

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Michała Ptaka

pod tytułem „The impact of dynamic loads on transmission shafts of the civil aircraft”

1. Podstawa prawna opracowania

Niniejsza opinia została opracowana na podstawie uchwały W10/RDND07/81/2023 z dnia 27 października 2023 w sprawie powołania komisji doktorskiej w postępowaniu doktorskim mgr. inż. Michała Ptaka w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, podjętej przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej. Przedmiotem opracowania jest recenzja rozprawy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Jerzego CZMOCHOWSKIEGO, profesora uczelni, dostarczonej do recenzji dnia 6 listopada 2023.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zagadnienia trwałości i niezawodności mechanicznej elementów mają kluczowe znaczenie w ekonomicznym rachunku kosztów eksploatacji urządzeń i mechanizmów. Dotyczy to zdecydowanie także techniki lotniczej, gdzie dochodzi niezwykle istotny aspekt bezpieczeństwa.

Większość prac, badań i wniosków zmęczeniowych badań numerycznych łączonych z pomiarami w eksperymencie dotyczy obciążeń definiowanych w dziedzinie częstotliwości. Natomiast ze względu na dualny charakter wymaganych normami obciążeń (zarówno deterministycznych, jak i losowych – określanych w domenie czasu lub częstotliwości) konieczne jest dokładniejsze opisanie sprzężeń oddziaływań i efektów zmęczeniowych wynikających z jednoczesnego realizowania obciążeń deterministycznych i losowych – we wspólnej domenie.

Uważam więc, że podjęcie tematu rozprawy jako opracowanie propozycji i przetestowanie metody i narzędzi programistycznych oceny efektów zmęczeniowych jednoczesnego działania obciążeń losowych i deterministycznych jest niezwykle celowe i w pełni uzasadnione, a podejmowana tematyka ważna i aktualna, zarówno w sensie badawczym, jak i wyrażnie ekonomicznym.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, na 175 stronach (plus 6 nienumerowanych stron streszczeń w języku angielskim i polskim). Zawiera ona 8 rozdziałów, w tym 164 rysunki i 68 tabel. Spis literatury zawiera 70 pozycji, w tym 5 pozycji współautorskich Doktoranta.

W tym miejscu muszę podkreślić, iż tytuł rozprawy nie do końca oddaje cel pracy i jej najważniejsze osiągnięcia.

Po pierwsze – najcenniejszym elementem pracy (i jej celem) jest zaproponowanie i przetestowanie metod analizy jednoczesnego działania obciążeń deterministycznych i stochastycznych, analizowanych we wspólnej domenie (np. czasu) – podczas gdy tytuł mówi enigmatycznie o „wpływie obciążeń dynamicznych”

Po drugie – nie widać w metodzie samolotu cywilnego. A jak mówi to streszczenie Autora – zaproponowana metoda to **ogólna** metoda szacowania uszkodzeń wibracyjnych i analizowany w finalnym przykładzie wałek skrętny może być elementem zawieszenia samochodu lub czołgu.

Ale biorąc pod uwagę, że to **doktorat wdrożeniowy** – akceptuję sformułowanie tytułu rozprawy jako ukłon w stronę „przemysłowego partnera” w badaniach.

3. Struktura i charakterystyka rozprawy

Rozdział 1. INTRODUCTION (4 strony)

Rozdział ten zawiera wstępne informacje dotyczące stanu wiedzy, prowadzonych aktualnie badań i stanu publikacji dotyczących uszkodzeń (zmęczenia) elementów mechanicznych poddanych normowym obciążeniom. Rozdział ten podaje też analizę aktualnego stanu zagadnienia oraz możliwości oprogramowania komercyjnego i finalnie – chociaż raczej opisowo niż deklaratywnie – **cel i zakres pracy**.

