**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

Rzeszów, dn. 14.06.2022 r.

prof. dr hab. inż. Wojciech Rdzanek
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
Uniwersytet Rzeszowski, ul. Prof. S. Pigonia 1, 30-310 Rzeszów

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 21.06.2022
nr 15 zał. .....

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Chrapońskiej pt.: „Noise and vibration reduction of a device enclosed in a thin-walled casing with the use of structural interactions"**

## 1. Sylwetka doktorantki

Mgr inż. Anna Chrapońska jest absolwentką kierunku Automatyka i Robotyka o specjalności systemy pomiarowe na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskała w 2017 r. Ubiega się o nadanie stopnia naukowego doktora po raz pierwszy. Przebieg pracy zawodowej:

- 08.2015-04.2016: Rockwell Automation, Katowice, stażysta-młodszy inżynier ds. testów oprogramowania wbudowanego
- 10.2016-12.2017: Intel Technology Poland, Gdańsk, stażysta-inżynier ds. oprogramowania
- 01.2018-02.2018: Alteris S.A., Katowice, specjalista ds. jakości oprogramowania.
- 03.2018-02.2021: udział w projekcie badawczym NCN OPUS 13 realizowanym w Instytucie Automatyki, na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechniki Śląskiej.
- 03.2021-12.2021: Amazon EU SARL Sp. z o. o., w Warszawie, stażysta ds. rozwoju oprogramowania, praca zdalna.
- 01.2022-obecnie: Amazon EU SARL Sp. z o. o., w Warszawie, inżynier ds. rozwoju oprogramowania, praca zdalna.
- 2018-2022: w Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, działalność dydaktyczna.

## 2. Przepisy prawne dotyczące nadania stopnia doktora

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z dn. 8 kwietnia 2022 r. Recenzja została wykonana zgodnie z obowiązującymi przepisami zawartymi w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce,

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

Dziennik Ustaw z 2018 r. poz. 1668. W rozdz. 2 Ustawy art. 186 napisano, że stopień naukowy doktora nadaje się osobie, która posiada tytuł zawodowy magistra inżyniera, posiada w dorobku co najmniej jeden artykuł naukowy oraz przedstawiła i obroniła rozprawę doktorską. Kandydatka spełnia te warunki. W artykule 187 zaznaczono, że przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Dodatkowo rozprawa doktorska powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W dalszej części tej recenzji przedstawiona jest ocena spełnienia wymienionych warunków przyznania stopnia naukowego doktora.

## 3. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

**Kandydatka przedstawiła do oceny rozprawy doktorską zatytułowaną: „Noise and vibration reduction of a device enclosed in a thin-walled casing with the use of structural interactions" (j. pol. „Redukcja hałasu i drgań urządzenia zamkniętego w cienkościennej obudowie z wykorzystaniem oddziaływań strukturalnych").**

Oceniana praca doktorska została wykonana w Katedrze Pomiarów i Systemów Sterowania na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Marka Pawełczyka, Prorektora ds. Nauki i Rozwoju Politechniki Śląskiej. Niezbędne prace badawcze zostały przeprowadzone w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki zatytułowanego „Modelowanie, optymalizacja i sterowanie dla celów strukturalnej redukcji hałasu urządzeń", nr DEC-2017/25/B/ST7/02236. Praca liczy łącznie 137 stron i jest napisana w języku angielskim. Składa się ze streszczenia w języku angielskim oraz w języku polskim, spisu treści, spisu oznaczeń, spisu tabel, spisu rysunków, 5 rozdziałów, wykazu 155 pozycji bibliograficznych, indeksu, 67 rysunków oraz 25 tabel.

Autorka podejmuje w pracy doktorskiej problematykę aktywnej redukcji drgań i hałasu obudowy cienkościennej z wykorzystaniem oddziaływań ośrodkiem i strukturą w zakresie niskich częstotliwości. Są to zagadnienia istotne, gdyż otrzymane wyniki pozwalają na poprawę jakości klimatu akustycznego w miejscach pracy, obiektach mieszkalnych oraz w środkach transportu. Jest to szczególnie ważne w sytuacjach, gdy wykorzystanie metod pasywnych jest nieefektywne lub zbyt drogie. Wykorzystanie metod aktywnych lub semi-aktywnych pozwala wtedy na osiągnięcie wymaganej sprawności redukcji hałasu lub na obniżenie jej kosztów.

