

Prof. dr hab. inż. Adam Niesłony
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
Tel.: +48 508 464 808
E-Mail: a.nieslony@po.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Smolarskiego pt.

*„Metoda spektralna bezpośrednia zliczania cykli naprężeń
o charakterze dwumodalnym”*

Podstawa prawna

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 26 lipca 2023 roku (M.00121/2023) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Metoda spektralna bezpośrednia zliczania cykli naprężeń o charakterze dwumodalnym stanowi ciekawy temat badawczy, który ma istotne znaczenie zarówno w kontekście naukowym, jak i przemysłowym. Tematyka adresuje złożoność obciążeń dwumodalnych w kontekście wyznaczania trwałości zmęczeniowej. W wielu branżach, takich jak motoryzacja, lotnictwo, energetyka czy przemysł morski, występują obciążenia o charakterze dwumodalnym. Zrozumienie tego typu obciążeń jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości struktur oraz komponentów w tych branżach. Ogólnie metoda spektralna pozwala na efektywną analizę cykli naprężeń i ich charakterystyk, co ma dzisiaj zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji struktur. Badania nad metodami analizy cykli naprężeń o charakterze dwumodalnym mogą prowadzić do nowych technik obliczeniowych, narzędzi analitycznych i innowacyjnych podejść do projektowania. To z kolei może przyczynić się do rozwoju technologicznego w przemyśle i umożliwić wprowadzenie nowych, zaawansowanych rozwiązań. Ponadto zastosowanie metody spektralnej w analizie obciążeń dwumodalnych pozwala na dokładne zrozumienie efektów zmęczeniowych i wpływ na

trwałość struktury na którą oddziałują. Dzięki temu można wprowadzić usprawnienia w konstrukcjach, które przekładają się na lepszą wydajność, trwałość i bezpieczeństwo struktur.

Wybrany przez mgra inż. Dariusza Smolarskiego temat z pogranicza analizy sygnałów i zaawansowanych technik wyznaczania trwałości zmęczeniowej to bardzo trafny wybór, a sam temat – autorska metoda spektralna bezpośrednia, wydaje się być bardzo atrakcyjna i zgodna z najnowszymi trendami w tym obszarze nauki. Ponadto należy podkreślić, że zakres tematyczny ma potencjał aplikacyjny i rokuje w przyszłości na zainteresowanie tym rozwiązaniem biur konstrukcyjnych czy producentów specjalistycznego oprogramowania. Dlatego też uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Dariusza Smolarskiego pt. *„Metoda spektralna bezpośrednia zliczania cykli naprężeń o charakterze dwumodalnym”* właściwie wpisuje się w aktualne trendy prac dotyczących wytrzymałości materiałów i obejmuje swym zakresem zagadnienia z obszaru inżynierii mechanicznej, analizy sygnałów i metod obliczeniowych.

2. Zawartość pracy

Rozprawa doktorska obejmuje 96 stron i składa się z siedmiu bogato ilustrowanych rozdziałów zasadniczych zajmujących 69 stron. Bibliografia, oznaczona jako rozdział ósmy, zawiera 111 pozycji literaturowych, po której występują spisy rysunków, tabel, wykaz stosowanych oznaczeń i streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozprawę otwiera strona tytułowa z podziękowaniami i spisem treści. Pierwszy rozdział rozprawy wprowadza czytelnika do tematu zmęczenia w układach drgających. Autor przytacza tu istotne zagadnienia na które należy zwrócić uwagę w analizach, między innymi znajduje się tutaj informacja o potrzebie uwzględnienia dynamiki konstrukcji oraz właściwości zmęczeniowych materiału. Podano także podstawowe informacje dotyczące opisu zmęczenia materiałów inżynierskich. Podpunkt 1.2 zawiera przegląd literatury z zakresu analiz zmęczeniowych przebiegów dwumodalnych. Następnie przedstawiono cel, tezę i zakres pracy. Punkt 2 poświęcono przedstawieniu wielkości opisujących zmienne obciążenie i które zastosowano w dalszej części pracy. Podano i opisano proste kryteria opierające się na założeniach Hubera, von Misesa i Hencky’ego dotyczące wyznaczania wartości amplitudy zastępczej oraz wartości średniej naprężenia oraz przedstawiono parametr Smitha Watsona i Toppera. Wpływ wartości średniej obciążenia opisano w podpunkcie 2.3 przedstawiając między innymi modele Goodmama, Gerbera i Dowlinga. Podpunkt 2.4 zawiera opis zjawiska kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, przedstawiono genezę zjawiska oraz wybrane hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Punkt 3 zawiera główne tezy badawcze i założenia proponowanego w rozprawie modelu obliczeniowego. Przedstawiono dziewięć punktów algorytmu stosowania metody spektralnej bezpośredniej dla założonego stanu naprężenia oraz uogólniono przedstawioną metodę do wieloosiowego stanu naprężenia. Punkt 4 przedstawia podstawy teoretyczne analizy częstotliwościowej sygnałów. W punkcie 5 opisano porównanie metody spektralnej

