

Badania czujników anemometrycznych wykorzystywanych w metodach pomiaru pola prędkości i strumienia objętości – wyznaczanie źródeł błędów, analiza niepewności

JANUSZ KRUCZKOWSKI, ADRZEJ KRACH, JERZY KRAWCZYK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków
e-mail: kruczkow@img-pan.krakow.pl*

Streszczenie

Wynik pomiaru jest estymatą wielkości mierzonej. Z tego powodu musi być podawany wraz z niepewnością, czyli parametrem charakteryzującym rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej. Stosowane w metodach pomiaru pola prędkości i wyznaczania strumienia objętości w systemach wentylacyjnych czujniki anemometryczne są wrażliwe na szereg czynników mających swój udział w powstaniu błędu pomiaru. W nowoczesnych, stacjonarnych anemometrach skrzydełkowych typu *smart*, dominującym składnikiem niepewności pomiaru jest składnik pochodzący od fluktuacji przepływu. Ponieważ anemometr skrzydełkowy nie mierzy bezpośrednio fluktuacji, nie jest możliwe wprowadzenie poprawki, np. wprost do wyniku pomiaru już w układzie elektronicznym czujnika. Celem opisanych w artykule badań było oszacowanie niepewności pomiaru lokalnej prędkości ze względu na fluktuacje. Po wyprowadzeniu zależności na niepewność rozszerzoną pomiaru, wykonano rejestrację pól prędkości w kilku rejonach sieci wentylacyjnej kopalni. Porównano wielkość niepewności rozszerzonej i udział jej składowych, dla różnych miejsc pomiaru prędkości lokalnej w przekroju różniących się wzajemnie wyrobisk. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się udział składowej pochodzącej od fluktuacji.

Słowa kluczowe: niepewność pomiaru prędkości powietrza, anemometr skrzydełkowy, fluktuacje prędkości powietrza, wentylacja kopalń, wielopunktowy pomiar pola prędkości powietrza, wydatek przepływu, strumień objętości

1. Wprowadzenie

Pomiary prędkości powietrza w sieciach wentylacyjnych charakteryzuje niepewność, której wielkość należy przedstawiać jednocześnie z podawaniem wyniku. Prędkość powietrza mierzy się przy pomocy anemometrów ręcznych lub stacjonarnych. Celem jest uzyskanie informacji o lokalnej prędkości lub części jej – pomiar strumienia objętości przepływu. Podczas ręcznych pomiarów stosowane są różne metody. Najczęściej w przekroju przepływu wykonywany jest tzw. trawers anemometrem, w celu określenia prędkości średniej. Inna klasa metod wymaga podziału przekroju na podobszary. Jeśli przekrój ma kształt okrągły lub prostokątny, można skorzystać z zaleceń odnośnie liczby i lokalizacji punktów, w których należy zmierzyć prędkość (Burrows i in., 1989). Dla pozostałych kształtów przekroju brak takich zaleceń. Wtedy można podzielić przekrój na pola o identycznej powierzchni i (np. rozwieszając siatkę) i wykonać lokalne trawersowanie w każdym z pól (Dziurzyński, 1996). Kolejną metodę przedstawiono w pracy (Krach, Krawczyk, Kruczkowski, Pałka, 2006), gdzie pole prędkości można oszacować dla dowolnego zestawu punktowych pomiarów, poprzez interpolację. Anemometry stacjonarne, pracujące w kopalniach w systemach monitoringu mierzą prędkość w wybranym punkcie. Dla każdego z wymienionych sposobów pomiaru o niepewności złożonej wyniku decyduje inny zestaw czynników.

W niniejszym opracowaniu skoncentrujemy się na niepewności pomiaru prędkości przy pomocy nieruchomego czujnika, pomijając charakterystyczne dla trawersowania składniki obejmujące wpływ

kształtu drogi trawersowania, prędkości trawersowania, odchylenia osi skrzydełka anemometru od kierunku przepływu i obecności operatora.

Powszechne stosowanie stacjonarnych czujników anemometrycznych do pomiarów w systemach wentylacyjnych kopalń, a także w innych wentylacyjnych systemach przemysłowych, uzasadnia rozpoznanie czynników wpływających na punktowy pomiar, a także przeprowadzenie analizy niepewności wykonywanych pomiarów. Wieloletnie doświadczenie autorów wynikające z prowadzonych badań *in situ*, przepływów w sieciach wentylacyjnych kopalń, pozwala im twierdzić, że jednym z najbardziej znaczących czynników błędu pomiaru są naturalne fluktuacje powietrza występujące w przepływach. Charakter tych fluktuacji i ich wielkość w różny sposób wpływa na wskazania anemometrów. Istnieją opublikowane prace pokazujące znaczną zależność wartości mierzonej prędkości w przepływach turbulentnych, od rodzaju czujnika pomiarowego a także od zastosowanej metody pomiarowej (Chmiel, Kruczkowski, 2005). Dotychczas nie udało się skonstruowanie czujnika skrzydełkowego mogącego uwzględniać i kompensować wpływ fluktuacji na jego pomiary.

Wszystkie rozważania prowadzone w tej pracy dotyczą zastosowania jednego typu czujnika skrzydełkowego o tych samych parametrach metrologicznych i takich samych parametrach mechanicznych i geometrycznych. Czujniki skrzydełkowe użyte w pomiarach były adjustowane i wzorcowane w tym samym akredytowanym laboratorium wzorcującym.

Przedstawionych wyników nie można odnosić bezpośrednio do szacowania niepewności pomiarów wykonywanych czujnikami anemometrycznymi innych typów.

2. Wpływ fluktuacji prędkości na pomiar wykonywany anemometrycznym czujnikiem skrzydełkowym

Aby oszacować wpływ fluktuacji prędkości na wskazania anemometru skrzydełkowego przyjęty został model dynamiczny czujnika skrzydełkowego (Krach, Krawczyk, Kruczkowski, Pałka, 2006) w postaci

$$2\pi J \frac{dn}{dt} = M_n \quad (1)$$

gdzie:

J – moment bezwładności skrzydełka

n – prędkość obrotowa skrzydełka

M_n – moment napędowy

na tej podstawie można napisać równanie ruchu obrotowego anemometru

$$\frac{J}{\rho R^2 S} \frac{dn}{dt} + vn = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2\pi R} v^2 \quad (2)$$

gdzie:

ρ – gęstość powietrza

v – prędkość napływu powietrza

S – powierzchnia czynna anemometru

α – kąt skręcenia skrzydełek względem osi obrotu

R – promień skrzydełka

Dla charakterystyki statycznej czujnika anemometru skrzydełkowego danej zależnością (Krach, 2004)

$$v = a + (1 + b)V \quad (3)$$

gdzie V jest prędkością wskazywaną przez przyrząd wzorcowany w jednostkach prędkości, a i b są współczynnikami poprawek, równanie (2) można przedstawić w postaci

$$c \frac{dV}{dt} + [a + (1 + b)V]v = v^2 \quad (4)$$

gdzie $c = \frac{J}{\rho S R^2}$.