W rozdziale pierwszym krótko wprowadza w problematykę redukcji drgań i hałasu. Przedstawia główne różnice, wady i zalety oraz obszary zastosowań praktycznych metod pasywnych, aktywnych i semi-aktywnych. Wyjaśnia, że głównym celem prowadzonych prac

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

naukowych jest obniżenie ekspozycji na drgania i hałas w środowisku. Następnie omawia możliwości tłumienia przenoszenia dźwięku przy użyciu struktur jedno- i dwu-panelowych. Wspomina o zjawisku rezonansu poduszki powietrznej w przypadku struktur dwu-panelowych, które może wpływać na pogorszenie tłumienia fali transmitowanej. Aby temu zaradzić Autorka wprowadza dodatkowe sprzężenia mechaniczne bądź elektro-mechaniczne pomiędzy obydwoma panelami.

Kandydatka wyjaśnia następnie, że zagadnienie redukcji drgań i hałasu obudowy cienkościennej zawierające źródło hałasu wciąż nie jest wystarczająco przebadane. Zwykle są to obudowy jednopanelowe. Natomiast w przypadku obudów dwupanelowych wciąż wiele praktycznych problemów pozostaje nierozwiązanych. Dodatkowo badania takie są prowadzone zwykle w warunkach pola swobodnego czyli w komorze bezechowej. W rzeczywistych warunkach zaś zwykle mamy do czynienia z falami odbitymi, np. od ścian naroża dwu- lub trójściennego. Wtedy fale bieżące i odbite interferują tworząc fale stojące. Autorka prowadzi większość swoich badań właśnie w takich rzeczywistych warunkach.

**Głównym celem ocenianej pracy doktorskiej jest wykorzystanie oddziaływań strukturalnych do redukcji drgań i hałasu pochodzącego od pracującego urządzenia zamkniętego w obudowie cienkościennej.**

**Autorka sformułowała następującą tezę: "Wybrane oddziaływania w strukturze dwupanelowej, lub pomiędzy panelami obudowy urządzenia a powierzchniami odbijającymi pomieszczenia, mogą zostać wykorzystane w celu poprawy własności wibroakustycznych obudowy, a w konsekwencji – redukcji emitowanych drgań i hałasu."**

**W rozdziale drugim** Autorka przedstawia stanowiska laboratoryjne wykorzystane w badaniach doświadczalnych. Pierwsze stanowisko zawiera źródło hałasu zamknięte w obudowie cienkościennej w pobliżu naroża dwu- lub trójściennego. W tym przypadku cienkie płyty są ze sobą połączone bezpośrednio bez dodatkowych elementów usztywniających. W rezultacie otrzymujemy obudową lekką i względnie prostą w wykonaniu.

Drugie stanowisko zawiera również źródło hałasu. Jest ono jednak zamknięte w obudowie ze ściankami utwierdzonymi do sztywnej ramy. W tym przypadku cienkie płyty są mocowane do specjalnej ramy przy pomocy połączeń śrubowych. Taka obudowa jest wprawdzie znacznie cięższa i bardziej złożona w porównaniu do poprzedniej. Zapewnia jednak szereg korzyści z punktu widzenia metod redukcji drgań i hałasu wykorzystywanych przez Autorkę pracy. Można tu wyliczyć łatwość określenia warunków brzegowych cienkich płyt oraz możliwość mocowania do sztywnej ramy dodatkowych czujników oraz elementów wykonawczych. Można również

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

oddzielić poduszki powietrzne występujące pomiędzy poszczególnymi parami równolegle ułożonych cienkich płyt i łatwiej zamodelować drgania powietrza pomiędzy takimi płytami.

Następnie Autorka przedstawia wykorzystane wzbudniki elektromagnetyczne, sondy ciśnienia akustycznego, czujniki drgań oraz cewki wykorzystywane do sprzężeń elektromagnetycznych drgań w panelach dwupłytowych rozdzielonych warstwą powietrza.

**Rozdział 3 dotyczy oddziaływań strukturalnych** pomiędzy źródłem hałasu oraz obudową wykonaną z paneli. Autorka przedstawia podstawy akustyki obszarów zamkniętych, a więc o ograniczonych rozmiarach i kształtach. Definiuje współczynnik pochłaniania, impedancję akustyczną ściany. Omawia wykorzystanie materiałów dźwiękochłonnych do niwelowania występowania efektu fali stojącej. Przedstawia wpływ usytuowania obudowy cienkościennej urządzenia względem ścian naroża na wytwarzane pole akustyczne oraz na możliwość redukcji ciśnienia akustycznego. Przedstawia warunki wykorzystania wzbudników do redukowania amplitudy fali stojącej w przestrzeni pomiędzy obudową, a ścianą naroża. Największą sprawność takiej redukcji zaobserwowała w sytuacji, gdy odległość ta jest mniejsza od 1/6 długości promieniowanej fali akustycznej.

