

## Przepływ cieczy, pary i gazów – zadanie dla przepływomierzy wirowych

*Pomiary przepływu mają długą tradycję, sięgającą 5 000 lat p.n.e. Jednak dopiero na przestrzeni ostatnich kilku dekad zaobserwować można szczególnie znaczący rozwój tej techniki pomiarów.*

Chociaż tradycyjne urządzenia pomiarowe, jak np. przepływomierze turbinkowe i kryzowe są powszechnie wciąż stosowane, to dostępne są już mierniki, w których wykorzystano zaawansowane technologie. Dają one użytkownikowi możliwości uzyskania znacznie więcej informacji niż tylko pomiar przepływu, w dodatku niejednokrotnie bywając rozwiązaniami tańszymi. Takimi urządzeniami pomiarowymi są przepływomierze wirowe.

### Trochę historii, a więc o rozwoju przepływomierzy wirowych

Pierwsze przepływomierze wirowe ukazały się na rynku amerykańskim i japońskim na początku lat siedemdziesiątych. Głównymi ich zaletami były stosunkowo mała strata ciśnienia na przepływomierzu, szeroki zakres temperatury mierzonego czynnika oraz brak części ruchomych. W początkowej fazie rozwoju tego typu przepływomierzy, ze względu na ograniczone możliwości ówczesnej elektroniki, główny nacisk kładziono na jakość przetwarzania sygnału pomiarowego. W późniejszym okresie więcej uwagi poświęcono samym generatorom wirów ścieżki von Karmana, koncentrując się na tym aby generowany sygnał miał względnie dużą amplitudę oraz by generowana częstotliwość wirów zachowywała proporcjonalność do prędkości przepływu płynu. Współczesny rynek przepływomierzy wirowych oferuje szeroki wachlarz urządzeń, zróżnicowanych pod względem sposobu detekcji ścieżki wirowej (metoda piezoelektryczna, ultradźwiękowa), sposobu zabudowy przepływomierza (pomiaru uśrednionego profilu prędkości lub prędkości lokalnej), jak i odmian wyposażonych w dodatkowe czujniki temperatury, pozwalające określić gęstość płynu, a docelowo strumień masy płynu.

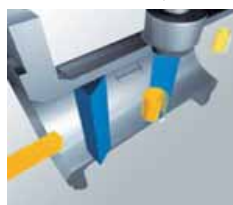
Obecnie, liczne zalety przepływomierzy wirowych i wysokie standardy ich produkcji decydują o tym, że stają się one coraz powszechniejszymi, przemysłowymi miernikami natężenia przepływu, będąc elementami składowymi systemów automatycznej kontroli i sterowania w różnych układach technologicznych.

### Jak one działają?

Przepływomierze wirowe wykorzystują zjawisko powstawania wirów za przeszkodą umieszczoną w strumieniu przepływu. Mierzą one częstotliwość wywołanych przez ścieżkę

wirową pulsacji ciśnienia w płynie. Ścieżka ta wytwarzana jest przez generator wirów umieszczony w strudze płynu. Struga, napotykać ciało, rozdziela się. Istnienie warstwy przyściennej powoduje, że płyn w bezpośrednim sąsiedztwie ciała porusza się wolniej niż w warstwach zewnętrznych. Na powierzchni opływającego ciała (po obu stronach) następuje oderwanie warstwy przyściennej. Dla małych wartości liczby Reynoldsa ( $Re$ ), charakterystycznych dla opływu, warstwy łączą się ponownie praktycznie zaraz za opływającym kształtem. Przy wzroście wartości liczby  $Re$  w odrywającej się warstwie przyściennej pojawiają się wiry. Następujące po sobie w jednoczesnych odstępach czasu, raz z jednej raz z drugiej strony wiry, tworzą ścieżkę wirową określaną również jako ścieżka wirowa von Karmana.

Wiry powstające w wyżej opisany sposób są nieregularne. Wystarczy jednak aby opływający element miał niewielkie wymiary poprzeczne aby odrywający się z jednej strony wir, stwarzał dobre warunki do powstawania wiru po przeciwnej stronie opływającego ciała. Wpływa to na zwiększenie stabilności i trwałości wytworzonej formacji wirowej, która składa się z szeregu wirów odrywających się w równych odstępach czasu raz z jednej, a raz z drugiej strony elementu nieopływowego. Stabilna ścieżka wirowa została zaobserwowana już przez Leonarda da Vinci, a matematycznie opisana przez Theodore von Kármán'a. Z kolei inny uczyony, Strouhal, stwierdził liniową zależność między częstotliwością odrywania się wirów a prędkością przepływu. Zależność ta wykorzystywana jest przy budowie przepływomierzy wirowych.

