

Laserowe przepływomierze dopplerowskie jako wzorce kontrolne

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza,
dr inż. Sławomir Zator,
Politechnika Opolska
mgr inż. Julij Kamiński,
OptoControl Moskwa

Zwięźle omówiono budowę i scharakteryzowano działanie dwóch rozwiązań przepływomierzy laserowych. Na podstawie przeprowadzonych badań porównawczych przedstawiono ocenę ich przydatności jako wzorców użytkowych do sprawdzania przepływomierzy i ciepłomierzy użytkowych.

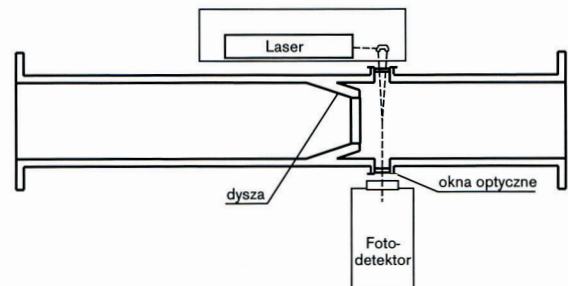
W ostatnich latach badania naukowe ukierunkowane są na budowę przemysłowych przyrządów pomiarowych opartych o metody optyczne, wykorzystujące monochromatyczne źródła światła, w tym lasery. Spowodowane jest to dobrą dynamiką i wysokimi parametrami metrologicznymi tych przyrządów. Dzięki osiągnięciom optoelektroniki stało się możliwe wykorzystanie w przemyśle przyrządów pomiarowych do niedawna wyłącznie laboratoryjnych.

Takie zalety metod optycznych: jak pomiar metodą bezkontaktową, wysoka dokładność i powtarzalność pomiaru, szeroki zakres pomiarowy, krótki czas odpowiedzi oraz odporność na szумы i zakłócenia czynią je efektywnymi w zastosowaniach do pomiarów prędkości i odległości w przemyśle, medycynie i transporcie. Dopplerowskie anemometry laserowe skutecznie konkurują z anemometrami oporowymi. Nie zakłócają strumienia płynu oraz nie wymagają złożonej aparatury do wzorcowania, gdyż wykorzystują bezwzględna metodę pomiaru i posiadają bardzo szeroki zakres pomiarowy. Porównanie właściwości metrologicznych anemometrów laserowych i oporowych można znaleźć w pierwszej polskojęzycznej monografii [1], wydanej w 1995 r.

Od wielu lat poszukuje się przepływomierzy, które charakteryzowałyby się podobnymi cechami. Do grupy tych przyrządów należą laserowe przepływomierze dopplerowskie. Służą one do pomiaru ustalonych i pulsujących strumieni objętości cieczy czy gazów. Stosowane są do płynów przezroczystych optycznie, jak woda, ropa naftowa lub gaz ziemny. Pierwsze konstrukcje takich przepływomierzy zostały już opracowane i przebadane, dlatego uznano za celową ich prezentację. Przedstawiono przykładowe konstrukcje przepływomierzy do pomiaru strumienia objętości wody, opracowanych w Rosyjskim Centrum Naukowo-Badawczym TIEPLOPRIBOR w Moskwie [2, 3, 4] oraz w Niemieckim Federalnym Instytucie Fizyczno-Technicznym PTB w Berlinie [5] (do pomiaru strumienia objętości gazu). Przepływomierze te są przyrządami kontrolnymi do stosowania na stanowiskach pomiarowych, kalibracyjnych bądź wzorcowniczych. Bardzo dobre właściwości metrologiczne kwalifikują je do zastosowań jako przyrządy odniesienia przy pomiarach strumienia objętości lub jako przepływomierze wzorcowe [6].

