dr hab. inż. Adam Dacko, profesor PW
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 24 czerwca 2023

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Olgi Grzejszczak-Pączek
pt. „Wytrzymałościowa ocena parametrów konstrukcyjnych wirnika sprężarki osiowej z uwzględnieniem czynników eksploatacyjnych".

1. Podstawa opracowania

Podstawę wykonania recenzji stanowi zlecenie 17/RDN IM/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna WAT prof. dr hab. inż. JERZEGO MAŁACHOWSKIEGO z dnia 24 marca 2023, i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Grzejszczak-Pączek pt. „Wytrzymałościowa ocena parametrów konstrukcyjnych wirnika sprężarki osiowej z uwzględnieniem czynników eksploatacyjnych", wykonana pod kierunkiem prof. Adama KOZAKIEWICZA.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zagadnienia trwałości i niezawodności turbinowych silników odrzutowych mają kluczowe znaczenie w ekonomicznym rachunku kosztów eksploatacji samolotu. W nowoczesnych silnikach turbinowych newralgicznym obszarem konstrukcji stopnia wirnikowego jest współpraca łopatki z bębnem nośnym czy tarczą.

Większość prac, badań i wniosków badań numerycznych łączonych z pomiarami w eksperymencie dotyczyła analizowania zastępczych i uproszczonych modeli konstrukcji. Natomiast ze względu na skomplikowany charakter obciążeń struktury (i występujące współoddziaływanie parametrów przepływu i deformacji obiektu) oraz istotne szczegóły rozwiązań konstrukcyjnych – konieczne jest dokładniejsze opisanie sprzężeń pól fizycznych i parametrów opisu połączenia łopatka-zamek.

Uważam więc, że podjęcie tematu rozprawy jako ocena parametrów konstrukcyjnych jest niezwykle celowe i w pełni uzasadnione, a podejmowana tematyka ważna i aktualna, zarówno w sensie badawczym, jak i wyraźnie ekonomicznym.

Rozprawa napisana jest w języku polskim, na 174 stronach. Zawiera ona 5 rozdziałów (w tym 224 rysunki). Spis literatury zawiera 139 pozycji, w tym 5 pozycji współautorskich Doktorantki. W Bibliografii tylko 3 to cytowania źródeł internetowych. Specyfiką takich źródeł jest ich zmienna zawartość, zatem odwołana do nich powinny zawierać datę dostępu. Niestety w spisie literatury i w tekście precyzyjnych informacji brak, nieznany jest nawet rok.

3. Omówienie zakresu rozdziałów

Rozdział 1. Wstęp (43 strony)

Rozdział ten zawiera wstępne informacje dotyczące materiałów stosowanych w silnikach turbinowych, czynników eksploatacyjnych determinujących ich trwałość i niezawodność, stosowanych technik obliczeniowych. Rozdział ten podaje też analizę aktualnego stanu zagadnienia i finalnie – cel i zakres pracy.

Aktualny stan zagadnienia to punkt rozbudowany, sięgający wstecz do opisów analitycznych tarcz wirujących o zmiennej grubości, oraz do aktualnych opisów analiz numerycznych (MES). Bieżące prace są cytowane szeroko, łącznie z pozycjami z roku 2021.

Po omówieniu stanu zagadnienia, wreszcie, ale dopiero **na 48 stronie pracy (sic!)** pojawia się definicja celu i zakresu pracy.

Autorka cel pracy określa jako *„.. opracowanie metodyki wspomagającej dobór optymalnych parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych elementów konstrukcji"*. Natomiast teza postawiona przez Doktorantkę to stwierdzenie, że *„..bazując na modelach połączenia łopatka-tarcza, można przez ocenę parametrów zidentyfikować cechy krytycznie wpływające na obciążenia konstrukcji i mogące stanowić bazę dla optymalizacji"*.

Rozdział 2. Model numeryczny stopnia sprężarki osiowej (23 strony)

Opis budowy modelu numerycznego rozpoczyna się od opracowania w programie Siemens NX geometrii tarczy oraz łopatki. Newralgicznym elementem jest zamek połączenia, opisany przez szereg parametrów. Doktorantka zastosowała tu cechę „cyklicznej symetrii", która upraszcza postepowanie nie tylko na etapie tworzenie modelu geometrycznego, ale także na etapie symulacji numerycznych. Opcja symetrii cyklicznej w obliczeniach jest w sposób naturalny wykorzystywana w analizie przepływowej (Fluent), jak i w analizie strukturalnej (ANSYS Workbench).

