

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Karola Czekaja

pt.:

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

Podstawę recenzji stanowi pismo Rektora Politechniki Opolskiej z dnia 27 stycznia 2025r.

W układach mechanicznych maszyn, pojazdów i urządzeń mechanicznych bardzo często występują człony sprężyste z ograniczeniami lub więzy niesymetryczne z luzami. Wprowadzane przez te człony nieliniowości sprawiają duże problemy w opisie matematycznym ruchu tych obiektów oraz w analizie ich wyężenia przy wymuszeniach cyklicznych w aspekcie późniejszej prognozy wytrzymałości zmęczeniowej.

Zagadnienie to jest szczególnie istotne w przemyśle motoryzacyjnym. Do elementów pojazdów stosowane są testy wibracyjne o charakterze losowym ale istnieje potrzeba przeprowadzania wstępnych prognoz za pomocą narzędzi numerycznych. Dysertacja mgra inż. Karola Czekaja jest poświęcona właśnie tej tematyce czyli opracowaniu metody obliczeniowej opartej na metodzie elementów skończonych umożliwiającej zastosowanie liniowych algorytmów do modelowania testów typu random vibration o charakterze nieliniowym. Rozprawa ma charakter doktoratu wdrożeniowego i była realizowana we współpracy z firmą ZF. Tematyka dysertacji i postawione w niej cele posiadają duże znaczenie aplikacyjne jak również są aktualne.

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 11 rozdziałów, wykazu literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Całość pracy liczy 141 stron.

Zakres rozprawy

W krótkim wstępie Autor uzasadnił potrzebę naukową i uylitarną podjęcia się tematu badań oraz sformułował cel pracy: opracowanie metody obliczeniowej opartej na metodzie elementów skończonych (MES), która umożliwia adaptację standardowych metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji w specyficznych warunkach dynamicznych

przy występowaniu zjawisk nieliniowych, występujących podczas testu typu random vibration. Opisano zakres ramowy przeprowadzonych przez doktoranta badań. Ich podstawę stanowił przeprowadzony przez mgra inż. Karola Czekaja przegląd literaturowy, przedstawiony obszernie w rozdziale 2 dysertacji.

W podrozdziale 2.1 zatytułowanym „Wprowadzenie do analiz dynamicznych MES” zestawiono podstawowe równania dynamiki układów drgających, w tym drgań swobodnych, wymuszonych, z tłumieniem. Opis metody elementów skończonych ograniczono do metod modalnych tj. wyznaczenia postaci i częstości własnych, analizy harmonicznej oraz bezpośredniego całkowania równań ruchu.

Podstawową metodą analizy układów obciążonych cyklicznie jest w metodzie elementów skończonych analiza w dziedzinie częstotliwości dlatego Autor szczegółowo przedstawił podstawowe zależności dotyczące teorii przetwarzania sygnałów: zastosowanie transformaty Fouriera, funkcję odpowiedzi częstotliwościowej, transmitancję oraz gęstość widmową mocy (podrozdział 2.2). W kolejnym podrozdziale omówiono testy wibracyjne stosowane w przemyśle motoryzacyjnym od najprostszych jak test przemiatania sinusoidalnego przez testy wibracyjne o charakterze losowym do testów o charakterze impulsów dynamicznych. Szczegółowo opisano obciążenia normowe do testów wibracyjnych o charakterze losowym.

Ze względu na to, że przy testach wibracyjnych uszkodzenie ma charakter zmęczeniowy Autor zestawiał rodzaje charakterystyk zmęczeniowych (podrozdział 2.4) oraz rozwinął zagadnienie obliczenia trwałości w dziedzinie częstotliwości w podrozdziale 2.5, w którym przedstawił podstawowe obecnie stosowane metody spektralne oraz przeprowadził dyskusję ich przydatności do sformułowanego we wstępie celu badań. Poruszono także zagadnienie stosowania naprężeń zastępczych do oceny złożonego stanu wyłączenia (podrozdział 2.6). Następnie w podrozdziale 2.7 przedstawiono procedurę obliczania trwałości elementów poddanych testom wibracyjnym wg algorytmu A. Dziury.

Najbardziej istotnym elementem przeglądu literatury jest podrozdział 2.8, w którym Autor przedstawił problem linearyzacji układów nieliniowych w analizie układów drgających w dziedzinie częstotliwości.

Bezpośrednio po przeglądzie literatury autor przechodzi do opisu zrealizowanych badań eksperymentalnych. W rozdziale 3 przedstawiono badania eksperymentalne odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenie o jednym stopniu swobody. Badania zrealizowano w Laboratorium Trwałości i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Szczegółowo przedstawiono stanowisko badawcze i układ pomiarowy oraz procedurę testową. W celach porównawczych analizowano odpowiedzi dynamiczne układu bez ograniczeń oraz układu z ograniczeniami. Zmianę

charakterystyki układu uzyskano przez usunięcie korony na odbojniku. Wymuszenia zdefiniowano zgodnie z znormalizowanymi profilami wibracyjnymi stosowanym w przemyśle samochodowym. Przeprowadzono testy dla częstotliwości wymuszeń w zakresie 5 – 200 Hz przy różnych wartościach przyspieszeń, a ich wyniki zostały przeanalizowane za pomocą napisanych przez Autora skryptów przy zastosowaniu metody Welcha.

Wyniki uzyskane dla układu liniowego bez kolizji i dla układu z niesymetrycznymi ograniczeniami (z kolizją) zostały porównane i sformułowano wnioski. Mimo dużych różnic w gęstości widmowej mocy różnice w wartości skutecznej przyspieszeń nie zaobserwowano dużych różnic. Wykazano natomiast różnice w podstawowej częstotliwości odpowiedzi układu oraz zidentyfikowano powstawanie charakterystycznych lokalnych ekstremów.

Przeprowadzone badania były wstępem do określenia wpływu ograniczeń w układzie drgającym na wytrzymałość zmęczeniową próbki (rozdział 4). W tym celu Autor przeprowadził symulacje numeryczne metodą elementów skończonych. Zbudowano model próbki z karbem i zastosowano wymuszenie kinematyczne masy drgającej zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych. Wyznaczono częstości i postaci własne a następnie zastosowano analizę drgań losowych przy zadanym widmie wymuszenia – *random vibration*. Wykazano około trzykrotny wzrost naprężeń w dnie karbu, co wiąże się z bliskością częstości własnej próbki i lokalnego ekstremum w widmie wymuszenia, co drastycznie obniża prognozę trwałości próbki.

Zrealizowane badania układu z jednym stopniem swobody oraz analiza zmęczeniowa próbki były kontynuowane w badaniach eksperymentalnych odpowiedzi dynamicznej układu zawieszenia sprężarki ZF do pneumatycznego zawieszenia samochodów osobowych. W rozdziale 5 opisano stanowisko badawcze systemu zawieszenia sprężarki. Zastosowano procedurę badań analogiczną jak w przypadku układu o jednym stopniu swobody. Wyznaczono odpowiedzi dynamiczne i przeprowadzono analizę statystyczną. Wyniki uzyskane z tej analizy porównano z wynikami uzyskanymi dla układu o jednym stopniu swobody (rozdział 6). Przedstawiono porównanie odpowiedzi dynamicznej w tych układach. Wyznaczono stosunek wartości skutecznej sygnału wyjściowego poszczególnych punktów układu sprężarki z wartością skuteczną sygnału wyjściowego w układzie o 1 stopniu swobody. Wykazano powtarzalną wartość tych stosunków, co potencjalnie może być zastosowane przy projektowaniu prototypów.

Zbudowano także model MES układu zawieszenia sprężarki przy geometrii zgodnej z układem rzeczywistym (rozdział 7) ale bez uwzględniania zderzeń. Wyznaczono częstości i postaci własne tego układu i uzyskano funkcję transferu. Wykazano zgodność z wynikami badań eksperymentalnych na podstawie funkcji transferu określono współczynniki

tłumienia dla poszczególnych modów. Tak dostrojony model posłużył do analizy drgań losowych. Z modelu obciążonego charakterystyką gęstości widmowej mocy wyznaczono skuteczną wartość naprężeń i ich funkcję gęstości widmowej. Jest to jednak model liniowy bez ograniczeń kinematycznych. Wynika stąd potrzeba opracowania algorytmów uwzględniających te ograniczenia. Temu zagadnieniu jest poświęcony rozdział 8 dysertacji.

Autor zaproponował dwie metody rozwiązania powyższego problemu. Pierwszą metodą jest zastosowanie zmiennej sztywności tłumików w dziedzinie częstotliwości. Autor podaje algorytm postępowania. Przez wprowadzenie zmiennej sztywności dąży do uzyskania zgodnej z wynikami testu lub symulacji układu o 1 stopniu swobody odpowiedzi dynamicznej układu. Tak dobrane sztywności zaaplikowano do modelu zawieszenia sprężarki opisanego w rozdziale 7 pracy. Uzyskane wyniki z symulacji MES porównano z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym uzyskując jakościowo zgodne wyniki. Wyniki są ilościowo zgodne dla najniższych częstotliwości. Drugą zaproponowaną metodą jest zastosowanie ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń, którym to parametrem Autor steruje zmianą sztywności i tłumienia do uzyskania dostrojonego modelu. Uzyskane z tego modelu wyniki naprężeń zastosowano do wyznaczenia trwałości w miejscu koncentracji naprężeń, za pomocą metody Dirlika i metody Tovo-Benasciuttiego. Ze względu na brak badań eksperymentalnych nie jest możliwa weryfikacja obliczeń trwałości.

Przeprowadzono natomiast weryfikację modelu MES ze zderzeniami, którą wykonano za pomocą pomiaru odkształceń za pomocą tensometrów na stanowisku badawczym w Laboratorium Trwałości i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej (rozdział 9). Pomiaru wykonano w 6 punktach przy pomocy rozet. Odkształcenia przeliczono na naprężenia. Wyznaczono gęstość widmową odkształceń mocy odkształceń. Wyniki pomiarów zostały porównane z wynikami uzyskanymi MES z modelu bez zderzeń oraz modelami dostrojonymi obydwoma zaproponowanymi metodami: zmiennej sztywności tłumików w dziedzinie częstotliwości oraz ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń. Stwierdzono że, metoda zmiennej sztywności tłumików w dziedzinie częstotliwości znacznie zaniża wyniki, a metoda ekwiwalentnej wartości skutecznej przyspieszeń z kolei je zawyża.

Przeprowadzone badania i symulacje posłużyły do sformułowania wniosków, które opisano w rozdziale 10 dysertacji oraz kierunków dalszych badań, które Autor chciałby przedsięwziąć w przyszłości (rozdział 11).

Bibliografia rozprawy liczy 79 pozycji dotyczących opisywanych zagadnień. Większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilkunastu lat.

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy modelowania dynamiki układów mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów za pomocą metody elementów skończonych. Takie układy są powszechnie stosowane w maszynach roboczych oraz pojazdach. Sprawiają one duży problem podczas projektowania, gdyż kolizje podzespołów stanowią o nieliniowości układu. Analiza zmęczeniowa układów drgających może być przeprowadzona w dziedzinie czasu lub w dziedzinie częstotliwości. Analiza w dziedzinie czasu jest potencjalnie możliwa ale wymaga bardzo długich obliczeń polegających na bezpośrednim całkowaniu równań ruchu, co sprawia, że jest to metoda nieefektywna. Ponadto przy dużej liczbie kroków całkowania nieunikniona jest utrata zbieżności rozwiązania. Analiza w dziedzinie częstotliwości w przypadku układów liniowych jest z sukcesem stosowana. Brak jest jednak metody modelowania gdy zachodzą w układzie istotne nieliniowości.

Istnieje duża potrzeba opracowania metody symulacji MES do analizy tego typu układów nieliniowych. Dysertacja mgra inż. Karola Czekaja wychodzi naprzeciw tym potrzebom. Wybór tematu dysertacji jest aktualny i jak najbardziej właściwy. Podjęta przez Doktoranta praca była realizowana we współpracy z firmą ZF i ma charakter wdrożeniowy.

We wstępie Autor sformułował cel pracy: opracowanie metody obliczeniowej opartej na metodzie elementów skończonych, która umożliwiała adaptację standardowych metod liniowych do analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji w specyficznych warunkach dynamiki nieliniowej, występujących podczas testu typu random vibration.

Mgr inż. Karol Czekaj przeprowadził szerokie rozpoznanie tematu, które zawarł w przeglądzie literatury. Należy podkreślić w tym przypadku złożoność podjętego do analizy problemu badawczego. Dlatego mimo znacznej objętości tej części pracy opis poszczególnych zagadnień jest syntetyczny, acz wystarczający do uporządkowania dotychczasowego stanu wiedzy.

Do osiągnięcia celu wykonano badania i symulacje numeryczne początkowo dla prostego układu o jednym stopniu swobody by później przeprowadzić je dla obiektu technicznego jakim jest sprężarka i jej układ zawieszenia. Zbudowano stanowisko badawcze o 1 stopniu swobody, na którym przeprowadzono testy wibracyjne układu liniowego z usuniętymi ograniczeniami kinematycznymi i odpowiadającego mu układu nieliniowego z ograniczeniami. W ten sposób badano wpływ powyższych ograniczeń na odpowiedź dynamiczną układu. Jako obciążenia przyjęto wymuszenia podłoża o gęstości widmowej mocy odpowiadającej przyjmowanej w przemyśle samochodowym. Przeprowadzono rejestrację sygnałów i zastosowano analizę fourierowską. Metodyka przeprowadzonych

badan jest właściwa. Przeprowadzone porównanie i wyciągnięte wnioski o zmianie wartości średniej częstotliwości domianty i kurtozy rozkładu można uznać za poprawne.

Równolegle do badań eksperymentalnych zbudowano modele skończenie elementowe stanowiska badawczego by stwierdzić jak zderzenia wpływają na trwałość. W tym celu zastosowano próbkę z karbem. Jako obciążenia wprowadzono widmo ruchu podłoża tożsame z elementem drgającym. Wyznaczono numerycznie trwałość zmęczeniową próbki ale nie zweryfikowano jej eksperymentalnie. Wykazano wpływ kolizji na wzbudzenie drgań próbki i wpływ grubości próbki na jej częstość własną, co może być ilustracją do wpływu kolizji na trwałość.

Przeprowadzone na tymże stanowisku badania układu zawieszenia sprężarki o trzech elementach sprężysto-tłumiących przyniosły dane, które można było porównać z układem o 1 stopni swobody. Przez zastosowanie analogicznej metodologii uzyskano wyniki, które można porównać. Wykazano podobny charakter odpowiedzi oraz stałość stosunków odpowiedzi wartości skutecznej przyspieszeń układu rzeczywistego w podniesieniu do odpowiedzi symulatora przy różnych wartościach skutecznych przyspieszeń wejścia. Powinno to umożliwić prognozowanie zachowania bardziej złożonych układów na podstawie wyników uzyskanych z symulatora o 1 stopniu swobody przez zastosowanie współczynnika korekcyjnego. Jest to cenne aplikacyjnie.

Zbudowano także model MES sprężarki z układem zawieszenia. Są to modele o złożonej geometrii i wielu członach, ale zastosowanie modeli styku typu glue powoduje, że układ w modelu jest sztywniejszy niż w rzeczywistości, gdyż brak jest możliwości wzajemnego przemieszczania elementów, tarcia i tłumienia na styku elementów. Należy się zastanowić czy nie lepiej byłoby zamodelować całe zawieszenie jako jeden element konstrukcyjny. Ocenę zgodności wyników modelu numerycznego z wynikami badań eksperymentalnych dokonano wykorzystując funkcję transferu w poszczególnych punktach pomiarowych. Uzyskano dobrą zgodność poszczególnych częstości własnych i wartości przyspieszeń, chociaż widoczna jest w modelu eliminacja wyższych częstości. Z modelu obliczono tłumienie dla poszczególnych postaci własnych, co uważam za właściwe. Z modelu z już skorygowaną wartością tłumienia wyznaczono funkcję widmowej gęstości naprężeń.

Uzyskane wyniki symulacji były uzyskane na modelu liniowym. W przypadku wystąpienia zderzeń elementów następuje zmiana sztywności układu, co wykazano wcześniej dla układu o 1 stopniu swobody. Pozostaje tak skorygować model liniowy, o ile jest to możliwe, by uzyskać wyniki odpowiadające układowi z ograniczeniami geometrycznymi w postaci kolizji, chociaż w sposób przybliżony.

Mgr inż. Karol Czekaj zaproponował dwie metody. Metoda pierwsza zastąpieniu na wprowadzeniu w układ zawieszenia konektorów typu CBUSH, który reprezentuje sprężysto-tłumiące połączenie między dwoma węzłami, o charakterystyce zmiennej od częstotliwości. Charakterystyki można wyznaczyć z układu o 1 stopniu swobody. Metoda druga polega na dostrojeniu sztywności tłumików za pomocą ekwiwalentnej skutecznej wartości przyspieszeń. Autor zbudował schematy blokowe powyższych procedur i zaaplikował je do modelu MES całego układu sprężarka – zawieszenie. Wyznaczone wartości naprężeń posłużyły do oszacowania trwałości metodą Dirlika oraz Tovo-Benasciuttiego.

Przeprowadzono także weryfikację powyższych modeli przez pomiar odkształceń w 6 punktach wsporników sprężarki. Uzyskane wyniki wykazują, że opracowane modele MES dalekie są od doskonałości. Uzyskane wartości naprężeń w zależności od metody są znacznie zaniżone lub zawyżone. Przyczyna tkwi prawdopodobnie w charakterze pracy tłumików, których charakterystyka jest niesymetryczna, ze względu na to, że kolizja występuje wyłącznie przy ściskaniu sprężyny. Tym niemniej opracowane algorytmy stanowią podstawę do dalszych prac nad opracowaniem bardziej zgodnych modeli. Mogą także służyć do porównywania różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Szczególnie dotyczy to modelu wykorzystującego ekwiwalentną skuteczną wartość przyspieszeń. W tym modelu uzyskano proporcjonalną zgodność wyników w poszczególnych punktach pomiarowych.

Autor krytycznie podchodzi do uzyskanych wyników i jest świadomy niedoskonałości modeli. Sformułowane wnioski końcowe są dobrze udokumentowane we wcześniejszych rozważaniach.

Opisany wcześniej zakres pracy jest obszerny i spójny. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień częściowych.

Przeprowadzone przez mgr inż. Karola Czekaja badania eksperymentalne i symulacje numeryczne wymagały dużej wiedzy zarówno w zakresie przeprowadzania eksperymentów (w tym wypadku Autor stosował różne techniki pomiarowe) jak i w zakresie budowania złożonych modeli numerycznych.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, kompleksowy charakter badań oraz opracowana na metodyka badań eksperymentalnych postępowania przy doborze adekwatnych modeli numerycznych, mimo ich niedoskonałości, stanowią oryginalne osiągnięcie naukowe i mają znaczenie aplikacyjne.

