

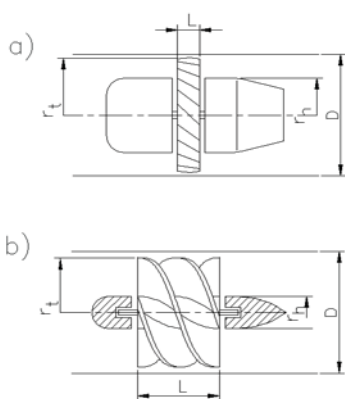
Pomiary pulsującego strumienia płynu (4)

Zastosowanie przepływomierzy turbinowych do pomiaru pulsującego strumienia płynu

Mateusz Turkowski *

W niniejszej, 4. części cyklu artykułów na temat pomiarów przepływów pulsujących omówiono problemy, które mogą wystąpić podczas pomiaru pulsującego strumienia płynu za pomocą przepływomierzy turbinowych. Przedstawiono metody identyfikacji i określenia parametrów pulsacji, a także sposoby wyznaczenia poprawek, umożliwiających w dużym stopniu korekcję błędu spowodowanego pulsacjami.

Organem pomiarowym przepływomierza turbinowego jest osiowa, swobodnie obracająca się turbina (rys. 1), która przy przepływie ustalonym cechuje się bardzo bliską liniową zależnością między prędkością obrotową a strumieniem objętości. Sygnał związany z prędkością obrotową uzyskuje się najczęściej poprzez detekcję przejścia łopatek turbiny obok czujnika umieszczonego w korpusie.



Rys. 1. Schemat przepływomierza turbinowego: a - do gazu, z krótkimi łopatkami, b - do cieczy, z łopatkami o powierzchni śrubowej

Niektóre przepływomierze zbierają tylko jeden impuls na jeden obrót turbiny, bądź też jeszcze rzadziej, np. jeden impuls na określoną wartość objętości, ale zwiększenie rozdzielczości poprzez zbieranie sygnału ze wszystkich łopatek jest bardzo przydatne, gdy występuje problem z pulsacjami. Gdy strumień zmienia się w czasie, inercja turbiny (i zapewne też inercja płynu znajdującego się w obrębie turbiny) powoduje, że wirnik opóźnia się w stosunku do prędkości przy przepływie ustalonym, gdy strumień zwiększa się,

i wyprzedza ją przy zmniejszającym się przepływie. Efekt ten jest większy przy przepływie zwiększającym się niż przy zmniejszającym się, tak że prędkość średnia turbiny dla przepływomierza poddanego pulsacjom może być większa niż prędkość odpowiadająca średniej wartości strumienia. W przypadkach skrajnych może to być ponad 25 % wskazanego strumienia.

Próg między przepływem ustalonym a pulsującym

Jeżeli jest jakakolwiek wątpliwość, że wirnik nie nadąża za zmianami strumienia należy określić próg między przepływem ustalonym a pulsującym. Dla danej amplitudy pulsacji, przy wzrastającej częstotliwości pulsacji, wskazania będą zawyżane aż do pewnej wartości granicznej od chwili, gdy rotor nie będzie nadążał za zmianami prędkości. Ta graniczna wartość zależy od amplitudy i dopuszczalnego błędu. Przykładowo, jeżeli dopuszczalny błąd spowodowany pulsacjami wynosi 0,1 %, to dopuszczalna amplituda pulsacji wynosi 3,5 %, a więc

$$\frac{U'_{rms}}{\bar{U}} \leq 0,035 \quad (1)$$

Do określenia amplitudy pulsacji można zastosować metody opisane w [2]. Jeśli zbierany jest sygnał z każdej łopatki turbiny, to można zastosować różne metody jego analizy.