Rozdział opisujący model numeryczny tarczy z łopatkami zamyka dodatkowa opcja zamodelowania tarczy zintegrowanej z łopatkami (rozwiązanie BLISK), przeprowadzenia dla obu rozwiązań nie tylko wstępnych analiz wytrzymałościowych, które umożliwiły redukcje masy w konstrukcji integralnej o 28%, ale także analiz modalnych. Analizy modalne były bazą do utworzenia diagramów Campbella.

Rozdział 3. Identyfikacja parametrów geometrycznych sprężarki pod katem optymalizacji (51 stron)

Rozdział 3 to merytorycznie ważny, a objętościowo największy element pracy. Wyniki analiz, przedstawiane w tym rozdziale są podstawą do przeprowadzenia w Rozdziale 4 finalnej oceny wpływu wybranych parametrów na własności wytrzymałościowe struktury.

Śledzenie wyników i analiz przedstawianych w tym Rozdziale wymaga od czytelnika skoncentrowanej uwagi i dokładnego śledzenia informacji. Analizie poddane są tu porównawczo dwa typy konstrukcji – konstrukcja klasyczna, z połączeniem zamkowym oraz konstrukcja integralna (typu BLISK).

W obu konstrukcjach rozpatrywano po dwa parametry określające własności mechaniczne struktury. Zwykle jeden z parametrów był przyjmowany kolejno jako dwie wyraźnie różne wartości i dla obu tych wartości badano wpływ drugiego parametru (w pełnym jego zakresie) na naprężenia zredukowane, pomieszczenia i odkształcenia (przy tych skrajnych wartościach pierwszego parametru). Dodatkowo zmieniano wartość obrotów wirnika.

Następnie sytuacja była odwracana – to drugi parametr przyjmował wyraźnie różne dwie wielkości („skrajne"), a badano zależność naprężeń, odkształceń i przemieszczeń dla pełnej zmienności pierwszego parametru.

Sytuacja była powtarzana w podobny sposób dla drugiego rozwiązania konstrukcyjnego (klasyczna i BLISK). Także w tym rozwiązaniu Doktorantka operowała dwoma parametrami, ale miały one inne fizyczne znaczenie. Dla konstrukcji klasycznej były to parametry kątowe P1 i P2 zamka łączącego łopatkę z tarczą. Dla konstrukcji integralnej (BLISK) były to parametry V12 i V14, określające grubość tarczy w części wieńcowej.

Powyższe wyznaczanie wrażliwości odpowiedzi na zmiany parametrów odbywały się dodatkowo dla dwóch przypadków obciążenia. Pierwsze obciążenie to podstawowy wariant – obciążenie od sił masowych wynikających z zadanej prędkości obrotowej. Drugie obciążenie to sprzężona analiza przepływowo-mechaniczna. Oznacza to, iż wzięto pod uwaga także obciążenia od ciśnienia na pióro łopatki. Sprzężenie przyjęto jako słabe (jednokierunkowe), czyli przepływ gazu oddziaływał na naprężenia i deformację struktury, ale deformacje struktury nie miały wpływu na rozkład ciśnień w przepływie.

Doktorantka zauważa, że w przypadku konstrukcji jednolitej (integralne, typu BLIK) wpływ ciśnienia w zadaniu sprzężonym jest wyraźnie niewielki, można nawet uznać za pomijalny w stosunku do wpływu obciążenia od wirowania.

Rozdział 3 zamyka analiza wpływu współczynnika tarcia na wytrzymałość konstrukcji stopnia wirnikowego sprężarki. Obliczenia wykazały niewielki stabilizujący wpływ tarcia na zachowanie struktury, np. wzrost wielkości współczynnika tarcia do wartości 0.3 powoduje ok 5% redukcję maksymalnych naprężeń.

Rozdział 4. Ocena wpływu wybranych parametrów geometrycznych na własności wytrzymałościowe stopnia wirnikowego z uwzględnieniem interakcji płyn-struktura. (34 strony)

Bazując na wynikach symulacji z Rozdziału 3 Doktorantka przeprowadza analizę wybranych parametrów na własności wytrzymałościowe, wykonuje analizę wrażliwości i tworzy w programie DesignXplorer tzw. powierzchnie funkcji odpowiedzi.

Analizując kształt tych powierzchni określane są wnioski odnośnie wrażliwości danej odpowiedzi (np. maksymalnych naprężeń zredukowanych). Kłopot z ich analizą polega na tym, że odpowiedzi te są bardzo indywidualne i np. zmiany naprężeń maksymalnych na konkretne parametry nie można porównywać z wrażliwością zmian przemieszczeń na te same parametry. Powierzchnie odpowiedzi w funkcji parametrów należy analizować indywidualnie.

