

Dynamika anemometru a średnia prędkość przepływu

PAWEŁ JAMRÓZ

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę dynamiki czujników pomiarowych wykorzystywanych w kopalnianych pomiarach wentylacyjnych na przykładzie anemometru skrzydełkowego. Zagadnienie to bezpośrednio związane jest z oceną niepewności wykonywanych pomiarów wentylacyjnych. Zaprezentowano badania symulacyjne odpowiedzi dynamicznego modelu anemometru skrzydełkowego na zmieniającą się wartość mierzonej prędkości wynikającą bezpośrednio z trajektorii modelowanego trawersu ciągłego w przekroju wyrobiska kopalnianego oraz dokonano próby oceny wpływu skończonej dynamiki takiego przyrządu na pomiar wartości średniej prędkości.

Słowa kluczowe: właściwości dynamiczne, anemometr, błąd dynamiczny, strumień objętości powietrza

1. Wstęp

Każdy pomiar obarczony jest niepewnością, w trakcie wyznaczania której należy wziąć pod uwagę maksymalną liczbę czynników, które wpływają na wartość podawaną jako wynik pomiaru. Część z nich pochodzi od niedokładnej znajomości charakterystyk statycznych przetworników pomiarowych, ich rozdzielczości czy własności przetworników analogowo-cyfrowych. Inne związane są z warunkami, w jakich przetworniki te muszą pracować i ich wpływem na końcowy wynik pomiaru. Kolejne związane są z samymi metodami pomiarowymi [1]. Uwzględnienie takich czynników jest wystarczające w konstruowaniu budżetu niepewności w przypadku pomiarów statycznych, gdzie wartość wielkości mierzonej nie zmienia się w czasie. Osobną grupę czynników wpływających na całkowitą niepewność pomiarów stanowią te związane właściwościami dynamicznymi urządzeń pomiarowych. Czynniki te są często pomijane i nie uwzględniane w budżetach niepewności wykonywanych pomiarów, chociaż w określonych rodzajach pomiarów, w których wartość wielkości mierzonej zmienia się w czasie, mogą posiadać one znaczący, wpływ na końcowy wynik pomiaru. Szczególnym typem pomiarów, w których konieczne jest uwzględnianie właściwości dynamicznych przetworników są pomiary fluktuacji wartości wielkości związanych z określaniem stanu przewietrzania kopalń. Z uwagi na ciężkie warunki pracy, duże zapylenie oraz wilgotność stosowane są tam czujniki masywne często dodatkowo zabudowywane [2]. Takie zabiegi z jednej strony zwiększają odporność urządzeń, z drugiej jednak powodują zdecydowane wydłużenie ich czasowej odpowiedzi na zmiany mierzonej wielkości.

