

Michał Ptak
Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

WPLYW OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH NA WAŁY TRANSMISYJNE SAMOLOTU CYWILNEGO

STRESZCZENIE

Badania przedstawione w pracy koncentrowały się na wpływie stochastycznego oraz kombinowanego stochastycznego i deterministycznego przypadku obciążenia na podzespoły lotnicze. Celem badań było stworzenie ogólnych metod szacowania uszkodzeń wibracyjnych dla tych przypadków obciążeń i zademonstrowanie ich na przykładowym wale transmisyjnym cywilnego statku powietrznego.

Początkowe badania skupiały się na studiowaniu dotychczasowych technik i wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania do szacowania uszkodzeń spowodowanych drganiami w przemyśle lotniczym. W pracy przedstawiono metody statystyki sygnału i zliczania cykli zmęczeniowych (ang. Rainflow Cycle Counting – RCC) w dziedzinie częstotliwości. Główną uwagę poświęcono metodzie Dirlika, metodzie wąskiego pasma Bendata, metodzie Steinberga i metodzie Lalanne, gdyż metody te są powszechnie stosowane w oprogramowaniu komercyjnym w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych (także w firmie Collins Aerospace Company).

Kolejnym krokiem było stworzenie narzędzi programistycznych w celu implementacji aktualnego stanu wiedzy służącej do szacowania uszkodzeń wibracyjnych w dziedzinie częstotliwości – gdyż badania zakładały rozwój dotychczasowych metod. Algorytmy pozwalające na szacowanie zmęczenia wibracyjnego zostały stworzone poprzez implementację powyższych metod. Utworzone algorytmy zostały skorelowane z oprogramowaniem MSC CAE Fatigue i stanowiły podstawę do dalszych badań. Dodatkowo podczas tej fazy zaobserwowano, że metoda Lalanne daje odmienne wyniki uszkodzeń, zwłaszcza dla sygnałów wąskopasmowych, w porównaniu z metodami Narrow Band i Dirlika. Na tym etapie badań zaproponowano modyfikację metody Lalanne. Zaproponowano modyfikację równania funkcji gęstości prawdopodobieństwa, skutkującą uzyskaniem wyników uszkodzeń zbliżonych do metody Dirlika.

Aby rozszerzyć dotychczasowy stan wiedzy zaproponowano badania reprezentacji czasowych sygnałów losowych w dziedzinie czasu z zastosowaniem metody IFFT (odwrotnej szybkiej transformacji Fouriera) i metody Monte Carlo – przez analogię do badań prowadzonych przez Dirlika podczas opracowywania jego metody. Założeniem badawczym było odtworzenie przebiegu losowego w dziedzinie czasu z odpowiedzi PSD (Power Spectral Density) otrzymanej dla rozpatrywanej próbki w dziedzinie częstotliwości przy użyciu powyższych metod. Na tym etapie badań zbudowano narzędzia programistyczne, które pozwalają na implementację metod IFFT i Monte Carlo do uzyskania funkcji odpowiedzi PSD dla rozpatrywanej próbki z wykorzystaniem dynamiki liniowej w środowisku Abaqus (używając metody superpozycji modalnej). Dodatkowo utworzono algorytm RCC w dziedzinie czasu umożliwiający analizę zmęczenia w dziedzinie czasu.