Aktualny stan opracowania zagadnienia (zarówno od strony badawczej jak i implementacji w oprogramowaniu) Autor określa jako wyraźnie niewystarczający w odniesieniu do potrzeb nowoczesnego przemysłu. Podkreśla, że wyniki niektórych z metod dostępnych w uznawanym na rynku oprogramowaniu wyraźnie odstają od innych metod – i stwierdza potrzebę ich modyfikacji.

Doktorant wskazuje na konieczność budowy własnego programowania, które umożliwi implementację klasycznych metod, weryfikację poprawności implementacji i da możliwość wprowadzenia własnych **korekt** do klasycznych algorytmów.

Jednocześnie podkreśla drugi, może nawet ważniejszy aspekt utworzenia własnego oprogramowania – możliwość zaproponowania metody oraz zbadania efektów zmęczeniowych **jednoczesnego działania obciążeń dynamicznych określonych w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu – jako analizy przeprowadzonej w dziedzinie czasu.**

Rozdział 2. VIBRATION FATIGUE DAMAGE PREDICTIONS UNDER STOCHASTIC LOADING IN THE FREQUENCY DOMAIN THEORETICAL BACKGROUND (13 stron)

Bazując na literaturze przedmiotu i korelując ją z dostępnym oprogramowaniem uznanych firm Autor przedstawia podstawy analiz zjawisk zmęczenia wywołanego obciążeniem o charakterze losowym, określonym dziedzinie częstotliwości. Autor wprowadza tu użycie momentów spektralnych (które są pewnymi charakterystykami rozkładów losowych) – które wykorzysta w swoim oprogramowaniu.

Opisuje też krótko podstawowe, klasyczne algorytmy (Dirlik, Bendat/Rice, Steinberg, Lalanne itp). Co istotne, pokazuje też cechy charakterystyczne sygnałów typu biały szum, sygnał szerokopasmowy, wąskopasmowy czy wręcz regularny sinus, ilustrując to ich przebiegami czasowymi i charakterystykami częstotliwościowymi. Wybiórcza, skrótowa forma prezentacji podstaw klasycznych algorytmów powoduje czasem małą czytelność, braki w definicjach itd. Sytuacje nieco ratują odnośniki do literatury źródłowej.

Należy domniemywać, że są to drobne niedostatki redakcyjne, gdyż implementacja tych schematów w oprogramowaniu Autora wykazuje (w Rozdziale 3.) pełną zgodność z odpowiednimi wynikami tychże procedur w oprogramowaniu komercyjnym (MSC.CAE Fatigue)

Rozdział 3. VIBRATION FATIGUE DAMAGE PREDICTIONS UNDER STOCHASTIC LOADING IN THE FREQUENCY DOMAIN – ALGORITHM, PROGRAMMING AND COMPUTATION (31 stron)

Rozdział 3. to merytorycznie bardzo ważny element pracy – tu Doktorant wykazuje realizację istotnej części celu pracy – stworzenie autorskiego oprogramowania, odtwarzającego algorytmy klasyczne, a jednocześnie dające możliwość wprowadzenia własnych korekt do tych algorytmów. Schematy działania poszczególnych elementów oprogramowania Autora przedstawione są w postaci schematów blokowych ilustrujących logikę działań. Oprogramowanie, zrealizowane w języku Python, jest elastyczne, przyjmując dane wejściowe z modelu MES oraz z kodu w Pythonie, realizującego klasyczne procedury (Derlik, Lalanne itd.).

Dane z modelu MES dotyczą wyników analizy modalnej obiektu oraz wyników testowej analizy harmonicznej z obciążeniem bezwładnościowym 1g. Tu tworzona jest Systemowa Funkcja Transferu („Funkcja przejścia”) w ujęciu naprężeniowym – zapisywane są zespolone wartości składowych tensora naprężenia (wybranych?) węzłów w dziedzinie częstotliwości. Przy użyciu tej funkcji oraz wczytywanej z zewnątrz charakterystyki PSD obciążenia losowego tworzona jest stochastyczna charakterystyka odpowiedzi obiektu w dziedzinie częstotliwości (PSD Response). Liczone są także momenty spektralne.

