



Właściwości dynamiczne cyfrowego anemometru skrzydełkowego

Dynamical properties of the digital vane anemometer

Mgr inż. Piotr Ostrogórski^{*)}

Treść: W artykule poruszono zagadnienia związane z problematyką pomiarów wykonywanych cyfrowymi (mikroprocesorowymi) anemometrami skrzydełkowymi. Zarówno rutynowe pomiary w przemyśle, jak i naukowe opracowanie danych pomiarowych, wymagają znajomości charakterystyki dynamicznej przyrządu w celu pozyskania informacji o niepewności, z jaką została wyznaczona mierzona wielkość. Analizie poddano czynniki ograniczające dynamikę cyfrowego anemometru skrzydełkowego, na podstawie badań, dedykowanego dla potrzeb aerologii górniczej, anemometru typu μ AS4 produkcji Instytutu Mechaniki Górniczej PAN [8]. Zamodelowany został tor przetwarzania sygnału pomiarowego w anemometrze. Autor rozpatruje oddzielnie część analogową przyrządu, za którą uważa mechaniczny czujnik skrzydełkowy i część cyfrową, czyli elektroniczny tor przetwarzania sygnału pomiarowego, poczynwszy od detektora obecności łopatki skrzydełka, a na wyświetlaczu danych pomiarowych skończywszy. Prezentowane są wyniki analiz pracy anemometru wykonywane w programie SciLab [9]. Model matematyczny został zidentyfikowany w oparciu o utworzony przez autora model geometrii 3D rzeczywistego skrzydełka anemometru. Pozyskano z modelu 3D wartość momentu bezwładności i powierzchnię łopatki. Na etapie identyfikacji modelu matematycznego dane symulacyjne porównywano z rzeczywistymi, zamieszczonymi w pracy Kruczkowskiego [3]. Z modelu matematycznego opisującego ruch obrotowy skrzydełka, program transformuje dane wejściowe do algorytmu symulującego funkcjonowanie części cyfrowej. Autor przedstawia wyniki, co do maksymalnej szerokości pasma przenoszenia sygnału pomiarowego dla skrzydełkowego anemometru cyfrowego w zależności od częstotliwości zmian prędkości przepływu powietrza, jej składowej ustalonej i amplitudy składowej zmiennej. Omówiono problematykę aliasingu w części cyfrowej anemometru, w kontekście błędów pomiaru.

Abstract: This paper presents issues related to the problems of measurements taken with a digital (microprocessor-based) vane anemometers. The factors limiting the dynamics of digital vane anemometer were analyzed. The μ AS4 anemometer, produced by Strata Mechanics Research Institute [8] which is dedicated to the needs of mining aerology, was tested. The signal processing circuit of the measuring anemometer was modeled. The analogue part of the instrument which is mechanical vane sensor, and a digital part in other words the electronic signal processing circuit were considered separately from the detector measuring the presence of the vane and the display of measurement data. The results of analysis of the anemometer work performed with the SciLab [9] were presented. The mathematical model was identified based on 3D models of a real vane anemometer. At the stage of the model identification, analog simulation data was compared with real given from Kruczkowski paper [3]. From the model describing the rotational movement of the vane, the program transforms the input data for modeling which describes the signal processing in the digital part. The author presents conclusions as to the maximum bandwidth of the measurement signal depending on the frequency changes in air velocity. The issue of aliasing in the digital part of the anemometer in the context of measurement errors was discussed.

Słowa kluczowe:

anemometr skrzydełkowy, właściwości dynamiczne anemometru, badania modelowe charakterystyk anemometrów

Key words:

vane anemometer, dynamical properties of anemometer, model research of dynamical characteristics

1. Wprowadzenie

Jak dotąd, anemometry skrzydełkowe nie mają możliwości kompensacji błędu pomiaru spowodowanego zmianami prędkości przepływu. Przyjmuje się, że wykonywanie pomiaru odbywa się w stacjonarnych warunkach przepływu. W rzeczywistości pomiar jest wykonywany często w miejscu, gdzie zachodzi taka potrzeba, nie bacząc na występujące warunki,

takie jak: stacjonarność, wiry, turbulencje, czy ukształtowanie profilu prędkości. Wprowadzenie kompensacji błędu dynamicznego wymaga zatem wnikliwego zbadania właściwości dynamicznych anemometrów skrzydełkowych.

