ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1993

Seria: MECHANIKA z. 113 Nr kol. 1198

Zdzisław KABZA, Janusz POSPOLITA

Instytut Elektrotechniki
Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu

ZASTOSOWANIE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO DO OCENY MOŻLIWOŚCI POMIARÓW PRZEPŁYWÓW NIEUSTALONYCH PRZEPŁYWOMIERZEM ULTRADŹWIĘKOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny nieustalonego przepływu przez przepływomierz ultradźwiękowy. Zbadano wpływ pulsacji strumienia oraz zaburzenia w postaci skoku prędkości na zakres zmian współczynnika czułości przepływomierza. Przedstawiono wnioski o charakterze metrologicznym.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELLING FOR EVALUATION OF POSSIBLITIES OF UNSTEADY FLOW MEASUREMENTS WITH ULTRASONIC FLOW METERS

Summary. A mathematical model of unsteady flow through the ultrasonic flowmeter has been presented in the paper. Influence of stream pulsation and disturbance in form of the velocity jump on changes of sensitivity coefficient of the flowmeter has been tested. Some conclusions of metrological character have been formulated.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ РАСХОДОВ УЛТРАЗВУКОВЫМ РАСХОДОМЕРОМ

Резюме. В работе представлено математическую моделы переменного расхода через ультразвуковый расходомер. Сделан анализ влияния пульсации потока и его деформации на диапазон изменехий коэффициента чувствительности расходомера. В конце работы изложено итоги метрологического характера.

1. WSTĘP

Przepływy nieustalone, które spotkać można w instalacjach przemysłowych, związane są głównie z procesami przejściowymi. Wywoływane są również działaniem układów regulacji. Zaburzenia występujące w instalacjach mogą

mieć także charakter periodyczny, spowodowany pracą pomp i sprężarek tłokowych. Stany nieustalone występujące w instalacjach są źródłem dodatkowego błędu pomiaru strumienia masy. Wartość tego błędu zależy głównie od właściwości dynamicznych zastosowanego układu pomiarowego oraz parametrów charakteryzujących zaburzanie przepływu [2, 5, 9]. Większość konwencjonalnych przepływomierzy posiada w części przepływowo-mechanicznej elementy bezwładnościowe uniemożliwiające pomiary strumieni szybkozmiennych. Trudności te wskazują na celowość zastosowania do pomiarów takich strumieni innych typów przepływomierzy, pozbawionych elementów bezwładnościowych, np. przepływomierzy ultradźwiękowych. Niezbędna jest jednak analiza, czy i w jakim stopniu zmienny w czasie profil prędkości wpływa na dokładność wskazań przepływomierza. Stosunkowo nieliczne opublikowane prace, np. [2, 4, 6], traktują powyższe zagadnienie wycinkowo, co uniemożliwia przedstawienie szerszej analizy metrologicznej. Złożoność odpowiednich badań eksperymentalnych oraz wysokie wymagania stawiane aparaturze pomiarowej skłaniają do poszukiwań rozwiązania tego problemu na drodze teoretycznej.

2. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWOMIERZA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Rozpatruje się jednodrogowy przepływomierz ultradźwiękowy, w którym pomiar prędkości dokonywany jest w płaszczyźnie średnicy D rurociągu (rys. 1). Średnia prędkość w przekroju rurociągu U_A wyraża się wzorem

$$U_A = k_u U_R \tag{1}$$

gdzie: U_R - uśredniona prędkość po promieniu $U_R = \frac{1}{2R}\int_{-R}^{R} U\,dr$

k_u - współczynnik czułości.

Przykładowo w przypadku przepływomierza ultradźwiękowego fazowego, sygnał pomiarowy przyjmuje wartość

$$\Delta\phi = 2L\Omega \cos \alpha U_R/c^2 \tag{2}$$

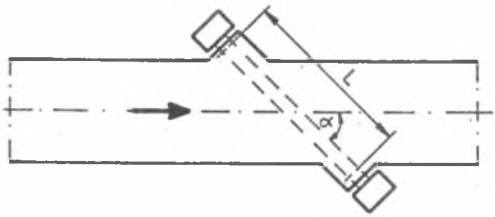
gdzie: L - odległość między przetwornikami,

α - kąt między osią rurociągu i prostą łączącą przetworniki,

c - prędkość dźwięku w przepływającym medium,

Ω częstość sygnału akustycznego.

Współczynnik czułości k_u uwzględnia wpływ profilu prędkości na wartość U , a tym samym na wskazania przepływomierza.



