

Pomiary pulsującego strumienia płynu (5)

Zastosowanie przepływomierzy oscylacyjnych do pomiaru pulsującego strumienia płynu

Mateusz Turkowski *

W niniejszej, piątej (ostatniej) części cyklu artykułów omówiono problemy, które mogą wystąpić podczas pomiaru pulsującego strumienia płynu za pomocą przepływomierzy oscylacyjnych (wirowych i z oscylatorem mechanicznym). Problemy te są związane przede wszystkim ze zjawiskiem unoszenia częstotliwości, które ma miejsce, gdy częstotliwość pulsacji strumienia jest bliska częstotliwości generowania wirów w przepływomierzu.

Przepływomierze wirowe

Uwagi ogólne

Przepływomierz wirowy składa się z dwóch głównych części: generatora wirów wytwarzającego wiry i sensora do detekcji wirów [1, 2]. Przy przepływie ustalonym wiry odrywają się alternatywnie z obu stron generatora wirów z częstotliwością proporcjonalną do prędkości przepływu w szerokim zakresie liczb Reynoldsa.

Dla przepływu ustalonego obowiązuje zależność

$$U = \frac{f_v d}{St} \quad (1)$$

gdzie: U – prędkość średnia płynu w rurociągu,
 f_v – częstotliwość odrywania się wirów,
 d – szerokość generatora wirów,
 St – liczba Strouhala, stała w zakresie liniowości wskazań przepływomierza.

W warunkach występowania pulsacji decydującym parametrem jest stosunek częstotliwości pulsacji do częstotliwości generowania wirów. Gdy współczynnik ten jest mały, obserwuje się zachowanie quasi ustalone, a częstotliwość odrywania się wirów nadąża za zmianami prędkości, liczba Strouhala, a więc i stała wzorcowania, się nie zmieniają [4].

Gdy częstotliwość pulsacji staje się porównywalna z częstotliwością odrywania się wirów, występuje silna tendencja do tzw. unoszenia częstotliwości, tj. częstotliwość generacji wirów blokuje się na częstotliwości pulsacji i przestaje zależeć od strumienia płynu. Zjawisko to występuje, gdy częstotliwości są takie same ($f_v = f_p$) lub częstotliwość wirów jest równa połowie częstotliwości pulsacji ($f_v = 0,5 f_p$).

W warunkach unoszenia częstotliwości przepływomierz przestaje być rzetelnym przyrządem do pomiaru strumienia płynu. Błędy wskazywanego strumienia mogą dochodzić do 80 %.

Zakres strumienia, przy którym występuje zablokowanie częstotliwości wirów na częstotliwości pulsacji zależy od amplitudy pulsacji, kształtu generatora wirów i stopnia zmniejszenia przekroju strumienia przez generator wirów, czyli szerokości generatora wirów. Niestety badania wykazują, że najgorsze pod tym względem są kształty generatora przyjmowane zwykle przez producentów za optymalne (np. kształt litery Δ lub T), gdyż zapewniają dużą energię i regularność ścieżki wirowej. Zakres unoszenia częstotliwości zwiększa się też wraz ze wzrostem stopnia zmniejszenia przekroju strumienia (czyli zwiększeniem szerokości generatora wirów) do wartości typowej właśnie dla dostępnych w handlu przepływomierzy.

Gdy częstotliwość pulsacji jest znacznie większa niż częstotliwość generacji wirów, wówczas unoszenie częstotliwości nie występuje, ale zmienia się liczba Strouhala i w stosunku do wzorcowania wykonanego dla przepływu ustalonego obserwuje się odchylenia rzędu ± 10 %.

Progowa amplituda pulsacji

Krytyczną amplitudą pulsacji jest wartość, która wystarcza do zainicjowania zjawiska unoszenia częstotliwości przy częstotliwości pulsacji dwukrotnie większej niż częstotliwość generacji wirów. Gdy wartość amplitudy jest mniejsza niż ta wartość krytyczna (progowa), wówczas nie ma zmian liczby Strouhala ani odchylen od charakterystyki wyznaczonej dla przepływu ustalonego.

