

Witold KRIESER

Politechnika Śląska, Instytut Informatyki

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA WZORCOWANIA PRZEPLYWOMIERZY PRÓBKUJĄCYCH Z CZUJNIKIEM O POWIERZCHNI CZYNNEJ KOŁOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono przepływomierze próbkujące z czujnikiem o powierzchni czynnej kołowej. Wyznaczono współczynnik wzorcowania dla wybranych rozkładów prędkości. Obliczenia przedstawione w tym opracowaniu stanowią wstęp do analizy metrologicznej przepływomierza próbkującego.

THE DETERMINATION OF CALIBRATION FACTOR FOR SAMPLING FLOWMETER WITH SENSORS HAVING CIRCLE EFFECTIVE SURFACE

Summary. In this article the sampling flowmeters with sensors having circle effective surface are shown. The sensitivity factors for different mathematical models of velocity distribution are calculated. Calculations introduced in this paper are the introduction to metrological analysis of sampling flowmeter.

1. Wprowadzenie

Pomiar parametrów przepływu (prędkość miejscowa, strumień objętości lub strumień masy, rozkład prędkości) ze względu na przestrzenny charakter zjawiska, różnorodność stosowanych czujników należy do najtrudniejszych w metrologii przemysłowej [12]. Do pomiaru wielkości związanych z przepływem stosowane są różne czujniki opisane w literaturze [1, 2, 6, 10, 15]. Właściwości kilku typów czujników do pomiaru przepływu oraz stawiane im wymagania metrologiczne przedstawiono w [7, 12], natomiast w [14] zestawiono możliwości zastosowania poszczególnych czujników w przepływomierzach próbkujących. Nieraz istnieje potrzeba uzyskania kompromisu pomiędzy potrzebą jak najdokładniejszego pomiaru przepływu płynu a wymaganiem minimalnej ingerencji w

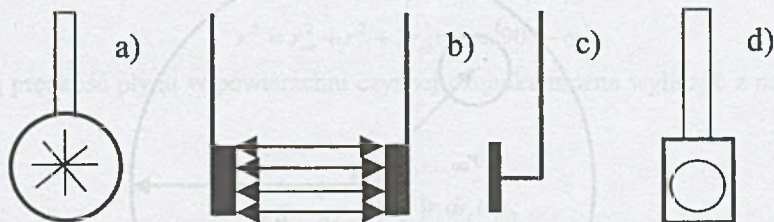
przepływającą strugę płynu w rurociągu. Dla użytkownika przepływomierza mniej istotna jest zasada działania przepływomierza, natomiast ważniejsze są jego właściwości metrologiczne i eksploatacyjne. Uzyskanie wymienionego kompromisu jest możliwe w przepływomierzach próbkujących, w których wielkość mierzona, to znaczy strumień objętości, jest obliczany na podstawie wyniku pomiaru prędkości miejscowej [12]. W tym przypadku pomiar strumienia objętości jest pomiarem pośrednim [5], gdzie wynik pomiaru zależy od kilku wielkości mierzonych bezpośrednio oraz przyjętego lub wyznaczonego modelu matematycznego obiektu, co dla przepływomierza oznacza model rozkładu prędkości w przewodzie. Jest to możliwe przy znajomości modelu matematycznego urządzenia pierwotnego przepływomierza, a ten będzie zależał od przyjętego modelu obiektu (rozkład prędkości płynu w przekroju poprzecznym przewodu). Ponieważ modele matematyczne rozkładów prędkości tylko w pewnym stopniu odpowiadają rzeczywistości, to konieczne jest zbadanie, jak przyjęte różne modele obiektu wpływają na postać i wartość parametrów modeli matematycznych urządzeń pierwotnych [14].

2. Czujniki stosowane w przepływomierzach próbkujących

Przepływomierze próbkujące umożliwiają obliczanie strumienia objętości płynu na podstawie wyniku pomiaru prędkości w jednym lub w kilku miejscach przekroju przepływowego. Czujniki stosowane w tych przepływomierzach mogą być skonstruowane jako powierzchniowe, punktowe lub odcinkowe [13]. Przedstawione w tym opracowaniu badania dotyczą przepływomierzy próbkujących charakteryzujących się urządzeniem pierwotnym jednopowierzchniowym, o kołowej powierzchni czynnej.