Zastosowanie własnego oprogramowania pozwoliło także na zbadanie metod całkowania momentów spektralnych. Autor wykazuje, że zastosowanie numerycznej procedury Gaussa, typowej w MES, tu daje nieakceptowalne różnice w stosunku do innych metod. Zatem charakter całkowania gaussowskiego, dobry (czasem nawet dokładny) dla funkcji wielomianowych, nie pasuje zupełnie do całkowania momentów spektralnych.

Przeprowadzone dalsze symulacje wykazały niedokładności modelu Lalanne`a, a modyfikacje zaproponowane przez Doktoranta na przykładzie sygnału typu „biały szum” usunęły wady oryginalnego algorytmu. Testy z innymi sygnałami wejściowym (szeroko- i wąsko-pasmowym) dały także wyraźnie poprawione rezultaty zmodyfikowanej funkcji Lalanne`a względem referencyjnego wyniku Dirlika z komercyjnego oprogramowania MSC.CAE Fatigue.

Wyniki analiz, przedstawiane w tym rozdziale są podstawą do zaakceptowania algorytmów w dziedzinie częstotliwości i uznania ich jako prawidłowej bazy do przejścia do dziedziny czasu.

Rozdział 4. VIBRATION FATIGUE DAMAGE PREDICTIONS UNDER STOCHASTIC LOADING – COMBINED FREQUENCY AND TIME DOMAIN CONSIDERATION (8 stron)

Bazując na wynikach symulacji z Rozdziału 3. Doktorant przeprowadza tu przejście do domeny czasu. Po wyznaczeniu Funkcji przejścia i finalnie charakterystyki odpowiedzi obiektu w dziedzinie częstotliwości (PSD Response) stosuje podejście Dirlika i przekształca sygnał do domeny czasu. Używa metody Monte Carlo oraz odwrotnej szybkiej transformaty Fouriera (IFFT)

Rozdział 4. przedstawia metodykę działania w przejściu do czasu oraz finalne szacowanie uszkodzeń zmęczeniowych metodą zliczania cykli zmęczeniowych (Rainflow Cycle Counting – RRC) w dziedzinie czasu. Algorytm działania metody RRC w domenie czasu (przedstawiony na schemacie blokowym) Doktorant realizuje w Pytonie. Wynik działania dla sygnału wąsko-pasmowego, szeroko-pasmowego oraz zbliżonego do białego szumu przedstawia na odpowiednich histogramach.

Rozdział 5. USING COMBINED TIME FREQUENCY DOMAINS CONSIDERATION FOR VERIFICATION AND MODIFICATION OF THE LEGACY THEORY (42 strony)

Przeprowadzone analizy parametryczne nowej metody pozwoliły na wychwycenie problematycznych obszarów analiz. Rozdział 5. przedstawia zaproponowaną przez Doktoranta modyfikację pewnych parametrów sygnału, wymaganą do skorelowania odpowiedniości parametrów sygnałów w domenie częstotliwości i dziedzinie czasu. Bez tych modyfikacji sygnały miały różne parametry statystyczne, istotne z punktu widzenia obliczeń zmęczeniowych (oddolne przejścia sygnału przez zero, liczba maksimum – lokalnych -pików, współczynnik nieregularności). Niezgodności te, wykazane przez Doktoranta w jego wcześniejszej publikacji, narastały wraz ze zmniejszaniem współczynnika nieregularności od jeden do zera, czyli przechodzeniem od sygnału wąskopasmowego do szerokopasmowego czy białego szumu. Doktorant proponuje modyfikację całkowania momentów spektralnych oraz modyfikację algorytmu metody NarrowBand, aby ją uogólnić do stosowalności dla różnej wersji szerokości pasma sygnału. Wprowadzone korekty pozwalają uzyskać zbliżone parametry uszkodzeń zmęczeniowych dla metody Dirlika i innych metod, także dla różnych typów sygnałów.