Wyniki pomiarów powinny dodatkowo uwzględniać wpływ dynamiki czujnika pomiarowego i układu przetwarzania mierzonej wielkości. Stąd istotne jest też poznanie właściwości dynamicznych anemometrów. Współczesne anemometry skrzydełkowe można traktować, jako przyrządy cyfrowe z czujnikiem skrzydełkowym, które należy brać pod

^{*)} Instytut Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk

uwagę przy wyznaczaniu właściwości dynamicznych całego przyrządu.

Dotychczasowe badania dotyczyły dynamiki czujnika skrzydełkowego, a więc wyłącznie części mechanicznej anemometru. Badania te posłużyły do zbudowania modelu matematycznego odzwierciedlającego zmianę prędkości kątowej wskutek zmian prędkości przepływu. Model jak również jego opis zawarto w publikacji [7]. Zaletą stworzonego modelu jest możliwość wyznaczenia wszystkich niewiadomych w oparciu o dane geometryczne czujnika. Autor przedstawia metodę bądź wyznaczania bądź pozyskiwania wszystkich danych do modelu czujnika skrzydełkowego w oparciu o model numeryczny 3D skrzydełka anemometru μ AS4. Opracowany wcześniej model uwzględniał współczynnik siły wiatru (E. Ower [6]), wyznaczany empirycznie. Współczynnik ten zależał od kąta skręcenia łopatek. Badanie z wykorzystaniem takiego modelu było poprzedzone kalibracją modelu z wyznaczeniem stałej.

Poruszono problem uśredniania prędkości mierzonej anemometrem z całej rejestracji, jak i średniej ruchomej w analizie wyników. Do wyznaczenia strumienia objętości powietrza stosuje się wzór $Q = v_{sr} \cdot S$, gdzie v_{sr} – prędkość średnia wyznaczana jest metodą trawersu ciągłego m/s, S – pole przekroju wyrobiska m^2 . Należy zauważyć, że v_{sr} wyznaczona, jako średnia arytmetyczna z wyników pomiaru jest różna od rzeczywistej prędkości średniej. Wynika to z niesymetrycznego rozkładu wyników pomiaru dla prędkości, której wartość oscyluje. Błąd wynikający z pomiaru zmiennych prędkości powietrza ze składową stałą może osiągać, około 15 %.

W analizie błędów anemometrii skrzydełkowej należy uwzględnić również część cyfrową. Całościowe podejście pozwoli przybliżyć, działanie anemometru elektronicznego i uzyskać odpowiedź anemometru na dowolną zmianę prędkości przepływu.

2. Badania symulacyjne z użyciem modelu matematycznego czujnika anemometru skrzydełkowego

Do badań symulacyjnych prowadzonych przy użyciu programu SciLab przyjęto model matematyczny czujnika anemometru skrzydełkowego opisany równaniem (1), wynikającym z drugiej zasady dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego [7].

$$\frac{J}{\rho \cdot R^2 \cdot S} \cdot \frac{d\omega}{dt} + v\omega = \frac{tg\alpha}{R} \cdot v^2 \quad (1)$$

gdzie; J – moment bezwładności skrzydełka w $kg \cdot m^2$, ω – prędkość obrotowa skrzydełka w rad/s , ρ – gęstość powietrza w kg/m^3 , v – prędkość napływu powietrza w m/s , S – powierzchnia czynna anemometru w m^2 , α – kąt skręcenia łopatek, R – średni promień skrzydełka w metrach.