Narzędzia utworzone w poprzednim kroku zostały następnie wykorzystane do badania parametrów statystycznych sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Badania oparto na odpowiedziach PSD w dziedzinie częstotliwości sztucznie utworzonych do celów badawczych oraz w celu odtworzenia odpowiedzi PSD w dziedzinie czasu z wykorzystaniem metod IFFT i Monte Carlo. Wyniki badań pokazują, że przy obecnym stanie wiedzy parametry statystyczne sygnału w dziedzinie częstotliwości (oddolne przejścia sygnału przez zero, liczba pików, współczynnik nieregularności) nie odpowiadają tym samym parametrom w dziedzinie czasu, zwłaszcza dla sygnału szerokopasmowego i białego szumu. Powyższe parametry są istotne z punktu widzenia szacowania zmęczenia wibracyjnego, dlatego zaproponowano modyfikację całkowania momentów spektralnych. Zaproponowano modyfikację całkowania pierwszego, drugiego i czwartego momentu spektralnego – pozwala to na dopasowanie wszystkich wymienionych parametrów pomiędzy odpowiedziami PSD w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dodatkowo w tej fazie badań zaproponowano modyfikację metody Narrow Band w celu uogólnienia tej metody – tak by można było ją zastosować dla sygnałów wąskopasmowych, szerokopasmowych i wąskopasmowych (obecny stan wiedzy pozwala na nie konserwatywną analizę uszkodzeń jedynie dla sygnału wąskopasmowego). Zaproponowano zastąpienie liczby pików w widmie liczbą przejść przez zero w górę w równaniu służącym do oszacowania rzeczywistej liczby cykli w każdym przedziale zakresu naprężeń. Wszystkie proponowane modyfikacje pozwalają na uzyskanie zbliżonych wartości uszkodzeń dla metody Dirlika, metody Wąskiego Pasma i metody Lalanne, która jest zbliżona do oryginalnej metody Dirlika. Zaproponowana modyfikacja pozwala na precyzyjną ocenę uszkodzeń metodą Lalanne i metodą wąskiego pasma dla wszystkich typów sygnałów przy znacznie mniejszym nakładzie empirycznym niż w metodzie Dirlika.

W trakcie badań zaobserwowano, że wartość uszkodzeń podana metodą Dirlika jest średnią wartością uszkodzeń, gdy weźmie się pod uwagę większą populację próbek – uszkodzenia oscylują wokół wartości średniej, gdy analizuje się różne reprezentacje szeregów czasowych rozważanej jednej reprezentacji odpowiedzi PSD w dziedzinie częstotliwości. To odkrycie jest istotne z punktu widzenia dokładności dotychczasowych metod – które nie są w stanie dostarczyć informacji o rozkładzie szkód, w związku z czym nie jest możliwe oszacowanie bezpiecznej wartości szkody (np. dla której 99,73% populacji ma mniejszą wartość zmęczenia wibracyjnego). Wyniki badań pozwalają na wyselekcjonowanie trzech najlepiej dopasowanych typów rozkładów: rozkładu normalnego, potęgowanego Weibulla i uogólnionej wartości ekstremalnej, które można wykorzystać do opisu zmienności uszkodzeń. Dodatkową obserwacją było zróżnicowanie uszkodzeń w zależności od rozmiaru bloku (N) zastosowanego w IFFT – rozdzielczość częstotliwości stosowana podczas testów w celu odtworzenia sygnału czasowego z krzywej PSD – niższa rozdzielczość częstotliwościowa skutkująca większą zmiennością uszkodzeń, które stabilizują się na poziomie $\log_2(N)$ równym 20. Zatem aby nie doszło do niewystarczającego przetestowania podczas rzeczywistych testów pod kątem obciążenia stochastycznego zaproponowano spełnienie nierówności (uszkodzenia, dla których 0,13% populacji ma wyższą wartość uszkodzeń oszacowaną dla rozdzielczości częstotliwości testowej, muszą być wyższe niż uszkodzenia, dla których 99,73% populacji nie ma większych uszkodzeń dla rozdzielczości częstotliwości, dla której $\log_2(N)$ jest równe 20). W celu spełnienia tej nierówności zakłada się modyfikację krzywej wejściowej PSD co pozwoli na pokrycie pierwotnego wymagania PSD.

Kolejny etap badań skupiał się na kombinowanych obciążeniach stochastycznych i deterministycznych będących wymogiem w statkach powietrznych cywilnych i wojskowych. Jako pierwszy krok stworzono narzędzie programistyczne, które odtworzyło aktualny stan wiedzy oraz dokonano korelacji z oprogramowaniem MSC CAE Fatigue. Dotychczas stosowane metody zakładają, że szacowanie uszkodzeń wibracyjnych przy kombinowanych obciążeniach stochastyczno-deterministycznych przeprowadza się w dziedzinie częstotliwości (w dziedzinie częstotliwości prowadzona jest superpozycja dwóch sygnałów). W rozprawie przedstawiono dowód, że zastosowanie takiego podejścia skutkuje wysoce zachowawczymi wynikami uszkodzeń. Zaproponowano nową, nowatorską metodę polegającą na analizie uszkodzeń w tym scenariuszu obciążenia z wykorzystaniem hybrydowych obliczeń w dziedzinie czasu i częstotliwości. W proponowanej metodzie zakłada się (tak samo jak w przypadku dotychczasowej metody) metod dynamiki liniowej w celu uzyskania funkcji odpowiedzi PSD (skorelowanej z wynikami testów), a następnie przejście do dziedziny czasu – uzyskanie odpowiedzi PSD w dziedzinie czasu metodami IFFT i Monte Carlo. Deterministyczna część obciążenia, np. przemiatanie sinusoidalne, uwzględnia odpowiedź PSD w domenie częstotliwości – wykorzystując związek pomiędzy czasem i częstotliwością. Kolejnym krokiem jest nałożenie sygnału w dziedzinie czasu i zliczanie cykli zmęzeniowych oraz szacowanie zmęczenia w dziedzinie czasu. Nowa metoda daje znacznie mniej konserwatywny wynik uszkodzeń. W przypadku tego scenariusza obciążenia, analogicznie do obciążeń czysto stochastycznych, konieczne jest wyprowadzenie rozkładu uszkodzeń, ponieważ uszkodzenia oscylują wokół wartości średniej. Jako najlepiej pasujący rozkład wybrano trzy wyżej wymienione rozkłady stosowane w scenariuszu obciążenia stochastycznego (rozkład normalny, wykładniczy Weibulla i uogólniona wartość ekstremalna). Zaproponowana nowa metoda pozwala na precyzyjną estymację uszkodzeń dla połączonego obciążenia stochastycznego i deterministycznego, a dodatkowo pozwala na uwzględnienie parametrów testowych, np. limit odchylenia standardowego sygnału losowego (np. do 3 lub 5 odchyień standardowych), uwzględnienie rozdzielczości częstotliwości stosowanej podczas rzeczywistych testów.

Ostatnim etapem pracy jest wdrożenie stworzonych lub zmodyfikowanych metod analizy wpływu obciążeń dynamicznych na przykładowy wał napędowy cywilnego statku powietrznego. Jako dane wejściowe do analizy zmęczeniowej wykorzystano wał napędowy, dla którego przeprowadzono testy wibracyjne. Wyniki badań wykorzystano do korelacji modelu MES w środowisku Abaqus, który wykorzystano następnie do szacowania zmęczenia wibracyjnego. W pracy zawarto demonstracyjną analizę zmęczenia wibracyjnego dla obciążeń stochastycznych oraz kombinowanych obciążeń stochastyczno-deterministycznych z wykorzystaniem opracowanych metod.

Rozważania przedstawione w pracy pozwoliły na opracowanie metod służących do szacowania zmęczenia wibracyjnego pod obciążeniem losowym oraz kombinowanym obciążeniem stochastyczno-deterministycznym, które zostaną wprowadzone w firmie Collins Aerospace i które będą podstawą do stworzenia oprogramowanie wewnętrznego.

W pracy przedstawiono plan dalszego rozwoju, który uwzględni analizę zmęczenia niskocyklowego, np. z wykorzystaniem korekcji naprężeń średnich Morrowa oraz podejście płaszczyzn krytycznych. Dodatkowo w dalszych badaniach uwzględnione zostanie zastosowanie rozważanych metod dla materiałów ortotropowych.

Wyniki badań przedstawione w rozprawie zostały przedstawione w dwóch artykułach naukowych, które zostały opublikowane w dwóch publikacjach międzynarodowych. Dodatkowo wyniki badań zaprezentowano w monografii i artykule konferencyjnym. Wyniki badań zostały zaprezentowane i poddane dyskusji na czterech konferencjach międzynarodowych.