

**RECENZJA**  
**ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgra inż. Tomasza Świetlika**

**pt. „Analiza możliwości ultradźwiękowej tomografii dopplerowskiej”**

*Podstawę opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Świetlika stanowi zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziejzica (RDN-AEE/49/2022 z dnia 21 kwietnia 2022 roku).*

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Opieliński  
Dyscyplina naukowa: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

**I. Tematyka rozprawy**

W ramach rozprawy doktorskiej podjęto zagadnienia badań metod akwizycji danych pomiarowych i rekonstrukcji obrazów w zastosowaniu do metody tomografii dopplerowskiej w geometrii okrężnej.

Badania obejmowały trzy etapy. W ramach etapu pierwszego i drugiego: - najpierw przedstawiono opisy zasady działania tomografii dopplerowskiej i wyjaśniono podstawowe pojęcia, a następnie przeprowadzono symulacje (podstawową i zaawansowaną) rekonstrukcji obrazu za pomocą metody tomografii dopplerowskiej. W ramach etapu trzeciego przeprowadzona została rekonstrukcja obrazów wybranego rzeczywistego obiektu i w oparciu o uzyskane wyniki omówiono kierunki dalszych badań mających na celu rozwój metody tomografii dopplerowskiej w geometrii okrężnej.

Tomografia dopplerowska wykorzystuje zjawisko Dopplera w nietypowy sposób tj. korzysta z dwu-przetwornikowej głowicy ultradźwiękowej poruszającej się wzdłuż badanego obiektu, w zarejestrowanym sygnale wyznaczany jest sygnał dopplerowski (częstotliwości dopplerowskie) i taki sygnał stanowi podstawę do rekonstrukcji obrazów. Tomografia dopplerowska w geometrii okrężnej ma potencjalne duże możliwości zastosowania w medycynie przy badaniu nieruchomych obiektów (struktur kostnych lub tkanek).

W Katedrze Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Wrocławskiej od wielu lat z wielkim powodzeniem prowadzone są badania z zakresu analizy i przetwarzania sygnałów, ultradźwiękowych metod tomograficznego



obrazowania piersi. W szczególności wielkim osiągnięciem jest skonstruowany nowatorski tomograf ultradźwiękowy, który łączy w sobie możliwości diagnostyczne mammografii, USG i rezonansu magnetycznego. Ten tomograf ultradźwiękowy jest aktualnie wdrażany w badaniach medycznych, gdyż może zapewnić szybkie i tanie badania przesiewowe.

**Reasumując uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy zagadnień aktualnych i jednocześnie istotnych dla medycyny i stanowi naturalną rozszerzenie badań prowadzonych w Katedrze Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów Politechniki Wrocławskiej.**

## II. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Świetlika liczy 104 strony i składa się z 5 rozdziałów, bibliografii i dodatku A.

Na początku rozprawy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 zatytułowanym „Wprowadzenie” Autor przedstawił tezę pracy, zdefiniował zjawisko Dopplera wraz z jego zastosowaniem do pomiaru prędkości przepływu krwi w naczyniach krwionośnych oraz przedstawił metody tomografii dopplerowskiej w geometrii liniowej i geometrii okrężnej.

W rozdziałach 2 i 3, zatytułowanych odpowiednio „Podstawowa symulacja rekonstrukcji obrazu za pomocą metody DT” i „Zaawansowana symulacja rekonstrukcji obrazu za pomocą metody DT”, Autor przedstawił opis działania tomografii dopplerowskiej, wyjaśniając podstawowe pojęcia takie jak promień strefy obrazowania, maksymalna częstotliwość dopplerowska, pasma dopplerowskie, sygnał dopplerowski, sinogram i rekonstrukcja obrazu z użyciem algorytmu o nazwie filtrowany rzut wsteczny (FBP). Autor przedstawił również wyniki symulacji rekonstrukcji obrazu na podstawie wyliczonego sygnału pomiarowego – takie symulacje zostały wykonane z użyciem autorskiego programu działającego w środowisku LabView. Za pomocą tego programu Autor zbadał wpływ wybranych parametrów (ilość pasm dopplerowskich, liczba kątów akwizycji, liczba próbek, częstotliwość nadawanej fali ultradźwiękowej, częstość obrotu obiektu ...) na jakość obrazowania. Dodatkowo Autor zaprezentował dwa algorytmy pozwalające na znaczącą poprawę jakości uzyskanych obrazów – algorytm nakładkowania, algorytm dodatkowych zer.

