

Urządzenie do pomiaru prędkości przepływu powietrza i stężenia metanu w wyrobisku kopalni

JANUSZ KRUCZKOWSKI, PIOTR OSTROGÓRSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W Instytucie Mechaniki Górotworu prowadzone są badania rozkładów pól prędkości powietrza i stężeń metanu w wyrobiskach kopalń głębinowych przy pomocy nowo skonstruowanych mierników (Kruczkowski, 2013; Dziurzyński i in., 2012). Jednym z efektów prac jest stwierdzenie dużej uniwersalności i przydatności tych urządzeń do celów metrologicznych. Dotychczas były one wykorzystywane w systemach pomiarów wielopunktowych, co nie pozwalało na bezpośredni odczyt mierzonych wielkości, gdyż z powodu przeznaczenia wyłącznie do celów badawczo-naukowych, dane pomiarowe były gromadzone w pamięci i dopiero na powierzchni, po transmisji do komputera, można było poddawać je analizie. Dzięki stosowaniu bezprzewodowej transmisji radiowej dane dodatkowo były dostępne w czasie rzeczywistym, lecz wiązało się to z koniecznością wykorzystania przenośnego komputera z modulem radiowym instalowanym na porcie USB. To stanowiło ograniczenie w wykorzystaniu miernika w niektórych eksperymentach badawczych a także do rutynowych pomiarów wykonywanych przez służby wentylacyjne. W artykule przedstawiono rozwiązania techniczne przenośnego urządzenia do *współczesnego, quasi punkowego* pomiaru stężenia metanu i prędkości przepływu powietrza w wyrobisku górniczym. Urządzenie zostało zaprojektowane z myślą o wykorzystaniu w podziemnych zakładach górniczych i spełnia wymagania odpowiednich norm i przepisów. W skład urządzenia wchodzi miernik zawierający czujniki stężenia metanu i prędkości przepływu oraz rejestrator umożliwiający wyświetlanie, analizę i zapamiętywanie danych pomiarowych. Komunikacja pomiędzy miernikiem i rejestratorem odbywa się drogą radiową. Nowe urządzenie pozwala na wykonywanie pomiarów punktowych i pomiarów metodą trawersu ciągłego. Przewiduje się, po opracowaniu odpowiednich procedur pomiarowych, wykorzystanie nowego urządzenia do wyznaczania strumienia objętości metanu. Ze względu na konieczność częstej weryfikacji metrologicznej czujnika metanu zaprojektowano dodatkowe urządzenie umożliwiające przeprowadzanie procedury adjustacyjnej. Zostały przeprowadzone pomiary *in situ* i w opracowaniu zamieszczono przykładowe rejestracje zmierzonych wielkości.

Słowa kluczowe: prędkość powietrza, stężenie metanu, metanoanemometr, wentylacja kopalń, czujnik metanu, anemometr

1. Wprowadzenie

Prędkość powietrza i stężenie metanu w wyrobisku kopalni należą do podstawowych wielkości fizycznych, których znajomość jest niezbędna do prawidłowego i bezpiecznego przewietrzania wyrobisk. Dotychczas, pomiary tych wielkości były wykonywane przy pomocy mierników ręcznych lub stacjonarnych w sposób od siebie niezależny. W wyniku prowadzonych w ostatnim czasie w Instytucie Mechaniki Górotworu eksperymentalnych badań rozkładów pól prędkości i stężeń metanu (Krawczyk i Kruczkowski, 2011; Kruczkowski, 2013), powstała koncepcja zbudowania ręcznego miernika wykonującego synchroniczny pomiar obu wielkości. Uzasadnieniem dla podjęcia takich prac było dążenie do uproszczenia pomiarów oraz zmniejszenie wpływu na niepewność pomiaru – zaobserwowanych w trakcie badań – zmian profili rozkładów prędkości i stężenia metanu w przekroju poprzecznym wyrobiska. Stosowana dotychczas standardowa metodyka charakteryzowała się rozdzieleniem pomiarów obu wielkości w czasie i przestrzeni. W oparciu o doświadczenia zdobyte podczas wykorzystywania systemów pomiarów wielopunktowych zaproponowano nowe rozwiązanie urządzenia pomiarowego (Janus i in., 2013), które zostało następnie zrealizowane