bezpośredniej z metodą opartą na zliczaniu cykli obciążenia algorytmem rainflow i metodą proponowaną przez Fu i Cebona. Wieloosiowy stan naprężenia i analiza trwałości zmęczeniowej wybranego łożyska są tematem punktu 6. Punkt 7 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe.

3. Ocena pracy

3.1. Ocena ogólna

Recenzowana praca doktorska skupia się na teoretycznych aspektach modelowania numerycznego rzeczywistych warunków pracy elementów maszyn lub konstrukcji. Tematyka pracy obejmuje swym zakresem dwa obszary naukowe: analizę sygnałów oraz wytrzymałość materiałów, szczególnie wytrzymałość zmęczeniową. W kontekście wytrzymałości zmęczeniowej napotykamy na wyzwanie związane z obliczeniami w przypadku obciążeń odbiegających od stało-amplitudowych. Wyzwanie to polega na tym, że wykresy zmęczeniowe materiałów zazwyczaj sporządzane są dla obciążeń o stałej amplitudzie oraz wartości średniej równej 0 a odporność zmęczeniowa materiału przy obciążeniu zmiennie-amplitudowym, losowym czy harmonicznym nie jest dokładnie poznana. Dotyczy to także informacji o wpływie wartości średniej naprężenia na trwałość zmęczeniową. Stąd też poszukiwane są metody obliczeniowe stosowne do danego charakteru obciążenia.

Doktorant wybrał spośród wielu przypadków obciążeń przypadek obciążeń dwumodalnych, który wbrew pozorom jest często spotykany jako odpowiedź układów mechanicznych na wymuszenia dynamiczne w których częstotliwości własne układu mieszczą się w zakresie wymuszenia. Wzmocnienie przez układ wymuszenia na dwóch pierwszych częstotliwościach własnych prowadzi do powstania takich właśnie przebiegów naprężeń. Należy również zaznaczyć, że w warunkach eksploatacyjnych tego typu obciążenia mają charakter wieloosiowy, co prowadzi do dodatkowej złożoności algorytmów obliczeniowych wymuszając przeprowadzenie redukcji przestrzennego stanu naprężenia do jednoosiowego stanu ekwiwalentnego w sensie zmęczenia. Zagadnienie to zostało prawidłowo zauważone przez Doktoranta i obrane jako temat przewodni pracy doktorskiej.

Pan mgr inż. Dariusz Smolarski cel pracy osiąga poprzez postawienie tezy i jej udowodnianiu realizując odpowiednio zaplanowane obliczenia symulacyjne. Sama koncepcja metody spektralnej bezpośredniej oraz model obliczeniowy został przedstawiony niejako „a priori” i prawdopodobnie wynika z dogłębnej analizy literatury fachowej oraz doświadczenia w obliczeniach numerycznych. Powołuje się w tym miejscu na prace Dowlinga z 1993 oraz obserwacji trajektorii naprężenia o charakterze dwumodalnym.

Przejście z przestrzennego stanu naprężenia do stanu ekwiwalentnego jednoosiowego Doktorant realizuje stosując hipotezę Hubera-Misesa-Hencky'ego dla amplitud składowych tensora naprężenia, wzór (3.10), ale także przy zastosowaniu kryteriów Crosslanda i Papadopoulosa, odpowiednio wzory (6.4) i (6.6) w rozdziale dotyczącym analizy zmęczeniowej łożyska walcowego wzdłużnego. Są to znane metody wykorzystujące dwa pierwsze

niezmienniki tensora naprężenia i można było przedstawić także wybrane kryterium z grupy kryteriów wykorzystujących pojęcie płaszczyzny krytycznej.