W przypadku mikroprocesorowych czujników skrzydełkowych, posiadających pamięć charakterystyki oraz adjustowanych i wzorcowanych w tym samym laboratorium wzorcującym można przyjąć, że wartość poprawek na charakterystykę statyczną będzie równa zero (oznacza to jednocześnie pominięcie niepewności samego procesu wzorcowania). Założenie to będzie uzasadnione wówczas, jeżeli jakość czujnika skrzydełkowego i jego układu łożyskowania będą gwarantować stałość swoich parametrów mechanicznych w przyjętym okresie wykonywania pomiarów. Przyjmując ponad to, że V i v są procesami stacjonarnymi o wartościach oczekiwanych odpowiednio V_0 i v_0 i przedstawiając je w postaci

$$V = V_0 + V_e, \quad v = v_0 + v_e \quad (5)$$

gdzie V_e i v_e są procesami stacjonarnymi o zerowej wartości oczekiwanej, a następnie obliczając wartości oczekiwane lewej i prawej strony równania (4) otrzymamy

$$V_0 v_0 + E(V_e v_e) = v_0^2 + E(v_e^2) \quad (6)$$

skąd

$$V_0 = v_0 + \frac{E(v_e^2) - E(V_e v_e)}{v_0} \quad (7)$$

gdzie $E(v_e^2)$ jest wariancją zmiennej losowej v_e a $E(V_e v_e)$ jest kowariancją zmiennych losowych V_e i v_e .

Poprawka wynikająca z fluktuacji prędkości wynosi więc

$$d_F = \frac{E(v_e^2) - E(V_e v_e)}{v_0} \quad (8)$$

O ile wartość oczekiwaną kwadratu zmiennej losowej v_e można obliczyć z zależności (Krysicki i in., 1998)

$$E(v_e^2) = \int_{-v_g}^{+v_g} v_e^2 f_v(v_e) dv_e \quad (9)$$

gdzie $f_v(v_e)$ jest funkcją gęstości zmiennej v_e z przedziału $(-v_g, +v_g)$, czyli wartość oczekiwana jest równa wariancji zmiennej v_e , to obliczenie wartości $E(V_e v_e)$ jest bardzo trudne ze względu na zależność obu zmiennych. W pracy (Krach, Krawczyk, Kruczkowski, Pałka, 2006) wykazano, że pominięcie tego składnika spowoduje przeszacowanie względnego błędu wartości średniej prędkości powietrza nie więcej niż o 10%. Akceptując to stwierdzenie, równanie (7) można będzie zapisać w postaci

$$V_0 = v_0 + \frac{1}{v_0} D^2(v_e) \quad (10)$$

a zależność na poprawkę d_F przedstawić jako

$$d_F = \frac{V_0}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{w}{V_0^2}} \right) \quad (11)$$

gdzie $w = D^2(v_e)$ jest wariancją zmiennej losowej v_e .

3. Niepewność pomiaru prędkości powietrza spowodowana fluktuacją przepływu

Dla stacjonarnych skrzydełkowych czujników anemometrycznych należy w wyniku pomiaru uwzględnić następujące poprawki:

- a – poprawka na przesunięcie charakterystyki
- bV – poprawka na nachylenie charakterystyki
- d_F – poprawka uwzględniająca fluktuacje powietrza

Zależność na średnią prędkość miejscową v_0 mierzona przy pomocy anemometru będzie miała postać

$$v_0 = V_0 + a + bV_0 - d_F \quad (12)$$

gdzie V_0 jest prędkością wskazywaną przez anemometr.

Na tej podstawie złożona wariancja średniej prędkości przepływającego powietrza jest równa

$$u_c^2(v_0) = u^2(V_0) + u^2(a) + V_0^2 u^2(b) + 2V_0 u(a, b) + u^2(d_F) \quad (13)$$

gdzie składnik $2V_0 u(a, b)$ uwzględnia możliwą korelację pomiędzy a i b .

W zależnościach powyższych nie występują poprawki charakterystyczne dla metody pomiaru ręcznym anemometrem skrzydełkowym, a więc na kształt drogi trawersowania, prędkość trawersowania, profil prędkości, odchylenie osi skrzydełka anemometru od kierunku przepływu i obecność operatora.

Dokładny pomiar powinien uwzględniać wszystkie poprawki. Jednak w praktyce kopalnianych pomiarów anemometrycznych przyjmuje się, że $v_0 = V_0$, czyli odczyt wskazań z anemometru uznawany jest za wartość poprawną pomiaru. W takim przypadku niepewność standardowa pomiaru jest równa dodatniemu pierwiastkowi kwadratowemu z sumy wariancji średnich poprawek i sumy wartości średnich wariancji poprawek (GUM, 1999)

$$u_{cp}^2(v_0) = u^2(V_0) + \overline{u^2(d)} + u^2(\bar{d}) \quad (14)$$

gdzie $\overline{u^2(d)}$ jest sumą wartości średnich wariancji wszystkich uwzględnianych poprawek, $u^2(\bar{d})$ sumą wariancji związanych ze średnimi wartościami poprawek, a $u^2(V_0)$ jest miarą niepewności odczytu wskazań.

Przyjmuje się, że wynikiem pomiaru jest wartość

$$v_0 = V_0 + \bar{d} \quad (15)$$

Ze względu na turbulentny charakter przepływu w wyrobiskach górniczych, należy spodziewać się silnego wpływu fluktuacji powietrza na niepewność całkowitą pomiaru. W niniejszej pracy ograniczono się do rozważań związanych z oszacowaniem niepewności pomiaru związanej wyłącznie z fluktuacyjnym charakterem przepływu powietrza.

Równanie (14) będzie miało wówczas postać

$$u_{cp}^2(v_0) = u^2(V_0) + \overline{u^2(d_F)} + u^2(\bar{d}_F) \quad (16)$$

gdzie, $\overline{u^2(d_F)}$ jest średnią wariancji poprawki d_F , $u^2(\bar{d}_F)$ jest wariancją średniej poprawki \bar{d}_F .

Niepewność standardowa pomiaru będzie wyrażona przez dodatni pierwiastek kwadratowy wariancji złożonej, danej równaniem (16).

Jak założono wcześniej, w przypadku mikroprocesorowych czujników skrzydełkowych, wyposażonych w nieulotną pamięć charakterystyki oraz adjustowanych i wzorcowanych w tym samym laboratorium możemy przyjąć, że wartość poprawek na charakterystykę statyczną będzie równa zero. Wówczas równanie (12), korzystając z zależności (15) można zapisać jako

$$v_0 = V_0 - \bar{d}_F \quad (17)$$

Ponieważ poprawka d_F nie jest uwzględniana w wyniku pomiaru ($v_0 = V_0$) powinniśmy o wartość tej poprawki powiększyć niepewność rozszerzoną pomiaru (GUM, 1999). Wynik pomiaru będzie wówczas równy

$$v_0 = V_0 \pm U \quad (18)$$

U jest niepewnością rozszerzoną określoną wzorem, w którym uwzględnia się średnią poprawkę \bar{d}_F

$$U = k \cdot u_{cp}(v_0) + \bar{d}_F \quad (19)$$

gdzie k jest współczynnikiem rozszerzenia i $k = 2$ dla poziomu ufności $p = 95,45\%$, $u_c(v_0)$ jest niepewnością standardową pomiaru odpowiadającą dodatniemu pierwiastkowi kwadratowemu wariancji złożonej danej wzorem (16).

Dla wyznaczenia średniej wariancji $\overline{u^2(d_F)}$, wariancji średniej $u^2(\overline{d_F})$ i wartości oczekiwanej $\overline{d_F}$, przyjęto, że wariancja zmiennej losowej fluktuacji prędkości v_e jest ciągłą zmienną losową w , o gęstości $f_w(w)$ i skoncentrowaną w przedziale $(0, w_g)$.