BUDOWA LASEROWYCH PRZEPŁYWOMIERZY DOPPLEROWSKICH

Przepływomierze zbudowane są z dwóch przetworników: hydraulicznego i optyczno-elektronicznego (rys.1). W literaturze spotyka się również inny podział – na przetworniki hydrooptyczny i elektroniczny. Przetwornikiem hydraulicznym jest dysza o specjalnej konstrukcji, której



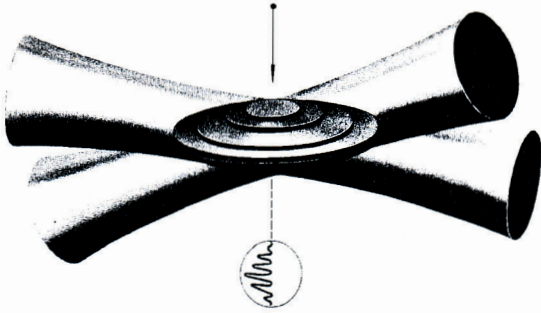
Rys.1. Schemat laserowego przepływomierza dopplerowskiego

zadaniem jest zapewnienie walcowego profilu prędkości przy wylocie dyszy. Dzięki temu jest on osiowo symetryczny i nieczuły na zakłócenia strumienia przed dyszą. Niesymetria profilu prędkości redukowana jest odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu stosunku przewężenia, a średnie zmiany turbulencji są redukowane odwrotnie proporcjonalnie do przewężenia dyszy. Konstrukcje dyszy, turbulizera oraz stabilizatora strugi są najistotniejszymi elementami przepływomierza laserowego, chronionymi tajemnicą firmy.

Przetwornik optyczno-elektroniczny jest odmianą anemometru laserowego [1] mierzącego prędkość przy wylocie dyszy. W układzie optycznym są formowane dwa promienie laserowe o jednakowym natężeniu promieniowania. Przez okna optyczne są one wprowadzane do wnętrza rurociągu, gdzie krzyżują się w jego osi pod kątem Θ . W objętości, w której przecinają się promienie, powstaje siatka interferencyjna (rys. 2), utworzona przez na przemian jasne i ciemne powierzchnie, oddalone od siebie o skok d

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\Theta/2)} \quad (1)$$

gdzie λ - długość fali światła lasera



Rys. 2. Siatka interferencyjna w obszarze przecięcia promieni monochromatycznych

Drobne niejednorodności (znaczniki) w przepływającym strumieniu, przecinając powierzchnie interferencyjne, generują modulowaną falę świetlną o częstotliwości modulacji f_d , proporcjonalną do prędkości strumienia v

$$f_d = \frac{2v \sin(\Theta/2)}{\lambda} \quad (2)$$

To promieniowanie przez okno optyczne trafia do fotodetektora, gdzie jest przetwarzane na sygnał elektryczny poddawany następnie filtracji i obróbce.

PRZEPLYWOMIERZ ROSYJSKI

Na stanowisku wzorcowym w laboratorium Politechniki Opolskiej zainstalowano dopplerowski przepływomierz laserowy ŁDR-S-O, wykonany we współpracy z moskiewskim Centrum TIEPIOPIROBOR [2, 3, 4]. Przetwornik hydrauliczny jest kanałem o średnicy DN 80, połączonym szeregowo z odcinkiem rurociągu w którym zainstalowany jest badany przepływomierz. W przetworniku hydraulicznym znajduje się element profilujący strumień cieczy dla zapewnienia równomiernego, prawie walcowego profilu prędkości w strefie pomiaru. W kanale, w strefie pomiarowej znajdują się dwie pary okien: poziome, do wprowadzenia i wyprowadzenia promienia lasera i pionowe - do obserwacji przecinających się promieni w strefie pomiaru. Dodatkowo, dla ustabilizowania strugi, na początku kanału znajduje się prostownica strumienia.

Na korpusie kanału przetwornika hydrooptycznego zamontowane są bloki optyczne – nadawczy i odbiorczy. Blok nadawczy składa się z lasera helowo-neonowego o mocy 10 mW oraz układu optycznego, w którym promień lasera jest rozdzielany na dwa promienie o jednakowej intensywności. W bloku odbiorczym, fotodioda lawinowa przekształca to promieniowanie w sygnał elektryczny, który jest wstępnie wzmacniany i przekazywany przewodem koncentrycznym do bloku elektronicznego. Blok elektroniczny przekształca sygnał dopplerowski na częstotliwość proporcjonalną do prędkości strumienia cieczy. Sygnał z fotodetektora jest filtrowany w celu zwiększenia stosunku sygnału do szumu, a następnie poddawany identyfikacji dla określenia częstotliwości dopplerowskiej. Sygnał Dopplera jest przekształcany w sygnał o niższej częstotliwości i poziomie logicznym TTL.

