

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Szudarka
pt. Modelling Selected Properties of Mechanical Oscillator Flowmeters.

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki
Warszawskiej z dnia 02.07.2020.

1. Celowość podjęcia tematu

Pomiary strumieni masy i objętości płynów są jednymi z najczęściej spotykanych pomiarów zarówno w praktyce przemysłowej, jak i w innych obszarach gospodarczych. Stąd wielość problemów z jaką ma się do czynienia w praktyce przy realizacji pomiarów strumieni. Wymienić tu można przykładowo spotykane bardzo duże średnice kanałów (energetyka ciepłownictwo), skrajnie małe średnice (chemia, farmacja, medycyna), skrajnie wysokie lub niskie oraz zmienne parametry płynów czy też obecność drugiej fazy, wtrąceń czy zanieczyszczeń w mierzonym czynniku. Inne trudności mogą pojawić się ze strony instalacji przepływowej, takie choćby jak brak odpowiednio długich prostych odcinków rurociągu dla montażu przepływomierza, stany nieustalone w przepływie czy znacznie ograniczony dostęp do instalacji.

Rynek oferuje wiele różnych rodzajów przepływomierzy, które zdaniem producentów, potrafią sprostać wielorakim trudnościom technicznym. Że tak do końca nie jest, świadczą ciągle poszukiwania nowych rozwiązań technicznych przepływomierzy i badania dotyczące wpływu nietypowych uwarunkowań na ich charakterystyki metrologiczne. Jest to obszar ciągłych poszukiwań naukowych, w który wpisuje się niniejsza, recenzowana praca.

Przepływomierze oscylacyjne nie należą do grupy przepływomierzy najbardziej rozpowszechnionych. Nie mniej jednak ich własności metrologiczne oraz eksploatacyjne powodują, że w pewnych obszarach zastosowań są rozwiązaniem korzystnym technicznie i ekonomicznie. Zespół naukowy, do którego należy Autor rozprawy od lat zajmuje się pomiarami strumieni, a przepływomierze oscylacyjne stanowią przedmiot szczególnych badań. W obszarze tym zespół ma wiele osiągnięć naukowych i efektów aplikacyjnych, jak również duże zaplecze badawcze. Stąd bardzo dobre ulokowanie Autora i ukierunkowanie Jego badań. Temat i zakres rozprawy ukierunkowany na ocenę wpływu wybranych cech konstrukcyjnych przepływomierzy oscylacyjnych na ich własności metrologiczne uważam za naukowo celowy. Istotnym elementem rozprawy jest uwzględnienie w badaniach wpływu uwarunkowań instalacyjnych przepływomierzy oscylacyjnych na ich charakterystyki.

Praca, prócz walorów podstawowych - poznawczych, ma ważne znaczenie użytkowe.

2. Zakres pracy, sposób jej realizacji i wyniki badań

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów, spisu literatury oraz załączników. Całość poprzedzona jest streszczeniem, spisem treści i stosowanych w pracy oznaczeń.

Praca została wydana w języku angielskim. Z całą pewnością rozszerzy to grono osób, chcących zapoznać się ze zgromadzonym w niej materiałem naukowym oraz ułatwi dalszą publikację zawartych w niej treści.

Rozdział pierwszy jest swojego rodzaju wstępem i zawiera informacje uzasadniające celowość wyboru tematu pracy. Autor wskazuje na obszar pomiarów strumieni, w którym

przepływomierz oscylacyjny spełnić może szereg warunków technicznych, metrologicznych i ekonomicznych. Uzasadnia tym samym ukierunkowanie swoich badań.

Rozdział drugi stanowi wyjaśnienie zasady działania przepływomierza oscylacyjnego, jego budowy, własności metrologicznych oraz jego cech w stosunku do innych metod pomiaru strumieni. Stanowi ogólny przegląd literatury związanej z przepływomierzami oscylacyjnymi.