Dalej Autorka omawia wykorzystane tzw. ścieżki pierwotne i wtórne. Określenia te dotyczą mierzonych sygnałów akustycznych pozwalających uformować sygnał błędu niezbędny do prawidłowego układu redukcji drgań i hałasu. **Przez ścieżkę pierwotną rozumiemy tu przejście sygnału od mikrofonu referencyjnego umieszczonego wewnątrz obudowy do mikrofonu błędu umieszczonego na zewnątrz tej obudowy. W przypadku ścieżki wtórnej jest to przejście sygnału od wejścia sterującego wzbudnikiem drgań do mikrofonu błędu.** Należy tu dodać, że taki układ zawiera algorytm, który można traktować jako układ regulacji automatycznej. Wielkością minimalizowaną jest w tym przypadku sygnał błędu otrzymany jako iloraz widma ciśnienia akustycznego z tzw. mikrofonu błędu umieszczonego na zewnątrz obudowy cienkościennej oraz ciśnienia akustycznego mikrofonu referencyjnego umieszczonego wewnątrz tej obudowy oraz w bezpośrednim sąsiedztwie źródła niepożądanych fal akustycznych czyli hałasu. Następnie przebadano doświadczalnie skończoną odpowiedź impulsową dla ścieżki pierwotnej pomiędzy mikrofonem referencyjnym i mikrofonem błędu. Uwzględniono sygnał mikrofonu błędu dla różnych położeń względem obudowy oraz ścian naroża. Długość pamięci filtru wynosiła 512 próbek przy częstotliwości próbkowania równej 2 kHz. Pomiary wykonywano dla częstotliwości poniżej 500 Hz. Pamięć taka jest względnie krótka. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że algorytm regulacji automatycznej działa w czasie rzeczywistym, jest to uzasadnione. Podczas tych pomiarów Autorka zwróciła uwagę na występowanie sprzężenia amplitudy i fazy

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

drgań wzajemnie równoległych par paneli. Zjawisko to występuje dla częstotliwości rezonansowych układ złożonego z dwóch równoległych płyt oraz poduszki powietrznej, kiedy płyty równoległe drgają ze zbliżonymi amplitudami w fazie lub w przeciwnej fazie. W przypadku drgań rezonansowych o zgodnej fazie, obserwuje się wtedy obniżenie ciśnienia akustycznego w obszarze poduszki powietrznej. Powietrze ulega głównie przesunięciu w kierunku normalnym do powierzchni płyt. Natomiast dla drgań rezonansowych o przeciwnej fazie obserwuje się nawet znaczny wzrost ciśnienia akustycznego w powietrzu w obszarze poduszki powietrznej. Jest to związane z cykliczną kompresją lub dekompresją powietrza. Obserwacja doświadczalna tego zjawiska może być utrudniona ze względu na superpozycję fal pochodzących z 3 wzajemnie prostopadłych par płyt. Zaobserwowano spadek amplitudy odpowiedzi impulsowej układu dla wybranych odległości panelu od ściany naroża.

Przedstawiono różnice oraz wady i zalety aktywnej redukcji hałasu przy pomocy dodatkowych głośników oraz przy pomocy aktuatorów mocowanych bezpośrednio na panelach obudowy. W pierwszym przypadku redukcja drgań i hałasu jest realizowana za pośrednictwem wytwarzanych dodatkowych fal akustyczny. Wykorzystuje się tu zjawisko superpozycji fal akustycznych. W drugim przypadku mamy do czynienia ze strukturalną redukcją drgań i w konsekwencji również z redukcją amplitudy promieniowanych fal akustycznych.

Omówiono działanie algorytmu sterowania w układzie redukcji drgań i hałasu. Jest on oparty filtracji X najmniejszych średnich kwadratów (ang. Filtered-X Least Mean Squares). Algorytm ten wykorzystuje zarówno sygnały uzyskane ze ścieżki pierwotnej jak i wtórnej. Możliwe jest wykorzystanie sygnałów czujników z wielu wejść oraz wypracowanie sygnałów sterujących dla wielu wyjść do urządzeń wykonawczych.

