

Własności metrologiczne przepływomierza Coriolisa

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań własności metrologicznych przepływomierza Coriolisa w przypadku pomiaru niskich strumieni masy. Stwierdzono, że przepływomierze wzorcowane wodą nie zawsze zachowują deklarowaną dokładność w przypadku przepływu czynnika ściśliwego pod niskimi ciśnieniami i małych strumieniach masy.

Abstract. The paper presents the results of research on the metrological properties of the Coriolis flowmeter in the case of measuring low mass streams. It has been found that water-calibrated flow meters do not always retain the declared accuracy when compressing a compressible medium under low pressures and small mass streams. (*Metrological properties of Coriolis flowmeter*).

Słowa kluczowe: pomiar, przepływomierz Coriolisa, błąd pomiaru, płyn ściśliwy.

Keywords: measurement, Coriolis flow meter, measuring error, compressible liquid.

Wstęp

Pomiar strumienia masy i objętości jest powszechnym i podstawowym pomiarem wykonywanym we wszystkich gałęziach przemysłu. Postępowi technologii towarzyszy również postęp w dziedzinie przepływomierzy, które stają się bardziej uniwersalne i dokładniejsze. Uważa się, że przepływomierzem o szerokim spektrum pomiarowym jest przepływomierz oparty na zjawisku opisanym przez Coriolisa, mierzący bezpośredni strumień masy przepływającego płynu. Główną zaletą tych przepływomierzy jest dokładność pomiarów sięgająca dla najdokładniejszych modeli $\pm 0,1\%$ dla strumienia masy, jak również dokładność pomiaru gęstości do $0,0005$ g/ml. Takie dokładności uzyskiwane są przy fabrycznej kalibracji i co ważne bez konieczności dokonywania jej po zamontowaniu urządzenia na instalacji docelowej. Dodatkowo zaletą jest brak wymagań odcinków prostych, zarówno przed, jak i za urządzeniem, możliwość pomiaru dwukierunkowego oraz możliwość stosowania masowców dla szerokiego spektrum mediów: od gazów, poprzez ciecze, po zawiesiny i pasty [1].

W związku z tym, że ten typ przepływomierza jest coraz częściej wykorzystywany w instalacjach przemysłowych, podjęto badania nad właściwościami metrologicznymi tego typu przepływomierzy w celu wyznaczenia błędu wskazania w specyficznych warunkach pomiaru.

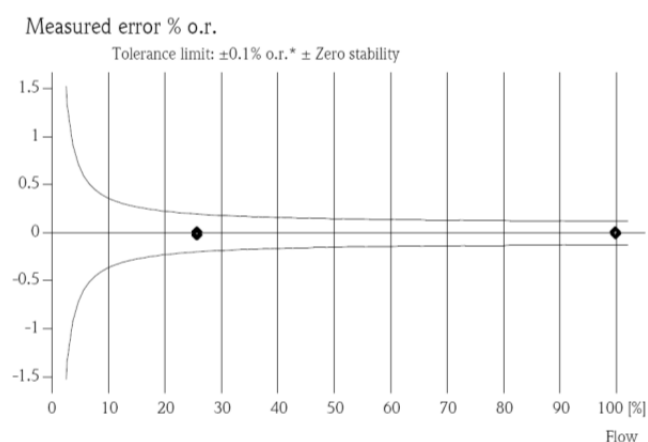
Charakterystyka przepływomierza

Przepływomierze Coriolisa są jednymi z nowoczesnych rozwiązań przepływomierzy, przeznaczonych do pomiaru bezpośrednio strumienia masy płynów o różnych gęstościach i lepkościach. Zasada działania oparta jest na wykorzystaniu zjawiska Coriolisa, które powoduje występowanie sił bezwładności w przypadku występowania jednoczesnego ruchu obrotowego i postępowego ciała. Kierunek działania siły bezwładności wyznaczony jest iloczynem wektorowym prędkości liniowej i prędkości obrotowej. W przepływomierzach wykorzystujących to zjawisko, ruch obrotowy został zastąpiony ruchem drgającym rur pomiarowych [2]. Co do wartości siły bezwładności, zwanej siłą Coriolisa, to jest ona proporcjonalna do masy poruszającego się płynu oraz iloczynu wektorowego wspomnianych prędkości. W efekcie działania powstających sił Coriolisa, następuje opóźnienie fazy drgań rur pomiarowych w częściach dolotowych oraz ich przyspieszenie na odcinkach wylotowych. Miara strumienia masy jest wartością przesunięcia fazowego drgań na wlocie i wylocie z rury (często 2 rury) pomiarowej. Przepływomierze Coriolisa mogą również mierzyć gęstość przepływającego płynu, ponieważ to od gęstości zależy

częstotliwość drgania rur pomiarowych. W niektórych rozwiązaniach zmierzona częstotliwość jest wykorzystywana do określenia częstotliwości drgań rezonansowych rur w trakcie pomiaru tak, aby zjawisko Coriolisa skutkowało silnym sygnałem pomiarowym.

