

Badanie możliwości wykorzystania siły poosiowej anemometru skrzydełkowego do kompensacji zawyżenia wyniku pomiaru prędkości zmiennych

PIOTR OSTROGÓRSKI

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

Streszczenie

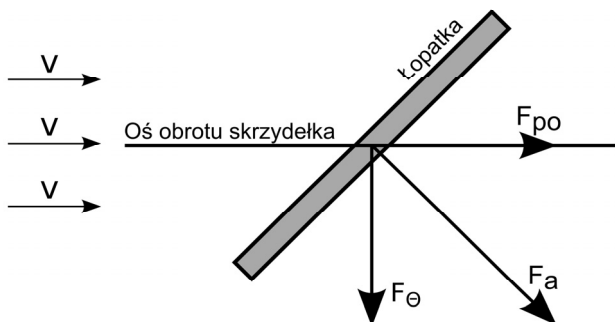
Autor zauważa przydatność wykorzystania siły poosiowej anemometru skrzydełkowego w usuwaniu negatywnych zjawisk związanych z pomiarem zmiennej prędkości powietrza. Artykuł zawiera opis badań poczyniony od wyjaśnienia zależności między siłą poosiową, a siłą aerodynamiczną poprzez symulację komputerową modelu matematycznego i budowę stanowiska pomiarowego na przetwarzaniu danych pomiarowych skończywszy. W artykule opisano próbę zmierzenia siły poosiowej przy użyciu zbudowanego do tego celu stanowiska pomiarowego.

Słowa kluczowe: anemometr skrzydełkowy, zawyżanie prędkości, siła poosiowa, charakterystyka częstotliwościowa

1. Wstęp

Artykuł nawiązuje do badań związanych ze zjawiskiem zawyżenia pomiaru średniej prędkości powietrza mierzonej anemometrem skrzydełkowym. Pomiar prędkości zmiennych w czasie anemometrem skrzydełkowym jest ciągle tematem nierozwiązanym. Prędkość średnia wskazywana przez anemometr w przebiegach zmiennych jest wyższa niż średnia arytmetyczna prędkości chwilowych. Jest to związane z większą zdolnością nadążania czujnika skrzydełkowego za zmianami wielkości mierzonej, gdy prędkość powietrza narasta, aniżeli gdy prędkość maleje. Zjawisko to tłumaczone było na różne sposoby jedni autorzy pisali, że wynika to z bezwładności skrzydełka [5] inni zauważali, że anemometr ma dwie, różne stałe czasowe [4]. „Stała czasowa rozpędzania się skrzydełka jest znacznie krótsza niż stała czasowa hamowania”. Wielu autorów (Ower, Pankhurst, Popow, Chrzanowski, Kruczkowski) podejmowało tematykę zawyżenia prędkości przez anemometr skrzydełkowy. Jak do tej pory nie zaproponowano skutecznej metody kompensacji, bądź wyrugowania tego zjawiska.

Badania przeprowadzone przez autora miały na celu wzbogacenie informacji pomiarowej o dodatkową wielkość – siłę poosiową (Rys. 1). Jest to jedna z sił składowych działających na łopatkę skrzydełka. Oprócz tej siły działają jeszcze dwie składowe: transversalna i radialna.



Rys. 1. Siły działające na łopatkę anemometru.
 F_{θ} – siła transversalna, F_{po} – siła poosiowa,
 F_a – siła aerodynamiczna

Siła transversalna działająca na umownym promieniu średnim tworzy moment napędowy. Siła radialna, działająca prostopadle do osi, nie była przedmiotem badań autora. Przy założeniu, że skrzydełko jest bryłą sztywną i osiowo symetryczną, siła radialna nie ma żadnego wpływu na dynamikę skrzydełka, więc może zostać pominięta w rozważaniach. Dwie pozostałe składowe są wynikiem działania siły aerodynamicznej na powierzchnię każdej z łopatek. Wynikiem tego oddziaływania jest zmienny w czasie i na powierzchniach łopatki rozkład ciśnienia. Dla uproszczenia powierzchnie boczne łopatek nie są brane pod uwagę. Następnie pola ciśnień mogą być zamienione na pola sił, które można przedstawić w postaci jednej siły skupionej działającej prostopadle do powierzchni łopatki.