w postaci przedstawionej w niniejszym opracowaniu. Przyjęto założenie, że nowe urządzenie pomiarowe powinno umożliwiać zmierzenie prędkości i stężenia metanu w dowolnie wybranym punkcie wyrobiska, a dane o wyniku pomiaru powinny być bezpośrednio dostępne dla operatora na wyświetlaczu urządzenia. Założenie to rzutuje na rozwiązanie konstrukcyjne przyrządu, który składa się z dwóch oddzielnych elementów. Jednym z nich jest miernik z wbudowanymi czujnikami stężenia i prędkości, a drugim rejestrator wyposażony w klawiaturę i ekran. Oba elementy komunikują się ze sobą drogą radiową. Rozwiązanie umożliwia wykonywanie pomiarów np. pod stropem wysokiego wyrobiska i bezpośrednią obserwację wyników. Taki pomiar będzie wymagał użycia wysięgnika. W przyszłości dane pomiarowe, dzięki odpowiednim algorytmom zaimplementowanym w programie obsługi urządzenia powinny służyć do wyznaczania innych wielkości np. strumienia objętości powietrza lub strumienia objętości metanu. W obu tych przypadkach niezbędne będzie wprowadzenie trzeciej wielkości jaką jest pole przekroju wyrobiska. Dla nowego urządzenia pomiarowego zaproponowano nazwę *metanoanemometr*.

2. Rozwiązania konstrukcyjne i funkcjonalne urządzenia

Idea ręcznego, synchronicznego pomiaru stężenia metanu i prędkości przepływu powietrza przez wyrobisko kopalni polega na umożliwieniu wykonania pomiarów punktowych lub pomiarów rozłożonych przestrzennie na polu przekroju poprzecznego wyrobiska. Pierwszy sposób polega na umieszczeniu w wybranym punkcie pomiarowym miernika i wykonaniu pomiaru. W drugim przypadku miernik przesuwany jest w ściśle określony sposób w płaszczyźnie przekroju i wykonuje pomiary w ustalonych odstępach czasowych. Takie pomiary wymagają fizycznego rozdzielenia układu mierzącego od układu odczytowego, aby umożliwić operatorowi bieżący odczyt mierzonych wielkości. Uzyskane dane pomiarowe powinny być składowane w pamięci urządzenia.

Na rys. 1 pokazano miernik urządzenia. Anemometryczny czujnik skrzydełkowy (2) zintegrowany jest z czujnikiem stężenia metanu znajdującym się w osłonie (1) umocowanej w górnej części osłony skrzydełka. Komora wlotowa czujnika metanu skierowana jest do wnętrza czujnika anemometrycznego. Wewnątrz obudowy (3) będącej jednocześnie rękojeścią, umieszczono układ elektroniczny wraz z modułem radiowym i anteną oraz zespół akumulatorów. Spód rękojeści ma wbudowany wyłącznik z sygnalizatorem optycznym typu LED oraz gniazdo pozwalające na podłączenie portu USB lub zasilacza do ładowania akumulatorów. Czujnik anemometryczny wykonany jest ze stali kwasoodpornych, pozostałe elementy z tworzyw typu Ertacetal.

