



Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Automatykacji Procesów

**PROF. DR HAB. INŻ. JANUSZ KOWAL**

Kraków, 30.08.2016 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Stanisława Wrony  
pt.: *Modelling and control of device casing vibrations  
for active reduction of acoustic noise*

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Pawełczyk

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: automatyka i robotyka

Praca została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, pismem nr RAU/535/2015/2016, z dnia 12 lipca 2016 r.

### 1. Wprowadzenie i ogólna ocena rozprawy

Funkcjonowaniu maszyn i urządzeń towarzyszą zakłócenia. Spośród tych zakłóceń najistotniejszymi są zakłócenia natury mechanicznej, które pojawiają się w postaci drgań poszczególnych elementów maszyn i emisji hałasu. Czynniki te wywierają szkodliwy wpływ na same maszyny, otaczające środowisko i pracowników obsługi. Istotnym źródłem drgań i hałasu jest pobudzenie struktury wibroakustycznej do drgań przez energię pochodzącą od zakłóceń dynamicznych, w wyniku których następuje wypromieniowanie energii do ośrodka sprężystego i jej rozchodzenie się w ośrodku jako fali akustycznej.

W ciągu ostatnich lat zarówno bierne, jak też aktywne metody redukcji drgań i hałasu podlegały intensywnym badaniom teoretycznym i eksperymentalnym oraz były i są źródłem licznych innowacji technologicznych. Aktualnie trwają prace nad przeniesieniem wyników tych badań na zastosowania w realnych konstrukcjach inżynierskich.

RAU	Biuro Dziekana	
	Wpłynęło dnia	05. 09. 2016
	Nr	551 / zał. ....

Technologia aktywnej redukcji hałasu jest kluczowa w realizacji nowoczesnych lekkich struktur maszyn i urządzeń i jest niezbędna w celu zagwarantowania bezpieczeństwa ich obsługi i eksploatacji, stabilności pracy, komfortu, jak też spełnienie szeregu surowych norm, np. ograniczających poziom emitowanego hałasu. System aktywnej redukcji hałasu wytwarza dodatkowe, wtórne akustyczne pole falowe, które nałożone na pierwotne zakłócające pole falowe, powoduje jego modyfikację, pomniejszenie, a w idealnym przypadku pełną kompensację, w celu osiągnięcia ciszy. Typowy system aktywnej redukcji hałasu zawiera: elementy pomiarowe (mikrofony) wielkości regulowanych oraz elementy wykonawcze (głośniki), sprzężone z regulatorem w pętli sprzężenia zwrotnego. Jednak redukcja hałasu w przestrzeni trójwymiarowej np. pomieszczeniach, napotyka wiele trudności związanych z dużą zależnością od otoczenia, dużym zużyciem energii i powstawaniem jedynie lokalnych stref ciszy. Jest ono również kłopotliwe, gdy źródło hałasu rozłożone jest na wielu powierzchniach gdyż wymaga użycia wielu elementów pomiarowych i wykonawczych. Alternatywą jest wtedy aktywna strukturalna redukcja hałasu, polegająca na sterowaniu drganiami struktury odpowiedzialnej za emisję dźwięku, w celu minimalizacji poziomu ciśnienia akustycznego emitowanego przez tą strukturę. Osiągnięcia nauki i techniki z ostatniej dekady oferują szereg nowych koncepcji rozwiązań w zakresie aktywnej strukturalnej redukcji hałasu.

Przedstawione w opiniowanej pracy podejście polegające na zastosowaniu aktywnych obudów dźwiękoizolacyjnych, które skutkuje globalną redukcją hałasu zamiast tworzenia lokalnych stref ciszy, jest zasadne oraz nowatorskie. Obecnie nie są mi znane prace, w których rozważane byłyby zagadnienia sterowania drganiami obudów wielościennych. Zaproponowana metoda redukcji hałasu emitowanego przez maszyny i urządzenia, nie wymaga modyfikacji urządzenia, pozwala zachować pierwotne drogi odprowadzenia ciepła i nie powoduje znaczącego zwiększenia wymiarów i masy urządzenia. Jest również bardzo efektywna w przypadku hałasów niskoczęstotliwościowych.

Wszystkie powyższe spostrzeżenia pozwalają stwierdzić, że tematyka, jaką wybrał Doktorant jest aktualna, ważna i uzasadniona pod względem poznawczym jak również i praktycznym. Tematyka pracy zawiera istotne i oryginalne wyniki z zakresu modelowania, optymalizacji oraz sterowania drganiami i mieści się w dyscyplinie automatyka i robotyka.