Istotną obserwacją poczynioną jest także zauważenie wpływu stosowania różnych reprezentacji szeregów czasowych dla rozważanej postaci PSD w dziedzinie częstotliwości. Pozwoliło to Doktorantowi wytypować trzy „optymalne” rozkłady: normalny, Weibula i uogólnionej wartości ekstremalnej.

Istotną informacją z badań było także ustalenie odpowiednie wielkości bloku zastosowanego w IFFT , aby nie wprowadzić efektu „niedotestowania” w trakcie rzeczywistych badań – parametry wejściowej krzywej PSD obciążenia zapewnią wtedy odpowiedni poziom ufności wyników.

Rozdział 6. DEVELOPING A METHOD FOR VIBRATION DAMAGE ESTIMATION UNDER COMBINED RANDOM AND DETERMINISTIC LOADING (32 strony)

Rozdział 6. to drugi merytorycznie bardzo ważny element pracy – tu Doktorant wykazuje realizację kolejnej istotnej części celu pracy – połączenie analiz obciążeń losowych i deterministycznych w dziedzinie czasu. W odróżnieniu od dotychczas stosowanego podejścia, gdzie analiza wykonywana jest w dziedzinie częstotliwości – Doktorant przechodzi do analizy w domenie czasu. Konwertując

sygnał losowy do dziedziny czasu (co zaproponował i przebadał w rozdziałach 4. i 5.) unika podstawowej wady analizy w dziedzinie częstotliwości – bardzo konserwatywnego oszacowania uszkodzeń zmęczeniowych. Superpozycja obciążenia losowego przedstawionego w funkcji czasu oraz obciążenia deterministycznego nie stanowi zatem problemu – bo obciążenie deterministyczne, np. „sine sweep” można prosto przekonwertować do zależności czasowej.

Także korzystając z przedstawionej w Rozdziale 4. metodyki naliczania cykli zmęczeniowych metodą RCC – uzyskuje się możliwość zliczania cykli zmęczeniowych (metodą Palmgren-Minera) i szacowanie zmęczenia w dziedzinie czasu.

Zaproponowana metoda jest znacznie mniej konserwatywna w szacowaniu uszkodzeń.

Rozdział 7. USING COMBINED TIME FREQUENCY DOMAINS CONSIDERATION FOR VERIFICATION AND MODIFICATION OF THE LEGACY THEORY (19 stron)

Rozdział 7. przedstawia przykład zastosowania metody w zastosowaniu do wałka skrętnego, stanowiącego element sterowania mechanizacją skrzydła w samolocie. Model jest uproszczony do pryzmatycznej rury, zamodelowanej w MES elementami bryłowymi w systemie Abaqus. Zastosowano 8-węzłowe elementy hexagonalne (liniowe funkcje kształtu), o zredukowanym całkowaniu – C3D8R. Zastosowanie zredukowanego całkowania jest tu elementem do dyskusji, co umieszczam w części „Ocena rozprawy”. Rura o nieznanym gęstości siatki MES (także po grubości?) jest w bliżej nieopisany sposób zamocowana na końcach. Częstości drgań własnych są skorelowane z eksperymentem i wg Doktoranta wyznaczone stosunkowo dokładnie.

Przeanalizowano obciążenie losowe o dwóch różnych rozkładach losowych (wąskopasmowy i szerokopasmowy). Przeprowadzono porównawczo obcięcie sygnału losowego do 3σ oraz 5σ . Porównano analizy z wykorzystaniem klasycznych sformułowań oraz wg metodyki opracowanej przez Doktoranta, stosując także modyfikacje korygujące niedoskonałości klasycznych sformułowań. Na sygnał losowy nałożono następnie typowy sygnał deterministyczny, tzw. „przemiatanie sinusem”.