Podstawowe parametry metrologiczne urządzenia są następujące:

1. Czujnik prędkości:

Zakres pomiarowy prędkości przepływu: $\pm (0,2 \div 20 \text{ m/s})$

Błąd pomiaru prędkości przepływu: $\pm (0,5\% \text{ rdg}^1 + 0,02 \text{ m/s})$

Rozdzielczość pomiaru prędkości: $0,01 \text{ m/s}$

2. Czujnik stężenia:

Zakres pomiarowy stężenia metanu: $0 \div 100\% \text{ V/V}^2$

Podzakresy pomiaru stężenia metanu: $0 \div 100\% \text{ DGW}^3$, $5 \div 100\% \text{ V/V}$

Błąd pomiaru stężeń metanu: $0,1\%$ dla zakresu $0 \div 2\% \text{ V/V}$

5% wskazań dla zakresu $2 \div 5\% \text{ V/V}$

3% dla zakresu $5 \div 60\% \text{ V/V}$

5% wskazań dla zakresu $60 \div 100\% \text{ V/V}$

Rozdzielczość pomiaru: $0,01\%$ dla zakresu $0 \div 100\% \text{ DGW}$

$0,1\% \text{ V/V}$ dla zakresu $5 \div 100\% \text{ V/V}$

Użyte skróty oznaczają:

¹ rdg – wartość odczytywana (reading)

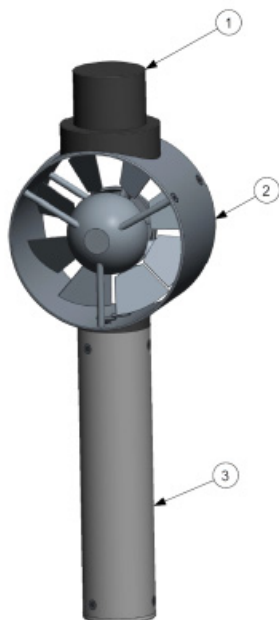
² V/V – procentowe stężenie objętościowe (volume/volume)

³ DGW – dolna granica wybuchowości (Lower Explosive Limit, LEL).

Należy zauważyć, że przedstawione parametry pozwalają zaliczyć miernik do przemysłowych urządzeń pomiarowych o bardzo wysokiej dokładności. Częstotliwość wykonywania pomiarów wynosi 1 Hz.

Rejestrator pokazany jest na rys. 2. Do jego budowy wykorzystano obudowę produkcji firmy Odenwälder Kunststoffwerke Gehäusesysteme GmbH o wysokim stopniu ochronnym IP65, dodatkowo zabezpieczoną

elastomerowym protektorem. W górnej części obudowy znajduje się gniazdo do podłączenia portu USB lub ładowania akumulatora. Wewnątrz obudowy znajduje się układ elektroniczny wyposażony w bardzo jasny wyświetlacz graficzny. Siedmio przyciskowa klawiatura, w której przyciski oznaczone są wyłącznie symbolami, pozwala operatorowi na łatwą, intuicyjną komunikację z urządzeniem.



Rys. 1. Miernik stężenia metanu i prędkości przepływu
1 – osłona czujnika stężenia metanu, 2 – skrzydełkowy czujnik anemometryczny, 3 – osłona układu elektronicznego

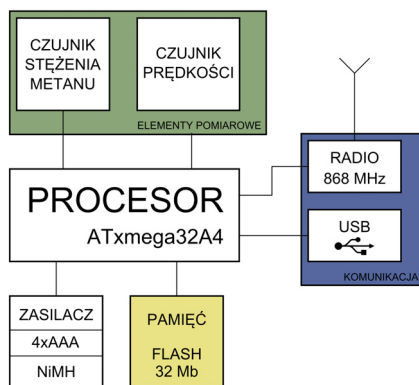


Rys. 2. Widok rejestratora urządzenia do pomiaru stężenia metanu i prędkości przepływu

Oprogramowanie rejestratora pozwala na przedstawianie wyników pomiarów w postaci wartości chwilowych oraz daje możliwość uśredniania wyników pomiarów w ustalonych przez operatora przedziałach czasowych. Jeden z modułów oprogramowania odpowiada za wykonywanie procedury adjustacyjnej czujników. W przypadku czujnika anemometrycznego procedura ta może być wykonywana wyłącznie w laboratorium wzorcującym Instytutu Mechaniki Górniczej. Adjustacja czujnika metanu może odbywać się w zakładzie górniczym, w tym przypadku wymagane jest posługiwanie się specjalnym urządzeniem do adjustacji które zostało zaprojektowane do tego celu i omówione w dalszej części artykułu. Istnieje również możliwość przesyłania danych w czasie rzeczywistym, a także diagnozowania usterek i modyfikowania oprogramowania przez sieć internetową.

