

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Automatyki i Informatyki

dr hab. inż. Janusz Goldasz, prof. PK

Kraków, 29-11-2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Żymełki
pt.

“Development of semi-active shock absorber dynamic model
and parameters identification methodology”

Promotor pracy: dr hab. inż. Marek Fidali, prof. PŚ.

Podstawa prawna oceny:

Pismo nr RDJMe.512.21.2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z
dnia 27/09/2023 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

W Rozdziale 1.5 Doktorant sformułował główną tezę pracy:

- Jest możliwa identyfikacja parametrów modelu matematycznego amortyzatora (na drodze eksperymentalnej) koniecznych do przeprowadzenia symulacji działania semi-aktywnego amortyzatora hydraulicznego w zakresie wysokich częstotliwości i z taką dokładnością, która umożliwi wyciągnięcie praktycznych wniosków do wykorzystania w procesie rozwoju produktu

Dodatkowo, w Rozdziale 1.2 Autor wymienił następujące cele szczegółowe:

- Przeprowadzenie przeglądu literatury w zakresie istniejących konstrukcji hydraulicznych amortyzatorów samochodowych oraz możliwości modelowania dynamiki tego typu elementów zawiesznień samochodowych w zakresie wysokich częstotliwości (do 500 Hz)
- Stworzenie modelu matematycznego (numerycznego) amortyzatora semi-aktywnego w celu jego wykorzystania do a) analizy osiągnięć amortyzatora w zakresie niskich częstotliwości i z uwzględnieniem zjawiska histerezy pod kątem jego adaptacji w modelu zawieszenia pojazdu, b) optymalizacji algorytmów sterowania, c) analizy ryzyka wystąpienia hałasu spowodowanego pracą amortyzatora (w zakresie wysokich częstotliwości), d) redukcji testów laboratoryjnych (wirtualne symulacje)
- Zaproponowanie procedury estymacji parametrów modelu matematycznego amortyzatora semi-aktywnego

- Weryfikacja doświadczalna modelu matematycznego amortyzatora hydraulicznego w zakresie wysokich częstotliwości
- Wdrożenie opracowanej metody w procesie rozwoju produktu u partnera przemysłowego z branży motoryzacyjnej

Ogólnie, zadanie badawcze podjęte przez Doktoranta należy rozpatrywać nie tylko w kontekście stricte badawczym, ale także (a może przede wszystkim) w aspekcie praktycznym (wdrożeniowym), jakim jest rozwój narzędzi i metod obliczeniowych do zastosowania w środowisku przemysłowym (zob. Rozdział 1.4).

Podjęty przez Doktoranta problem badawczy ma zatem charakter aplikacyjny; zadania badawcze zostały zrealizowane we współpracy z partnerem przemysłowym (firma Tenneco jest m.in. producentem elementów zawiesznień samochodowych w tym pasywnych i semi-aktywnych amortyzatorów hydraulicznych).

Badania laboratoryjne z użyciem prototypów samochodowych amortyzatorów hydraulicznych są zwykle kosztowne zwłaszcza w początkowej fazie procesu rozwoju produktu; wymagają przygotowania określonej liczby prototypów i przeprowadzenia licznych testów laboratoryjnych i analiz. Wykorzystanie symulacji numerycznych w procesie rozwoju produktu pozwoli zatem zredukować ich liczbę, skrócić czas rozwoju produktu oraz znacząco zmniejszyć koszty.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 145 stronach rozprawy zawierającej: streszczenia w j. polskim i angielskim, 8 rozdziałów, spis literatury zawierający 133 pozycje, listę symboli i zmiennych, spisy tabel i rysunków. W spisie literatury znalazły się 4 prace Autora, w tym 1 praca konferencyjna, 1 raport oraz 2 prace opublikowane w czasopiśmie z listy MEiN. Rozprawa została napisana w j. angielskim.

Rozdział 1 (*Introduction*) zawiera: sformułowanie problemu badawczego, głównej tezy pracy i celów, określenie zakresu badań oraz plan wdrożenia wyników pracy u partnera przemysłowego.