2. Materiał i Metodyka

Badania opierają się na modelu dynamiki anemometru skrzydełkowego. Model ten został zaprezentowany w publikacjach [6] i [8], gdzie badano i próbowano określić wpływ fluktuacji na wynik pomiaru. Założono, że skrzydełko anemometru obraca się bez oporów tarcia. Podstawowym wzorem określającym model [6] i na jakim wykonywano obliczenia numeryczne jest:

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

gdzie:

- J – moment bezwładności skrzydełka w $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,
- 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,
- t – czas w sekundach.

Model ten zidentyfikowano podając wszystkie jego parametry w trakcie badań nad dynamiką anemometru skrzydełkowego cyfrowego [1].

Przyjęte parametry modelu matematycznego czujnika skrzydełkowego przedstawiono w tab. 1.

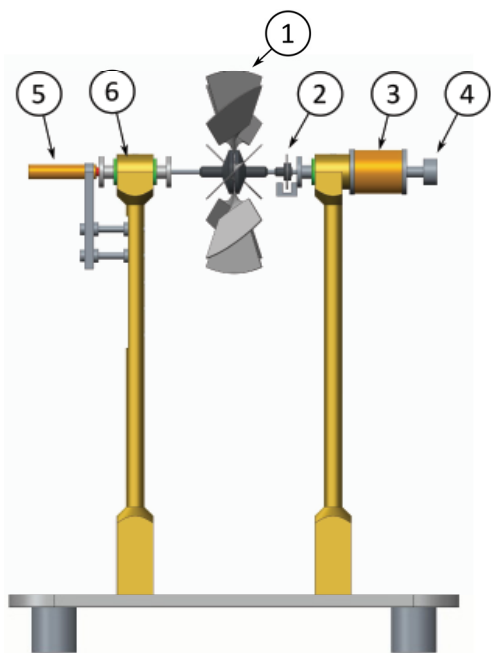
Tab. 1. Parametry badanego modelu [1]

Moment bezwładności	J	$8,18 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Powierzchnia łopatek	S	$4686,8 \text{ mm}^2$
Ilość 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°
Masa części uczestniczących w ruchu liniowym	m	28,54 g

Do weryfikacji zależności wynikających z modelu wykonano stanowisko pomiarowe (Rys. 2).

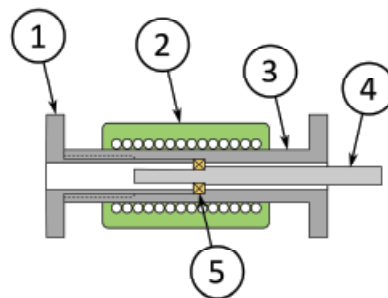
W stanowisku użyto skrzydełka anemometru uAS4. Wał na którym zamocowane było skrzydełko był łożyskowany zarówno poprzecznie jak i wzdłużnie. Łożyska poprzeczne znajdowały się wewnątrz łożysk wzdłużnych w sposób pokazany na rys 3. Użyto do tego celu łożysk kulkowych.

Stanowisko umożliwia jednoczesny pomiar prędkości obrotowej skrzydełka i siły poosiowej. Prędkość obrotowa mierzona jest enkoderem optycznym. Enkoder zbudowano z tarczy z 36 nacięciami w równych odstępach, co 10 stopni. Tarcza obracając się przerywała wiązkę światła podczerwonego generując tym samym sygnał powodujący przełączanie optotranzystora. Impulsy generowane przez enkoder były przetwarzane na prędkość obrotową poprzez zmierzenie czasu pomiędzy kolejnymi impulsami. Siła poosiowa była mierzona pośrednio poprzez pomiar przesunięcia osi wału. Do tego celu zbudowano czujnik położenia. Był to czujnik indukcyjny wykonany z dwóch identycznych uzwojeń nawiniętych na wspólnym korpusie. Do wewnątrz



Rys. 2. Stanowisko do jednoczesnego pomiaru siły poosiowej i prędkości kątovej skrzydełka.