Rozdział trzeci określa precyzyjnie cel i zakres przedstawionej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale czwartym opisano stanowiska badawcze; wodne i powietrzne umożliwiające zarówno kalibrację przepływomierzy jak i przeprowadzenie planowanych badań eksperymentalnych. Podano zakresy strumieni możliwych do uzyskania na ww. stanowiskach oraz sumaryczne niepewności wzorcowań na nich przeprowadzanych. Stanowisko umożliwiające badania przepływomierzy w warunkach przepływu skroplonych gazów opisano w dalszej części pracy.

Rozdział piąty zawiera model matematyczny przepływu płynu w układzie przepływowym, w którym umieszczono badany przepływomierz. Model w swej ogólnej postaci jest modelem trójwymiarowym, niestacjonarnym, opartym na równaniach Reynoldsa, równaniu ciągłości oraz wybranym, na drodze wstępnych obliczeń, modelu turbulencji $k-\omega$ SST. Model uzupełniono właściwymi warunkami początkowo-brzegowymi. Podano informacje co do zastosowanych metod numerycznych oraz rodzaju i gęstości zastosowanej siatki numerycznej. Przedstawiono również wyniki analizy dotyczącej wpływu wielkości zastosowanego wymiaru siatki (kroku) w czasie i w przestrzeni na wartości obliczeń.

Rozdziały szósty i siódmy zawierają wyniki modelowania numerycznego. Są to głównie studia parametryczne, a także działania weryfikujące uproszczony analityczny opis oddziaływania płynu na przepływomierz. Zbadano wpływ cech geometrycznych przepływomierza m.in. kątów charakteryzujących oscylator, wybranych wielkości geometrycznych, odległości oscylatora od rozdzielacza na energię oscylacji wyrażoną poprzez bezwymiarowy parametr F . Dokonano również analizy wpływu modyfikacji kształtu części spływowej oscylatora na amplitudę oscylacji. Badaniom numerycznym poddano także ocenę wpływu siły grawitacji na działanie przepływomierza, poprzez uwzględnienie w modelowaniu jego pionowego i poziomego położenia.

Rozdział ósmy zawiera wyniki badań numerycznych nad wpływem zaburzenia strugi przed przepływomierzem na jego wskazania poprzez dodatkowy błąd pomiaru o charakterze systematycznym. Badania są bardzo obszerne. Uwzględniono w nich zaburzenia wynikające z obecności kolana w dwóch różnych płaszczyznach w stosunku do lokalizacji przepływomierza, a także dwóch kolan różnie usytuowanych względem siebie oraz przepływomierza. Poddano również analizie wpływ rodzaju i lokalizacji elementu zaburzającego na rozkłady prędkości płynu w otoczeniu przepływomierza.

W rozdziale ósmym zawarto również opis przeprowadzenia i wyniki badań eksperymentalnych nad wpływem pulsacji strumienia płynu na wskazania przepływomierza oscylacyjnego. Do przeprowadzenia badań wykorzystano stanowisko wzorcownicze z dzwonowym zbiornikiem gazu. Zastosowany pulsator umożliwiał regulację zarówno częstotliwości jak i amplitudy pulsacji gazu. Wyniki badań opracowano w postaci zależności niepewności pomiaru od stosunku częstotliwości pulsacji strumienia do częstotliwości oscylatora przepływomierza. Generalnie, poza przedziałem $f_p/f_{os} < 0,5$, wykazano istotny wpływ pulsacji strumienia na niepewność wskazań przepływomierza.

Rozdział ósmy zamykają, syntetycznie podane, wyniki badań nad wpływem chropowatości rurociągu na wskazania przepływomierza oscylacyjnego. Autor konkluduje, że w badanym zakresie chropowatości rurociągu (do $14E-4$ Ra/D) jej wpływ na wskazania jest nieznaczny.