Rys. 1. Schemat organu pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego jednodrogowego
Fig. 1. Schema of the ultrasonic flowmeter

Profil prędkości pulsującego w pełni rozwiniętego, turbulentnego przepływu płynu w rurociągu opisuje równanie Reynoldsa dla składowej osiowej U wektora prędkości

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\nu_{ef}\frac{\partial U}{\partial r}\right) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} \tag{3}$$

w którym lepkość efektywną określa wzór

$$\nu_{ef} = \nu + c_{\mu}\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

Występującą w (4) kinetyczną energię turbulencji k i prędkość jej dyssypacji ε wyznacza się opierając się na równaniach modelu turbulencji [8].

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\nu_{ef}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial r}\right) + \nu_{ef}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 - \varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\nu_{ef}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right) + \frac{\varepsilon}{k}c_1\nu_{ef}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 - c_2\varepsilon \tag{6}$$

Stałe empiryczne w równaniach (4) ÷ (6) przyjmują wartości: $c_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.43$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

W turbulentnych przepływach pulsujących charakteryzujących się małymi liczbami Reynoldsa, rzędu 10^4 oraz dużymi amplitudami pulsacji strumienia masy, w części cyklu pulsującego, w której następuje wzrost wartości strumienia, może wystąpić relaminaryzacja przepływu. W literaturze w różny sposób określa się graniczne wartości parametrów charakteryzujących przepływ pulsujący, przy których pojawia się relaminaryzacja (czy też turbulencja w przypadku laminarnego przepływu pulsującego) [7]. Przedstawiony model matematyczny, po odpowiedniej adaptacji [12], wykorzystano również do symulacji cyfrowej tego typu przepływów. Okresową zmienność profilu prędkości uzyskiwano zadając okresowo zmienny gradient ciśnienia. Układ równań (3) ÷ (6) rozwiązano metodą różnic skończonych. W wyniku dyskretyzacji układu otrzymano równania różnicowe o ogólnej postaci [2]

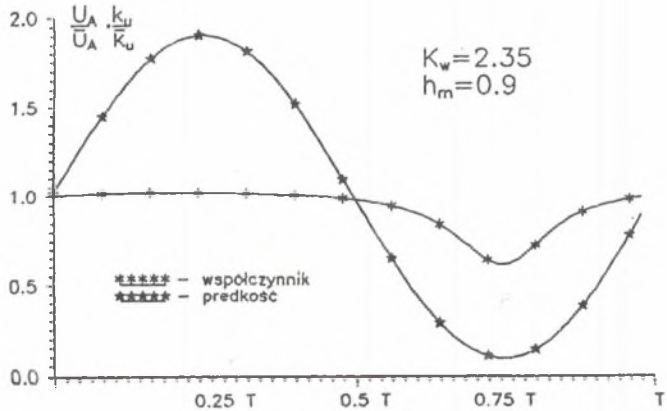
$$a_P^{\phi}\,\phi_P^{n+1} = a_N^{\phi}\,\phi_N^{n+1} + a_S^{\phi}\,\phi_S^{n+1} + R_P S_U + M_P \phi_P^{n} \tag{7}$$

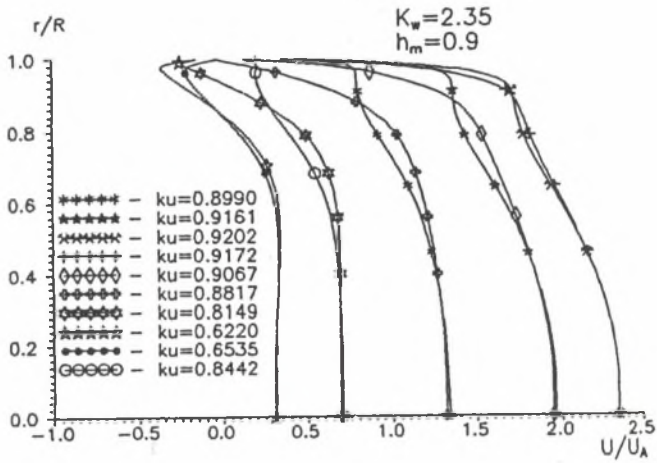
Zależności określające współczynniki a_P^{ϕ}, a_S^{ϕ}, a_N^{ϕ} oraz M_P i S_U wynikają z przyjętego sposobu dyskrertyzacji równań (3), (5) i (6). Szczegóły dotyczące przyjętej siatki różnicowej oraz dyskretyzacji równań modelu matematycznego przedstawiono m. in. w pracach [2, 3]. Rozwiązanie układu równań oparto na metodzie SIMPLE [11].