Przykład przeanalizowany przez Doktoranta jest niezwykle prosty, pozwala jednak na wykazanie wszystkich zalet zaproponowanego podejścia. Pokazuje różnice pomiędzy klasycznymi sformułowaniami i zaproponowaną metodą. W trakcie zamiany domeny analizy na czasową (przez Monte Carlo i IFFT) wykazuje stabilizację prognozowanych uszkodzeń w zależności od zastosowanej wielkości bloku próbkowania.

Rozdział 8. CONCLUSIONS AND FURTHER RESEARCH (3 strony)

Rozdział ten zawiera syntetyczne wyniki i wnioski z rozprawy. Autor w tym miejscu podsumowuje wyniki uzyskane w rozprawie, przedstawia najważniejsze wnioski, a także sugeruje kierunki dalszych badań.

W opinii Recenzenta Doktorant dowiódł, iż przedstawiony w Rozdziale 1. cel pracy został osiągnięty.

4. Ocena rozprawy

Z zaprezentowanego omówienia wynika, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału wymagania stawiane tego typu pracom. Obejmuje ona bardzo wiele wątków skupionych wokół podstawowego tematu pracy. Przyjęty w pracy sposób realizacji badań można uznać za właściwy, a zastosowane metody za odpowiednie dla jej zakresu. We wszystkich obszarach badań Autor wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie ich planowania, realizacji i analizy. Dotyczy to zarówno analiz numerycznych jak i oceny badań eksperymentalnych.

Praca napisana jest generalnie bardzo dobrym, technicznym językiem angielskim. Natomiast manierą Autora są rozbudowane, „wielopiętrowe zdania”, liczące po 5 lub więcej linii tekstu – przez co pracę czyta się ciężko, analizując szczegółowo strukturę ważnych zdań.

a. **Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta**

Uważam, że oryginalnym dorobkiem Doktoranta jest przeanalizowanie i rozwiązanie problemu opisu i analizy jednoczesnego działania obciążeń losowych i obciążeń deterministycznych – rozwiązując to w domenie czasu. Doktorant monitorując prawidłowość implementacji klasycznych algorytmów, zlokalizował słabe punkty klasycznego algorytmu Lalanne's, wprowadził własne poprawki, uzyskując lepszą skuteczność metody. Jednocześnie wykazał, że przejście do rozwiązania w dziedzinie czasu pozwala na mniej konserwatywne oszacowania. Określił też wymagane parametry testowania i przekształcenia IFFT, które zapewnią stabilne prognozy uszkodzeń zmęczeniowych

Krytyczna ocena rozprawy / pytania

W pracy nie dostrzegłem poważniejszych błędów merytorycznych czy metodycznych – praca jest efektem badań poprawnych warsztatowo i zgodnych ze współczesną wiedzą na temat mechaniki ciała stałego i analiz strukturalnych.

- Czy w analizie harmonicznej (Rozdział 3.) wykonywanej w MES, użyty jest zapis ze stałym krokiem częstotliwości, czy wykorzystany jest tzw. „clustering”, zagęszczający wyniki wokół częstości rezonansowych (co podnosi dokładność wyników)?
- Czy wyniki naprężeń w dziedzinie częstotliwości dotyczą pewnych części modelu – praca wspomina np. węzły powierzchniowe do analiz zmęczeniowych, czy też używane są pojedyncze węzły „krytyczne” (Rys 3.2 ma opis „Transfer Function Critical Node). Czy jednego węzła dotyczy analiza zmęczeniowa z Rozdziału 7 („control point” na Rys. 7-1)?
- Niejasne są dane materiałowe beleczki wspornikowej – czy to dane tablicowe (z Internetu) czy też testowane przez Doktoranta? (w sekcji 3.3.2 w pierwszym akapicie pojawia się nazwa *transmission shaft tubes*, które nie pojawiały się wcześniej, co sugeruje zbieżność z tematyką Rozprawy)
- Jaki jest model MES próbki „benchmark w stosunku do MSC.CAE Fatigue” w sekcji 3.3. Jakie elementy zostały zastosowane?
- Podstawowe testy oprogramowania Doktoranta, jeszcze w domenie częstotliwości (beleczka wspornikowa z nacięciami, sekcja 3.3.3) dla różnej „pasmowości” sygnału odbywały się w różnym czasie referencyjnym (0.353 h, 0.229 h, 0.346 h). Dlaczego?

