



Rzeszów, dn. 9.03.2025 r.

prof. dr hab. inż. Wojciech Rdzanek
Uniwersytet Rzeszowski
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. S. Pigoń 1, 30-310 Rzeszów

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Nowaka
pt.: „Kształtowanie frontu fali za pomocą soczewek akustycznych”**

1. Przepisy prawne dotyczące nadania stopnia doktora

Recenzję wykonano na prośbę Pana Prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziejzica przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej. Recenzja została wykonana zgodnie z obowiązującymi przepisami zawartymi w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dziennik Ustaw z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami. W artykule 187 Ustawy zaznaczono, że przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Dodatkowo rozprawa doktorska powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca powinna zawierać streszczenie w języku angielskim. W dalszej części tej recenzji przedstawiona jest ocena spełnienia wymienionych warunków przyznania stopnia naukowego doktora.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Kandydat przedstawił do oceny rozprawę doktorską zatytułowaną: „Kształtowanie frontu fali za pomocą soczewek akustycznych”.

Rozprawa została wykonana w Politechnice Wrocławskiej pod kierunkiem Pana Prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobruckiego. Autor rozprawy jako dyscyplinę naukową wskazał Automatykę, Elektronikę, Elektrotechnikę i Technologie Kosmiczne.

Autor podejmuje tematykę projektowania i realizacji klasycznego przetwornika elektroakustycznego wyposażonego w tzw. soczewkę akustyczną, co ma na celu umożliwić kształtowanie pola akustycznego. W mojej ocenie prawidłowo wskazał dyscyplinę naukową, w której chciałby umieścić swoje wyniki naukowe.



3. Ocena pracy doktorskiej

3.1. Ocena układu rozprawy doktorskiej, wykorzystanego piśmiennictwa i celu pracy

Autor swoją pracę doktorską przedstawił w postaci rozprawy doktorskiej zawierającej 7 rozdziałów, wykaz oznaczeń, spis literatury, streszczenie w j. pol., streszczenie w j. ang., wykaz skrótów w j. ang., 40 rysunków oraz 2 tabele. Praca napisana jest zrozumiałym językiem z wykorzystaniem odpowiednio dobranej terminologii fachowej. W spisie bibliografii zawarto pozycje kluczowe dla problematyki pracy w postaci monografii oraz artykułów naukowych własnych oraz innych autorów.

Głównym celem ocenianej pracy doktorskiej jest zbadanie możliwości stworzenia i wykorzystania soczek akustycznych tak by możliwe było kształtowanie frontów falowych generowanych w polu akustycznym za pomocą przetwornika prostokątnego.

Autor postawił w pracy tezę według której „Jest możliwe stworzenie soczewki akustycznej pozwalającej na regulację krzywizn czoła fali w dwóch płaszczyznach, dla dowolnego kształtu źródła.”

Podjęta tematyka jest interesująca dotyczy bowiem możliwości udoskonalenia pola akustycznego wytwarzanego przez dostępne przetworniki elektroakustyczne poprzez wyposażenie ich w tzw. soczewkę akustyczną. W zamierzeniu Autora ma to umożliwić kształtowanie frontów falowych tak, by promieniowana wiązka akustyczna miała w przybliżeniu stałą szerokość w możliwie jak najszerszym przedziale częstotliwości słyszalnych. Należy dodać, że efekt taki jest trudny lub niemożliwy do osiągnięcia przy użyciu klasycznych przetworników.

Reasumując tę część oceny, układ i strukturę pracy, użyte piśmiennictwo uważam za prawidłowe. Cel pracy jest w pełni uzasadniony i pozwala na uzyskanie oryginalnych wyników naukowych.

3.2. Ocena wykorzystanych metod badawczych

Kandydat w swojej pracy do badania zjawiska modyfikacji frontów fali akustycznych przy pomocy soczewki wykorzystuje metodę symulacji komputerowej oraz metodę eksperymentalną.