Przy spełnieniu warunku

$$w_g < \frac{V_0^2}{4} \quad (20)$$

funkcja (11) w przedziale $(0, w_g)$ jest rzeczywista i ściśle monotoniczna. Gęstość zmiennej d_F w przedziale $(0, w_g)$ jest więc równa (Pacut, 1985)

$$f_g(d_F) = |V_0 - 2d_F| f_w(V_0 d_F - d_F^2) \quad (21)$$

Poza tym przedziałem funkcja (21) przybiera wartość zero.

Wartość oczekiwaną, wariancję i wartość średnią wariancji zmiennej d_F można wyrazić związkami (Krach, Krawczyk, Kruczkowski, Pałka, 2006)

$$\overline{d_F} = \int_0^{w_g} d_F(w) f_w(w) dw \quad (22)$$

$$u^2(\overline{d_F}) = \int_0^{w_g} d_F^2(w) f_w(w) dw - \overline{d_F}^2 \quad (23)$$

$$\overline{u^2(d_F)} = \frac{1}{4w_g} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{w_g}{V_0^2}} \right) \int_0^{w_g} w^2 f_w(w) dw \quad (24)$$

Aby obliczyć wartości (22), (23), (24) należy określić funkcję gęstości wariancji $f_w(w)$. Na podstawie pomiarów termoanemometrycznych przeprowadzonych w wyrobisku kopalni (częstotliwość pomiarów wynosiła 33 Hz), przyjmując odchylenie standardowe składowej fluktuacji prędkości powietrza w granicach $0,15 v_0$ m/s i $0,25 v_0$ m/s, i zakładając prostokątny rozkład gęstości dla odchylenia standardowego, funkcja gęstości została określona zależnością

$$f_w(w) = \frac{5}{v_0 \sqrt{w}} \quad (25)$$

dla przedziału (w_1, w_2) , gdzie $w_1 = 0,0225 v_0^2$, $w_2 = 0,0625 v_0^2$.

Przyjmując, że najlepszą estymatą średniej prędkości jest wartość wskazywana przez anemometr, czyli $v_0 = V_0$, gęstość zmiennej d_F na podstawie (21) i (25) jest równa

$$f_g(d_F) = \frac{5(V_0 - 2d_F)}{V_0 \sqrt{V_0 d_F - d_F^2}} \quad (26)$$

i jest skoncentrowana w przedziale (d_{F1}, d_{F2}) , gdzie $d_{F1} = 0,023 V_0$ i $d_{F2} = 0,067 V_0$.

Wartości (22), (23), (24) będą więc równe

$$\overline{d_F} = \frac{5}{V_0} \int_{d_{F1}}^{d_{F2}} \frac{d_F (V_0 - 2d_F)}{\sqrt{V_0 d_F - d_F^2}} dd_F = 0,043 \cdot V_0 \quad (27)$$

$$u^2(\bar{d}_F) = \frac{5}{V_0} \int_{d_{F1}}^{d_{F2}} \frac{d_F(V_0 - 2d_F)}{\sqrt{V_0 d_F - d_F^2}} dd_F - \bar{d}_F^2 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot V_0^2 \quad (28)$$

$$\overline{u^2(d_F)} = \frac{1}{12(w_2 - w_1)} \ln \left(\frac{1 - \frac{w_1}{V_0^2}}{1 - \frac{w_2}{V_0^2}} \right) (w_2^2 + w_2 w_1 + w_1^2) = 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot V_0^2 \quad (29)$$

W opisywanych w tej pracy eksperymentach pomiarowych użyto czujników skrzydełkowych o zakresie pomiarowym 20 m/s i błędzie granicznym pomiaru prędkości wynoszącym $\Delta v_{\max} = 2\%$.

Niepewność standardowa pomiaru dla poziomu ufności $p = 95,45\%$ będzie równa

$$u(V_0) = \frac{0,4}{2} = 0,2 \text{ m/s} \quad (30)$$

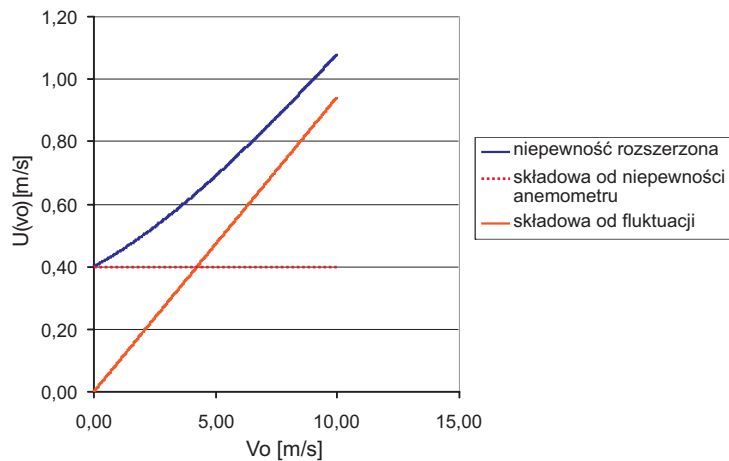
a wariancja

$$u^2(V_0) = 0,04 \text{ (m/s)}^2 \quad (31)$$

Przyjmując, że rozkład zmiennej losowej v_0 jest rozkładem normalnym, niepewność rozszerzona pomiaru prędkości anemometrycznym czujnikiem skrzydełkowym, uwzględniająca wpływ fluktuacji przepływu będzie miała postać

$$U(v_0) = 2\sqrt{u^2(V_0) + \overline{u^2(d_F)} + u^2(\bar{d}_F) + \bar{d}_F} = 2\sqrt{0,04 + 0,00066 \cdot V_0^2} + 0,043 \cdot V_0 \quad (32)$$

W równaniu (32) możemy wyróżnić składową pochodzącą od niepewności pomiaru czujnikiem skrzydełkowym i składową pochodzącą od fluktuacji prędkości przepływu. Przebieg zależności niepewności rozszerzonej i jej składników w funkcji prędkości średniej dla przedziału od 0 do 10 m/s przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność niepewności od prędkości średniej

3. Pomiary prędkości lokalnych powietrza w wyrobiskach kopalń

Pomiary prędkości lokalnych powietrza w wyrobiskach kopalni zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu bezprzewodowego systemu anemometrycznego pozwalającego na jednoczesny pomiar w wielu punktach przekroju poprzecznego wyrobiska. System wyposażony jest w czujniki skrzydełkowe o parametrach metrologicznych i mechanicznych takich samych jakie miały czujniki wykorzystane do badań

mających na celu stworzenie modelu teoretycznego przedstawionego wcześniej. Parametry czujników były następujące:

- zakres pomiarowy: +/- 20,00 m/s
- rozdzielczość pomiaru: 0,01 m/s
- graniczny błąd pomiaru: 1 %
- częstotliwość pomiarów: 1 Hz
- średnica skrzydełka: 96 mm

Przed wykonaniem pomiarów wszystkie czujniki poddano procesowi adjustacji i wzorcowania. Czujnik, a także sposób montażu pozwalający wyeliminować ewentualne zakłócenia przepływu pochodzące od systemu nośnego pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Skrzydełkowy czujnik anemometryczny z radiową transmisją danych