W rozdziale 4 „Rekonstrukcja obrazu rzeczywistych obiektów za pomocą metody DT” przedstawiony jest opracowany i zbudowany układ pomiarowy do akwizycji danych pomiarowych niezbędnych do rekonstrukcji obrazu za pomocą metody tomografii dopplerowskiej. Omówiono funkcjonalność poszczególnych elementów, dzięki czemu wyeliminowano wiele zakłóceń na kolejnych rekonstrukcjach obrazu obiektu. Przedstawiono wyniki rekonstrukcji obrazu pręta dla optymalnych parametrów algorytmów poprawy obrazowania wypracowanych w trakcie badań przedstawionych w Rozdziale 3.

Oryginalne własne prace Autora są przedstawione w rozdziałach 2 - 4.

W rozdziale 5 zatytułowanym „Wnioski oraz możliwości wykorzystania metody tomografii dopplerowskiej” Autor przedstawia podsumowanie rozprawy z wyszczególnieniem oryginalnych i nowatorskich elementów, plany dalszych prac



mających na celu ulepszenie metody oraz możliwe zastosowania metody tomografii dopplerowskiej.

Spis literatury zawiera 16 pozycji bibliograficznych. Tę małą ilość Autor tłumaczy faktem, iż bardzo niewiele ośrodków na świecie zajmuje się badaniem tomografii dopplerowskiej.

W dodatku A zatytułowanym „Publikacje i osiągnięcia doktoranta” znajdują się zestawienia opublikowanych prac, opublikowanych rozdziałów w monografiach, wygłoszonych referatów i wykaz projektów naukowych, w których Autor uczestniczył.

### III. Teza, cel i zakres rozprawy

W rozprawie przyjęto następującą tezę: **„Istnieje możliwość wykorzystania ultradźwiękowej fali ciągłej i zjawiska Dopplera do zobrazowania metodą tomografii dopplerowskiej przekroju struktury obiektu zawierającej wtrącenia dobrze rozpraszające ultradźwięki. Opracowanie odpowiedniej metody pomiarowej, metody przetwarzania rejestrowanych dopplerowskich sygnałów ultradźwiękowych wraz z szybkim algorytmem rekonstrukcji obrazu pozwoli na zwiększenie rozdzielczości i jakości takiego obrazowania”**

W rozprawie nie zdefiniowano wprost celu i celów pośrednich, jakkolwiek analiza tezy oraz zakresu rozprawy wskazuje przyjęcie przez Autora następującego celu:

**wykorzystanie ultradźwiękowej fali ciągłej i zjawiska Dopplera do zobrazowania metodą tomografii dopplerowskiej przekroju struktury obiektu zawierającej wtrącenia dobrze rozpraszające ultradźwięki.**

oraz celów pośrednich:

- a) **opracowanie odpowiedniej metody pomiarowej,**
- b) **opracowanie metody przetwarzania rejestrowanych dopplerowskich sygnałów ultradźwiękowych,**
- c) **opracowanie szybkiego algorytmu rekonstrukcji obrazu zapewniającego zwiększenie rozdzielczości i jakości takiego obrazowania.**

realizowanych na etapach symulacji podstawowej, symulacji zaawansowanej i rekonstrukcji obrazów wybranego rzeczywistego obiektu.

Warto dodać, że w Rozdziale 5 na stronie 97 Autor pisze „Końcowym celem pracy nad tomografią dopplerowską jest powstanie urządzenia, które będzie umożliwiało uzyskanie dobrej jakości obrazu wtrąceń (rozdzielczość 0.5 mm).”

