

Optymalizacja właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym

PAWEŁ LIGEZA

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

Streszczenie

Anemometry wykorzystujące zjawisko wymiany pędu pomiędzy przepływem a wirującym elementem pomiarowym stanowią ważną klasę przyrządów stosowanych w metrologii przepływów, w szczególności w pomiarach meteorologicznych oraz wentylacyjnych. Wadą anemometrów mechanicznych z wirującym elementem pomiarowym są złe właściwości dynamiczne wynikające ze stosunkowo dużych wymiarów i bezwładności mechanicznej elementu pomiarowego. W przyrządach tych występuje zjawisko zawyżania pomiaru prędkości średniej związane z inercją wirnika. Optymalizacja dynamiki procesu pomiarowego oraz szacowanie i minimalizacja niepewności pomiaru możliwe są w oparciu o model matematyczny anemometru. W pracy zaproponowano metodę optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym.

Słowa kluczowe: anemometr skrzydełkowy, model matematyczny, stany dynamiczne, badania modelowe

1. Wprowadzenie

Anemometry z wirującym elementem pomiarowym (wirnikiem, rotorem, turbinką) stanowią ważną klasę przyrządów przeznaczonych do pomiaru prędkości przepływu płynów. Znajdują one wszechstronne zastosowanie w metrologii przepływów, jednak głównym obszarem aplikacyjnym są pomiary meteorologiczne oraz pomiary wentylacyjne [1].

Anemometry mechaniczne z wirującym elementem pomiarowym posiadają szereg korzystnych właściwości metrologicznych. Należą do nich w przybliżeniu liniowa charakterystyka, szeroki zakres mierzonych prędkości, właściwości uśredniające wynik pomiaru oraz ograniczona wrażliwość na zmianę parametrów fizycznych gazu. Natomiast ze względu na stosunkowo duże wymiary i bezwładność elementu wirującego, pomiary w niejednorodnym polu prędkości, oraz w przepływach zmiennych w czasie wymagają złożonej interpretacji wyniku. Pomiary takie są także obciążone znaczną niepewnością. Analiza tych zjawisk możliwa jest w oparciu o model matematyczny anemometru.

Modelowaniu anemometrów z wirującym elementem pomiarowym oraz ich eksperymentalnej weryfikacji poświęcona jest obszerna literatura. W fundamentalnej pracy [2] autor podaje równanie ruchu dla anemometru skrzydełkowego oraz zwraca uwagę na efekt zawyżania pomiaru prędkości średniej związany z inercją wirnika. Dalsze prace w tej dziedzinie [3-6] opierają się na podobnym do przyjętego w pracy [2] modelu zjawiska. Dla przyjętych założeń rozważane jest równanie ruchu wirnika, przy czym uwzględniane są momenty siły związane z wymianą pędu z przepływem oraz z tarcie. Generalnie zakładany model dynamiczny anemometru, oparty na równaniu ruchu jest w tych pracach zbliżony. Punktem wyjścia jest druga zasada dynamiki dla ruchu obrotowego wirnika anemometru przy uwzględnieniu sumarycznego momentu siły działającego na wirnik.

Podobną metodykę konstrukcji uproszczonego modelu anemometru skrzydełkowego przedstawiono w pracach [7-10]. Model ten opisuje dynamiczną zależność prędkości wskazywanej przez anemometr od prędkości mierzonej, przy czym zawiera on tylko jeden parametr. Posiada on jednak pewne istotne wady wynikające z przyjętych założeń. Zgodnie z tym modelem przy skoku prędkości mierzonej z pewnej

niezerowej wartości do zera prędkość wskazywana nie zmienia się. Ogólnie model nie opisuje poprawnie stanów dynamicznych anemometru przy skokowej, dużej zmianie prędkości mierzonej. Ponadto model ten nie uwzględnia wpływu kąta nachylenia skrzydełek na dynamikę anemometru oraz osiowej wymiany pędu pomiędzy przepływem a wirnikiem.

