

**Artur ANDRUSZKIEWICZ, Krzysztof KUBAS,
Januariusz GÓRECKI, Tomasz GODLEJEWSKI**
POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW

Pomiar strumienia masy cieczy za pomocą przepływomierzy uśredniających ciśnienie dynamiczne i bezwładnościowych

Dr inż. Artur ANDRUSZKIEWICZ

Jest wieloletnim pracownikiem Zakładu Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej. Autor wielu prac naukowych dotyczących urządzeń i systemów pomiarowych stosowanych w przemyśle energetycznym. Obszar zainteresowań: pomiary maszyn i urządzeń energetycznych, pomiary przepływów dwufazowych, bilanse energetyczne zakładów wraz z analizą strat nadmiernych, odzysk ciepła odpadowego, sprawdzanie przyrządów pomiarowych.

e-mail: artur.andruszkiewicz@pwr.wroc.pl



Dr inż. Januariusz GÓRECKI

Jest wieloletnim pracownikiem Zakładu Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej. Autor wielu prac naukowych dotyczących urządzeń i systemów pomiarowych stosowanych w przemyśle energetycznym. Obszar zainteresowań: miernictwo termoeenergetyczne, ciepłownictwo, bilanse energetyczne zakładów, ocena możliwości odzysku ciepła odpadowego i optymalizacji eksploatacji obiektów energetycznych, ocena zagrożenia wybuchowego.

e-mail: januariusz.gorecki@pwr.wroc.pl



Dr inż. Krzysztof KUBAS

Jest wieloletnim pracownikiem Zakładu Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej. Autor wielu prac naukowych dotyczących urządzeń i systemów pomiarowych stosowanych w przemyśle energetycznym. Obszar zainteresowań: pomiary maszyn i urządzeń energetycznych, bilanse energetyczne zakładów, optymalizacja eksploatacji obiektów energetycznych.

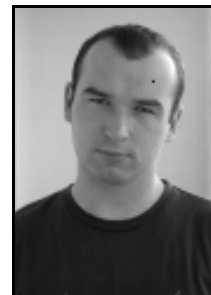
e-mail: krzysztof.kubas@pwr.wroc.pl



Mgr inż. Tomasz GODLEJEWSKI

Jest doktorantem w Zakładzie Miernictwa i Ochrony Atmosfery w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej. Obszar zainteresowań: Pomiar strumienia masy/objętości metodami bezwładnościowymi.

e-mail: tomasz.godlejewski@pwr.wroc.pl



Streszczenie

Pomiar strumienia masy lub objętości cieczy w kanałach o dużym przekroju dotyczy np. sytuacji przepływu wody chłodzącej z chłodni kominowych do kondensatorów pary wodnej w blokach energetycznych elektrowni zawodowych. Stosowanie klasycznych metod pomiarowych w tym np. zwężek przekroju jest praktycznie niemożliwe. Również inne metody pomiaru tego strumienia, przykładowo za pomocą przepływomierzy ultradźwiękowych, nie spełniają wymogów metrologicznych. Autorzy do w/w pomiarów zastosowali dwie metody: sondy uśredniające ciśnienie dynamiczne oraz przepływomierze wykorzystujące siły bezwładności cieczy wynikające ze zmiany kierunku przepływu – tzw. przepływomierze kolanowe. W referacie opisane będą zasady realizacji pomiarów, własności metrologiczne przepływomierzy wraz z analizą niepewności pomiarów.

Słowa kluczowe: strumień masy, przepływomierze, pomiar.

Fluid mass flux measurement with use of inertial and dynamic pressure averaging flowmeters

Abstract

Fluid mass flux and volumetric flow measurement in high section channels may concerns for instant cooling water flow from cooling tower to steam capacitor in power units of power plants. Use of classical measurements methods such orifice plates is practically impossible while the other ones, with use of ultrasonic flowmeter for instant, don't meet metrological requirements. For measurements described above, two methods have been used: dynamic pressure averaging probes and centrifugal-head flowmeters that make use of fluid inertial forces resulting from change of direction flow. The measurements carrying out principles and metrological properties of flowmeters with measurement uncertainty analysis will be described in this paper.

Keywords: mass flux, flowmeters, measurement.

