

Dr hab. inż. Stanisław Waluś  
Ul. Andromedy 2 m 9  
44-117 Gliwice  
s.walus@data.pl  
32 238 17 97  
519 619 918

Gliwice, 31 listopada 2019 r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Wpływ zaburzeń przepływu na charakterystyki przepływomierzy ultradźwiękowych z głowicami nakładanymi na rurociąg**

Autor rozprawy: **mgr inż. Piotr Synowiec**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz prof. PWr

Przedstawiona do recenzji rozprawa została wydana drukiem na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w 2019 r. Składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych symboli, 9 rozdziałów i bibliografii obejmujących 175 stron.

### 1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo istotnego zagadnienia poprawy dokładności pomiaru strumienia objętości w rurociągach, gdzie przepływomierz musi być zainstalowany w krótkim prostym odcinku rurociągu i wiadomo, że rozkład prędkości w miejscu zainstalowania przepływomierza nie będzie osiowo-symetryczny.

Mgr inż. Piotr Synowiec postawił sobie dwa zasadnicze cele badawcze: poznanie, jak błędy pomiaru strumienia objętości zależą od odległości między przepływomierzem, a miejscem zaburzenia strugi oraz znalezienie takiego kąta instalowania głowic na rurociągu, aby błędy pomiaru strumienia objętości były jak najmniejsze. Dodatkowym celem badawczym było sprawdzenie czy model matematyczny rozkładu prędkości  $k-\epsilon$  dobrze odpowiada rozkładowi prędkości wyznaczonym za pomocą anemometrii laserowej. Cel pracy został opisany w rozdziale 3 na stronie 32.

Zakres rozprawy wynika z postawionych sobie zadań i ze względów czasowych ograniczony jest do badania wpływu zaburzeń przepływu wywołanych tylko jednym elementem zaburzającym przepływ – łukiem hamburskim. Autor wybrał ten element instalacji, gdyż często występuje on w praktyce. Autor zbudował stanowisko pomiarowe i opracowana przez niego metodyka badań może być stosowana do innych elementów zaburzających przepływ.

Praca ma charakter badawczy i jej wyniki mogą być wykorzystane w praktyce pomiaru strumienia objętości cieczy w rurociągu. Aby móc zrealizować cele badawcze autor musiał zbudować odpowiednie stanowisko badawcze, a więc można powiedzieć, że praca zawiera pewne elementy konstrukcyjne. Zakres pracy jest przedstawiony w rozdziale 5 na str. 33.

### 2. Zawartość rozprawy

W pierwszym rozdziale pracy (Wstęp) Autor na przeszło trzech stronach przedstawił ważność pomiaru strumienia płynu (strumienia objętości lub strumienia masy) oraz trudności

jakie występują w praktyce z pomiarem tej wielkości. Odwołując się do literatury wspominał o różnych zasadach pomiarowych jakie są stosowane w przepływomierzach oraz opisał zalety przepływomierza nieingerencyjnego, jakim jest przepływomierz ultradźwiękowy z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu. Opisał zjawisko przepływu w rurociągu i wskazał na konieczność okresowego sprawdzania i wzorcowania przepływomierza. Do badań Autor rozprawy wybrał przepływomierz ultradźwiękowy, który ze względu na to, że nie ingeruje w strugę płynu lub ingerencja jest bardzo mała (gdy głowice są instalowane w ściance rurociągu) jest często stosowany w praktyce przemysłowej. Ze wstępu dobrze wynika uzasadnienie wyboru tematu rozprawy.

Rozdział drugi, zatytułowany „Zasada działania przepływomierza ultradźwiękowego” obejmuje str. 11 – 32. Na początku Autor krótko opisał wykorzystanie ultradźwięków w różnych dziedzinach i potem zastosowania przepływomierzy ultradźwiękowych, które są zbudowane z wykorzystaniem dwóch zjawisk: zjawiska zmiany prędkości fali ultradźwiękowej w płynie w ruchu w stosunku do prędkości w płynie pozostającym w spoczynku (metoda transit-time – czasu przejścia) i zjawiska Dopplera. Dalej opisał zjawisko odbicia fali ultradźwiękowej od granicy między ośrodkami charakteryzującymi się różnymi impedancjami akustycznymi i zjawisko przechodzenia promieniowania przez taką granicę. Kilka stron poświęcił zagadnieniu propagacji fal ultradźwiękowych. Dalsza część rozdziału jest poświęcona zasadzie działania przepływomierza ultradźwiękowego z nakładanymi głowicami na ściankę rurociągu i Autor wyprowadził model matematyczny przepływomierza, na podstawie którego wyznaczana jest wielkość mierzona, to znaczy strumień objętości. Nieco miejsca poświęcił przepływomierzom wielodrogowym, które pozwalają na uzyskanie dokładniejszego wyniku pomiaru, ale muszą być zabudowane w rurociągu na stałe. Wymienił zalety przepływomierzy z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu (clamp-on).