W **Rozdziale 2** (*Automotive suspension and shock absorbers - theoretical background*) Autor podjął się próby opisu obecnego stanu rozwoju semi-aktywnych układów zawiesznień z uwzględnieniem amortyzatorów z cieczą magnetoreologiczną (MR) oraz amortyzatorów z układami zaworowymi z ciągłą regulacją sił tłumienia. Przedstawia funkcje pełnione przez amortyzator hydrauliczny w zawieszeniu samochodu, zwłaszcza w aspekcie zapewnienia odpowiedniego komfortu pasażera oraz manewrowości podczas jazdy, a także zasadę działania pasywnych amortyzatorów jedno- i dwu-rurowych oraz semi-aktywnych amortyzatorów trzy-rurowych z zaworem aktywnym. Charakterystyka działania typowych zaworów pasywnych o działaniu jednostronnym i zaworów aktywnych (na przykładzie zaworu aktywnego firmy Ohlins) została przedstawiona w Rozdziale 2.5. W Rozdziale 2.6 Doktorant podejmuje się przedstawienia klasyfikacji rodzajów hałasu w zawieszeniach samochodowych (rozdziela hałas strukturalny, hałas akustyczny), podkreśla rolę symulacji komputerowych w analizie hałasu strukturalnego (drgań przenoszonych przez konstrukcję zawieszenia) i analizuje typowe mechanizmy przyczyniające się do wzrostu drgań w zawieszeniu samochodu (drgania wzdłużne tłoczyska, drgania poprzeczne obudowy, tarcie) oraz

metody pomiaru osiągow amortyzatora i zaworów z uwzględnieniem metody pomiaru drgań tłoczyska w układzie amortyzator - górne mocowanie.

Rozdział 3 (*Literature survey of modeling techniques*) jest poświęcony analizie metod modelowania dynamiki amortyzatorów samochodowych. Doktorant podzielił istniejące modele matematyczne na dwie grupy: modele empiryczne (Rozdział 3.1) i modele o parametrach skupionych (w pracy opisanych terminem '*physical models*') (Rozdział 3.2). Interesujące podsumowanie postępu prac badawczych w tej dziedzinie zostało zawarte przez Autora w Tabeli 3.1. Zasadniczo, Autor odwołuje się do większości ważniejszych prac w tym obszarze badawczym. Podsumowanie w Tabeli 3.1. zawiera nieliczne usterki – ich omówienie zawarłem w Rozdziale 4.2 recenzji. W Rozdziale podkreślona jest rola metod modelowania charakterystyk hydraulicznych typowych zaworów płytkowych stosowanych w amortyzatorach samochodowych przy użyciu m.in. metody elementów skończonych oraz zjawisk dynamicznych w amortyzatorze (m.in. histereza, siła adhezji związana z oddziaływaniem powierzchni kontaktu płytki zaworu z przylgnią). Rozdział kończą rozważania Doktoranta dotyczące modelowania dynamiki podatnych mocowań amortyzatora m.in. z wykorzystaniem elementarnych modeli Maxwella, Zenera, Kelvina-Voigta, itp.

W **Rozdziale 4** (*Proposed model description*) Autor przechodzi do przedstawienia opisu modelu matematycznego semiaktywnego amortyzatora samochodowego. Zaprezentowane są tu następujące sub-modele: dynamiki tłoczyska, ściśliwości medium hydraulicznego, podatności ścianek cylindra, zmian ciśnienia w komorach roboczych, dynamiki zaworów roboczych, siły adhezji oraz dynamiki mocowania górnego (na przykładzie modelu histerezowego Bouc-Wen'a o parametrach skupionych). Do opisu nieliniowej zależności między ugięciem zestawu dysków roboczych a działającą na nie siłą posłużono się modelem fenomenologicznym w formie funkcji eksponencjalnej. Obecność sił tarcia została uwzględniona przez Autora w postaci modelu LuGre, a charakterystyki hydrauliczne zaworów w postaci krzywych $P-Q$ (zawory pasywne) i map $P-Q-I$. Model LuGre jest często używany w modelach matematycznych sił tarcia w węzłach uszczelniających. Prezentowane równania są przedstawione na dużym stopniu ogólności i nieodniesione do konstrukcji analizowanego amortyzatora semi-aktywnego.