## 2. Charakterystyka rozprawy i jej ocena merytoryczna

Opiniowana rozprawa ma wysoki poziom merytoryczny. Poszczególne rozdziały są ułożone w logiczną kolejność, a zawarte w nich treści są proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Zawartość rozprawy została ujęta w 7 rozdziałach na 129 stronach. Otwierają ją streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykazy: rysunków, tablic, skrótów i ważniejszych oznaczeń, a zamyka wykaz 95 pozycji literatury, z których w 14-tu Doktorant jest współautorem. Do pracy dołączono dodatek w formie dwóch załączników i indeksu najważniejszych pojęć. Jest ilustrowana 59 rysunkami, wykonanymi czytelnie i jednoznacznie oraz logicznie wplecionymi w treść rozprawy. Ułatwia to zrozumienie prezentowanych przez Doktoranta rozważań. Treść pracy nawiązuje w sposób właściwy do jej tytułu, a nazwy rozdziałów przedstawiają spójną całość, dając syntetyczny pogląd na rozważaną treść.

Tradycyjnie rozdział pierwszy zawiera usystematyzowane wprowadzenie do prezentowanych zagadnień dotyczących pasywnych i aktywnych metod redukcji hałasu. Autor dokonuje obszernego przeglądu literatury dotyczącej tematu pracy i ocenia stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy. W świetle analizy światowej literatury zagadnienia uważam, że opracowanie mgr inż. Stanisława Wrony jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań nad sterowaniem aktywną obudową dźwiękoizolacyjną. Autor formułuje podstawowy cel naukowy pracy, którym jest rozwinięcie metody aktywnej obudowy, jako sposobu redukcji hałasu generowanego przez maszyny i urządzenia. Teza pracy została sformułowana w następujący sposób: „Możliwa jest redukcja drgań ścian obudowy urządzenia metodą pasywną dzięki optymalnemu rozmieszczeniu lokalnych wzmocnień oraz mas na ścianach obudowy, a także zmniejszenie emisji hałasu globalnego do otoczenia metodą aktywną, dzięki optymalnemu rozmieszczeniu wzbudników drgań i czujników”.

Część teoretyczno-obliczeniowa i doświadczalna obejmuje rozdziały 2, 3, 4, 5 i 6 (100 stron), w których Doktorant zbudował i opisał obiekt badań – aktywna obudowa dźwiękochłonna. Zaprezentował parametry tego modelu oraz zbudował i zweryfikował jego model matematyczny, który następnie optymalizował przy użyciu algorytmu memetycznego. Po przeprowadzeniu właściwej analizy drgającej struktury, kiedy elementy wykonawcze i pomiarowe zostały właściwie rozmieszczone, Doktorant podjął zadanie sterowania. We wszystkich eksperymentach aktywnej redukcji hałasu wykorzystał adaptacyjny układ sterowania ze sprzężeniem w przód. Następnie w oparciu o opracowane modele matematyczne oraz algorytmy sterowania przeprowadził serie badań doświadczalnych. W celu przeprowadzenia tych badań opracował laboratoryjne stanowisko badawcze oraz przedstawił wyniki badań opracowanego przez siebie układu redukcji hałasu – sterowanej obudowy aktywnej, dla przypadku obudowy sztywnej i obudowy lekkiej. Całość pracy kończy podsumowanie, w którym Doktorant odniósł się do własnych dokonań naukowych formułując wnioski.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań, analiz i badań laboratoryjnych. Z punktu widzenia określonych celów, podjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy jak i literaturowy, został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta np. w poznanie technik modelowania złożonych obiektów w mechatronicznych, a w szczególności sterowanych obudów o złożonej strukturze konstrukcyjnej.

Ostatni punkt pracy stanowią załączniki, w których zostały przedstawione definicje macierzy sztywności i mas.

Opiniowana rozprawa doktorska ma klasyczny układ. Swoim zakresem obejmuje zarówno zagadnienia teoretyczne jak i badania doświadczalne. W problematyce teoretycznej można wyróżnić zagadnienia związane z projektowaniem konstrukcji mechanicznych, wyznaczaniem modeli matematycznych obiektów, projektowaniem algorytmów sterowania i filtracji. Badania doświadczalne były prowadzone w celu weryfikacji zaprezentowanych algorytmów optymalizacji i sterowania oraz weryfikacji zaprojektowanych układów mechanicznych.