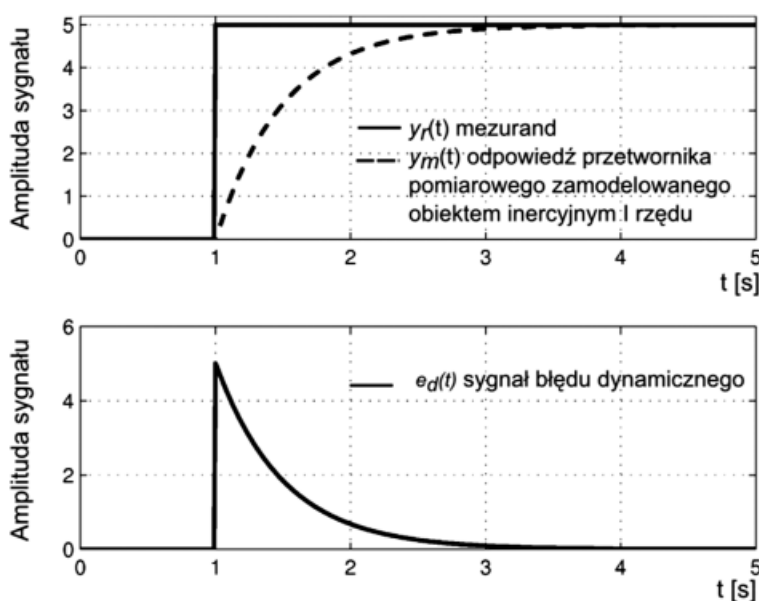
2. Błąd dynamiczny

W wyniku zakończenia pomiaru przed ustaleniem się wartości wskazywanej dochodzi do powstania błędu pomiarowego zwanego błędem dynamicznym. Przykładowo, w przypadku pomiarów temperatury błąd taki powstaje w momencie zakończenia pomiaru termometrem, przed wyrównaniem się wartości temperatury czujnika i otoczenia. Na wartość tego błędu mają wpływ właściwości dynamiczne wykorzystywanych przetworników pomiarowych oraz sama metoda pomiaru. W celu określenia właściwości dynamicznych czujników lub całych systemów pomiarowych opisuje się je modelami związanymi z ich fizycznymi właściwościami w postaci równań różniczkowych lub bardziej uniwersalnymi obiektami dynamiki wykorzystywanymi

w automatyce, elektrotechnice czy elektronice [3]. W obu przypadkach opis takich układów związany jest z wyznaczeniem zależności pomiędzy sygnałem wejściowym do układu, a sygnałem wyjściowym z tego układu. W przypadku systemów pomiarowych sygnał wejściowy związany jest z mierzandem czyli fizyczną wartością mierzonej wielkości, natomiast sygnał wyjściowy stanowi odpowiedź układu pomiarowego, czyli wynik pomiaru wartości wielkości mierzonej.

Na rysunku 1 przedstawiono odpowiedź czujnika zamodelowanego obiektem inercyjnym I-go rzędu opisanego równaniem różniczkowym (1). Obiektem takim opisywane są między innymi czujniki pomiarowe, takie jak termometryczne włókna rezystancyjne traktowane jako jednorodna bryła bez płaszcza osłonowego [4]. Właściwości dynamiczne tego obiektu określone są przez stałą czasową T_s , w analizowanym przypadku wynoszącą 0,5 s.

$$T_s \frac{dy_m(t)}{dt} + y_m(t) = y_r(t) \quad (1)$$



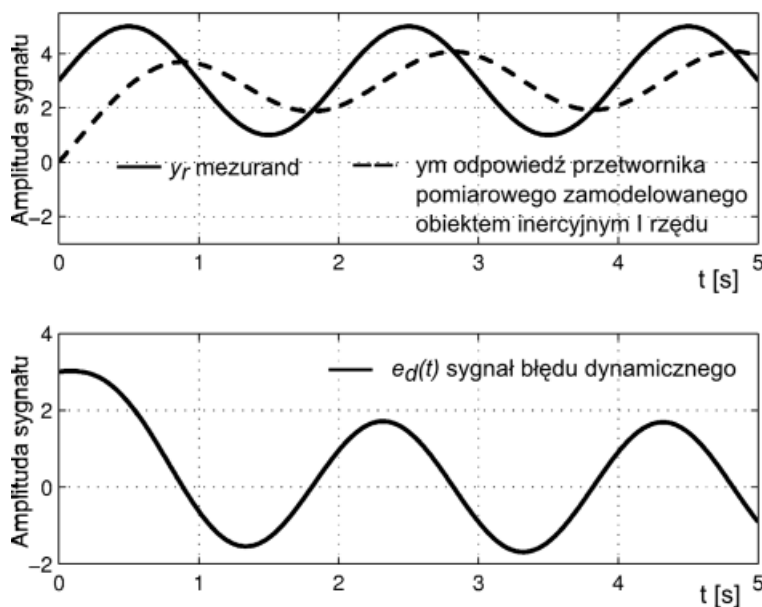
Rys. 1. Odpowiedź modelu czujnika inercyjnego na wymuszenie skokowe