Przedstawiono wykorzystane stanowiska do badań eksperymentalnych. W przypadku obudowy cienkościennej głównym źródłem hałasu był głośnik umieszczony wewnątrz obudowy. Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest możliwość imitowania wcześniej zarejestrowanych odgłosów pochodzących z różnorodnych maszyn. Możliwe jest również wykorzystanie sygnałów stochastycznych lub z przemiataniem częstotliwości. Stanowisko laboratoryjne zostało skonstruowane w pobliżu realistycznych ścian odbijających fale akustyczne. Na panelach umieszczono wzbudniki elektromagnetyczne umożliwiające sterowanie ich drganiami.

Sporo uwagi poświęcono wyborowi rozmieszczenia mikrofonów błędu oraz aktuatorów ze względu na uzyskanie jak największej redukcji drgań i hałasu. Jest to istotne, gdyż

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

w realistycznych warunkach pola pogłosowego należy się liczyć z występowaniem węzłów i strzałek amplitudy ciśnienia akustycznego. Już we wstępnych badaniach uzyskano redukcję ciśnienia akustycznego średniej ze wszystkich mikrofonów minimum 20 dB w przedziale częstotliwości od ok. 75 Hz do 180 Hz. Dalsze prace nakierowane były na taką optymalizację całego układu sterowania, aby zwiększyć redukcję hałasu oraz poszerzyć zakres niskich częstotliwości, gdzie taka redukcja jest możliwa.

Dalej przedstawiono analizę eksperymentalną wydajności układu aktywnej redukcji drgań i hałasu. Na wejście głośnika będącego źródłem hałasu podawano sygnał monochromatyczny z przedziału od 1 do 350 Hz z krokiem 5 Hz. Dla każdej próbki przeprowadzono 60 sekundowy eksperyment podczas którego mierzono sygnały zarówno z włączonym jak i wyłączonym układem sterowania. Następnie przebadano redukcję hałasu dla różnych odległości obudowy od ściany naroża. Generalnie największą redukcję rzędu 20 dB lub więcej uzyskano w przedziale częstotliwości od 100 do 200 Hz. Natomiast w cały analizowanym przedziale częstotliwości występują maksima i minima.

Wyniki z tej części pracy zostały podsumowane wnioskami. Można stwierdzić, że uzyskano nowatorskie rozwiązanie redukcji hałasu w warunkach realistycznych tj. w pobliżu naroża złożonego ze ścian o względnie dużym współczynniku odbicia. Ponieważ zwykle zachowanie takich układów jest badane w warunkach minimalnego wpływu fal odbitych, więc w warunkach rzeczywistych sprawność redukcji hałasu może ulec obniżeniu. Autorka tak zaprojektowała swój układ, że uzyskała dużą sprawność redukcji hałasu w polu akustycznym bogatym w fale odbite.

**W rozdziale czwartym** omówiono oddziaływania pomiędzy panelami struktur dwupanelowych. W tym przypadku układy par paneli zamocowanych do sztywnej ramy zostały wykorzystane do tłumienia fal akustycznych pochodzących od źródła hałasu umieszczonego wewnątrz obudowy. Układ dwupanelowy zamocowano na jednej ze ścian ramy. Na pozostałych ścianach umieszczone panele ze sklejki oraz materiału dźwiękochłonnego tak by zapewnić izolację akustyczną. W rezultacie otrzymano obudowę sześcienną, wewnątrz której umieszczono źródło hałasu. Zamocowanie układu dwóch paneli równoległych do jednej ze ścian sztywnej ramy pozwoliło na wykorzystanie aktywnych połączeń pomiędzy panelami. Połączenia zrealizowano wykorzystując tzw. zawory elektromagnetyczne, których działanie jest oparte na zmianie pola magnetycznego w cewce wskutek zmian przepływającego przez nią cewkę. Wprowadzono więc dodatkowe oddziaływania sterujące pomiędzy panelami przez wprowadzenie sił skupionych.