3. Opis układu elektronicznego miernika stężenia metanu i prędkości przepływu

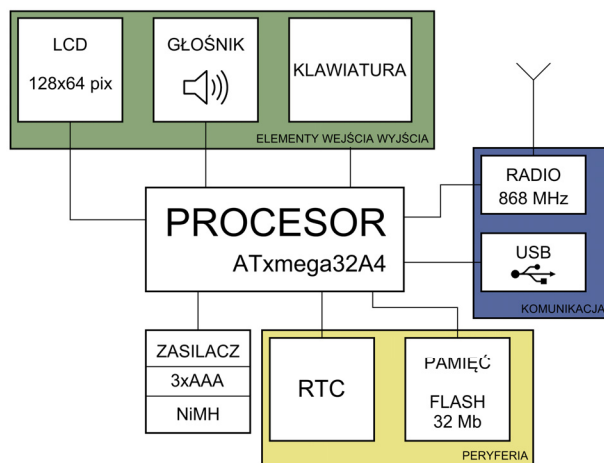
Układ elektroniczny miernika, którego schemat blokowy pokazano na rys. 3 zbudowano w oparciu o procesor ATxmega32A4. Elementem służącym do komunikacji bezprzewodowej jest zintegrowany moduł radiowy pracujący w paśmie przeznaczonym dla urządzeń bliskiego zasięgu SRD o częstotliwości 868 MHz. Do komunikacji przewodowej wykorzystywany jest interfejs w standardzie USB 2. Czujnikiem prędkości jest anemometr skrzydełkowy z indukcyjnym detektorem prędkości obrotowej skrzydełka. Zastosowano podwójny układ czujników indukcyjnych, odpowiednio ułożonych względem siebie w celu wykrywania kierunku obrotów, co pozwala na określenie zwrotu przepływu. Pomiar stężenia metanu wykonywany jest przy pomocy czujnika pellistorowego o zakresie do 100% V/V. Czujnik w zakresie do 5% V/V wykorzystuje katalityczną metodę pomiaru, a powyżej tego zakresu metodę konduktometryczną. Dane pomiarowe gromadzone są w pamięci typu FLASH o pojemności 32 Mbit. Miernik zasilany jest z akumulatorów NiMH 4×AAA i posiada wbudowany układ stałoprądowego ładowania nadzorowany przez procesor.



Rys. 3. Schemat blokowy układu elektronicznego miernika stężenia metanu i prędkości przepływu

4. Opis układu elektronicznego rejestratora

Układ elektroniczny rejestratora podobnie jak układ miernika funkcjonuje w oparciu o procesor ATxmega32A4. Ideę działania układu pokazano na schemacie blokowym przedstawionym na rys. 4. Elementem służącym do komunikacji bezprzewodowej jest zintegrowany moduł radiowy pracujący w paśmie przeznaczonym dla urządzeń bliskiego zasięgu o częstotliwości 868 MHz. Do komunikacji przewodowej wykorzystywany jest standard USB 2. Miernik posiada zintegrowany zegar czasu rzeczywistego o dokładności ± 2 ppm. Komunikacja z operatorem odbywa się przy pomocy klawiatury. Zaprojektowano układ klawiszy pozwalający na intuicyjne poruszanie się po menu rejestratora pokazywanym na wyświetlaczu graficznym o rozdzielczości 128×64 pix. Cechą charakterystyczną wyświetlacza jest bardzo jasne podświetlenie i duży kontrast pozwalające na łatwy odczyt w trudnych warunkach oświetleniowych. Dane pomiarowe gromadzone są w pamięci typu FLASH o pojemności 32 Mbit. Miernik zasilany jest z akumulatorów NiMH 3×AAA i posiada wbudowany układ stałoprądowego ładowania nadzorowany przez procesor. Jako dodatkowy element do komunikacji z operatorem zastosowano sygnalizator dźwiękowy.