W pracy [11] autor zaproponował eliminujący powyższe wady alternatywny model anemometru, wykorzystujący bilans mocy. W oparciu o ten model możliwe jest stosunkowo dokładne przeprowadzenie optymalizacji dynamiki procesu pomiarowego oraz szacowanie i minimalizacja niepewności pomiaru. W tym artykule zaproponowano metodę optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym. Rozwiązanie to jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [12]. Przedstawiono proponowaną metodę i rozwiązanie układowe oraz przeprowadzono porównawcze badania modelowe anemometru bez układu optymalizacji oraz wyposażonego w taki układ.

2. Model matematyczny anemometru skrzydełkowego bazujący na bilansie mocy

Autor w pracy [11] zaproponował konstrukcję modelu matematycznego w oparciu o bilans mocy. Bilans ten bazuje na fakcie, że zmiana energii kinetycznej wirnika anemometru jest równa różnicy energii kinetycznej strumienia medium wpływającego i wypływającego z przekroju czynnego anemometru. Autor zakłada zachowawczy charakter procesu oraz jednorodne pole prędkości mierzonej v w medium o gęstości ρ . Przyjmuje się, że wirnik posiada skrzydełka nachylone do przepływu pod kątem α , odległość środka aerodynamicznego skrzydełek od osi obrotu wynosi R , przekrój czynny oddziaływania przepływu z wirnikiem w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu wirnika wynosi S , moment bezwładności wirnika względem osi obrotu wynosi J , a prędkość kątowa wirnika ω .

W konstrukcji modelu autor przyjmuje założenie, że medium dociera do przekroju czynnego S anemometru i wypływa z niego z prędkością średnią U równą:

$$U = V = \frac{\omega R}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1)$$

Postulat ten w założeniu odzwierciedla proces pracy wirnika anemometru jako pewnego rodzaju turbiny. W przypadku gdy mierzona prędkość v jest mniejsza od V następuje zasysane medium przez turbinę, natomiast gdy v jest większe od V następuje tłumienie przepływu. Zgodnie z tym założeniem masa medium docierająca oraz wypływająca z przekroju czynnego anemometru w czasie dt wynosi:

$$dm = \rho S V dt \quad (2)$$

Bilans mocy związany z wymianą energii kinetycznej pomiędzy przepływem a turbiną anemometru można zapisać w postaci:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = \frac{\rho S V v^2}{2} - \frac{\rho S V V^2}{2} \quad (3)$$

Z tego równania uwzględniając (1) otrzymujemy model matematyczny anemometru skrzydełkowego dla przyjętych założeń w postaci:

$$c \frac{dV}{dt} = -V^2 + v^2 \quad (4)$$

gdzie: $c = \frac{2J \operatorname{tg}^2 \alpha}{\rho R^2 S}$ jest jedynym parametrem modelu i posiada wymiar długości. Zgodnie z równaniem (4)

w stanie ustalonym prędkość wskazywana jest równa prędkości mierzonej.

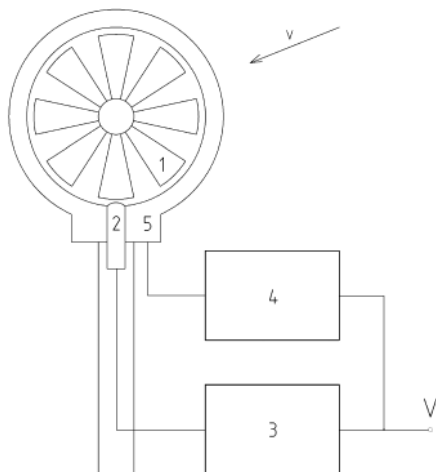
W dalszej części pracy omówiono metodę i rozwiązanie układowe optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym. Na bazie modelu (4) przeprowadzono porównawcze badania modelowe anemometru bez układu optymalizacji oraz wyposażonego w taki układ.

3. Metoda optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym

Anemometry mechaniczne z wirującym elementem pomiarowym posiadają szereg korzystnych właściwości metrologicznych. Należą do nich w przybliżeniu liniowa charakterystyka, szeroki zakres mierzonych prędkości, właściwości uśredniające wynik pomiaru oraz ograniczona wrażliwość na zmianę parametrów fizycznych płynącego medium.