Symulacje wykonane są przy użyciu metody elementów skończonych (MES) do symulacji pola akustycznego na bazie rozwiązywania równania falowego z warunkiem promieniowania fali na granicy obszaru zamkniętego powierzchnią o kształcie sferycznym. Otrzymane wyniki teoretyczne pokazały, że możliwe jest kształtowanie frontów falowych drgającej membrany



głośnika przy pomocy badanej soczewki akustycznej. Po przejściu fali płaskiej przez soczewkę fronty falowe stawały się bardziej wypukłe dla wszystkich analizowanych częstotliwości w oparciu o założony model teoretyczny.

Przeprowadzone następnie badania eksperymentalne wymagały zaprojektowania i zrealizowania badanej soczewki akustycznej, doboru toru akustycznego oraz toru pomiarowego, w tym głośnika, wzmacniacza, generatora sygnału akustycznego oraz odpowiednio dobranego mikrofonu do pomiarów pola akustycznego. Wykorzystanie okna czasowego o odpowiednio dobranej szerokości pozwoliło na wyeliminowanie wpływu fal odbitych na odpowiedź impulsową bez wykorzystania komory bezechowej do pomiarów. Jest to metoda tzw. „symulowanego pola swobodnego” zgodna z normą PN-EN 60268-5 z kwietnia 2005 r.

W pracy uzyskano zadowalającą zgodność wyników teoretycznych i pomiarowych. Jest to istotne, ponieważ pomiary pola akustycznego są czasochłonne i co z tego wynika liczba punktów pomiarowych jest mocno ograniczona w porównaniu do liczby węzłów wykorzystanych do obliczeń w metodzie MES. Jednakże uzyskana zgodność z wynikami teoretycznymi pozwala nie tylko na aproksymację, ale również na wnioskowanie, iż uzyskane wyniki teoretyczne dają dobre przybliżenie pola w całym symulowanym obszarze sferycznym zamykającym soczewkę.

Można zaobserwować dużą dbałość zarówno w planowaniu jak i realizacji badań doświadczalnych. Starannie dobierano mikrofony i ich kalibratory, wzmacniacze sygnałów akustycznych, realizacja stanowiska pomiarowego, okna czasowe w celu wyeliminowania wpływu fal odbitych od ścian pomieszczenia, itp. Generalnie pomiary takie są żmudne i wymagają dużego zacięcia naukowego. Pewien niedosyt budzi jedynie nieco skąpy opis samego stanowiska pomiarowego. Opis ten mógłby być bardziej obszerny i niewątpliwie byłby interesujący.

Reasumując tę część oceny pracy można powiedzieć, że otrzymane wyniki teoretyczne i doświadczalne pozwoliły na realizację jej celu pracy oraz potwierdzenie wcześniej postawionej tezy pracy.

3.3. Ocena omówienia wyników badań oraz ich oryginalności

Zaproponowana metoda kształtowania frontów falowych na bazie klasycznego przetwornika elektroakustycznego wyposażonego w soczewkę akustyczną umożliwia uzyskanie praktycznie dowolnego kształtu frontu falowego zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej przetwornika akustycznego. Efekt taki uzyskano na bazie przetwornika o geometrii prostokątnej



i w przybliżeniu równomiernym rozkładzie prędkości drgań na całej jego powierzchni. Przy powierzchni drgającego przetwornika umieszczono soczewkę akustyczną w postaci macierzy falowodów o długościach rosnących w miarę oddalania się od środka przetwornika do jego obrzeża. Zróżnicowanie długości falowodów pozwoliło modyfikować czasy opóźnień fal akustycznych docierających do wylotów poszczególnych elementów macierzy. Wypadkowy front falowy jest przy tym superpozycją fal promieniowanych przez poszczególne wyloty falowodów. Pozwala to na fizyczną emulację soczewki akustycznej. W przedstawionej soczewce długości falowodów są z góry ustalone, podobnie jak czasy opóźnień. Oznacza to, że przesunięcia fazowe na wylotach falowodów będą zmieniać się wraz ze zmianami częstotliwości. Tym samym kształt frontów falowych również będzie ulegał zmianie. Jest to niewątpliwie słaba strona przedstawionego rozwiązania. Natomiast mocną jego stroną jest duża prostota oraz niewygórowany koszt wykonania soczewki. Należy wspomnieć, że wykorzystanie matrycy niezależnie sterowanych przetworników (np. w postaci głowicy ultrasonografu) z jednej strony dawałoby znacznie większe możliwości kształtowania frontów falowych, a z drugiej znacznie większy byłby stopień komplikacji, sterowania oraz kosztu wykonania lub zakupu takiego wielokanałowego przetwornika. Przy pomocy analizowanej soczewki uzyskano efekt modyfikacji promienia krzywizny promieniowanych frontów falowych. Matematycznie macierz czasów opóźnień jest wyrażona przy pomocy tzw. macierzy transformujących. Umożliwia to poprzez odpowiedni dobór macierzy transformującej, uzyskanie frontu falowego płynnie przechodzącego z wycinka powierzchni cylindrycznej do wycinka powierzchni kulistej. Dodatkowo w wyniku wykorzystania zaprojektowanej soczewki zwiększeniu uległa powierzchnia efektywnie promieniująca fale akustyczne, co powinno być korzystne w zakresie niskich częstotliwości.