Strumień objętości oblicza się na podstawie pomiaru częstotliwości wyjściowej wg wzoru:

$$Q_v = K(f) \cdot [1 + \alpha (T - T_{20})] \quad (3)$$

$$K(f) = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 f^3 \quad (4)$$

gdzie: $K(f)$ – wielomian aproksymujący częstotliwość wyjściową,

a_i – współczynniki wielomianu aproksymującego,

f – częstotliwość wyjściowa z ŁDR, w kHz,

α – współczynnik temperaturowy rozszerzalności objętościowej w 20°C,

T, T_{20} – temperatury.

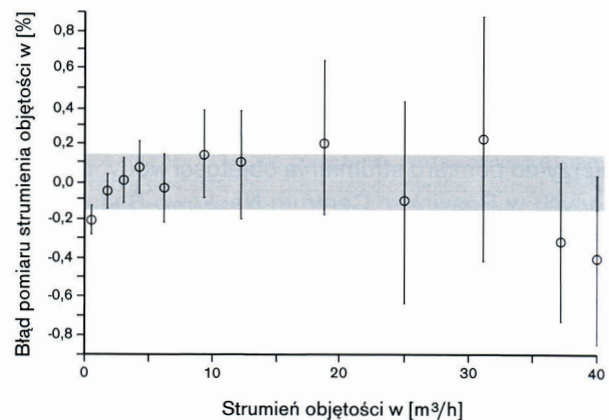
Wartość średnią strumienia objętości w czasie t określa się za pomocą częstotlicznika pracującego w trybie zliczania impulsów wg wzoru:

$$V = K_M(f, T) \cdot N \quad (5)$$

gdzie: $K_M(f, T)$ – współczynnik proporcjonalności,

N – liczba impulsów zliczona w czasie t przez licznik częstotlicznika.

Przepływomierz był wzorcowany na moskiewskim stanowisku ORUKS 400 o niepewności 0,04%. W laboratorium Politechniki Opolskiej przeprowadzono badania porównawcze. Charakterystykę błędów przepływomierza przedstawia rys. 3. Zakres mierzonego strumienia objętości wody wynosił 0,4-40 m³/h. Na wykresie zaznaczono niepewność podstawową pomiaru, która przez producenta została określona na $\pm 0,15\%$ wartości mierzonej w całym zakresie pomiarowym, przy czasie uśredniania nie mniejszym niż 10 sekund oraz niepewności wzorcowania stanowiska. Częstotliwość wyjściowa z przepływomierza ŁDR-S-O może być również mierzona częstotlicznikiem.



Rys. 3. Charakterystyka błędów przepływomierza ŁDR-S-O-80 zdjęta na stanowisku ORUKS w Moskwie

Na stanowisku funkcję przeliczania częstotliwości na strumień objętości cieczy przejął sterownik realizujący proces sterowania przepływem w odcinkach pomiarowych.

PRZEPLÝWOMIERZ NIEMIECKI

Przeplýwomierze laserowe mogą być również zastosowane do pomiaru strumienia gazów. Przykładem jest przeplýwomierz zbudowany w Niemieckim Federalnym Instytucie Fizyko-Technicznym PTB w Berlinie [5]. Podobnie jak w rozwiązaniu rosyjskim, przetwornik hydrauliczny jest kanałem zakończonym kołnierzami do połączenia z odcinkiem pomiarowym, we wnętrzu którego znajduje się dysza Witoszyńskiego [7] o stosunku przewężenia $n=11$, która zapewnia prawie walcowy profil prędkości. Przy tym stopień turbulizacji w pobliżu osi jest rzędu 0,3%. W kanale, w strefie pomiarowej znajduje się para okien do wejścia i wyjścia promieni lasera.

