

Przepływomierze masowe Coriolisa

Zasada działania, budowa, zalety i wady

Przeglądając dostępne na rynku rozwiązania wykorzystywane do pomiaru przepływu, natrafimy na przepływomierze masowe Coriolisa, nazywane potocznie masowcami. Urządzenia te stają się coraz popularniejsze, warto więc dowiedzieć się więcej na ich temat. Niniejszy artykuł omawia zjawiska fizyczne leżące u podstaw działania przepływomierza masowego i opisuje konstrukcję typowego urządzenia. Przedstawione na zakończenie zalety i wady masowców pozwolą potencjalnym Użytkownikom ocenić przydatność tego typu przepływomierza w ich aplikacjach.

ZASADA DZIAŁANIA

Przepływomierze masowe są nazywane również przepływomierzami Coriolisa ze względu na zjawisko, w oparciu o które działają. W XIX wieku, francuski inżynier i naukowiec Gaspard-Gustave Coriolis zaobserwował, że gdy w wirującym układzie odniesienia zacznie się poruszać ciało o pewnej masie, to pojawi się siła działająca na to ciało prostopadle do kierunku jego ruchu. Zwrot tej siły jest zależny od kierunku ruchu ciała. Jeżeli ciało przybliży się do osi obrotu, siła działa zgodnie z kierunkiem obrotu układu, natomiast jeżeli ciało się oddala, siła działa przeciwnie do tego kierunku. Poniżej przedstawiono wzór pozwalający wyznaczyć wartość siły Coriolisa oraz określić jej kierunek i zwrot zależnie od wektorów prędkości obrotowej układu i liniowej poruszającego się ciała.

$$\vec{F}_c = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

gdzie:

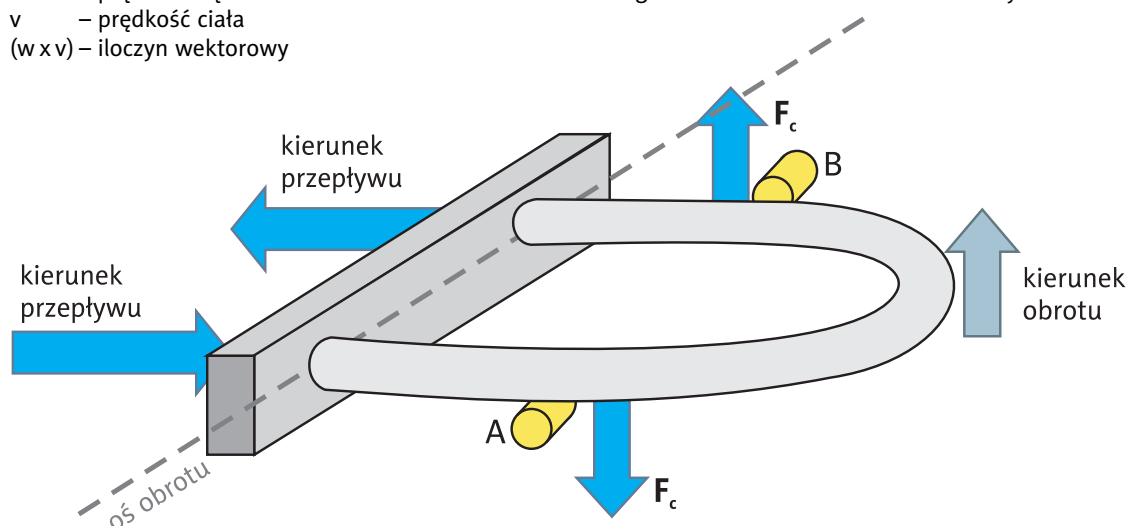
- F_c – siła Coriolisa
- m – masa poruszającego się ciała
- ω – prędkość kątowna układu
- v – prędkość ciała
- $(w \times v)$ – iloczyn wektorowy

Popatrzmy teraz, jak zjawisko Coriolisa zostało wykorzystane do pomiaru przepływu (Rysunek 1).