- Przejście z obciążeniem losowym z domeny częstotliwości do domeny czasu Doktorant wykonał przy użyciu metody Monte Carlo. Faktycznie, utworzenie sygnału czasowego o zadanych charakterystykach losowych nie jest jednoznaczne. Czy przebiegi czasowe wygenerowane przez Monte Carlo były porównywane z przebiegami oryginalnymi, np. z przyspieszeniami w „korytarzu tolerancji” +/-3 dB. Poza tym - istnieją dostępne inne metody generacji równoważnego sygnału czasowego, publicznie dostępne, a nie cytowane w literaturze przez Doktoranta (np. algorytmy i gotowe programy w Matlabie lub C++ autorstwa Toma Irvine – <https://vibrationdata.com>). Czy jest istotna wyższość generacji metody Monte Carlo/IFFT nad metodą tłumionych sinusoid lub „wavelets”?
- Rozdział 7. Model rurki – samolotowy wałek transmisyjny, obliczenia drgań własnych w Abaqusie. Nie ma informacji o warunkach brzegowych – rysunek niewiele mówi.
- Ile było elementów po grubości rurki?
- Dlaczego zastosowano elementy o zredukowanym całkowaniu? To niewielki zysk na czasie analizy. Owszem, sztywność (więc i przemieszczenia) jest OK, częstości drgań będą prawidłowe, ale dokładność naprężeń jest wyraźnie gorsza niż w elementach o pełnym całkowaniu (Abaqus wyraźnie to stwierdza). Dodatkowo wartości naprężeń (co istotne w Funkcji Transferu) są ekstrapolowane do węzłów, ale liczone w analizie w pojedynczym punkcie całkowania – tylko w środku elementu, nie na powierzchni.

b. Uwagi szczegółowe.

Szczegółowe oceny krytyczne odnoszą się do błędów redakcyjnych. Ze względu na ich niewielką wagę wymieniam je na końcu niniejszej recenzji. Te uchybienia nie wpływają zasadniczo na sumaryczną bardzo wysoką ocenę rozprawy.

5. Wnioski końcowe

W zakończeniu stwierdzam, że wymienione powyżej uwagi i zastrzeżenia oraz wymienione błędy redakcyjne nie mają negatywnego wpływu na moją wyraźnie pozytywną ocenę rozprawy jako całości.

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że podjęte w niej zadanie naukowo-badawcze zostało przez Doktoranta zrealizowane. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne. Doktorant wykazał się przy tym wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i numerycznych. Praca dowodzi odpowiedniej wiedzy teoretycznej i praktycznej doktoranta.

Stwierdzam więc, że rozprawa mgr inż. Michała Ptaka spełnia w całości wymogi określone w Ustawie – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Komisją Doktorską Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.



Drobne usterki i błędy redakcyjne:

str 25 –wz. 2.6: co oznacza S oraz dS – brak komentarza co do dS , to samo wz. 2.8

str 68¹ – „...*the equation above...*” – powyżej nie ma żadnego równania

str 119 – wz. 6.1 – jednostki Transfer Function wg Rys 3-2 to $[\text{MPa}^2/\text{g}^2]$. We wzorze 6.1 jest SQRT, więc wg 6.1 $S(f)$ wyjdzie w **MPa**, bo na Rys 6.1 $\sin [g]$. A we wz. 3.4 jest $[\text{MPa}^2/\text{Hz}]$. Dlaczego **MPa²**?

str 120 – wz. 6.13 jest $N(S)_i$ powinno być, jak we wz.3.5 $N(S)_i$

str 151³ – *dumping* zamiast *damping*, gdzieś wcześniej też było ☺