Przy takim założeniu odpowiedź w ten sposób zamodelowanego czujnika, zrównuje swoją wartość z wymuszeniem dopiero po ok. 2,75 s od zmiany wartości sygnału mierzonego. Zakończenie pomiaru przed tym czasem skutkuje popełnieniem błędu pomiarowego o wartości zależnej od czasu, po jakim zakończono pomiar, a jego wartość wynosi e_d (2)

$$e_d(t) = y_r(t) - y_m(t) \quad (2)$$

Podany przykład odpowiada pomiarowi wielkości, której wartość po jednokrotnej zmianie utrzymuje się na stałym poziomie. Daje to możliwość minimalizacji wartości błęd dynamicznego poprzez odczekanie odpowiedniej ilości czasu pozwalającej na osiągnięcie wartości ustalonej odpowiedzi modelu układu pomiarowego. W rzeczywistości dominują pomiary wielkości fizycznych, które nie wykazują cech stacjonarności, a ich wartości zmieniają się w czasie. Na rysunku 2 pokazano przykład sinusoidalnych zmian sygnału wielkości stanowiącej wymuszenie dla modelu czujnika pomiarowego, opisanego zgodnie z równaniem 1. Dynamiczne zmiany wielkości mierzonej nie dają możliwości, tak opisanemu układowi pomiarowemu, nadążenia za wielkością mierzoną powodując powstanie błęd dynamicznego o zmiennych wartościach, zależnych od momentów próbkowania.

W rzeczywistości nie istnieją idealne, bezinercyjne przetworniki pomiarowe. Z uwagi na to, zawsze tam, gdzie wielkość mierzona zmienia swoją wartość w czasie istnieje ryzyko, że pomiar tej wartości obciążony będzie dodatkowym składnikiem niepewności pochodzącym od błęd dynamicznego.

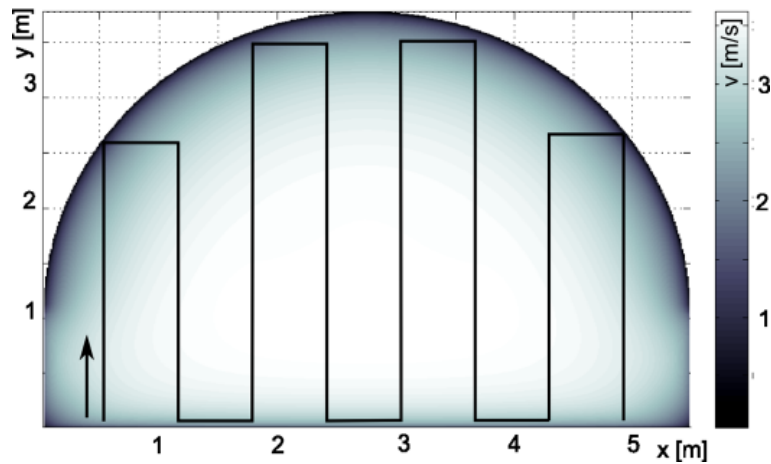


Rys. 2. Odpowiedź modelu czujnika inercyjnego na wymuszenie sinusoidalne

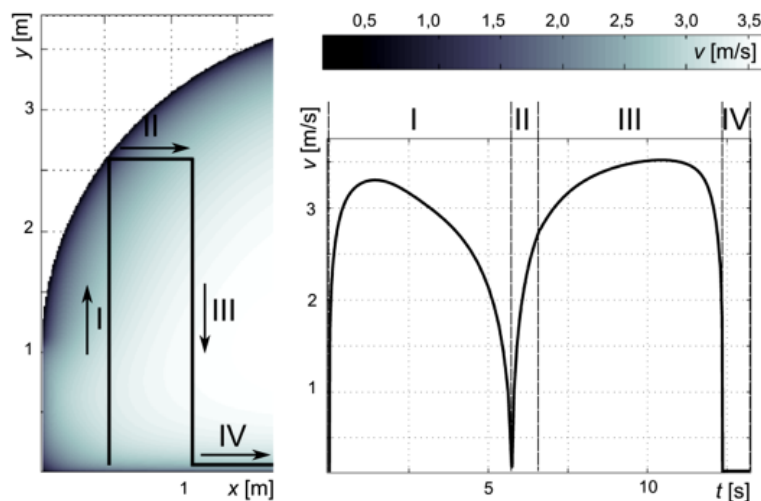
3. Pomiar prędkości średniej w przekroju wyrobiska metodą trawersu ciągłego