Przepływomierz próbkujący składa się z urządzenia pierwotnego i urządzenia wtórnego. W skład urządzenia pierwotnego wchodzi: czujnik do pomiaru prędkości lokalnej, sonda do ustalenia położenia czujnika oraz odcinek rurociągu, w którym zabudowany jest czujnik. Oprócz czujnika do pomiaru prędkości przepływomierz może być wyposażony w czujniki do pomiaru wielkości wpływających, które charakteryzują stan medium (temperatura, ciśnienie, lepkość, gęstość).

Jako powierzchniowe są stosowane często czujniki turbinowe [9, 11], ultradźwiękowe [3, 4], dynamometryczne (z tarczą naporową) [10] i ostatnio elektromagnetyczne [3, 8]. Schematy budowy tych czujników przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schematy budowy czujników powierzchniowych: a) turbinowy, b) ultradźwiękowy, c) dynamometryczny, d) elektromagnetyczny

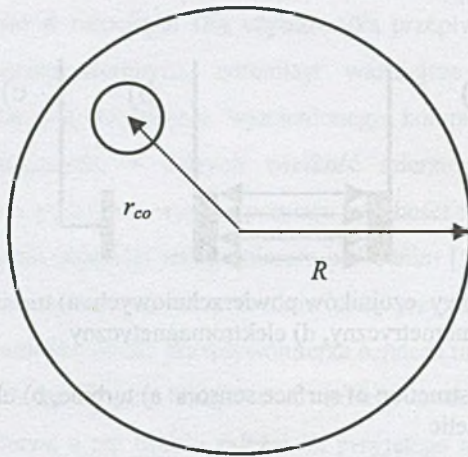
Fig. 1. Scheme of construction of surface sensors: a) turbine, b) ultrasonic, c) target, d) electromagnetic

Sygnał wyjściowy z urządzenia pierwotnego nie zależy bezpośrednio od strumienia objętości płynu, lecz od prędkości w określonej powierzchni przekroju przepływowego, to znaczy w powierzchni czynnej czujnika. Wobec wielości czujników pozostaje problem wyboru i tu wskazówki można znaleźć w [14, 15].

Do odtworzenia wielkości mierzonej (strumień objętości) wymagana jest znajomość nie tylko pola przekroju przepływowego, ale i związku między prędkością zmierzoną czujnikiem a prędkością średnią w całym przekroju przepływowym [14]. Związek ten zależy od kształtu rozkładu prędkości, położenia czujnika i jego konstrukcji.

3. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania przepływomierza próbkującego z czujnikiem o kołowej powierzchni czynnej

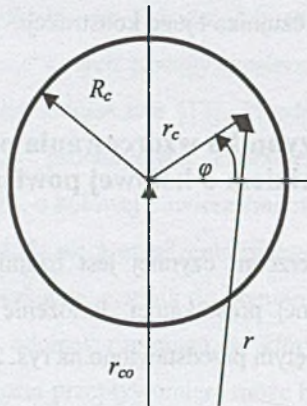
Czujnik o kołowej powierzchni czynnej jest czujnikiem częściej występującym niż czujniki o powierzchni czynnej prostokątnej. Położenie czujnika o powierzchni czynnej kołowej w przewodzie zamkniętym przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Położenie czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej: R – promień wewnętrzny rurociągu, r_{co} – odległość środka czujnika od osi rurociągu

Fig. 2. Places of surface sensor with circle effective surface: R – inner radius of the pipe, r_{co} – the distance of the centre of sensor from the pipe axis

W celu obliczenia prędkości średniej w powierzchni czynnej czujnika należy rozpatrzeć sytuację przedstawioną na rys. 3.



Rys. 3. Schemat sytuacji w powierzchni czynnej czujnika: R_c – promień czujnika, r_c – promień bieżący w czujniku, r – promień bieżący w rurociągu, φ – współrzędna kątowa

Fig. 3. Scheme of the situation in the effective surface of the sensor: R_c – sensor radius, r_c – current radius in the sensor, r – current radius in the pipe, φ – angular coordination

Z twierdzenia kosinusów można wyznaczyć promień bieżący w rurociągu:

$$r^2 = r_{co}^2 + r_c^2 + 2r_{co}r_c \cos(90^\circ - \varphi) \quad (1)$$

Średnią prędkość płynu w powierzchni czynnej czujnika można wyliczyć z następującej całki:

$$v_c = \frac{1}{\pi R_c^2} \int_0^{R_c} \int_0^{2\pi} v(r) r_c dr_c d\varphi, \quad (2)$$

gdzie $v(r)$ – funkcja opisująca rozkład prędkości w przekroju poprzecznym rurociągu.