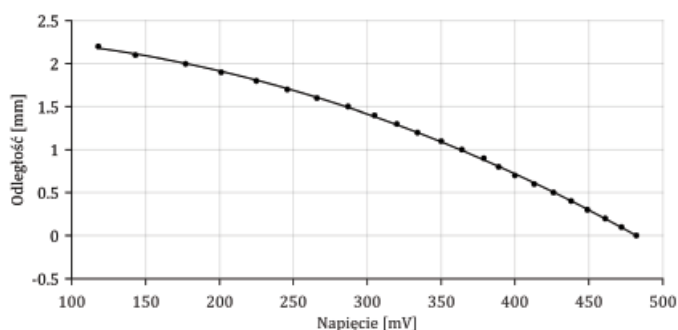
- 1 – skrzydełko, 2 – optyczny czujnik prędkości kątovej,
3 – cewka wymuszająca ruch w osi, 4 – magnes,
5 – czujnik położenia osi, 6 – układ łożyskowania wału



Rys. 3. Sposób łożyskowania wału skrzydełka.

- 1 – wkręt mocujący łożysko poprzeczne, 2 – łożysko wzdłużne, 3 – bieżnia łożyska wzdłużnego,
4 – wał skrzydełka, 5 – łożysko poprzeczne

był wsuwany rdzeń. Rdzeń wykonano współosiowo z bieżnią łożyska, tak aby nie dotykał korpusu czujnika indukcyjnego. Czujnik nie był wrażliwy na przypadkowy obrót rdzenia. Cewki były połączone w mostek Maxwella. Mostek zasilono generatorem laboratoryjnym wybierając przebieg sinusoidalnie zmienny z częstotliwością 288 kHz. Częstotliwość dobrano doświadczalnie dla uzyskania największej zmiany sygnału. Sygnał wyjściowy z czujnika indukcyjnego został zdemodulowany amplitudowo i odfiltrowany. Czujnik położenia został skalibrowany przy użyciu śruby mikrometrycznej i wykreślono jego charakterystykę statyczną. Rozdzielczość kalibracji wynosiła 0,1 mm. Następnie charakterystykę aproksymowano wielomianem drugiego rzędu.



Rys. 3. Charakterystyka statyczna czujnika indukcyjnego

Siłę poosiową wyznaczano poprzez wyliczenie drugiej pochodnej położenia wału po czasie i pomnożenie przez masę części ruchomej stanowiska. Stanowisko było wyposażone dodatkowo w cewkę umożliwiającą zadanie siły działającej wzdłuż osi. Cewka była zasilana poprzez mostek H, co umożliwiło dwukierunkowe zadawanie strumienia pola magnetycznego na rdzeń ferromagnetyczny przymocowany do układu posuwu. Na końcu rdzenia zamocowany był magnes neodymowy wzmacniający oddziaływanie pola magnetycznego na układ posuwu. Cewka posuwu sterowana była z mikrokontrolera z rodziny AVR. Umożliwiło to szeroki wybór sposobów sterowania.

Akwizycję danych wykonywano oscyloskopem z możliwością rejestracji. Dane pomiarowe przenoszono do oprogramowania Matlab celem dalszego przetwarzania. W pakiecie Matlab wykonano skrypty wyliczające siłę poosiową i prezentujące dane w formie wykresów.