Wyprowadzony w rozprawie model, łączy opis matematyczny wielu zjawisk, które do tej pory w literaturze rozpatrywane są oddzielnie. Obejmują one: teorię cienkich i grubych płyt, elastyczne warunki brzegowe, model tłumienia termoelastycznego, a także obciążenie płyty dodatkowymi masami, usztywnieniami oraz elementami wykonawczymi i pomiarowymi. Każda ze ścian modelowana była oddzielnie. Układ równań różniczkowych cząstkowych rozwiązany został metodą Rayleigha-Ritza i zapisany został w postaci równań stanu. W toku dalszych prac Autor zaproponował metodę identyfikacji parametrów modelu, wykorzystując pomiar eksperymentalny i algorytm optymalizacji. Opracowany model został wykorzystany w rozwiązaniu szeregu problemów optymalizacji, takich jak rozmieszczenie dodatkowych mas i usztywnień oraz elementów wykonawczych i pomiarowych bazując na miarach sterowalności i obserwowalności układu. Autor zastosował algorytm memetyczny, będący kombinacją algorytmu ewolucyjnego z algorytmem poszukiwań lokalnych. Jest on wydajny dla problemów o skomplikowanej przestrzeni rozwiązań z wieloma optimumami lokalnymi. Następnie zaproponowana została metoda kształtowania odpowiedzi częstotliwościowej ścian obudów. Została ona zweryfikowana dla szeregu rozwiązań, rozważających zastosowania pasywne i aktywne. Wykonane zostały badania symulacyjne i eksperymentalne. Badania prowadzone były dla obudowy sztywnej i obudowy lekkiej, ze ścianami jedno i dwu płytowymi (łącznie 5 konfiguracji). Dla celów sterowania drganiami ścian obudów Doktorant wykorzystał adaptacyjny układ sterowania ze sprzężeniem w przód. Jest on oparty o normalizowany algorytm Fx LMS z wyciekiem, użyty do aktualizacji parametrów filtrów sterujących. Doktorant zaproponował dwie strategie sterowania, w pierwszej niezależny układ sterowania został użyty dla każdej ze ścian, w drugim przypadku stosowany był wspólny układ sterowania dla całej obudowy. Jakość sterowania była oceniana przez osiągnięty poziom redukcji hałasu, mierzony przez mikrofony obserwacyjne. We wszystkich eksperymentach zakłóceniem pierwotnym był sygnał tonalny o częstotliwości od 20 do 500 Hz. Uzyskano wysokie poziomy redukcji hałasu rzędu 20 dB, co potwierdza praktyczny potencjał aktywnych układów redukcji hałasu.

Do oryginalnych i wartościowych osiągnięć rozprawy doktorskiej należy zaliczyć:

1. Miejsca montażu sensorów oraz aktuatorów zostały wyznaczone na podstawie rozwiązania zadań optymalizacji, gdzie wskaźnikami jakości były oparte na Gramianach obserwowalności i sterowalności. Takie podejście umożliwia dekompozycję problemu zaprojektowania obudowy na zadania optymalnego rozmieszczenia sensorów, elementów wykonawczych, dodatkowych mas oraz syntezy sterowania dla aktywnej redukcji hałasu.
2. Zaproponowanie procedury projektowania obudowy z możliwością pominięcia etapu syntezy układu aktywnej redukcji hałasu w przypadku, gdy optymalny dobór dodatkowych mas umożliwił uzyskanie satysfakcjonującego poziomu redukcji hałasu.
3. Uzasadnione zastosowanie w tym przypadku algorytmów genetycznych, ponieważ zadania optymalnego rozmieszczenia mas, sensorów, elementów wykonawczych charakteryzują się występowaniem wielu minimów lokalnych.
4. Rozważane zadania optymalizacji charakteryzują się dużą złożonością obliczeniową z tego względu Autor zastosował w celu rozwiązania tych zadań



- algorytmy memetyczne, które są modyfikacją algorytmów ewolucyjnych umożliwiających szybsze (o rząd wielkości) wyznaczenie rozwiązań optymalnych.
5. Metodologię zaproponowaną przez Autora – zweryfikowano projektując dwa typy obudów: sztywnej i lekkiej.
  6. Zaproponowana przez Autora metodologia projektowania obudowy redukującej hałas może być zastosowana w innych dziedzinach techniki.

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy doktorskiej pragnę podkreślić istotną wagę poznawczą i praktyczną przedstawionej pracy. Stanowi ona interesującą i innowacyjną metodę rozwiązania problemu redukcji hałasu maszyn i urządzeń. Szeroki zakres pracy od projektu do badań weryfikujących świadczy o dużej wiedzy teoretycznej oraz praktycznej Doktoranta z dziedziny mechaniki, automatyki oraz akustyki. Zastosowane w pracy rozwiązania oraz metody świadczą o dobrym przygotowaniu doktoranta do badań naukowych i odpowiedniej wiedzy w zakresie rozprawy doktorskiej. Zaprezentowane w pracy wyniki potwierdzają słuszność sformułowanej tezy. Otrzymane wyniki zostały zaprezentowane przejrzyście i nie budzą najmniejszych zastrzeżeń. Wnioski przedstawione przez Autora zostały dobrze sformułowane zgodnie z otrzymanymi wynikami.