Prace nad weryfikacją poprawności proponowanej metody spektralnej bezpośredniej zliczania cykli można było uzupełnić badaniami eksperymentalnymi np. na wzbudniku elektromagnetycznym z odpowiednio zaprojektowaną próbką. Doktorant miałby wtedy sposobność przedstawienia umiejętności planowania i przeprowadzania badań eksperymentalnych a także modelowania zjawisk MES projektując stanowisko badawcze i próbkę do badań przy obciążeniu dwumodalnym. Powyższa uwaga ma charakter wskazówki co do kierunku dalszych badań i nie umniejsza wartości przedstawionej pracy, która ma charakter teoretyczno-symulacyjny i tworzy zwięzłą całość.

3.2. Uwagi merytoryczne

Po przeczytaniu pracy i dogłębnej analizie jej treści nasuwają się następujące uwagi szczegółowe.

1. W rozdziale piątym, podpunkt 5.1, Doktorant przedstawia działanie zaproponowanej metody i porównuje ją z metodą zliczenia cykli rainflow. Przedstawia tam dwa rysunki 5.1 i 5.2 na których ilustruje postać analizowanych przebiegów naprężeń o charakterze dwumodalnym. Efektem analizy są tabele 5.1 i 5.2 w których przedstawia zauważone amplitudy z wartościami średnimi. Proszę wytłumaczyć dlaczego metoda spektralna wykazuje o jeden cykl więcej w porównaniu z metodą rainflow. Proszę także wskazać, jeżeli to możliwe, graficznie na rysunkach 5.1 i 5.2, w którym miejscu pojawiają się cykle wyznaczone z metody spektralnej.
2. W podpunkcie 5.1 porównano metodę spektralną bezpośrednią z metodą rainflow podając w tabelach wyznaczone cykle.
 - a) Co rozumie Pan przez twierdzenie „... *zaproponowany sposób identyfikacji cykli naprężeń daje wyniki bardziej zgodne z rzeczywistym przebiegiem ...*”? (strona 44)
 - b) Proszę przedstawić jaka będzie różnica w uszkodzeniu zmęczeniowym licząc metodą rainflow i metodą spektralną dla przykładowego wykresu Wöhlera.
3. Przytaczane i wykorzystywane w pracy podczas obliczeń kryteria wieloosiowego zmęczenia (HvMH, Crossland i Papadopoulos) wykorzystują dwa pierwsze niezmienniki tensora naprężenia. Oczywiście wartości tych niezmienników są niezależne od układu współrzędnych. Można sobie wyobrazić dwie konfiguracje stanu naprężenia w których kierunek naprężeń zmiennych w czasie jest prostopadły lub równoległy do wartości stałej (zmienne naprężenie o charakterze dwumodalnym w kierunku σ_{xx} , wartość średnia stała w kierunku σ_{xx} lub σ_{yy}). Jak zareaguje proponowany przez Doktoranta algorytm opisany w podpunkcie 3.2? Czy otrzymamy różne wyniki trwałości?

4. Czas życia elementu metodą Fu-Cebona (strona 47) obliczono zgodnie z wzorem (5.4) przed którym w opisie wymieniono, że stosuje się formułę Dirlika. Jaka formuła na gęstość prawdopodobieństwa zakresów naprężeń ostatecznie zastosowano i dlaczego w treści podano trwałość jako $T_{FC} = 3,27e9$ cykli skoro przedstawiona formuła (5.4) wyznacza trwałość w sekundach?
5. Jaki jest udział cykli pobocznych (Tabele 5.3 i 5.4) w całkowitym uszkodzeniu wyznaczonym zgodnie z teorią wbudowania uszkodzeń zmęczeniowych dla przypadku rozpatrywanego przez Fu-Cebona? Mając na uwadze fakt, że amplitudy cykli pobocznych nie przekraczają 7 MPa ich udział pewnie będzie marginalny. Czy w tym przypadku dozwolone by było założenie, że za zmęczenie materiału odpowiada tylko cykl główny?
6. Na stronie 50 w rezultacie obliczeń zmęczeniowych metodą spektralną bezpośrednią wyznaczono trwałość i podano jej wartość jako liczba cykli $T_{DS} = 4,6e9$ cykli. Proszę wyjaśnić pojęcie cykli w kontekście dwumodalnego przebiegu naprężenia.
7. Wniosek ogólny nr 6 mówi o tym, że metoda spektralna bezpośrednia może być stosowana w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych. Jakie są przesłanki aby tak twierdzić?
8. Wniosek ogólny nr 9 dotyczy granic całkowania funkcji GWM w celu otrzymania amplitud naprężenia cyklu głównego i pobocznych. Stwierdzono, że całkuje się w pewnych granicach. Jak ustalić te granice (szerokość zakresu częstotliwości) i czy pominięcie pewnego zakresu pomiędzy częstotliwościami modalnymi wpłynie na obliczeniową trwałość.