Dostępne dane z badań w tunelu aerodynamicznym i na stanowiskach do wzorcowania wskazują, że ta krytyczna, progowa amplituda jest na poziomie 3 % średniej wartości strumienia. Badania te wykazały też, że nie ma to związku między progową amplitudą a kształtem generatora wirów lub stopniem zwężenia przekroju strumienia.

* dr hab. inż. Mateusz Turkowski
 – Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych,
 Politechnika Warszawska

Ponieważ krytyczna amplituda pulsacji jest tego samego rzędu co amplituda turbulencji, należy здаwać sobie sprawę, że do detekcji i pomiaru amplitudy pulsacji należy zastosować zaawansowane techniki. Dla oceny możliwości wystąpienia unoszenia częstotliwości sugeruje się [3] zastosowanie analizy widma surowego sygnału z sensora przepływomierza albo sygnału z termooanemometru wstawionego po stronie dopływowej przepływomierza

Jeżeli nie da się z wystarczającym prawdopodobieństwem wykazać, że amplituda pulsacji jest mniejsza niż 3 %, to trzeba przyjąć, że zjawisko unoszenia może wystąpić, jeżeli częstotliwość pulsacji jest w zakresie od 25 % minimalnej do podwójnej maksymalnej częstotliwości generowania wirów.

Graniczna częstotliwość dla quasi ustalonego zachowania przepływomierza

Dostępne dane doświadczalne [3] są ograniczone do warunków, gdy względna wartość skuteczna amplitudy pulsacji $U'_{rms}/\bar{U}$ nie przekracza 20 %. Dane te wskazują, że zachowanie quasi ustalone (czyli niezauważalny wpływ pulsacji) może występować pod warunkiem, że częstotliwość pulsacji jest mniejsza niż 25 % częstotliwości generowania wirów przy najmniejszej prędkości przepływu, a więc gdy $U'_{rms}/\bar{U} \leq 0,2$ oraz $f_p/f_v < 0,25$.

Możliwości minimalizacji skutków pulsacji, oszacowanie niepewności pomiaru

Wrażliwość przepływomierzy wirowych na pulsacje jest na tyle duża, że zasadny jest wybór tego przepływomierza tylko wówczas, gdy w ogóle nie występują pulsacje, lub gdy ich częstotliwość jest mniejsza niż 25 % najmniejszej częstotliwości generowania wirów. Częstotliwość generowania wirów jest odwrotnie proporcjonalna do szerokości generatora wirów. Dla osiągnięcia powyższego może więc być możliwość dobrania przepływomierza o wąskim generatorze wirów. Należy zauważyć, że przepływomierze w postaci sondy (próbkujące) mają ogólnie znacznie mniejsze wymiary niż przepływomierze z pełnym korpusem, dlatego też częstotliwości generacji wirów są tam znacznie większe, a więc możliwości ich zastosowania do przepływów pulsujących znacznie szersze.

Możliwe jest oszacowanie niepewności, gdy częstotliwość generowania wirów otrzymana jest drogą analizy spektralnej oraz gdy:

- 1) występują warunki przepływu quasi statycznego, tj. $f_p/f_v < 0,25$
- 2) częstotliwości pulsacji jest dużo większa niż podwójna maksymalna częstotliwość generowania wirów.

Dla pierwszego przypadku z istniejących danych dla amplitud pulsacji mniejszych niż 20 %, wynika, że należy liczyć się z niepewnością około 1 %.

W drugim przypadku, nawet gdy nie występuje unoszenie częstotliwości i amplitudy pulsacji są mniejsze niż 20 %, niepewność pomiaru może być jeszcze rzędu 10 %.