Wyobraźmy sobie, że rurka w kształcie litery U została wprawiona w ruch obrotowy wokół osi przechodzącej przez oba jej końce (wirujący układ odniesienia). Jeżeli teraz przez rurkę zacznie przepływać ciecz (poruszająca się masa), to zgodnie z podanym wcześniej wzorem, na ciecz wpływającą do rurki (oddala się od osi obrotu) zacznie działać siła skierowana przeciwnie do kierunku obrotu, a na ciecz wypływającą (płyne w kierunku osi obrotu) – siła skierowana zgodnie z kierunkiem obrotu. Obie siły działające w przeciwnych do siebie kierunkach spowodują odkształcenie rurki w sposób pokazany na rysunku 2.

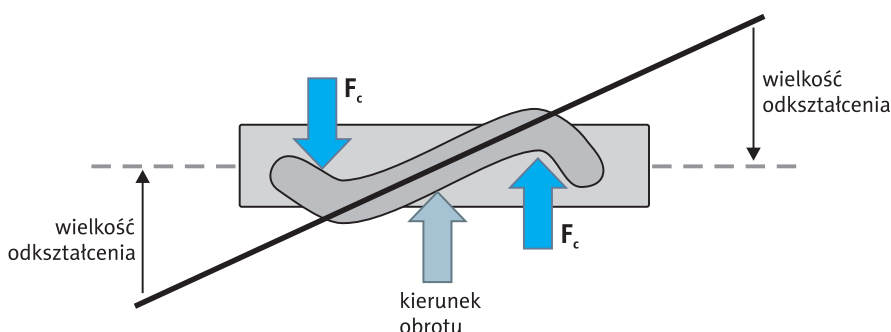
Łatwo sprawdzić, że po zmianie kierunku obrotu rurki na przeciwny (przy tym samym kierunku przepływu cieczy), zmieniają się także kierunki działania sił Coriolisa na obie części rurki, a odkształcenie zmieni się na przeciwnie.

Opisany wyżej efekt został wykorzystany przy konstrukcji przepływomierza masowego. Element pomiarowy zbudowano z dwóch, umieszczonych równoległe do siebie rurek w kształcie litery U. Wcześ-



Rysunek 1.
Siły Coriolisa
w obracającym się
układzie

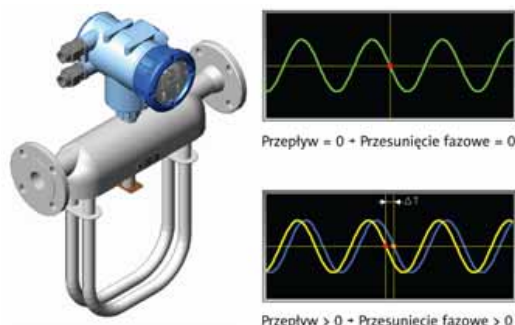
Możemy zauważyć, że dla stałej prędkości wirowania układu, wielkość siły Coriolisa jest zależna tylko od dwóch parametrów opisujących poruszający się obiekt: jego masy i jego prędkości liniowej.



Rysunek 2.
Odkształcenia rurki
powodowane przez siły
Coriolisa

niej, dla łatwiejszego wyjaśnienia efektu Coriolisa, założyliśmy, że nasza rurka wiruje. W rzeczywistości rurki wewnątrz przepływomierza nie wirują, ale zostają pobudzone do drgań. Ten rodzaj ruchu można traktować jako bardzo ograniczony ruch obrotowy przy ciągle zmieniającym się kierunku obrotów. Pojawiające się przy tym siły Coriolisa powodują cykliczne odkształcanie rurek. **Wielkość odkształcenia jest zależna od wielkości siły Coriolisa, a ta jest wprost proporcjonalna do prędkości przepływającej masy.** Im większa prędkość przepływu (i przepływ masowy), tym większe odkształcenia. Rurki są wzbudzone do drgań w przeciwnych kierunkach. Odkształcenia obserwowane w punktach A i B będą się zmieniały z taką samą częstotliwością (częstotliwość rezonansowa układu), ale będą przesunięte w fazie. Większe odkształcenia (czyli większy przepływ masowy) oznaczają większe przesunięcie fazowe sygnałów odbieranych w punktach A i B. Tak więc mierząc przesunięcie fazowe sygnałów jesteśmy w stanie mierzyć przepływ masowy przez układ pomiarowy (Rysunek 3).