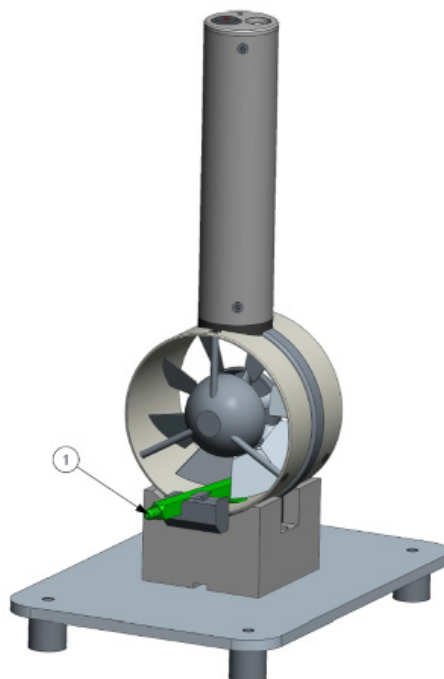


Rys. 4. Schemat blokowy układu elektronicznego rejestratora

5. Adjustacja czujnika stężenia metanu

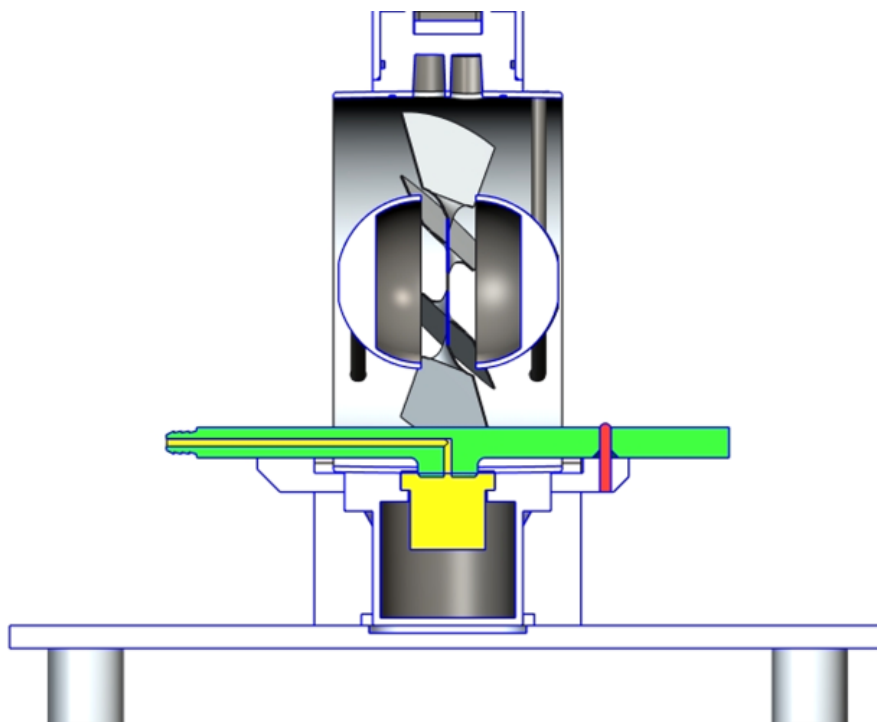
Zarówno czujnik stężenia metanu jak i czujnik prędkości powietrza podlegają okresowym procedurom adjustacji i wzorcowania (Dziurzyński i in., 2013). Wzorcowania i adjustacji czujnika anemometrycznego nie da się przeprowadzić na terenie kopalni, która nie jest wyposażona w odpowiednie stanowiska metrologiczne. Z tego powodu anemometry powinny być przekazywane do uprawnionych instytucji wzorcujących. W przypadku czujników metanu wymagane jest sprawdzanie poprawności metrologicznej w krótkich odstępach czasowych, a nawet przed każdym użyciem. Zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganiami produ-