Na korpusie kanału przetwornika hydraulicznego zamontowany jest blok optyczny. W odróżnieniu od rozwiązania przeplýwomierza opisanego poprzednio, tutaj wykorzystuje się promieniowanie rozproszone w kierunku lasera, co umożliwiło stworzenie zwartej konstrukcji. Jako źródło światła monochromatycznego wykorzystuje się laserową diodę półprzewodnikową GaAlGa o mocy 100 mW. Układ optyczny rozdziela promień lasera na dwa promienie o jednakowej intensywności. W bloku odbiorczym fotodiody z przedwzmacniaczem przekształca to promieniowanie na sygnał elektryczny. W bloku elektronicznym sygnał jest filtrowany i przekazywany do procesora sygnałowego typu FPGA (*field programmable gate array*). To rozwiązanie techniczne zapewnia niewielkie wymiary całego urządzenia, przy niepewności pomiaru prędkości rzędu 0,1%. Alternatywnie, sygnał z filtra może być przekazany do laboratoryjnego zestawu pomiarowego, który składa się z karty przetwornika A/C o częstotliwości próbkowania 100 MHz, zainstalowanej w komputerze typu laptop PC, sprzężonym z procesorem sygnałowym DSP32C i zapewniającym obróbkę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Niepewność pomiaru prędkości (w punkcie pomiaru) takiego zestawu jest rzędu 0,02%.

Na podstawie badań określono niepewność pomiaru strumienia objętości jako wartość nieprzekraczającą

0,2% przy strumieniach gazu zmieniających się w przedziale $200 \div 4700 \text{ m}^3/\text{h}$ dla średnicy wylotowej dyszy 59,9 mm.

PODSUMOWANIE

Przytoczone wyżej wyniki badań wskazują na możliwość budowy dopplerowskich przeplýwomierzy laserowych zapewniających niepewność pomiaru rzędu $0,1 \div 0,2\%$, odniesioną do wartości mierzonej w szerokim zakresie pomiaru od 1:50 do 1:100. Takich parametrów metrologicznych nie osiągnął jeszcze żaden inny typ przeplýwomierza. Jest to jedyny typ przeplýwomierza, który może sprostać m.in. wymaganiom projektowanej normy europejskiej EN 1434 dotyczącej sprawdzania i legalizacji ciepłomierzy. W jej projekcie wymaga się, aby przeplýwomierz kontrolny miał niepewność pomiaru nie gorszą niż 0,12%.

Autorzy zaproponowali Głównemu Urzędowi Miar w Warszawie potrzebę włączenia dopplerowskich przeplýwomierzy laserowych do grupy wzorców kontrolnych wykorzystywanych do sprawdzania przeplýwomierzy i ciepłomierzy użytkowych. Podobne działania podjęto w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Rosji i Białorusi. W GUM prowadzone są badania przeplýwomierzy znajdujących się w Politechnice Opolskiej.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Elsner J.W., Drobnik S.: Metrologia turbulencji przepływów, Tom 18 serii Maszyny przepływowe. Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wyd. PAN, Wrocław 1995
- [2] Technическое описание и инструкция по эксплуатации 08903082 TO, Приобразовател разчода лазерной образцовой ЛДР-С-О. НИИ Теплоприбор, Москва 1994
- [3] Pasport 0890382 PS, Приобразовател разчода лазерной образцовой ЛДР-С-О. НИИ Теплоприбор, Москва 1994
- [4] Kabza Z., Zator S., Kaminski J.: Dopplerowski przeplýwomierz laserowy ЛДР-С-О. Prace Naukowe. Konferencje z. 4, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995
- [5] Strunck V., Krey E.A., Mueller H., Dopheide D.: High speed nozzle flowmeter using miniaturized laser-doppler techniques. Fluid Flow Measurement 3rd International Symposium, San Antonio (Texas) 1995
- [6] Kabza Z., Kostyrko K.: Metrologia przepływów, gęstości i lepkości. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Studia i Monografie, z. 87, Opole 1996
- [7] Witoszyński C.: Aerodynamika. Politechnika Warszawska, Warszawa 1975

Abstracts

Laser Doppler type flowmeters as calibration standards

Zdzisław Kabza, Sławomir Zator, Julij Kamiński

– p. 25.

Structure and operation of two models of laser Doppler-type flowmeters are described. On the ground of comparative tests, possibility is assessed of their application as working standards for calibration of flowmeters and heatmeters.