Średni promień skrzydełka R wyznaczono, jako średnia arytmetyczną maksymalnego promienia skrzydełka i promienia rozgraniczającego część skrzydełka, na którą działa powietrze i część będącą w cieniu aerodynamicznym wynikającym z konstrukcji mechanicznej czujnika.

Obliczenia symulacyjne wykonano w oparciu o dane wyznaczone z użyciem modelu 3D, poprzez pomiary geometrii i masy oraz na podstawie dokumentacji technicznej skrzydełka anemometru μ AS4. Odtworzono jego geometrię i wyznaczono takie parametry jak: moment bezwładności, powierzchnia łopatek, średni promień. Wyznaczono stałą anemometru zdefiniowaną zależnością (2)

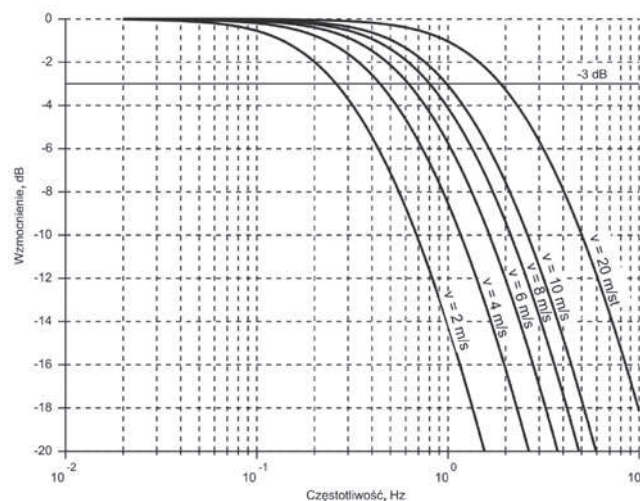
$$c = \frac{J}{\rho R^2 S} \quad (2)$$

Przyjęte parametry modelu matematycznego czujnika skrzydełkowego przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Parametry symulowanego modelu
Table 1. Parameters of the model

Moment bezwładności J	$8,18 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Powierzchnia łopatek S	$4686,8 \text{ mm}^2$
Liczba łopatek n	8
Promień średni R	34,75 mm
Stała anemometru c	1,204
Gęstość powietrza ρ	$1,293 \text{ kg/m}^3$
Kąt skręcenia łopatek α	45°

Zwiększając stopniowo częstotliwość zmian prędkości powietrza określono częstotliwościowe pasmo przenoszenia skrzydełkowego czujnika anemometrycznego. Badany model matematyczny wykazał tendencję do zawyżania wyników pomiarów, podobnie jak podczas badań anemometru [6] i [7]. Potwierdzono, że wpływ zmian prędkości na uzyskany pomiar maleje wraz ze wzrostem częstotliwości składowej zmiennej prędkości mierzonej.



Rys. 1. Charakterystyki Bodego czujnika skrzydełkowego
Fig. 1. Bode plots of vane sensor

