

Analiza modalna modeli wybranych stopni wirnikowych sprężarki osiowej na różnych zakresach pracy silnika turbinowego

Adam Kozakiewicz¹, Olga Grzejszczak¹, Tomasz Łącki¹

¹InstituT Techniki Lotniczej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: adam.kozakiewicz@wat.edu.pl, olga.grzejszczak@wat.edu.pl, tomasz.lacki@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W niniejszym artykule przeanalizowano wpływ prędkości obrotowej na częstotliwości i postaci drgań własnych stopnia wirnikowego sprężarki wysokiego ciśnienia. Przeprowadzono analizę porównawczą dla dwóch różnych rozwiązań konstrukcyjnych: klasycznego połączenia zamkowego łopatki z tarczą i zastępczego połączenia integralnego typu Blisk. Model geometryczny połączenia zamkowego powstał z wykorzystaniem technik inżynierii odwrotnej. Modele dyskretne elementów i obliczenia numeryczne wykonane zostały w oprogramowaniu Ansys. W analizie porównawczej skupiono się na trzech, ważnych z punktu widzenia eksploatacji, zakresach pracy silnika: bieg jałowy (praca na ziemi), wnoszenie i lot z prędkością przelotową.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza modalna, drgania elementów wirujących, silnik turbinowy, tarcza, Blisk, optymalizacja

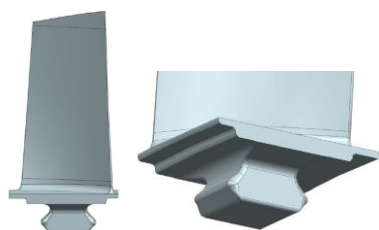
1. Wstęp

W eksploatacji silników lotniczych, za najbardziej charakterystyczne zakresy pracy można przyjąć: bieg jałowy, wnoszenie i lot z prędkością przelotową. Stopnie wirnikowe sprężarki podczas pracy na tych zakresach poddawane są działaniu dużych sił bezwładności wynikających z osiąganych znacznych prędkości obrotowych. Związana z tym dodatkowo, zmienność parametrów w kanale przepływowym i powstające obciążenia mogą być przyczyną pojawiania się drgań, wpływających w decydujący sposób na trwałość zmęczeniową tych elementów i bezawaryjną pracę całego silnika. Istotny wpływ na częstotliwości drgań własnych stopnia wirnikowego ma także kształt podzespołów, sposób zastosowanego połączenia łopatki z wieńcem tarczy i materiał, z jakiego są wykonane poszczególne elementy.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza częstotliwości i postaci drgań własnych pojedynczego stopnia wirnikowego pracującego z różnymi prędkościami obrotowymi. Analizie podlegają dwa typy konstrukcji, różniące się rodzajem połączenia łopatki z tarczą. Jako pierwsza, rozpatrywana jest konstrukcja z klasycznym połączeniem zamkowym. W kolejnym etapie analizie poddana została zastępcza konstrukcja integralna typu Blisk, w której wyeliminowane zostało połączenie zamkowe, łopatka i tarcza tworzą jeden element.

2. Model numeryczny

Model geometryczny rozpatrywanej konstrukcji stopnia wirnikowego z klasycznym połączeniem zamkowym typu "jaskółczy ogon" wykonany został w programie Siemens NX 9.0 (rys.1). Powstał z wykorzystaniem metod inżynierii odwrotnej.