Przeprowadzone symulacje pola akustycznego wykazały, że fronty falowe ulegają zakrzywieniu poprzez odpowiednio dobrane opóźnienia w macierzy falowodów soczewki. W efekcie, w polu bliskim uzyskano rozproszenie w przedziale wysokich częstotliwości. Natomiast w polu dalekim uzyskano wiązkę o w przybliżeniu stałej szerokości w szerokim przedziale częstotliwości. Przetwornik pozwala na niezależne kształtowanie wiązki falowej w obu wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Uzyskane wyniki można wykorzystać dla przetwornika o dowolnym kształcie poprzez odpowiednio zaprojektowaną soczewkę. Badana soczewka akustyczna spełnia swoją rolę dla częstotliwości wyższych od częstotliwości odcięcia, która zależy od rozmiarów geometrycznych matrycy soczewki. Z praktycznego punktu widzenia jest to korzystne, gdyż przetwornik może mieć mniejsze rozmiary i dowolny kształt.



Na podkreślenie zasługuje bogaty zestaw możliwych do przeprowadzenia dalszych badań, gdzie istotną rolę będzie odgrywać modelowanie teoretyczne soczewek przy pomocy MES z wykorzystaniem stacji o odpowiednio dużej mocy obliczeniowej.

Reasumując, Autor, poprzez przeprowadzone prace badawcze, w pełni zrealizował cel pracy swojej doktorskiej oraz dowiódł postawionej tezy. Przedstawione wyniki dotyczące możliwości kształtowania frontów falowych przetworników przy pomocy soczewki akustycznej w całym obszarze analizowanego pola akustycznego w szerokim przedziale częstotliwości słyszalnych można uznać za w pełni oryginalny wkład Kandydata do dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

3.4. Ocena dotycząca ogólnej wiedzy Kandydata w dyscyplinie oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Analizując przedstawioną do oceny rozprawę doktorską można stwierdzić, że Kandydat umiejętnie korzysta z danych literaturowych, dobiera odpowiednie metody badawcze oraz prawidłowo i z powodzeniem je stosuje. W efekcie pozwala mu to na realizację celu pracy oraz udowodnienie postawionej tezy.

Wyniki swoich badań przedstawia w przejrzysty i czytelny sposób oraz prawidłowo wyciąga wnioski cząstkowe i końcowe. Można więc uznać, że jest przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

3.5. Informacje na temat praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników

Możliwe jest potencjalne wykorzystanie praktyczne przedstawionej soczewki akustycznej do poprawy właściwości akustycznych już istniejących i dostępnych w sprzedaży przetworników elektroakustycznych. Pozwoli to na poprawę wytwarzanego pola akustycznego poprzez kształtowaniu frontu falowego, tak by miał on pożądany kształt w całej objętości nagłaśnianego obszaru. Możliwe będzie również uzyskanie wiązki akustycznej o w przybliżeniu stałej szerokości w szerokim przedziale częstotliwości słyszalnych.

3.6. Uwagi krytyczne, dyskusyjne i polemiczne

Uwagi dotyczące strony redakcyjnej ocenianej pracy doktorskiej:

- Str. V: Zamiast „normalne przyspieszenie” powinno być „składowa normalna przyspieszenia”.
- Str. V: Zamiast „kierunek fali” powinno być „wektor jednostkowy normalny do czoła fali”.