3.3. Uwagi redakcyjne

Należy stwierdzić, że praca została zredagowana w sposób staranny. Drobne, nieliczne błędy w piśmiennictwie, interpunkcji itp. zostały przekazane Doktorantowi i zapisane poniżej. Rysunki zostały przedstawione czytelnie, jednakże można było zrezygnować z przedstawiania kopii rysunków ze znanych pozycji literaturowych, jak np. Rys. 1.1 i 2.5 (książka Kocańdy i Szali) czy Rys. 5.3 i 5.4 (praca Fu i Cebona). Na ich miejsce należało umieścić autorskie grafiki przez co podniesiono by jakość rozprawy doktorskiej i jej czytelność.

Warto także rozważyć zmianę kolejności punktów pracy, aby podkreślić logikę i spójność jej struktury. Sugeruję na przyszłość rozpoczęcie pracy tekstem odnoszącym się do znaczenia badanego zagadnienia, aby wprowadzić czytelnika w tematykę. W recenzowanej pracy treść zaczyna się od przedstawienia metod analiz zmęczeniowych bez ogólnego wstępu. Proponuje także scalenie prezentacji podstaw teoretycznych lub „książkowych” modeli w jeden rozdział i przedstawienie ich przed celem i zakresem pracy. Dotyczy to np. podpunktów 2.1, 4.1 gdzie przedstawiono podstawy teoretyczne.

Cel, zakres i tezę pracy powinno się umieścić w osobnym punkcie a nie jako podpunkt wprowadzenia do rozprawy. Zazwyczaj jest to punkt występujący po wstępie i analizie literatury fachowej będąc efektem zauważonych braków w stanie nauki światowej.

Drobne błędy redakcyjne

Str. 19; linia 4 od dołu; jest „Toopera”, powinno być „Toppera”

Str. 44; linia 7 od dołu; „się że”, powinno być „się, że”

Str. 44; linia 4 od dołu; „zdudnienie” ?

Str. 45; Rys. 5.3; jest „ramię resoru”, powinno być „pióro resoru”

Str. 45; Rys. 5.3; jest „poduszka powietrzna”, powinno być „amortyzator mieszkowy” lub „amortyzator pneumatyczny” lub „zawieszenie pneumatyczne”

Str. 46; linia 2; jest „resoru, ma”, powinno być „resoru ma”

Str. 47; wzór (5.4); jest „ T_{FL} ”, powinno być „ T_{FC} ”

Str. 48; linia 9; jest „katów”, powinno być „kątów”

W Polsce do oddzielenia wartości dziesiętnych używamy przecinka (,) a nie kropki (.), np. Tabela 5.2, 6.1, 6.6, wzór (6.1) itd.

5. Ocena końcowa

Powyższe uwagi nie podważają istotnej treści merytorycznej rozprawy oraz nie negują naukowych osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że posiada dużą wiedzę z zakresu analizy sygnałów, metod wyznaczania trwałości zmęczeniowej oraz umiejętność planowania i prowadzenia obliczeń numerycznych. Dużą zaletą obliczeń numerycznych zrealizowanych i przedstawionych przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie jest fakt, że dotyczą rzeczywistych układów mechanicznych takich jak łożysko kulkowe czy zawieszenie pojazdu drogowego. Stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta w pracy cel został zrealizowany w zakresie wystarczającym, a postawiona hipoteza udowodniona. Wśród prowadzonych obecnie na świecie bardzo wielostronnych badań dotyczących obliczeń zmęczeniowych mgr inż. Dariusz Smolarski potrafił znaleźć problem, który rozwiązał samodzielnie, przyczyniając się do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

6. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu recenzowanej rozprawy warunków podanych w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882), z późniejszymi zmianami i dopuszczenie do publicznej obrony z nadaniem stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