Tematyka **Rozdziału 5** (*Parameter estimation methodology*) poświęcona jest opisowi metody estymacji parametrów modelu matematycznego. Autor przeprowadził podział parametrów modelu amortyzatora (w liczbie 105) na 3 grupy. - zob. Tabela 5.1. Jedynie wartości parametrów jednej z grup powinny, zdaniem Autora, być objęte procedurą kalibracji. W pozostałych 2 przypadkach wartości parametrów modelu mogą być odczytywane albo z dokumentacji technicznej amortyzatora albo określane na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Jest to, zasadniczo, słuszne założenie. Autor zaproponował dwie zasadniczo odmienne procedury kalibracji parametrów modelu; obie przeprowadzane z użyciem algorytmu genetycznego. W pierwszym przypadku (metoda 1) sugeruje metodę wyznaczania parametrów modelu w oparciu o badania czy symulacje numeryczne pracy wyizolowanych podukładów amortyzatora. Jako alternatywę do pierwszej metody Doktorant zaproponował użycie globalnej analizy wrażliwości metodą Sobola (metoda 2).

Następnie, w **Rozdziale 6** (*Parameters calibration study – approach 1*) Doktorant prezentuje wyniki procedury kalibracji z wykorzystaniem metody 1. Badane były kolejno: zawory amortyzatora, amortyzator (m.in. celem określenia ściśliwości/podatności komór) oraz mocowanie górne. Testy zaworów pasywnych sprowadzały się do wyznaczenia charakterystyk $P-Q$ na

dedykowanym stanowisku przepływowym. Charakterystyki $P-Q$ zaworu aktywnego były wyznaczone przy ustalonych (stałych) wartościach natężenia prądu cewki sterującej. Badania doświadczalne uzupełnia opis testowania mocowania górnego, czego wynikiem są uzyskane przez Autora charakterystyki statyczne i dynamiczne tego podukładu. Każdorazowo, procedura kalibracji została przeprowadzona dla każdego z podukładów z osobna przy użyciu algorytmu genetycznego i założonej funkcji celu. Uzyskane przez Autora wyniki z przeprowadzonych procedur kalibracyjnych zostały przezeń użyte do weryfikacji modelu amortyzatora wraz z mocowaniem górnym. Porównanie wyników testów z wynikami obliczeń przedstawiono w formie wykresów siła-prędkość, siła-przemieszczenie, przebiegów czasowych przyspieszenia tłoczyska oraz widm mocy przyspieszenia tłoczyska w dziedzinie częstotliwości.

Materiał zawarty w **Rozdziale 7** (*Parameter calibration study – approach 2*) można uważać za najważniejszy z punktu widzenia osiągnięcia założonych celów badawczych (wymienionych w Rozdziale 1). Autor proponuje tu metodę alternatywną do opisanej w poprzednim rozdziale. Metoda 2 ma, w intencji Doktoranta, doprowadzić do znacznej redukcji liczby testów z użyciem fizycznego prototypu w porównaniu z metodą 1, której istota polega na przeprowadzeniu szeregu niezależnych testów na wyizolowanych podukładach. Procedura kalibracji parametrów modelu przeprowadzana jest z użyciem zaproponowanego modelu amortyzatora w obrębie jednej pętli optymalizacyjnej. Podobnie jak w Rozdziale 6 Doktorant posługuje się algorytmem genetycznym do realizacji zadań optymalizacyjnych. Autor używa identycznego zestawu parametrów wejściowych jak w Rozdziale 6, ale badania amortyzatora oraz amortyzatora w układzie z mocowaniem górnym są przeprowadzone oddzielnie. Badania kalibracyjne są przeprowadzone przez Autora z użyciem analizy wrażliwości metodą Sobola. Uzyskane wyniki są przedstawione w postaci wykresów czasowych (siły tłumienia, przyspieszenia tłoczyska), wykresów siła-przemieszczenie i widm mocy. **Rozdział 8** (*Summary and discussion*) zawiera podsumowanie uzyskanych wyników oraz omówienie wdrożenia opracowanego przez Autora modelu u partnera przemysłowego.

3. OCENA MERYTORYCZNA

Moim zdaniem, zawartość merytoryczna recenzowanej przeze mnie rozprawy świadczy o sporym doświadczeniu i wiedzy technicznej Doktoranta.