Rysunek 3.
Pomiar przepływu masy

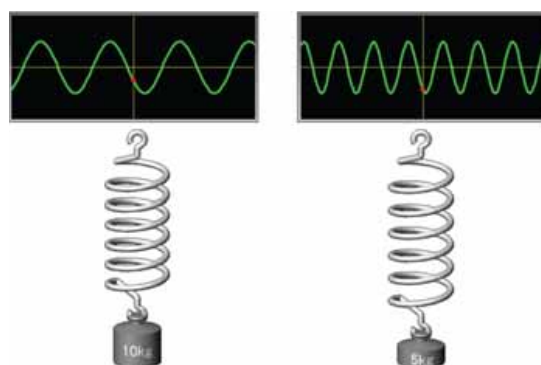


Wspomnieliśmy wcześniej, że układ rurek jest wzbudzany do drgań aby umożliwić pomiar przepływu masowego. Okazuje się, że ten sam układ drgający pozwala nam zmierzyć jeszcze jeden parametr medium, a mianowicie gęstość. Na rysunku 4 zilustrowano zjawisko, które zostało wykorzystane do tego celu.

Dwa układy drgające są zbudowane z takich samych ciężarków o masie m zawieszonych na identycznych sprężynach. Pierwszy układ jest umieszczony w ośrodku o gęstości ρ_1 , a drugi w ośrodku o gęstości ρ_2 , przy czym $\rho_1 < \rho_2$. Zewnętrzna siła wymuszająca wprawia układy w oscylacje. Zauważymy, że częstotliwość rezonansowa drgań obu układów jest różna. Dla ośrodka o gęstości ρ_1 (mniejszej), częstotliwość drgań jest większa, niż dla ośrodka o gęstości ρ_2 (większej).

W praktyce pomiar gęstości wygląda następująco. Częstotliwość rezonansowa układu pomiaro-

Rysunek 4.
Zależność częstotliwości drgań układu od gęstości



wego jest zależna od jego masy oraz właściwości mechanicznych (sprężystości). Masa układu składa się z masy rurek (która jest stała) i masy wypełniającej je cieczy. Przyjmując, że objętość rurek jest stała, masa cieczy jest zależna jedynie od jej gęstości. Wynika stąd wprost, że pomiar częstotliwości rezonansowej elementu pomiarowego daje nam informację o gęstości zawartego wewnątrz medium.

Właściwości mechaniczne układu sensora zmieniają się w pewnym stopniu wraz z temperaturą w jakiej układ pracuje. Zmiany temperatury są powodowane głównie przez medium i aby skompensować wpływ temperatury na wyniki pomiarów, układ wyposażono w czujniki zintegrowane z rurkami. W ten sposób jednocześnie poprawiono dokładność pomiaru i zwiększono użyteczność urządzenia: oprócz przepływu masowego i gęstości Użytkownikowi dostarcza się informacji o temperaturze przepływającej cieczy.

Warto przy okazji zaznaczyć, że dla wielu metod pomiarowych przepływ objętościowy jest wielkością pierwotną. Wyliczenie przepływu masowego wymaga zmierzenia dodatkowych parametrów: temperatury i ciśnienia. Dla przepływomierza Coriolisa jest odwrotnie: przepływ masowy jest wielkością pierwotną, a przepływ objętościowy – wtórną, wyliczaną w oparciu o bieżące wartości przepływu masowego i gęstości.