Rozdział 4 zamyka informacja o eksperymentalnej weryfikacji symulacji numerycznych. Weryfikacja ta niestety nie daje szerszego spektrum wyników, które można by porównać do symulacji numerycznych. Potwierdza jedynie słuszność wyboru parametrów optymalizacji, które należy uwzględnić w badaniach.

Rozdział 5 Podsumowanie i wnioski (5 stron)

Rozdział ten zawiera syntetyczne wyniki i wnioski z rozprawy. Autorka w tym miejscu podsumowuje wyniki uzyskane w rozprawie, przedstawia najważniejsze wnioski, a także sugeruje kierunki dalszych badań. W opinii Recenzenta, Doktorantka dowiodła, iż przedstawiony w rozdziale 3 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 Autorka wykazała się wysokimi kompetencjami w zakresie ich planowania, realizacji i analizy. Dotyczy to zarówno analiz numerycznych jak i badań eksperymentalnych.

a. Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta

Uważam, że oryginalnym dorobkiem Doktorantki jest przeanalizowanie i rozwiązanie problemów powiązania parametryzacji, optymalizacji i analizy wrażliwości w wytrzymałościowej ocenie parametrów wirnika sprężarki. Przeanalizowanie dwóch rozwiązań konstrukcyjnych, przy różnej ich parametryzacji, dla różnych prędkości obrotowych wirnika, dla różnych obciążeń (także sprzężonych), wykazuje wyraźnie stopień komplikacji analiz, które przeprowadziła Doktorantka.

b. Krytyczna ocena rozprawy

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

- Jako istotny mankamentem układu pracy odbieram określenie celu pracy dopiero na 48. stronie rozprawy, czyli prawie w 1/3 całej pracy. Utrudnia to na początku czytelnikowi zrozumienie – „do czego dążymy".
- Na str. 71 pojawia się analiza modalna. „Osiągnięto oszczędność masy..." i mowa o własnościach dynamicznych konstrukcji. To nie jest „jasne" – bo przy drganiach własnych nie istnieje wielkość amplitudy. Dopiero w analizie harmonicznej (znane obciążenie) można mówić o amplitudzie drgań.
- Także niezbyt klarownym elementem pracy jest wyłowienie szczegółów – już pierwsze wykresy (rys 3.6 i następne) wpływu zmiany parametrów na naprężenie zredukowane (np. rys. 3.8 – na odkształcenie i przemieszczenie) – nie określają miejsca odczytu tych naprężeń czy odkształceń. Czy to jest ta sama lokalizacja, czy też zmienna lokalizacyjnie „wielkość maksymalna" – nie wiadomo.
- Cały Rozdział 3 jest mało czytelny. Przejścia między analizami nie są czytelne. W p. 3.2 tekst najpierw mówi o konstrukcji klasycznej, potem integralnej. Warto byłoby to wyraźnie rozdzielić. To samo w p. 3.3. Przejście od analizy konstrukcji klasycznej do integralnej jest mało czytelne. Rozdział ten ma tak wiele „wariantów", że robi się nieczytelny.
- Niefortunny jest układ osi w wykresach powierzchni wrażliwości (rys 4.6 i następne). Osie parametrów P1 oraz P2 (a potem V12 i V14) są orientowane niekonsekwentnie – czasem w lewo to oś P1, a czasem P2. Utrudnia to porównywanie wykresów i określanie wrażliwości funkcji.

c. Uwagi szczegółowe.

Szczegółowe oceny krytyczne odnoszą się do błędów redakcyjnych. Ze względu na ich niewielką wagę wymieniam je w załączniku do 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 Doktorantkę zrealizowane. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne. Doktorantka wykazała się przy tym wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych, numerycznych i badań doświadczalnych. Praca dowodzi odpowiedniej wiedzy teoretycznej i praktycznej doktorantki. Stwierdzam więc, że rozprawa mgr inż. Olgi Grzejszczak-Pączek spełnia w całości wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* wraz z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2017 r. poz. 859) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Komisją Doktorską Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej.

Drobne usterki i błędy redakcyjne:

str 28_{11} – powinno być: HMH (jest HMN)

str 35^{6} – macierz K **może** być pasmowa przy odpowiedniej numeracji węzłów. Ogólnie – nie jest.

str 63 – podpis pod rys. 2.16 Rysunek z prawej to 2-D? To „przekrój" tarczy?

str 71 – w podpisie rys. 2.26 pojawia się enigmatyczne N_2 – dotąd nie zdefiniowane...