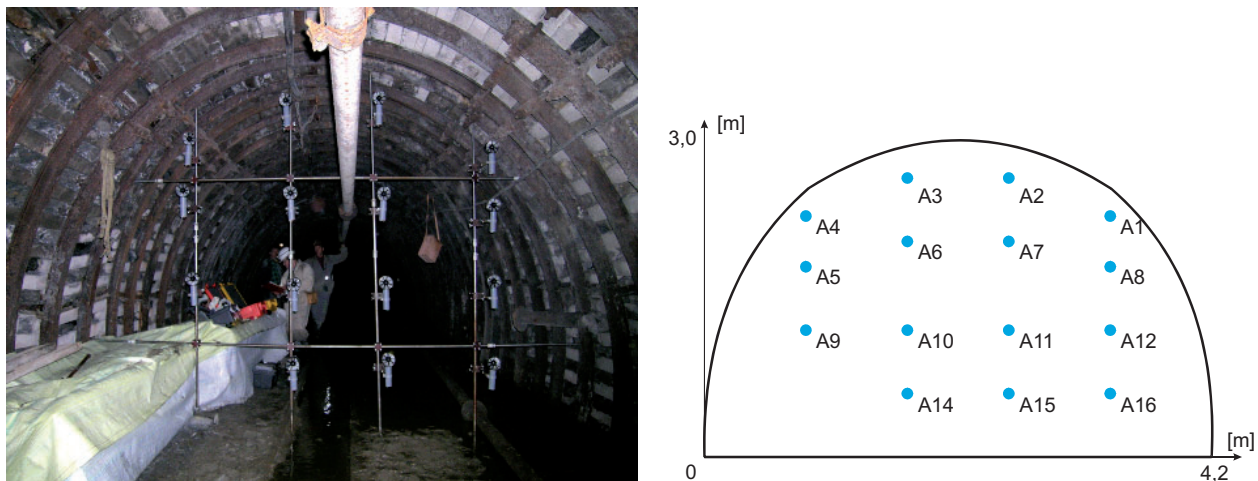
W celu uzyskania danych pomiarowych wybrano trzy różne lokalizacje czujników, spodziewając się zarejestrowania lokalnych prędkości z różnymi fluktuacjami. We wszystkich przypadkach poddanych późniejszej analizie obserwowane sygnały prędkości miały charakter stacjonarny. Liczba zastosowanych czujników zależała od wielkości pola przekroju w którym wykonywano pomiary, a ich rozmieszczenie starano się wykonać w taki sposób, aby było zbliżone do zaleceń podawanych w normach dotyczących rozmieszczenia punktów pomiarowych podczas pomiarów strumienia objętości powietrza w przewodach. W przypadku wyrobisk o sklepieniu łukowym, rozmieszczenie czujników było intuicyjne, pozwalające na uzyskanie danych z różnych punktów przekroju.

Każdy z czujników przekazywał na bieżąco pomiary drogą radiową do komputera zarządzającego systemem, co pozwalało na bezpośredni podgląd przebiegu procesu pomiarowego.

3.1. Pomiary w chodniku z obudową łukową stalową

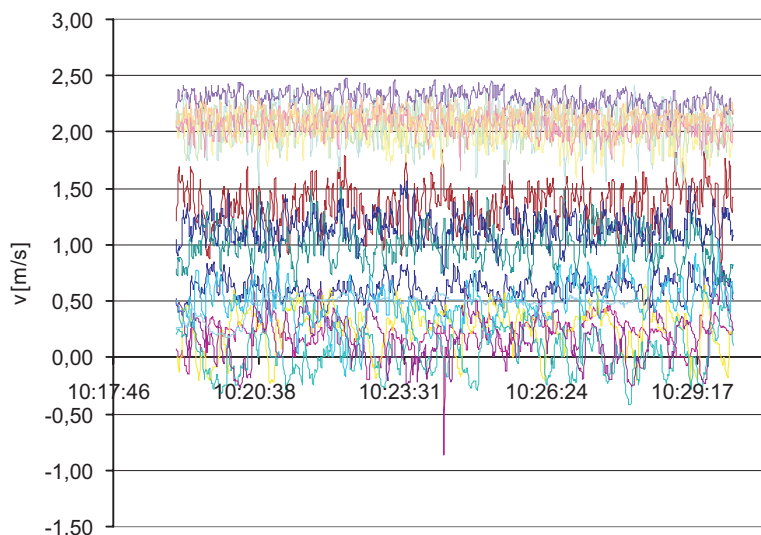
Na rys. 3 pokazano sposób rozmieszczenia czujników w przekroju zabudowanym stalową obudową łukową typu ŁP. Przestrzenie międzyłukowe były wyłożone betonowymi bloczkami. Na spągu, w narożu chodnika, znajdowały się elementy konstrukcyjne owinięte płótnem wentylacyjnym. Zastosowano 15 czujników skrzydełkowych o numerach od 1 do 15, zamocowanych do sztywnej konstrukcji nośnej w kolejności pokazanej na rysunku. Jedynym elementem konstrukcyjnym znajdującym się w przekroju chodnika był podwieszany po stropem rurociąg. Kilka metrów przed przekrojem pomiarowym występowała skokowa zmiana kształtu i pola przekroju wyrobiska. Od strony napływu powietrza znajdował się odcinek o przekroju prostokątnym i betonowych ścianach, który przechodził w obudowę łukową. Struga ukształtowana przez prostokątny przekrój miała wpływ na profil prędkości w przekroju pomiarowym. Przekrój obejmował również strefę recyrkulacji powietrza na granicy strugi. Miejsce to wybrano dla sprawdzenia zdolności czujników pomiarowych do rejestrowania odwróceń przepływu i możliwości pomiarowych systemu w niekorzystnych warunkach przepływowych.

Przeprowadzono kilkudziesięciominutową obserwację sygnałów prędkości przepływu powietrza. W tym czasie wykonano regulację w sieci przy pomocy tamy wentylacyjnej. Pozwoliło to na rejestrację prędkości lokalnych podczas stanów przejściowych i dla dwóch stanów ustalonych różniących się wartościami średnimi.



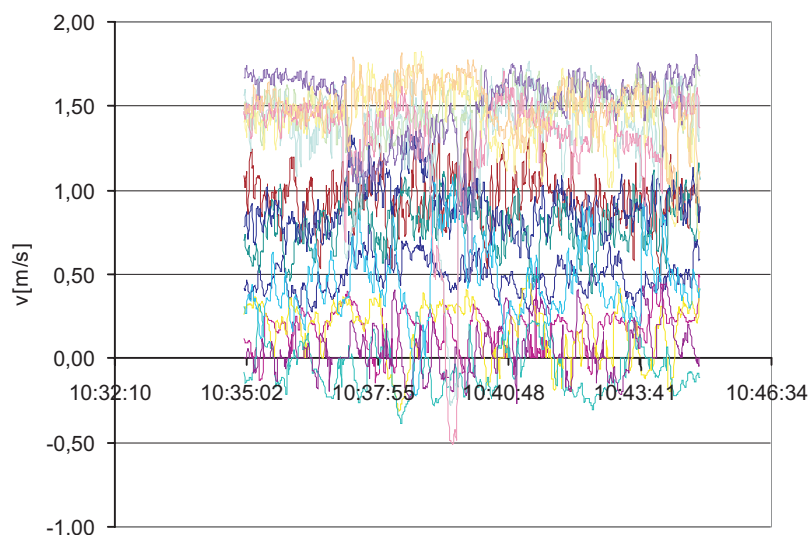
Rys. 3. Rozmieszczenie czujników w wyrobisku z obudową łukową metalową

Fragment rejestracji pola prędkości dla pierwszego ustalonego stanu przewietrzania, charakteryzującego się większymi wartościami średnimi, pokazano na rys. 4. Rejestracja pola prędkości dla drugiego ustalonego stanu przewietrzania, o mniejszych wartościach średnich prędkości, jest przedstawiona na rys. 5. W obu przypadkach widoczne są silne wahania wartości chwilowych prędkości wokół ustalonych wartości średnich.



