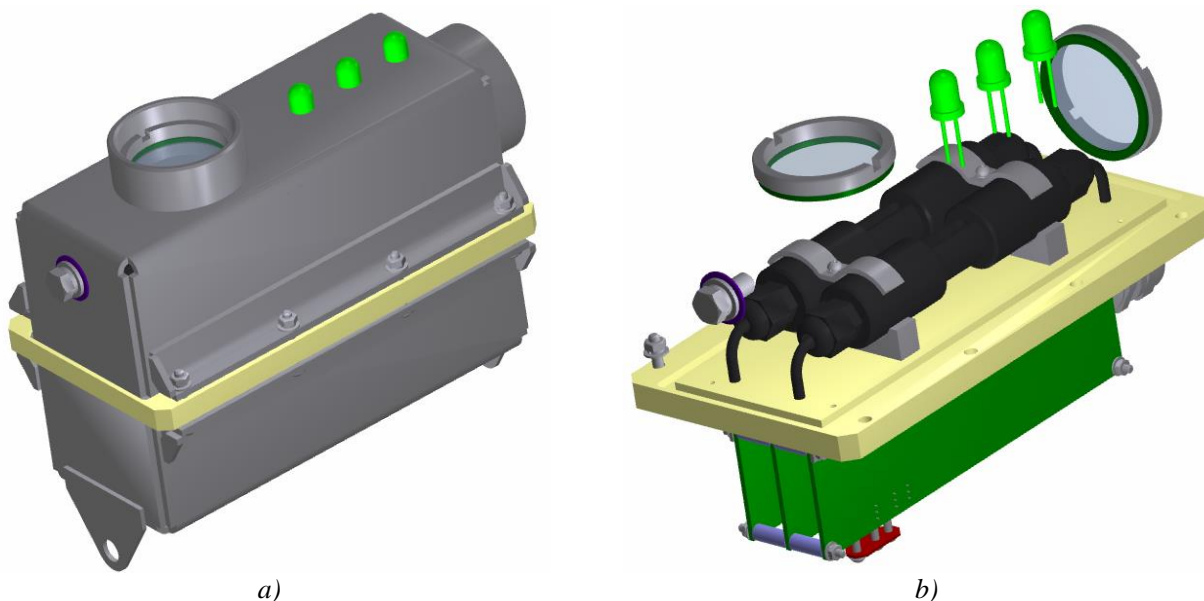
Okres zmiany w szczelinie dysku, $T$ , s	Częstotliwość obrotów dysku, $f=1/T$ , Hz	Czas trwania procesu przejścia przy ustalaniu napięcia wyjściowego, $t_{TR}$ , ms
2,00	0,50	59,0
1,00	1,00	55,4
0,67	1,49	54,1
0,50	2,00	53,3
0,40	2,50	53,0



Rys. 6. Zmiana czasu trwania procesu przejścia z częstotliwości obrotów dysku ( $f$ )

W rezultacie prędkość opracowanego miernika wynosi poniżej 0,06 s, gdy maksymalny dopuszczalny czas reakcji miernika metanu wynosi 0,8 s, co zostało zdefiniowane na podstawie normy [3].

Podczas projektowania optycznego miernika stężenia metanu o dużej prędkości opracowano model obudowy, której widok zewnętrzny przedstawiono na rys. 7a. Z kolei rys. 7b pokazuje projekt konstrukcji tej obudowy bez pokryw zabezpieczających.



Rys. 7. Widok zewnętrzny modelu obudowy miernika stężenia metanu (a) oraz projekt konstrukcji bez pokryw zabezpieczających (b)

Miernik składa się z dwóch sekcji: sekcji komponentów opto-elektronicznych i sekcji z przetwornikami elektronicznymi. Część elektroniczna połączona jest kablem telekomunikacyjnym z systemem ochrony powietrzno-gazowej kopalni. Na obudowie sekcji komponentów opto-elektronicznych znajdują się wskaźniki LED pokazujące jakościowe mapowanie pomiarów stężenia metanu. Miernik jest zainstalowany pod łukiem obudowy wyrobiska, pod wskaźnikami LED skierowanymi w dół.

