

Poznań, 12.09.2023r.

dr hab. inż. Krzysztof Talaśka, prof. PP
Instytut Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Mateusza Żurawskiego
pt.: „Experimental Study, Numerical Analysis and Predictive Control of the Adaptive Tuned
Particle Impact Damper”

Promotor: prof. dr hab. inż. Robert Zalewski

1. Podstawa prawna

Podstawą wykonania recenzji było pismo z dnia 6.07.2023 Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej informujące o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgra inż. Mateusza Żurawskiego, na posiedzeniu w dniu 07.06.2023 r.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy koncepcji adaptacyjnego tłumika uderzeniowego (ATPID - Adaptive Tuned Particle Impact Damper) w zastosowaniu do tłumienia drgań mechanicznych. Autor rozprawy dokonał modyfikacji klasycznego tłumika uderzeniowego poprzez umożliwienie zmiany objętości komory roboczej tłumika w czasie rzeczywistym, co pozwoliło uzyskać cechy adaptacyjności. Rozprawa liczy 5 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, wyjaśnieniem skrótów użytych w tekście rozprawy oraz listą ważniejszych oznaczeń i symboli. Po piątym rozdziale, który jest podsumowaniem znajduje się bibliografia, która liczy 130 pozycji. Całość rozprawy zajmuje 180 stron.

Rozdział 1 zawiera genezę oraz motywację podjęcia tematyki, aktualny stan wiedzy w tym obszarze tematycznym wraz z opisem klasycznych granulowanych tłumików uderzeniowych, ich typów oraz obszarów zastosowania. Na końcu tego rozdziału Autor zawarł cele oraz plan rozprawy. Doktorant zwraca uwagę, że tego typu tłumiki są rozwijane od lat 60-

tych, mimo to nadal znajduje się przestrzeń dla badaczy, którzy chcą udoskonalać te konstrukcje, szczególnie w obszarze rozszerzenia uniwersalności ich zastosowania poprzez wprowadzenie cech adaptacyjności i możliwości reagowania tego typu tłumików na aktualne wymuszenie generujące drgania konstrukcji tłumionej. Autor opisuje podstawowe konstrukcje tłumików uderzeniowych zwracając uwagę, że najczęściej obudowa ma stałą objętość (nie ma możliwości przemieszczania poszczególnych ścian obudowy, co mogłoby wpłynąć na zmianę charakterystyki działania tłumika). Przedstawia też wyzwania w modelowaniu na etapie projektowania tego typu konstrukcji ze względu na fakt, że dyssypacja energii następuje w wyniku niesprężystych zderzeń granulatu oraz w wyniku sił tarcia podczas interakcji granulatu ze ścianami obudowy. Analiza literatury prowadzi Doktoranta do wniosku, że korzystne jest stosowanie granulatu o zdecydowanie wyższej twardości niż twardość ścian obudowy. Autor prezentuje szerokie spektrum zastosowania tłumików uderzeniowych potwierdzając tym samym aktualność podjętej tematyki oraz wskazując niedostatki techniczne konstrukcji, które można znaleźć w praktycznym zastosowaniu albo tych, które są w fazie prac badawczo-rozwojowych.

Doktorant definiuje trzy główne cele rozprawy:

- zaprojektowanie autorskiego prototypu adaptacyjnego tłumika uderzeniowego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej oraz w celu walidacji badań symulacyjnych,
- budowa modelu numerycznego autorskiego ATPID, który w możliwie dokładny sposób będzie reprezentował rzeczywiste cechy fizyczne tłumika oraz da podstawy do zaproponowania predykcyjnego algorytmu sterowania,
- zaproponowanie predykcyjnego algorytmu sterowania tłumikiem w celu wyznaczenia optymalnej wysokości tłumika w zależności od aktualnych zmiennych wymuszeń zewnętrznych działających na konstrukcję tłumioną.