Pierwotny sygnał z przepływomierza turbinowego ma postać w przybliżeniu sinusoidalnego napięcia, którego amplituda zmienia się ze strumieniem płynu, ale zwykle zawiera się w granicach od 5 mV do 0,5 V. W większości instalacji pomiarowych sygnał ten jest przetwarzany na ciąg impulsów. Możliwość wydobycia informacji o amplitudzie i kształcie fali pulsacji ze zmian częstotliwości ciągu impulsów zależy od wartości tzw. parametru odpowiedzi dynamicznej przepływomierza b . Istnieje ścisły związek między stałą czasową τ a parametrem odpowiedzi dynamicznej, mianowicie danego średniego strumienia \bar{q}_v

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

stała czasowa $\tau = b/\bar{q}_v$. Parametr b jest więc wygodniejszy, gdyż nie zależy, w odróżnieniu od stałej czasowej, od wartości strumienia płynu. Producenci nie podają zwykle tego parametru, a pomiary umożliwiające jego wyznaczenie w istniejących instalacjach zwykle są niewykonalne. Problem ten przedyskutowano dalej, przykładowe typowe wartości podano w tablicy 1.

Odpowiedź przepływomierza na pulsacje zmienia się od prawie idealnego nadążania za pulsacjami (średnie i duże przepływomierze do cieczy) aż do zupełnej niemożności nadążania za pulsacjami (małe i średnie przepływomierze do gazu przy średnich i dużych częstotliwościach pulsacji). Ten ostatni przypadek jest najgorszy. Sygnał wyjściowy nie zawiera informacji o obecności pulsacji, ale jeśli ich amplituda jest odpowiednio duża, to pozornie ustalony sygnał wyjściowy nie będzie w sposób poprawny odzwierciedlał średniej wartości strumienia. Jeśli są podejrzenia takiej sytuacji, należy to zweryfikować, stosując inne, opisane dalej, środki wyznaczenia parametrów pulsacji. Pierwszym podejściem jest analiza i interpretacja sygnału wyjściowego i próba określenia parametru odpowiedzi dynamicznej. Nierównomierność rozłożenia łopatek turbiny (tolerancje wykonawcze lub uszkodzenie przelatującym przez przepływomierz ciałem stałym) może sprawić wrażenie obecności przepływu pulsującego z częstotliwością wirowania turbiny. Zaobserwowano w niektórych instalacjach nierównomierności w granicach 3 – 4 %. Istnieją procedury usunięcia tego wpływu, jak też procedury korekcji sygnału przepływomierza, trzeba jednak znać wartość parametru dynamicznego b .

Tablica 1. Przykładowe wartości parametru odpowiedzi b dla przepływomierzy turbinowych

Średnica nominalna DN	Liczba łopatek N	Materiał turbiny	Mierzony płyn	Parametr odpowiedzi b (m ³)
50	12	tworzywo sztuczne	powietrze atmosferyczne	0,0046
80	16	metal	powietrze atmosferyczne	0,023
100	12	tworzywo sztuczne	powietrze atmosferyczne	0,016
100	16	metal	powietrze atmosferyczne	0,035
150	20	metal	gaz, $\rho = 0,935 \text{ kg/m}^3$	0,156
200	20	metal	gaz, $\rho = 1,105 \text{ kg/m}^3$	0,261
50	10	stal nierdzewna	woda	0,009
25	6	stal nierdzewna	woda	0,0012

Ogólna zależność między błędem pomiaru a parametrami pulsacji

Błąd przepływomierza zależy od amplitudy i kształtu fali pulsacji, średniej wartości strumienia, gęstości płynu oraz parametrów konstrukcyjnych turbiny, włącznie z jej momentem bezwładności. Przepływomierz turbinowy w stanie nieustalonym można opisać równaniem

$$b \frac{df}{dt} = q_v^2 - q_v f + b \left(\frac{I_F}{I_R + I_F} \right) \frac{dq_v}{dt} \quad (2)$$

gdzie: q_v – chwilowa wartość strumienia objętości, f – chwilowa wartość strumienia objętości wskazana przez przepływomierz, t – czas, b – parametr odpowiedzi dynamicznej, I_R i I_F – moment bezwładności rotora i płynu znajdującego się w obrębie turbiny.