Rys. 1. Geometria stopki trapezowej

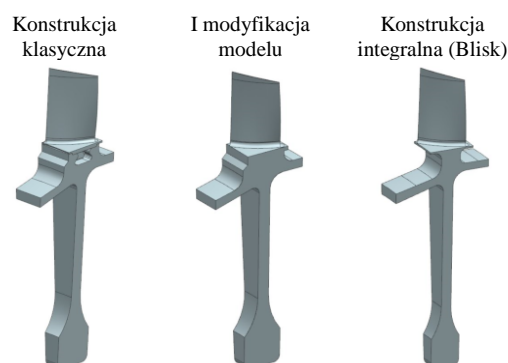
Do przygotowania modelu dyskretnego wykorzystano elementy skończone typu sześciennego i czworosiecznego. Wygenerowany model MES pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Model MES

Konstrukcja wykonana jest ze stopu niklowo-chromowego Inconel 718 o gęstości 8193,3 [kg/m³]. Stop ten charakteryzuje się doskonałą wytrzymałością na pełzanie w temperaturach do 700°C. Warunki brzegowe zdefiniowane są poprzez podparcie przesuwne typu Frictionless Support na powierzchniach łączących tarczę z poprzedzającym i kolejnym stopniem wirnika sprężarki. Powierzchnie styku łopatki i części wieńcowej tarczy zdefiniowane zostały za pomocą kontaktowych warunków brzegowych.

Na potrzeby analizy porównawczej zaprojektowano zastępczą konstrukcję integralną typu Blisk, przenosząc obciążenia na podobnym poziomie naprężeń jak konstrukcja z połączeniem zamkowym.



Rys. 3. Etapy projektowania modelu zastępczego

Etapy projektowania modelu zastępczego przedstawia rys. 3. W wyniku przeprowadzonych modyfikacji udało się uzyskać redukcję masy na poziomie około 22%. Wyniki optymalizacji masowo-wytrzymałościowej przedstawiono w [2].

W budowie modelu dyskretnego konstrukcji integralnej wykorzystano wyłącznie elementy czworościenne. Założenia dotyczące materiału i warunków brzegowych są analogiczne jak w przypadku wcześniej przedstawionej konstrukcji z zamkiem.

3. Analiza modalna

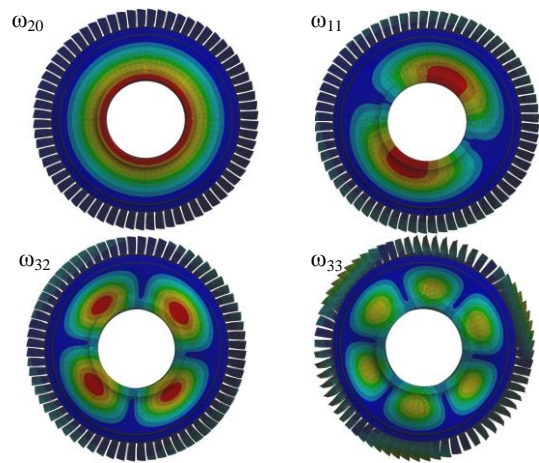
Analiza modalna służy do identyfikacji własności dynamicznych konstrukcji. Poprawna ocena postaci drgań własnych pozwala na określenie obszarów konstrukcji podatnych dynamicznie. Znajomość częstotliwości drgań własnych zespołów wirnikowych ma istotny wpływ na trwałość zmęczeniową poszczególnych podzespołów, a co za tym idzie na niezawodną pracę całego silnika. Dzięki znajomości zależności częstotliwości drgań od prędkości obrotowej można tak dobrać częstotliwości drgań własnych, a więc konstrukcję stopnia wirnika sprężarki, by częstotliwości rezonansowe pojawiły się poza zakresem pracy silnika.

Analizę częstotliwości drgań własnych stopnia wirnikowego sprężarki wykonano w programie Ansys. Przebadano wpływ różnych prędkości obrotowych na własności dynamiczne pojedynczego stopnia sprężarkowego. Przeanalizowano także wpływ sposobu połączenia łopatki z tarczą na częstotliwości i postaci drgań własnych. Konstrukcje przedstawione na rysunku 3 są wynikiem optymalizacji pod względem dynamicznym. Wprowadzone modyfikacje, prócz połączenia zamkowego również zmniejszenie grubości elementów tarczy Blisk, pozwoliły na zachowanie podobnych częstotliwości i amplitud drgań.