centów czujniki metanu są systematycznie sprawdzane i w razie potrzeby adjustowane przez odpowiednie służby kopalniane. Każdy z producentów powinien wraz z metanomierzem dostarczyć niezbędne do tego celu wyposażenie dodatkowe. Miernik metanoanemomeru ze względu na swoją specyficzną konstrukcję charakteryzującą się brakiem bezpośredniego dostępu do czujnika metanu, wymaga użycia specjalnego stanowiska do przeprowadzenia sprawdzenia metrologicznego i adjustacji. W celu przeprowadzenia adjustacji miernik mocowany jest w urządzeniu przedstawionym na rysunku 5, umożliwiającym doprowadzenie do czujnika metanu mieszanki wzorcowej.



Rys. 5. Urządzenie do adjustacji czujnika stężenia metanu

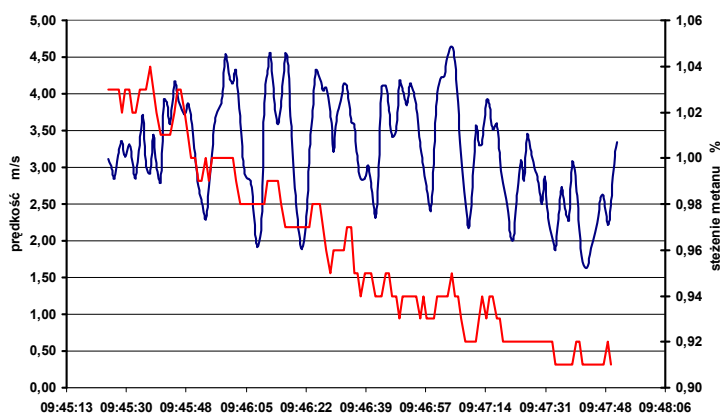
Do zadawania gazu wzorcowego służy specjalna sonda (1), która dzięki odpowiedniej konstrukcji doprowadza mieszankę bezpośrednio do komory pomiarowej. Konstrukcję sondy pokazano na rysunku 6. Element ustalający ogranicza ilość stopni swobody, tak aby wykluczyć możliwość błędnego zamocowania przyrządu. Wprowadzanie sondy pomiędzy łopatki skrzydełka jest kontrolowane mechanicznie i nie istnieje możliwość uszkodzenia czujnika anemometrycznego. Pobrana z butli mieszanka wzorcowa przepływa kolejno przez regulator ciśnienia, regulator przepływu i zawór odcinający. W oprogramowaniu rejestratora zawarty jest moduł z zaimplementowaną procedurą adjustacji podaną przez producenta czujnika metanu. Użytkownik jest prowadzony przez kolejne etapy procedury dzięki instrukcjom wyświetlanym na ekranie. W przyszłości przewiduje się pełne zautomatyzowanie procesu adjustacji czujnika metanu, włącznie z możliwością komunikacji z urządzeniami diagnostycznymi producenta przy wykorzystaniu sieci internetowej. Rozpoczęto również prace nad zmianą konstrukcji urządzenia tak, aby można było przeprowadzać również procedury sprawdzania metrologicznego czujnika prędkości. Należy jednak podkreślić, że wzorcowanie czujnika prędkości powinno odbywać się wyłącznie w akredytowanych instytucjach posiadających udokumentowaną spójność pomiarową z wzorcami wyższych rzędów. W przypadku wykonywania wzorcowania czujnika metanu przez upoważnione służby kopalniane, niezbędne jest postępowanie ściśle według procedur i korzystanie wyłącznie z mieszanek pochodzących z instytucji akredytowanych zapewniających żadaną niepewność ich wykonania.



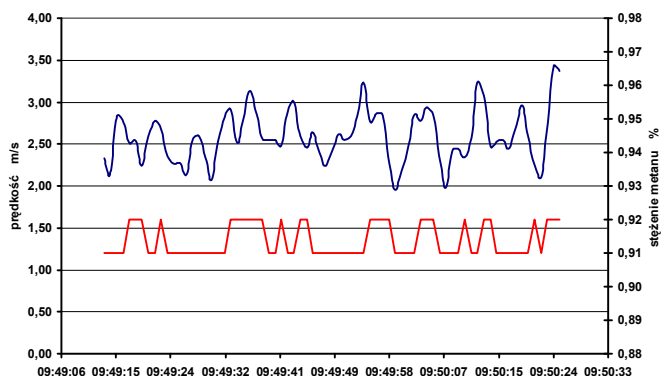
Rys. 6. Sposób doprowadzenia mieszaniny wzorcowej do komory pomiarowej miernika stężenia metanu

6. Przykładowe wyniki pomiarów

Na rysunkach 7 i 8 pokazano przykładowe wyniki rejestracji wykonanych na wylocie chodnika nadścianowego prowadzonego w obudowie typu ŁP9/V32. Pole powierzchni przekroju wynosiło $9,5 \text{ m}^2$. Rysunek 7 pokazuje dane uzyskane podczas trawersu ciągłego na polu przekroju trwającego około 2,5 minut. Pomiary były wykonywane w warunkach przepływu stacjonarnego. Zarejestrowane zmiany prędkości wynikają z istnienia określonego rozkładu pola prędkości. Zmiany stężenia metanu mogą również wynikać z istnienia pewnego rozkładu tej wielkości w przekroju poprzecznym. Na rysunku 8 widoczne są dane z około 1 minutowej rejestracji punktowej. W tym przypadku za zmiany prędkości odpowiadają fluktuacje lokalne. Można przyjąć, że stężenie metanu jest stałe a jego zmiany wynikają jedynie z rozdzielczości czujnika. Stałość lokalnego stężenia potwierdzałaby wysuniętą wyżej hipotezę o istnieniu, podobnie jak pola rozkładu prędkości, pewnego pola rozkładu stężenia metanu. Występowanie pól prędkości i stężenia metanu o różnych rozkładach jest istotne w aspekcie poszukiwania lepszej metody wyznaczania strumienia objętości metanu niż metoda oparta o pomiary punktowe obu wielkości.



Rys. 7. Rejestracja rozkładu prędkości powietrza i stężenia metanu w przekroju wyrobiska.
Metoda pomiaru – trawers ciągły pionowy



Rys. 8. Rejestracja prędkości powietrza i stężenia metanu w przekroju wyrobiska. Pomiar punktowy