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

Z zasady działania zaworu elektromagnetycznego wynika, że sterując prądem cewki można zmieniać amplitudy sił. Zawór taki jest więc wygodnym elementem wykonawczym układu sterowania drganiami pary paneli. Przebadano doświadczalnie zachowanie wibroakustyczne z jednym połączeniem aktywnym umieszczonym centralnie oraz z pięcioma połączeniami. Sprawdzono czy układ z pojedynczym połączeniem pozwoli równie skutecznie redukować drgania co układ z pięcioma połączeniami przyłożonymi w różnych punktach na panelach. Zawory elektromagnetyczne sterowane były poprzez modulację szerokości impulsu (ang. pulse width modulation). Oba panele miały różne grubości, tak aby uniknąć zachodzenia na siebie ich częstotliwości rezonansowych, a ich krawędzie zostały zamocowane sztywno do ramy. Prędkość drgań zmierzono na siatce punktów przy pomocy wibrometru laserowego. Dodatkowo przeprowadzono analizę postaci drgań paneli przy pomocy metody elementów skończonych. Pozwoliło to określić rozkład linii węzłowych na panelach dla kilku najniższych częstotliwości rezonansowych. Tym samym możliwe było takie rozmieszczenie punktów przyłożenia sił, aby nie przypadały one na linie węzłowe.

Ponadto Kandydatka rozpatrzyła równanie drgań własnych cienkiej płyty stalowej z uwzględnieniem masy zaworów. W tym celu wykorzystała model masy skupionej. Pozwoliło Jej to uzyskać przybliżone wartości częstotliwości rezonansowych oraz przebieg linii węzłowych na płycie, a tym samym poprawnie rozlokować punkty zamocowania zaworów do płyty.

W dalszej pracy przeanalizowała postaci drgań oraz częstotliwości własne paneli ortotropowych. Następnie zdefiniowała utratę przenoszenia dźwięku (ang. sound transmission loss) przez cienką nieograniczoną płytę. Współczynnik transmisji dźwięku przez płytę o skończonych rozmiarach definiuje jako iloraz części rzeczywistej uśrednionej w czasie mocy akustycznej fali promieniowanej przez płytę na zewnątrz obudowy oraz mocy akustycznej fali padającej na powierzchnię wewnętrzną płyty. Następnie przeanalizowała analitycznie moc akustyczną czynną promieniowaną przez drgający panel w płaskim sztywnym i nieskończonym ekranie.

Wykorzystała również techniki uczenia maszyn do prognozowania utraty transmisji dźwięku przez panel dwupłytowy. Osiągnęła tą metodą dobrą zgodność przewidywań symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi. Przeprowadziła badania eksperymentalne widma układu dwóch paneli równoległych z pojedynczym zaworem elektromagnetycznym oraz z pięcioma takimi zaworami. Zauważyła, że przyłożenie napięcia do zaworu nie powoduje istotnych zmian

częstotliwości rezonansowych układu. W przypadku układu z pięcioma połączeniami aktywnymi przebadano różne scenariusze działania układu. Pierwszy z nich to taki, kiedy zasilanie wszystkich połączeń jest wyłączone i linki oddziałują na drgania dwóch paneli jedynie jako masa dodana. Kolejno załączano obwód elektryczny pojedynczych połączeń, a następnie różnych ich kombinacji. Analizowano przy tym widma częstotliwościowe wskaźnika sprawności redukcji drgań i hałasu przy pomocy połączeń aktywnych. Skonstruowany układ pozwolił następnie przebadać charakterystyki częstotliwościowe utraty transmisji dźwięku w przedziale częstotliwości od 20 Hz do 500 Hz dla różnych scenariuszy sterowania przy pomocy linków aktywnych. Największą redukcję fali transmitowanej uzyskano dla załączonych pięciu połączeń aktywnych przy czym jedno z połączeń było przymocowane centralnie na obu panelach. Zauważono, że energia drgań jest przenoszona w różne obszary na panelach przy wzroście wartości procentowej opisującej cykl pracy wybranych połączeń aktywnych. Ponadto zauważono, iż w przypadku użycia pięciu połączeń aktywnych można dla wybranych cyklów ich pracy uzyskać znacznie większy transport energii drgań z panelu przyjmującego do panelu promieniującego, niż w przypadku wykorzystania tylko jednego połączenia lub braku takich połączeń. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły również stwierdzić iż prawidłowe rozmieszczenie połączeń aktywnych na panelach pozwala uzyskać znaczną redukcję drgań i hałasu w szerokim przedziale niskich częstotliwości. Jednak aby uzyskanie takich rezultatów było możliwe, niezbędna jest optymalizacja algorytmu sterowania.