Zakres rozprawy doktorskiej stwarza możliwości realizacji celu (etapy realizacji tego celu są uszczegółowione poprzez podane cele pośrednie realizowane na etapach symulacji podstawowej, symulacji zaawansowanej i rekonstrukcji obrazów wybranego rzeczywistego obiektu) i umożliwi realizację postawionej tezy rozprawy doktorskiej.

**Teza postawiona w rozprawie doktorskiej jest właściwa i reprezentuje poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.**



#### IV. Uwagi ogólne i dyskusyjne

Układ rozprawy doktorskiej, stronę edycyjną, materiał ilustracyjny należy uznać jako prawidłowe. W sensie edycyjnym praca jest napisana starannie. Praca napisana jest poprawnym językiem polskim. Mankamentem jest niekompletny opis kilku rysunków: Rys. 4.1, Rys. 4.5 i Rys. 4.7 – w większości wyjaśnienia są zawarte w tekście pracy i wtedy jest to tylko niedogodność dla czytelnika. Na stronach 74 -75 odwołania do Rys.4.6 - 4.8 są faktycznie odwołaniami do Rys. 4.5 – 4.7.

Autor skupił się w rozprawie nad opisem elementów metody badawczej, nad wyszukiwaniem parametrów metody i nad wprowadzeniem modyfikacji zapewniających poprawę jakości obrazowania. Należy przyznać, że w tych obszarach jest twórczy i uzyskane wyniki są oryginalne i nowatorskie. W konsekwencji prowadzą one do uzyskania znacznej poprawy jakości obrazowania. Opisy te są bardzo szczegółowe i bardzo dobrze odzwierciedlają duży poziom wiedzy Autora w tych obszarach.

Jednocześnie, wielokrotnie Autor bardzo oszczędnie przedstawia opis zjawisk fizycznych np.: a) *streszczenie, wiersz 10 od dołu* „częstotliwość nadawania fali ultradźwiękowej”, b) *strona 13, wiersz 7 od góry* „najważniejsza jest składowa prędkości ruchu w kierunku propagacji fali ultradźwiękowej”, c) *strona 15, wiersz 2 od dołu* „ wtrącenia te rozpraszają falę ultradźwiękową jednakowo we wszystkich kierunkach dookoła”. Ponieważ z cytowanej literaturze znajdują się np. pozycje [2] i [13] jestem przekonany iż Autor posiada wiedzę o zjawiskach fizycznych, na które się powołuje

**U1) Proszę o bardziej szczegółowy opis zjawisk związanych ze sformułowaniami a) - c).**

W rozdziale 2 Autor przedstawia podstawową symulację rekonstrukcji trzech małych wtrąceń a, b i c na platformie obrotowej za pomocą metody tomografii dopplerowskiej, następnie w rozdziale 4 przedstawiona jest rekonstrukcja obrazu mosiężnego pręta. W rozdziale 5, Autor informuje o tym, że uzyskał obrazy od bardziej złożonych struktur.

**U2) Proszę o przeanalizowanie rekonstrukcji obrazu dla następujących struktur:**

- a) **struktura ma dwa zaburzenia zlokalizowane wzdłuż jednej ze średnic stolika obrotowego,**
- b) **struktura zawiera rozciągnięte zaburzenie zlokalizowane wzdłuż średnicy stolika obrotowego.**

W rozdziale 4.2, Autor bardzo szczegółowo omówił zaprojektowaną i wykonaną głowicę ultradźwiękową wykazując w szczególności, że głowica zapewnia propagację fali ultradźwiękowej generowanej przez głowicę w cały obszar obrazowania. Oczywiście wygenerowana fala ultradźwiękowa jest rozbieżna. Ten fakt oznacza, że dla pewnych punktów obrazowania generowane częstotliwości dopplerowskie będą różne od przyjętych w opisie zastosowanej metody.

**U3) Proszę o dokonanie oszacowań zmian, które zajdą w trakcie rekonstrukcji obrazu spowodowanych użyciem ultradźwiękowej głowicy nadawczej promieniującej wiązkę rozbieżną (nierównoległą).**



## V. Ocena merytoryczna

### V.1. Ocena merytoryczna rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Tomasz Świetlik sformułował tezę stanowiącą ważny problem naukowy prowadzący do powstania nowej metody badawczej o dużych możliwościach aplikacji, w szczególności w medycynie.

Do rozwiązania postawionego zagadnienia niezbędne jest posiadanie interdyscyplinarnej wiedzy z akustyki, elektroniki, metrologii, przetwarzania sygnałów i medycyny. Zadanie jakie postawił sobie Autor ma szczególny stopień trudności z uwagi na to, że w chwili obecnej nie istnieje żadne urządzenie działające w oparciu o metodę tomografii dopplerowskiej i badania nad tą metodą badawczą są prowadzone w niewielu ośrodkach na świecie. Autor wykazał się znajomością tej wiedzy i w przedstawionej do recenzji rozprawie uwzględnił 16 pozycji literaturowych, oraz prace własne: 4 prace opublikowane w czasopismach naukowych, 5 rozdziałów w monografiach i 9 wygłoszonych referatów.

Przedstawiona literatura przedmiotu zawierająca pozycje książkowe i aktualną literaturę czasopism światowych, pozwoliła Autorowi na postawienie tezy i systematyczne badania wykonane w trzech kolejnych etapach (rozdziały 2-4).

W pierwszym etapie badań (wyniki są zamieszczone w rozdziale 2), Autor najpierw przedstawił zasady rekonstrukcji obrazu w metodzie dopplerowskiej. Następnie opracował w środowisku LabView program umożliwiający przeprowadzenie symulacji obrazowania na podstawie wyliczonego sygnału pomiarowego (dla obiektu z trzema małymi wtrąceniami). W ramach analizy Autor przeprowadził badania wpływu liczby pasm dopplerowskich na rozdzielczość obrazu.

W drugim etapie badań (wyniki są zamieszczone w rozdziale 3) autor wypracował zaawansowaną symulację rekonstrukcji obrazu za pomocą metody dopplerowskiej mającą na celu wyznaczenie optymalnych parametrów opracowywanej metody dopplerowskiej. W pierwszej kolejności zidentyfikował wyzwania i problemy występujące przy rekonstrukcji obrazu na podstawie sygnału dopplerowskiego. Wprowadził parametr kątowy  $\alpha$  odpowiadający za długość sygnału dopplerowskiego dla poszczególnych kątów  $\varphi$  i w ten sposób wprowadził algorytm nakładkowania. Dzięki wykonanym pomiarom rozdzielczości i rozmycia dla symulacji zaawansowanej, znalazł związek pomiędzy wartościami parametru  $\alpha$  a rozdzielczością widma sygnału dopplerowskiego rejestrowanego przy różnych wartościach kąta  $\varphi$ . Autor przeprowadził również badania wpływu innych parametrów tj. częstotliwości sygnału nadawanego z głowicy ultradźwiękowej, częstości obrotu badanego obiektu i temperatury na jakość obrazowania. Autor wprowadził także algorytm dodatkowych zer i poprzez wprowadzony parametr  $z$  znalazł związek pomiędzy tym parametrem a jakością obrazowania w różnych strefach. Całość tych wszystkich badań, analiz i symulacji pozwoliła Autorowi na wyznaczenie optymalnych parametrów metody tomografii dopplerowskiej.

W trzecim etapie badań Autor przeprowadził weryfikację badań symulacyjnych na obiekcie rzeczywistym. W tym celu najpierw zaprojektował, zbudował i przebadął głowicę ultradźwiękową dedykowaną do metody tomografii dopplerowskiej, a następnie zaprojektował, zbudował i przebadał układ pomiarowy uzyskując znaczące ograniczenie zakłóceń. Wreszcie docelowo przeprowadził pomiary na



obiekcie rzeczywistym (metalowy pręt) i uzyskał zrekonstruowany obraz tego rzeczywistego obiektu.