### 3. Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne

Uwagi, jakie nasuwają się po lekturze pracy mają charakter ogólny i redakcyjny. Zauważyć należy, że rozprawa jest bardzo starannie przygotowana, nasuwają się jednak pewne uwagi dyskusyjne, które sformułowałem poniżej:

#### Rozdział 2

1. Jakie były przesłanki wyboru konstrukcji obudowy sztywnej, bazującej na sztywnej szerokiej ramie i przeprowadzenia analizy kwadratowej ściany obudowy. Na ile taka konstrukcja ma odpowiednik w aplikacjach przemysłowych?

#### Rozdział 4

2. W rozdziale 4 brakuje dyskusji związanej z otrzymanymi wynikami symulacyjnymi i eksperymentalnymi dla walidowanego modelu obudowy.

#### Rozdział 5

3. Istotny wpływ na efektywność rozwiązywania zadań optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych mają metody kodowania chromosomów. Jaką metodę kodowania chromosomów zastosowano w przedstawionej rozprawie?
4. Autor w rozprawie zamieścił wykres zależności pomiędzy kolejnymi generacjami w algorytmie genetycznym, a wskaźnikiem jakości tylko w przypadku identyfikacji modelu. W celu oceny poprawności otrzymanego rozwiązania optymalnego należałoby przedstawić takie wykresy również w pozostałych przypadkach.
5. Wartości parametrów modelu  $k_{rx0}, k_{rx1}, \dots$  (stałe sprężystości związane z warunkami brzegowymi) zostały zidentyfikowane w rozdziale 5 natomiast walidację modelu przeprowadzono w rozdziale 4. Celowym byłoby przedstawienie porównania modelu z parametrami zidentyfikowanymi z modelem przyjętym w rozdziale 4.
6. Czy w przypadku obudowy lekkiej również przeprowadzono identyfikację parametrów analogicznie jak w przypadku obudowy sztywnej?

7. Czy dodatkowe masy związane z zastosowanymi sensorami i aktuatorami oraz ich położenie miały wpływ na efektywność izolacji akustycznej i wibracyjnej?

Rozdział 6

8. W rozważanym układzie sterowania założono, że obiekt jest liniowy, mogą jednak występować zjawiska nieliniowe, które mają istotne znaczenie szczególnie w zakresie bardzo niskich częstotliwości. Czy Autor przeprowadził badania jak zmieniają się charakterystyki częstotliwościowe zamkniętego układu sterowania w zależności od amplitudy sygnału zakłócającego?
9. Celowym byłoby zamieszczenie w rozprawie szerszej dyskusji związanej z porównaniem efektywności redukcji hałasu dla obudowy sztywnej i lekkiej.

Uwagi edycyjne:

10. Charakterystyki częstotliwościowe przedstawione w rozprawie są przedstawione w niektórych przypadkach od 0Hz, (Figure 5.6) a w innych np. od 25Hz, (Figure 5.4).
11. Brak opisów osi na niektórych rysunkach np. Figure 4.15, 4.16, 4.16.

Przedstawione wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają wartości pracy, którą oceniam bardzo dobrze. Traktuję je jako wskazówki dla Autora, ponieważ nie wpływają one na całość pracy oraz jej wartość. Powinny być one uwzględnione w dalszych badaniach i publikacjach naukowych.

#### 4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu przedstawionej recenzji wyrażam pogląd, że mgr inż. Stanisław Wrona w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułował, rozwiązał i opisał oryginalne zadanie naukowe, jakim było rozwinięcie metody aktywnej obudowy dźwiękoizolacyjnej, jako sposobu redukcji hałasu maszyn i urządzeń. Uważam, że praca zawiera oryginalne rozwiązania teoretyczne, szczególnie w zakresie modelowania, optymalizacji i sterowania układów aktywnej, strukturalnej redukcji hałasu.

Recenzowana rozprawa doktorska jest ważnym opracowaniem naukowym, a jednocześnie ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne oraz wdrożeniowe i mieści się w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. Rozprawa świadczy również, iż Autor opanował właściwie takie zagadnienia jak projektowanie, modelowanie, sterowanie systemów wibroakustycznych. Okazał się również dobrym eksperymentatorem.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów obowiązującej Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym, stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Stanisława Wronę do publicznej.

**Uwzględniając bardzo nowoczesne i nowatorskie ujęcie tematu a także oryginalne i bardzo istotne, zarówno z teoretycznego, jak i z praktycznego punktu widzenia rezultaty pracy doktorskiej oraz biorąc pod uwagę, że częściowe wyniki rozprawy były publikowane w renomowanych czasopismach (7 artykułów), w tym indeksowanych w bazie Web of Science (4), sumaryczny IF= 5,733 a także liczne wystąpienia Doktoranta na międzynarodowych konferencjach Naukowych (11) i jedno zgłoszenie patentowe, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Stanisława Wrony.**



6