Wadą anemometrów mechanicznych z wirującym elementem pomiarowym są złe właściwości dynamiczne wynikające ze stosunkowo dużych wymiarów i bezwładności mechanicznej elementu pomiarowego. Czas ustalania się prędkości wirnika przy zmianie prędkości przepływu jest znaczny, przy czym czas ten jest mniejszy przy rozpędzaniu wirnika, a większy przy zwalnianiu. W wyniku tego zjawiska pomiary w przepływach zmiennych w czasie wymagają złożonej interpretacji wyników oraz są obciążone znaczną niepewnością. W anemometrach tych pomiar prędkości średniej w przepływach zmiennych w czasie może być zawyżony nawet o kilkanaście procent. W pracy [13] przedstawiono wyniki badań możliwości wykorzystania siły poosiowej anemometru skrzydełkowego do kompensacji tego zjawiska. Autor tej pracy przedstawia wstępne wyniki badań eksperymentalnych i modelowych tej metody oraz analizuje jej możliwości aplikacyjne.

Alternatywne rozwiązanie jest przedmiotem niniejszego artykułu. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie proponowany układ optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym.



Rys. 1. Układ optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym

Układ optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym zbudowane jest z umieszczonego w badanym przepływie o prędkości v wirnika anemometru 1, czujnika prędkości obrotowej wirnika 2, układu przetwarzania prędkości obrotowej wirnika na sygnał wyjściowy 3, elektronicznego układu wspomaganie rozpędzania lub hamowania wirnika 4 oraz zespołu elektromagnesów 5. Poprzez wymianę pędu pomiędzy badanym przepływem v a wirującym elementem pomiarowym wirnik osiąga prędkość obrotową stanowiącą miarę prędkości przepływu. Wirnik wykonany jest z materiału dobrze przewodzącego prąd elektryczny lub materiału oddziałującego z polem magnetycznym. Jego prędkość obrotowa mierzona jest za pomocą czujnika 2, a następnie przetwarzana w bloku 3 na sygnał wyjściowy V stanowiący miarę prędkości przepływu. Równocześnie sygnał ten przetwarzany jest w układzie wspomaganie rozpędzania lub hamowania wirnika 4 na sygnał sterujący zespołem elektromagnesów 5 umieszczonych przy wirniku, na jego obwodzie. Układ wspomaganie 4 pracuje sekwencyjnie zgodnie z przyjętym algorytmem, sterując prądem zespołu elektromagnesów w taki sposób, aby poprzez pole magnetyczne i prądy wirowe generowane w wirniku lub oddziaływanie magnetyczne wytwarzać moment siły przyspieszający lub hamujący obroty wirnika.

Proces optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym realizowany jest sekwencyjnie, w dwóch etapach, w układzie wspomaganie rozpędzania lub hamowania wirnika 4. W pierwszym etapie, w celu stwierdzenia, czy oddziaływanie wirnika z przepływem powoduje wzrost, czy spadek prędkości obrotowej wirnika, wyznaczana jest pochodna dV/dt sygnału pomiarowego V .

W drugim etapie generowany jest impulsowy sygnał do zespołu elektromagnesów 5. Jeśli pochodna jest dodatnia, zespół elektromagnesów 5 wytwarza chwilowy moment siły przyspieszający wirnik 1, a jeśli ujemna – wytwarza moment siły hamujący wirnik 1. Następnie sygnał generacji momentu siły jest wyłączany i następuje powrót do pierwszego etapu, a proces odbywa się cyklicznie. W ten sposób następuje przyspieszenie procesu nadażania prędkości obrotowej wirnika za zmianami prędkości przepływu, a tym samym optymalizacja właściwości dynamicznych anemometru.

Możliwy jest również uproszczony tryb pracy wyłącznie z hamowaniem wirnika. Pozwala to na skrócenie czasu hamowania wirnika, a także wyrównanie czasu rozpędzania i hamowania wirnika. Metoda i układ optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym pozwalają na redukcję czasu odpowiedzi anemometru na zmiany sygnału prędkości, przy czym możliwe jest uzyskanie zbliżonego czasu przy rozpędzaniu i przy zwalnianiu wirnika. Powoduje to minimalizację dynamicznej niepewności pomiaru oraz minimalizację zjawiska zawyżania pomiaru prędkości średniej w przepływach zmiennych w czasie.