Doktorant bardzo sprawnie posługuje się wybranym przez siebie inżynierskim oprogramowaniem do przeprowadzenia symulacji komputerowych (Siemens AMESIM). Opracował aktualny przegląd literatury w obszarze modelowania dynamiki hydraulicznych amortyzatorów samochodowych. Moim zdaniem, wykazał się zaawansowaną znajomością czynników i mechanizmów wpływających na siły tłumienia generowane przez amortyzator, którym to zresztą poświęca sporo uwagi. Dotyczy to zwłaszcza materiału zawartego w Rozdziałach 3 i 4 oraz 6 i 7. Potrafi zaplanować i zrealizować złożone i obszerne badania doświadczalne z wykorzystaniem zarówno wyizolowanych podukładów amortyzatora, samego amortyzatora jak i złożenia amortyzatora z mocowaniem górnym, a także, poprawnie interpretować wyniki.

Główną tezę pracy w świetle przedstawionych wyników można uznać za potwierdzoną. Dokładność zaprezentowanego narzędzia jest ogólnie zadowalająca w aspekcie predykcji sił tłumienia do 1 m/s. Model z dobrą dokładnością pozwala przewidzieć zachowanie tłoczyska w zakresie częstotliwości do 200 Hz, a w zakresie wyższych częstotliwości zachowany jest trend.

Jednakże, uważam, iż zaprezentowany przez Doktoranta model matematyczny jest niekompletny i zaprezentowany w zbyt dużym stopniu ogólności. Model powinien on zostać zaprezentowany w (ogólnie przyjętej) formie układu równań różniczkowo-algebraicznych oraz schematów hydraulicznych wykonanych przez Autora w środowisku Siemens AMESIM i odniesiony do wybranej przez Autora konstrukcji z Rys. 6.1. Za pewnego rodzaju wzór mogą posłużyć chociażby prace: 1) Gällsjö, A., & Johansson, M. (2012). *Physical Modelling and Automatic Configuration of CES Valve*, gdzie autorzy przedstawiają stworzony przez siebie w środowisku Hopsan w formie diagramów hydraulicznych i równań, 2) André, S. (2013). *Optimization of valve damping* (gdzie model zaworu aktywnego jest przedstawiony przy użyciu równań i schematów hydraulicznych w programie AMESIM) oraz 3) Svennerbrandt, P. (2014). *Force Feedback Control of a Semi-Active Shock Absorber*. Celowo przywołuję tutaj prace, w których autorzy posłużyli się środowiskami graficznymi (Simulink, Hopsan, AMESIM) do budowy modeli matematycznych i takie, w których analizowane były zawory aktywne i amortyzatory o konstrukcji zbliżonej do analizowanej przez Doktoranta. Być może brak tego rodzaju informacji jest spowodowany specyfiką badań i chęcią ochrony własności intelektualnej przez partnera przemysłowego. Uważam jednak, iż zawarta w rozprawie doktorskiej informacja powinna być przedstawiona w formie pozwalającej na chociażby częściowe odtworzenie treści pracy i jej prawidłową ocenę.

Chciałbym podkreślić, iż nie kwestionuję faktu osiągnięcia przez Doktoranta określonych przezeń celów, a jedynie zbyt ogólną i nieprzejrzystą formę. Nie mam przy tym wątpliwości, iż Doktorant biegle posługuje się wybranym przez siebie narzędziem obliczeniowym. Podobnie, nie budzi zastrzeżeń fakt posiadania przez niego umiejętności przeprowadzenia złożonego eksperymentu badawczego, o czym, jak wspomniano, świadczą liczne badania laboratoryjne i symulacje wykonane przez Doktoranta.

Ogólnie jednak, przy wszystkich moich zastrzeżeniach, dobór typu i charakteru badań laboratoryjnych, realizacji i prezentacji symulacji numerycznych, analiza otrzymanych wyników i ich interpretacja oraz struktura pracy nie budzą zastrzeżeń. Praca ma istotny walor poznawczy. Uwagi merytoryczne zawarte są w Rozdziale 4.2 niniejszej recenzji.

4. UWAGI

Uwagi podzieliłem na dwie zasadnicze grupy: uwagi redakcyjne oraz uwagi merytoryczne.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowana starannie. Wykresy i ilustracje są czytelne. Opis pozycji literaturowych w spisie jest prawidłowy (za wyjątkiem poz. 120). Na podkreślenie zasługuje fakt sprawnego posługiwania się przez Doktoranta językiem angielskim.