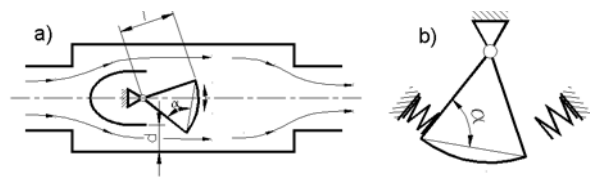
Przepływomierze z oscylatorem mechanicznym

Uwagi ogólne

Przepływomierze z oscylatorem mechanicznym pojawiły się na rynku w końcu lat 70. Ze względu na prostą budowę, odporność na zanieczyszczenia i osady, dużą zakresowość i dokładność mogą one stanowić ekonomiczną alternatywę dla przepływomierzy wirowych.

Duża amplituda oscylacji, a więc sygnału wyjściowego sprawia, że nie występują problemy z wpływem drgań i uderów, co jest jednym z problemów eksploatacji przepływomierzy wirowych [5] i wymaga stosowania skomplikowanych układów filtrowania i przetwarzania sygnału [6].

Główne elementy przepływomierza z oscylatorem mechanicznym (rys. 1a) to rozdzielacz strumienia i oscylator.



Rys. 1. Schemat przepływomierza z oscylatorem mechanicznym (a) i jego analog mechaniczny (b)

Dwa strumienie uformowane przez rozdzielacz (można je traktować przez analogię jako sprężyny mechaniczne, rys. 1b) wywołują oscylacyjny ruch oscylatora. Pulsacja naturalna takiego układu jest równa

$$\omega = \sqrt{\frac{C}{I}} \quad (2)$$

gdzie: I – moment bezwładności oscylatora,
 C – zastępcza sztywność sprężyn mechanicznych.

Wychodząc z zasady zachowania pędu, można wyznaczyć zastępczą sztywność „sprężyn płynowych”, a następnie zależność między częstotliwością oscylacji f a strumieniem masy q_m :

$$f = \frac{q_m}{\sqrt{\rho}} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{l_0^2 \sin 2\alpha}{2AdI}} \quad (3)$$

gdzie: A – powierzchnia przekroju poprzecznego kanału uformowanego przez korpus przepływomierza i rozdzielacz strumienia, l_0 – odległość między osią obrotu oscylatora a jego krawędzią natarcia, α – kąt natarcia bocznej powierzchni oscylatora, d – szerokość kanału, ρ – gęstość płynu.

Powody uzyskania stabilnych oscylacji o stałej amplitudzie, mimo tłumiącego działania płynu i tarcia w łożyskach, można objaśnić różnie. Heckle [7] wykazał, że dodatkowa energia kompensująca te oddziaływania tłumiące pochodzi z nakładania się efektów spowodowanych bezwładnością oscylatora i piętrzącego działania oscylatora w okolicy ścianki korpusu przepływomierza. Inne źródła uzyskania tej energii przedstawiono w [8].

Jednak ze względu na trudności z opisem matematycznym zjawiska unoszenia częstotliwości dla przepływomierza z oscylatorem mechanicznym, autor zdecydował zbadać to zjawisko doświadczalnie.

Stanowisko badawcze

Wentylator (1) wytwarzał przepływ, autotransformator zmieniając prędkość obrotową silnika wentylatora, umożliwiał sterowanie wartością średnią strumienia płynu. Układ obrotowych łopatek (2), napędzany krzywką, wytwarzał pulsacje. Częstotliwość pulsacji regulowano, zmieniając prędkość obrotową krzywki.

Kinematyka całego układu była tak obliczona, aby otrzymać możliwie sinusoidalny przebieg pulsacji. Ponieważ obrotowe łopatki generują zmienny dynamicznie profil prędkości, zastosowano prostownicę strumienia (3) dla zminimalizowania tego efektu. Amplitudę pulsacji mierzono termooanemometrem (4).

Do pomiaru wartości średniej strumienia zastosowano kryzę pomiarową. Zastosowano wszelkie możliwe środki, opisane w [3, 9], dla zminimalizowania wpływu pulsacji na przepływomierz zwężkowy.

Za zwężką zainstalowano badany model przepływomierza o średnicy nominalnej DN 200.

Mimo skompensowania możliwych błędów systematycznych, na podstawie danych z [3] oszacowano niepewność wskazania przepływomierza zwężkowego na około 5 % do 10 %, w zależności od liczby Strouhala. Tak duża niepewność wynika z faktu, że wpływ pochodnej lokalnej prędkości, a także zmiany współczynnika przepływu (które zależą m.in. od liczby Strouhala, amplitudy pulsacji i kształtu fali) nie mogły być uwzględnione.

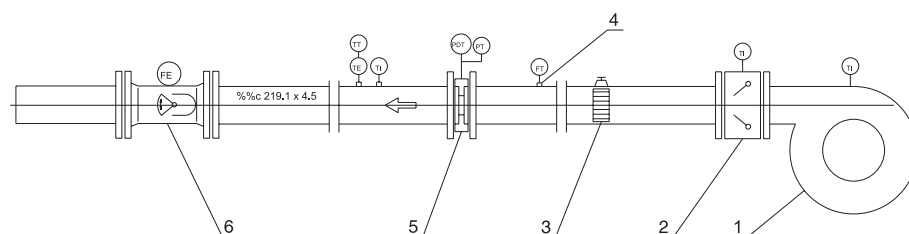
Także pomiary amplitudy pulsacji były obarczone znacznymi niepewnościami, gdyż termooanemometr mierzy w zasadzie prędkość w określonym punkcie, a profil prędkości w rurociągu jest zmienny w trakcie cyklu pulsacji.

Ponieważ badane zjawiska są związane bardziej z częstotliwością (mierzona dokładnie miernikiem cyfrowym) niż amplitudą, wydaje się, że duża niepewność pomiaru wartości średniej strumienia i amplitudy pulsacji nie zmniejsza w sposób istotny wartości uzyskanych wyników.

Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiono na rys. 3. Jest to wykres częstotliwości oscylatora f_{os} w funkcji częstotliwości pulsacji f_p . Stała przetwarzania przepływomierza wynosiła $K = 16,37$ impuls/kg. Przedstawiono częstotliwość drgań oscylatora f_{os} dla stałych wartości jako funkcję częstotliwości pulsacji f_p . Szczegółowy opis poszczególnych serii pomiarów jest zamieszczony w tablicy 1.

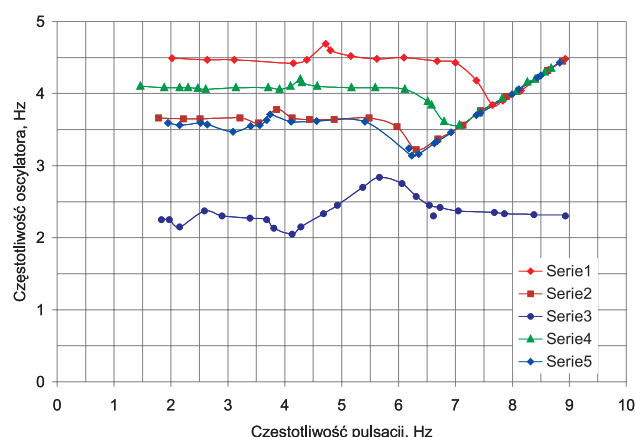
Zachowanie przepływomierza, zgodnie z przewidywaniami, było podobne do zachowania przepływomierza wirowego. Dla kilku stałych wartości średnich strumienia zmieniano częstotliwość pulsacji. Zjawisko unoszenia częstotliwości jest wyraźnie widoczne przy częstotliwości pulsacji bliskich częstotliwości



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego, 1 – wentylator, 2 – generator pulsacji, 3 – prostownica strumienia, 4 – termooanemometr

Tablica 1. Szczegóły serii pomiarowych przedstawionych na rys. 3

Oznaczenie serii na rys. 3	Średni strumień masy (kg/h)	Częstotliwość oscylatora przy przepływie ustalonym (Hz)	Amplituda (%)	Maks. i min. błąd od pulsacji gdy $f_p/f_{os} \approx 1\%$	Maks. i min. błąd od pulsacji gdy $f_p/f_{os} \approx 2\%$
serie 1	996	4,53	17,9	-2,42 +3,53	-15,2 -
serie 2	798	3,63	14,9	-1,10 +4,13	-11,3 +22,6
serie 3	491	2,23	13,2	-3,59 +6,28	-8,07 +27,4
serie 4	894	4,06	22,3	-0,00 +3,45	-12,3 +7,24
serie 5	795	3,61	20,0	-3,88 +2,77	-13,0 +22,7



Rys. 3. Wyniki badań dla różnych średnich wartości strumienia masy i różnych amplitud pulsacji dla rosnącej częstotliwości pulsacji

ści oscylatora. Zamiast stałej częstotliwości oscylatora reprezentującej średni strumień płynu, obserwuje się prawie liniową zależność między częstotliwością pulsacji a nominalną częstotliwością oscylatora związaną ze średnim strumieniem płynu. Odchylenie (patrz tablica 1) mieści się w zakresie od -3,88 % do +6,28 %.

Zjawisko unoszenia częstotliwości jest znacznie bardziej wyraźne przy częstotliwości pulsacji dwukrotnie większej niż częstotliwość drgań oscylatora. Błędy osiągają wartości aż do (-13,0 do +27,4) %, przy czym częstotliwość pulsacji była ograniczona do 8,93 Hz, tak więc tylko seria nr 3 pomiarów pokrywa cały obszar będący przedmiotem zainteresowania. Dla innych serii maksymalny błąd nie został prawdopodobnie osiągnięty. Niezbędna jest więc kontynuacja badań przy większych częstotliwościach pulsacji, a także przy szerszym zakresie amplitud, dla określenia minimalnej progowej amplitudy, która może powodować unoszenie częstotliwości.

Bibliografia

1. M. Turkowski, *Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.
2. M. Turkowski, *Przepływomierze wirowe – układy detekcji wirów oraz właściwości metrologiczne i eksploatacyjne*, PAR 7-8/2001, s. 38 – 40.
3. ISO TR 3313:1998 *The effect of flow pulsation on flow measuring instruments: orifice plates, nozzles or Venturi tubes, turbine and vortex flow meters*.
4. P. Hebrard, L. Malard, A. Strzelecki, *Experimental study of a vortex flowmeter in pulsatile flow conditions*, Flow Measurement and Instrumentation, 1992, 3, 173 – 186.
5. J. J. Miao, C. C. Hu, J. H. Chou, *Response of a vortex flowmeter to impulsive vibrations*, Flow Measurement and Instrumentation, 2000, 11, pp. 41 – 48.
6. A. Johnson, *Applying vortex flow metering technology in demanding process applications*, Proceedings of the Flow Measurement 2001 – International Conference, Peebles, Scotland, 2001, paper 4.4.
7. M. Heckle, *Ein neues Durchflussmessverfahren mit Frequenzausgang*, Messtechnik, 1971, 9, pp. 207 – 214.
8. M. Turkowski, *Progress towards the optimisation of a mechanical oscillator flowmeter*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 14, issues 1-2 March-April 2003, pp. 13 – 21.
9. M. Turkowski, *Pomiary pulsującego strumienia płynu (2). Przepływomierze zwężkowe*, PAR 11/2005, s. 10 – 14.

www.testo.com.pl
 °C
 % RH
 m/s
 m³/h
 hPa
 ppm
 mbar
 rpm
 pH

Przygotuj się na przyszłość!

- przetworniki wilgotności
- mierniki temperatury punktu rosy w sprężonym powietrzu
- analizatory spalin
- rejestratory temperatury i wilgotności
- anemometry
- higrometry
- termometry
- tachometry
- pehametry

Testo Sp. z o.o.
 ul. Czeresniowa 130
 02-456 Warszawa
 tel. (022) 863-74-01
 fax (022) 863-74-15