Aby wykonać całkowanie należy przyjąć model matematyczny rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym rurociągu. Do obliczeń zastosowano modele matematyczne rozkładów prędkości, uwzględniające charakter przepływu. Dla przepływu laminarnego (uwarstwionego):

$$v = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (3)$$

gdzie: v_m – prędkość w osi rurociągu, r – odległość punktu w przekroju przepływowym od osi rurociągu.

Dla przepływu turbulentnego (burzliwego) rozkład prędkości może być opisany wzorem potęgowym trójskładnikowym [12]:

$$v = v_m \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^2 - (1 - b) \left(\frac{r}{R} \right)^m \right], \quad (4)$$

gdzie: b , m – stałe, które wyznacza się dla konkretnego profilu prędkości.

Jeżeli w wzorze (4) $b=1$, przepływ ma charakter przepływu laminarnego opisanego wzorem (3), natomiast gdy $b=0$, przepływ ma charakter przepływu turbulentnego. Do dalszych analiz wybrano wzór trójskładnikowy (4), ponieważ dla różnych parametrów współczynników b , m można przeanalizować przepływy o zróżnicowanych charakterach.

Współczynnik wzorcowania jest zdefiniowany następująco:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c}, \quad (5)$$

gdzie: v_{sr} – średnia prędkość płynu po przekroju przepływowym A w przewodzie zamkniętym obliczana według wzoru:

$$v_{sr} = \frac{1}{A} \int v dA \quad (6)$$

v_c – średnia prędkość płynu w powierzchni czynnej czujnika A_c obliczana według wzoru:

$$v_c = \frac{1}{A_c} \iint v dx dy, \quad (7)$$

gdzie: x, y – współrzędne bieżące.

4. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla przepływu laminarnego

Do obliczeń zastosowano wzór (3), opisujący rozkład prędkości w rurociągu. Średnia prędkość płynu v_{sr} po przekroju przepływowym A jest obliczana na podstawie wzoru (3) i (6):

$$v_{sr} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] 2\pi r dr = \frac{v_m}{2} \quad (8)$$

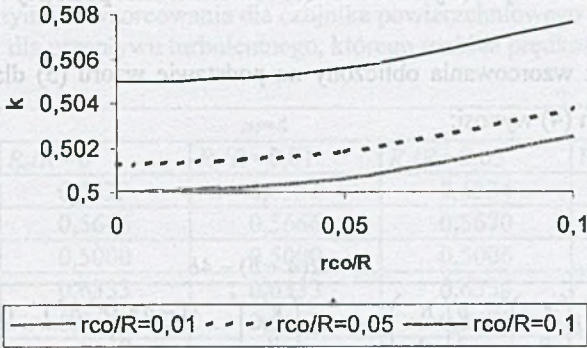
Średnia prędkość płynu v_c w powierzchni czynnej czujnika A_c jest obliczana następująco:

$$v_c = \frac{v_m}{\pi R_c^2} \int_0^{R_c} \int_0^{2\pi} \left[1 - \left(\frac{r_{co}^2 + r_c^2 + 2r_{co}r_c \sin\varphi}{R} \right)^2 \right] r_c dr_c d\varphi = v_m \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego oblicza się ze wzoru (8) i (9):

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

Dokonując analizy wartości współczynnika wzorcowania można zauważyć, że rozmiar czujnika w przypadku przepływu laminarnego ma dosyć duży wpływ na współczynnik wzorcowania. Wraz ze wzrostem odległości czujnika od osi rurociągu współczynnik wzorcowania rośnie, co zostało zobrazowane wykresami przedstawionymi na rys. 4.



Rys. 4. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku średnicy czujnika do średnicy rurociągu dla przepływu laminarnego, którego rozkład prędkości jest opisany wzorem (3)

Fig. 4. The dependence of calibration factor on the ratio of sensor diameter to diameter of the pipe for laminar flow, which velocity distribution is described with formulae (3)

Dla przepływu laminarnego można znaleźć takie położenie czujnika, aby mierzona nim prędkość była równa prędkości średniej w całym przekroju przepływowym. Przyjmując wartość $k = 1$ we wzorze na współczynnik wzorcowania otrzymuje się:

$$r_{co}/R = [0,5 - (R_c/R)^2]^{0,5} \quad (11)$$

Znając stosunek promienia powierzchni czynnej czujnika do promienia rurociągu R_c/R dla przepływu laminarnego można wyznaczyć takie położenie r_{co}/R , aby wartość współczynnika wzorcowania wynosiła zawsze 1, to znaczy odczytana prędkość jest równa prędkości średniej w całym przekroju przepływowym. Położenie takie nazywane jest położeniem przełomowym [14]. Położenie to, wygodne dla użytkownika czujnika powierzchniowego ze względu na odczyt, jest mniej korzystne ze względu na błędy montażu czujnika. W pobliżu osi rurociągu rozkład prędkości jest bardziej płaski, a więc ewentualne niedokładności montażu będą miały mniejszy wpływ na wynik pomiaru niż dla położenia przełomowego.

5. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla przepływu turbulentnego

Współczynnik wzorcowania obliczony na podstawie wzoru (5) dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (4) wynosi:

Dla $m=4$

$$k = \frac{2(4+b) - 4b}{12 \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{b}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right) - (1-b) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^4 - \frac{(1-b)(2r_{co}^2 R_c^2)}{R^4} - \frac{(1-b) \left(\frac{R_c}{R} \right)^4}{3} \right]} \quad (12)$$

Dla $m=8$

$$k = \frac{2(8+b) - 8b}{20 \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{b}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right) - (1-b) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^8 - \frac{(1-b)(8r_{co}^6 R_c^2)}{R^8} - \frac{(1-b)(12r_{co}^4 R_c^4)}{R^8} - \frac{(1-b)(4r_{co}^2 R_c^6)}{R^8} - \frac{(1-b) \left(\frac{R_c}{R} \right)^8}{5} \right]} \quad (13)$$

Dla $m=12$

$$k = \frac{2(12+b) - 12b}{28 \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{b}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right) - (1-b) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{12} - \frac{(1-b)(18r_{co}^{10} R_c^2)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(75r_{co}^8 R_c^4)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(100r_{co}^6 R_c^6)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(45r_{co}^4 R_c^8)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(6r_{co}^2 R_c^{10})}{R^{12}} - \frac{(1-b) \left(\frac{R_c}{R} \right)^{12}}{7} \right]} \quad (14)$$

Dokonując analizy współczynników wzorcowania można zauważyć, iż rozmiar czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (4) mają niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania. Wraz ze wzrostem wartości wykładnika potęgowego m współczynnik wzorcowania wzrasta. Rozmiar czujnika oraz jego odległość od osi rurociągu mają mniejszy wpływ na wartość współczynnika wzorcowania. Wyniki obliczeń potwierdzające powyższe wnioski przedstawiono w postaci tabelarycznej.

Tabela 1

Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulентnego, którego rozkład prędkości opisany jest wzorem (4)

$m=4$					
	b	$R_c/R=0$	$R_c/R=0,01$	$R_c/R=0,05$	$R_c/R=0,1$
$r_{co}/R=0$	0,2	0,6333	0,6333	0,6334	0,6339
	0,6	0,5666	0,5666	0,5670	0,5683
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,01$	0,2	0,6333	0,6333	0,6335	0,6339
	0,6	0,5667	0,5667	0,5671	0,5684
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,05$	0,2	0,6336	0,6336	0,6338	0,6343
	0,6	0,5675	0,5675	0,5679	0,5692
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{co}/R=0,1$	0,2	0,6346	0,6346	0,6348	0,6365
	0,6	0,5701	0,5701	0,5705	0,5718
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5057
$m=8$					
$r_{co}/R=0$	0,2	0,7400	0,7400	0,7401	0,7407
	0,6	0,6200	0,6200	0,6204	0,6218
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,01$	0,2	0,7400	0,7400	0,7402	0,7407
	0,6	0,6200	0,6200	0,6204	0,6219
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,05$	0,2	0,7403	0,7403	0,7405	0,7411
	0,6	0,6209	0,6209	0,6213	0,6228
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{co}/R=0,1$	0,2	0,7414	0,7414	0,7416	0,7422
	0,6	0,6237	0,6237	0,6242	0,6256
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5076
$m=12$					
$r_{co}/R=0$	0,2	0,7857	0,7857	0,7859	0,7865
	0,6	0,6428	0,6428	0,6433	0,6447
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,01$	0,2	0,7857	0,7857	0,7859	0,7865
	0,6	0,6428	0,6428	0,6434	0,6448
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{co}/R=0,05$	0,2	0,7861	0,7861	0,7863	0,7868
	0,6	0,6438	0,6438	0,6443	0,6457
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{co}/R=0,1$	0,2	0,7872	0,7872	0,7874	0,7880
	0,6	0,6467	0,6467	0,6472	0,6486
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5076

6. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej analizy można wnioskować, iż kształt rozkładu prędkości ma duży wpływ na współczynnik wzorcowania.

Modelując matematycznie urządzenia pierwotne przepływomierzy próbkujących można wyznaczyć błędy metody i zasymulować różne rozwiązania tak, by dla danych warunków pomiaru (spodziewane kształty rozkładów prędkości) wybrać konstrukcję urządzenia pierwotnego, która pozwoli ograniczyć błąd pomiaru.

LITERATURA

1. Biernacki Z.: Sensory i systemy termoanemometryczne, WKiŁ, Warszawa 1998
2. Bajkiewicz-Grabowska E., Magnuszewski A., Mikulski Z.: Hydrometria, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993
3. Erb H.G.: Technika pomiarów przepływu wody i ścieków, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin 1999
4. Kabza Z.: Pomiary strumieni płynów (Przewodnik), Studia i monografie z. 90, Politechnika Opolska, Opole 1996
5. Janiczek R.: Pośrednie pomiary wielkości fizycznych, PAN, Oddział w Katowicach, Komisja Metrologii, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1993
6. Kegel T.M.: Insertion (Sampling) Flow Measurement [w:] Flow Measurement. Editor: Spitzer D.W., Instrument Society of America, Research Triangle Park 1991
7. Krigman A.: Guide to Selection Non-Intrusive Flowmeters for Closed Pipe Measurements, Instrumentation Technology, Vol. 29, Number 12, 1982, pp. 29-34
8. Multi-MagTM Model 284 Insertable Electromagnetic Averaging Flowmeter, materiał firmy Marsh-McBirney, Inc., USA 1997
9. Pospolita J.: Pomiary strumieni płynów, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2004
10. Spitzer D.W.: Industrial Flow Measurement, ISA, Research Triangle Park 1993
11. Turbine Flowmeters, Measurements & Control, Issue 187, February 1998, pp. 235-240

12. Waluś S.: Przepływomierz ultradźwiękowe. Metodyka stosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997
13. Waluś S.: Pomiar pośredni strumienia płynu metodą próbkującą, Metrologia i Probiernictwo, 3 (14) 1999, ss. 34-38
14. Waluś S.: Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierz próbkujących. Monografia 43, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
15. Waluś S.: Czujniki do pomiaru prędkości w przepływomierzach próbkujących, VI Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Gliwice, 13-16 czerwca 2000, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria: Konferencje nr 2, Gliwice 2000, tom I, ss. 279-284.

Recenzent: Dr hab. inż. Roman Janiczek
Prof. nadzw. Politechniki Częstochowskiej

Abstract

The flow-rate measurements have a very important meaning in industry. The sampling flowmeters are devices, which can be used for measuring of flow-rate. A flowmeter sensor has a big influence on mathematical model of the flowmeter, because in it the velocity, which is the representation of the measuring value, is converted to the signal, which can be detected by the measuring transducer. Volume flow-rate in sampling method of flow measurement is calculated as a product of velocity measured by the sensor, calibration coefficient and pipe cross section area.

The main purpose of the mathematical modeling of flowmeter sensors is the description of the flow phenomenon in various conditions. The second purpose is to reproduce the measuring value and estimate the total error for concrete flowmeter. The big influence on mathematical model of the flowmeter has the sensor, because in it the measuring value is converted to the signal, which can be detected by the measuring transducer. In this article the sampling flowmeters which have a circle sensors are analyzed. The author calculated the calibration factor for different mathematical models of velocity distribution.