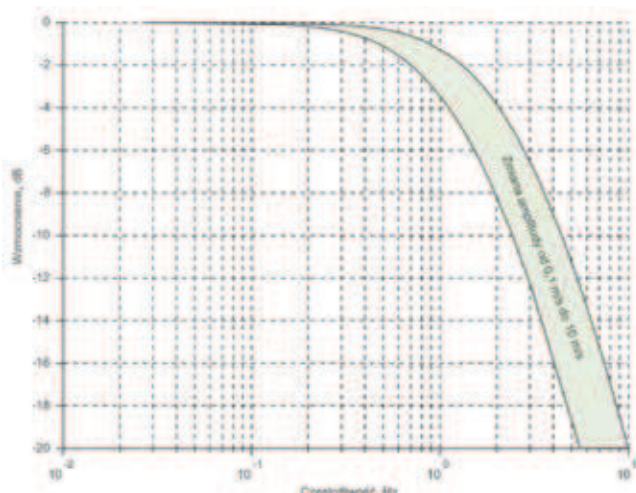
Na rysunku 1 pokazano charakterystyki Bodego czujnika prędkości będące wynikiem symulacji na modelu matematycznym (1). Sygnałem wejściowym jest prędkość przepływu powietrza, a wyjściowym prędkość kątowa skrzydełka. Sygnał wejściowy był sinusoidalnie zmienny, ze składową stałą. Każda z krzywych została wykreślona dla innej wartości składowej stałej. Amplituda składowej zmiennej we wszystkich przypadkach wynosiła 1 m/s. Zmieniając częstotliwość prędkości przepływu otrzymywano sygnały wyjściowe, w postaci zniekształconych przebiegów sinusoidalnych podniesionych o zadaną składową stałą. Sygnały wyjściowe uśredniano po całkowitej liczbie okresów. Wynikiem jednego procesu obliczeniowego był jeden punkt na krzywej. Powtarzając algorytm obliczeniowy otrzymano przedstawioną rodzinę krzywych. Łatwo zauważyć, że model anemometru ma charakter filtru dolnoprzepustowego.

Oś y wykresu wyskalowana w dB, przedstawia wzmocnienie badanego obiektu, a oś x częstotliwość składowej zmiennej prędkości zadanej.

Pasma przenoszenia z 3 dB granicą waha się od 0,26 Hz, dla wartości prędkości przepływu 2 m/s do 1,88 Hz, dla górnej granicy zakresu pomiarowego anemometru – 20 m/s. Nie

wykreślono charakterystyki Bodego (rys. 2) dla mniejszych prędkości, ze względu na znaczną składową zmienną. Badania symulacyjne omawianego modelu dla małych prędkości nie są zatem przybliżeniem rzeczywistości, gdyż badany model nie zawiera informacji o sile tarcia, która jest dominująca przy bardzo małych prędkościach.

Stwierdzono, że pasmo przenoszenia zależy również od wartości amplitudy fluktuacji prędkości powietrza.

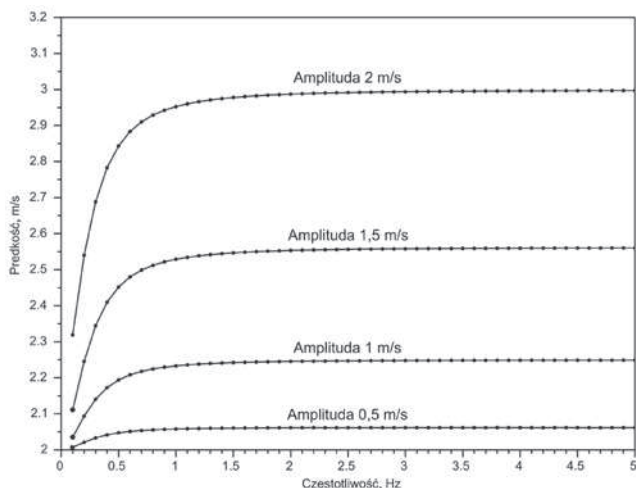


Rys. 2. Zakres zmian charakterystyki Bodego anemometru dla prędkości o składowej stałej 10 m/s i amplitudzie składowej zmiennej prędkości powietrza od 0,1 do 10 m/s.

Fig. 2. Range of changes of Bode plot of vane sensor for 10 m/s. Amplitude of variable component of air velocity was changed in the range from 0,1 to 10 m/s

Na rysunku 2 podano przykładowy zakres zmian charakterystyki Bodego, dla składowej stałej 10 m/s, przy zmianie amplitudy składowej zmiennej od 0,1 m/s do 10 m/s. Im większa amplituda składowej zmiennej prędkości, tym pasmo przenoszenia anemometru jest szersze.