Rozdział trzeci (Cel pracy) został opisany w pierwszym punkcie niniejszej recenzji.

W rozdziale 4 (Teza pracy) Autor przedstawił cztery tezy, z których pierwszą i czwartą uważam za najważniejsze. Pierwsza odnosi się do możliwości zmniejszenia błędu pomiaru w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości z równoczesnym pomiarem dokonanym nieinwazyjnie – głowice przepływomierza ultradźwiękowego są nakładane na rurociąg. Umożliwia to na dokonywanie pomiarów okresowych w wielu miejscach jednym przepływomierzem. Ostatnia teza dotyczy możliwości wyznaczania położenia głowic na rurociągu na podstawie wyników modelowania numerycznego.

W rozdziale 5 (Zakres pracy) na str. 33 został w sześciu punktach wymieniony zakres pracy, który skomentowałem w pierwszym punkcie niniejszej recenzji.

Rozdział szósty (Budowa stanowiska i sposób realizacji pomiarów) zawarty na stronach 34-54 zawiera opis zaprojektowanego i zbudowanego przez Doktoranta stanowiska badawczego. W podrozdziale 6.1 jest przedstawiony schemat i opis stanowiska badawczego, a w podrozdziale 6.2 (str. 36 – 50) są opisane przyrządy stosowane na stanowisku badawczym. W podrozdziale 6.3 Autor przedstawił sposób realizacji pomiarów (str. 50-54).

W rozdziale siódmym (Wyniki z przeprowadzonych badań (anemometrycznych i numerycznych), na str. 55 – 116 autor zawarł wyniki przeprowadzonych badań anemometrem laserowym i numerycznych. Na początku przytoczył znane od lat wzory modelujące w sposób analityczny kształt zniekształconego rozkładu prędkości (podrozdział 7.1 Modele matematyczne). Dla dwunastu modeli przedstawił wykresy izotach. Niestety nie odzwierciedlają one wystarczająco rzeczywistych zniekształconych rozkładów prędkości. Modele te nie są powiązane z konkretnymi urządzeniami w rurociągu, które są przyczyną zniekształcenia. W tej sytuacji Autor zastosował numeryczną symulację CFD (Computational fluid dynamics) wykorzystując program ANSYS i wybierając model turbulencji k-ε.

Wyniki symulacji numerycznej były porównywane z wynikami uzyskanymi na stanowisku za pomocą dopplerowskiego anemometru laserowego. Badania wykonano dla dwóch liczb Reynoldsa: około 70 000 i 100 000, co odpowiada zakresowi wartości występującemu w praktyce i wybór ten uważam za trafny. Przy dużych wartościach prędkości (i tym samym liczby Reynoldsa) rosną straty ciśnienia i tym samym koszty pompowania, natomiast przy mniejszych wartościach prędkości rosną koszty rurociągu (większa średnica).

### **Ocena rozprawy**

Postawione cele naukowe Autor osiągnął w rozprawie w zakresie projektowania stanowiska pomiarowego, badania przydatności modelowania numerycznego bryły prędkości oraz badania dokładności przepływomierza ultradźwiękowego jednodrogowego, który musi być zainstalowany w miejscu, gdzie występuje zniekształcony rozkład prędkości, a właśnie wskazania przepływomierza ultradźwiękowego zależą od kształtu rozkładu prędkości. W takiej sytuacji można zaproponować użycie np. przepływomierza elektromagnetycznego, którego wskazania nie zależą od kształtu rozkładu prędkości, ale jego zabudowa wiąże się z koniecznością przerywania przepływu, opróżnienia rurociągu i zamontowania na rurociągu kołnierzy do instalacji przepływomierza. Przepływomierz ultradźwiękowy z nakładanymi głowicami tego nie wymaga. Natomiast przepływomierz ultradźwiękowy z głowicami montowanymi w ściance może być instalowany bez przerywania przepływu (robi się to zwłaszcza na rurociągach o dużych średnicach). Bibliografia obejmuje 113 pozycji, w tym podręczniki, artykuły w czasopiśmie, materiały firmowe. 52 pozycje są w języku angielskim, 3 w języku niemieckim, a 21 jest z lat 2012 – 2019, co świadczy o tym że Doktorant zapoznał się z najnowszą literaturą.