W Rozdziale 5 widoczne jest, że Autor ma świadomość, iż zbudowana przez niego metoda tomografii dopplerowskiej obejmująca system oprogramowania oraz układ pomiarowy zamyka pewien etap w badaniach. Następnie, Autor przedstawia kierunki dalszych badań.

Za oryginalne i najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

- opracowanie kolejnych etapów symulacji obrazowania metodą tomografii dopplerowskiej: w podstawowej postaci, oraz z użyciem algorytmów poprawy rozdzielczości (w postaci nakładkowania i dodatkowych zer),
- opracowanie symulacji i przebadanie wpływu następujących parametrów na jakość obrazowania: liczby pasm dopplerowskich, parametru  $\alpha$ , liczby kątów rejestracji, częstotliwości sygnału nadawanego z głowicy ultradźwiękowej, częstości obrotu badanego obiektu, temperatury oraz wyznaczenie na tej podstawie optymalnych parametrów opracowywanej metody dopplerowskiej,
- zaprojektowanie, zbudowanie i przebadanie głowicy ultradźwiękowej dedykowanej do metody tomografii dopplerowskiej,
- zaprojektowanie, zbudowanie i przebadanie układu pomiarowego pozwalającego na ograniczenie zakłóceń,
- uzyskanie zrekonstruowanego obrazu rzeczywistego obiektu (metalowy pręt) i wykorzystanie w tym celu wcześniej określonych optymalnych parametrów.

Uwagi ogólne i dyskusyjne zawarte w rozdziale IV recenzji nie pomniejszają wartości rozprawy doktorskiej. Ich celem jest odpowiednio zwiększenie precyzji naukowych wypowiedzi Autora, oraz rozszerzenie opisów opracowywanej metody dopplerowskiej tak, aby docelowy opis uwzględniał występujące w rzeczywistości złożone warunki pomiarowe.

**Podsumowując stwierdzam, że uzyskane wyniki potwierdzają osiągnięcie przez Autora tezy rozprawy doktorskiej. Wyniki te stanowią poszerzenie wiedzy z zakresu wykorzystania zjawiska Dopplera do zbudowania nowej metody badawczej o dużych możliwościach aplikacyjnych. Autor wykazał się samodzielnością w zaplanowaniu i prowadzeniu badań naukowych mających interdyscyplinarny zakres.**

## V.2. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta

W dorobku Doktoranta znajduje się według Bazy Web of Science 5 prac, zaś według Bazy Scopus 6 prac (dostęp 21.06.2022):

- a) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie Archives of Acoustics (100 pkt. na liście MNiSW),
- b) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie Materials Science and Engineering B (70 pkt. na liście MNiSW),
- c) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie Vibrations in Physical Systems,
- d) dwie prace z międzynarodowych konferencji: 6<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup> International Conference on Information Technology in Biomedicine (ITIB) opublikowane jako dwa rozdziały w książkach serii: Advances in Intelligent Systems and Computing, (AISC, volume 762, 471, Springer International Publishing AG)



d) jedna praca z międzynarodowej konferencji: International Spring Seminar on Electronics Technology.

Wymienione pozycje są przypisane do dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, dlatego uzasadnione jest stwierdzenie, że jest to dobry dorobek.

## VI. Wniosek końcowy

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Świetlika w obecnej postaci nie wymaga poprawek ani uzupełnień. Rozprawa doktorska zawiera bogaty dorobek merytoryczny Autora w pełni wystarczający do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Mgr inż. Tomasz Świetlik przeprowadził symulacje (podstawową i zaawansowaną) rekonstrukcji obrazu za pomocą metody tomografii dopplerowskiej oraz rekonstrukcję obrazów wybranego rzeczywistego obiektu, wykazując się na każdym z tych etapów wiedzą i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

**Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Świetlika pod tytułem „Analiza możliwości ultradźwiękowej tomografii dopplerowskiej” spełnia wymagania ustawowe (z wyraźnym nadmiarem,), określone w ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. 30.08.2018 r. Poz. 1669) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Świetlika do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**



dr hab. inż. Franciszek Witos, prof. PŚ