7. Podsumowanie

Przedstawione w artykule ręczne urządzenie pomiarowe jest nowym i unikalnym rozwiązaniem nie znajdującym odpowiednika w literaturze dotyczącej metrologii wentylacji kopalń. Po raz pierwszy zastosowano połączenie anemometrycznego czujnika skrzydełkowego i pellistorowego czujnika metanu w układzie pozwalającym na pomiary quasi punktowe. Geneza urządzenia wywodzi się z prowadzonych wcześniej badań naukowych nad rozkładami pól stężeń metanu i prędkości przepływu w wyrobiskach górniczych. Wtedy po raz pierwszy zastosowano tego typu mierniki, nie dające jednak możliwości bardziej wszechstronnego i uniwersalnego wykorzystania. Zbudowanie ręcznego urządzenia pozwoli na jego wykorzystanie do rutynowych pomiarów wykonywanych przez służby wentylacyjne kopalń. Miernik stężenia metanu i prędkości przepływu nie tylko eliminuje w znacznym stopniu konieczność stosowania dwóch różnych urządzeń, ale przede wszystkim pozwoli na wykonywanie pomiarów strumienia objętości metanu. Ten cel będzie wymagał zdefiniowania odpowiednich procedur pomiarowych. W związku z tym konieczne będzie wykonanie szeregu eksperymentów porównawczych z użyciem wielopunktowych systemów badania rozkładów pól stężeń i prędkości, a także przeprowadzenie badań dynamiki obu czujników. Istotnym elementem urządzenia byłby system określający jego geometryczne położenia w przestrzeni. Rozwiązanie tego zagadnienia pod kątem uzyskania informacji o polu przekroju wyrobiska wydaje się być możliwe w nieodległej przyszłości np. w oparciu o układy akcelerometryczne.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Dziurzyński W., Kruczkowski J., Wasilewski S., 2012. *Nowoczesna metoda badania przepływu powietrza i metanu w wyrobisku kopalni*. Nowe spojrzenie na wybrane zagrożenia naturalne w kopalniach. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.
- Dziurzyński W., Wasilewski St., Skotniczny P., Jamróz P., Kruczkowski J., 2013. *Zasady nadzoru nad wentylacyjnymi przyrządami pomiarowymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN. Rozprawy, Monografie. Nr 10.
- Janus J., Krawczyk J., Kruczkowski J., 2013. *Nowe rozwiązania urządzeń do pomiaru pól prędkości i rozkładów stężenia metanu oraz wyniki badań porównawczych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN.
- Krawczyk J., Kruczkowski J., 2011. *Pomiary rozkładów pól prędkości w wyrobiskach kopalnianych*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko.
- Kruczkowski J., 2013. *Wyznaczanie metanowości wentylacyjnej przy pomocy nowej techniki pomiarowej*. Materiały 7 Szkoły Aerologii Górniczej. Politechnika Śląska. Wydział Górnictwa i Geologii. Instytut Eksploatacji Złóż. Gliwice
- Kruczkowski J., 2013. *Rozkłady stężeń metanu w wyrobiskach przyścianowych*. Zagrożenia aerologiczne w kopalniach węgla kamiennego – profilaktyka, zwalczanie, modelowanie, monitoring. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.

Device for measuring flow velocity of air and methane concentration in mines

Abstract

Research work was undertaken in the Strata Mechanics Research Institute to investigate the distribution of air flow velocity and methane concentration in underground mines using a new-design integrated sensors measuring those two parameters. The devices are proved to be universal and fit for use in a variety of metrological applications. To date they have been mostly used in multi-point measurements, yet the direct readout of the measured quantities is not possible. Since the device has been intended for the purpose of research only, the measurement data have to be stored in the computer memory, uploaded to the computer on the surface and then analysed and processed accordingly. Due to the application of wire-less radio transmission, the data have been accessible on-line, though a portable computer equipped with a specialised radio module installed in the USB port would be required. This has been a major limitation of the device so far, precluding its widespread use in routine measurements by the mine ventilation personnel. The paper outlines the design solution of a portable device for simultaneous, quasi-point-by-point measurements of methane concentration and airflow velocity in a mine heading. This device is designed for use in underground mines and fully complies with all relevant rules and regulations. The device incorporates a methane concentration sensor, a flow velocity sensor and a recorder enabling the display, processing and storage of measurement data. The radio transmission is used to transfer data between the sensor and the recorder. The device enables the point-to-point measurements and those taken by the continuous traverse method. It is expected that once the measurement procedures are ready, the new device will be used to determine the volumetric flow rate of methane. Since the methane sensors are subject to regular verification of their metrological parameters, an additional device was designed to support the adjustment procedures. Exemplary results of in-situ measurements have been shown.

Keywords: air flow velocity, methane concentration, methane flow meter, mine ventilation, methane detector, anemometer