1. Wstęp

Systemy do ciągłego monitoringu i pomiaru strumienia masy wody chłodzącej skraplacze turbin parowych mają ogromne

znaczenie w pracy bloku energetycznego. Umożliwiają racjonalne gospodarowanie wodą, a co za tym idzie, znaczne jej oszczędności. W artykule zawarto opis sposobu pomiaru strumienia masy wody za pomocą sond uśredniających ciśnienie dynamiczne oraz za pomocą przepływomierza kolanowego. W ocenie autorów wybór w/w metod pomiarowych był optymalny, ponieważ stosowanie klasycznych metod pomiarów (metoda zwężkowa) jest niemożliwy ze względu na średnicę rurociągów powyżej jednego metra. Sygnał pomiarowy, pochodzący z przepływomierza, po przetworzeniu w przetworniku ciśnienia na analogowy sygnał prądowy jest kierowany do nastawni bloku, w której przetwarzany jest na sygnał cyfrowy określający mierzony strumień masy wody chłodzącej skraplacze bloków.

2. Przepływomierze uśredniające ciśnienie dynamiczne

Do pomiaru strumienia masy wody zastosowano sondy uśredniające ciśnienie dynamiczne strumienia za skraplaczami bloków. Ciśnieniowy sygnał pomiarowy z sond po przetworzeniu na analogowy sygnał prądowy (4–20 mA) w przetworniku ciśnienia kierowany jest do nastawni bloku, w której przetwarzany jest na sygnał cyfrowy określający mierzony strumień masy wody chłodzącej skraplacze bloków. Na rys. 1 pokazano model przepływomierza uśredniającego ciśnienie dynamiczne, natomiast na rys. 2 przedstawiono sposób zamocowania sond w rurociągu [1, 2].

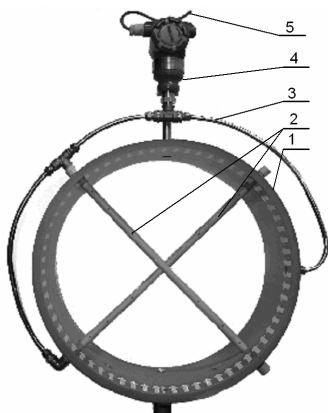
Zasada pomiaru polega na proporcjonalności strumienia masy do pierwiastka z różnicy ciśnień:

$$q_m = C \cdot \sqrt{\Delta p_d} \quad (1)$$

gdzie: C - stała przepływu lub uwzględniając charakterystykę przetwornika $\Delta p_d = f(I) = C_1(I - 4)$ gdzie: I - prąd z przetwornika różnicy ciśnień (4–20 mA):

$$q_m = C^* \cdot \sqrt{I - 4} \quad (2)$$

Zwłaszcza to ostatnie równanie jest powszechnie stosowane w celu wprowadzania sygnału pomiarowego do systemu kontrolno-pomiarowego bloku energetycznego.



Rys. 1. Model przepływomierza uśredniającego: 1 – rurociąg pomiarowy, 2 – rurki uśredniające ciśnienie całkowite, 3 – ciśnieniowy przewód impulsowy doprowadzające uśrednione ciśnienie do przetwornika $\Delta P/I$, 4 – przetwornik $\Delta P/I$ Fischer–Rosemount, 5 – elektryczny przewód impulsowy doprowadzający sygnał elektryczny do nastawni bloku

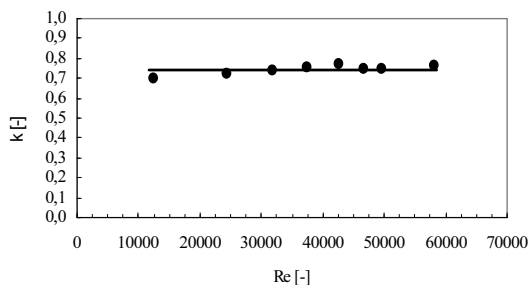
Fig. 1. Averaging flowmeter model: 1 – measurement pipeline, 2 – total pressure averaging pipes, 3 – pressurized impulse pipe supplying electrical signal to transducer, 4 – transducer, 5 – electrical impulse pipe supplying electrical signal to control station



Rys. 2. Sposób zamocowania sond uśredniających w rurociągu

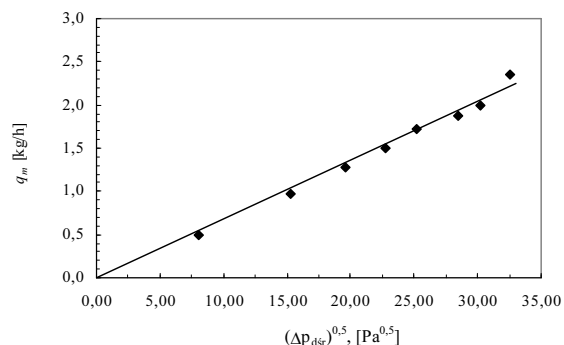
Fig. 2. Attachment method of averaging probes in pipeline