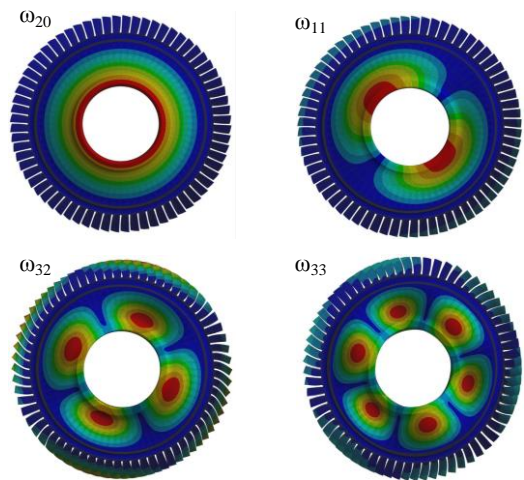
Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 1. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono uzyskane postaci drgań własnych.

Tabela 1. Wpływ prędkości obrotowej na wybrane częstotliwości własne

| Konstrukcja klasyczna z połączeniem zamkowym | | | |
|--|-----------------------------|---------|---------|
| | Prędkość obrotowa [obr/min] | | |
| | 8852,2 | 12563,1 | 15326,6 |
| ω_{20} [Hz] | 660,77 | 697,23 | 729,53 |
| ω_{11} [Hz] | 1051,9 | 1102,5 | 1147,5 |
| ω_{32} [Hz] | 1687,1 | 1764,1 | 1832,3 |
| ω_{33} [Hz] | 2727,7 | 2815,1 | 2884,6 |
| Zastępcza konstrukcja integralna | | | |
| | Prędkość obrotowa [obr/min] | | |
| | 8852,2 | 12563,1 | 15326,6 |
| ω_{20} [Hz] | 566,44 | 611,54 | 651,06 |
| ω_{11} [Hz] | 899,25 | 959,48 | 1012,9 |
| ω_{32} [Hz] | 1420,2 | 1513,2 | 1595,8 |
| ω_{33} [Hz] | 2218,5 | 2322,9 | 2415,9 |



Rys. 4. Postacie drgań własnych konstrukcji z zamkiem



Rys. 5. Postacie drgań własnych konstrukcji integralnej

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono kolejny etap optymalizacji połączenia łopatka-tarcza konstrukcji pojedynczego stopnia sprężarki osiowej. Przedstawiony w [2] etap optymalizacji masowo-geometrycznej miał na celu taką modyfikację konstrukcji, gdzie przy zachowaniu podobnej wytrzymałości osiąga się minimalną masę stopnia sprężarki. Osiągnięta oszczędność masy wynosiła wówczas 28%. Konstrukcja, mimo że poprawna pod względem wytrzymałościowym, pod względem dynamicznym wykazywała duże amplitudy drgań, co w konsekwencji przekłada się na duże naprężenia i ewentualne szybkie zniszczenie konstrukcji. Zaproponowana w kolejnym etapie optymalizacji (dynamicznej) konstrukcja charakteryzowała się większą grubością ścianki tarczy. Osiągnięta redukcja masy wynosi 22% przy zachowaniu podobnych częstotliwości i amplitud, co konstrukcja klasyczna, niemodyfikowana.

Literatura

- [1] J. Lipka; „Wytrzymałość maszyn wirnikowych”, WNT, 1967
- [2] A. Kozakiewicz, O. Grzeszczak; „Wpływ uszkodzeń eksploatacyjnych łopatki na pracę stopnia wirnikowego sprężarki osiowej”; Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Nr 71/2016
- [3] T. Jamroz, J. Had; „Structural analysis of bladed disk”; International Scientific Conference Modern Safety Technologies in Transportation 2015
- [4] S. Kaliski; „Drgania i fale w ciałach stałych”, PWN, Warszawa 1966