



Bydgoszcz, 5 marca 2025

prof. dr hab. inż. Dariusz Skibicki
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Czekaja
pt. „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych
z uwzględnieniem kolizji podzespołów”.

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest pismo Rektora Politechniki Opolskiej, dr hab. inż. Marcina Lorenca, nr RR/127/2025, z dnia 27 stycznia 2025.

2. Ocena formalna rozprawy

Całość rozprawy liczy 142 strony. Rozprawa zawiera wykaz oznaczeń oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis treści jest nadmiernie rozbudowany, co utrudnia zrozumienie struktury pracy.

Tytuł rozprawy „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów” jest niepoprawny stylistycznie. Ponadto, co prawda daje wyobrażenie o tematyce pracy, ale nie informuje jaki cel jej autor chce osiągnąć.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w tematykę pracy oraz definiuje problem badawczy, który stanowi jej przedmiot. Dzięki dobremu wprowadzeniu pracy jest czytelny. Wstęp kończy się opisem etapów przeprowadzonych badań, co stanowi swoistą mapę dysertacji. Szkoda, że autor nie odnosi się w niej do numerów rozdziałów swojej pracy.

Przegląd literatury w rozprawie doktorskiej powinien prowadzić do określenia aktualnego stanu wiedzy na temat zagadnień badanych przez autora. Niestety, Rozdział 2 pt. „Przegląd literatury” tylko częściowo spełnia tę funkcję, ponieważ w przeważającej części zawiera liczne informacje podręcznikowe (np. opis rodzajów drgań) oraz zagadnienia, które nie zostały wykorzystane w badaniach autora (np. wykresy zmęzeniowe Woehlera, Ramberga-Osgooda, Mansona-Coffina-Basquina). Uważam, że podrozdziały 2.1–2.6 zawierające te informacje są zbędne. Wybrane fragmenty przeglądu mogłyby ewentualnie znaleźć się w rozdziale poświęconym metodyce badań, którego, swoją drogą, brakuje w rozprawie. Dotyczy to

na przykład podrozdziałów 2.5.3 Metoda Dirlika oraz 2.5.6 Metoda Tovo-Benassciutti. Jako główny cel swoich badań autor wskazuje opracowanie metody obliczeniowej pozwalającej na adaptację metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji w warunkach dynamiki nieliniowej. Dlatego uważam, że w rozdziale „Przegląd literatury” zasadne byłoby pozostawienie jedynie informacji bezpośrednio odnoszących się do przedmiotu rozprawy a mianowicie podrozdziałów 2.7 Standardowa procedura obliczania trwałości elementów poddanych testom wibracyjnym oraz 2.8 Linearyzacja systemów nieliniowych.

Jak wcześniej zazaczyłem, w pracy brakuje rozdziału poświęconego metodom i narzędziom badawczym. Autor za każdym razem włącza prezentację swojego warsztatu badawczego do rozdziałów przedstawiających wyniki badań. Na przykład w rozdziale 3 „Badania eksperymentalne odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia 1 DOF” znajdują się podrozdziały: 3.1 Stanowisko testowe, 3.2 Układ badawczy oraz 3.3. Według mnie oddzielenie części metodologicznej od prezentacji i analizy wyników jest standardem w nauce.

Tytuł rozdziału 4 „Wpływ zderzeń układu 1 DOF na trwałość zmęczeniową próbki – Symulacja MES” nie pozwala zrozumieć roli tej części pracy w całej dysertacji. Dopiero w trakcie lektury czytelnik może się zorientować, że podrozdziały 3.4 i 3.5 to najprawdopodobniej badania wstępne, mające na celu określenie charakterystyk stanowiska badawczego, natomiast rozdziały 4 i 5 dotyczą badań zasadniczych. Dobrą praktyką naukową jest w takich przypadkach stosowanie terminów „badania wstępne” i „badania zasadnicze”.

W rozdziale 5 „Badania eksperymentalne odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki” przedstawiono szereg wyników w formie wykresów. Niestety, wiele z nich, np. rysunki 62–75, nie zostało omówionych.