Jednym z najistotniejszych typów pomiarów wykonywanych w ramach oceny parametrów przewietrzania kopalń jest pomiar strumienia objętości przepływającej mieszaniny gazów w wyrobisku kopalnianym [2]. Metodologia tego pomiaru zakłada wyznaczenie pola powierzchni przekroju wyrobiska oraz pomiar średniej prędkości przepływającego medium w całym przekroju. Najpopularniejszą metodą wykonywania pomiaru prędkości średniej w przekroju wyrobiska jest metoda trawersu ciągłego. Polega ona na rejestracji chwilowych wartości prędkości wskazywanych przez anemometr w trakcie przemieszczania go po wcześniej ustalonej trajektorii obejmującej swym zasięgiem maksymalny obszar przekroju i na podstawie zebranych danych pomiarowych wyznaczenie prędkości średniej. Zakłada ona, że w czasie obejmującym wykonanie trawersu przepływ wykazuje cechy stacjonarności, czyli profil prędkości w wybranym przekroju wyrobiska kopalnianego jest niezmienny. W publikacjach związanych z wentylacyjnymi pomiarami górnictwami opisywanych jest szereg typów trawersów, których trajektorie optymalizowane są pod kątem jak najdokładniejszego wyznaczenia wartości średniej prędkości przepływu [5]. W badaniach takich dodatkowo uwzględniane są też wpływy osoby przeprowadzającej pomiar [6] oraz wpływ intensywności turbulencji przepływu na końcowy wynik pomiaru prędkości średniej w przekroju wyrobiska kopalnianego [7]. Najczęściej wykonywanym rodzajem trawersu jest trawers przedstawiony na rysunku 3, na którym przedstawiono trajektorie po której porusza się anemometr, na tle profilu prędkości w wyrobisku górnictwami. Profil prędkości zamodelowany został w programie Fluent, i przedstawia rozwiniętą strugę niezakłóconego przepływu w chodniku kopalnianym. Cechą charakterystyczną takiego profilu jest zmienność prędkości, która od wartości minimalnych przy spągu, stropie i ociosach (warstwa przyścienna), idąc w kierunku środka przekroju, osiąga wartości maksymalne wyznaczając obszar rdzenia potencjalnego przepływu. Metoda trawersu zakłada stacjonarność pola prędkości, polegającą na tym, że w tych samych punktach przekroju wartość prędkości jest niezmienna w okresie czasu obejmującym trawers.

Jednakże wykonując trawers po przekroju nie sposób jest uniknąć zmian prędkości w przestrzeni ograniczonej przekrojem pomiarowym. Na rysunku 4 przedstawiono fragment trawersu, z uwzględnieniem jego kierunku oraz sygnał kolejnych wartości rzeczywistej prędkości przepływu, która musi zostać zmierzona przez przyrząd pomiarowy w trakcie przemieszczania się anemometru. W kolejnych fazach trawersowania następują znaczne zmiany dynamiczne mierzonego sygnału. Tylko w fazie I mierzony sygnał zmienia się od wartości minimalnych do wartości maksymalnych, po czym znowu wraca do minimum. Amplituda tych zmian wynosi 3,2 m/s. Dynamika tego sygnału powoduje znaczne wymagania stawiane przyrządom pomiarowym względem ich możliwości w zakresie krótkiej odpowiedzi czasowej na zmiany wymuszenia. Wymogi te związane są również z minimalizacją czasu, w którym trawers musi zostać wykonany, aby zapewnić quasi stacjonarne pole prędkości w przekroju.