Do najważniejszych osiągnięć Autora zawartych w rozprawie zaliczam:

Opracowanie metodyki instalowania przepływomierzy ultradźwiękowych z nakładanymi głowicami na rurociąg, w miejscu, w którym występuje zniekształcony rozkład prędkości z równoczesnym uzyskaniem zadawalającego wyniku pomiaru biorąc pod uwagę niepewność pomiaru (błąd graniczny).

Potwierdzenie za pomocą pomiarów z użyciem dopplerowskiego anemometru laserowego sensowności symulacji numerycznych, w których wykorzystano model turbulencji k-ε. Pozwoli to w niektórych przypadkach na opracowanie zaleceń instalowania głowic przepływomierza bez konieczności przeprowadzania pomiarów na obiekcie. Wyniki badań numerycznych mogą posłużyć do projektowania ultradźwiękowych przepływomierzy wielodrogowych dla danego charakteru zaburzenia.

Zbudowanie stanowiska badawczego, na którym mogą być badane różne elementy zakłócające przepływ i wyciągane wnioski dla różnych sytuacji pomiaru przepływu w warunkach przemysłowych.

Wybór przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi jako obiektu badań uważam za trafny, gdyż często potrzebny jest szybki, tani pomiar (bez konieczności korzystania z przewoźnego stanowiska wzorcowego) z nie koniecznie małą niepewnością wyniku pomiaru.

### **Uwagi krytyczne, dyskusyjne i szczegółowe**

1) We wstępie na str. 8 (wiersze 18, 19 od góry) Autor napisał, że dokładność pomiarowa powinna być jak największa przy założeniu jak najmniejszych kosztów inwestycyjnych. Moim zdaniem dokładność pomiaru powinna być zadawalająca ze względów technologicznych i ekonomicznych. Ponieważ na ogół im przyrząd jest bardziej dokładny, to więcej kosztuje, więc niepewność graniczna może być jak największa, byle spełniała wymagania technologa, a wtedy koszty będą najmniejsze. Na przykład do bilansowania i rozliczeń dokładność powinna być jak największa, natomiast, gdy wynik pomiaru służy tylko do kontroli jakiegoś parametru procesu niepewność graniczna może być większa. Ponieważ w warunkach przemysłowych przyrząd pomiarowy powinien pracować poprawnie przez jakiś okres czasu, ważne są też koszty eksploatacyjne, nie tylko inwestycyjne.

2) Rozdział 2 liczący 22 strony mógłby być podzielony na kilka podrozdziałów. Zawartość tego rozdziału jest przedstawiona logicznie – od wprowadzenia o zastosowaniach ultradźwięków, opisu rodzajów i rozchodzenia się fal ultradźwiękowych poprzez zasadę działania przepływomierza ultradźwiękowego badanego na stanowisku pomiarowym do wskazania możliwości powiększenia dokładności pomiaru w przepływomierzu wielodrogowym i podania zaleceń odnośnie instalowania urządzenia pierwotnego przepływomierza.

3) W instrukcji przepływomierza PortaFlow 330 napisano, że można wybrać rodzaj wielkości mierzonej (prędkość lub przepływ – strumień objętości). Jak rozumieć zapisaną na str. 46 dokładność wskazań od 0,5% do 2% odczytu prędkości dla  $v > 0,2$  m/s? Prędkość wskazywana przez przepływomierz jest prędkością średnią po przekroju rurociągu czy prędkością średnią po drodze fali ultradźwiękowej?

4) Jakie dane były wprowadzane do programu ANSYS przed obliczeniami. Czy uwzględniono chropowatość ścianki rurociągu i lepkość wody, która zależy od temperatury?

5) Str. 52 (w 10 g). Doktorant napisał „...aby współczynnik korekcyjny  $K^*$  był jak najmniejszy.” W dalszej części pracy są podane wyliczone wartości tego współczynnika i wynoszą one nieco ponad 1. Sądzę, że Autorowi chodziło o to, aby jak najmniej różnił się od 1. Moim zdaniem kąt instalacji głowic powinien być taki, aby dla spodziewanej zmiany strumienia objętości błąd pomiaru był jak najmniejszy. Jeśli wprowadza się stałą wartość  $K^*$  jako korektę wyniku pomiaru, to dla przepływu minimalnego błąd będzie np. ujemny, dla maksymalnego dodatni – lub odwrotnie. Chodzi o znalezienie takiego kąta instalowania głowic, aby dla spodziewanego zakresu zmian przepływu spełnić cel optymalizacji pomiaru (np. minimalny błąd całki przepływu, albo aby maksymalny błąd w całym zakresie pomiarowym był jak najmniejszy – może tu być brany pod uwagę błąd bezwzględny lub względny).

6) Czy Doktorant może podać krótko procedurę postępowania dla konkretnych warunków, gdy zostanie poproszony o jednorazowy pomiar strumienia objętości w określonym

miejscu, gdzie wiadomo, że wystąpi zaburzenie przepływu spowodowane łukiem hambur-  
skim. Jak zaprojektował by Doktorant badania, gdyby klient zlecił wyznaczenie charaktery-  
styki zaworu w całym zakresie jego otwarcia?

#### Uwagi szczegółowe

w i d – oznacza i-ty wiersz liczony od dołu strony (g – liczony od góry strony)

	jest	powinno być
str. 7 w 14 i 15 d	Lamego	Lamégo
str. 10 w 12 d	płyny	płynu
str. 10 w 2 d	określna	określany
str. 12 w 3 g	uśredniające	rurki uśredniające
str. 13 w 14 g	fale poprzeczna	fale poprzeczne
str. 14 w 5 g	jako macierzy	jako macierz
str. 14 w 1 d	naprężenia będącego	naprężenia wywołanego
	wywołanego	
str. 22 wzór 2.36 i 2.37	różniczka $dl$ powinna odnosić się do pierwszego składnika i być w liczniku ułamka pod całką ( $l$ we wzorze 2.36 jest niepotrzebne). Drugi składnik jest sumą czasów przejścia fali ultradźwiękowej w ścianie rurociągu i głowicach	
str. 24 w 3 g	stosowany w rurociągach	stosowany jest w rurociągach
str. 25 wzory 2.41, 2.42 i 2.43	całe wyrażenie pod całką powinno być w nawiasie i dopiero po tym nawiasie różniczka $dl$	
str. 26 wzór 2.53	$v(l) = v(D) \cdot D$	$v(l) = v(D)$
str. 34 w 7 d	$v_{MAX} = 2,05 \text{ m}^3/\text{h}$	$v_{MAX} = 2,05 \text{ m/s}$
str. 38 w 3 g	tzn. W warunkach	tzn. w warunkach
str. 40 w 12 d	indukowana	indukowaną
str. 49 w 7 d	ilości próbek	liczby próbek
str. 49 w 4 d	ilość próbek	liczba próbek
str. 50 w g (po prawej)	MH	MHz
str. 55 w 8 g	średnice	średnicę
str. 67 w 5 d	układają	układają
str. 115 w 9 g	przedstawiającymi	przedstawiającymi
str. 115 w 14 d	odmiana	odmianą
str. 115 w 11 d	kryterialna	kryterialną
str. 167 w 14 g	cieplno-przepływowych	cieplno-energetycznych
str. 168 w 1 d	Ultradźwiękowa	ultradźwięków
str. 169 w 11 g	ultradźwiękowego	ultradźwiękowego do
	do bezzakłuceniowego	bezzakłóceniowego
str. 169 w 14 15 g	Automatyka, 1988, 93	seria: Automatyka, z. 93, 1988
str. 170 w 10 d	Wpływ... Waluś ...	Waluś ... Wpływ ...
str. 174 w 2 d	Turzeniecka	Turzeniecka
str. 174 w 1 d	Wrocławskiej	Poznańskiej

W wielu miejscach Autor używa określeń „przy pomocy” i „rysunek przedstawia”. Powinno być: „za pomocą” i „przedstawiono na rysunku”.

### **Wnioski końcowe**

Praca jest zredagowana poprawnie i wskazuje zarówno na szeroką wiedzę Autora, jak i na umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Wyniki badań cząstkowych są czytelnie ilustrowane zarówno na wykresach rozkładów prędkości, jak i poprzez przedstawienie profili prędkości w średnicach rurociągu. Zbiorcze wyniki przedstawiono w dwóch tabelach i na dwóch wykresach (str. 165 i 166) w sposób pozwalający na łatwe wyciąganie wniosków.

Uwzględniając całość treści rozprawy doktorskiej, oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze i konstrukcyjne Doktoranta, oraz pewne drobne niedopracowania, mające charakter redakcyjny, stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Piotra Synowca pt. „Wpływ zaburzeń przepływu na charakterystyki przepływomierzy ultradźwiękowych z głowicami nakładanymi na rurociąg” spełnia wszystkie wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponieważ praca jest podsumowaniem całościowego, samodzielnego rozwiązania trudnego zagadnienia pomiaru strumienia cieczy w rurociągu w miejscu, gdzie występuje niekształcony rozkład prędkości, ma charakter implementacyjny, a cząstkowe osiągnięcia są udokumentowane dwudziestoma dwoma publikacjami (w tym publikacje współautorskie dwóch rozdziałów w książce „Methods and techniques of signal processing in physical measurements”, wydawnictwo Springer, 2019, oraz publikacje współautorskie w czasopismach Przegląd Elektrotechniczny i Elektronika (Warszawa)) wnoszę o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.



Stanisław Waluś