Do wykonania eksperymentów pomiarowych konieczne było przygotowanie wymuszenia prędkości powietrza z określoną częstotliwością i amplitudą oraz znaną prędkością stałą. Na obecnym etapie badań posłużono się sprężonym powietrzem skierowanym w stronę stanowiska. Wymuszenie zadawano poprzez cykliczne otwieranie i zamykanie elektrozaworu. Wylot z przewodu pneumatycznego skierowany był koncentrycznie z osią obrotu skrzydełka, w odległości 30 cm. Zastosowanie takiego wymuszenia umożliwiło zachowanie przynajmniej jednej składowej oczekiwanego wymuszenia, a więc częstotliwości.

3. Wyniki

Z zależności teoretycznych wynika, że można wykorzystać siłę poosiową do wyliczenia prędkości napływającego powietrza nie przejawiającej efektu zawyżania anemometru.

Ze wzoru na siłę transwersalną [6]:

$$F_{\theta} = \rho S v^2 - \rho S v \omega R \quad (2)$$

gdzie:

- 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 skrzywienia łopatek,
- R – średni promień skrzydełka w metrach.

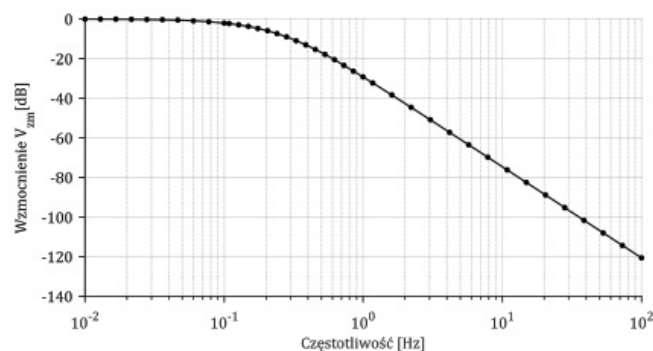
Wyliczono prędkość napływu i podstawiono pod siłę transwersalną siłę poosiową. Te siły są równe co do wartości dla skrzydełek z łopatkami skrzywionymi o kąt 45° .

$$v = \frac{\omega R + \sqrt{(\omega R)^2 + 4 \frac{F_{Po}}{\rho S}}}{2} \quad (3)$$

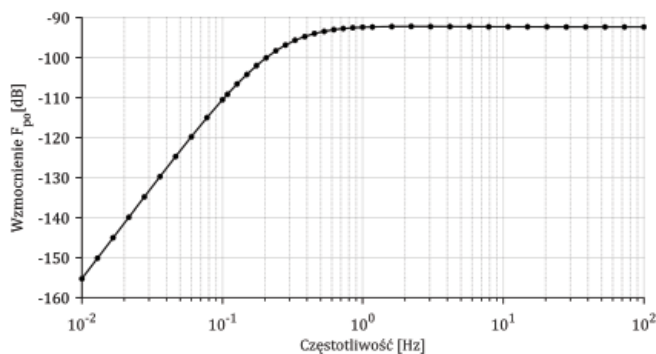
Z symulacji wynika, że siła poosiowa przejawia właściwości filtra górnoprzepustowego. Dla wolno zmieniających się prędkości powietrza siła poosiowa może być nie mierzalna, gdyż małe częstotliwości tj. poniżej 0,1 Hz są silnie tłumione (Rys. 6). Tłumienie jest wówczas większe od 20 dB względem tłumienia sygnałów o częstotliwościach większych niż 1 Hz.

Z porównania wykresów rys. 5 i rys. 6 można wysunąć wniosek, że amplituda siły poosiowej wzrasta, gdy skrzydełko przestaje nadążać za zmianami prędkości powietrza i zaczyna stawiać opór. Powodem stawianego oporu przepływającemu powietrzu jest ograniczona bezwładność.