Należy zdać sobie sprawę, że parametr odpowiedzi dynamicznej b zależy nie tylko od właściwości przepływomierza, ale też od właściwości płynu.

Dla danego średniego strumienia wielkość b/\bar{q}_v wyraża stałą czasową przepływomierza. Dla przepływomierzy od DN 25 do DN 100 stosowanych do gazu pod ciśnieniem bliskim atmosferycznemu stała czasowa jest rzędu 1 s. Dla przepływomierzy od DN 20 do DN 50 stosowanych do wody typowa stała czasowa jest rzędu 1 ms. Jak z tego wynika, prawdopodobieństwo wystąpienia dużych błędów spowodowanych pulsacją jest większe przy używaniu przepływomierzy do gazu przy niskim ciśnieniu niż przy używaniu

przepływomierzy do pomiaru strumienia objętości cieczy. Dla gazów pod ciśnieniem atmosferycznym można pominąć wpływ bezwładności gazu w obrębie turbiny. Chwilowa wartość błędu w dowolnym momencie będzie równa

$$\frac{f - q_v}{q_v} = \frac{b}{q_v^2} \left(-\frac{df}{dt} + \frac{I_F}{I_R + I_F} \frac{dq_v}{dt} \right) \quad (3)$$

Dla pomijalnie małych błędów $dq_v/dt \approx df/dt$, błąd może być przybliżony równaniem

$$\frac{f - q_v}{q_v} = -\frac{b}{q_v^2} \frac{dq_v}{dt} \left(\frac{I_F}{I_R + I_F} \right) \quad (4)$$

a warunkiem pomijalności błędów będzie pomijalna prawa strona powyższego równania.

Dla przypadku pulsacji sinusoidalnych o częstotliwości f_p i amplitudzie $a = (q_{v,\max} - q_{v,\min})/2\bar{q}_v$ błąd można opisać równaniem

$$\frac{f - q_v}{q_v} = -\frac{2\pi f_p a b}{q_v} \frac{I_R}{I_R + I_F} G(a) \quad (5)$$

Wartości $G(a)$ zawierają się w granicach od 1 dla $a = 0$ do 1,6 dla $a = 0,5$.

Dla niektórych zastosowań powyższe kryteria mogą być w sposób nieuzasadniony zbyt ostre, gdyż wielkością będącą przedmiotem zainteresowania jest raczej wartość średnia niż chwilowa strumienia płynu. Założenie $dq_v/dt \approx df/dt$ likwiduje asymetrię zjawisk między przypadkiem strumienia zwiększającego się i zmniejszającego się, tak więc powyższe równania nie mogą być zastosowane do oszacowania średniej wartości strumienia.

Nie istnieje równanie analityczne do wyznaczenia błędu wartości średniej. Dla sinusoidalnych pulsacji w gazie o niskim ciśnieniu stwierdzono, w wyniku symulacji komputerowej potwierdzonej eksperymentami, że błąd ten jest funkcją a i $B = bf_p/\bar{q}_v$ (patrz dalej).

Określenie parametru odpowiedzi dynamicznej b przepływomierza turbinowego

Są dwa główne sposoby określenia parametru odpowiedzi dynamicznej, pierwsza eksperymentalna poprzez badanie odpowiedzi skokowej i druga – analityczna.

Z równania ruchu wynika, że odpowiedź skokową można podzielić na dwie części. Po pierwsze będzie to zmiana prędkości turbiny w celu dostosowania się do wpływu wyrazu związanego z bezwładnością płynu. Po drugie pojawi się pierwszego rzędu (wykładnicze) przejście do nowych warunków. Dla gazów pierwsza część jest pomijalna w stosunku do drugiej.

Dla cieczy niezbędna szybkość realizacji skoku ($\leq 100 \mu s$) jest taka, że ze względu na trudność jej realizacji nie wykonano dotąd żadnych tego rodzaju badań. Wydaje się jednak prawdopodobne, że gdyby takie badania przeprowadzić, to obie części nałożyłyby się na siebie.