**W rozdziale piątym** sformułowane zostały wnioski końcowe oraz wyszczególnione kierunki dalszych badań.

## 4. Ocena pracy doktorskiej

### 4.1. Ocena układu rozprawy doktorskiej oraz wykorzystanego piśmiennictwa

Oceniana rozprawa doktorska zawiera wszystkie niezbędne elementy składowe. W rozdziale pierwszym zawarto wprowadzenie do podjętej tematyki badawczej, przedstawiono stan aktualnych badań o zbliżonej tematyce prowadzonych zarówno w ośrodkach krajowych jak i zagranicznych. Przedstawiono zarówno starsze podstawowe pozycje jak prace zawierające najnowsze wyniki badań. Tak przedstawiony stan badań pozwolił Kandydatce wprowadzić czytelnika w problematykę swojej pracy, wskazać lukę literaturową, którą następnie wypełniła realizując tę pracę i wreszcie wykorzystała wyników literaturowe we własnych pracach badawczych. Następnie Autorka przedstawiła cel pracy oraz sformułowała jedną tezę.

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

W kolejnych rozdziałach przedstawiła wykorzystane w pracy metody badawcze, szczegółowo opisała wykorzystaną aparaturę oraz zaprojektowane i zrealizowane stanowiska badawcze. Dalej omówione zostały wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych oraz wnioski cząstkowe. Całość została zakończona wnioskami końcowymi oraz kierunkami dalszych badań. Dodatkowo Autorka zamieściła w pracy spisy tabel i rysunków oraz indeks najważniejszych użytych pojęć. Układ i strukturę pracy oraz użyte piśmiennictwo mogę uznać w pełni za prawidłowe.

### 4.2. Ocena celu pracy

Kandydatka jako cel swojej pracy doktorskiej wskazała **wykorzystanie oddziaływań strukturalnych do redukcji drgań i hałasu pochodzącego od pracującego urządzenia zamkniętego w obudowie cienkościennej.** Tak sformułowany cel pracy wpisuje się tematykę związaną aktualnymi zagadnieniami redukcji drgań i hałasu. Autorka podejmuje rozwiązanie redukcji fali transmitowanej ze źródła hałasu przez obudowę cienkościenną w zakresie niskich częstotliwości. Wykorzystuje przy tym układy połączeń aktywnych oraz ściany dwupanelowe. Badania w tej tematyce wymagają z jednej strony umiejętności rozwiązywania wielu wzajemnie powiązanych problemów cząstkowych. Niezbędne jest rozwiązanie problemów akustycznych, wibracyjnych, sterowania automatycznego procesami dynamicznymi. Niezbędne było również rozpatrzenie zagadnień optymalizacyjnych oraz uczenia maszynowego. Są to więc badania interdyscyplinarne. Z drugiej strony otrzymane wyniki mają wyraźne przełożenie utylitarne. Pozwalają bowiem na znaczną poprawę klimatu akustycznego miejsc pracy oraz obszarów mieszkalnych. Uważam, że podjęta problematyka jest istotna zarówno z naukowego punktu widzenia jak ze względu na wymierne wyniki utylitarne. Cel pracy jest w pełni uzasadniony potrzebami tych środowisk i pozwala na uzyskanie oryginalnych wyników naukowych.

### 4.3. Ocena wykorzystanych metod badawczych

Kandydatka we własnej pracy badawczej wykorzystuje głównie metody doświadczalne. Wymaga to umiejętnego wykorzystania zaawansowanych technik pomiarowych, doboru odpowiednich czujników amplitudy drgań, ciśnienia akustycznego, układów konwersji analogowo-cyfrowej, konstrukcji i oprogramowania układów mikroprocesorowych realizujących algorytmy sterowania automatycznego układów dynamicznych. Wykorzystywane są elementy analizy spektralnej co pozwala na optymalizację układu sterowania elementami aktywnymi obudowy dźwiękochłonnej. Ponadto autorka wykonuje w ograniczonym zakresie analizy analityczne badanych struktur drgających obudowy cienkościennej. Określa częstotliwości

rezonansowe oraz postaci drgań tych struktur. Pozwala Jej to na dalszą i jeszcze bardziej efektywną optymalizację obiektu sterowania, elementów wykonawczych oraz algorytmu sterującego. Autorka wykorzystuje elementy analizy statystycznej otrzymanych wyników.

Wykorzystane przez Kandydatkę metody badawcze są interdyscyplinarne, wymagają bowiem wiedzy oraz biegłości z zakresie więcej niż jednej dyscypliny. Uważam, że wybór oraz wykorzystanie metod badawczych są prawidłowe.