4. Wyniki badań modelowych

Wstępne badania zaproponowanej metody i układu optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym przeprowadzono w oparciu o symulację komputerową. Na bazie modelu (4) przeprowadzono porównawcze badania modelowe anemometru bez układu optymalizacji oraz wyposażonego w taki układ. Przyjęto parametry fizyczne rzeczywistego anemometru zawarte w pracy [10]. Do modelu (4) wprowadzono parametr u o wymiarze prędkości, umożliwiający symulację procesu hamowania lub rozpędzania wirnika za pomocą pola magnetycznego:

$$c \frac{dV}{dt} = -V^2 + v^2 + u^2 \quad (5)$$

W procesie badań symulacyjnych przyjęto postać tego parametru jako:

$$u^2 = h_i V_i' \quad (6)$$

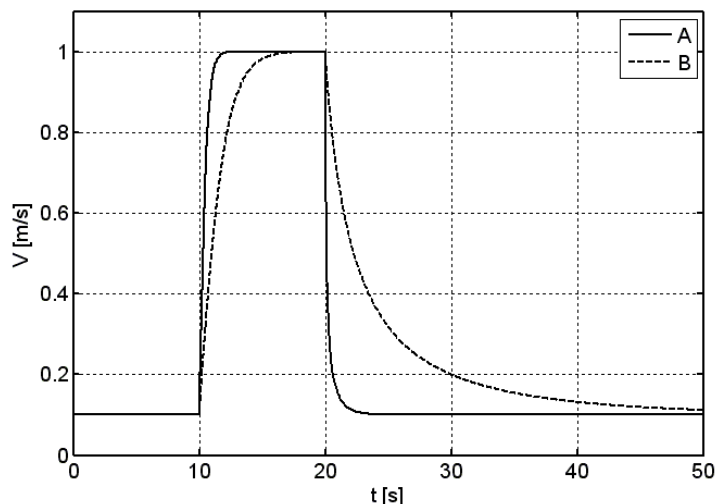
gdzie:

- V_i' – pochodna prędkości wyznaczona w pierwszym etapie cyklu optymalizacji,
- h_i – parametr procesu rozpędzania lub hamowania wirnika o wymiarze długości.

Parametr h_i w pierwszym etapie cyklu optymalizacji przyjmuje wartość zero, natomiast w drugim etapie w zależności od znaku pochodnej przyjmuje jedną z dwóch dobranych, oddzielnie dla procesu przyspieszania, oddzielnie dla hamowania wartości. Parametr ten może być również funkcją prędkości wyznaczonej w pierwszym etapie.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg symulacji pracy układu optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru.

Przedstawia on przebieg sygnału wyjściowego V z anemometru z wirującym elementem pomiarowym oraz układem optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru – przebieg A. Jest to odpowiedź anemometru na skokową zmianę mierzonej prędkości od wartości 0,1 m/s do wartości 1 m/s w chwili $t = 10$ s, a następnie spadek prędkości do wartości 0,1 m/s w chwili $t = 20$ s. W tej symulacji czas modelowania 50 s podzielono równomiernie na 500 przedziałów. W każdym przedziale realizowano dwuetapowy cykl optymalizacji. Dobrano wartość parametru h_i równą 200 m dla przyspieszania oraz 1000 m dla hamowania. Dla porównania przedstawiono odpowiedź anemometru bez układu optymalizacji właściwości dynamicznych – przebieg B. Na rys. 2. widoczny jest uzyskany efekt działania układu optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru, polegający na znacznym skróceniu oraz wyrównaniu czasów narastania i opadania sygnału. Pozwala na minimalizację dynamicznej niepewności pomiaru oraz minimalizację zjawiska zawyżania pomiaru prędkości średniej w przepływach zmiennych w czasie.