Zdaniem recenzenta Doktorant dokonał dokładnego i szczegółowego rozpoznania tematu, był w stanie zidentyfikować wady istniejących konstrukcji, problemy jakie trzeba rozwiązać podczas projektowania tłumika oraz, że zaproponowanie predykcyjnego algorytmu sterowania w znaczący sposób zwiększy możliwości aplikacyjnego wykorzystania proponowanej konstrukcji tłumika.

Rozdział 2 zawiera opis budowy autorskiego tłumika ATPID oraz jego badania eksperymentalne. Zaproponowany przez Autora tłumik składa się z cylindrycznej obudowy wykonanej przy użyciu technik szybkiego prototypowania – druku 3D. Dolna ściana czołowa jest nieruchoma, natomiast ściana czołowa górna ma możliwość osiowego przemieszczania się. Zmiana położenia ściany czołowej górnej następuje przez obrót śruby napędzanej silnikiem elektrycznym, śruba współpracuje z nakrętką na stałe przytwierdzoną do ściany czołowej górnej. W tłumiku wykorzystano pojedynczy element (granulat), który swobodnie

przemieszcza się wzdłuż śruby napędzającej ścianę czołową górną. Na tym etapie na uwagę zasługuje fakt prostej budowy prototypu tłumika oraz wykorzystania do wytworzenia wybranych części tłumika technologii druku 3D.

Następnie Doktorant przedstawił stanowisko badawcze, na którym był w stanie eksperymentalnie weryfikować działanie zaproponowanej konstrukcji. Obiektem tłumionym (służącym do weryfikacji skuteczności tłumika) była belka, wprawiana w ruch (wymuszenie kinematyczne) poprzez mechanizm korbowy z możliwością regulacji skoku. Do pomiaru parametrów ruchu belki wykorzystano akcelerometr PCB 351B03 oraz czujnik laserowy Omron ZX1-LD300A81. W pierwszej kolejności Doktorant dokonał badań drgań swobodnych z danym wymuszeniem początkowym z wykorzystaniem masy granulatu na poziomie 2,5% masy całego układu dla 5 wysokości tłumika. Wysokość $h_1 = 0,017$ m była najmniejszą i powodowała zablokowanie granulatu, wysokość $h_5 = 0,2$ m była największą wartością i wynikała z ograniczeń konstrukcyjnych prototypu tłumika. Następnym etapem badań dotyczyło zmiany masy granulatu od 2,5% do 30% masy całego układu. Zaobserwowano zdecydowanie większe zmiany skuteczności tłumienia dla większych mas granulatu. Kolejne badania obejmowały sprawdzenie skuteczności tłumienia dla różnych wstępnych odkształceń belki w zakresie od 0,1 m do 0,3 m. Doktorant dochodzi do wniosku, że wyniki otrzymane z badań na tym etapie są niewystarczające by sprecyzować wytyczne do projektowania efektywnego tłumika ze względu na złożony wzajemny wpływ czynników zewnętrznych oraz cech tłumika. Kolejnym etapem badań obejmował tłumienie drgań harmonicznym wymuszonych przez elementy stanowiska badawczego. Doktorant przedstawił drgania belki podczas wymuszania drgań z częstotliwością bliską częstotliwości rezonansowej ($0,9 f_{res} - 1,1 f_{res}$). Doktorant badał efektywność działania tłumika na belce wzbudzonej w drgania o określonej częstotliwości przy czym tłumik miał różne wysokości (takie same jak podczas badań z drganiami swobodnymi), masy granulatu również były różne. Doktorant zauważa, że większa masa granulatu wpływa na większą efektywność tłumienia, tak samo zmiana wysokości tłumika, która wpływa na ruch granulatu w tłumiku jednoznacznie wpływa na jego efektywność tłumienia. Doktorant dochodzi do wniosku, że na tym etapie dalsze badania nie są wskazane, powinien za to podjąć się budowy modelu matematycznego tłumika oraz stanowiska badawczego by podczas symulacji znaleźć optymalne parametry tłumika.