- Str. V: natężenie dźwięku jest wielkością falową, czyli symbol I może oznaczać wartość bezwzględną natężenia dźwięku.
- Str. V: Prędkość jest wielkością wektorową, stąd symbol v_n może oznaczać składową normalną prędkości do wybranej powierzchni.
- Wzór 2.1: Użycie symbolu „ t ” na oznaczenie grubości soczewki jest nieco mylące. Zwykle małe „ t ” oznacza zmienną czasu.
- Wzór 3.1: Wzór przedstawia moduł amplitudy ciśnienia akustycznego, nie ciśnienie akustyczne, gdyż nie zawiera zależności od czasu, ani fazy początkowej.
- Wzór 3.2: Mimo iż w pracy zależność od czasu jest pominięta, można było podać w tekście tę na początku analizy. Z postaci wzoru wynika, że dla fal rozchodzących się od źródła jest to funkcja $\exp(-j \omega t)$, czyli wielkość sprzężona tej przyjmowanej np. w Comsolu.
- Str. 17, rozdz. 3.6: Pierwsze zdanie zaczyna się od „Aby”.
- Str. 17, tekst przed równaniem 3.3: „Definiuje się g_0 ” dotyczy propagacji ciśnienia akustycznego. Powinno być „Pole akustyczne opisuje się równaniem...”
- Równanie 3.4: Równanie to przedstawia niejednorodny warunek brzegowy Neumanna, a nie równanie falowe.
- Równania 3.3–3.6: Wielkość oznaczona jako „ q_d ” jest wektorem, podobnie jak gradient ciśnienia akustycznego w tych równaniach.
- Równanie 3.6, wykaz oznaczeń: Zarówno „ x ” jak i „ r_o ” są wielkościami wektorowymi, co powinno być zaznaczone strzałką nad tymi symbolami lub użyciem wytłuszczonej czcionki, w zależności od przyjętej konwencji.
- Tab. 5.1: W ostatniej linii powinno być „liczba pomiarów” zamiast „ilość pomiarów”.
- Wzór 6.1: Nie podano podstawy logarytmu.
- Po wzorze 6.2: W tekście jest odwołanie do tabeli nr 5, powinno być do tab. 6.1.
- Tekst przed wzorem 6.4: Zamiast „efektywnego ciśnienia akustycznego p_{rms} ” powinno być „wartość skuteczna ciśnienia akustycznego p_{rms} ”.
- Wzór 6.4: Natężenie dźwięku jest wielkością wektorową. Przedstawiona wielkość to wartość bezwzględna tego wektora.
- W tekście przed wzorem 6.7: Zamiast „średniej kwadratowej ciśnienia akustycznego” powinno być „średniego kwadratu ciśnienia akustycznego”.
- Wzory 6.7 i 6.9: Do oznaczenia ciśnienia akustycznego należało użyć, tak jak wcześniej, małej litery „ p ” zamiast greckiej litery „ ρ ”.
- Str. 42: Zamiast „(Tabel 6.1)” powinno być „(Tabela 6.1)”.



- Wzór 6.10: Przydatny byłby rysunek przedstawiający przyjętą konwencję współrzędnych sferycznych, zależności pomiędzy użytymi współrzędnymi sferycznymi i prostokątnymi oraz usytuowanie przetwornika względem odpowiednich układów współrzędnych.

Jednocześnie chciałbym zaznaczyć, iż wymienione uwagi nie umniejszają wartości ocenianej rozprawy doktorskiej.

4. Podsumowanie i konkluzja oceny

Mgr. inż. Tomasz Nowak w swojej rozprawie doktorskiej zatytułowanej „**Kształtowanie frontu fali za pomocą soczewek akustycznych**” przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wykazał się wiedzą ogólną w dyscyplinie naukowej **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne** oraz posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. **Oceniam pozytywnie Jego rozprawę doktorską** i stwierdzam, że spełnia ona warunki i wymagania stawiane w przewodach doktorskich, określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dziennik Ustaw z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami). **Wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony tej pracy.**

(podpis recenzenta)