BUDOWA PRZEPŁYWOMIERZA CORIOLISA

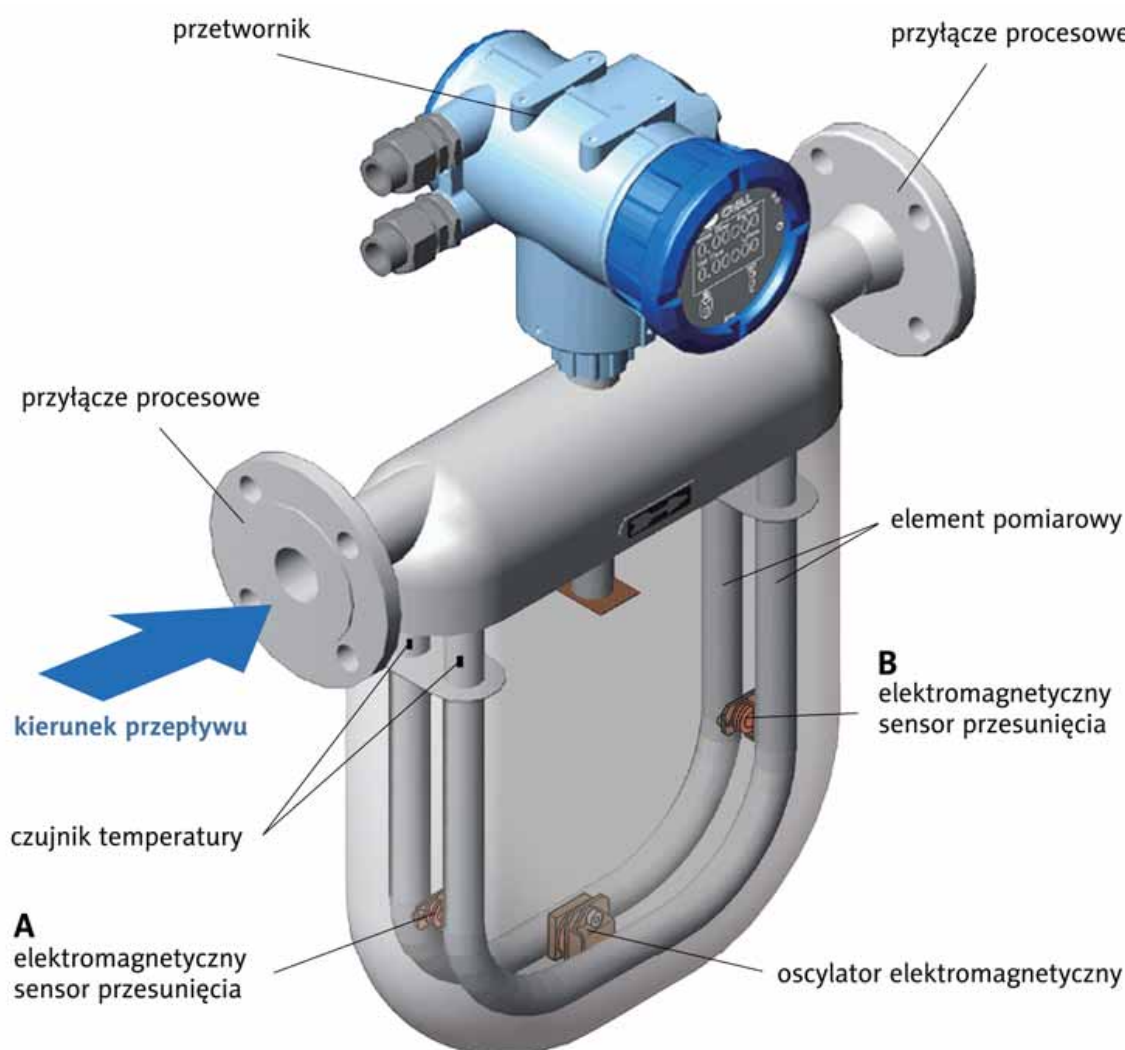
Przyglądając się typowej konstrukcji przepływomierza masowego, znajdziemy wszystkie istotne elementy spełniające opisane wcześniej funkcje (rysunek 5):

- element pomiarowy (dwie, zabudowane równolegle U-rurki, pobudzone do drgań)
- oscylator elektromagnetyczny (układ wzbudzający)
- elektromagnetyczne sensory przemieszczenia (punkty A i B)
- czujniki temperatury (temperatura medium)
- przetwornik
- przyłącza procesowe (zabudowa przepływomierza w instalacji)