Rys. 4. Rejestracja pola prędkości o większych wartościach średnich dla ustalonego stanu przewietrzania wyrobiska z obudową łukową

Czujniki umieszczone pod stropem i w lewym górnym narożu chodnika rejestrowały najmniejsze wartości średnie prędkości. W tych miejscach wystąpiły także recyrkulacje. Obydwa zjawiska miały miejsce zarówno przy jednym jak i drugim stanie przewietrzania.



Rys. 5. Rejestracja pola prędkości o mniejszych wartościach średnich dla ustalonego stanu przewietrzania wyrobiska z obudową łukową

W tabelach 1 i 2 zostały przedstawione wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie uzyskanych danych pomiarowych, odpowiednio dla przepływu o większych wartościach średnich i o mniejszych wartościach średnich. Dla każdego czujnika obliczono prędkość średnią V_0 , odchylenie standardowe eksperymentalne $q(v)$, oraz niepewność rozszerzoną $U(v_0)$. Zgodnie z zależnością (32) niepewność rozszerzona została dodatkowo zapisana w postaci dwóch składowych; składowej od niepewności standardowej pomiaru $u_c(V_0)$ i składowej fluktuacyjnej.

Tab. 1

| Numer czujnika | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 0,61 | 0,20 | 0,26 | 0,04 | 0,18 | 1,35 | 1,00 | 1,15 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,09 | 0,13 | 0,19 | 0,19 | 0,21 | 0,18 | 0,16 | 0,13 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,43 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,41 | 0,46 | 0,45 | 0,45 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,003 | 0,02 | 0,13 | 0,09 | 0,11 |
| Numer czujnika | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 0,48 | 2,09 | 2,06 | 2,00 | | 2,06 | 2,30 | 2,14 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,17 | 0,15 | 0,12 | 0,12 | | 0,09 | 0,07 | 0,08 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,42 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | | 0,50 | 0,52 | 0,51 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,05 | 0,20 | 0,19 | 0,19 | | 0,19 | 0,22 | 0,20 |

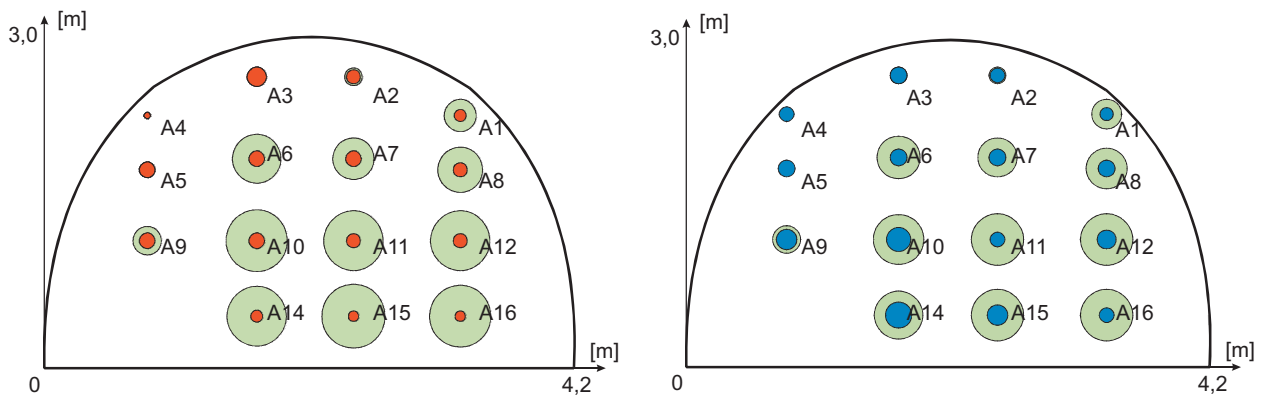
Tab. 2

| Numer czujnika | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 0,49 | 0,17 | 0,17 | 0,06 | 0,06 | 0,95 | 0,79 | 0,91 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,10 | 0,12 | 0,17 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,40 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,001 | 0,01 | 0,09 | 0,07 | 0,09 |
| Numer czujnika | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 0,46 | 1,34 | 1,47 | 1,44 | | 1,31 | 1,50 | 1,51 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,22 | 0,34 | 0,13 | 0,18 | | 0,35 | 0,22 | 0,14 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,42 | 0,46 | 0,47 | 0,47 | | 0,46 | 0,47 | 0,47 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,04 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | | 0,12 | 0,14 | 0,14 |

Jak wynika z tabeli 1 prędkości średnie zawierały się w granicach od 0,04 do 2,30 m/s a ich odchylenia standardowe były zawarte w przedziale od 0,07 do 0,21 m/s. Niepewność rozszerzona pomiaru ze względu na jego fluktuacje miała wartości od 0,40 do 0,52 m/s.

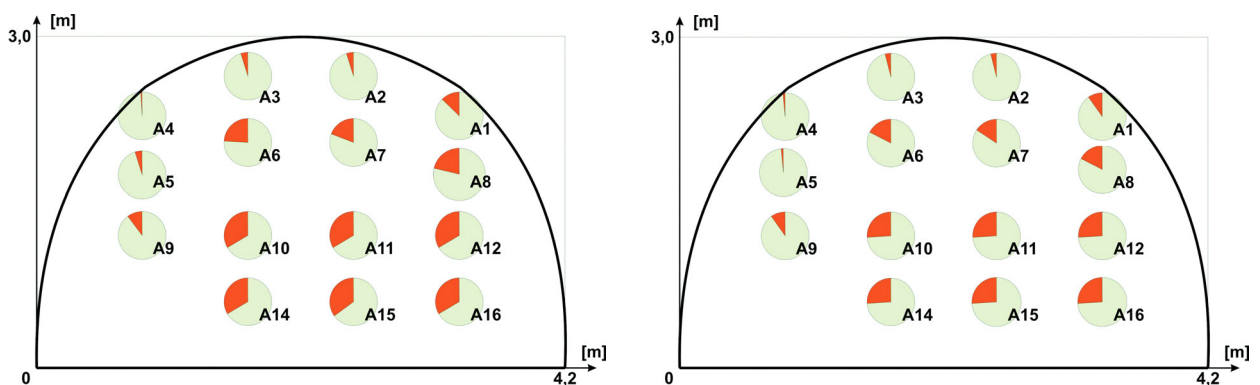
Dla drugiego stanu przewietrzania (tabela 2) prędkości średnie zawierały się w granicach od 0,06 do 1,51 m/s, a odchylenia standardowe były zawarte w przedziale od 0,1 do 0,35 m/s. Niepewność rozszerzona pomiaru ze względu na jego fluktuacje miała wartości od 0,40 do 0,50 m/s.

Pole prędkości średnich i ich odchylenia standardowe dla obu stanów przewietrzania zobrazowano graficznie na rysunku 6. Pola powierzchni kół odpowiadają wartościom odpowiednio prędkości i odchyłeń standardowych. Taka forma prezentacji wyników pozwala pokazać wielkości z szerszego przedziału, wartościom większym odpowiadają okręgi o większej średnicy, jednak przy ocenie proporcji porównywanych wielkości wygodniej jest skorzystać z danych z tabeli.