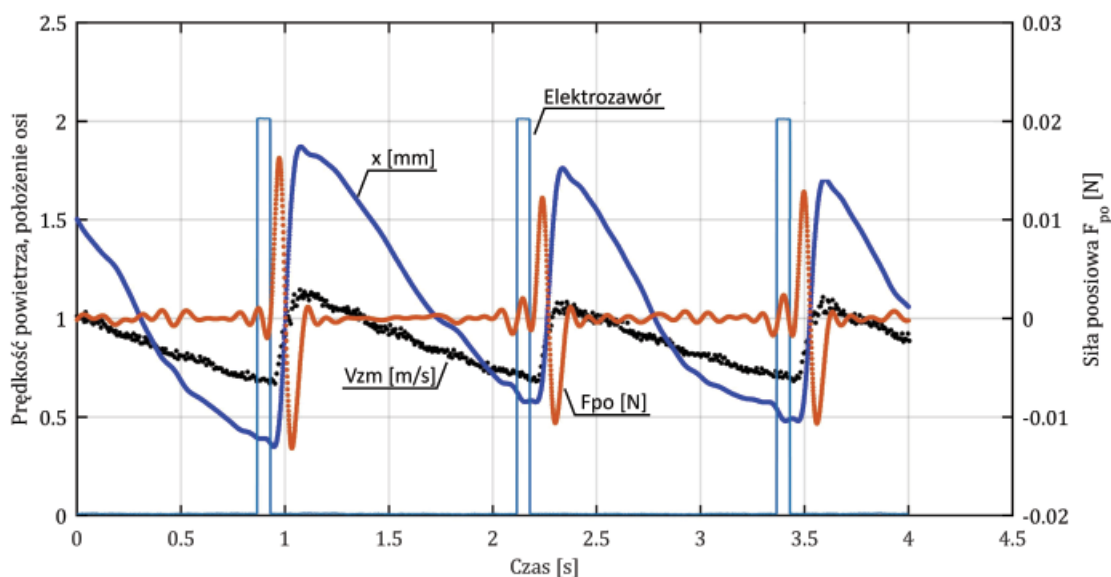
Zarejestrowano przebieg zmienny prędkości powietrza, położenia wału i sygnału zadawania otwarcia elektrozaworu. Wszystkie te sygnały zarejestrowano jednocześnie. Sygnał położenia przeliczono otrzymując przebieg siły poosiowej.



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa prędkości kątowej przeliczonej na zmierzoną prędkość przepływu



Rys. 6. Charakterystyka częstotliwościowa siły poosiowej wyznaczona poprzez zadawanie kolejnych częstotliwości prędkości napływu



Rys. 7. Zarejestrowane sygnały w wyniku eksperymentu. Częstotliwość wymuszenia wynosiła 0,8 Hz. Współczynnik wypełnienia impulsu wynosił 5,2%

Rys. 7. przedstawia wybrany fragment rejestracji eksperymentu polegającego na wymuszaniu prędkości powietrza poprzez otwarcie elektrozaworu uwalniającego sprężone powietrze. Zarejestrowano położenie wału w osi (x). Punkt x_0 znajdował się w skrajnym położeniu tj. przy maksymalnym wysunięciu wału w stronę napływu. Przed rozpoczęciem pomiaru wał ustawiono w połowie zakresu.

Siła poosiowa (F_{po}) zmieniała kierunek w zależności od kierunku wypadkowej prędkości działającej na łopatkę skrzydełka. Gdy skrzydełko jest napędzane zwrot siły poosiowej jest zgodny ze zwrotem prędkości powietrza, gdy skrzydełko napędza powietrze zwrot siły jest przeciwny.

4. Podsumowanie

Pomiar siły poosiowej anemometru wykonywany był pośrednio poprzez pomiar położenia osiowego wału. Takie podejście okazało się skomplikowane ze względu na długi tor przetwarzania sygnału. Na każdym etapie przetwarzania pojawiały się nowe zakłócenia, które należało odfiltrować, bądź zminimalizować np. poprzez ponowne wykonywanie części mechanicznych z większą dbałością o jakość i precyzję wykonania. Podstawowym zakłóceniem trudnym do zminimalizowania były opory tarcia poosiowego. Drugim stacjonarności charakterystyki statycznej czujnika indukcyjnego, który jest źródłem informacji o sile poosiowej. Trzecim liczne zakłócenia elektryczne i zakłócenia polem magnetycznym. Po skutecznym wydzieleniu sygnału użytecznego dokonano akwizycji sygnałów.

Zauważenie przydatności informacji o sile poosiowej było główną przyczyną rozpoczęcia badań nad poprawą rejestrowanego sygnału prędkości powietrza przez anemometry. Przedstawiono rozwiązanie teore-

tyczne oparte na modelu matematycznym skrzydełka, pozwalające na wyeliminowanie zjawiska zawyżania. Wykonano symulację w środowisku Matlab wynikiem, której były wykresy bodego dla prędkości mierzonej przez anemometr i siły poosiowej dla zakresu częstotliwości od 0,01 Hz do 100 Hz. Zauważono korzystny górnoprzepustowy charakter dla modelu przenoszenia prędkości napływu powietrza na siłę poosiową i tym samym szansę na wykorzystanie siły poosiowej również do poszerzenia pasma przenoszenia anemometru. Dzięki szerszemu pasmu możliwe byłoby wierniejsze odwzorowanie kształtu przebiegu rzeczywistej prędkości napływu. Zbudowano więc stanowisko do jednoczesnej akwizycji sygnałów siły poosiowej i prędkości kątowej. Udało się zarejestrować przebiegi zmierzonej prędkości powietrza będącej odpowiedzią na podmuch powietrza zadany poprzez okresowe otwieranie i zamykanie elektrozaworu uwalniającego sprężone powietrze. Brak odpowiedniego urządzenia do zadawania wymuszeń zmiennych prędkości przepływu uniemożliwia stwierdzenie, czy siła poosiowa mogłaby być z powodzeniem wykorzystywana do kompensacji zjawiska zawyżania prędkości. Dobre stanowisko do zadawania wymuszeń zmiennych pozwoliłoby na weryfikację prowadzonych eksperymentów i rzetelną ocenę wyników.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Ostrogórski P.: Właściwości dynamiczne cyfrowego anemometru skrzydełkowego. *Przegląd Górniczy*, 4/2015.
- Gajda J., Szyper M.: Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych. AGH, Kraków 1998.
- Nabavi M., Siddiqui K.: A critical review on advanced velocity measurement techniques in pulsating flows. *Measurement Science and Technology*, 2010.
- Kruczkowski J.: Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym. Praca doktorska, IMG PAN, Kraków 1999.
- Ower E., Pankhurst R.C.: *The measurement of air flow*. Pergamon Press, 1977.
- Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T.: Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych. *Archiwum Górnictwa, Seria: Monografia 1*, 2006.
- Krawczyk J., Kruczkowski J.: *Pomiary niestacjonarnych przepływów w wyrobisku kopalnianym*. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, SITG, Katowice 2004.
- Kruczkowski J., Krach A., Krawczyk J.: *Badania czujników anemometrycznych wykorzystywanych w metodach pomiaru pola prędkości i strumienia objętości – wyznaczanie źródeł błędów, analiza niepewności*. *Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN*, Tom 10, nr 1-4, 2008.

Investigation of possibility to use axial force of vane anemometer to compensation of overestimation effect during measuring variable air velocity.

Abstract

The author observes that axial force can be useful at compensation of overestimation effect. The article consists of description of investigations which start from clarify relation between axial force and aerodynamic force. In description the author apply results from numerical simulations of the mathematical model of dynamic of vane anemometer. Article contain precise description of preparing and building test-bench. Investigations end at results of first experiments which It were discussed.

Keywords: vane anemometer, overestimation of velocity, axial force, frequency response