W rozdziale 6 przedstawiono porównanie wyników badań układu uproszczonego z układem rzeczywistym. Ponownie, dopiero z treści rozdziału dowiadujemy się, że celem badań była analiza możliwości wykorzystania układu o jednym stopniu swobody jako symulatora dynamiki rzeczywistego zawieszenia sprężarki. W wielu rozdziałach, w tym również w szóstym, brakuje wprowadzenia informującego o ich celu i zakresie.

Identyczną uwagę można sformułować w odniesieniu do układu rozdziału 9 „Pomiary odkształceń sprężarki przy zderzeniach”. Rozdział nie zawiera podrozdziałów, więc opis warsztatu badawczego jest połączony z prezentacją wyników i wnioskami. We wstępie zamiast wprowadzenia do treści rozdziału znajdujemy jedynie informacje na temat techniki tensometrycznej.

Wysoko oceniam rozdział 11, zatytułowany „Kierunki dalszych badań”. Autor zamieścił w nim katalog przyjętych założeń i uproszczeń modelowania, co świadczy o jego świadomości ograniczeń własnego warsztatu naukowego. Po drugie, rozdział ten dowodzi, że rozprawa doktorska jest dla autora nie tylko świadectwem jego dotychczasowych osiągnięć, ale także fundamentem dalszego rozwoju naukowego.

Podsumowując, dbałość autora o jakość tekstu rozprawy oceniam dość krytycznie. Można wyróżnić trzy główne grupy niedoskonałości:

1. Układ pracy oraz nazwy i struktura rozdziałów są mało czytelne i mogą wprowadzać czytelnika w błąd. Brak wstępów w rozdziałach, które powinny określać ich treść i miejsce w rozprawie, sprawia, że problem ten staje się jeszcze bardziej odczuwalny.
2. W pracy występują liczne potknięcia stylistyczne, które czasami są na tyle poważne, że utrudniają lub wręcz uniemożliwiają zrozumienie zdań. Na przykład: „W pracy skupiono się na opracowaniu metody modelowania układu zawieszenia sprężarki do obliczeń metodą elementów skończonych (MES).” Zdanie to pochodzi ze streszczenia, a więc kluczowego elementu pracy. We wprowadzeniu czytamy natomiast: „Procedura testowania opiera się na zasadzie oceny trwałości konstrukcji ...”. Co oznacza „zasada oceny”? Dalej w tekście pojawia

się sformułowanie: „Badania początkowo przeprowadzono od eksperymentów na uproszczonym modelu stanowiska ...”. Co znaczy „przeprowadzono od eksperymentów”? Podobne problemy występują w innych miejscach pracy, np. w podrozdziale 2.3.2: „Logicznie rzecz biorąc, drgania konstrukcji postępują w czasie, ...” – zdanie to jest zupełnie niezrozumiałe. Niepoprawny stylistycznie jest również tytuł podrozdziału 8.1: „8.1. Metoda 1 – Zmienna w częstotliwości sztywność zastępcza tłumików.”

3. Rysunki zamieszczone w pracy są często traktowane niedbale. Na przykład Autor zamieszcza skany słabej jakości. W innych przypadkach kandydat zaniedbuje skalowanie osi, przez co wykresy stają się mniej czytelne. Wartości na wykresie z rys. 81 zmieniają się w zakresie od 0,6 do 0,8, natomiast granice wartości zostały ustawione od 0 do 2. Opisy numerowanych linii odniesienia na pewnych rysunkach są wyjaśnione dopiero w tekście pracy, a nie w podpisie rysunku – patrz rys. 51 i 52. Niektóre rysunki pozostają nieskomentowane w tekście, np. rys. 45 b, c i d oraz rysunki od 62 do 75. Innym przykładem braku dbałości są rysunki 90 i 99. Prezentują one istotne osiągnięcia kandydata, ale z niewiadomej przyczyny zawierają opisy w języku angielskim.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1 Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna

Autor wykazuje się dobrą znajomością podstaw teoretycznych analizy drgań, przetwarzania sygnałów drganiowych oraz obliczeń zmęczeniowych. Posiada szeroką wiedzę na temat badań dotyczących odpowiedzi pojazdów na wymuszenia w postaci drgań, które są powszechnie realizowane w przemyśle samochodowym.