Rys. 6. Pole prędkości średnich (kolor jaśniejszy) i ich odchylenia standardowe (kolor ciemniejszy), dla większych (wykres lewy) i mniejszych (wykres prawy) prędkości średnich

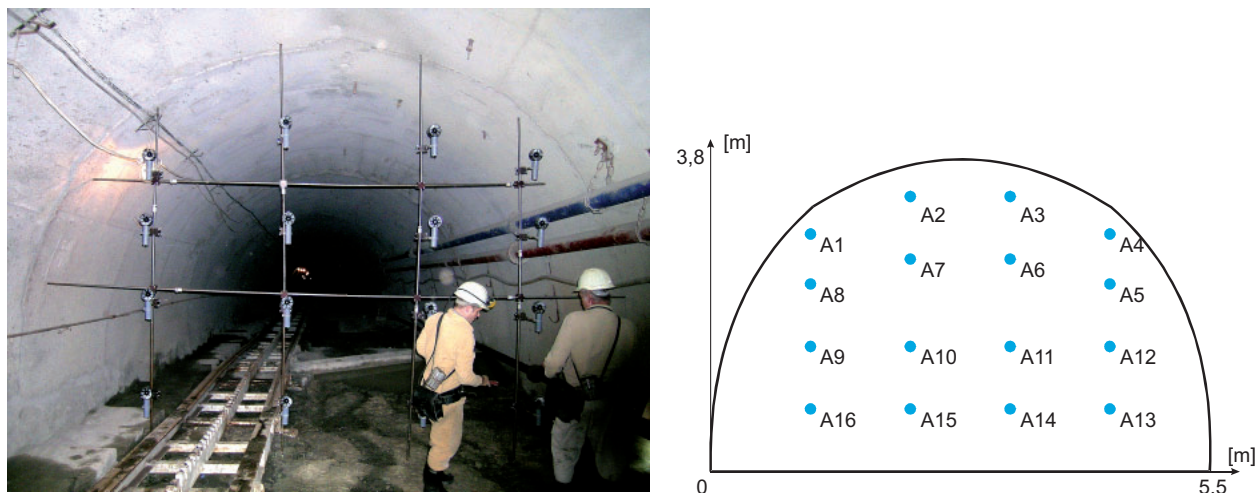
Z informacji zawartych w tabeli 1 i 2 wynika, że wartości niepewności rozszerzonych pomiarów są porównywalne dla obu stanów przewietrzania wyrobiska. Występują natomiast różnice ich składowych, co zostało przedstawione na rys. 7. W większości punktów pomiarowych dominującą rolę odgrywa składowa niepewności standardowej, związana z anemometrem. Składowa fluktuacyjna niepewności ulega zmniejszeniu w przepływie o mniejszych wartościach średnich prędkości.



Rys. 7. Porównanie wielkości składowej od niepewności standardowej pomiaru (kolor jaśniejszy) i składowej od fluktuacji (kolor ciemniejszy) w niepewności rozszerzonej, dla większych (wykres lewy) i mniejszych (wykres prawy) prędkości średnich w wyrobisku z obudową stalową łukową

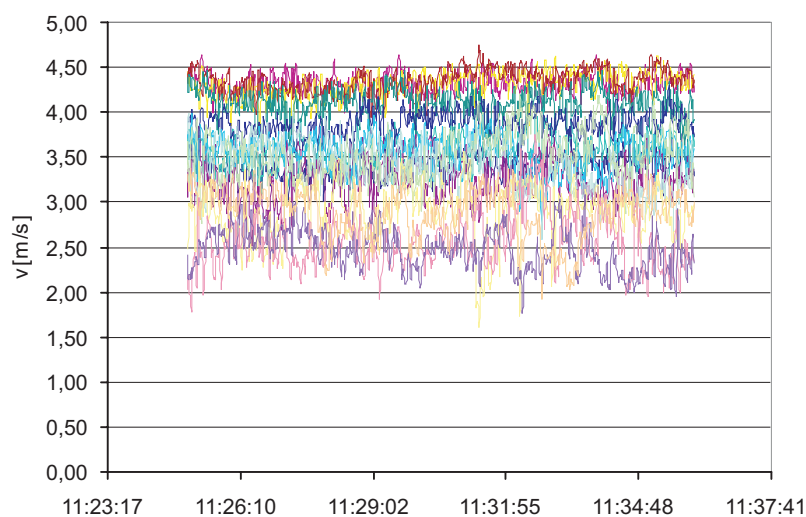
3.2. Pomiary w upadowej odstawczo-transportowej

Następne pomiary wykonano w upadowej odstawczo-transportowej. Obudowa upadowej była wykonana z wygładzonego żelbetonu, a jej wymiary geometryczne przewyższały wymiary poprzedniego obiektu w którym przeprowadzono pomiary. W badaniach wykorzystano 16 czujników anemometrycznych w konfiguracji pokazanej na rys. 8.



Rys. 8. Rozmieszczenie czujników w upadowej odstawczo-transportowej

Spąg upadowej był nierówny i o znacznej chropowatości, a po jego lewej stronie ułożono szyny kolejki. Poza dwoma rurociągami o małej średnicy umieszczonymi przy ścianie bocznej, w rejonie pomiarów nie występowały żadne dodatkowe elementy mogące zakłócać przepływ. Wykonano kilkudziesięciominutową rejestrację. Wybrany fragment zarejestrowanych przebiegów prędkości pokazany został na rys. 9.



Rys. 9. Rejestracja pola prędkości w upadowej odstawczo-transportowej

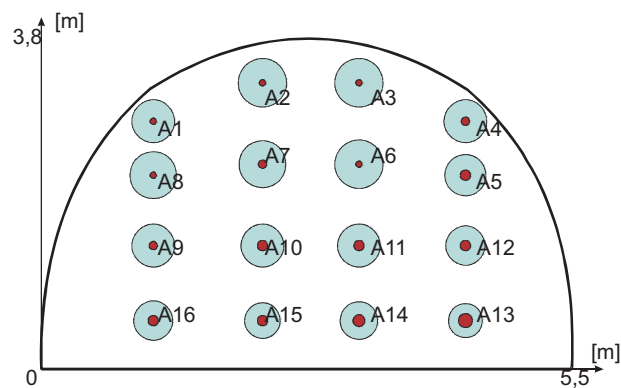
Wyniki pomiarów i obliczone wielkości charakteryzujące ich niepewności zamieszczono w tabeli numer 3. Wartości lokalnych prędkości średnich mieściły się w przedziale od 2,21 do 4,36 m/s. Największe prędkości występowały pod stropem. Odchylenie standardowe zawiera się w granicach od 0,11 do 0,45 m/s. Niepewność rozszerzona pomiaru zmienia się od 0,51 do 0,65 m/s.

Tab. nr 3

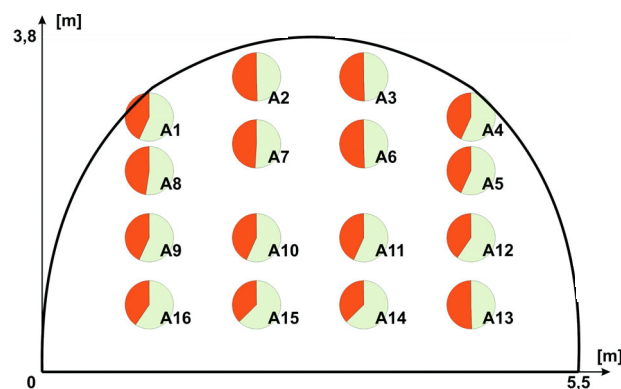
| Numer czujnika | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 3,41 | 4,33 | 4,31 | 3,57 | 3,24 | 4,36 | 4,11 | 3,88 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,13 | 0,11 | 0,13 | 0,17 | 0,23 | 0,13 | 0,15 | 0,13 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,58 | 0,64 | 0,64 | 0,59 | 0,57 | 0,65 | 0,63 | 0,61 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,32 | 0,41 | 0,41 | 0,34 | 0,31 | 0,41 | 0,39 | 0,37 |
| Numer czujnika | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 3,57 | 3,41 | 3,51 | 2,89 | 2,21 | 2,55 | 2,47 | 2,90 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,19 | 0,25 | 0,25 | 0,28 | 0,45 | 0,29 | 0,22 | 0,27 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,59 | 0,58 | 0,59 | 0,55 | 0,51 | 0,53 | 0,53 | 0,55 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,34 | 0,32 | 0,33 | 0,27 | 0,21 | 0,24 | 0,23 | 0,27 |

Na rys. 10 zobrazowano pole prędkości średnich i odpowiadających im odchyleniom standardowym wartości prędkości chwilowych. Największe wartości odchylenia występują w dolnej części upadkowej. Jest to związane z ukształtowaniem spągu, a także najpewniej z obecnością na nim torowiska. Małe wartości odchylenia standardowego prędkości lokalnych widoczne są w części przystropowej.

Rysunek 11 pokazuje udziały poszczególnych składowych w niepewności rozszerzonej pomiaru.



Rys. 10. Pole prędkości średnich (kolor jaśniejszy) i ich odchylenia standardowe (kolor ciemniejszy) dla pomiarów w upadkowej odstawczo-transportowej

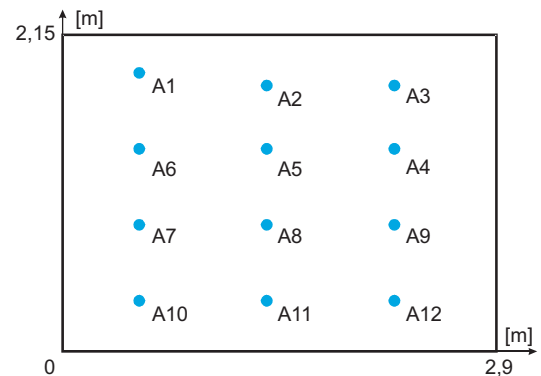


Rys. 11. Porównanie wielkości składowej niepewności standardowej pomiaru (kolor jaśniejszy) i składowej fluktuacji (kolor ciemniejszy) w niepewności rozszerzonej dla pomiarów w upadkowej odstawczo-transportowej

Widoczne jest zwiększenie w niepewności rozszerzonej udziału składowej pochodzącej od fluktuacji, szczególnie dla czujników umieszczonych pod stropem. Wielkości udziałów obu składowych w tym miejscu są porównywalne.

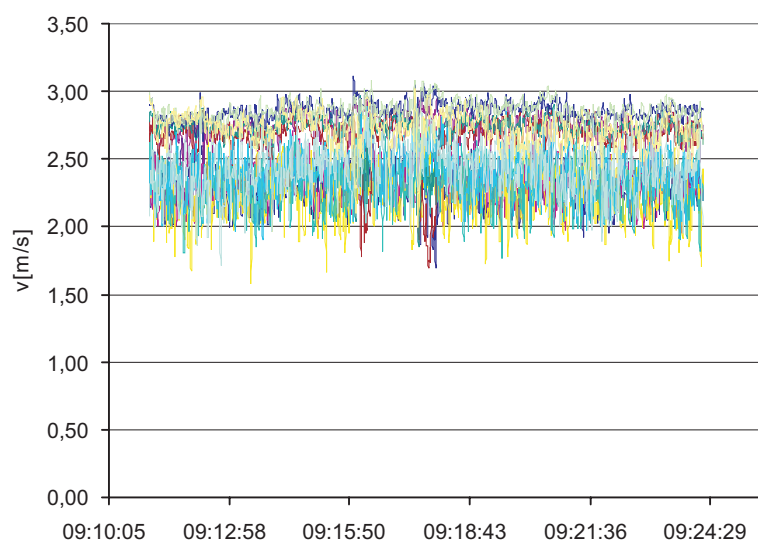
3.3. Pomiary w odrzwiach tamy bezpieczeństwa

Kolejny eksperyment pomiarowy został przeprowadzony z wykorzystaniem odrzwi tamy bezpieczeństwa. Użyto 12 czujników anemometrycznych rozmieszczonych w świetle tamy w sposób pokazany na rysunku nr 12. Ocios chodnika przed i za tamą obudowany był łukami stalowymi i wyłożony siatką. Chodnikiem było doprowadzane powietrze bezpośrednio do rejonu ściany wydobywczej będącej w eksploatacji.



Rys. 12. Rozmieszczenie czujników w odrzwiach tamy bezpieczeństwa

W ustalonym stanie przewietrzania zarejestrowano prędkości lokalne. Fragment rejestracji pokazany jest na rys. 13. Widoczne jest znaczne spłaszczenie profilu prędkości w porównaniu do wcześniejszych rejestracji. Wykonywanie pomiarów prędkości lokalnych w odrzwiach tamy jest szczególnie korzystne przy wyznaczaniu strumienia objętości, ze względu na łatwość uzyskania informacji o wielkości przekroju czynnego, przez który przepływa strumień.



Rys. 13. Rejestracja pola prędkości w odrzwiach tamy bezpieczeństwa

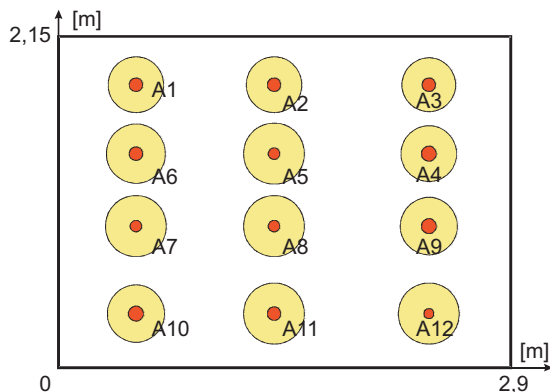
W tabeli 4 zawarte są liczbowe wyniki pomiarów i obliczeń. Prędkości średnie zmieniają się w granicach od 2,22 m/s do 2,78 m/s. Odchylenia standardowe prędkości mieszczą się w przedziale od 0,11 do 0,19 m/s. Niepewności rozszerzone pomiaru ze względu na fluktuacje, różnią się od siebie niewiele i mieszczą się w granicach od 0,51 do 0,54 m/s.