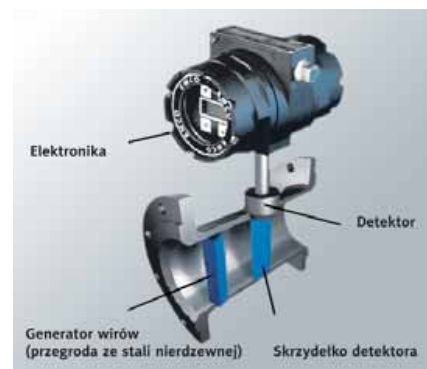


### Generator, detektor...

Konstrukcje wszystkich przepływomierzy wirowych zawierają trzy podstawowe części:

- element tworzący w przepływającym strumieniu ścieżkę Karmana, zwany generatorem wirów
- czujnik wykrywający wzbudzone wiry tworzący system detekcji,
- system elektronicznej analizy sygnału.

Głównym elementem przepływomierza wirowego jest – zanurzony w medium – generator



ścieżki wirowej von Karmana. Jest to podłużny profil mocowany na stałe, w gardzieli przepływomierza. Do pomiaru pulsacji ciśnienia służy czujnik, który jest przymocowany do generatora lub zespolony z osobnym elementem (skrzydełkiem), umieszczonym w medium.

Generator wirów winien posiadać następujące cechy:

- być bryłą symetryczną względem płaszczyzny przekroju równoległej do osi strumienia,
- geometryczne stosunki między szerokością generatora i jego długością oraz szerokością generatora i średnicą rurociągu winny być dobrane pod kątem wysokiej wartości natężenia, wartości liczby Strouhala i liniowości charakterystyki, jak również oporów przepływu,
- trzeci wymiar generatora powinien być dostatecznie długi (najczęściej przez całą szerokość – średnicę przewodu), aby nie zakłócał dwuwymiarowego charakteru zjawiska spływu wirów,
- kształt generatora powinien zapewnić jednocześnie stabilność i regularność wzbudzonych wirów w szerokim zakresie liczby  $Re$  (liniowość charakterystyki) oraz łatwość zainstalowania czujników, przetworników sygnału i łatwość „współpracy” z systemem detekcji.



Rodzaje stosowanych generatorów

### Systemy detekcji:

Systemy detekcji pracują zawsze wg jednej zasady: mierzą częstotliwość generowania wirów, a nie amplitudę zaburzeń.

### Rodzaje stosowanych detektorów

- **Detektory termiczne**

Jedne z pierwszych modeli przepływomierzy wirowych były wyposażone w układy pomiarowe z termooanemometrami w postaci termistorów, które samopodgrzewały się płynącym przez nie prądem. Pulsacje prędkości, które towarzyszyły odrywającym się wirom, powodowały cykliczne chłodzenie termistora, a przez to zmienia-

ta się w sposób cykliczny jego rezystancja (częstotliwość odrywania się wirów zmienia – modeluje w sposób cykliczny jego rezystancję). Dłagazów elementem kluczowym jest grzane włókno, natomiast w cieczach, gdzie siły masowe są większe i wymagana jest większa trwałość elementu cieplnego, stosuje się platynowe lub platynowo-irydowe filmy napylane np. na kwarcowe rdzenie. Obecnie urządzenia te najczęściej spotyka się w laboratoriach.

#### • Detektory ultradźwiękowe

Do detekcji okresowych zmian w przepływie za generatorem, stosowane są detektory ultradźwiękowe. W tym przypadku nadajnik i odbiornik są zamontowane za generatorem, w korpusie przepływomierza, prostopadłe do kierunku przepływu. Wiązka ultradźwięków jest przepuszczana przez ścieżkę wirową. W tym przypadku fala ultradźwiękowa jest modulowana amplitudowo ze względu na to, że zawirowanie powodują jej uginanie.

#### • Detektory optyczne

Innym rozwiązaniem jest układ optyczny składający się z diod laserowych. Różnice gęstości płynu wywołane przez wiry powodują załamanie wiązki światła, która jest emitowana przez diodę laserową, następnie skupiana przez zespół soczewek. Po refrakcji wiązka jest ponownie skupiana przez soczewki i kierowana do fotodiody. Dioda posiada moc rzędu 20 mW, a długość fali wynosi 780 nm.

#### • Detektory piezoelektryczne

Najbardziej popularną metodą detekcji pulsacji ciśnienia jest metoda piezoelektryczna, stosowana w przepływomierzach wirowych firmy EMCO. Detektory piezoelektryczne odpowiadają na oscylację ciśnienia niskonapięciowym sygnałem o takiej samej częstotliwości jak częstotliwość oscylacji. Czujniki mogą być zamontowane wewnątrz lub na zewnątrz korpusu przepływomierza. Na detektory wewnętrzne oddziałuje bezpośrednio ciśnienie pochodzące od pulsacji wirowych. Czujniki zewnętrzne umieszczone są poza kanałem przepływomierza, a siły pulsacji ciśnienia pochodzące od ścieżki wirowej, przekazywane są za pośrednictwem profilu, bądź osobnego elementu zwanego skrzydełkiem.