W bardzo istotnym z punktu widzenia aplikacyjnego, rozdziale dziewiątym Autor rozprawy przedstawił wyniki badań przepływomierza oscylacyjnego w warunkach przepływu cieczy kriogenicznej. Przedstawił założenia i metodologię skorygowania stałej kalibracyjnej przepływomierza dla adaptacji przepływomierza do pomiaru płynu o innej gęstości niż płynu wykorzystanego przy wzorcowaniu. Przeliczenia wykorzystano do dostosowania przepływomierza do pomiaru skroplonego gazu LNG. Jako wzorzec wtórny wykorzystano przepływomierz Coriolisa wraz ze stanowiskiem umożliwiającym stabilny przepływ cieczy kriogenicznej. Przedstawione wyniki badań wskazują, że tak przygotowany przepływomierz

oscylacyjny może być zastosowany do pomiaru badanej cieczy kriogenicznej. Błędy pomiaru mieszczą się w przedziale tolerancji przewidzianej dla tego typu pomiarów w rozliczeniach handlowych. Jak podkreśla Autor, względnie niska lepkość czynnika kriogenicznego powoduje, że pomiary realizowane są przy wysokich liczbach Reynoldsa, co ogranicza wpływ efektów nieliniowych na charakterystykę przepływomierza.

Rozdział 10 zawiera właściwie sformułowane wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz wskazanie kierunków dalszych działań.

Spis literatury liczy 127 pozycji z czego 30 pozycji jest z okresu ostatnich dziesięciu lat. Pan Maciej Szudarek jest współautorem w dwóch wymienionych pozycjach.

2. Ocena pracy

Jak już wcześniej podkreśliłem temat rozprawy jest ważny i interesujący tak z naukowego jak i wdrożeniowego punktu widzenia. Recenzowana praca doktorska jest, co do zakresu przeprowadzonych badań, bardzo obszerna, a uzyskane wyniki są naukowo i użytkowo istotne. Aby bardzo duży zakres badań dostosować do zwyczajowych ram pracy doktorskiej Autor niekiedy do minimum opisał metodykę badań, a uzyskane wyniki starał się przedstawić jak najbardziej syntetycznie. Należy jednak wskazać, że ogólnie rozprawa jest napisana poprawnie, jasno i podzielona jest na logiczne, wynikające z jej układu rozdziały.

Za Jego główne osiągnięcia uważam:

- Przygotowanie bardzo złożonego narzędzia numerycznego i dostosowanie go do badań obiektu i zjawiska fizycznego o złożonej geometrii i niestacjonarnym przebiegu. Takim obiektem jest działający przepływomierz oscylacyjny. Przeprowadzenie testów zbieżności rozwiązań. Globalna weryfikacja uzyskanych wyników w oparciu o własne dane eksperymentalne. Badane numerycznie zagadnienie jest silnie nieliniowe i niestacjonarne. Niestacjonarność wynika zarówno turbulencji przepływu jak i przede wszystkim z charakteru pracy urządzenia. Stąd uzyskana ilościowa wręcz zgodność stałych kalibracyjnych „numerycznych” z eksperymentalnymi jest istotnym osiągnięciem Autora.

- Przeprowadzenie kompleksowych badań numerycznych nad wpływem warunków konstrukcyjnych oraz uwarunkowań instalacyjnych na charakterystyki przepływomierzy oscylacyjnych. Autor wskazuje tutaj kierunki i możliwości poprawy własności metrologicznych tych przepływomierzy m.in. przez zwiększenie zakresu liniowości charakterystyki, zwiększenie energii oscylacji czy lepszy dobór wymiarów wybranych elementów przepływomierza. Uzyskane wyniki stanowią niewątpliwie wkład naukowy w badanym obszarze technik pomiaru strumienia jak również posiadają duże walory aplikacyjne.

- Przeprowadzenie trudnego od strony organizacyjnej i instalacyjnej eksperymentu w warunkach kriogenicznych z jasno opracowanymi wynikami i konkluzjami co do możliwości stosowania badanego przepływomierza oscylacyjnego do pomiaru LNG przy spełnieniu uwarunkowań prawnych.

