

# Analiza danych pomiarowych uzyskanych z anemometrycznych czujników stacjonarnych i przenośnych

JANUSZ KRUCZKOWSKI

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*  
e-mail: [kruczkow@img-pan.krakow.pl](mailto:kruczkow@img-pan.krakow.pl)

## Streszczenie

W wyrobiskach kopalni głębinowej do pomiaru wielkości strumienia objętości powietrza stosowane są stacjonarne czujniki anemometryczne. Wyznaczanie uśrednionego w czasie strumienia objętości przepływającego przez płaszczyznę przekroju poprzecznego wyrobiska, przy pomocy miejscowego pomiaru prędkości, prowadzi do błędów. Jednym z nielicznych sposobów wykonania przybliżonego całkowania prędkości po płaszczyźnie przekroju wyrobiska jest metoda trawersu anemometrem przenośnym. Porównanie wyników pomiarów pozwala na oszacowanie wielkości błędów dla czujnika stacjonarnego. Przedstawione w artykule dane pomiarowe uzyskano stosując po raz pierwszy nowy, przenośny czujnik anemometryczny typu  $\mu$ AS4 wyposażony w pamięć i zegar czasu rzeczywistego. Ponieważ współczesne systemy stacjonarnego monitoringu kopalnianej sieci wentylacyjnej pozwalają na gromadzenie wyników pomiarów wraz z rejestracją czasu ich wykonania, możliwe było porównanie obu pomiarów. Badania zostały wykonane w różnych wyrobiskach. W jednym z omawianych przypadków anemometr stacjonarny znajdował się w pobliżu odrzwi tamy bezpieczeństwa, co pozwoliło na porównanie jego wskazań jako miernika strumienia z pomiarami strumienia objętości wykonanymi anemometrem ręcznym. W drugim przypadku porównano dane pomiarowe z wynikami uzyskanymi za pomocą wielopunktowej matrycy czujników. Wyniki przeprowadzonych badań posłużą do walidacji danych pomiarowych uzyskiwanych przez stacjonarne czujniki anemometryczne w systemach monitoringu atmosfery kopalnianej.

**Słowa kluczowe:** aerologia górnicza, pomiary strumienia objętości, anemometr, wentylacja kopalń

## 1. Wprowadzenie

Wyznaczenie jednego z najbardziej istotnych parametrów sieci wentylacyjnej jakim jest uśredniony w czasie strumień objętości powietrza, wymaga całkowania po płaszczyźnie przekroju przewodu wentylacyjnego (w przypadku kopalni jest nim najczęściej chodnik) uśrednionego w czasie rzutu wektora prędkości na normalną do przekroju. W praktyce kopalnianych pomiarów wentylacyjnych do pomiarów wartości średniej prędkości miejscowej stosuje się ręczne anemometry skrzydełkowe, zakładając, że dominującą składową prędkości jest składowa wektora równoległa do osi wyrobiska i pomijając nieliniowe własności dynamiczne czujnika skrzydełkowego. Z kolei całkowanie po płaszczyźnie realizowane jest poprzez przesuwanie anemometru ruchem jednostajnym, najczęściej wzdłuż pionowych, równo od siebie oddalonych trajektorii. Procedura ta nazywa się trawersowaniem i może być wykonywana również wzdłuż trajektorii poziomych. Przyjmuje się, że w wyniku tak przeprowadzonego pomiaru otrzymujemy uśrednioną wartość prędkości w przekroju. Zmierzona prędkość obciążona jest błędami wynikającymi z odchylen lokalnych wektorów prędkości od normalnych do płaszczyzny przekroju, nieuwzględnienia własności dynamicznych czujnika, braku możliwości zapewnienia przesuwania anemometru ruchem jednostajnym, braku możliwości zapewnienia jednoczesnego całkowania całej powierzchni przekroju, a także błędami spowodowanymi obecnością w bezpośrednim sąsiedztwie anemometru operatora. Metoda pomiaru ręcznym anemometrem skrzydełkowym jest jednak – jak dotychczas – jedynym, stosowanym w ruchu sposobem pozwalającym na wyznaczenie strumienia objętości. Oczywiście niezbędna jest jeszcze znajomość pola przekroju, ale

problemy związane z jego wyznaczeniem były omawiane przez innych autorów (Michalunio A., Krach A., Trutwin W., 2006; Trutwin W., 2004) i nie będą rozważane w tym artykule.

Pomiary prowadzone przy użyciu anemometrów ręcznych dostarczają informacji o mierzonej wielkości jedynie w czasie ich wykonywania. Dla zapewnienia prawidłowego procesu wentylowania wyrobisk niezbędny jest ciągły monitoring strumieni objętości w wybranych rejonach kopalni. Przepływ powietrza przez sieć wentylacyjną kopalni, rozważany w dłuższym okresie czasowym, nie jest procesem stacjonarnym. Wielkość strumieni objętości w poszczególnych wyrobiskach może ulegać zmianom na skutek regulacji kontrolowanych, wynikających z potrzeb procesów technologicznych i bezpieczeństwa załogi, a także w przypadkach zdarzeń katastroficznych. Ciągły monitoring strumienia objętości jest realizowany w oparciu o dane z czujników anemometrycznych na stałe zainstalowanych w wyrobiskach. Ponieważ czujniki te mogą mierzyć wyłącznie prędkość lokalną w punkcie ich umieszczenia, niezbędna jest znajomość wartości średniej prędkości w przekroju, w którego płaszczyźnie umieszczono czujnik stacjonarny. Taką informację można uzyskać wyłącznie dzięki pomiarom wykonanym anemometrem ręcznym. Na podstawie tych pomiarów powinno się wprowadzać współczynnik korygujący wskazania anemometru stacjonarnego. Zastosowanie takiego współczynnika jest jednak uzasadnione jedynie w przypadku zachowania stałego w czasie kształtu profilu prędkości w miejscu zainstalowania anemometru stacjonarnego. Tymczasem badania pokazują, że w stanach przejściowych przewietrzania profil ulega zmianom, i może odbiegać od początkowego po ustaleniu się przepływu (Krawczyk J., Kruczkowski J., 2004). Innym, do tej pory nie rozważanym czynnikiem wpływającym na błąd pomiaru anemometrami stacjonarnymi, są różnice w ich wskazaniach zależne od typu anemometru i wynikające z różniących się od siebie zasad działania. W przepływach turbulentnych, z jakimi mamy do czynienia w wyrobiskach kopalni, umieszczone w tym samym punkcie pomiarowym anemometry różnych typów będą pokazywać różne wyniki pomiarów, w zależności od intensywności turbulencji (Chmiel W., Kruczkowski J., 2005).