Przykładowe charakterystyki metrologiczne przepływomierzy uśredniających przedstawiają wykresy na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Przykładowa zależność współczynnika kształtu k przepływomierza uśredniającego od liczby Reynoldsa Re

Fig. 3. An example of dependence of averaging k flowmeter sensitivity coefficient on Reynolds number Re



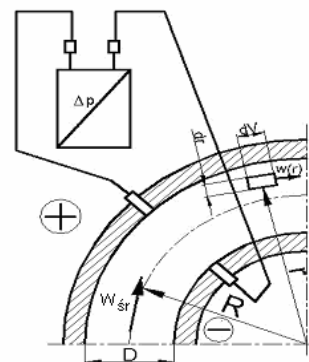
Rys. 4. Przykładowa charakterystyka przepływomierza uśredniającego

Fig. 4. An example of averaging flowmeter characteristic

3. Bezwładnościowe przepływomierze kolanowe

Bezwładnościowy przepływomierz kolanowy utworzony jest przez zakrzywiony odcinek pomiarowy rurociągu (kolano) oraz przetwornik pomiarowy mierzący różnicę ciśnień statycznych Δp między zewnętrzną i wewnętrzną ścianką kolana. Różnica ciśnień wywołana jest siłą bezwładności. Zasada pomiaru polega na wykorzystywaniu zależności tej różnicy ciśnień od strumienia objętości przepływającego medium [3].

Zasada przesyłu sygnału jest podobna jak w opisywanym przepływomierzu z rurkami uśredniającymi. Schemat przepływomierza kolanowego przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat przepływomierza kolanowego

Fig. 5. Averaging flowmeter diagram

Charakterystykę przepływomierza przedstawiają równania (3) i (4):

$$q_m = C \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (3)$$

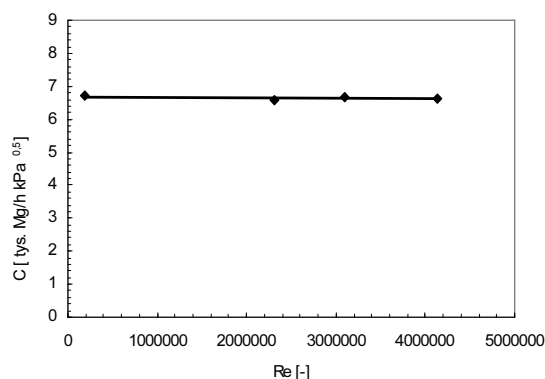
lub

$$q_m = C^* \cdot \sqrt{I - 4} \quad (4)$$

Współczynniki C i C^* czasami nazywane są współczynnikami przepływu. Dla danego typu przepływomierza mogą być wyznaczone poprzez wzorcowanie, mierząc strumień objętości/masy inną metodą np. za pomocą wysokiej klasy przepływomierza.

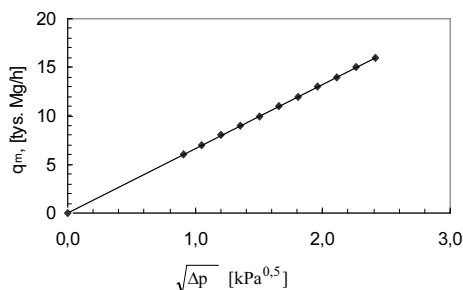
Rysunek 6 przedstawia uzyskaną, przykładową charakterystykę metrologiczną przepływomierza typu kolanowego do pomiaru strumienia masy wody.

Natomiast rysunek 7 przedstawia uzyskaną wg równania (5) charakterystykę prądową przepływomierza.



Rys. 6. Przykładowa zależność współczynnika przepływu przepływomierza kolanowego w funkcji liczby Reynoldsa

Fig. 6. An example of dependence of flow ratio on Reynolds number for centrifugal-head flowmeter



Rys. 7. Przykładowa charakterystyka przepływomierza kolanowego

Fig. 7. Current characteristic example of centrifugal-head flowmeter

4. Przykładowa analiza niepewności pomiarowych dla przepływomierza kolanowego

Analizę niepewności pomiaru strumienia objętości przeprowadzono [4], przy założeniu, iż przepływ wody w instalacji był ustalony i niepewnością dominującą jest niepewność standardowa typu B spowodowana niedokładnością aparatury pomiarowej. Zatem niepewność rozszerzona wyraża się równaniem:

$$\frac{u_{q_m}}{q_m} = k_B(\alpha) \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{B_C}}{C}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{u_{B_{\Delta p}}}{\Delta p}\right)^2} \quad (5)$$

Niepewność standardową typu B współczynnika przepływu C można określić z wykresu charakterystyki przepływomierza.