Tab. nr 4

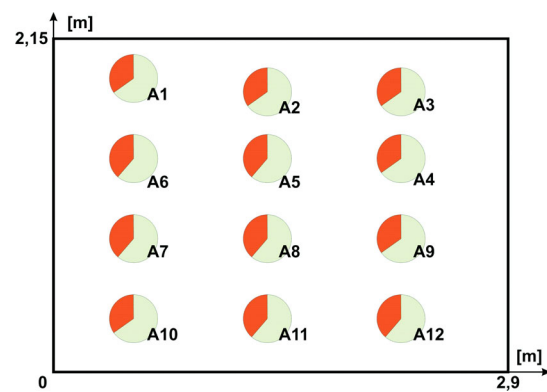
| Numer czujnika | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 2,27 | 2,29 | 2,22 | 2,29 | 2,67 | 2,65 | 2,71 | 2,78 |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,16 | 0,15 | 0,17 | 0,19 | 0,11 | 0,17 | 0,12 | 0,13 |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,51 | 0,52 | 0,51 | 0,52 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,54 |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,26 |
| Numer czujnika | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Prędkość średnia V_0 [m/s] | 2,38 | 2,38 | 2,79 | 2,78 | | | | |
| Odchylenie standardowe $q(v)$ [m/s] | 0,18 | 0,19 | 0,14 | 0,11 | | | | |
| Niepewność rozszerzona $U(v_0)$ [m/s] | 0,52 | 0,52 | 0,54 | 0,54 | | | | |
| Składowa od niepewności pomiaru [m/s] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | | | | |
| Składowa od fluktuacji [m/s] | 0,22 | 0,22 | 0,26 | 0,26 | | | | |

Pole średnich prędkości i odchyleń standardowych prędkości lokalnych przedstawiono na rysunku 14. Widoczne jest słabe zróżnicowanie jednej i drugiej wielkości. Potwierdza to, że wybór odrzwi tamy w celu uzyskania danych pomiarowych do wyznaczania strumienia objętości, jest korzystniejszy niż wybór którejs z poprzednich lokalizacji. Wybór ten jest szczególnie korzystny przy metodzie pomiaru anemometrem ręcznym z wykorzystaniem techniki trawersu ciągłego. Zmniejszeniu ulegają składniki niepewności pochodzące od zmian profilu prędkości i zmian prędkości trawersowania.

Jak pokazano na rys. 15 składowa niepewności rozszerzonej pochodząca od niepewności standardowej dominuje dla każdego pomiaru lokalnego.



Rys. 14. Pole prędkości średnich (kolor jaśniejszy) i ich odchyleń standardowych (kolor ciemniejszy) dla pomiarów w odrzwiach tamy bezpieczeństwa



Rys. 15. Porównanie wielkości składowej niepewności standardowej pomiaru (kolor jaśniejszy) i składowej fluktuacji (kolor ciemniejszy) w niepewności rozszerzonej pomiaru, dla pomiarów w odrzwiach tamy bezpieczeństwa

4. Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty pomiarowe stanowią wstęp do prac mających na celu oszacowanie niepewności metody pomiaru strumienia objętości powietrza w wyrobisku górniczym z wykorzystaniem wielopunktowego systemu pomiaru pola prędkości przy pomocy anemometrów skrzydełkowych.

Niepewności rozszerzone pomiaru prędkości lokalnych ze względu na fluktuacje, mają znaczące wartości i nie mogą być pomijane przy podawaniu niepewności strumienia objętości. Należy pamiętać, że do wartości niepewności złożonej strumienia objętości przy metodzie wielopunktowego pomiaru anemometrycznego, zostanie dodany składnik pochodzący od niepewności wyznaczania pola przekroju.

W celu dalszego weryfikowania poprawności przyjętej funkcji gęstości wariancji zmiennej losowej fluktuacji prędkości, niezbędne staje się uzyskanie większej ilości danych o fluktuacjach przepływów w różnych wyrobiskach. W tym celu należy wykorzystać szerokopasmowe czujniki termooanemometryczne.

Należy wykonać powtórnie pomiary systemem wielopunktowym w wyrobiskach z obudową łukową stalową, aby uzyskać miarodajne dane dla typowych odcinków takich wyrobisk.

Dominiacja, wraz ze wzrostem prędkości średnich, składowej niepewności pochodzącej od fluktuacji, sugeruje podjęcie prac nad osłabieniem wrażliwości czujnika skrzydełkowego na fluktuacje, a tym samym zmniejszenie błędu pomiaru. Czujnik skrzydełkowy ma najlepiej ze wszystkich typów anemometrów stosowanych w polskich kopalniach rozpoznane czynniki wnoszące udział do niepewności pomiaru. Jest ich stosunkowo niewiele, a znaczącym jest czynnik pochodzący od fluktuacji. Jego zmniejszenie stanowiłoby istotny krok w kierunku zmniejszenia niepewności wyznaczania strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalnianych.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń wydaje się, że istnieje szansa na częściowe korygowanie wpływu fluktuacji na błąd pomiaru skrzydełkowym czujnikiem anemometrycznym na podstawie analizy rejestrowanych zmian prędkości mierzonej. Od strony technicznej jest obecnie możliwe zastosowania w czujnikach anemometrycznych szybkich procesorów mogących wykonywać zaimplementowane algorytmy korekcyjne. Aby zbudować takie algorytmy, konieczne jest jednak wykonanie szeregu pomiarów porównawczych in situ, pomiędzy czujnikiem skrzydełkowym a termooanemometrycznym. Przeprowadzenie pomiarów nie jest jednak łatwe ze względu na wrażliwość tych ostatnich na parametry fizyko-chemiczne środowiska kopalnianego i brak dostatecznego rozpoznania wszystkich składników niepewności pomiaru czujnikiem termooanemometrycznym.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Chmiel W., Kruczkowski J., 2005: *Badanie wpływu zaburzeń profilu prędkości powietrza na pomiary wykonywane anemometrami stacjonarnymi różnych typów*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN. Tom 7, nr 1-2. Kraków.
- Dziurzyński W., 1996: *Optymalna lokalizacja w przekroju wyrobiska stacjonarnego anemometru systemu monitoringu sieci wentylacyjnej kopalni*. Archives of Mining Sciences, Vol. 41, Issue 3, Kraków.
- Burrows J., Hemp R., Holding W., Stroch R.M. 1989: *Environmental Engineering In South African Mines*. Wyd. Mine Ventilation Society of South Africa.
- GUM, 1999: *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. Główny Urząd Miar RP. Warszawa.
- Krach A., 2004: *Źródła niepewności w kopalnianych pomiarach wentylacyjnych*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Special Issue, Kraków.
- Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., 2006: *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych*. Archives of Mining Sciences, Monograph 1, Kraków.
- Kruczkowski J., 2008: *Analiza porównawcza danych z przetworników prędkości stosowanych w monitoringu wentylacji kopalń*. Przegląd Górniczy.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., 1998: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach*. PWN, Warszawa.
- Pacut A., 1985: *Prawdopodobieństwo, teoria, modelowanie probabilistyczne w technice*. WNT, Warszawa.

Research on velocity sensors and transducers applied the measurement of velocity field and flow rate – designation of error sources and uncertainty analysis

Abstract

What the measurements actually provides is the estimate of measured value. Therefore it should be given together with uncertainty of such estimate, which is a parameter characterizing dispersion of values, which in justified way may be attributed to the measured value. Anemometric sensors applied in measurements of the velocity field and volumetric flow rate are sensitive to several factors causing the measurement error. In case of the modern, stationary vane anemometers of the smart type, the dominant uncertainty factor originates from the flow fluctuations. Vane anemometer does not measure fluctuations directly. Therefore there is no way to implement a correction e.g. directly as a function of the electronic circuit of the sensor. The aim of the research described in this paper was to estimate the effect of flow fluctuations on the measurement uncertainty. Formal and experimental analysis provided formulae for extended uncertainty. This estimate was applied for data acquired by series of multipoint velocity measurements in crosssections of various mine workings. Magnitude of the uncertainty itself and individual shares of particular factors was compared. Properties of the vane sensor have proven to be the main component of the uncertainty.

Keywords: uncertainty of air velocity measurement, vane anemometer, flow velocity fluctuations, mine ventilation multipoint velocity measurement, velocity field, volumetric flow rate

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Wasilewski*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN