



Dr hab. inż. Sławomir Duda, prof. PŚ

Gliwice, 07.04.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Karola Czekaja

pod tytułem:

„Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów”

podstawa opracowania: pismo Rektora Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Marcina Lorenca nr RR/129/2025 z dnia 27.01.2025 roku, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Adam Niestony a opiekunem pomocniczym dr inż. Artur Dziura (ZF CVS).

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Wyznaczanie stanu naprężenia w konstrukcjach mechanicznych podlegających obciążeniom zmiennym różni się istotnie od obliczeń przy obciążeniach statycznych. Obliczenia statyczne umożliwiają stosunkowo dokładnie wyznaczyć wyężenie poszczególnych elementów, natomiast wyniki obliczeń zmęczeniowych są najczęściej obarczone błędem, gdyż nie można przewidzieć i dokładnie uwzględnić wszystkich czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową elementów. Aspekt ten staje się tym bardziej znaczący w przypadku układów poddawanych cyklicznym zmianom obciążenia o charakterze losowym. Z taką sytuacją mamy do czynienia chociażby w układach wielocłonowych, gdzie poszczególne masy połączone są ze sobą za pomocą par kinematycznych z nieliniowymi charakterystykami sprężysto tłumiącymi bądź z luzami. Tego typu układy występują chociażby w przemyśle samochodowym np. zawieszenia pojazdów z ograniczeniami przemieszczeń poszczególnych komponentów.

Przeprowadzanie losowych testów wibracyjnych takich urządzeń polega na doprowadzeniu testowanego urządzenia do awarii, co umożliwia określenie żywotności urządzenia oraz identyfikacji jego słabych miejsc. Działania te są kosztowne i możliwe jedynie w przypadku wytworzenia gotowego prototypu. W sukurs przychodzą techniki obliczeń komputerowych. Można je prowadzić w dziedzinie czasu lub w dziedzinie częstotliwości. Druga grupa wymaga liniowych modeli rozpatrywanego urządzenia. Recenzowana praca doktorska mgr inż. Karola Czekaja obejmuje zagadania linearyzacji nieliniowych oddziaływań dynamicznych na model obiektów technicznych opracowany w konwencji metody elementów skończonych w celu przeprowadzenia symulacji numerycznych wpływu drgań o charakterze losowym na rozpatrywaną konstrukcję.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Dysertacja realizowana była jako doktorat wdrożeniowy we współpracy z zakładem ZF.

2. Przegląd treści pracy

W pracy zaprezentowano sposób modelowania układu zawieszenia sprężarki metodą elementów skończonych z uwzględnieniem efektów nieliniowych wynikających ze zderzeń tłumików drgań zastosowanych w jej układzie zawieszenia w celu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej w wybranych węzłach konstrukcji.

Autor opracował modele matematyczne rozpatrywanego urządzenia - model zawieszenia sprężarki metodą elementów skończonych, dokonał adaptacji do modelu liniowego w celu uwzględnienia w obliczeniach numerycznych efektów zderzeń tłumików z konstrukcją wsporczą. W ramach badań na układzie rzeczywistym dokonał ponadto pomiarów odkształceń w wybranych punktach, w celu weryfikacji skuteczności zaproponowanych metod obliczeniowych. Badania rozpoczęto od budowy stanowiska badawczego stanowiącego uproszczony model rozpatrywanych zjawisk, które stanowiło przyczynek do przedstawienia metodyki badań dla układu docelowego.

Rozprawę doktorską podzielono na dwanaście rozdziałów, uzupełnionych streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz wykazem oznaczeń zawartych w pracy.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wprowadzenie”, zamieszczono ogólne informacje stanowiące wprowadzenie do pracy. Autor w tym samym rozdziale zawarł cel i zakres pracy. Cel został scharakteryzowany przez Autora jako „opracowanie metody obliczeniowej opartej na metodzie elementów skończonych (MES), która pozwala na adaptację standardowych metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji w specyficznych warunkach dynamiki nieliniowej, występujących podczas testu typu random vibration”. Zakres pracy został przedstawiony w postaci krótkiego opisu kolejnych działań podejmowanych w ramach realizowanego zadania badawczego.