Brak szczegółowo zdefiniowanych procedur, pozwalających na wzorcowanie anemometrów stacjonarnych w miejscu zamontowania jako mierników strumienia objętości powoduje, że służby wentylacyjne kopalń mają problemy z interpretacją ich wskazań. Ponadto stacjonarne czujniki anemometryczne, co wynika z przepisów, najczęściej umieszczane są w rejonie ścian. W zdecydowanej większości pozostałych wyrobisk dokonuje się standardowych pomiarów strumienia objętości przy pomocy ręcznych anemometrów skrzydełkowych. Często na podstawie tych pomiarów i po wykonaniu bilansu rozplywu powietrza w sieci, koryguje się wskazania stacjonarnego czujnika przepływu w myśl prostej zasady „aby pasowało”.

Pomimo, że od dawna zajmowano się problematyką wyznaczania strumienia objętości w wyrobisku kopalni przy wykorzystaniu czujnika stacjonarnego (Dziurzyński W., 1996; Wasilewski St., 1996), problem ten do dnia dzisiejszego nie został rozwiązany i stanowi jeden z najtrudniejszych tematów w metrologii wentylacji kopalń. W niniejszej pracy postanowiono zająć się nim ponownie, dzięki nowym możliwościom wynikającym z udoskonaleniem już istniejących, lub opracowania całkiem nowych urządzeń pomiarowych. W ostatnim czasie w IMG PAN skonstruowano mierniki pozwalające na znacznie dokładniejsze niż dotychczas zbadanie rozkładu prędkości w płaszczyźnie zamontowania czujnika stacjonarnego. Zwiększenie częstotliwości pomiarów, wprowadzenie synchronizacji czasowej pomiędzy pomiarami z różnych czujników, a także wyposażenie ich w pamięci o bardzo dużych pojemnościach i zastosowanie nowych sposobów przemieszczania w płaszczyźnie pomiarowej, umożliwiło uzyskanie i zarejestrowanie danych pomiarowych obciążonych mniejszą niepewnością niż uzyskiwane wcześniej. Do badań rozkładu prędkości został wykorzystany anemometr skrzydełkowy typu  $\mu$ AS4. W opracowaniu wykorzystano również wynik pomiaru uzyskany przy pomocy bezprzewodowego systemu wielopunktowego pomiaru rozkładu prędkości powietrza w wyrobisku górniczym, skonstruowanego w ramach projektu badawczego nr 5T12A 037 25.

Otrzymane wyniki zostały porównane z danymi pochodzącymi z zapisów w dokumentacji służb kopalnianych. Różnice jakie można zaobserwować powinny być według autora niniejszego opracowania wyłącznie przedmiotem dyskusji merytorycznej.

## 2. Anemometr $\mu$ AS4. Nowe rozwiązania konstrukcyjne

Anemometr  $\mu$ AS4 (fot. 1) jest nowym przyrządem opracowanym w Pracowni Wentylacji Kopalń IMG PAN. Nowo zaprojektowany układ elektroniczny pozwolił na istotne zwiększenie funkcjonalności przyrządu w stosunku do poprzednich modeli ( $\mu$ AS3).

Menu przyrządu zostało zaprogramowane z myślą o wykonywaniu pomiarów w systemach wentylacyjnych kopalni głębinowej. Użytkownik ma możliwość wyboru pomiędzy pomiarami prędkości lub strumienia objętości. W przypadku pomiarów strumienia objętości wprowadzana jest wartość przekroju wyrobiska. Można podawać ją bezpośrednio, lub jest ona obliczana dla przekrojów prostokątnych po wprowadzeniu parametrów geometrycznych przekroju. Ze względu na swoje zasadnicze przeznaczenie przyrząd ma wbudowaną opcję programową MINING EXCAVATION (Wyrobisko Górnicze). Po jej uaktywnieniu oraz podaniu szerokości i wysokości wyrobiska, anemometr automatycznie wprowadza do iloczynu współczynnik 0,8, co odpowiada rutynowemu sposobowi obliczania pola przekroju wyrobiska górniczego w obudowie łukowej typu ŁP, z dokładnością wystarczającą dla pomiarów ruchowych. Pomiary mogą być wykonywane w różnych jednostkach, a także istnieje możliwość przeliczania jednostek już po wykonaniu pomiarów.



Fot. 1. Anemometr skrzydełkowy  $\mu$ AS4. Głowica przegubowa wysięgnika

Anemometr charakteryzują bardzo dobre parametry metrologiczne, w tym zredukowany błąd pomiaru nie większy niż 0,5% dla zakresu 0,2-20 m/s, przy rozdzielczości pomiaru wynoszącej 0,01 m/s. Przyrząd mierzy i wyświetla wyniki pomiarów wartości chwilowej prędkości z częstotliwością 1 Hz. Tryb uśredniania pozwala na obliczenie wartości średniej arytmetycznej z ciągu pomiarów wykonywanych w okresie czasu do 1,5 h.

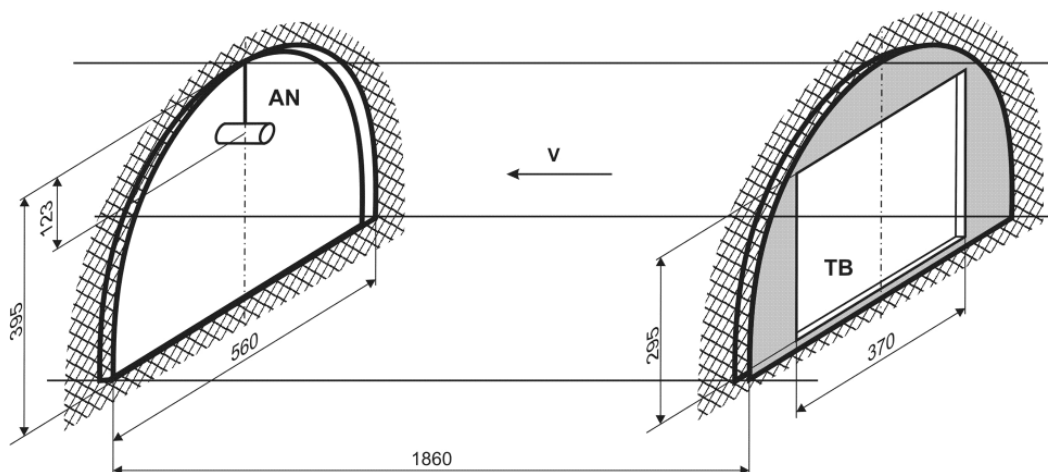
Funkcją szczególnie przydatną do prowadzenia badań rozkładu prędkości w przekroju wyrobiska jest możliwość rejestrowania w pamięci anemometru pomiarów chwilowych wykonywanych podczas procedury uśredniania. Procedura uśredniania pozwala na całkowanie prędkości lokalnych w polu przekroju wyrobiska podczas wykonywania trawersu. Jeżeli podczas wykonywania pomiarów anemometr trzymany jest w rękę (jest to sposób powszechnie praktykowany w kopalniach), wykonanie trawersu w całym przekroju na ogół nie jest możliwe ze względu na pionowe rozmiary wyrobiska. Z tego powodu, a także dla wyeliminowania negatywnego wpływu obecności operatora na dokładność pomiarów, skonstruowano wysięgnik dedykowany wyłącznie do współpracy z anemometrem  $\mu$ AS4.