Cel i zakres badań

Celem badań było wyznaczenie dokładności wskazań przepływomierza Coriolisa, przeznaczonego do pomiaru gazów i par. Zakres pomiarowy dla którego zostało przeprowadzone wzorcowanie i sprawdzenie przez producenta wynosi $36\ 000$ kg/h, przy średnicy rurociągu DN80. Nie jest to maksymalny strumień jaki można mierzyć, a wynika on z możliwości stanowiska testowego producenta.



Rys. 1. Świadectwo wzorcowania przepływomierza Coriolisa [3]

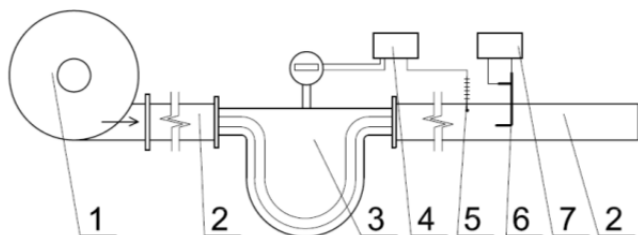
Zgodnie z dołączonym świadectwem wzorcowania (rysunek 1) błąd wskazania wynosi $0,1\%$ przy strumieniach $50-100\%$ przepływu maksymalnego, natomiast poniżej 10% zaczyna gwałtownie rosnąć i przy 2% przepływu maksymalnego można się spodziewać błędu $1,5\%$, a poniżej 2% zakresu błąd jest nieokreślony. Wzorcowanie fabryczne przeprowadzane jest standardowo przy użyciu wody, a przeliczenie na medium przeznaczenia dokonywane jest poprzez zmianę nastaw w układzie elektroniki. Jest to zgodne z oświadczeniem Holenderskiego Urzędu Miar i Wag, w którym stwierdza się po przeprowadzeniu testów, że współczynnik kalibracyjny uzyskany dla wody może być stosowany dla gazu bez konieczności kalibracji polowej, dla uzyskania wyspecyfikowanej dokładności pomiarów [4]. Ze względu na bezpośredni pomiar masy płynu nie powinno to wpływać na późniejsze wyniki, jednakże istotna różnica występuje w

ściślności płynu, gdy medium docelowym jest gaz. Wprowadzona w drganie ciecz ze względu na brak ściślności drga całą masą wraz z rurą pomiarową, natomiast drgania gazu mogą sprowadzać się do lokalnego sprężania i rozprężania gazu w sąsiedztwie ścianek rury, ze względu na jego ściślność. W związku z tym, masa drgająca może nie wiele różnić się od masy samej rury, co przy i tak małej masie samego gazu może być źródłem dużych błędów pomiaru. Znane są w literaturze [5] wyniki badań doświadczalnych dotyczące przepływów wody z zawartością gazu w proporcjach od 0 - 100%. Wynika z nich, że przepływomierz Coriolisa wskazywał poprawne wartości przepływu.

Własne badania doświadczalne przepływomierza, przeprowadzono stosując jako medium powietrze i zapewniając strumień masy w granicach od 0,2% zakresu (65 kg/h) do 1,12% (400 kg/h) zakresu pomiarowego przepływomierza. Prędkości średnie powietrza w rurociągu zmieniały się w zakresie (2,8 do 16,5 m/s). Niepewność pomiaru układu porównawczego wynosiła poniżej 2%.

Stanowisko doświadczalne

Do przeprowadzenia badań doświadczalnych przygotowano stanowisko, którego schemat przedstawiono na rysunku 2. Stanowisko składa się z wentylatora WP 7.6 (1) napędzanego silnikiem elektrycznym, zasilanym z falownika prądu jednofazowego. Powietrze z wentylatora tłoczone było do rurociągu o średnicy nominalnej 80 mm (2), przepływało przez przepływomierz Coriolisa (3) o zakresie pomiarowym do 36000 kg/h. Pomiar porównawczy wykonano rurką Prandtla (6). Parametry powietrza określono korzystając m. in. z pomiaru temperatury wykonanego czujnikiem PT500 (5). Do rejestracji wskazań przepływomierza Coriolisa, wykorzystano wyjście pętli prądowej skalowanej do przewidywanego zakresu pomiaru wielkości mierzonej, które jest fabrycznie zainstalowane w sterowniku urządzenia. Sygnał prądowy zarejestrowano w rejestratorze elektronicznym MPI-8E-0 firmy Metronic (4), wyposażonym w 8 wejść programowanych, z interwałem 3 sekund. Na tym samym urządzeniu rejestrowano temperaturę powietrza w rurociągu oraz temperaturę powietrza zasysanego przez wentylator.