Aktualnie, przepływomierze wirowe to urządzenia oparte przede wszystkim na czujnikach piezoelektrycznych.

### Po pierwsze odporność, po drugie dokładność

Zaletą przepływomierzy wirowych jest możliwość pracy w dużym zakresie temperatury (od temperatury -200 °C, panującej w instalacjach kriogenicznych, do 400°C występującej przy przepływie pary przegrzanej), oraz ciśnie-

niu do 100 bar. Zakres pomiarowy dla cieczy zawiera się w granicach od 0,5 m/s do 9 m/s, dla gazów od 2 m/s do 80 m/s. Dolne granice mierzonych wartości wynikają z faktu, iż przy małych prędkościach, wartość liczby Strouhala jest ściśle związana z liczbą Reynoldsa (ma przebieg nieliniowy), a pulsacje ciśnienia są często niedostatecznie duże do poprawnej detekcji sygnału. Dolne wartości mierzonych strumieni określone są poprzez podanie minimalnej wartości liczby Re (określonej dla średnicy rurociągu). Liczba Reynoldsa określa w sposób jednoznaczny charakter przepływu wiążąc ze sobą: gęstość, lepkość, prędkości przepływu i rozmiar rurociągu. Mała liczba oznacza przewagę sił lepkości nad siłami bezwładności, duża zaś – przewagę sił bezwładności nad siłami lepkości. Należy przyjmować, że dla  $Re < 2320$  mamy do czynienia z przepływem laminarnym, a dla  $Re$  od 3 000 do 10 000 z przepływem turbulentnym. Minimalne wartości liczby Reynoldsa, przy zastosowaniu przepływomierzy wirowych, mieszczą się w granicach 10 000 – 20 000. Zbyt niska liczba Reynoldsa powoduje, iż siły tarcia wewnętrzne są na tyle duże w porównaniu z siłami bezwładności, że drobne zaburzenia są tłumione. W celu osiągnięcia jak największej dokładności pomiaru powinno się zapewnić możliwie długi, prosty odcinek rurociągu przed i za przepływomierzem (ze względu na szczególnie zaburzeniowy charakter pracy układu) oraz odpowiednio oddaloną lokalizację wszelkiej armatury.

Dokładność przepływomierzy wirowych wynosi dla cieczy: 0,7%-1%, natomiast dla gazów: 1%-1,5%.

### Są niemal wszędzie czyli o zastosowaniu

Przepływomierze wirowe znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Mogą służyć do pomiaru strumienia powietrza, gazu ziemnego, innych gazów i ich mieszanin, wody zasilającej kocioł, pary nasyconej i przegrzanej. Doskonale sprawdzają się w sieciach ciepłowniczych oraz instalacjach wykorzystujących parę wodną do celów technologicznych. Przepływomierze są przeznaczone do pomiaru płynów czystych, jednofazowych.

### Przepływomierze firmy EMCO

#### EMCO Hydro-Flow



Bardzo ekonomiczne przepływomierze wirowe, służące do pomiaru przepływu cieczy w zakresie średnic od 0,5" do 20"

- montaż w osi rurociągu
- pomiar przepływu wody także zdemineralizowanej
- pomiar cieczy agresywnych
- brak części ruchomych
- zakresowość 50:1
- zakres pomiarowy od 0,09 do 4,5 m/s
- norma jakości ISO 9001
- nie posiada żadnych uszczelkeł

#### EMCO Phd

Przepływomierze wirowe w wersji „in-line”, służące do pomiaru cieczy, gazów i pary w temperaturze medium do 400°C

- czujnik piezoelektryczny wbudowany w belkę spiętrającą
- lokalny wyświetlacz LCD, wskazania bierzące i sumaryczne
- pomiar przepływu cieczy, pary i gazów
- wykonanie Ex d[ib] C T6

#### EMCO V-bar

Przepływomierze wirowe w wersji „insert”, służące do pomiaru

cieczy, gazów i pary w zakresie średnic od DN65 do DN2000

- media: gazy, ciecz, para
- dla średnic DN 80 do DN 2000
- niezawodne
- brak części ruchomych
- niski koszt i prosty montaż
- szeroki zakres prędkości przepływu
- lokalnie programowalne
- wysoka dokładność
- ISO 9001



Opracowanie:  
**Barbara Sokół**

Ukończyła Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, o specjalności Energetyka Procesowa i Ochrona Środowiska na Politechnice Śląskiej w Katowicach. W Introlu pracuje na stanowisku asystentki działu pomiaru przepływu, w którym zajmuje się między innymi przepływomierzami wirowymi.

tel. 032/7890090  
e-mail: [przeplywy@introl.pl](mailto:przeplywy@introl.pl)