Przeprowadzono również symulacje mające na celu zbadanie odpowiedzi modelu na wymuszenie o różnych amplitudach sygnału zmiennego, przy tej samej składowej stałej wynoszącej 2 m/s. Amplituda składowej zmiennej wynosiła: 0,5, 1, 1,5 i 2 m/s. Zakres zmian częstotliwości składowej zmiennej prędkości przepływu obejmował przedział od 0,1 Hz do 5 Hz. Prędkości powietrza wskazywane przez zamodelowany anemometr uśredniono dla pełnych okresów funkcji wyjściowej. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Efekt zawyżania pomiaru prędkości średniej
Fig. 3. Over-estimation effect for measurement of mean velocity

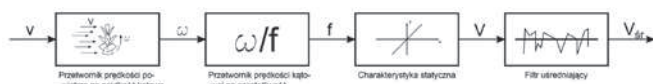
Widoczna jest wyraźna zależność wartości średniej prędkości powietrza, zarówno od częstotliwości jak i amplitudy składowej zmiennej prędkości. Zawyżanie wyniku pomiaru prędkości średniej względem na częstotliwość składowej zmiennej prędkości ustalała się na stałym poziomie, nie powodując dalszego jego wzrostu wraz ze zwiększaniem częstotliwości.

3. Tor cyfrowego przetwarzania sygnału z czujnika skrzydełkowego

Część cyfrowa anemometru wprowadza dodatkowe źródła błędów pomiaru. Wynikają one z dokładności pomiaru częstotliwości, próbkowania i kwantowania sygnału, a więc procesów związanych z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym. Elementy toru przetwarzania cyfrowego wnoszą błędy spowodowane głównie przez proces dyskretyzacji sygnału. Skończona rozdzielczość pomiaru czasu, nierównomierne próbkowanie i zjawisko aliasingu, to tylko niektóre ze źródeł błędów.

Do badania wpływu poszczególnych elementów toru przetwarzania cyfrowego na wynik pomiaru wykonano skrypt w programie SciLab, wiernie oddający proces przetwarzania sygnału w cyfrowym anemometrze skrzydełkowym. W modelu toru cyfrowego uwzględniono zmienną częstotliwość próbkowania, jako funkcję prędkości kątowej skrzydełka. Zmienia ona swoją wartość liniowo wraz ze wzrostem prędkości kątowej. Uwzględniono charakterystykę statyczną, odpowiadającą rzeczywistemu anemometrowi μ AS4 oraz filtr uśredniający wyniki, po dowolnym czasie wybieranym przed rozpoczęciem symulacji.

Na rysunku 4 zamieszczono schemat blokowy modelowanego toru przetwarzania anemometru skrzydełkowego z cyfrowym przetwarzaniem sygnału pomiarowego.



Rys. 4. Schemat blokowy toru przetwarzania sygnału pomiarowego w cyfrowym anemometrze skrzydełkowym μ AS4
Fig. 4. Block diagram of digital vane anemometer

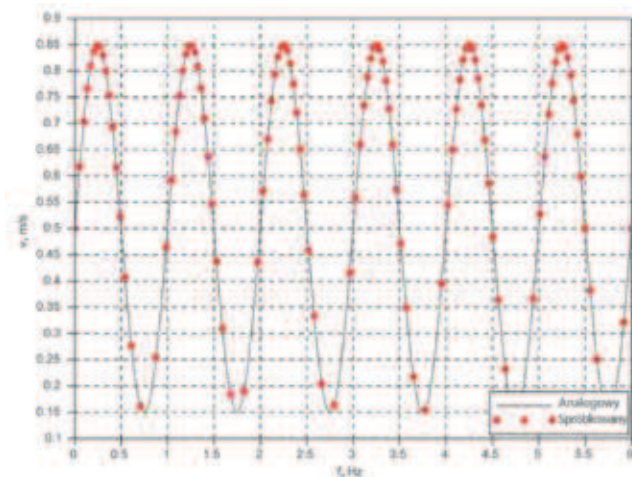
Pierwszy człon modelu omówiono w poprzednim rozdziale. Odpowiada on za przetwarzanie prędkości powietrza na prędkość kątową skrzydełka anemometru.