Naturalna cyrkulacja powietrza zapewniona jest w całej konstrukcji poprzez sekcję opto-elektroniczną miernika. Pobór powietrza zlokalizowany jest po przeciwnej stronie miernika w stosunku do przepływu powietrza, aby zapobiec zatkanie miernika przez pył. Autorzy zaproponowali wykorzystanie tkaney siatki, z wielkością oczek około 0,04 x 0,03 mm, celem rozszerzenia przedziału powtórnej kalibracji oraz ulepszenia metrologicznej niezawodności miernika. Użycie siatki przy wlocie powietrza powoduje

zmniejszenia stopnia turbulencji powietrza, co może znacznie zmniejszyć zapylenie komponentów optycznych miernika. Zapyłone powietrze, po przejściu przez kanały optyczne, wydostaje się przez wylot umieszczony poniżej miernika i krąży w środowisku gazowym oraz kontroluje usuwanie resztek pyłu.

Wykonane badania potwierdzają możliwość zastosowania miernika do monitorowania stężenia metanu w atmosferze kopalnianej, w której stężenie pyłu wynosi około  $1 \text{ g/m}^3$ .

#### 4. WNIOSKI

Po opracowaniu i przetestowaniu miernika stężenia metanu w laboratorium Zakładów Petrowski („Petrovsky Coal Engineering Plant”) wyciągnięto następujące wnioski:

- charakterystyka konwersji miernika jest praktycznie liniowa w przedziale stężeń metanu od 0 do  $4,0^{\text{vol.}\%}$  oraz od 0 do  $97,0^{\text{vol.}\%}$ , czułość miernika w przedziale stężeń metanu od 0 do  $4,3^{\text{vol.}\%}$  wynosi  $0,128 \text{ V}^{\text{vol.}\%}$ , a w przedziale od 0 do  $97^{\text{vol.}\%}$  –  $0,159 \text{ V}^{\text{vol.}\%}$ ;
- skuteczność prędkości miernika wynosi poniżej 0,06 s z maksymalnym dopuszczalnym czasem reakcji mierników metanu około 0,8 s, co zostało zdefiniowane w normie [3]. Potwierdza to skuteczność metody w monitorowaniu stężenia metanu w kopalniach.

Zaproponowana metoda kompensacji multiplikatywnej zapylenia powietrza kopalnianego oraz jej implementacja sprzętowa sprawdzona została testami laboratoryjnymi, które udowodniły skuteczność opracowanej metody usuwającej składnik błędu warunkowanego obecnością pyłu węglowego w optycznym kanale pomiarowym.

Sformułowane wymagania techniczne miernika pomiaru stężenia metanu o dużej prędkości ukierunkowują dalszy rozwój urządzeń do pomiaru stężeń składników gazowych, który zakłada zaprojektowanie eksperymentalnego miernika do testowania w warunkach laboratoryjnych i kopalnianych. Planuje się realizację i wprowadzenie do użytku eksperymentalnych mierników do systemu ochrony gazowo-powietrznej.

#### Literatura

1. Vovna O.V., Zori A.A., Korenev V.D., Khlamov M.G.: *Metody i sredstva analiticheskogo izmerenija koncentracii gazovyh komponent i pyli v rudnichnoj atmosfere ugol'nyh shahit* [Analytical methods and tools of gas components and dust concentration measuring in the coal mine atmosphere], DonNTU, Donetsk 2012, Ukraine.
2. Vovna A., Zori A.A., Khlamov M.G.: *Metody i sredstva izmerenija koncentracii gazovyh komponent* [Methods and tools of gas components concentration measuring], LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken 2012, Germany.
3. Ukraine Ministry of Coal Industry: *24032:2009. Pribory shahtnye gazoanaliticheskie. Obshhie trebovanija, metody ispytanjia* [24032:2009 Mine gas analysis instruments. General requirements, test methods.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev 2009, Ukraine.
4. Vovna O.V., Zori A.A., Korenev V.D., Khlamov M.G. (State Institute of Higher Education „Donetsk National Technical University” under Ministry of Education and Science of Ukraine): *Sposib vimirjuvannja koncentracii metanu v rudnikovij atmosferi* [Method of methane concentration measuring in the mine atmosphere], State Register of Patents of Ukraine, Kiev 2009, UA, Pat. № 91795.
5. Vovna O.V., Zori A.A., Korenev V.D., Khlamov M.G. (State Institute of Higher Education „Donetsk National Technical University” under Ministry of Education and Science of Ukraine): *Pristrij dlja vimirjuvannja koncentracii metanu v rudnichnij atmosferi* [The device for methane concentration measuring in the mine atmosphere], State Register of Patents of Ukraine, Kiev 2009, UA, Pat. № 92564.
6. Vovna A.V., Zori A.A.: *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki. Vypusk «Kompjuternye i informacionnye tehnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii»*. „Development and research experimental samples of the methane concentration meter for coal mines”, 2013, vol. 4, no. 153, pp. 171-177.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.