Streszczenie w języku polskim nieco różni się od streszczenia w języku angielskim.

4.2. Uwagi merytoryczne

Lista uwag ogólnych:

- Zapropozowany przez Autora model matematyczny jest niekompletny. Brak np. równań

ciągłości. Model jest zaprezentowany w formie zbyt ogólnej, aby można było ocenić prawidłowość sformułowanych przez Autora równań matematycznych (w odniesieniu do analizowanej konstrukcji amortyzatora semi-aktywnego z Rys. 6.1).

- Autor posługuje się środowiskiem graficznym Siemens AMESIM przy tworzeniu w/w modelu matematycznego, ale w rozprawie brak chociażby prezentacji schematów hydraulicznych, które musiały być przez niego stworzone w tym edytorze.
- Opis modelu matematycznego sprowadza się więc do ogólnych równań różniczkowych i algebraicznych w Rozdziale 4 i opisu słownego oraz uzyskanych wyników obliczeń prezentowanych z reguły w formie wykresów. W pracy należało umieścić schematy hydrauliczne i równania różniczkowo-algebraiczne odniesione do analizowanej konstrukcji przedstawionej na Rys. 6.1.
- W rozprawie brakuje informacji co do rodzaju użytego przez Autora algorytmu rozwiązywania równań różniczkowo-algebraicznych, kroku całkowania, kryteriów zbieżności, itp.
- Brak liczbowej informacji dot. analizowanych kodów zaworowych. Dane wejściowe są niekompletne, tj. w rozprawie nie zawarto większości danych wejściowych (z reguły podawana była tylko informacja co do parametrów wymuszenia) jak i uzyskanych wyników. Tylko w Rozdziale 7 Autor umieszcza wykresy ilustrujące zbieżność zastosowanego algorytmu.
- Opis stanowisk pomiarowych i metody przetwarzania danych pomiarowych jest często niekompletny, np. w Rozdziale 6 brak informacji dot. częstotliwości próbkowania, użytych czujników, aparatury pomiarowej, danych maszyny wytrzymałościowej, metody przetwarzania danych pomiarowych, etc.
- Brak informacji, czy temperatura oleju wewnątrz amortyzatora była monitorowana podczas badań.
- Zastosowanie klasycznych metod gradientowych do realizacji zadań optymalizacyjnych z ograniczeniami w Rozdziale 6 może być lepszym rozwiązaniem niż algorytm genetyczny. Skala pojedynczego zadania (analizowane są izolowane podukłady) jest dużo mniejsza niż w Rozdziale 7.
- Dlaczego w treści pracy brak badań amortyzatora semi-aktywnego dla natężenia prądu w cewce sterującej zaworu aktywnego $I=0$ A? Analizowany przez Doktoranta zawór aktywny firmy Ohlins posiada najprawdopodobniej tryb bezpieczeństwa (*fail-safe*). Czy zatem charakterystyka $P-Q-I$ na Rys. 6.1. jest całkowicie poprawna?
- Czy były rozważane badania i symulacje numeryczne w zakresie wyższych prędkości wymuszenia do 2 m/s lub wyżej?
- Czy Autor uwzględnił rozważał uwzględnienie bezwładności mocowania górnego w modelu AutoBushFD? Czy może to mieć pozytywny wpływ na poprawę uzyskanych wyników?
- Czy Doktorant rozważał uwzględnienie w modelu matematycznym strat hydraulicznych przy przepływie cieczy pomiędzy cylindrem wewnętrznym a cylindrem pośredniczącym?
- Jaki wpływ na dokładność wyników w zakresie wyższych częstotliwości drgań może mieć uwzględnienie bezwładności cieczy w komorach roboczych?

- W jakim stopniu nieuwzględnienie dynamiki zaworu aktywnego (tj. jego reprezentacja w modelu w formie map $P-Q-I$) może mieć wpływ na jakość otrzymanych wyników?
- Co Doktorant uważa za swoje oryginalne osiągnięcie (oprócz zapewne zmodyfikowanej procedury estymacji parametrów opisanej w Rozdziale 7)?
- Wynik weryfikacji modelu matematycznego powinien zostać uzupełniony o porównanie charakterystyk statycznych siła-prędkość modelu względem wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych.