W rozdziale drugim, 42 stronicowym, zatytułowanym „Przegląd literatury” przedstawiono obszerny przegląd literatury dotyczącej opisu podstawowych rodzajów drgań układu o jednym stopniu swobody, analiz drgań układów dyskretnych o wielu stopniach swobody, przetwarzania sygnałów, metod spektralnych wyznaczania trwałości zmęczeniowej oraz przypadków linearyzacji układów nieliniowych w analizie drgań.

Rozdział trzeci dotyczy przedstawienia i omówienia wyników badań uzyskanych na opracowanym stanowisku stanowiącym uproszczony model rozpatrywanego obiektu. Autor zaproponował kompleksowe stanowisko badawcze mające na celu zademonstrować wpływ odboju elementu tłumiącego w pozycjach krańcowych na odpowiedź dynamiczną układu.

W kolejnym rozdziale, czwartym, Autor przedstawia kontynuację badań opisanych w rozdziale trzecim, z tym że do zaproponowanego stanowiska dołącza próbki z karbem. Badania te mają na celu przeprowadzenie weryfikacji wpływu efektów powstawania dodatkowych sił w trakcie odboju gumowego elementu tłumiącego na trwałość zmęczeniową próbek. Opisane badania mają charakter teoretyczny. Do zamodelowania próbek wykorzystano metodę elementów skończonych. Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdziły tezę o znaczącym wpływie uwzględniania efektu odboju tłumika na wytrzymałość zmęczeniową badanych próbek.

Rozdział piąty zatytułowany „Badania eksperymentalne odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki” poświęcony został implementacji

zaproponowanej metody badawczej do przeprowadzenia badań odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki. Procedura testowa układu rzeczywistego opierała się na schemacie wypracowanym dla układu uproszczonego. Wnioskiem wpływającym z przeprowadzonych badań było to, że zarówno model uproszczony jak i zawieszenie sprężarki reagują proporcjonalnym wzrostem RMS przyspieszeń na masie drgającej przy wzroście wymuszenia. Wartość RMS przyspieszeń wyjściowych pozostaje porównywalna w obydwu scenariuszach z uwzględnieniem i bez uwzględnienia odboju. Stąd sformułowany przez Autora wniosek, iż obecność kolizji w badanym zakresie RMS przyspieszeń wejściowych (0.1g – 1.1g) nie wpływa znacząco na całkowitą energię transmitowaną przez system, a jedynie zmienia charakter odpowiedzi.

W rozdziale szóstym Autor zawarł porównanie wyników badań układu uproszczonego z układem rzeczywistym. Analiza wyników prowadzi Doktoranta do spostrzeżenia, że zaproponowana metoda badawcza wskazuje na duży potencjał wykorzystania układu o jednym stopniu swobody jako symulatora dynamiki układu rzeczywistego zawieszenia sprężarki.

Rozdział siódmy „Symulacja MES układu zawieszenia sprężarki w warunkach bez zderzeń” odnosi się do opracowanego metodą elementów skończonych modelu sprężarki. Opisano sposób dyskretyzacji modelu oraz rodzaj zastosowanych elementów skończonych. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych, w tym analizy modalnej oraz odpowiedzi układu na wymuszenie harmoniczne. W ostatnim podrozdziale przedstawiono wyniki symulacji zachowania się układu na wymuszenie losowe wynikające z opracowanej gęstości widmowej mocy obciążenia. Zaprezentowano barwne mapy zredukowanych naprężeń skutecznych, wskazujące miejsca ich największej intensywności.

W rozdziale ósmym zatytułowanym „Propozycja metody symulacji MES układu zawieszenia sprężarki w warunkach ze zderzeniami” Autor przedstawił dwie metody umożliwiające uwzględnianie rzeczywistych nieliniowości w modelu liniowym, wynikających z odboju elementów gumowych w układzie zawieszenia sprężarki w trakcie testu typu drgania losowe: metodę sztywności zastępczej oraz metodę ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń.

Rozdział dziewiąty dotyczy eksperymentalnej weryfikacji wyników uzyskanych na drodze symulacji numerycznej. Doktorant przeprowadził badania stanowiskowe z użyciem tensometrów oporowych. Na badanej konstrukcji wyodrębniono sześć punktów pomiarowych. Miejsca klejenia rozet ustalono w oparciu o wyniki badań



numerycznych. Każdy punkt pomiarowy ze względu na ilość dostępnych kanałów był mierzony niezależnie.

Rozdziały dziesiąty, jedenasty i dwunasty to rozdziały poświęcone wnioskowi, dalszym kierunkom badań i spisowi literatury.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od zagadnień podstawowych jak przedstawienie opisu drgań układów o jednym stopniu swobody, teorii przetwarzania sygnałów, obliczania trwałości zmęczeniowej, poprzez linearyzację układów nieliniowych w analizie układów drgających do zagadnień ściśle związanych z rozwiązywaniem postawionego problemu badawczego „opracowania metody obliczeniowej opartej na metodzie elementów skończonych (MES), która pozwala na adaptację standardowych metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji w specyficznych warunkach dynamiki nieliniowej”. Cel ten był osiągany stopniowo. W pierwszym kroku Doktorant zaproponował autorski, uproszczony model zawieszenia sprężarki. Zaprojektowany symulator drgań umożliwił Autorowi prognozowanie, skalowanych przebiegów odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki. Jak zauważył Doktorant daje to możliwość przewidywania odpowiedzi na zmienne parametry układu wynikające ze zmian np.: masy układu, sztywności sprężyn czy sztywności/tłumienia odbojników gumowych. Ze względu na zdolności patentowe opracowanego stanowiska złożono w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej wniosek o udzielenie patentu na wynalazek nr P.448984. W kolejnym kroku mgr inż. Karol Czekaj zbadał wpływ zderzeń układu 1 DOF na trwałość zmęczeniową próbki. Badania te miały charakter symulacji numerycznych. W wyniku nakładania się częstości drgań własnych próbki z częstością wymuszenia, będącą efektem zderzeń, odnotowano znaczący wzrost naprężeń w karbie próbki rzutujący na jej trwałość zmęczeniową. Niestety badań tych nie zweryfikowano na stanowisku badawczym.

W dalszej części pracy Autor, na opracowanym stanowisku, przeprowadził badania dla układu rzeczywistego – trójpunktowego zawieszenia sprężarki. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych Doktorant zauważył, że rzeczywisty układ wykazuje zachowanie dynamiczne podobne do analizowanego uprzednio uproszczonego modelu układu o 1 stopniu swobody. Pozwoliło to na wysunięcie

ciekawego spostrzeżenia, że zaproponowana metoda wskazuje na duży potencjał do wykorzystania układu o jednym stopniu swobody jako symulatora dynamiki układu rzeczywistego zawieszenia sprężarki.

Dotychczasowe działania pozwoliły Doktorantowi na wyznaczenie wymuszeń, którym miał być poddany model układu zawieszenia sprężarki opracowany za pomocą metody elementów skończonych. Autor poddał dyskretyzacji wszystkie zespoły sprężarki. Mając na uwadze, że elementami o znaczącej podatności są płyty wspornikowe, można zapytać, czy nie korzystnie byłoby przyjąć pozostałe elementy jako bryły nieodkształcalne? Zwłaszcza, że Doktorant nie przedstawia wyglądu modelu „od wewnątrz”. Nie podał ostatecznie ilości zastosowanych elementów skończonych oraz tego, ile model ma stopni swobody? Przeprowadzone symulacje pozwoliły wyznaczyć częstości drgań własnych i odpowiadające im postacie - teoretyczna analiza modalna oraz badania odpowiedzi dynamicznej na wymuszenie częstotliwościowe. Porównanie charakterystyk transferu otrzymanych z symulacji numerycznych i badań stanowiskowych pozwoliło Doktorantowi na uwiarygodnienie i uszczegółowienie przyjętego modelu MES zawieszenia sprężarki o tłumienia. Symulacje numeryczne zakończone są przeprowadzeniem obliczeń wartości skutecznej naprężeń RMS elementów zawieszenia sprężarki. Uwzględnienie w obliczeniach numerycznych zjawiska zderzenia prowadzi do uzyskania modelu nieliniowego. W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych rzeczywistego zachowania dynamicznego zawieszenia sprężarki w dziedzinie częstotliwości wymagane było opracowanie modelu liniowego uwzględniającego wspomniane efekty nieliniowe. Mgr inż. Karol Czekaj w swojej rozprawie zaproponował dwie metody: metodę sztywności zastępczej oraz metodę ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń. Pierwsza metoda polegała na zastąpieniu rzeczywistych elementów zawieszenia (sprężyny i elementu gumowego) poprzez wprowadzenie w układ zawieszenia łączników typu CBUSH, który reprezentuje sprężysto tłumiące połączenie między dwoma węzłami o charakterystyce zależnej od częstotliwości. Charakterystykę taką Doktorant wyznaczył z układu o 1 stopniu swobody. Natomiast metoda druga polega na dostrojeniu sztywności tłumików za pomocą ekwiwalentnej skutecznej wartości przyspieszeń. Niezmiennie wartościowe jest poddanie weryfikacji otrzymanych rozwiązań z symulacji z wynikami otrzymanymi z badań eksperymentalnych. Autor przeprowadził pomiary odkształceń w wybranych punktach płyt wsporczych z wykorzystaniem pomiarów tensometrycznych. Punkty pomiarowe zostały dobrane na podstawie przeprowadzonych wcześniej obliczeń numerycznych. W otrzymanych rozwiązaniach teoretycznych i eksperymentalnych widoczne są różnice w wartościach naprężeń w punktach kontrolnych. W zależności od

zastosowanej metody uzyskane wartości są albo wyższe albo niższe w stosunku do wartości naprężeń wyznaczonych z badań eksperymentalnych. Pomimo tych różnic, jak wykazuje Autor wyniki otrzymane z symulacji numerycznych metodą MES odzwierciedlają trend zaobserwowany w pomiarach eksperymentalnych, szczególnie w modelu, w którym zastosowano metodę ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń do zamodelowania połączeń sprężystych sprężarki z ostoją. Mając na uwadze złożoność rozpatrywanego układu, wykazującego silne nieliniowości w swojej strukturze, opracowany model i metodyka jego linearyzacji stanowią oryginalne osiągnięcie naukowe, wykazujące równocześnie znaczenie aplikacyjne.

W przemyśle zaproponowany przez Doktoranta model układu zawieszenia sprężarki może znaleźć zastosowanie dla celów poznawczych, oszacowania wytrzymałości zmęczeniowej nowo projektowanych urządzeń tego typu.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania modelu zawieszenia sprężarki w konwencji MES i metodyki umożliwiającej na adaptację standardowych metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji z nieliniowymi charakterystykami sprężystymi. Zaproponowany tok postępowania wykorzystał do wyznaczenia naprężeń w konstrukcji sprężarki. Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora:

- opracowania modelu układu zawieszenia sprężarki bazującego na metodzie elementów skończonych,
- opracowania metodyki linearyzacji nieliniowych charakterystyk sprężysto - tłumiących elementów zawieszenia sprężarki,
- opracowania algorytmów i ich implementacji programowej dla celów przeprowadzenia symulacji numerycznych.

Opracowane modele oraz algorytmy stanowią oryginalne oraz nowatorskie podejście do problemu wyznaczania wpływu odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk zawieszenia na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji, co jest niewątpliwie dużym osiągnięciem naukowym i aplikacyjnym Autora.

Recenzowana praca wskazuje, że Doktorant wykazał się umiejętnością łączenia wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu inżynierii mechanicznej. Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne, takie jak:

- do budowy stanowiska badawczego układu o 1 stopniu swobody Autor przyjął masę elementu podwieszonego równą 1,3 kg, pisząc, że „masa na stanowisku testowym odpowiada masie przenoszanej przez jeden z tłumików układu”. W jakim sensie masa ta odpowiada masie przenoszanej przez jeden z tłumików układu? Czy mówimy tu o podobieństwie modelu do obiektu rzeczywistego?
- czy założenie o braku wpływu dodatkowych elementów (płaskowników z karbem) dołączonych do stanowiska symulującego drgania o jednym stopniu swobody jest słuszne? Dlaczego nie przeprowadzono prostego eksperymentu drgań swobodnych tego obiektu?
- Dlaczego nie zdecydowano się zweryfikować wyznaczonej z symulacji trwałości zmęczeniowej próbek (rozdział 4.4) badaniami eksperymentalnymi?
- Przedstawiony w pracy model MES zawieszenia sprężarki nie został dostatecznie opisany i omówiony.

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. W większości jej treść napisana jest poprawną polszczyzną, chociaż zdarzają się nieliczne błędy stylistyczne. Irytujące jest, zdaniem recenzenta, wplatanie w zdania anglojęzycznych nazw analiz np. str. 110 „... w analizach typu harmonic response, a w dalszej konsekwencji wyznaczaniu ich trwałości przy random vibration”. To samo odnosi się do legend w niektórych opisach rysunków, przedstawionych algorytmach wykonywania obliczeń np. rys. 90. Ilustracje zamieszczane w pracy mają zadanie informacyjne. Stąd wymagana jest ich czytelność. Część zamieszczonych ilustracji nie spełnia tego wymogu, szczególnie w opisach osi i legend np. rys. 33, rys. 84.

W pracy zauważono kilka błędów redakcyjnych np. we wzorze 149 występuje błąd, w tab. 7 dla modułu 2, częstotliwości drgań własnych przyjmują taką samą wartość.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić pozytywnie ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- wykazane przez autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne budowy modeli matematycznych, numerycznych, opracowanych w środowiskach Patran, Matlab, Excel.
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.

4. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, nie pomniejszają jednak osiągnięć Doktoranta w uzyskiwaniu wartościowych wyników naukowych i poznawczych. Mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i uczulić na staranność w przygotowaniu samodzielnych opracowań naukowych, wnikliwą analizę oraz zgłębianie realizowanych przez Autora problemów badawczych.

Dokładna analiza dysertacji mgr. inż. Karola Czekaja pt. „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów” pozwala stwierdzić, iż stanowi ona wartościowy naukowo, oryginalny wkład w rozwój metod modelowania dynamiki układów mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów za pomocą metody elementów skończonych. Z tego typu układami mechanicznymi mamy do czynienia, jeżeli dochodzi do interakcji poszczególnych komponentów, wszędzie tam gdzie elementy masowe łączone są za pomocą elementów sprężystych i mają ograniczony zakres przemieszczeń np. w zawieszeniach pojazdów. Elementy poddawane zmiennym wymuszeniom w czasie, na które nakładają się efekty zderzeń komponentów, poddane są cyklicznym zmianom naprężeń. Przedstawiona w pracy metodyka uwzględniania tych zjawisk w obliczeniach wytrzymałościowych w dziedzinie częstotliwości stanowi oryginalną próbę rozwiązania tego zadania (układ nieliniowy) za pomocą metod liniowych. Zawarte w pkt. 3 uwagi do treści rozprawy nie mają charakteru podważającego uzyskane wyniki – są prośbą o dodatkowe wyjaśnienia lub skorygowanie drobnych niejasności.



Podsumowując to, co zostało szczegółowo wykazane w niniejszej recenzji, rozprawa mgr inż. Karola Czekaja pt. „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów” spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.), tj.: – prezentuje wiedzę teoretyczną oraz praktyczną Autora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna w zakresie badania dynamiki układów mechanicznych modelowanych w konwencji MES z wymuszeniem w postaci drgań losowych, potwierdza umiejętność samodzielnego definiowania problematyki badań naukowych, ich prowadzenia oraz analizowania i interpretacji ich wyników, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania kompleksowej, numeryczno-eksperymentalnej analizy wyznaczenia naprężeń w konstrukcji mechanicznej z kolizjami podzespołów, spełnia wymogi formalne w zakresie posiadania formy monografii naukowej opatrzonej streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Karola Czekaja do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej, rekomendując nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Stanisław Duda