Cechą charakterystyczną wysięgnika jest przegubowa głowica (fot. 1) pozwalająca na takie zamocowanie anemometru, aby podczas wykonywania trawersu płaszczyzna wlotu do czujnika skrzydełkowego pokrywała się z płaszczyzną przekroju wyrobiska niezależnie od miejsca położenia przyrządu. Jest to nie stosowane w polskich kopalniach rozwiązanie, skutkujące eliminacją błędów pomiaru wynikających z nie pokrywania się kierunku linii prądu z osią czujnika skrzydełkowego. Umieszczony w ręczce wysięgnika przełącznik umożliwia uruchamianie i kończenie procedury uśredniania prędkości dopiero wówczas, gdy anemometr znajduje się we właściwym położeniu w przekroju wyrobiska. Bardzo duża pamięć anemometru i długi czas uśredniania pozwalają aby przesuwanie anemometru podczas trawersu odbywało się z małą prędkością, co jest kolejnym czynnikiem zmniejszającym błąd pomiaru.

### 3. Eksperyment pomiarowy 1

Eksperyment pomiarowy został przeprowadzony w chodniku wentylacyjnym kopalni „B1”, prowadzącym do rejonu będącej w eksploatacji ściany w pokładzie 385. Szkic miejsca wykonania pomiarów z zaznaczonymi podstawowymi wymiarami przedstawiony jest na rys.1. Stacjonarny anemometr ultradźwiękowy

(AN) zawieszony był na pionowym wysięgniku, w chodniku o nachyleniu około  $3^\circ$ , w odległości 1,23 m od stropu. Przed anemometrem, patrząc od strony napływu powietrza, w odległości 18,60 m znajdowały się odrzwia tamy bezpieczeństwa (TB) o wymiarach  $3,70 \times 2,95$  m. Szerokość chodnika wynosiła 5,60 m, a wysokość 3,95 m. Spąg w rejonie pomiarów był wyłożony deskami, tworzącymi podest zaczynający się w odległości 6,30 m za tamą bezpieczeństwa. Wysokość podestu w miejscu jego początku wynosiła 0,70 m.



Rys. 1. Szkic rejonu wykonywania pomiarów

Fragment chodnika z zabudowanym anemometrem pokazano na fot. 2. W chodniku zastosowano obudowę łukową typu ŁPZS. Poza szyną transportu podwieszanego i lampami oświetleniowymi nie było urządzeń mogących zakłócić przepływ powietrza. Pomiary odbywały się w warunkach przepływu ustalonego, podczas przestoju ściany, nie były również wykonywane żadne czynności w układzie wentylacyjnym kopalni mogące wpłynąć na zmiany przepływu w wyrobisku. Takie uwarunkowania przepływu pozwalały przyjąć, że profil prędkości w miejscu prowadzenia eksperymentów nie ulegał zmianom.

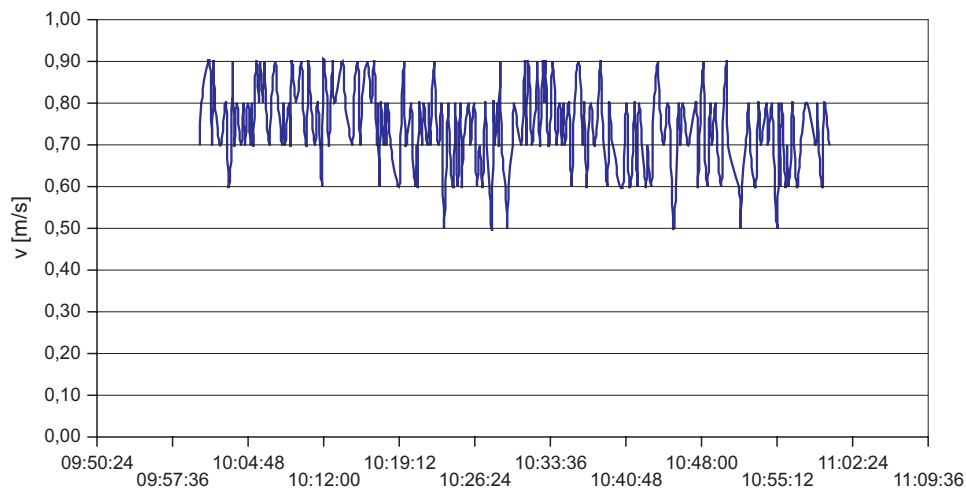
Zabudowany anemometr stacjonarny był czujnikiem systemu monitoringu rejonu ściany, a uzyskiwane z niego dane pomiarowe były rejestrowane w pamięci systemu, co pozwoliło na późniejsze porównywanie ich z danymi uzyskanymi z anemometru ręcznego.

Średnica wlotu do kanału pomiarowego anemometru była równa 100 mm.



Fot. 2. Miejsce umieszczenia ultradźwiękowego anemometru stacjonarnego

Na rys. 2 pokazano wykres prędkości zmierzonych z częstotliwością 0,1 Hz przez anemometr stacjonarny w okresie czasu wynoszącym około 1h, i zarejestrowanych w pamięci kopalnianego systemu monitoringu. Prędkość była mierzona z rozdzielczością 0,1 m/s. Widoczne fluktuacje wynikają z turbulentnego charakteru przepływu powietrza przez wyrobisko. Jakość nowoczesnych przyrządów pomiarowych jest na tyle wysoka, że w sygnale wyjściowym nie są obecne szумы własne układu elektronicznego.