.Lista uwag szczegółowych:

- Autor nie podaje informacji odnośnie wersji użytego oprogramowania Siemens AMESIM.
- Brak odsyłacza lit. w opisie Rys. 2.10 i 2.12, 2.14 i 2.15.
- Podsumowanie w Tabeli 3.1. zawiera kilka usterek:
 - Model Langa (Ref. [83]) pozwala uwzględnić podatność ścianek cylindra – zob. Tabela 3.1.
 - Model Lee (Ref. [85]) zawiera uproszczony model kawitacji. Lee wykorzystuje w swoim modelu metodę elementów skończonych do obliczenia ugięć dysków roboczych w zaworze tłoka – zob. Tabela 3.1.
 - Sikora zastosował model sił adhezji np. w pracy: STUDY OF FLOW-INDUCED VIBRATION PHENOMENA IN AUTOMOTIVE SHOCK ABSORBERS, Mechanics and Control 33 (2014), 58-64
- Czy w badaniach Autor analizował użycie innych modeli mocowania górnego niż AutoBushFD (zob. Rozdział 4.5)?
- Brak jednostek w Tabeli 5.1.
- Rys. 6.2 jest częściowo poprawny.
- Rys. 6.6 jest nieczytelny.
- Brak jednostek w Tabeli 6.4.
- Brak podsumowania otrzymanych wyników (wartości parametrów modelu) dla badań w Rozdziale 6 i 7.
- Brak w rozprawie równań użytych przez Autora do obliczenia indeksów Sobola.
- Czy Autor rozważał uproszczenie procedury kalibracji w Rozdziale 7 przez zastosowanie klasycznego algorytmu optymalizacyjnego z więzami (ograniczeniami)? Czy tego typu metody były przez Autora rozważane?
- Rys. 7.9 jest nieczytelny.
- Wykres siła-przemieszczenie (zob. Rys. 7.10) powinien być uzupełniony o wykres siła-prędkość.

Podczas publicznej obrony pracy doktorskiej oczekuję od Doktoranta jednoznacznego określenia oryginalnego wkładu w dyscyplinę inżynieria mechaniczna, przedstawienia modelu matematycznego na reprezentatywnym przykładzie trzy-rurowego semi-aktywnego amortyzatora hydraulicznego w formie równań różniczkowo-algebraicznych i diagramów ilustrujących strukturę modelu w środowisku AMESIM.

5. KONKLUZJA

Podsumowując, uważam, iż wyniki badań Pana mgr inż. Szymona Żymełki są wartościowe z punktu widzenia dyscypliny inżynieria mechaniczna. Wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych przez Doktoranta z użyciem opracowanego modelu matematycznego są zweryfikowane wynikami badań laboratoryjnych.

Mimo moich zastrzeżeń wymienionych w Rozdziale 4 niniejszej recenzji, uważam, iż Doktorant poprawnie sformułował problem badawczy, uzasadnił jego podjęcie (zwłaszcza w kontekście wdrożeniowym), wykazał się sporą wiedzą w zakresie dynamiki samochodowych amortyzatorów hydraulicznych. Zaproponował autorską procedurę kalibracji modelu. Przeprowadził liczne badania doświadczalne i numeryczne, a także przeprowadził poprawną analizę otrzymanych wyników.

Przedstawione przez Doktoranta w pracy wyniki badań mogą mieć cenny wymiar finansowy dla partnera przemysłowego w aspekcie wykorzystania opracowanego modelu i procedury jego kalibracji do budowy wirtualnego prototypu amortyzatora, co może mieć przełożenie w przyszłości na zmniejszenie liczby testów laboratoryjnych z użyciem fizycznych prototypów i (finalnie) redukcję kosztów.

Dorobek naukowy Doktoranta, na który powołuje się w rozprawie zawiera 4 pozycje. W spisie literatury przywołane są kolejno: 1 referat konferencyjny, 1 raport oraz 2 publikacje recenzowane opublikowane w czasopismach z listy MEiN (punktacja: 40 i 70 pkt. wg aktualnie obowiązującego wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych).

Moim zdaniem, przedstawione w rozprawie wyniki spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą aktualnie **Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 20.04.2023 r., poz. 742)**. Recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska może służyć zatem za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie wnioskowi Autorowi stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Prof. Janusz Gołdasz

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)