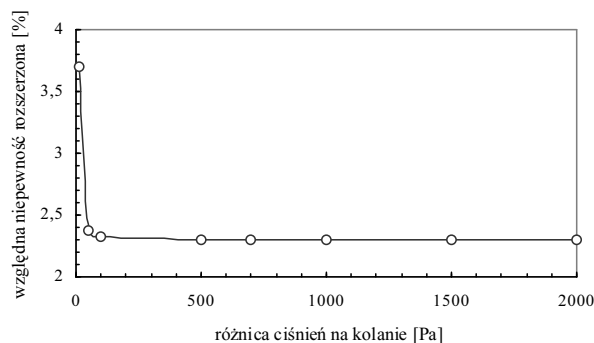
Przyjmując względny błąd graniczny $\frac{\Delta_{q_c}}{C}$ wyznaczenia współczynnika przepływu równy 2%, niepewność standardowa typu B wynosi: $\frac{u_{B_C}}{C} = \frac{\Delta_{q_c}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cong 1,15\%$.

Niepewność standardową typu B różnicy ciśnień na „kolanie” przyjmujemy zgodnie z [4], $u_{B_{\Delta p}} = 0,29 \cdot \delta_x$, gdzie: δ_x – rozdzielczość przetwornika różnicy ciśnień, stąd $u_{B_{\Delta p}} = 0,29 \cdot 1\text{Pa} = 0,29 \text{ Pa}$ (rozdzielczość przetwornika różnicy ciśnień wynosiła 1,0 Pa).

Przyjęto na podstawie [4] współczynnik rozszerzenia $k_B(\alpha) = 2$ dla poziomu ufności $\alpha = 0,95$ względna niepewność rozszerzona wyraża się równaniem:

$$\frac{u_{q_m}}{q_m} = 2 \cdot \sqrt{(0,0115)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0,29}{\Delta p}\right)^2} \quad (6)$$

przedstawionym wykreślnie na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność względnej niepewności rozszerzonej $\frac{u_{q_m}}{q_m}$ od różnicy ciśnień statycznych na kolanie Δp

Fig. 8. Dependence of relative extended uncertainty $\frac{u_{q_m}}{q_m}$ on differential static pressure in leg pipe Δp

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości ciągłego pomiaru strumienia przepływu w rurociągach o średnicach przekraczających 1 m za pomocą przepływomierzy uśredniających ciśnienie dynamiczne oraz bezwładnościowych przepływomierzy kolanowych. Przepływomierze tego typu zostały z powodzeniem wykorzystane do pomiaru strumienia masy wody chłodzącej skraplacze turbin parowych w jednej z polskich elektrowni. W artykule opisano zasadę działania tych przepływomierzy, a także zamieszczono przykładowe ich charakterystyki. Wizualizację sygnałów pomiarowych pochodzących od przepływomierza uśredniającego ciśnienie dynamiczne, jak i bezwładnościowego przepływomierza kolanowego przedstawiono na ekranie systemu operatorskiego bloku elektrowni.

Dla przepływomierza kolanowego oszacowano niepewności pomiarowe z których jednoznacznie wynika, iż już od różnicy ciśnień na kolanie wynoszących ok. 100 Pa niepewność całkowita pomiaru strumienia masy zbliża się do poziomu 2,3% na poziomie ufności $\alpha = 95\%$.

6. Literatura

- [1] J. Górecki, J. Stańda, A. Andruszkiewicz, K. Kubas: Bloki nr 9 i 10 - wykonanie układu pomiaru przepływu wody chłodzącej przez skraplacze. Etap III/IV. Wykonanie, uruchomienie oraz wizualizacja na monitorach nastawni bloków w/w układu pomiarowego. Politechnika Wroclawska Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów. Raport serii SPR 22/2003, Wrocław 2003.
- [2] J. Górecki, A. Andruszkiewicz, K. Kubas: Pomiary strumieni w rurociągach o dużych średnicach. Energetyka, z.2/2006, str. 88-91.
- [3] F. Strzelczyk: Metody i przyrządy w pomiarach ciepłno-energetycznych. Wyd. Politechnika Łódzka, Łódź, 1993.
- [4] Główny Urząd Miar: Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik. Warszawa, 1999.
- [5] J. Górecki, A. Andruszkiewicz, K. Kubas, A. Taterek: Układ do pomiaru strumienia wody chłodzącej skraplacze turbin. Energetyka 2/2006.