3. ANALIZA WPŁYWU STANÓW NIEUSTALONYCH STRUMIENIA NA WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA CZUŁOŚCI PRZEPŁYWOMIERZA

Rozpatrywane zagadnienie nieustalone charakteryzuje się tym, że dla dużego strumienia masy profil prędkości wynika zarówno ze sposobu zmienności strumienia jak i ze stanu (warunku) początkowego. Wielość możliwych stanów nieustalonych i tym samym wielość możliwych rozkładów prędkości jest przyczyną, że zmienne w czasie profile prędkości rozpatrywano dla takich przepływów nieustalonych, które są możliwie najbardziej zbliżone do występujących w praktyce technicznej. Stąd też analizą objęto przepływ pulsujący oraz przepływ charakteryzujący się skokiem prędkości.

Przykładowe rozkłady prędkości dla pulsującego w pełni rozwiniętego turbulentnego przepływu w rurze przedstawiono na rys. 2. Rysunek ten przedstawia również odpowiadające tym profilom względne wartości współczynnika czułości k_u. Obliczenia numeryczne wykazały, że znaczne zmiany wartości k_u występują w części okresu pulsacji, w której przepływ osiąga

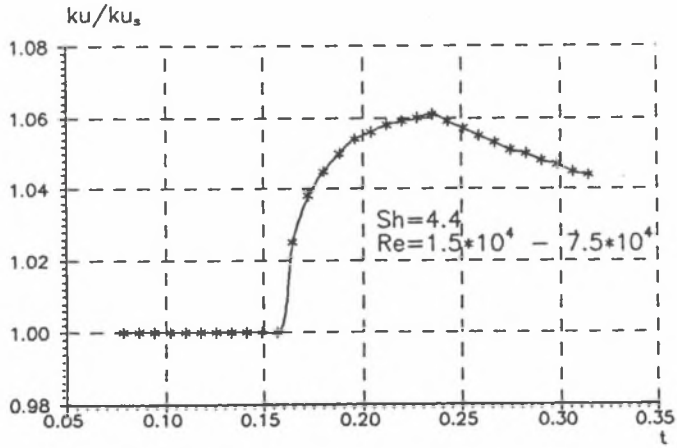


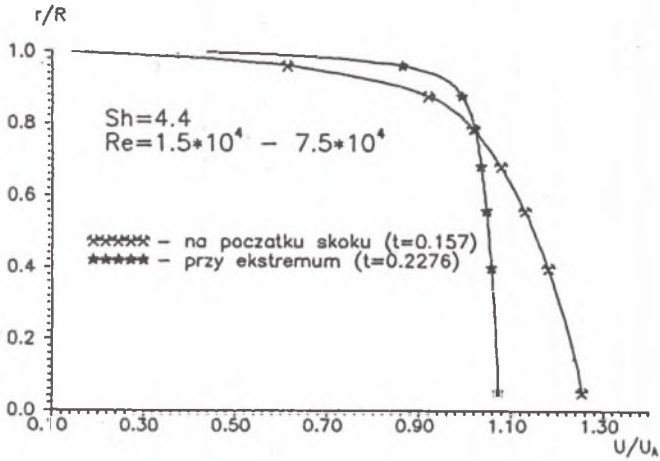


Rys. 2. Profile prędkości i współczynnik k_u w okresie pulsacji strumienia

Fig. 2. Velocity profile and sensitivity coefficient k_u in pulsation period

minimum. Wyniki obliczeń profili prędkości pulsującego przepływu w rurze oparte na przedstawionym modelu matematycznym i algorytmie porównano z dostępnymi danymi eksperymentalnymi uzyskując ilościową zgodność [12].





Rys. 3. Wartości współczynnika k przy skoku prędkości oraz profile prędkości przed skokiem i przy ekstremum k_u .(k_{u_s} - wartość przed skokiem)

Fig. 3. Sensitivity coefficient k by the velocity jump and velocity procfile before the jump and by extremum of k .(k_{u_s} - coefficient before the jump)

Rysunek 3 przedstawia zmiany względnego współczynnika czułości przepływomierza w wyniku zaburzenia przepływu w postaci skoku prędkości. Rys. 3 przedstawia także względne profile prędkości odpowiadające momentowi bezpośrednio przed skokiem prędkości oraz gdy k_u osiąga maksimum. Widać, że występuje tutaj wyraźne spłaszczenie profilu.