Człon ω/f dyskretyzuje sygnał prędkości kątowej ω ze zmiennym krokiem czasowym. Jest to czasowo-licznikowy sposób przetwarzania analogowo-cyfrowego. Sposób działania polega na zliczaniu impulsów zegarowych mikroprocesora pomiędzy zboczami cyfrowego sygnału próbkującego. Zbocza są generowane poprzez układ detektora obecności łopatki skrzydełka. Istnieje, zatem zależność pomiędzy krokiem czasowym, z jakim generowane są impulsy sygnału próbkującego, a prędkością kątową skrzydełka. Im prędkość kątowa skrzydełka większa, tym większa częstotliwość sygnału próbkującego. Stąd wynik z obliczeń numerycznych modelu skrzydełka musiał zostać repróbokowany (rys. 5), zgodnie z rzeczywistą częstotliwością próbkowania.

Ponieważ próbkowanie sygnału prędkości następowało w momencie detekcji łopatki, stosowaną metodą pomiaru nie można było otrzymać wyniku wcześniej niż po czasie równym $2\pi/(\omega_0)$. Częstotliwość związana z maksymalną prędkością obrotową była zatem maksymalną częstotliwością próbkowania. Zmierzona prędkość kątowa skrzydełka, wyrażona, jako częstotliwość, jest argumentem charakterystyki statycznej, której wyjściem jest zmierzona prędkość przepływu.

Ostatnim członem przetwarzania jest filtr uśredniający, z ustalalnym czasem uśredniania.

Ponieważ częstotliwość próbkowania jest zależna od prędkości obrotowej skrzydełka, wyliczanie średniej z przebiegów zmiennych w czasie będzie zawyżone. Czym wyższa prędkość przepływu tym anemometr częściej uzyskuje wynik pomiaru prędkości kątovej skrzydełka, co przekłada się na rosnącą liczbę danych pomiarowych wraz z prędkością powietrza. Do średniej zostanie wliczone więcej próbek dla większych wartości prędkości chwilowej. Zjawisko to można zauważyć na rysunku 5.



Rys. 5. Nierównomierne próbkowanie w torze cyfrowym anemometru sygnału sinusoidalnego