Rys. 2. Schemat stanowiska doświadczalnego. Opis w tekście.

Pomiar ciśnienia barometrycznego i wilgotności powietrza wykonywano w pomieszczeniu laboratorium. Przepływ wzorcowy wyznaczono rurką Prandtla o średnicy 2 mm ustawianą w wyznaczonych punktach przekroju. Współrzędne punktów, wyznaczono zgodnie z normą [6] dla czterech pierścieni równoważnych. Producent podaje w instrukcji montażu [7], że przepływomierz nie wymaga zachowania odcinków prostych przed i za urządzeniem, jednocześnie zaleca aby nie instalować w bezpośrednim sąsiedztwie armatury i kolan. Coriolisa zamontowano za wentylatorem zachowując odległość 1000 mm (12,5 średnicy) od wentylatora, a przekrój pomiarowy, w którym mierzono przepływ rurką Prandtla w odległości 1500 mm (ponad 18 D) od Coriolisa.

Ciśnienie dynamiczne pobierane z rurki Prandtla rejestrowano w rejestratorze parametrów przepływu powietrza firmy LAT Sp. z o.o. (7), wyposażonego w przetwornik ciśnienia różnicowego o zakresie 0-500 Pa. Rejestrację wyników realizowano z interwałem 1 sekundy. Równocześnie rejestrowano ciśnienie statyczne przetwornikiem o zakresie 0-2500 Pa oraz ciśnienie barometryczne przetwornikiem ciśnienia absolutnego, również z interwałem 1 sekundy.

Metodyka badań

Pomiary wykonano dla 5 strumieni masy, w zakresie od 65 kg/h do 400 kg/h, zmieniając strumień poprzez regulację prędkości obrotowej wentylatora, sterowanego falownikiem. Zadawano częstotliwości falownika od 10Hz (20% prędkości nominalnej) do 50Hz (100% prędkości nominalnej) z krokiem co 5Hz (10%). W ten sposób uzyskano przepływy w zakresie od 0,2% zakresu pomiarowego przepływomierza Coriolisa, do 1,12% zakresu pomiarowego. Dla zadanych obrotów rejestrowano wskazania przepływomierza Coriolisa i wykonano pomiary ciśnienia dynamicznego i statycznego, dla czterech powierzchni równoważnych przekroju rurociągu, za pomocą rurki Prandtla. Przekroje pomiarowe wyznaczono z zależności (1) [6]:

$$(1) \quad y_i = D \times 0.5 \left(1 \pm \sqrt{\frac{|2n - 2i_\theta + 1|}{2n}} \right)$$

gdzie: D – średnica rurociągu, n – liczba powierzchni równoważnych, i_θ – liczba punktów pomiarowych dla jednej osi.

Z równania (1) wyznaczono punkty pomiarowe na promieniach: 0,968 D, 0,895 D, 0,806 D, 0,677 D, 0,323 D 0,194 D, 0,105 D, 0,032 D.

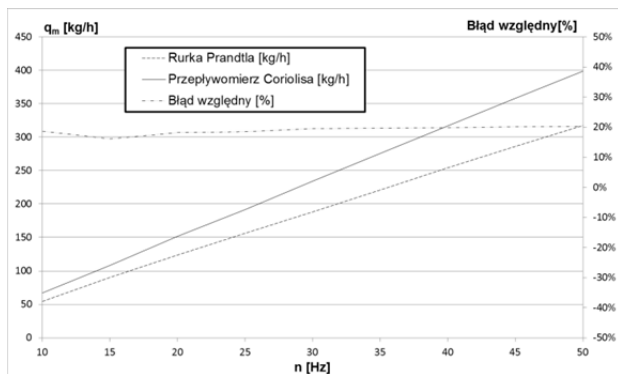
Do wyznaczenia gęstości powietrza, wykorzystano pomiar nadciśnienia statycznego w przekroju pomiarowym, temperaturę, wilgotność i ciśnienie barometryczne. Znając gęstość i ciśnienie dynamiczne wyznaczono prędkość miejscową, a dalej prędkość średnią.

Wyniki pomiarów

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że badany przepływomierz wskazuje strumień masy wyższy o około 20%, od strumienia masy wzorcowego. Przepływomierz wykorzystujący zjawisko Coriolisa badany był w zakresie małych strumieni masy rzędu 0,2-1,12% zakresu pomiarowego, w przypadku płynu ściślności. Wyznaczoną zależność strumienia masy od częstotliwości falownika, dla pomiarów przepływomierzem Coriolisa i rurką Prandtla, przedstawiono na rysunku 3.