Zdaniem recenzenta zarówno zaprezentowane stanowisko badawcze z prototypem tłumika jak i metodologia badawcza są poprawne. Wykorzystanie ich pozwoliło Doktorantowi wyciągnąć wnioski w zakresie wzajemnego wpływu cech funkcjonalnych tłumika na jego właściwości tłumiące dla danego układu fizycznego.

Rozdział 3 zawiera analizy numeryczne wykorzystujące zaproponowany przez Doktoranta model matematyczny tłumika oraz stanowiska badawczego. W pierwszej kolejności został przedstawiony przegląd stanu wiedzy z zakresu modelowania zjawisk kontaktowych

w obszarze zderzeń sprężystych, zostały przedstawione modele sprężysto-plastyczne, zalety i wady wykorzystania metody elementów skończonych oraz metody elementów dyskretnych. Analiza dostępnych modeli umożliwiła Doktorantowi wybór tego, który wykorzystał do budowy modelu numerycznego tłumika. Był to zmodyfikowany model Hertza uwzględniający właściwości lepko sprężyste zjawisk zderzenia granulatów m.in. o ścianki obudowy tłumika. Doktorant przedstawił model matematyczny z uwzględnieniem innowacyjnego rozwiązania jakim jest możliwość zmiany wysokości tłumika. W dalszej kolejności została przedstawiona walidacja modelu numerycznego wykazująca wysoką zbieżność wyników symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi. Przeprowadzono analizę wrażliwości mającej na celu określenie wpływu wysokości tłumika na efektywność tłumienia, badany był przypadek, kiedy granulat był zakleszczony pomiędzy ścianami czołowymi oraz przypadek kiedy granulat mógł swobodnie przemieszczać się pomiędzy ścianami czołowymi i odbijał się od ścian z każdym wychyleniem. Wykorzystanie zaproponowanego modelu umożliwiło identyfikację stanów pracy tłumika, w których granulat podczas drgań nie był w stanie odbijać się od ścian czołowych przy każdym wychyleniu. To powodowało przypadkową pracę tłumika i trudne do zidentyfikowania parametry jego działania. Dalej zbadano wpływ masy granulatów dla danej wysokości tłumika oraz danej wartości amplitudy wymuszenia. Okazało się, że im mniejsza masa tym większa tendencja do ruchów granulatów wraz z przemieszczającym się tłumikiem. Większe masy powodowały przypadkowe odbicia się od ściany czołowej górnej, a największa badana masa wykluczała w ogóle możliwość odbicia się granulatów od ścianki górnej. Następnie Doktorant zbadał wpływ amplitudy wymuszenia oraz wprowadził współczynnik tłumienia (SDC – Specific Damping Coefficient) wykorzystany do analizy skuteczności działania tłumika. Przeprowadził analizę energetyczną, która umożliwiła wykazanie, że odpowiednio dobrane parametry tłumika, np. jego wysokość pozwalają na sprawne wytłumienie układu wzbudzonego w drgania. Na końcu rozdziału 3 Doktorant dokonuje optymalizacji parametrów tłumika w celu osiągnięcia stanu drgań belki w stanie ustalonym dla maksymalnej wysokości tłumika i różnych mas granulatów oraz różnych amplitud wymuszenia. Autor zauważa, że ważną cechą proponowanego tłumika jest to, że dla każdej kombinacji masy granulatów oraz amplitudy wymuszenia potrzebna jest konkretna wysokość robocza tłumika by osiągnąć najbardziej zadowalający efekt tłumienia. Dlatego zaproponowana przez Autora konstrukcja może stać się tak użyteczna w tłumieniu drgań o różnych parametrach. Przeprowadzona walidacja polegająca na wyznaczeniu optymalnej wartości wysokości tłumika dla danej masy granulatów oraz określonej wartości amplitudy potwierdziła skuteczność zaproponowanego modelu numerycznego.

Zdaniem recenzenta zaprezentowany model numeryczny zostały przygotowany w sposób poprawny, pozwolił on określić wpływ wybranych cech tłumika na efektywność jego działania

oraz poszukiwanie optymalnych wartości wysokości tłumika dla danej masy granulatu oraz amplitudy wymuszenia, dla których tłumik działa najskuteczniej.

W **rozdziale 4** Doktorant prezentuje algorytm sterowania tłumikiem. Swoje rozważania i propozycje opiera na pracach prof. Masri (University of Southern California) stwierdza, że poprawne działanie tłumika będzie miało miejsce jeśli masa ruchoma w tłumiku będzie uderzać o ścianki tłumika w chwili osiągnięcia przez układ tłumiony prędkości maksymalnej poruszając się w przeciwnym kierunku. Doktorant podczas prac nad układem sterowania korzysta z wyników, jakie osiągnął zespół prof. Masri wykorzystując stanowisko badawcze aktywnego tłumika uderzeniowego, zwraca jednak uwagę, że stanowisko to ma pewne wady. Działając w poziomie nie uwzględniano działania sił grawitacji oraz tarcia. Doktorant ponadto nie zgadza się z określeniem tego tłumika mianem aktywnego przez zastosowanie mechanicznych ograniczników ruchu. Analizując wady prezentowanego w literaturze rozwiązania oraz zauważając, że żadne prace w kierunku wyeliminowania tych wad nie nastąpiły, Doktorant zaprezentował ogólną koncepcję strategii sterowania autorskim tłumikiem adaptacyjnym. Założył on, że zmiana wysokości tłumika będzie następować co określony czas, wysokość tłumika będzie zmieniać się skokowo co określoną wartość, czas zmiany wysokości tłumika jest założony i stały, po osiągnięciu określonej wysokości algorytm będzie sprawdzał czy tłumienie jest bardziej efektywne, jeśli drgania belki będą mniejsze będzie następować kontynuacja regulacji tłumika, jeśli drgania belki będą większe będzie następować powrót do poprzednich nastaw uznając je za najefektywniejsze. Doktorant zauważa, że największą wadą proponowanej strategii sterowania jest długi czas osiągnięcia wartości optymalnej. Proponowany algorytm sterowania został zweryfikowany eksperymentalnie potwierdzając wcześniej poczynione założenia. Następnie został przedstawiony predykcyjny system sterowania, który zawierał następujące kryteria: uderzenie elementu tłumika następuje w chwili gdy przemieszcza się on w kierunku przeciwnym niż element tłumiony, uderzenie następuje gdy prędkość jest maksymalna lub zaczyna się zmniejszać, uderzenia następują w każdym cyklu drgań, należy unikać zjawiska zakleszczania się elementu tłumika pomiędzy ścianami czołowymi. Weryfikacja zaproponowanego systemu sterowania potwierdza wcześniejsze obliczenia wartości optymalnych zawartych na rys. 3.25. Różnice pomiędzy tymi wartościami a wartościami otrzymanymi z wykorzystaniem algorytmu PCA (rys. 4.46) wynikają z zastosowanej metody określania optymalnej wartości wysokości tłumika. Doktorant wymienia zidentyfikowane wady algorytmu PCA: potrzeba pełnej znajomości modelu układu drgającego, założenie prędkości początkowej granulatu tłumika, z użyciem algorytmu PCA niemożliwe jest wyznaczenie optymalnej wysokości tłumika dla niewielkich amplitud wymuszenia oraz wysokich częstotliwości. Doktorant prezentuje też możliwe rozwiązania, które mogą przyczynić się do eliminacji wcześniej zdefiniowanych ograniczeń.

Zdaniem recenzenta treści zawarte w tym rozdziale są bardzo cenne ze względu na fakt przedstawienia propozycji działającego algorytmu sterowania tłumikiem, który jest w stanie określić optymalną wartość wysokości tłumika dla danych warunków wymuszenia konstrukcji tłumionej. Cenne jest również dojrzałe i rzetelne określenie wad proponowanego rozwiązania wraz ze wskazaniem potencjalnych dróg wyeliminowania tych wad.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie całości pracy, w którym Doktorant wymienia swe osiągnięcia kategoryzując je na trzy grupy. W grupie pierwszej Doktorant wymienia osiągnięcia z zakresu eksperymentalnych badań zaproponowanego przez siebie tłumika ze szczególnym zwróceniem uwagi na wady klasycznego tłumika PID oraz eliminację tych wad w tłumiku ATPID. Druga grupa osiągnięć dotyczy badań symulacyjnych tłumika ATPID, a wśród nich określenie modelu matematycznego z uwzględnieniem nieliniowego lepko sprężystego modelu kontaktowego granulat-ściana tłumika, określenie wrażliwości modelu oraz optymalizacji parametrycznej. Trzecia grupa osiągnięć Doktoranta dotyczy sformułowania podstawowej koncepcji strategii sterowania tłumikiem, weryfikacja eksperymentalna tej strategii, sformułowanie koncepcji predykcyjnego algorytmu sterowania oraz określenie jego efektywności i wrażliwości.

Zdaniem recenzenta Doktorant osiągnął założone wcześniej cele.

Bibliografia zawiera 130 prac. Ich wybór jest w pełni uzasadniony, są aktualne oraz stanowią szeroki przegląd stanu wiedzy w tym temacie.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca stanowi spójne opracowanie zawierające propozycję konstrukcji adaptacyjnego tłumika uderzeniowego, jego model matematyczny oraz predykcyjny algorytm sterowania w celu zapewnienia mu efektywnej pracy. Doktorant dokonał szerokiego przeglądu literatury w tym zakresie, określił niedostatki i wady stosowanych tłumików PID. Zdefiniował trzy główne cele rozprawy:

- zaprojektowanie prototypu autorskiego adaptacyjnego tłumika uderzeniowego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej oraz w celu walidacji badań symulacyjnych,
- budowa modelu numerycznego autorskiego ATPID, który w możliwie dokładny sposób będzie reprezentował rzeczywiste cechy fizyczne tłumika oraz da podstawy do zaproponowania predykcyjnego algorytmu sterowania,
- zaproponowanie predykcyjnego algorytmu sterowania tłumikiem w celu wyznaczenia optymalnej wysokości tłumika w zależności od aktualnych zmiennych wymuszeń zewnętrznych działających na konstrukcję tłumioną.

W trakcie realizacji zdefiniowanych celów rozprawy Doktorant zaproponował autorskie rozwiązanie konstrukcyjne, wykonał jego prototyp, przeprowadził badania identyfikacyjne jego

działania. Na tej podstawie zidentyfikował złożony problem naukowy polegający na trudności szybkiego i jednoznacznego określenia parametrów użytkowych tłumika: wysokość oraz masa elementu ruchomego. Przeprowadził szerokie studia w zakresie identyfikacji dostępnych modeli zjawisk kontaktowych i zdecydował się na wykorzystanie modelu matematycznego z uwzględnieniem nieliniowego lepko sprężystego modelu kontaktowego granulat-ściana tłumika. Dokonał walidacji tego modelu, jego wrażliwości oraz optymalizacji parametrycznej mającej na celu określenie efektywnej wysokości tłumika w zależności od masy elementu ruchomego oraz amplitudy wymuszenia. Przedstawił strategie algorytmów sterowania mające na celu dostosowywanie wysokości tłumika (a przez to jego możliwości tłumienia) w czasie rzeczywistym. Określił precyzyjnie wady zaproponowanych algorytmów sterowania.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest potwierdzeniem, że autor prezentuje wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zaprezentowana w pracy metodologia badawcza oraz realizacja poszczególnych zadań badawczych potwierdza dojrzałość naukową Doktoranta. Praca jest napisana starannie, w sposób przejrzysty prezentowane są założenia do badań, ich wyniki oraz ich interpretacja. Doktorant jest świadomy definiowanych założeń upraszczających, potrafi właściwie identyfikować wady prezentowanych rozwiązań oraz proponuje sposoby ich eliminacji. Uważam, że praca stanowi cenny wkład w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

4. Uwagi, komentarze oraz pytania

Podczas analizy tekstu rozprawy nasuwają się pewne pytania, uwagi i komentarze. Poniżej wybrane uwagi szczegółowe:

- podczas walidacji modeli numerycznych niezwykle istotne są wartości parametrów wykorzystywanych w tych modelach. W rozdziale 3.3 Doktorant pisze, że parametry fizyczne modelowanego układu jak np.: k_s oraz c_s są określane na podstawie wstępnych badań eksperymentalnych. Jakie są bliższe szczegóły sposobu i warunków wyznaczania konkretnych wartości tych parametrów,

- przedstawiony na rysunku 2.1 schemat prototypu tłumika ATPID wskazuje, że element ruchomy tłumika (2) może swobodnie przemieszczać się wzdłuż śruby (5), której obrót powoduje przemieszczanie się górnej ściany czołowej obudowy tłumika. Z opisu wynika, że powierzchnia wewnątrz otworu elementu (2) współpracuje z powierzchnią zewnętrzną gwintu śruby (5). Jaka jest tolerancja wykonania otworu i jaki wpływ ma ona na charakter współpracy obu tych elementów? Może dochodzić do zakleszczania się?

- w jaki sposób uwzględniono specyficzny kształt elementu ruchomego (2) w miejscach, które wchodzi w kontakt ze ścianą dolną nieruchomą i górną ruchomą podczas uderzeń, szczególnie jeśli chodzi o modelowanie zjawiska uderzenia?

- jakie parametry w modelu matematycznym należy zmodyfikować w przypadku wykorzystania innego materiału podczas druku 3D (wytwarzanie części obudowy),

- na str. 89 Doktorant definiuje przedziały czasowe, które były stosowane podczas weryfikacji modelu matematycznego. Z czego wynikają takie wartości i czy te czasy mogłyby być krótsze,

- czy zdaniem Doktoranta inny niż płaski kształt ścian czołowych obudowy tłumika miałby korzystny wpływ na jego charakterystyki tłumiące?

- czy zdaniem Doktoranta inny niż kulisty kształt elementu ruchomego (granulatu) tłumika miałby wpływ na jego charakterystyki tłumiące?

- jakie korzyści zdaniem Doktoranta niesłoby wykorzystanie w algorytmie sterowania sztucznej inteligencji?

- w których etapach projektowania nowego adaptacyjnego tłumika uderzeniowego można by z korzyścią wykorzystać metodę elementów skończonych?

Praca jest napisana starannie i przejrzysto. Wykresy i grafiki ułatwiają interpretację wyników badań. Pewne nieścisłości pojawiają się w oznaczeniach źródeł literatury, ich analiza jest odrobinę utrudniona. Przykładem może być rys. 1.1 oraz źródło [3].

Zdaniem recenzenta niefortunnym wydaje się użycie określenia „sufit” oraz „podłoga” obudowy. Określenie takie zostało użyte zarówno w polskojęzycznym streszczeniu jak i angielskojęzycznym tekście rozprawy. Bardziej trafnym sformułowaniem, zdaniem recenzenta, byłoby np.: górna i dolna ściana czołowa obudowy.

Przedstawione powyżej uwagi, pytania i komentarze mają stanowić przyczynek do dalszej dyskusji w temacie adaptacyjnych tłumików uderzeniowych. Nie umniejszają w żaden sposób wysokiego poziomu prezentowanego przez recenzowaną rozprawę doktorską.

5. Wnioski końcowe

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych badań oraz to, że Doktorant wykazał się umiejętnością rozwiązania oryginalnego problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia w sposób ponadprzeciętny warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. Podsumowując, wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenia mgra inż. Mateusza Żurawskiego do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom prezentowanych w rozprawie badań w zakresie zaproponowania autorskiej konstrukcji adaptacyjnego tłumika uderzeniowego wraz z jego modelem matematycznym oraz propozycją predykcyjnego algorytmu sterowania wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Mateusza Żurawskiego.

Krzysztof Tolułowicz