

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa  
Tel.: +48 261 839 140  
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, dn. 10.02.2023 r.

### **Recenzja**

rozprawy doktorskiej (tytuł w j. angielskim)

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

autorstwa mgr. inż. MICHAŁA PTAKA

#### **1. Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn. W10/RDND07/83/2023) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej sygnowane przez Pana prof. dr hab. inż. ZBIGNIEWA GRONOSTAJSKIEGO i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. MICHAŁA PTAKA pt. „*The impact of dynamic loads on transmission shafts of the civil aircraft*”. Promotorami rozprawy są dr hab. inż. JERZY CZMOCHOWSKI, prof. uczelni ze strony Politechniki Wrocławskiej, a promotorem ze strony firmy Collins Aerospace Company Pan mgr inż. MARCIN CIS.

#### **2. Omówienie pracy**

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, łącznie na 188 stronach maszynopisu formatu A4. Składa się ona z: Acknowledgements, Content, wykazu rysunków (Figures), wykazu tabel (Tables), wykazu skrótów (Abbreviations), ośmiu rozdziałów głównych, literatury (Bibliography, 70 pozycji), streszczeń w j. angielskim i polskim oraz rozprawy głównej zawartej w sześciu rozdziałach. Dysertacja zawiera następujące rozdziały: (1) Introduction; (2) Vibration fatigue damage predictions under stochastic loading in the frequency domain theoretical background; (3) Vibration fatigue damage predictions under stochastic loading in the frequency domain – algorithm, programming and computation; (4) Vibration fatigue damage predictions under stochastic loading – combined frequency and time domain consideration; (5) Using combined time and frequency domains consideration for verification and modification of the legacy theory; (6) Developing a method for vibration damage estimation under combined random and deterministic loading; (7) Usage developed algorithms for vibration damage prediction of aircraft transmission shafts; (8) Conclusions and further research.

Doktorant w swojej rozprawie skupił się na ocenie wpływu stochastycznego oraz kombinowanego stochastycznego i deterministycznego obciążenia na wybrany podzespół statku

lotniczego. Za cel swoich badań przyjął opracowanie ogólnych metod szacowania uszkodzeń wibracyjnych dla tych rodzajów obciążeń i zademonstrowanie ich na przykładowym wale napędowym cywilnego statku powietrznego.

Praca doktorska składa się z kilku etapów. Autor na początku skupił się na studiowaniu dotychczasowych metod badawczych i wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania do szacowania uszkodzeń spowodowanych drganiami w przemyśle lotniczym. Wykonał analizę statystyczną sygnału i zliczania cykli zmęczeniowych w dziedzinie częstotliwości. Główną uwagę ukierunkował na adaptację kilku metod, m.in. metodę Dirlika (Autor przyjął jako metodę referencyjną), metodę wąskiego pasma Bendata (ang. *Narrow Band*), metodę Steinberga i metodę Lalanne'a, które znalazły swoje implementacje w komercyjnych kodach komputerowych stosowanych w przemyśle. Mając na względzie możliwość modyfikacji wybranych metod badawczych, Doktorant podjął się w pierwszym kroku stworzenia narzędzi programistycznych w celu implementacji aktualnego stanu wiedzy służącego do szacowania uszkodzeń wibracyjnych w dziedzinie częstotliwości. Opracowane własne algorytmy i przeprowadzone na ich bazie analizy zostały porównane z rezultatami otrzymywanymi z oprogramowaniem MSC CAE Fatigue dając podstawę do dalszych badań. Autor dokonując porównań wyników otrzymywanych metodą Lalanne'a zauważył, iż daje ona odmienne wyniki uszkodzeń dla sygnałów wąskopasmowych w porównaniu z metodą wąskiego pasma i metodą Dirlika. Stało się to inspiracją dla Doktoranta do wprowadzenia zmian do metody Lalanne'a poprzez modyfikację równania funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W ten sposób Autor uzyskał wyniki uszkodzeń zbliżone do metody Dirlika.

Autor dysertacji dokonał poszerzenia badania reprezentacji czasowych sygnałów losowych w dziedzinie czasu z zastosowaniem metody odwrotnej szybkiej transformacji Fouriera (IFFT, ang. *Inverse Fast Fourier Transform*) oraz metody Monte Carlo. Założeniem badawczym jakie przyjął Doktorant, było odtworzenie przebiegu losowego w dziedzinie czasu z odpowiedzi uzyskanej na podstawie widmowej gęstości mocy (PSD, ang. *Power Spectral Density*). Na tym etapie swoich badań opracował kolejne narzędzie programistyczne pozwalające na implementację wspomnianych metod w celu uzyskania funkcji odpowiedzi PSD dla rozpatrywanej próbki z wykorzystaniem wyników z analiz wykonanych w zakresie dynamiki liniowej w środowisku Abaqus (używając metody superpozycji modalnej). Dodatkowo Doktorant utworzył algorytm do zliczania cykli zmęczeniowych (RCC, ang. *Rainflow Cycle Counting*).

Opracowane narzędzia Autor dysertacji w kolejnym kroku wykorzystał do badania parametrów statystycznych sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Badania oparł na odpowiedziach PSD w dziedzinie częstotliwości sztucznie utworzonych do celów badawczych oraz w celu odtworzenia odpowiedzi PSD w dziedzinie czasu z wykorzystaniem metody IFFT i metody Monte Carlo. Wyniki badań pokazały potrzebę modyfikacji całkowania pierwszego,



drugiego i czwartego momentu spektralnego w celu dopasowania wszystkich parametrów pomiędzy odpowiedziami PSD w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dodatkowo Doktorant zaproponował modyfikację metody wąskiego pasma w kierunku uogólnienia i zastosowania do analizy sygnałów wąskopasmowych i szerokopasmowych. Autor uzyskał finalną zbieżność wartości uszkodzeń dla metody Dirlika, metody wąskiego pasma i metody Lalanne'a. Daje to możliwość precyzyjnej oceny uszkodzeń metodą Lalanne'a i metodą wąskiego pasma dla wszystkich typów sygnałów przy znacznie mniejszym nakładzie empirycznym niż w metodzie Dirlika. Dla analizy uzyskanych wyników uszkodzeń Doktorant wyselekcjonował opis z wykorzystaniem rozkładu normalnego, potęgowanego Weibulla i uogólnionej wartości ekstremalnej. Autor dodatkowo zdiagnozował zróżnicowanie uszkodzeń w zależności od rozmiaru bloku (N) zastosowanego w IFFT i zaproponował rozwiązanie w postaci stosownej nierówności, której spełnienie zakłada modyfikację krzywej wejściowej PSD.

W kolejnym etapie swoich badań Doktorant wprowadził kombinację obciążeń stochastycznych i deterministycznych będącą zarazem wymogiem z punktu widzenia prowadzonych analiz dla statków powietrznych zarówno cywilnych, jak też wojskowych. Na początku Doktorant opracował własne narzędzie programistyczne i dokonał stosownych porównań z komercyjnym kodem MSC CAE Fatigue. Autor dla potrzeb swoich badań zaproponował nowatorską metodę polegającą na analizie uszkodzeń w tym scenariuszu obciążenia z wykorzystaniem hybrydowych obliczeń w dziedzinie czasu i częstotliwości. Założył badania z wykorzystaniem liniowej dynamiki w celu uzyskania funkcji odpowiedzi PSD (skorelowanej z wynikami testów), a następnie wykonał przejście do dziedziny czasu i uzyskanie odpowiedzi PSD w dziedzinie czasu metodami IFFT i Monte Carlo. W ten sposób po nałożeniu sygnału w dziedzinie czasu dokonywane jest zliczanie cykli zmęczeniowych. Doktorant podkreśla, że zaproponowana metoda daje znacznie mniej konserwatywny wynik uszkodzeń. Analizę wyników uszkodzeń Autor przeprowadził implementując wspomniane wcześniej trzy rozkłady stosowane w scenariuszu obciążenia stochastycznego (rozkład normalny, wykładniczy Weibulla i uogólniona wartość ekstremalna). Takie podejście pozwala bez wątplenia na precyzyjną estymację uszkodzeń dla przypadków obciążeń kombinowanych (stochastycznych i deterministycznych) oraz dodatkowo daje możliwość uwzględnienia parametrów testowych, np. limitu odchylenia standardowego sygnału losowego i uwzględnienia rozdzielczości częstotliwości stosowanej podczas rzeczywistych testów.

W ostatnim etapie rozprawy Autor wdrożył stworzone lub zmodyfikowane metody analizy wpływu obciążeń dynamicznych dla przypadku badań wału napędowego cywilnego statku powietrznego. Danymi wejściowymi do analizy zmęczeniowej były wyniki badań wału poddanego testom wibracyjnym. Wyniki te posłużyły do korelacji modelu MES w środowisku Abaqus,

a następnie zaimplementowano do szacowania zmęczenia wibracyjnego. Wskazaną konstrukcję zbadano poddając ją stochastycznym oraz kombinowanym stochastyczno-deterministycznym warunkom obciążenia.

Analizy zaprezentowane w rozprawie pozwoliły na opracowanie metod służących do szacowania zmęczenia wibracyjnego pod obciążeniem losowym oraz kombinowanym, które następnie Autor pragnie wdrożyć w firmie Collins Aerospace. W ten sposób wypracowana metodologia badawcza i zaproponowane algorytmy numeryczne będą stanowiły podstawę do stworzenia oryginalnego oprogramowania służącego prowadzonym wewnątrz firmy analizom.

W rozprawie Doktorant nakreślił także potrzebę kolejnych badań m.in. dotyczących analiz w zakresie zmęczenia niskocyklowego np. z wykorzystaniem korekcji naprężeń średnich Morrowa oraz badań elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów ortotropowych.

Należy podkreślić, iż realizacja rozprawy doktorskiej mogła się odbyć dzięki finansowemu wsparciu, jakie uzyskał Doktorant w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” realizowanemu pod auspicjami Ministerstwo Edukacji i Nauki (edycja III, grant nr. DWD/3.03.2019).

Mgr inż. Michał Ptak jest współautorem 4 prac zarejestrowanych w bazie Scopus opublikowanych w czasopismach naukowych: *Probabilistic Engineering Mechanics* (wydawnictwo Elsevier), *Acta Mechanica et Automatica* (wydawnictwo Politechniki Białostockiej), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (wydawnictwo Springer) i *International Journal of Structural Integrity* (wydawnictwo Emerald). Jest to publikacyjność na poziomie spełniającym wymagania stosownej ustawy przy składaniu rozprawy doktorskiej.

### **3. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne**

Recenzent zdecydował się, po przestudiowaniu niniejszej dysertacji, na przedstawianie swoich uwag i wątpliwości w dwóch zakresach, tj. w zakresie merytorycznym oraz edycyjnym. Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie:

- 1) Recenzent pragnie zwrócić uwagę, iż zaprezentowany sposób cytowania literatury jest niepoprawny i nie prezentuje wiedzy cząstkowej zawartej w poszczególnych przytoczonych pozycjach bibliograficznych (str. 23, „The research and conclusions presented in publications [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] and [14] are focused on a combined computer technique method and FEM analysis predicting the vibration damage.”).
- 2) Autor dysertacji jasno nie zdefiniował pojęcia „uszkodzenia” w analizowanych przypadkach (ang. *damage*), które jest podstawą prowadzonych analiz. Można jedynie znaleźć następujące stwierdzenie (str. 55): „The damage value was evaluated using an



unaverage element nodal value (stress value extrapolated from integration points of elements of the element nodal location).”

- 3) Recenzent pragnie zauważyć, iż przed przystąpieniem do budowania modelu numerycznego MES próbki z karbem geometrycznym (rozdział 3.3.1) winna być przeprowadzona analiza w kierunku doboru gęstości siatki oraz topologii użytych elementów skończonych mając na względzie oszacowanie dopuszczalnego błędu rozwiązania. Opis dyskretny w tym obszarze istotnie determinuje otrzymywane wyniki, szczególnie w aspekcie oceny stanu naprężenia/odkształcenia.
- 4) Dlaczego Autor przyjął metodę Dirlika jako metodę referencyjną? W literaturze dla przemysłu lotniczego jako metodę referencyjną przyjmuje się metodę Lalanne’a występująca w postaci zmodyfikowanego równania Rice’a. Wskazuje na to seria pozycji literaturowych: Lalanne C., *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration*, John Wiley & Sons, 2013; Lalanne C., *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Sinusoidal Vibration*, John Wiley & Sons, 2013; Lalanne C., *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Fatigue Damage*, John Wiley & Sons, 2013; Lalanne C., *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Mechanical Shock*, John Wiley & Sons, 2013 oraz Lalanne C., *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Specification Development*, John Wiley & Sons, 2013.
- 5) Autor nie dokonał zestawień statystycznych opracowanych modeli dyskretnych dla analizowanych przypadków (model MES (próbka z karbem geometrycznym) zaprezentowany w podrozdziale 3.3.1 i rozdziale 7 (model wału napędowego statku powietrznego)). Ta uwaga ma na względzie aspekt podniesiony w uwadze zawartej w punkcie 3.
- 6) Jak Doktorant widzi możliwość wprowadzenia do zaproponowanej metody badawczej istnienia np. hipotetycznych ukrytych wad materiałowych i jak mogłoby to wpłynąć na uzyskiwane wyniki?
- 7) Jakie niezbędne są modyfikacje (jeżeli są?) do zastosowania dla zaproponowanej metody badawczej dla przypadków badania konstrukcji obciążonych w założonych stanach obciążenia skutkujących m.in. powstaniem lokalnych złożonych stanów naprężenia, szczególnie np. w obszarach istniejących inkluzji materiałowych lub dla badania elementów produkowanych z wykorzystaniem technologii 3D printing mając na względzie obecnie panujące trendy w tym obszarze?
- 8) Recenzent zauważa, że zaproponowana przez Doktoranta metoda nie została bezpośrednio zwalidowana na wybranym elemencie konstrukcyjnym statku powietrznego.

Wśród niedociągnięć natury edycyjnej należy wskazać m.in.:

- 1) Dlaczego każdy z podrozdziałów zaczyna się od nowej strony. Powoduje to efekt sztucznego namnażania objętości rozprawy.
- 2) Rys. 7.1 i 7.4 charakteryzują się bardzo niską czytelnością.
- 3) Recenzent za celowe uznaje dołączenie do pracy w postaci załączników elementów opracowanych kodów numerycznych powstałych w języku programowania Python.

Przedłożone w recenzji uwagi merytoryczne oraz edycyjne winny stanowić dla Doktoranta podstawę do bardziej dogłębnych analiz i przemyśleń, przyczyniając się tym samym do uzyskania szeregu nowych, jeszcze bardziej wartościowych rezultatów pod kątem ilościowym oraz jakościowym, a tym samym wytyczając prekursorski horyzont badawczy.

#### **4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się przede wszystkim istotnym aspektem poznawczo-badawczym z jasno określonym planem wdrożenia opracowanych metod badawczych. Doktorant zaproponował połączenie w swoich badaniach metody MES oraz metody Monte Carlo, które to połączenie zrealizował dzięki opracowanym kodom numerycznym w języku programowania Python na bazie oryginalnych algorytmów. Pozwoliło to na identyfikację potrzeby udokładnienia opisu statystycznego sygnału w dziedzinie częstotliwości dla sygnałów innych niż wąskopasmowe. Doktorant opracował autorską modyfikację istniejącej metody oceny uszkodzeń wibracyjnych poprzez modyfikację równania do obliczania funkcji gęstości prawdopodobieństwa (metoda Lalanne'a) i modyfikację równania do obliczania rzeczywistej liczby cykli (metoda Bendata). Dodatkowo, zademonstrował nowe podejście do całkowania momentów widmowych wykorzystując metodę Monte Carlo i IFFT, co pomogło uzyskać parametry statystyczne sygnału w dziedzinie częstotliwości dopasowane do statystyk sygnału w dziedzinie czasu. Zredukowane całkowanie momentu widmowego dało możliwość precyzyjnego wyprowadzenia statystyk sygnału w dziedzinie częstotliwości, a zastosowanie tego podejścia ze zmodyfikowanymi metodami Lalanne'a i Bendata pozwoliło uzyskać wyniki uszkodzeń zbliżone do metody Dirlika (metoda referencyjna). Oryginalnym rezultatem badań przeprowadzonych przez Doktoranta jest więc jest zatem opracowanie dwóch metod opartych na metodzie Bendata i Lalanne'a, które umożliwiają na precyzyjną estymację uszkodzeń dla wszystkich sygnałów (wąskopasmowych, szerokopasmowych, białego szumu) z dokładnością zbliżoną do metody Dirlika. Takie ujęcie daje mniej skomplikowaną formułę empiryczną i w ten sposób pozwala na aplikację w zastosowaniach inżynierskich realizowanych w Collins Aerospace Company.



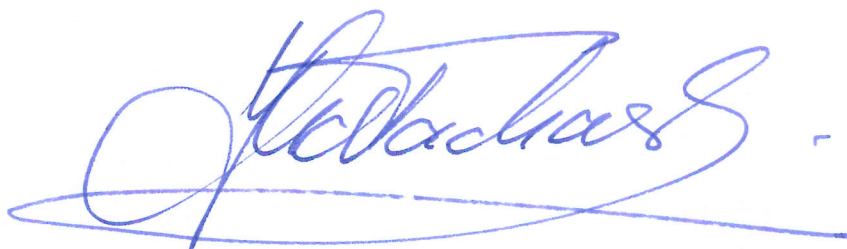
Pan mgr inż. Michał Ptak dzięki zrealizowanej rozprawie doktorskiej wykazał się zarówno wiedzą z zakresu umiejętności prowadzenia badań analitycznych oraz zaawansowanych analiz numerycznych. Recenzent pragnie także stwierdzić, iż zarówno osiągnięte wyniki zaprezentowane w niniejszej dysertacji, już opracowane i opublikowane artykuły, jak też i powiązane z nimi przeprowadzone badania analityczno-numeryczne potwierdzają, że Autor dysertacji posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzent widzi duży dalszy potencjał badawczy w zakresie wykorzystania opracowanych modeli numerycznych dla potrzeb analiz optymalizacyjnych, mając na uwadze rozważany w pracy deterministyczny i stochastyczny charakter obciążeń będących odzwierciedleniem warunków eksploatacyjnych.

## **5. Wniosek końcowy**

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną ustawę i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr. inż. MICHAŁA PTAKA.

Rozprawa mieści się w zakresie dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych i wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Michał Ptak', with a long horizontal flourish extending to the right.