### 4.4. Ocena omówienia wyników badań oraz ich oryginalności

Przeprowadzone badania pozwoliły uzyskać znaczną redukcję transmitowanej fali akustycznej. Rezultat taki uzyskano poprzez wykorzystanie układu złożonego z dwóch paneli oddzielonych poduszką powietrzną wraz z pięcioma połączeniami aktywnymi oraz czujnikami amplitudy drgań i ciśnienia akustycznego. Układ taki wykorzystano jako jedną ze ścian obudowy sześciennej wewnątrz którego umieszczono źródło hałasu. Jest to rozwiązanie nietypowe, gdyż zwykle obudowy urządzeń składają się z pojedynczej ścianki natomiast linki aktywne nie były wcześniej wykorzystywane w takich obudowach. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na znaczne zwiększenie utraty transmisji dźwięku, a tym samym na istotną poprawę dźwiękoizolacyjności obudowy w zakresie niskich częstotliwości.

**Przedstawione rozwiązanie obudowy dwupanelowej wraz z połączeniami aktywnymi sterowanymi automatycznie można uznać w pełni za oryginalny wkład Kandydatki do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.**

### 4.5. Ocena dotycząca ogólnej wiedzy Kandydatki w dyscyplinie oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Analizując przedstawioną do oceny rozprawę doktorską można stwierdzić, że Kandydatka umiejętnie korzysta z informacji dostępnych w literaturze naukowej, dobiera odpowiednie metody badawcze i prawidłowo jest stosuje. Wyniki swoich badań przedstawia w przejrzysty i czytelny sposób oraz prawidłowo wyciąga wnioski cząstkowe i końcowe. Ponadto wyniki swoich badań publikuje w czasopismach naukowych o uznanej renomie. Można więc uznać, że jest gotowa do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

### 4.6. Informacje na temat praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników

Wiele z maszyn i urządzeń generuje niepożądane fale akustyczne i z tego powodu jest

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

umieszczanych w obudowach dźwiękochłonnych i dźwiękoizolacyjnych. Przedstawione wyniki badań naukowych mają zastosowanie w aktywnej redukcji drgań i hałasu niskoczęstotliwościowych urządzeń przemysłowych, wykorzystywanych w gospodarstwach domowych oraz w środkach transportu. Ma to znaczenie utylitarne i praktyczne, gdyż pozwala efektywnie poprawić klimat akustyczny w środowisku pracy i w obszarach mieszkalnych.

### 4.7. Informacje o nieprawidłowościach i uwagi dyskusyjne

Uwagi dotyczące ocenianej pracy doktorskiej:

- W pracy nie wyartykułowano wyraźnie znaczenia wyników średniej wariancji zmierzonych sygnałów z mikrofonów przedstawionych na rys. 32 i 34. Nasuwa się pytanie, jakie jest utylitarne znaczenie tych wyników?
- Brak jest dyskusji na temat trudności z jakimi możemy się zetknąć przy podjęciu próby rozszerzenia przedziału częstotliwości, w którym będzie działał układ aktywnej redukcji drgań i hałasu, do 700 Hz.
- Czy możliwe jest rejestrowanie zużycia energii elektrycznej zużywanej przez układ aktywnej redukcji hałasu podczas pracy? Jeśli tak, to jak należałoby praktycznie zrealizować taką rejestrację?
- Charakterystyki częstotliwościowe redukcji hałasu przedstawione na rys. 33, 35 i 36 zawierają szereg maksimów i minimów. Różnice w maksimum i minimum wynoszą 10 dB lub więcej. Dlaczego charakterystyki te nie są zbliżone do płaskich i co zrobić, aby takie były? Czy użycie płyty wykonanej z materiału o mniejszej wartości modułu sprężystości byłoby pomocne?
- Należałoby bardziej przybliżyć pojęcie sprawności redukcji hałasu wykorzystane w pracy.
- W pracy wspomniano, że wykorzystanie zaworów elektromagnetycznych jako linków aktywnych drgań ustrojów dwupanelowych powoduje lokalne nagrzewanie się paneli i może powodować przesunięcia ich częstotliwości rezonansowych. Należałoby wyjaśnić przyczyny takiego nagrzewania oraz przedstawić możliwości redukcji lub eliminacji tego efektu.
- Należałoby rozwinąć problem liczby użytych linków aktywnych w celu uzyskania założonej sprawności redukcji drgań i hałasu w zakresie niskich częstotliwości.

Chciałbym zaznaczyć, iż wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości ocenianej rozprawy doktorskiej.

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

### 4.8. Ocena indywidualnego wkładu Kandydatki w pracy zbiorowej

Ponieważ Kandydatka uczestniczyła w pracach zespołu badawczego, niezbędna jest ocena jej indywidualnego wkładu do dyscypliny naukowej **automatyka, elektronika i elektrotechnika**.

Autorka pracy uczestniczyła w konstrukcji stanowisk badawczych, zaprojektowaniu i wykorzystaniu powierzchni odbijających naroża dwu- i trójściennego. Zaproponowała różnorodne konfiguracje ustawienia mikrofonów błędu dla obudowy umieszczonej w pobliżu naroża. Uczestniczyła w badaniach doświadczalnych dźwiękoizolacyjności obudowy cienkościennej w narożu. Wykorzystała model analityczny utraty transmisji dźwięku utwierdzonej struktury dwupanelowej w nieskończonym sztywnym ekranie zaproponowany przez Xina i innych. Wykorzystała w tym celu elementy analizy numerycznej. Uczestniczyła w badaniach teoretycznych koncepcji połączeń pasywnych, semi-aktywnych i aktywnych struktur dwupanelowych. Zastosowała i przebadała doświadczalnie wpływy połączeń semi-aktywnych struktur dwupanelowych pod względem redukcji amplitudy drgań i hałasu transmitowanego na zewnątrz obudowy. Wykorzystała w tym celu elementy analizy spektralnej. Zaproponowała wykorzystanie techniki uczenia maszynowego do modelowania utraty transmisji dźwięku struktury dwupanelowej wraz z połączeniami semi-aktywnymi.

Kandydatka opublikowała wyniki swoich prac badawczych w renomowanych czasopismach takich jak „Sensors", „Archives of Acoustic", „Applied Sciences". Łącznie jest współautorką w 7 artykułach oraz 12 doniesieniach konferencyjnych. Na uwagę zasługuje fakt, że w 3 artykułach oraz w 4 doniesieniach konferencyjnych jest pierwszą współautorką co wskazuje na jej wiodącą rolę w tych pracach. Ponadto jest współautorką w 3 zgłoszeniach patentowych. Tematyka tych patentów dotyczy aktywnych barier akustycznych. Uczestniczyła w projekcie badawczym Narodowego Centrum Nauki zatytułowanego „Modelowanie, optymalizacja i sterowanie dla celów strukturalnej redukcji hałasu urządzeń", a realizowanego w Instytucie Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w l. 2018-2021.

### 4.9. Wniosek o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej wraz z uzasadnieniem

Jednym z warunków wyróżnienia rozprawy doktorskiej jest wniosek recenzenta wraz z jego uzasadnieniem. Moja ocena przedstawionej pracy doktorskiej oraz jej wartość merytoryczną uważam za wysoką. Kandydatka przedstawiła wyniki doświadczalne i częściowo analityczne kompleksowego rozwiązania redukcji drgań i hałasu źródła dźwięku umieszczonego wewnątrz

**Uniwersytet Rzeszowski**
Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych
ul. Prof. St. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, A0-B1L 317, 213
Tel.: 17 851-85-77, email: wordzanek @ ur.edu.pl

obudowy dźwiękoizolacyjnej. Zaproponowała nowatorskie rozwiązanie aktywnej dwupanelowej ścianki takiej obudowy co pozwoliło uzyskać wysoką redukcję transmisji drgań i hałasu. Wyniki swoich badań opublikowała w renomowanych czasopismach naukowych oraz w doniesieniach konferencyjnych. W 3 artykułach posiadających współczynnik wpływu oraz 4 doniesieniach konferencyjnych jest pierwszą autorką. Legitymuje się bogatą działalnością w zawodzie inżyniera. W mojej opinii oceniana praca doktorska zasługuje na wyróżnienie.

## 5. Podsumowanie oceny i konkluzja

Mgr. inż. Anna Chrapońska w swojej rozprawie doktorskiej pt. „**Noise and vibration reduction of a device enclosed in a thin-walled casing with the use of structural interactions**" przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autorka wykazała się wiedzą ogólną w dyscyplinie naukowej **automatyka, elektronika i elektrotechnika** oraz posiadła umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. **Oceniam pozytywnie tę rozprawę.** Ponadto stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Wojciech Kdzierski
.....
(*podpis recenzenta*)