Gdy przepływomierz jest poddany skokowej zmianie strumienia od $q_{v,0} + \Delta q_v$ do $q_{v,0}$ (gdzie Δq_v może być dodatnie lub ujemne), wówczas odpowiedź można opisać równaniem

$$f = q_{v,0} + \Delta q_v e^{-q_{v,0}t/b} \quad (6)$$

Tak więc, wykres $\ln(q_{v,0} - f)$ w funkcji czasu będzie linią prostą o nachyleniu równym $q_{v,0}/b$. Potwierdzono to doświadczalnie.

Obliczeniowe wyznaczenie parametru odpowiedzi dynamicznej

Najbardziej rozbudowane wzory do obliczenia b podał Grey [3] (dla krótkich prostokątnych łopatek turbiny, jak na rys. 1 a):

$$b = \frac{2I[1+(2\eta/A_R)]}{N\rho\eta LR} \quad (7)$$

i Jepson [4] (dla łopatek o powierzchni śrubowej wg rys. 1 b)

$$b = \frac{2I[1+(2\eta/A_R)]R(r_t - r_h)}{N\rho\eta \int_{r_h}^{r_t} Lr^2 dr} \quad (8)$$

We wzorach tych: I – moment bezwładności turbiny, η – sprawność łopatki: wg Greya $\eta = 0,9$, a wg Jepsonego $\eta = 1$; A_R – wydłużenie łopatki, N – liczba łopatek, ρ – gęstość płynu, L – długość łopatek, R – średni promień łopatek, r_h i r_t – promienie podstawy i wierzchołka łopatek.

Warto zauważyć, że powyższe wzory, podobnie jak wzory wyprowadzone przez prawie wszystkich innych autorów sugerują, że parametr odpowiedzi jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości płynu. Wykorzystano to do wyznaczenia parametru odpowiedzi dla przepływomierzy przeznaczonych do pomiaru cieczy. Założono podobieństwo zjawisk i obliczeniowo, na podstawie badań wykonanych za pomocą powietrza wyznaczono parametr odpowiedzi dla cieczy.

Moment bezwładności

Jeżeli moment bezwładności piasty turbiny jest pomijalny w stosunku do momentu bezwładności łopatek, to

$$I = N\rho_b \int_{r_h}^{r_t} t_b C r^2 dr \quad (9)$$

gdzie: ρ_b – gęstość materiału łopatki, t_b – grubość, C – cięciwa łopatki.

Jeżeli t_b i C nie zależą od ρ , to wzór upraszcza się do postaci

$$I = N\rho_b t_b C (r_t^3 - r_h^3) / 3 \quad (10)$$

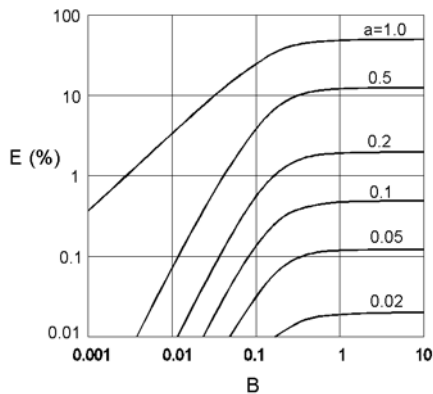
W tabelicy 1 podano przykładowe wartości parametru odpowiedzi obliczone ze wzorów (7) i (8) dla różnych przepływomierzy turbinowych, oparte na znajomości parametrów turbiny i obliczonym (wzory 9 i 10) momencie bezwładności.

Oszacowanie współczynników korekcyjnych i niepewności pomiaru spowodowanych pulsacjami

Nie istnieje, niestety, żadna prosta analityczna zależność umożliwiająca wyznaczenie współczynnika korekcyjnego dla przepływomierza turbinowego w obecności pulsacji. Jeżeli pulsacje są sinusoidalne i ich parametry są znane, to można zastosować wyniki badań Atkinsona [5].

Na rys. 2 przedstawiono wykres błędu przepływomierza jako funkcję parametrów $a = (q_{v,max} - q_{v,min}) / 2\bar{q}_v$ oraz $B = bf/\bar{q}_v$.