Rys. 2. Przebieg symulacji pracy układu optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru

5. Podsumowanie

W pracy poddano teoretycznej analizie i badaniom symulacyjnym nową metodę i układ optymalizacji właściwości dynamicznych anemometru z wirującym elementem pomiarowym. Omówiono ideę metody oraz metodologię badań modelowych. Zaprezentowano także wstępne wyniki eksperymentów symulacyjnych. Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda może okazać się przydatna w zastosowaniu do optymalizacji właściwości dynamicznych anemometrów. Metoda pozwala na kontrolowanie i optymalizację czasu narastania i opadania sygnału pomiarowego, a w szczególności na minimalizację i wyrównanie tych czasów. Wiąże się to jednak z wprowadzeniem do przyrządu dodatkowych elementów konstrukcyjnych oraz rozbudową oprogramowania sterującego, co komplikuje jego budowę i zwiększa koszty. Jednak w przypadku pewnej klasy przyrządów, w której istotna jest minimalizacja błędów dynamicznych, proponowane rozwiązanie może zostać zastosowane. Wymaga to dalszych prac badawczych w zakresie modelowania, a następnie przejścia do etapu prac eksperymentalnych i prototypowych.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych 2016 realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Unwin I. D., Phil M.: *The Measurement of Air Flow in British Coal Mines: A Historical Review*; B. SC. D.I.S, http://www.cmhrc.co.uk/cms/document/air_flow_2007.pdf, (2007).
- [2] Ower E.: *On the response of a vane anemometer to an air-stream of pulsating speed*. Phil. Mag. Series 7 23, 157, 992-1005 (1937).
- [3] Lee W.F.Z., Kirik M.J., Bonner J.A.: *Gas Turbine Flowmeter Measurement of Pulsating Flow*. J. Eng. Power, 97, 4, 531-539 (1975).
- [4] Wyngaard J.C.: *Cup, Propeller, Vane, and Sonic Anemometers in Turbulence Research*. Annual Review of Fluid Mechanics, 13, 399-423 (1981)
- [5] Lee B., Cheesewright R., Clark C.: *The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows*. Flow Measurement and Instrumentation, 15, 239-248, (2004).
- [6] Pindado S., Sanz A., Wery A.: *Deviation of Cup and Propeller Anemometer Calibration Results with Air Density*. Energies, 5(3), 683-701, (2012).
- [7] Lee B.: *Dynamic Response of Small Turbine Flowmeters in Pulsating Liquid Flows*. Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Systems Engineering Brunel University, (2002).
- [8] Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T.: *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych*. Archives of Mining Sciences, Monograph 1, Kraków, (2006).

- [9] 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 Górotworu PAN, 10, 1-4, 115-130, (2008).
- [10] Ostrogórski P.: *Właściwości dynamiczne cyfrowego anemometru skrzydełkowego*. Przegląd Górniczy, 71, 4, 67-71, (2015).
- [11] Ligęza P.: *O modelu matematycznym anemometru skrzydełkowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 17, 3-4, 55-60, (2015).
- [12] Ligęza P.: *Sposób pomiaru prędkości płynu za pomocą anemometru z wirującym elementem pomiarowym i anemometr z wirującym elementem pomiarowym*. Zgłoszenie Patentowe UP RP, P – 416351, (2016).
- [13] Ostrogórski P.: *Badania możliwości wykorzystania siły poosiowej anemometru skrzydełkowego do kompensacji zawyżania wyniku pomiaru prędkości zmiennych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 17, 3-4, 61-66, (2015).

Optimization of the dynamic properties of an anemometer with a rotating measuring element

Abstract

Anemometers using the phenomenon of transfer of momentum between the gas flow and the rotating measuring element are an important class of instruments used in the metrology of flows, in particular in meteorology and ventilation measurements. The phenomenon of over-estimation of the average velocity measurements associated with the inertia of the rotor is known. The research of this phenomenon and of the dynamics of measurement process, as well as the estimation of measurement uncertainty and its reduction needs a mathematical model of the anemometer. The paper proposes a method to optimize the dynamic properties of an anemometer with a rotating measuring element. The article presents the concept of the proposed system and the results of comparative simulation studies of anemometer equipped with such a system, and without system.

Keywords: vane anemometer, mathematical model, dynamic states, model tests