Doktorant zna metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej dla obciążeń wibracyjnych o charakterze losowym, zarówno dla systemów liniowych, jak i nieliniowych. Rozumie specyfikę dynamicznych modeli obiektów technicznych podlegających drganiom nieliniowym oraz konieczność upraszczania takich modeli za pomocą metod linearyzacji. Potrafi wskazać i opisać przykłady praktycznych zastosowań linearyzacji modeli dynamicznych.

Autor posiada teoretyczną wiedzę w zakresie obliczeń zmęczeniowych w warunkach obciążeń losowych. Zna i rozumie klasyczne podejścia do opisu obciążeń, takie jak metoda Rainflow, a także dobrze orientuje się w metodach spektralnych, w tym w analizie widmowej gęstości mocy. Potrafi podać liczne przykłady praktycznej realizacji tego typu obliczeń.

Kandydat zna i stosuje metodę elementów skończonych; korzystając z tej metody przeprowadził wiele analiz dynamicznych, zarówno modalnych, jak i harmonicznych.

Doktorant posiada także wiedzę na temat podstaw działania i stosowania tensometrycznych układów pomiarowych.

Łącznie Autor skorzystał z 79 źródeł literaturowych oraz stron internetowych, cytując artykuły z uznanych czasopism naukowych. Większość źródeł pochodzi z ostatnich 10 lat, co świadczy o ich aktualności.

Podsumowując, rozprawa doktorska prezentuje dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

3.2 Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

W rozdziale 1 doktorant przedstawił poprawnie sformułowany problem badawczy, mieszczący się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Pomimo zastrzeżeń dotyczących układu pracy, zgłoszonych w ocenie formalnej rozprawy, można stwierdzić, że autor poprawnie przeprowadził analizę literatury w kontekście celu badań i obszaru jego zainteresowań naukowych.

W podrozdziałach 3.1 i 3.2 autor ze zrozumieniem opisał stanowisko badawcze, składające się z układu pomiarowego, elementu wykonawczego w postaci wzbudnika drgań, jednostki kontrolno-pomiarowej oraz układu badawczego. Stanowisko badawcze stanowi element wyposażenia Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej, natomiast układ badawczy został najprawdopodobniej wykonany przez autora. W podrozdziale 3.3 autor określił procedurę badawczą obiektu badań dynamicznych. Zbudowanie układu badawczego oraz opracowanie procedury badawczej świadczą o samodzielności doktoranta w prowadzeniu badań naukowych.

Analiza przeprowadzona w rozdziałach 3.4 i 3.5 charakteryzuje cechy odpowiedzi dynamicznej badanego obiektu w warunkach ze zderzeniem i bez zderzenia. Autor porównał te odpowiedzi pod względem wartości skutecznej sygnałów RMS oraz cech charakterystycznych wykresów PSD przyspieszeń. Tym samym samodzielnie zidentyfikował cechy charakterystyczne liniowej i nieliniowej odpowiedzi układu dynamicznego.

W rozdziale 4 doktorant wyznaczył trwałość zmęczeniową próbki na podstawie widmowej gęstości mocy naprężeń, stosując odpowiednie dla tego zadania metody obliczeniowe.

W rozdziale 5 kandydat samodzielnie zbadał odpowiedź dynamiczną układu zawieszenia sprężarki. W tym celu zaprojektował układ badawczy oraz wykorzystał procedurę badawczą opracowaną dla układu uproszczonego o jednym stopniu swobody.

Kandydat biegle posługuje się metodą elementów skończonych. W programie Nastran zbudował model układu zawieszenia sprężarki, uwzględniając zagęszczenie siatki elementów, definicję warunków kontaktu pomiędzy częściami modelu. Korzystając z modelu wykonał analizę modalną i harmoniczną.

Doktorant wykazał się umiejętnością pomiaru odkształceń układu dynamicznego, wykorzystując tensometry rozetkowe, moduły pomiarowe oraz zaawansowaną architekturę pętli pomiarowej w programie LabVIEW.

W swojej rozprawie doktorskiej Autor zastosował odpowiednie naukowe narzędzia i metody badawcze. Do badań wykorzystał stanowisko badawcze z autorskim układem badawczym. Do analizy danych posłużył się metodami statystycznymi do opisu losowego sygnału przyspieszeń, wykresami przebiegów czasowych i histogramów przyspieszeń, wykresami widmowej gęstości mocy, wartościami skutecznymi RMS, analizą modalną oraz analizą MES do wyznaczania odkształceń i naprężeń.

Podsumowując, kandydat zaplanował i przeprowadził serię badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych. Wyniki poprawnie zaprezentował i przeprowadził ich samodzielną analizę. Swoją pracę zakończył podsumowaniem i wnioskami. W osobnym rozdziale doktorant opisał dalsze kierunki badań, co świadczy o jego dojrzałości naukowej.

Biorąc pod uwagę wszystkie opisane wyżej działania doktoranta, można stwierdzić, że wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

3.3 Ocena oryginalności rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej

Za osiągnięcie naukowe można uznać procedurę testową badań dynamicznych z kolizją i bez kolizji, przedstawioną w rozdziale 3.3. Procedura została zastosowana do określenia charakterystyk stanowiska badawczego, badania układu o jednym stopniu swobody oraz analizy układu zawieszenia sprężarki.

Drugim osiągnięciem jest sporządzenie charakterystyki stanowiska badawczego pod względem jego odpowiedzi dynamicznej w warunkach z kolizją i bez kolizji, na podstawie charakterystyk PSD oraz wartości RMS. Autor wykazał, że kolizja wpływa na powstawanie nieliniowości w układzie, ale nie ma istotnego wpływu na całkowitą energię transmitowaną przez system.

Trzecim osiągnięciem jest określenie wpływu zderzeń na trwałość zmęczeniową. Autor wykazał, że obecność zderzeń prowadzi do wzrostu naprężeń w próbce, co skutkuje niemal 2000-krotnym obniżeniem jej trwałości. Istotnym ograniczeniem uzyskanych wyników jest fakt, że badanie przeprowadzono na pojedynczej próbce. Wyciągnięcie wiarygodnych wniosków w nauce o zmęczeniu materiałów wymaga analizy większej liczby próbek. Niemniej jednak na podstawie opracowanej przez siebie metodyki, doktorant uzyskał wykresy zmęczeniowe rzeczywistego układu wsporników sprężarki pod działaniem obciążeń zmiennych.

Czwartym osiągnięciem jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych odpowiedzi dynamicznej rzeczywistego układu zawieszenia sprężarki. Badanie prowadzi do wniosku, że układ o jednym stopniu swobody może być wystarczająco dobrym modelem zachowania rzeczywistego układu zarówno w warunkach bez zderzeń jak i ze zderzeniami.

Piątym i szóstym osiągnięciem jest opracowanie i praktyczne zastosowanie dwóch metod symulacji MES układu zawieszenia sprężarki z uwzględnieniem zderzeń. Pierwsza metoda polega na zmianie sztywności tłumików drgań w zależności od częstotliwości. Dzięki temu funkcja transferu układu pozwala na osiągnięcie wyników zgodnych z pomiarami eksperymentalnymi. Druga metoda autorstwa Kandydata polega na kontrolowaniu ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń modelu numerycznego, przy ustalonej sztywności tłumików. Metoda bazuje na założeniu, że całkowita moc sygnału wyjściowego układu nieliniowego musi być równa wartości mocy sygnału wyjściowego układu liniowego. Metody zostały zweryfikowane na podstawie badań eksperymentalnych obiektu rzeczywistego z użyciem technik tensometrycznych.

Podsumowując, rozprawa doktorska opisuje sześć oryginalnych rozwiązań dotyczących zastosowania wyników badań naukowych w praktyce gospodarczej.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Czekaja pt. „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.



prof. dr hab. inż. Dariusz Skibicki