Dokładność współczynnika korekcyjnego określonego tą metodą jest jednak ograniczona interpolacją wykresu przedstawionego na rys. 2 i dokładnością określenia parametru odpowiedzi b . Metodę tę zweryfikowano eksperymentalnie. Stwierdzono, że jeżeli pulsacja sygnału wyjściowego z przepływomierza wynosi co najmniej 0,5 %, a rzeczywista pulsacja jest mniejsza niż 50 %, to współczynnik korekcyjny można określić z dokładnością 1 %.



Rys. 2. Wykres błędów przepływomierza turbiny spowodowanych pulsacjami w funkcji parametrów a i B

Jeżeli parametry pulsacji są znane, ale są wyraźnie niesinusoidalne, to nie da się oszacować współczynnika korekcyjnego a priori. W zasadzie jest możliwe określenie wyrazów związanych z q_v w równaniu (2) i rozwiązać je względem f np. metodą Rungego-Kutty i na tej podstawie oszacować współczynnik korekcyjny. Obliczenia te należałoby powtórzyć dla każdej możliwej amplitudy pulsacji, nawet gdyby kształt fali był niezmienny, ale kształt fali musiałby być rzeczywiście bardzo powtarzalny, aby obliczenia te dały rzetelne wyniki.

Dla pulsacji niesinusoidalnych jedyną dostępną jest metoda podana przez Cheeswrighta i in. [6]. Oparta jest ona na estymacji f i df/dt z sygnału przepływomierza i rozwiązaniu równania (2) dla historii zmian w czasie q_v . Dla pewnych warunków problem jest skomplikowany z powodu możliwości wystąpienia pierwiastków wielokrotnych równania (2). Metoda ta była sprawdzona niezależnie przez pomiary dla ekstremalnych przypadków, dla współczynników korekcyjnych rzędu 0,8 stwierdzono dokładność 1 %.

Żadna z tych metod nie była sprawdzona eksperymentalnie dla cieczy, dla których wpływ bezwładności płynu może być znaczny. Trzeba też podkreślić, że żadna z powyższych prac nie może być z wystarczającą dokładnością stosowana dla przypadków, gdy przepływ jest przerywany – włączany i wyłączany.

Bibliografia

1. ISO CD TR 3313:1997 *The effect of flow pulsation on flow measuring instruments: orifice plates, nozzles or Venturi tubes, turbine and vortex flow meters.*
2. M. Turkowski, *Pomiary pulsującego strumienia płynu* (1), PAR 10/2005.
3. J. Grey, *Transient response of the turbine flowmeter.* Jet Propulsion, February, 1956.
4. P. Jepson, *Currentmeter errors under pulsating flow conditions*, Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 9, 1967, No 1, pp. 45 – 54.
5. K.N. Atkinson, *A software tool to calculate the over-registration error of a turbine meter in pulsating flow.* Flow Measurement and Instrumentation, vol. 3, 1992, pp. 167 – 172.
6. R. Cheeswright, D. Edwards, C. Clark, *Measurement with a turbine flowmeter in the presence of large, non-sinusoidal pulsations*, Materiały konferencji FLUCOME'94, Tuluza. ■

REKLAMA ▼



31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7
tel./fax: +48 12 623-75-99, 632-69-77
metronic@metronic.pl www.metronic.pl

- rejestratory elektroniczne
- przeliczniki przepływu i energii pary, wody
- przetworniki 4-20 mA
- konwertery RS-485
- oprogramowanie



MPI - G
20-kanalowy elektroniczny rejestrator bezpapierowy (128 MB)
Pomiar temperatury (RTD, TC) i sygnałów analogowych 0/4-20 mA-16 kanałów. Pomiar sygnałów dwustanowych oraz częstotliwości - 4 kanały. Funkcje obliczeniowe (+, -, *, /) - 16 kanałów. Wyjścia alarmowe i sterujące. Port RS-485. Program do odczytu i wizualizacji wyników.