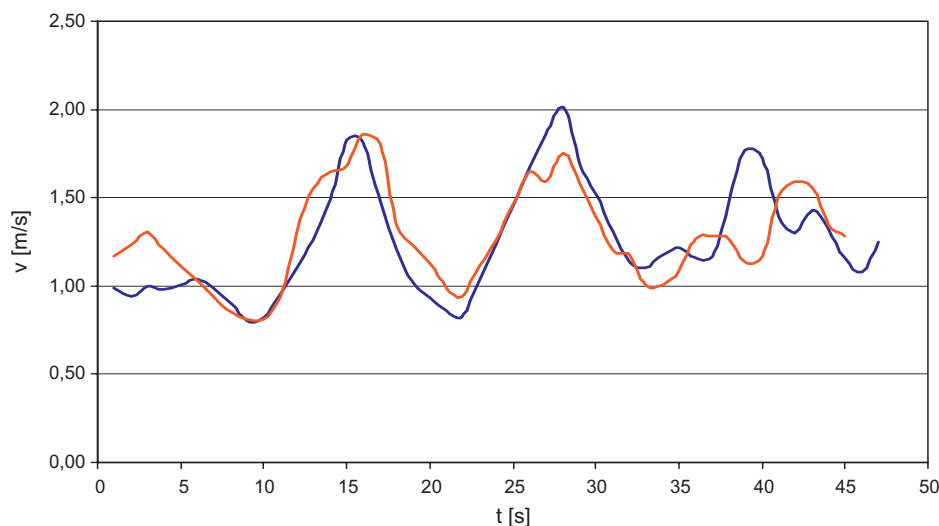
Rys. 2. Prędkość zarejestrowana przez system monitoringu

Stosując metodę ruchomej średniej lub dolnoprzepustowego filtru cyfrowego można z obserwowanego sygnału pomiarowego wydzielić składową reprezentującą zmiany wartości średniej prędkości powietrza (Wasilewski S., 1996). To rozwiązanie jest już jednak zastosowane w oprogramowaniu anemometru, o czym może świadczyć mała wartość odchylenia standardowego  $s = 0,09$  m/s. Ocena stacjonarności obserwowanych sygnałów, za pomocą testu serii dla wartości średniej i średniokwadratowej potwierdziła hipotezę o słabej stacjonarności procesu. W czasie eksperymentu była obserwowana nieistotna zmienność wartości średniej sygnałów. Obliczono i przyjęto do dalszych rozważań średnią wartość arytmetyczną prędkości  $v_{sr} = 0,74$  m/s, obliczoną z wartości prędkości chwilowych.

W tym samym przedziale czasowym prowadzone były pomiary anemometrem ręcznym  $\mu AS4$ , metodą trawersowania. Wykonano szereg trawersów ciągłych pionowych, w przekrojach przed i za anemometrem stacjonarnym. Trawersy były wykonywane metodą „anemometr na wsięgniku przed operatorem” w przekrojach wyrobiska odległych odpowiednio o 3,0 i 4,0 m od przekroju w miejscu zamocowania anemometru stacjonarnego. Długość wsięgnika gwarantowała zminimalizowanie wpływu operatora na błąd pomiaru i pozwalała na trawersowanie w całym przekroju wyrobiska. Czasy kolejnych trawersów wynosiły po około 60 sekund. Każdy trawers, rozpoczynany w dolnym rogu lewego ociosu, zawierał siedem gałęzi pionowych, z których czwarta przebiegała w osi przekroju wyrobiska. Dwie przykładowe rejestracje zmian prędkości w przekroju wyrobiska przed anemometrem stacjonarnym pokazano na rys. 3. Wartość rejestrowanej prędkości rosła wraz ze zbliżaniem się anemometru do spągu. Obliczone wartości średnie dla rejestracji przedstawionych na rysunku wynosiły  $v_{sr1} = 1,21$  m/s i  $v_{sr2} = 1,20$  m/s.

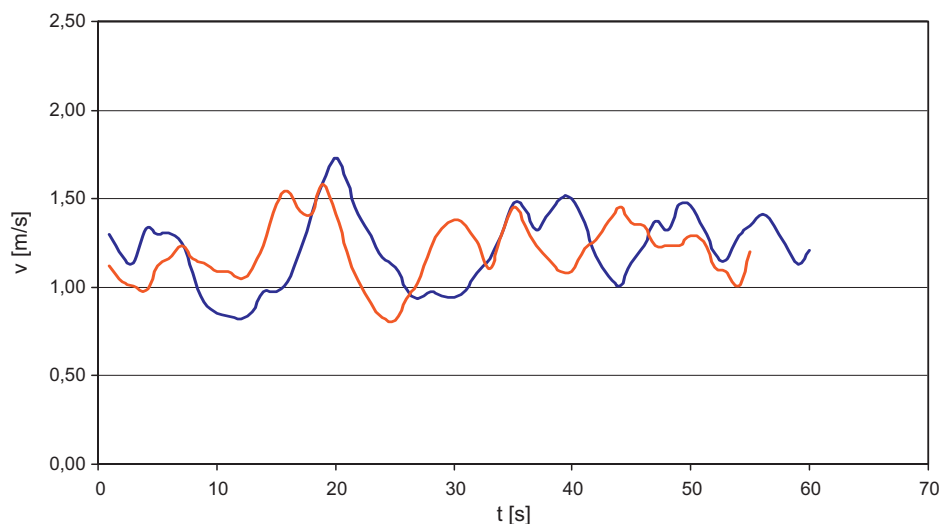
Zmiany prędkości przedstawione na rysunku są funkcją czasu trawersowania. Pomiar wykonywany metodą trawersu ciągłego nie pozwala na określenie miejsca położenia anemometru w przekroju. Nie jest w związku z tym możliwe, na podstawie takiej rejestracji, zdefiniowanie parametrów rozkładu prędkości. Pomimo, że nie znamy układu miejscowych wektorów prędkości możemy jednak stwierdzić, że ich wartości mogą znacząco różnić się od siebie. Na jednym z wykresów widać, że pomiędzy 22 a 28 sekundą trawersu (anemometr był wówczas opuszczany od stropu do spągu) prędkość uległa zmianie od wartości 0,83 do 2,01 m/s. Nie można jednak na tej podstawie twierdzić, że w wyrobisku górniczym przyspągowa prędkość powietrza jest większa niż pod stropem. Przedstawione wykresy pokazują, że rozkłady prędkości w przekroju wyrobiska kopalni charakteryzuje duża nieregularność. Duże zmiany prędkości w płaszczyźnie tego samego przekroju są także przesłanką do zwrócenia uwagi na to, że w technice trawersu ciągłego jednym z najistotniejszych czynników wpływających na błąd pomiaru jest stałość prędkości przesuwania anemometru.





Rys. 3. Profile prędkości w przekroju przed anemometrem stacjonarnym

W celu zbadania czy na krótkim odcinku wyrobiska, w warunkach przepływu stacjonarnego, mogą wystąpić różnice w rozkładzie prędkości wykonano pomiar w innym miejscu. Na rys. 4 widoczne są rejestracje z trawersów wykonanych za anemometrem stacjonarnym w odległości około 4,0 m. Podobnie jak w omówionym wcześniej przykładzie wartość rejestrowanej prędkości rosła wraz ze zbliżaniem się anemometru do spągu. Pomimo, że odległość pomiędzy płaszczyznami trawersowania wynosiła 7,0 m, rejestracje przedstawione na rys. 4 charakteryzują się mniejszymi zmianami amplitudy niż omawiane wcześniej. Może to świadczyć o tym, że profile prędkości różnią się od siebie.



Rys. 4. Profile prędkości w przekroju za anemometrem stacjonarnym

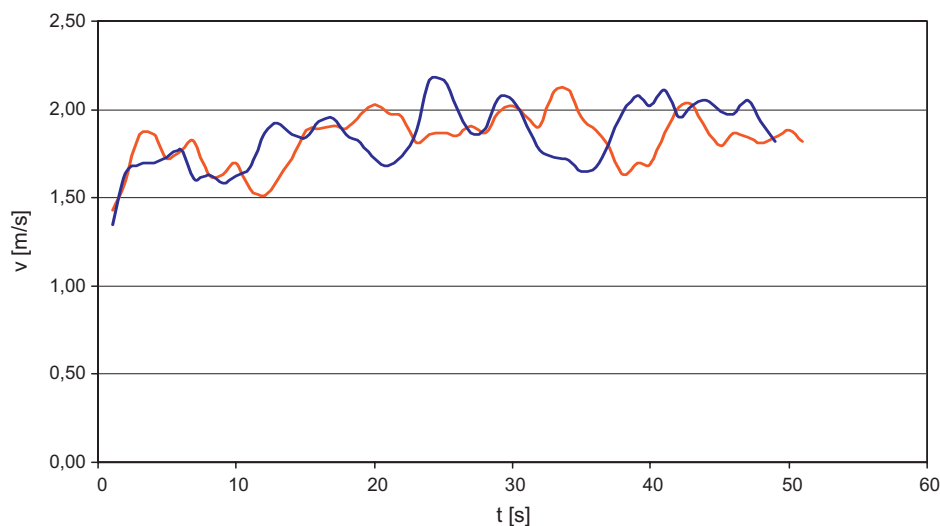
Na wykresie danych z dłuższego czasu trawersowania, pomiędzy 29 a 37 sekundą widoczne są zmiany prędkości podczas gdy anemometr był przesuwany od stropu do spągu. Prędkość uległa zmianie od wartości 0,94 do 1,50 m/s. Wartość prędkości przy spągu była o 25% mniejsza niż w odległości 7,0 m. Mimo różnic w rozkładzie prędkości obliczone wartości średnie dla rejestracji przedstawionych na rysunku wynosiły  $v_{sr1} = 1,25$  m/s,  $v_{sr2} = 1,23$  m/s i nie odbiegały od średnich uzyskanych dla pomiarów przed anemometrem. Różnice pomiędzy profilami nie były więc spowodowane zmianą strumienia objętości a wynikały raczej z geometrii wyrobiska, typu obudowy i prawdopodobnie z występującego jeszcze w tym miejscu, oddziaływania na rozptył strugi odrzwi tamy.

Obecność w pobliżu miejsca zamontowania anemometru skrzydełkowego odrzwi tamy bezpieczeństwa (fot. 3), pozwoliła na wykonanie pomiarów strumienia objętości w miejscu innym niż przekrój wyrobiska. Ze względu na bardzo dobrym stan techniczny odrzwi można było z dużą dokładnością zmierzyć pole powierzchni otworu tamy i wykonać w nim pomiary wartości średniej prędkości. Prosty odcinek wyrobiska przed tamą nie zawierał elementów zakłócających przepływ. Wyznaczony w ten sposób strumień objętości charakteryzował się najmniejszą niepewnością pomiaru w stosunku do pozostałych pomiarów i jego wartość przyjęto za poprawną w dalszych rozważaniach.



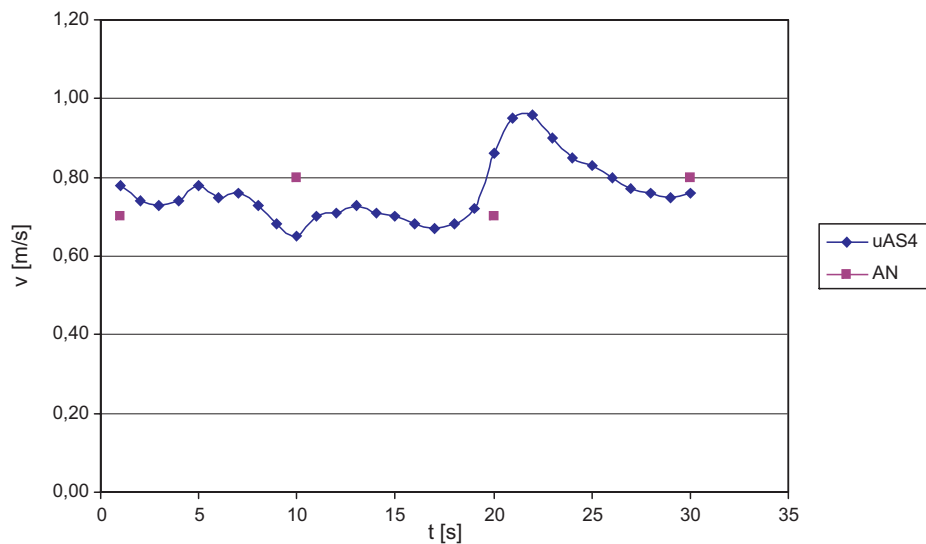
Fot. 3. Odrzwia tamy bezpieczeństwa

Na rys. 5 pokazano dwie rejestracje z pomiaru prędkości w odrzwiach tamy bezpieczeństwa. Trawers wykonywano taką samą techniką jak w wyrobisku. Początek trawersowania następował w lewym dolnym narożu tamy. W stosunku do poprzednich rejestracji widoczne jest znaczne spłaszczenie profili prędkości związane ze wzrostem prędkości w przekroju tamy. Widoczna jest również niewielka niesymetria zmian prędkości związana z obecnością za tamą od strony napływu stalowej płyty opartej o obudowę wyrobiska. Dla pokazanych na rysunku rejestracji ich wartości średnie były równe  $v_{sr1} = 1,83$ ,  $v_{sr2} = 1,85$  m/s.



Rys. 5. Profile prędkości w odrzwiach tamy

W celu zweryfikowania wskazań anemometru stacjonarnego zarejestrowana została prędkość powietrza wzdłuż linii prądu pokrywającej się z osią podłużną kanału pomiarowego czujnika ultradźwiękowego. Rejestrację rozpoczęto w odległości 1,0 m od czoła anemometru stacjonarnego, zbliżając do niego ruchem jednostajnym umieszczony na wysięgniku anemometr  $\mu$ AS4, aż do momentu zetknięcia się osłony czujnika skrzydełkowego z wlotem do kanału pomiarowego anemometru. Średnice osłon czujników obu anemometrów są takie same i wynoszą 100 mm. Występujące duże podobieństwo geometryczne obu przyrządów stwarza możliwość porównania uśrednionych wyników pomiarów. Na rys. 6 pokazano rejestrację prędkości anemometrem ręcznym wykonaną z częstotliwością 1 Hz, oraz wyniki pomiarów wykonanych z częstotliwością 0,1 Hz przez anemometr stacjonarny. Obydwie rejestracje były prowadzone w tym samym czasie. W momencie zetknięcia przyrządów zaobserwowano nieznaczny wzrost wskazań anemometru  $\mu$ AS4. Porównywanie wyników pomiarów anemometrów po ich zetknięciu jest nieuzasadnione ze względu na wzajemne oddziaływanie czujników. Dla weryfikacji istotne było porównanie wartości średniej prędkości zmierzonej przez anemometr ręczny zanim doszło do zetknięcia czujników i prędkości średniej rejestrowanej przez anemometr stacjonarny. Prędkości te wynosiły odpowiednio  $v_{sr1} = 0,76$  m/s i  $v_{sr2} = 0,74$  m/s. Na tej podstawie można stwierdzić, że wskazania anemometru stacjonarnego były poprawne.



Rys. 6. Prędkość przed wlotem do kanału pomiarowego anemometru stacjonarnego

W tab. 1 zostały zgromadzone wyniki pomiarów wykonanych bezpośrednio w chodniku wentylacyjnym kopalni „B1”. W wierszu piątym zamieszczono wynik pomiaru, który zostałby uzyskany na podstawie danych z anemometru stacjonarnego (AN) w przypadku nie stosowania współczynnika (procedury) korygującej. Podano również dane otrzymane z kopalni. Wyniki pomiarów strumienia objętości wykonywane metodą trawersu są do siebie zbliżone. Zmierzone wartości różnią się jednak zasadniczo od danych uzyskanych przez służby wentylacyjne kopalni. Najbardziej odbiegającym od pozostałych byłby jednak pomiar wykonany anemometrem stacjonarnym traktujący zmierzoną wartość prędkości lokalnej jako wartość średnią w przekroju.

Tab. 1. Wyniki pomiarów. Kopalnia „B1”

	Prędkość średnia [m/s]	Pole przekroju [m <sup>2</sup> ]	Strumień objętości [m <sup>3</sup> /min]	Średni strumień objętości [m <sup>3</sup> /min]
Trawers przed anemometrem stacjonarnym	1,21	15,0	1089,0	1084,5
	1,20	15,0	1080,0	
Trawers za anemometrem stacjonarnym	1,25	15,0	1125,0	1116,0
	1,23	15,0	1107,0	
Trawers w odrzwiach tamy	1,83	10,92	1199,0	1205,6
	1,85	10,92	1212,1	
Anemometr stacjonarny (bez współczynnika korygującego)	0,76	15,0		684,0
Dane kopalni				1680,0



Jeżeli przyjmiemy za wartość poprawną wielkości mierzonej, wynik pomiaru uzyskany przez trawers wykonany w odrzwiach tamy, to bezwzględne błędy pomiaru będą takie jak przedstawiono w tab. 2.

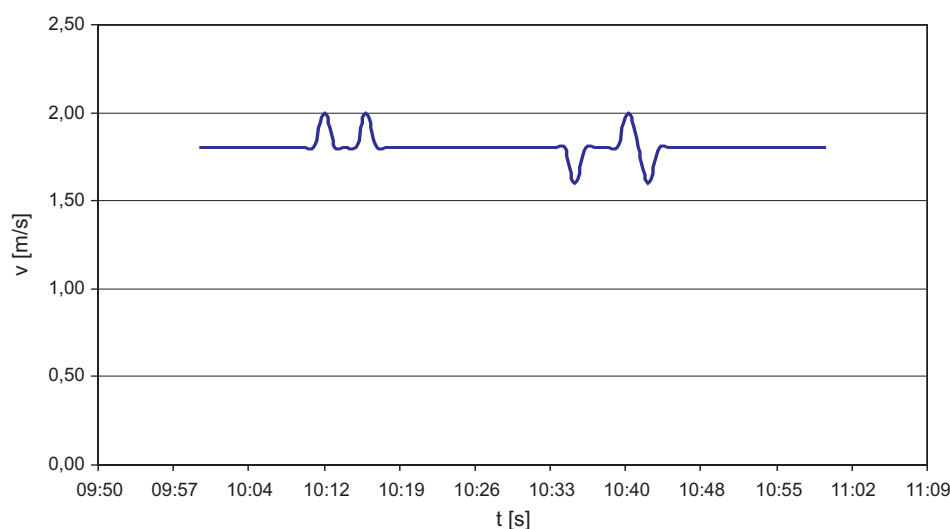
Tab. 2. Błędy pomiarów strumienia objętości w chodniku wentylacyjnym

	Błąd bezwzględny [m <sup>3</sup> /min]	% wartości poprawnej
Trawers przed anemometrem	-121,1	-10,0
Trawers za anemometrem	-89,6	-7,4
Anemometr stacjonarny (bez współczynnika korygującego)	-521,6	-43,3
Dane kopalni	474,4	39,3

Z tabeli wynika, że metoda pomiaru za pomocą trawersu ciągłego z anemometrem ręcznym umieszczonym na wysięgniku pozwala na uzyskanie wyników najbardziej zbliżonych do prawidłowego. Należy jednak pamiętać, że na błąd pomiaru w wyrobisku duże znaczenie ma niepewność wyznaczenia jego przekroju. Największy, przekraczający 40% jest błąd pomiaru wykonanego anemometrem stacjonarnym. Potwierdza to po raz kolejny konieczność wzorcowania takich czujników. Znak błędu nie jest istotny, ponieważ jak wcześniej stwierdzono, że względu na różnorodność profili prędkości w wyrobiskach górniczych w innym przypadku może on być odwrotny. Wynik pomiaru podany przez służby wentylacyjne kopalni jest o 40% większy od prawidłowego. Oznacza to, że jeżeli został uzyskany na podstawie wskazań anemometru stacjonarnego, to zastosowano nieprawidłowy współczynnik korygujący.

#### 4. Eksperyment pomiarowy 2

Eksperyment został przeprowadzony w kopalni „B2” w chodniku B-4 doprowadzającym powietrze w rejon ściany B-5 w pokładzie 358/1. Ultradźwiękowy anemometr stacjonarny, tego samego typu co w poprzednim przykładzie, zabudowany był w odległości około 80 m od skrzyżowania chodnika z pochylnią transportową. W chodniku w obudowie typu ŁP nie było przeszkód ani urządzeń zakłócających przepływ. W trakcie wykonywania badań pomiarowych ściana była w ruchu i prowadzono urabianie przy pomocy kombajnu. Z kopalnianego systemu monitoringu uzyskano dane z rejestracji pomiarów prędkości wykonanych przez anemometr stacjonarny w tym samym okresie czasu w którym wykonywano pomiary anemometrem ręcznym. Wykres rejestracji przedstawiono na rys. 7.

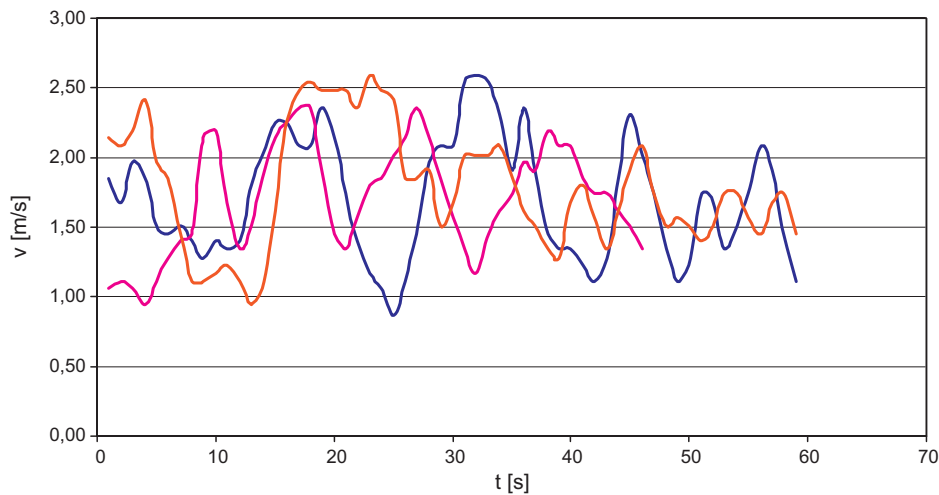


Rys. 7. Prędkość zarejestrowana przez system monitoringu

Podobnie jak w poprzednim przypadku potwierdzono stacjonarność procesu przewietrzania w czasie wykonywania pomiarów. Było to istotne stwierdzenie ze względu na wykonywanie pomiarów podczas prowadzenia prac górniczych. System monitoringu rejestrował prędkość z częstotliwością 60 s<sup>-1</sup>. Roz-

dzielczość pomiarów wynosiła 0,2 m/s. Wartość średnia prędkości w analizowanym okresie czasu wynosiła  $v_{\text{sr}} = 1,80$  m/s, a odchylenie standardowe było równe  $s = 0,05$  m/s.

Trawersy anemometrem ręcznym, taką samą metodą jak w poprzednim przypadku wykonano przed anemometrem stacjonarnym, patrząc od strony napływu. W jednym przypadku trawers wykonano wzdłuż trajektorii poziomych. Nie stwierdzono istotnych różnic w wynikach ze względu na przebieg trajektorii. Przykładowe wykresy rejestracji dwóch trawersów pionowych i jednego poziomego pokazano na rys. 8. Prędkość początkowa zarejestrowana podczas trawersu poziomego wynosiła około 1 m/s. Podobnie jak w chodniku wentylacyjnym kopalni „B1” prędkość przyspągowa była większa niż pod stropem. Niestety nie zweryfikowano wskazań anemometru stacjonarnego.



Rys. 8. Profile prędkości w przekroju wyrobiska

Ponieważ w trakcie pomiarów był testowany bezprzewodowy system wielopunktowego pomiaru rozkładu prędkości powietrza w wyrobisku górniczym (Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., w przygotowaniu) skorzystano z okazji aby porównać uzyskane wyniki z wynikiem otrzymanym z systemu. Testowany system wraz z algorytmami analizy danych pomiarowych jest obecnie najdokładniejszym narzędziem pomiaru strumienia objętości stosowanym w eksperymentach badawczych na polskich kopalniach. Został wykonany w ramach projektu badawczego nr 5 T12A 037 25 pt. „Badanie czasoprzestrzennych rozkładów prędkości i objętościowego natężenia przepływu powietrza w wyrobiskach kopalni głębinowej”. Na fot. 4 pokazano jego wygląd w miejscu zabudowania w chodniku B-4.



Fot. 4. Wielopunktowy system badania rozkładu prędkości

Uzyskane dane pomiarowe, wraz z danymi z dokumentacji kopalni przedstawiono w tab. 3. Prędkości średnie zmierzone podczas trawersów są bardzo zbliżone do siebie. Potwierdza to dobrą powtarzalność metody. Uśredniona z trzech trawersów wartość strumienia objętości była równa 1248 m<sup>3</sup>/min. Wynik ten jest bardzo zbliżony do wyniku pomiaru systemem wielopunktowym. Z kopalni uzyskano dane o prędkości średniej zmierzonej w wyrobisku oraz o wielkości strumienia objętości. Podana wartość prędkości  $v_{sr} = 2,9$  m/s jest o 66% większa od uzyskanej podczas trawersowania.

Tab. 3. Wyniki pomiarów. Kopalnia „B2”

	Prędkość średnia [m/s]	Pole przekroju [m <sup>2</sup> ]	Strumień objętości [m <sup>3</sup> /min]	Średni strumień objętości [m <sup>3</sup> /min]
Trawers przed anemometrem stacjonarnym	1,71	12,0	1231,2	1248,0
	1,71	12,0	1231,2	
	1,78	12,0	1281,6	
System pomiaru wielopunktowego				1116,6
Anemometr stacjonarny (bez współczynnika korygującego)	1,80	12,0		1296,0
Dane kopalni	2,9			
Dane kopalni				1500,0

Jeżeli przyjmiemy za wartość poprawną wielkości mierzonej wynik pomiaru uzyskany przez system pomiaru wielopunktowego to bezwzględne błędy pomiaru będą takie jak zamieszczone w tabeli 4.

Tab. 4. Błędy pomiarów strumienia objętości w chodniku wentylacyjnym

	Błąd bezwzględny [m <sup>3</sup> /min]	% wartości poprawnej
Trawers	131,4	11,8
Anemometr stacjonarny (bez współczynnika korygującego)	179,4	16,1
Dane kopalni	383,4	34,3

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli trawersowanie pozwoliło uzyskać wynik najbardziej zbliżony do poprawnego. Jest to wniosek podobny do wysnutego na podstawie analizy danych z tabeli 2. Uwagę zwraca mała wartość błędu w przypadku wykorzystania anemometru stacjonarnego jako miernika strumienia objętości. Niestety w przypadku tego eksperymentu pomiarowego nie zostały zweryfikowane wskazania anemometru stacjonarnego. Zakładając, że były one poprawne można stwierdzić, że w tym przypadku anemometr był umieszczony w takim punkcie przekroju wyrobiska, w którym średnia prędkość lokalna była zbliżona do wartości prędkości średniej w przekroju. Potwierdzałoby to tezę o możliwości znalezienia w przekroju wyrobiska optymalnej lokalizacji dla anemometru mierzącego strumień objętości (Dziurzyński W., 1996).

Dane kopalni dotyczące wielkości strumienia objętości obciążone są 34% błędem. Należy zwrócić uwagę, że służby wentylacyjne kopalni podały informację, że średnia prędkość w chodniku jest równa  $v_{sr} = 2,9$  m/s. Podczas wykonywania trawersów, co jest widoczne na rejestracjach, w przekroju nie zanotowano lokalnej prędkości o takiej wartości. Pole przekroju wyrobiska dla strumienia wynoszącego według danych kopalni 1500 m<sup>3</sup>/min, musiałyby mieć powierzchnię równą 8,6 m<sup>2</sup>. Tymczasem zmierzony w czasie pomiarów przekrój był równy 12 m<sup>2</sup>. Dane pomiarowe kopalni mogą wskazywać na to, że do wyznaczenia strumienia objętości w tym wyrobisku nie jest wykorzystywany zabudowany tam anemometr stacjonarny.

W przypadkach obu eksperymentów pomiarowych stwierdzono, że wartości strumienia objętości w badanych wyrobiskach są mniejsze niż podają służby wentylacyjne kopalń. W pierwszym przypadku różnica wynosiła 39,3% a w drugim 34,3%. Stwierdzenie tego faktu jest ważne, ponieważ obydwa chodniki doprowadzały powietrze bezpośrednio w rejon ścian. Ilość powietrza dostarczanego do ściany ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki pomiarów, uzyskane w ramach eksperymentów pomiarowych, wskazują na istotne różnice pomiędzy nimi a wynikami otrzymywanymi przez służby wentylacyjne kopalń, stosujące do wyznaczenia strumienia objętości anemometry stacjonarne.

Na podstawie rejestracji wykonanych podczas trawersów można stwierdzić, że rozkłady prędkości w wyrobisku kopalni nie są regularne.

Wydaje się, że z powodu braku jednoznacznych procedur pozwalających na wzorcowanie anemometru jako miernika strumienia objętości w wyrobisku kopalni, przyrządy te częściej wykorzystywane są jako mierniki lokalnej prędkości, błędnie niekiedy interpretowanej jako średnia prędkość w przekroju wyrobiska.

W przypadku wykorzystywania w pracujących w czasie rzeczywistym interaktywnych programach symulacji przewietrzania kopalń danych dostarczanych bezpośrednio ze stacjonarnych czujników anemometrycznych, niezbędne jest wcześniejsze wzorcowanie anemometrów jako mierników strumienia objętości.

Pomimo, że metoda wzorcowania anemometru stacjonarnego metodą trawersu nie pozwala na poznanie rozkładu prędkości i nie uwzględnia warunków przepływu na brzegach wyrobiska, jest ona jedyną aktualnie dostępną dla służb wentylacyjnych i powinna być wykorzystywana. Warunkiem jest stworzenie procedur podających sposób postępowania i określających niezbędne wyposażenie pomiarowe.

Najmniejszą niepewnością wzorcowania anemometru stacjonarnego obciążona jest metoda wykorzystująca wielopunktowe systemy pomiaru rozkładu prędkości. Uzyskuje się to między innymi dzięki algorytmom interpolującym szeregi czasowe zmiennych uzyskanych ze skończonej liczby czujników i uwzględniające warunki na brzegach wyrobiska. Jej wadą jest dłuższy czas (sięgający kilkudziesięciu minut) potrzebny do uzyskania wyniku pomiaru.

W opracowaniu wykorzystano wynik pomiaru uzyskany przy pomocy bezprzewodowego systemu wielopunktowego pomiaru rozkładu prędkości powietrza w wyrobisku górniczym, opracowanego i wykonanego w ramach projektu badawczego nr 5T12A 037 25.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w ramach działalności statutowej IMG PAN w roku 2006.

## 6. Literatura

- Chmiel W., Kruczkowski J., 2005: *Badania wpływu zaburzeń profilu prędkości powietrza na pomiary anemometrami stacjonarnymi różnych typów*. Prace IMG PAN, t. 7, nr 1-2, Kraków.
- Dziurzyński W., 1996: *Optymalna lokalizacja w przekroju wyrobiska stacjonarnego anemometru systemu monitoringu sieci wentylacyjnej kopalni*. Archives of Mining Science, Vol. 41, Iss. 4.
- Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., 2006: *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości w wyrobiskach kopalń głębinowych*. Archives of Mining Science, seria: Monografie, nr 1, Kraków.
- Krawczyk J., Kruczkowski J., 2004: *Pomiary niestacjonarnych przepływów w wyrobisku kopalni*. Materiały 3 Szkoły Aerologii Górniczej, Katowice
- Michalunio A., Krach A., Trutwin W., 2006: *Górnictwo profilometrii laserowej*. Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej, Kraków
- Trutwin W., 2004: *Zastosowanie profilometrii do określania pola przekroju poprzecznego wyrobisk kopalnianych*. Prace IMG PAN, t. 6, nr 3-4, Kraków
- Wasilewski St., 1996: *Badania przepływu powietrza w kopalni*. Archives of Mining Science, Vol. 41, Iss. 4,

### Analysis of data acquired with portable and stationary anemometric sensors

#### Abstract

Quantity of air flowing in workings of underground mines is assessed upon indications of stationary anemometric sensors. Evaluation of a time averaged flow through given cross-section of a gallery upon a point velocity measurement has a considerable error. Comparison with a more accurate method gives an estimate of the error of the one-point measurement. Traversing with a portable anemometer is a typical reference method. The  $\mu$ AS4 portable anemometer – newly developed at the Institute was selected for this purpose. A matrix of anemometric sensors simultaneously sampling distribution of velocity, developed by the author may be considered as another reference method. Contemporary monitoring systems have a capability of recording of data, which may be compared with results given by the reference methods. Two examples of such comparison have been given. In first case the stationary anemometer was placed in by rectangular opening, where traversing was done. In another the matrix of anemometers was applied. Results will be used for validation of data provided by velocity sensors operating in the systems of monitoring.

**Keywords:** mining aerology, mine ventilation, measurement of volumetric flow quantity, anemometer

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Wasilewski, Centrum EMAG