Podstawowe osiągnięcia Doktoranta w rozprawie

Do podstawowych osiągnięć Autora i oryginalnych aspektów pracy można zaliczyć:

- dokonanie szerokiego przeglądu istniejącego stanu wiedzy w zakresie analiz dynamicznych MES w zakresie modelowania drgań losowych oraz obliczeń trwałości w dziedzinie częstotliwości,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych układu o 1 stopniu swobody bez kolizji i z kolizją elementów przy różnych wartościach przyspieszeń i wymuszeniach charakterystycznych dla pojazdów samochodowych oraz interpretacja wyników badań,
- prezentacja wpływu występowania kolizji na przykładzie trwałości próbki z karbem umieszczonej na elemencie drgającym,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych układu zawieszenia sprężarki i wykazanie stałego stosunku odpowiedzi dynamicznej układu rzeczywistego i układu o 1 stopniu swobody, co ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne; układ badawczy o 1 stopniu swobody został zgłoszony w Urzędzie Patentowym RP;
- budowa oryginalnego modelu sprężarki z pełnym układem zawieszenia i przeprowadzenie analizy częstotliwościowej,
- zaproponowanie autorskich metod symulacji MES układu zawieszenia sprężarki w warunkach ze zderzeniami, w tym opracowanie algorytmów i ich aplikacja do badanej sprężarki,
- przeprowadzenie weryfikacji opracowanych modeli za pomocą pomiarów tensometrycznych,
- porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami numerycznymi MES i przeprowadzenie dyskusji,
- sformułowanie wniosków z przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych oraz przedstawienie kierunków dalszych badań.

Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

- Autor podaje, że „Odwrótne transformacje Fouriera pozwalają na rekonstrukcję oryginalnego sygnału czasowego z jego reprezentacji w dziedzinie częstotliwości” (str. 25). Jest to stwierdzenie błędne. Uzyskuje się co najwyżej sygnał adekwatny o takim samym PSD, ale nie oryginalny,
- Na elementach, w których planowano odczyt wyników dyskretyzacja jest gęsta, pozostałe elementy sprężarki zostały zdyskretyzowane zgrubnie (rys. 82). Uważam, że także elementy zawieszenia takie jak sprężyny powinny być zdyskretyzowane mniejszymi elementami, gdyż to wpływa na sztywność sprężyny.

- Nie opisano dostatecznie modelu skończonelementowego próbki. Nie podano rodzaju elementów skończonych, gęstości dyskretyzacji. Nie uzasadniono przyjęcia modelu powłokowego zamiast objętościowego. Nie opisano sposobu utwierdzenia próbki w modelu.
- Skąd wynikała wartość tłumienia 3% tłumienia krytycznego? (str. 75)
- Czy można porównywać układ o 1 stopniu swobody i układ rzeczywistej sprężarki, gdy są to różne obiekty o innych masach i tłumieniu? (rozdział 6)
- Czy można skalować wyniki wartości skutecznej z układu o 1 stopniu swobody do układu złożonego stosując stały współczynnik korekcyjny? (str. 97)
- Dlaczego w porównaniu na rys. 77 – 79 nie zastosowano tego samego typu osi PSD czyli logarytmicznej?
- W modelach MES całej sprężarki Autor stosuje połączenie typu glue, twierdząc, że jest to „kontakt” liniowy. W rzeczywistości jest to połączenie stałe, sklejające łączone powierzchnie bez żadnej charakterystyki czy to sztywności, czy też tarcia i związanego z nim tłumienia (str. 99).
- Wsporniki sprężarki zostały zamodelowane elementami powłokowymi. Zastosowano dużą gęstość dyskretyzacji (rys. 83). Przy elementach powłokowych nie powinno się stosować elementów o rozmiarze mniejszym niż grubość blachy. A jak jest w przypadku zbudowanego modelu?
- Autor podaje, że *„Drgania własne samych wsporników bocznych sprężarki pojawiają się powyżej 200 Hz, czyli powyżej zakresu częstotliwości testowania w teście random vibration”* (str. 100). Przy układach z tłumieniem należy sprawdzać także częstotliwości wyższe i w dalszej analizie je uwzględniać.
- W procedurach symulacji przedstawionych na rysunku 90. i 99. jest wiele elementów zbędnych, nieistotnych do przedstawienia toku postępowania np. „czyszczenie modelu” siatkowanie, nadawanie własności materiałowych itp.
- Jakie były kryteria rozmieszczenia punktów, w których naklejono tensometry?