Rys. 3. Profil prędkości w wyrobisku kopalnianym z trajekcją trawersu



Rys. 4. Fragment trawersu wraz z mierzonym sygnałem

4. Dynamiczny model anemometru skrzydełkowego

W pomiarach prędkości przepływu w wyrobiskach górniczych wykorzystywane są głównie anemometry skrzydełkowe. Są to urządzenia, które wykazują znaczną odporność na panujące w kopalniach warunki pomiarowe i zapewniają minimalną wrażliwość charakterystyki przetwarzania na zmiany tych warunków. Wynikiem pomiaru prędkości anemometrem skrzydełkowym jest wartość prędkości średniej pola prędkości ograniczonego rozmiarami skrzydełka anemometrycznego. Jedną z nielicznych wad takich urządzeń jest ich inercja spowodowana bezwładnością skrzydełka pomiarowego. Pomimo iż nowe konstrukcje takich anemometrów optymalizowane są pod kątem ich własności dynamicznych, znacznie skracając czas odpowiedzi na zmiany mierzonych prędkości, to z uwagi na właściwości fizyczne tych przyrządów nie ma możliwości całkowitej eliminacji tego wpływu. W optymalizacji dynamicznych właściwości anemometrów duże znaczenie mają badania modelowe pozwalające na opisanie parametrów wpływających na dynamikę tych urządzeń. W publikacji [8] zaproponowany został model dynamiczny anemometru skrzydełkowego opisany równaniem różniczkowym (3)

$$c \frac{dy_m(t)}{dt} + [a + (1+b)v_m(t)]v_r(t) = v_r^2(t) \quad (3)$$

gdzie:

$$c = \frac{J}{\rho S R^2} \quad (4)$$

- v_m – prędkość mierzona przez anemometr [m/s],
 v_r – rzeczywista prędkość przepływającego medium [m/s],
 J – moment bezwładności skrzydełka [kg · m²],
 ρ – gęstość powietrza [kg/m³],
 S – powierzchnia czynna anemometru [m²],
 R – promień skrzydełka [m],
 a, b – współczynniki określające charakterystykę przetwarzania anemometru uzyskane na drodze wzorcowania.

Zakładając idealny przetwornik pomiarowy równanie to sprowadza się do postaci (5)

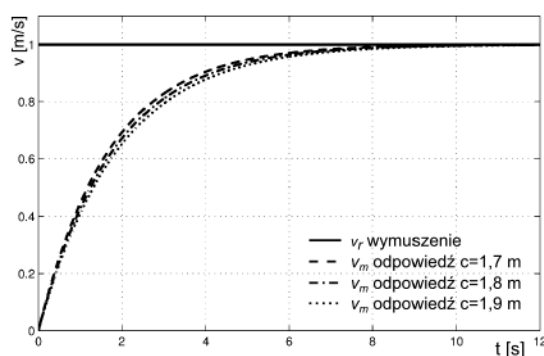
$$c \frac{dv_m(t)}{dt} + v_m(t)v_r(t) = v_r(t)^2 \quad (5)$$

Właściwości dynamiczne tego obiektu reprezentowane są przez współczynnik c znajdujący się przy pochodnej w równaniu (5). Związany jest on zarówno z fizycznymi właściwościami samego przyrządu pomiarowego jak i przepływającego medium, którego prędkość jest mierzona. W opracowaniu [9] wartość współczynnika c szacowana jest w przedziale 1.7-1.9 m. Obliczenia te przeprowadzono dla jednego typu anemometru – μ AS 100 i jego badań przedstawionych w [10].

5. Badania modelowe wpływu dynamiki anemometru skrzydełkowego na pomiar prędkości przepływu

Badania modelowe przeprowadzono w środowisku Matlab w oparciu o przedstawiony model dynamiczny anemometru skrzydełkowego (5). Chwilowe wartości odpowiedzi modelu anemometru na zmienne wymuszenie wyznaczano w oparciu o funkcję *ode45* realizującą numeryczną metodę Rungego-Kutty w procesie rozwiązywania równań różniczkowych.

W pierwszym etapie zasymulowano odpowiedź dynamiczną anemometru skrzydełkowego v_m na wymuszenie skokowe. W symulacji uwzględniono trzy różne wartości współczynnika c , których wartość wynosiła odpowiednio 1,7, 1,8 oraz 1,9 m. Rysunek 5 przedstawia odpowiedź tak zamodelowanego układu pomiarowego na zmianę sygnału mierzonego zadaną skokiem jednostkowym. Symulacja ta ma na celu zweryfikowanie poprawności działania przyjętego modelu i wybrania wartości współczynnika c do dalszych badań

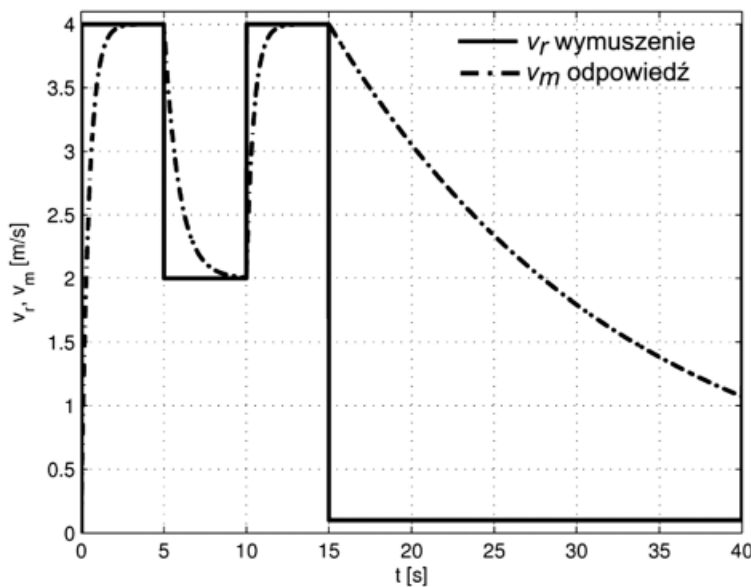


Rys. 5. Odpowiedź modelu anemometru skrzydełkowego na wymuszenie skokowe dla różnych współczynników c

Uzyskane modelowe charakterystyki odpowiedzi na skok jednostkowy odpowiadają przeprowadzonym rzeczywistym badaniom takiego anemometru przedstawionym w [11]. Potwierdzają one poprawność przyjętego modelu. Zmiana wartości współczynnika c o 0,2 m nie wprowadza do charakterystyki odpowiedzi modelu anemometru skrzydełkowego znaczących zmian. Do dalszych badań modelowych przyjęto współczynnik c o wartości 1,8 m.

Działanie modelu zostało przetestowane również w przypadku różnych zmian wartości prędkości. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 6. Na rysunku tym uwidaczniają się szczególne właściwości

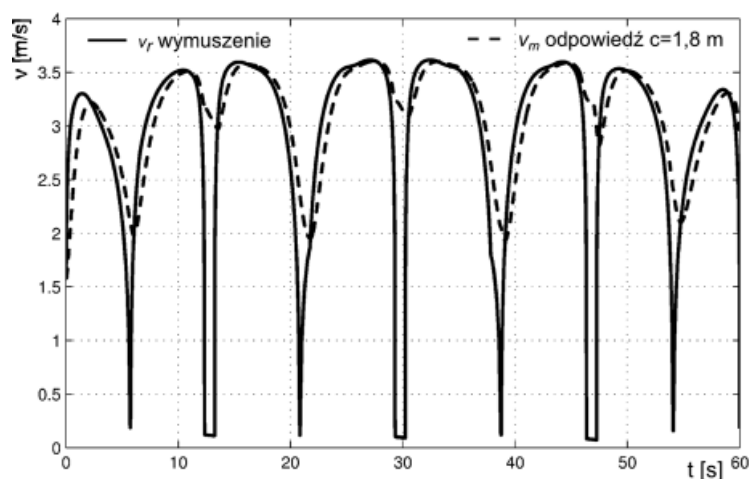
dynamiczne obiektu jakim jest anemometr skrzydełkowy. Dotyczą one odpowiedzi modelu anemometru na zmiany wartości prędkości rzeczywistej w przypadku jej zwiększenia się oraz zmniejszenia. W przypadku zwiększania wartości prędkości do prędkości znacznie większej od prędkości 0 m/s, odpowiedź dynamiczna modelu anemometru zachowuje się w każdym przypadku podobnie, osiągając wartość ustaloną w podobnym czasie. W przypadkach, w których wartość prędkości zmniejsza się, osiągając wartości zbliżone do zera, czas odpowiedzi modelu znacznie się wydłuża. Wraz z zanikającą prędkością oddziałującą na anemometr, zanika również moment napędowy wirnika, a zmniejszanie prędkości jego wirowania związane jest jedynie z bezwładnością i oporami ruchu wirnika. Można się spodziewać, że taka własność dynamiczna anemometru skrzydełkowego będzie silnie oddziaływać na wynik pomiaru, szczególnie w przypadkach, w których wykonuje się pomiary sygnałów odzerowo tętniących.



Rys. 6. Odpowiedź modelu anemometru skrzydełkowego – różne wymuszenia skokowe

W kolejnym etapie badań modelowych jako wymuszenie oddziałujące na model anemometru skrzydełkowego v_r przyjęto sygnał pochodzący z analizy profilu rozkładu prędkości w przekroju wyrobiska kopalnianego. Chwilowe wartości sygnału odpowiadają chwilowym wartościom prędkości występującym w profilu prędkości na drodze trawersowania zgodnie z rysunkiem 3. W procesie akwizycji rzeczywistego sygnału pomiarowego założono, że trawers przeprowadzano ze stałą prędkością przesuwu anemometru w czasie 60 sekund. Dla tak zdefiniowanego wymuszenia zasymulowano odpowiedź modelu anemometru skrzydełkowego oznaczoną jako v_m na wymuszenie v_r została przedstawiona na rysunku 7.

Przyjęty model matematyczny opisujący dynamikę anemometru skrzydełkowego wykazuje, że tak zamodelowany anemometr nie nadaje za zmianami prędkości, generowanymi w trakcie pomiaru średniej wartości prędkości metodą trawersowania. Związane jest to w szczególności z faktem występowania w sygnale wymuszenia pochodzącym z trawersu dużych gradientów prędkości sprowadzających wartość prędkości do wartości około zerowych. W tak przyjętej metodzie trawersowania, wykonywane są w trzech okresach sekundy pomiary prędkości, których wartości są zbliżone do zera, zaraz po tym jak odpowiedź anemometru skrzydełkowego osiągnęła maksymalną wartość związaną z sygnałem wymuszenia (około 3,5 m/s). Takie stany dynamiczne, uniemożliwiają przeprowadzenie dokładnych pomiarów prędkości średniej w przekroju bez popełnienia błędu pomiarowego wynikającego ze skończonej dynamiki czujnika pomiarowego, określonej własnościami przestawionymi na rys. 6. W analizowanym przypadku wartość średnia prędkości v_r stanowiącej przedmiot pomiaru wynosiła 2,94 m/s, natomiast wartość średnia wynikająca z pomiaru tego sygnału 3,12 m/s. Wykonanie pomiaru dla tak przedstawionego profilu prędkości, z tak przyjętą metodą trawersu i tak zamodelowanym anemometrem skrzydełkowym powoduje, że w wyniku uzyskuje się wartość zaniżoną o 0,18 m/s.



Rys. 7. Odpowiedź modelu anemometru skrzydełkowego na sygnał prędkości wygenerowany w trakcie trawersowania

6. Wnioski

Przedstawione badania symulacyjne odpowiedzi anemometru skrzydełkowego na wymuszenie prędkości generowane w trakcie przeprowadzania trawersu ciągłego wykazują potrzebę uwzględniania wpływu własności dynamiki urządzenia pomiarowego na końcowy wynik pomiaru, którego niepewność powinna być powiększona o składnik pochodzący od błędu dynamicznego popełnianego w trakcie pomiaru. Wartość tego składnika związana będzie z rodzajem użytego czujnika oraz samą metodą trawersowania. Czynniki wpływające na powstawanie błędu dynamicznego oraz jego wartość mogą być minimalizowane poprzez nowe rozwiązania konstrukcyjne anemometrów, pozwalające ograniczać ich inercję, opracowanie i wprowadzanie metod korekcji dynamicznych ale również poprzez optymalizację metod trawersowania. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań, pozwalających na wybór optymalnych trajektorii trawersu pod kątem minimalizacji jego wpływu na wartość błędu dynamicznego popełnianego w trakcie pomiaru średniej wartości prędkości w przekroju wyrobiska kopalnianego. Badania takie wymagają również potwierdzenia na drodze eksperymentu pozwalającego na jednoznaczne określenie chwilowych wartości prędkości przepływu na drodze trawersu.

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

Literatura

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Joint Committee for Guides in Metrology, First Edition, September 2008.
- [2] W. Roszczyński, W. Trutwin, J. Waclawik, *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”, 1992.
- [3] P. Jamróz, P. Ligęza, K. Socha, *Dynamic properties of hot-wire anemometric measurement circuits in the aspect of measurements in mine condition*. Arch. Min. Sci., Vol. 57, No 3, p. 699-714, 2012.
- [4] P. Jamróz, *Relationship Between Dynamic Coefficients of Two Temperature Sensors Under Nonstationary Flow Conditions*. IEEE Sensors Journal. Vol. 11, Issue 2, p. 335-340, 2011.
- [5] G. Mbuyi Kamba, E. Jacques, J. Patigny, *Toward A Reinstatement Of The Traversing Method For Mine Air Flow Rate Measurements?* Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium: June 21-23, 1993, University of Utah, Salt Lake City, Utah
- [6] S. Boshkov, M.T. Wane, *Errors in Underground Air Measurements*. In AIME Transactions, p. 1047-1053, 1955.
- [7] R. Teale, *The Accuracy of Vane Anemometers*. Colliery Eng. (London), Vol. 35, June, p. 239-246, 1958.
- [8] A. Krach, *Źródła niepewności w kopalnianych pomiarach wentylacyjnych*, Arch. Min. Sci., Vol. 49, Spec. Issue, 2004.
- [9] A. Krach, *Uncertainty of measurement of selected quantities in mine ventilation measurements*, Arch. Min. Sci., Monograph, No. 8, 2009.

- [10] J. Kruczkowski, *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska, IMG PAN, 1999.
- [11] W. Dziurzyński, J. Kruczkowski, *Pomiar wydatku przepływu w wyrobisku górniczym z zastosowaniem nowych technik pomiarowych*. XX Dni Techniki ROW'94, Wodzisław Śl., 1994.

Anemometer dynamics and the mean flow velocity

Abstract

The dynamics of measurement sensors used in mine ventilation measurements is investigated basing on the example of a vane anemometer. This issue is associated with the uncertainty of ventilation measurements. Simulation data are provided showing the dynamic response of a vane anemometer model to the variable (measured) flow velocity associated with the trajectory of the modelled path in the gallery's cross-section and attempts are made to evaluate how the finite dynamics of the device should affect the mean velocity measurements.

Keywords: dynamic properties, anemometer, dynamic error