Fig. 5. Uneven sampling of exemplary sine wave

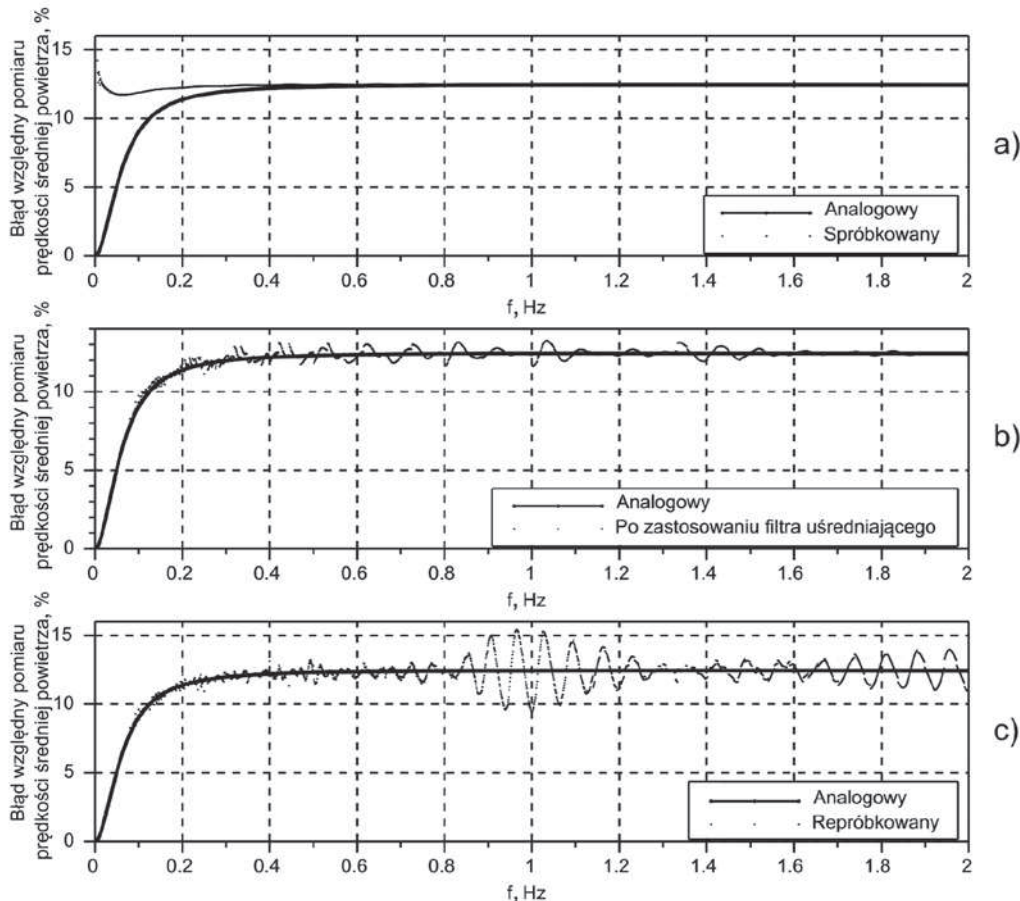
W dalszej części przetwarzania, sygnał dyskretny zostaje uśredniony, z czasem uśredniania równym 1 s. Po zastosowaniu średniej ruchomej, sygnał przedstawiono na wykresie b) (rys. 6). Na wykresie c) pokazano sytuację, w której sygnał nie był uśredniany tylko repróbowany z częstotliwością 1 Hz (uprzednio zmierzony sygnał prędkości kątovej skrzydełka ponownie próbkowano z częstotliwością 1 próbkę/s, wybierając ostatnią zarejestrowaną próbkę dla danej chwili czasowej). Na wykresach b) i c) widoczne jest zjawisko aliasingu, objawiające się zafalowaniami narastającymi wraz ze zbliżaniem się do częstotliwości próbkowania jest to spowodowane niespełnieniem twierdzenia Shannona-Kotelnikowa [1].

Aby zapobiec nakładaniu się widma częstotliwościowego sygnału prędkości konstruktorzy przyrządów powinni zadbać o to, aby wyższe harmoniczne sygnału były usuwane przed uśrednianiem lub repróbowaniem. Można to zrealizować dwoma sposobami – zastosować filtr antyaliasingowy eliminujący częstotliwości powyżej 0,5 Hz (dla czasu próbkowania 1 s) albo skonstruować wirnik przyrządu tak, aby swoją bezwładnością tłumił ww. częstotliwości.

4. Podsumowanie

Analiza przeprowadzonych symulacji pozwoliła na określenie skali zjawiska zawyżania wyniku pomiaru prędkości średniej przez anemometr. Zmierzona prędkość średnia może być nawet o 12 % wyższa z powodu fluktuacji prędkości przepływu.

Wynikiem prowadzonych badań modelowych było wyznaczenie minimalnej częstotliwości próbkowania i sformułowa-



Rys. 6. Porównanie błędów względnych pomiaru na różnych etapach przetwarzania

Fig. 6. Comparison of relative errors of measurement for different levels of processing

nie zaleceń dla konstruktorów anemometrów skrzydełkowych. Podano zależność pasma przenoszenia anemometru dla różnych składowych stałych prędkości. Prowadzone badania pozwolą na poprawę konstrukcji mechanicznej, jak również wprowadzenie algorytmów korekcji dynamiki czujnika skrzydełkowego.

Badania te prowadzą do poprawy dokładności pomiaru prędkości średniej podczas wykonywania rutynowych pomiarów kopalnianych. Do tego celu stosuje się metodę trawersu ciągłego. Podczas trawersowania w przepływie ustalonym, prędkość powietrza mierzona przez anemometr jest zmienna, co wynika bezpośrednio z przemieszczania anemometru w niejednorodnym polu prędkości. Mierzona prędkość przepływu powietrza jest funkcją położenia anemometru. Osoba wykonująca pomiar metodą trawersu musi mieć na uwadze prędkość z jaką porusza anemometrem. Im mniejsza wartość prędkości trawersowania tym lepiej. Jednak warunek niestacjonarności nie pozwala na zbyt długi czas trawersowania. Zbyt szybko trawersowanie powoduje znaczne tłumienie amplitudy zmian prędkości i dodatkowo powoduje zawyżanie wyniku pomiaru.

Czujnik skrzydełkowy ma decydujący wpływ na zawyżanie wyników pomiaru. Przetwarzanie sygnału w torze cyfrowym powoduje dodatkowe zakłócenia prowadzące do znacznych przekłamań w wyniku pomiaru prędkości zmiennych w czasie. Powodem dodatkowych niepewności pomiaru jest przetwarzanie analogowo-cyfrowe.

Na etapie analizy danych pomiarowych nie jest możliwe określenie, czy mierzone wartości prędkości są zawyżone. Należy zapobiegać zawyżaniu wyników pomiarowych np. poprzez zastosowanie algorytmów przetwarzania i korekcji sygnału.

Z rozdziału 2 wynika, że częstotliwości do 2 Hz są przenoszone przez skrzydełko dla składowej stałej 20 m/s (rys. 1). Bezwładność badanego skrzydełka jest zbyt mała by tłumić częstotliwości powyżej 0,5 Hz.

Przeprowadzone badania mogą przyczynić się do poprawy dokładności pomiaru z użyciem metody trawersowania. Planuje się ich potwierdzenie w oparciu o eksperymenty w tunelu aerodynamicznym, z zastosowaniem technik zada-

wania wymuszeń zmiennych. Eksperymenty będą przeprowadzone w oparciu o obecnie budowane stanowisko do pomiaru siły aerodynamicznej działającej na łopatkę skrzydełka.

Wyniki symulacji potwierdzają występowanie zjawiska zawyżania wyniku pomiaru prędkości średniej przez anemometr skrzydełkowy. Na podstawie symulacji stwierdzono, że występują dodatkowe czynniki wpływające (nierównomierne próbkowanie, zbyt niska częstotliwość próbkowania) na zawyżanie wyniku pomiaru wynikające ze sposobu przetwarzania sygnałów w części cyfrowej.

Artykuł finansowany ze środków przeznaczonych na prace statutowe Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk.

Literatura

1. *Gajda J., Szyper M.*: Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych, AGH, Kraków 1998
2. *Nabavi M., Siddiqui K.*: A critical review on advanced velocity measurement techniques in pulsating flows, Measurement Science and Technology, 2010
3. *Kruczkowski J.*: Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym, Praca doktorska, IMG PAN, Kraków 1999
4. *Pindado S, Perez J, Avila-Sanchez S.*: On cup anemometr rotor aerodynamics, Sensors 2012, ISSN 1424-8220
5. *Lee B., Cheesewright R., Clark C.*: The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows, Flow Measurement and Instrumentation, 15 (2004) 239-248
6. *Ower E., Pankhurst R. C.*: The measurement of air flow, Pergamon Press, 1977
7. *Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Palka T.*: Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych, Archiwum Górniczo Monografia 1, 2006
8. *Krawczyk J., Kruczkowski J.*: Pomiary niestacjonarnych przepływów w wyrobisku kopalnianym, 3 Szkoła Aerologii Górniczej, SITG, Katowice 2004
9. Dokumentacja programu SciLab, <https://www.scilab.org/resources/documentation>