4. WNIOSKI NATURY METROLOGICZNEJ

Wykonano serie obliczeń dla względnych amplitud pulsacji z zakresu 0 ÷ 0.9, dla różnych częstotliwości pulsacji i średnich prędkości przepływu. Stwierdzono, że jeśli liczba K_w charakteryzująca przepływ pulsujący [10]
Stwierdzono, że jeśli liczba K_w charakteryzująca przepływ pulsujący [10]
$K_w = R\sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \Big/ (\overline{Re})^{3/8}$, gdzie $\overline{Re}$ jest średnią liczbą Reynoldsa, ν - współczynnikiem lepkości kinematycznej, jest mniejsza od 0.1, to zakres zmian współczynnika czułości jest pomijalnie mały, niezależnie od amplitudy pulsacji strumienia masy. Stwierdzono interesujący fakt, że dodatkowy błąd pomiaru średniej wartości strumienia, wynikający z przyjęcia współczynnika k_u jak dla turbulentnego przepływu ustalonego, nie przekraczał 2% w całym analizowanym zakresie parametrów charakteryzujących przepływ pulsujący. Fakt ten wymaga jednak weryfikacji eksperymentalnej.

W przypadku zaburzenia przepływu w postaci skoku prędkości współczynnik k_u osiąga wartość o 4 ÷ 6% większą od wartości właściwej przepływowi ustalonemu przed skokiem. Obliczenia wykazały, że gdy maksymalna wartość liczby Strouhala Sh charakteryzującej skok prędkości

$$Sh = \frac{dU_A}{dt} \; D \Big/ U_A^2$$

jest mniejsza od 0.1, wówczas zmiany współczynnika czułości w obrębie skoku są pomijalnie małe.

LITERATURA

[1] Boroń R., Szebeszczyk J., Pietraszak S.: Przepływomierze ultradźwiękowe z nakładanymi głowicami do pomiaru strumienia objętości cieczy w rurociągach. Metrologia i Systemy Pomiarowe. Zeszyt 7, 1990, s. 159÷172.

[2] Dobrowolski B., Pospolita J.: Theoretical estimation of the applicability range of differential pressure type flowmeters in presence of pulsation of the mass flux. Arch. Mech., Vol. 39, No 6, 1987, s. 571-588.

[3] Dobrowolski B., Kabza Z., Pospolita J.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen des Einflusses der Pulsationsströmung auf die Charakteristiken der Drosselgeräte. Fortschritt Berichte VDI, Strömungstechnik Nr 193, Düsseldorf 1991.

[4] Dordain J. J.: Steady-state and unsteady liquid flow-rate measurements. Characteristics and performance of the Onera ultrasonic flowmeter. ACTA IMEKO 1979.

[5] Dijstelbergen H. H.: Rotametr dynamics. Chemical Engineering Science, 1964, Vol. 19, s. 856-865.

[6] Hamidulin W. K., Karamowicz W.: Ultrazwukowyje kontrolno-izmeritielnyje ustrojstwa i sistemy. Izdatielstwo Leningradskowo Uniwersiteta, Leningrad 1989.

[7] Iguchi M., Ohmi M.: Transition to turbulens in a pulsatile pipe flow. Part 2, Characteristics of reversing flow accompanied by relaminarization. Bull. of the JSME, Vol. 25, No 208, 1982, s. 1529-1536.

[8] Launder B. E., Spalding D. B.: Mathematical models of turbulence. New York, Academic Press 1972.

[9] Lee W. F., Kirik M. S., Bonner J. A.: Gas turbine flowmeter measurement of pulsating flow. Journal of Engineering for Power, Trans. of ASME, Oct. 1975, s. 531-539.

[10] Ohmi M, Iguchi M.: Flow pattern and frictional losses in pulsating pipe flow. Part 3: General representation of turbulent flow pattern. Bull. of the JSME, Vol. 23, No 186, 1980, p. 2029-2036.

[11] Patankar S. V.: Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publ. Corp., New York 1980.

[12] Pospolita J.: Teoretyczna ocena możliwości pomiaru pulsującego strumienia masy przepływomierzem ultradzwiękowym. Pomiary, Automatyka, Kontrola, nr 1, 1992, s. 8-11.

Recenzent: Dr hab. Jan Kaźmierczak

Wpłynęło do Redakcji dnia 02.10.1992

Abstract

In the paper a mathematical model of unsteady flow through the ultrasonic flowmeter has been presented. The velocity profile, changing at time, was determined by solving numerical Reynolds equation and equations of the turbulence model k-ε. Influence of velocity profile changes on the changes of the sensitivity coefficient of the ultrasonic flowmeter was examined. Variable flow and its disturbance in form of the temperature jump were periodically given. Values of the sensitivity coefficient were shown versus time for various Strouhal numbers, characterizing unsteady flow. Some conclusions of metrological type were formulated.