Poziom rozwiązaniem zadań przyjętych w pracy jest, z punktu widzenia jej celu, wysoki i spełnia aż nadto wymogi stawiane pracom doktorskim z zakresu nauk technicznych. Wykonując zaplanowane zadania Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych. Warto jeszcze raz podkreślić zakres przeprowadzonych eksperymentów, profesjonalne ich wykonanie i bardzo staranne opracowanie wyników.

Praca dotyczy badań konstrukcji i eksploatacji przepływomierza z oscylatorem mechanicznym i mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

W trakcie studiowania rozprawy nasuwają się następujące uwagi i pytania:

a) W pracy, w rozdziale 4 i dalszych, brak jest charakterystyki metrologicznej badanych przepływomierzy $q_v = F(f_{os})$, czy też $K(q_v)$. Przykładowo, na rys. 5.14 oraz w podpisie rys.5.15 są wartości K różniące się o dwa rzędy i nie wiadomo czy dotyczą f_{os} , czy też sygnału impulsowego wyjścia przepływomierza? Ułatwiło by to również analizę wyników zamieszczonych w podrozdziale 8.2, dotyczących przepływu pulsującego. Wartość f_p/f_{os} można wtedy odnieść do konkretnych praktycznych wartości. Uwaga ta dotyczy też rozróżnienia oznaczeń K , K_{ref} , K_b (str. 89) czy K_m .

b) Autor modelował numerycznie bardzo złożone zjawisko fizyczne. Przedstawił model matematyczny, warunki brzegowe i szereg informacji co do konstrukcji siatki różnicowej. Natomiast bardzo ogólnie, w podrozdziale 5.3.3 oraz 5.4 i 5.5, przedstawiono opis zastosowanych metod numerycznych czy schematów różnicowych. Brak jest tutaj cytowania stosownej literatury, a zwłaszcza literatury dotyczącej samego narzędzia – oprogramowania. Myślę, że Autor korzystał ze specjalistycznego, komercyjnego oprogramowania np. typu FLUENT. Bardzo potrzebne były wykonane przez Autora testy zbieżności. Z kolei spełnienie warunku Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego jest bezwzględnie niezbędne dla stabilności jawnego schematu różnicowego w zagadnieniu niestacjonarnym. W zastosowanej metodzie niejawniej, poruszającym się elemencie układu wraz z częścią siatki, przy nieliniowości zagadnienia określenie właściwej wielkości kroku w czasie wymaga przeprowadzenia stosownych prób, co Autor *nota bene* wykonał. Modelowane jest rzeczywiste zjawisko fizyczne. O jaki kąt przemieści się oscylator w jednym kroku w czasie? Jak przebiega uśrednienie wielkości przedstawionych na wykresach zbiorczych np. 6.9?

c) Autor określa część z przeprowadzonych przez siebie symulacji jako *steadyt-state CFD* np. str. 90, wiersz 8. Czy jest to przypadek, gdy oscylator jest „unieruchomiony” (układ jest stacjonarny), a obliczenia są prowadzone dla ogólnej niestacjonarnej postaci równań 5.2 i niestacjonarnej postaci równań modelu turbulencji? Ten problem należy wyjaśnić.

d) Na rys. 5.15 bardzo małe przedziały określające niepewność pomiaru wynikają (prawdopodobnie) z niepewności pomiarowej stanowiska wzorcowniczego. Czy przedziały te nie powinny być rozszerzone o powtarzalność pomiarów badanym przepływomierzem?

4. Konkluzja

Podsumowując swoją recenzję chciałbym podkreślić, że **oceniłam pracę Pana Macieja Szudarka jako bardzo dobrą pracę doktorską. Godny podkreślenia jest wkład pracy naukowej Autora, oryginalność uzyskanych wyników, a także ich istotny użytkowy potencjał.** Przedstawione wcześniej uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają wysokiej oceny pracy.

Uważam, że Pan Maciej Szudarek wykazał się umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Szudarka spełnia wymogi ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.