Zmierzona przepływomierzem Coriolisa gęstość przepływającego czynnika, została porównana z wyznaczoną na podstawie parametrów powietrza. Stwierdzono, że wskazywana przez przepływomierz gęstość płynu jest większa o ok. 8% od wyznaczonej na podstawie parametrów powietrza. Trudno jest użytkownikowi przepływomierza określić, jaki wpływ ma wartość gęstości różna od wyznaczonej tradycyjnymi metodami, gdyż z zasady działania Coriolisa, wskazanie zależy bezpośrednio od masy płynu.

Sprawdzając wpływ zauważonej różnicy gęstości stwierdzono, że przyjmując wskazywaną przez Coriolisa wartość gęstości do obliczeń strumienia masy rurką Prandtla, odchyłka pomiarów wzrasta o dodatkowe 4%. Do dalszej analizy wyników pomiarów zaniebano zauważoną różnicę gęstości, jako rzecz nie istotną z punktu widzenia bezpośredniego pomiaru strumienia masy przez przepływomierz.



Rys. 3. Zależność strumienia masy od częstotliwości falownika dla pomiarów przepływomierzem Coriolisa i rurką Prandtla.

Strumień masy mierzony obydwoma metodami rośnie liniowo wraz z obrotami wentylatora (linia ciągła pomiar przepływomierzem Coriolisa, linia kreska kropka pomiar rurką spiętrzącą rys. 3.), przy czym wartości strumienia wskazane przez Coriolisa rosną szybciej (wartości na lewej osi). Błąd względny wskazania został na wykresie przedstawiony linią kreska–dwie kropki i jest linią prawie poziomą. Odchyłka wskazania rośnie proporcjonalnie do wzrostu wartości przepływu, dlatego błąd względny jest, w badanym zakresie, prawie stały i wynosi nieco ponad 20%. Jest to bardzo duży błąd wskazania i trudno taki wynik akceptować, nawet jako zgrubne szacowanie przepływu.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że nie jest obojętne dla przepływomierza opartego na wykorzystaniu zjawiska Coriolisa rodzaj medium i zakres pomiarowy. Ściślność płynu w istotny sposób może wpływać na pomiary dynamiczne.

W przepływomierzach masowych wzorcowanych do cieczy o dużej gęstości i płynów nieściśliwych, zmiana czynnika na płyn o mniejszej gęstości i ściśliwy sprawia, że pomiary odbywają się na marginesie zakresu pomiarowego, gdzie błąd pomiaru jest bardzo duży i może wynosić ponad 20%, co pokazały przeprowadzone pomiary.

Pomimo uniwersalności metody i zdawałoby się możliwości zastosowania jednego urządzenia do pomiaru wszystkich płynów nie jest bez znaczenia gęstość i ściślność płynu.

W przypadku płynów ściśliwych, drgająca rura może wywoływać w gazach zjawiska falowe – obszary spiętrzenia gazu i obszary jego rozprężenia, co wpływa na oddziaływanie masy gazu na ścianki zmieniając ich sposób drgania, w odmienny sposób niż drgania cieczy. Producent zapewnia, że urządzenie na podstawie zmierzonej gęstości płynu, zmienia częstotliwość drgań dobierając częstotliwość optymalną.

Należy rozumieć trudność pomiaru wynikającą z znacznie większej masy materiału drgającej rury niż masy drgającej w jej wnętrzu gazu. W przypadku cieczy, efekt Coriolisa jest na tyle wyraźny, że czujniki mogą z wystarczającą dokładnością określić przesunięcie fazy drgań, a w przypadku gazów ten efekt jest znacząco mniejszy.

Autorzy: dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: Artur.Andruszkiewicz@pwr.edu.pl; dr inż. Wiesław Wędrychowicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: Wieslaw.Wedrychowicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Piotr Synowiec, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: Piotr.Synowiec@pwr.edu.pl; mgr inż. Piotr Piechota, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: Piotr.Piechota@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Janota J., Akademia automatyki: Przepływomierze masowe Coriolisa Zasada działania, budowa, zalety i wady., Podkontrola.pl, 2017.
- [2] Krajewski M., Proniewicz J., Przepływomierze masowe Coriolisa, <https://automatykab2b.pl/technika/506-przeplywomierze-masowe-coriolisa#.WvQNme-FPcs>, (dostęp 15.03.2018)
- [3] Muhammad A., Flow Calibration with Adjustment, 2009.
- [4] Stappert K., Przepływomierze masowe Coriolisa firmy Micro Motion do pomiaru gazu, *Magazyn EX*, 4/2010, 50-59.
- [5] Szutkowski B., Przepływomierz Coriolisa w zapowietrzonych instalacjach, *Automatykaonline.pl*, <http://automatykaonline.pl/Artykuly/Pomiary/przeplywomierz-coriolisa-w-zapowietrzonych-instalacjach>, 2014, (dostęp 15.03.2018).
- [6] PN-Z-04030-7:1994 Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną.
- [7] Instrukcja obsługi przepływomierza masowego Coriolisa.