W całej konstrukcji przepływomierza szczególnie ważną rolę spełnia przetwornik. Ma on za zadanie sterować pracą całego układu. Musi także analizować wielką ilość danych pomiarowych przekazywanych przez sensor: częstotliwości drgań, przesunięcia fazowe, temperatura. Od sprawności i mocy obliczeniowej przetwornika zależą m. in. szybkość reakcji na zmiany przepływu i dokładność pomiaru. Przetwornik jest zazwyczaj wyposażony w wyświetlacz pozwalający na lokalny odczyt aktualnych wartości wielkości mierzonych oraz na kontrolę i programowanie parametrów przepływomierza. W bardziej zaawansowanych wykonaniach na wyświetlaczu pojawiają się także informacje o stanie pracy urządzenia (np. ostrzeżenie o zbyt silnych wibracjach rurociągu, o przeprowadzaniu samokontroli sensora lub o braku medium w elemencie pomiarowym). Przetwornik odpowiada także za przesyłanie danych pomiarowych, zależnie od konfiguracji przepływomierza, w postaci sygnałów analogowych lub cyfrowych.

ZALETY I WADY

Użytkownicy decydują się na zastosowanie przepływomierzy masowych Coriolisa głównie z uwagi



Rysunek 5.
Budowa
przepływomierza
Coriolisa

na dokładność pomiarów. Najdokładniejsze modele mierzą przepływ masy z dokładnością $\pm 0,1\%$, a gęstość z dokładnością do $0,0005 \text{ g/ml}$. Przykładowy przepływomierz ALTI_{mass} U firmy OVAL zapewnia podane dokładności pomiaru przy fabrycznej kalibracji, bez konieczności dokonywania jej po zamontowaniu urządzenia na instalacji.

Drugą istotną zaletą masowców jest możliwość pomiaru kilku parametrów za pomocą jednego urządzenia: przepływu masy, gęstości oraz temperatury medium.

Przepływomierze masowe nie wymagają przy tym odcinków prostych, zarówno przed, jak i za urządzeniem. Oznacza to, że profil prędkości w rurociągu nie ma wpływu na pomiar. Dodatkowo ułatwia to wybór miejsca montażu przepływomierza i zmniejsza koszty instalacji.

Nie bez znaczenia jest także możliwość pomiaru dwukierunkowego oraz możliwość stosowania masowców dla szerokiego spektrum mediów: od gazów, poprzez ciecze, po zawiesiny i pasty.

Jako najważniejszą wadę przepływomierzy Coriolisa wymieniano do tej pory ich cenę. Rzeczywiście, najdokładniejsze urządzenia stosowane w układach rozliczeniowych są drogie. Są już jednak na rynku urządzenia przeznaczone do pomiarów technologicznych, które łączą wysoką dokładność z bardzo przystępną ceną. Takim przepływomierzem jest wspomniany już ALTI_{mass} U firmy OVAL, który zapewnia dokładność $\pm 0,1\%$ przy cenie rzędu 5.000 EUR.

Należy pamiętać również o pewnej słabości masowca jaką jest jego sensor pomiarowy. U-rurki mają średnice mniejsze niż rurociąg, na którym przepływomierz pracuje. W przypadku cieczy zanieczyszczonych lub zawierających dużą ilość łatwo wytrącających się zawiesin istnieje więc niebezpieczeństwo zatykania się rurek, a ich czyszczenie może być uciążliwe lub wręcz niemożliwe.

Biorąc pod uwagę wspomniane wady i zalety można stwierdzić, że wraz z dalszym rozwojem i związanym z nim spadkiem cen, przepływomierze masowe Coriolisa mają szansę stać się najczęściej stosowanymi urządzeniami pomiarowymi dla cieczy, zaraz za przepływomierzami elektromagnetycznymi. W przypadku innych mediów, głównie ze względu na cenę, nadal dominować będą inne metody (gazy – przepływomierze termiczne, para – przepływomierze wirowe), niemniej jednak w niektórych aplikacjach także masowce znajdą swoje zastosowanie.



Jerzy Janota

Jest absolwentem Wydziału Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W Introlu pracuje od 19 lat. Obecnie na stanowisku Dyrektora ds. Technicznych.

Tel: 32 789 00 09