Stwierdzono także niedociągnięcia głównie dotyczące terminologii oraz precyzji sformułowań:

- Autor używa terminu „piki” zamiast wartości szczytowe,
- Autor używa określenia ilość zamiast liczba do rzeczy policzalnych (np. str.11)
- Nie używa się terminu trwałość zmęczeniowa a wytrzymałość zmęczeniowa (str. 73)
- Autor używa kolokwializmów np. *uwaga będzie skupiona, oczywistym jest, że* (str. 92), *gdyż wiadomym jest* (str. 115)
- Podawanie w tabelach 16, 17, 18 numerów elementów skończonych jest bezcelowe.

Powyższe uwagi krytyczne nie zmieniają mojej pozytywnej ogólnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena redakcyjna rozprawy

Dysertacja zredagowana jest starannie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień, chociaż można sformułować zastrzeżenia dotyczące struktury pracy. Zazwyczaj po przeprowadzeniu rozpoznania literaturowego formułowana jest teza lub definiowany jest cel, który doktorant zamierza osiągnąć. W przypadku dysertacji mgr inż. Karola Czekaja brak jest takiego rozdziału. Sformułowany cel pracy można znaleźć we wstępie, ale uważam, że pełne, kompletne sformułowanie celu można wykonać dopiero po przeglądzie istniejącego stanu wiedzy.

Rysunki są wykonane czytelnie, chociaż Autor miesza opisy w języku polskim i angielskim.

Pozostałe uwagi zaznaczyłem w przekazanym mi egzemplarzu pracy, który przekazałem Autorowi, i dlatego ich tutaj nie przytaczam.

Wnioski końcowe

Praca dotyczyła zagadnienia modelowania metodą elementów skończonych układów mechanicznych poddawanych wymuszeniom dynamicznym o charakterze losowym z występowaniem kolizji podzespołów. Są to układy nieliniowe. Jako reprezentatywny przykład takiego obiektu przyjęto układ zawieszenia sprężarki pneumatycznej w samochodzie osobowym. Zamysłem Autora była adaptacja do rozwiązania tego zadania modeli liniowych, Kandydat przeprowadził kompleksowy zakres prac badawczych w zakresie badań eksperymentalnych oraz zbudował oryginalne modele MES. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiły weryfikację przyjętych modeli.

Treść zawarta w pracy odpowiada tytułowi pracy, choć jej zakres jest znacznie bardziej obszerny, bo obejmuje także liczne badania eksperymentalne. Układ tematyczny pracy jest w zasadzie logiczny. Nie ustrzeżono się jednak pewnych błędów językowych i redakcyjnych, z których kilka przytoczyłem powyżej.

W podsumowaniu niniejszej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej stwierdzam, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, a opracowane modele mimo ich niedoskonałości są krokiem naprzód w rozwoju modelowania MES tego typu układów. Podstawowe cele naukowe rozprawy zostały w dużej mierze osiągnięte. Autor samodzielnie rozwiązał zagadnienie budowy modeli MES układów dynamicznych, w których występują kolizje oraz przeprowadził ich weryfikację eksperymentalną przez pomiar przyspieszeń i odkształceń. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu

pracy. Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i dużą użyteczność. Wymienione powyżej liczne uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorant wykazał duży zasób wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor wykazał się dobrą znajomością metod badań eksperymentalnych oraz metod numerycznych w obszarze modelowania układów dynamicznych w zakresie analizy modalnej. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie pana mgr inż. Karola Czekaja do samodzielnej pracy naukowej.

Recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze, ma walory użyteczne, stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego i wnosi istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Karola Czekaja pt. „Modelowanie dynamiki MES przy układach mechanicznych z uwzględnieniem kolizji podzespołów” spełnia w wystarczającym stopniu wymagania ustawowe stawiane rozprawom na stopień doktora nauk technicznych i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony, a po pozytywnym jej zakończeniu do nadania mgr inż. Karolowi Czekajowi stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Wrocław, dnia 23 marca 2025 r.



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki