



## **Bezkontaktowe pomiary drgań wybranych elementów wirnikowych turbinowych silników lotniczych**

Aleksander OLEJNIK, Robert ROGÓLSKI\*, Michał SZCZEŚNIAK

*Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,  
00-908 Warszawa 49, ul. Gen Witolda Urbanowicza 2*

*\* autor korespondencyjny, e-mail: robert.rogolski@wat.edu.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 11.05.2017 r.*

*Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 06.11.2017 r.*

DOI 10.5604/01.3001.0011.7185

**Streszczenie.** Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie metody bezdotykowego pomiaru postaci drgań własnych izolowanych elementów konstrukcyjnych silników turbinowych z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Badaniom poddano dwa dostępne elementy konstrukcyjne: zintegrowaną tarczę turbinową silnika rozruchowego AI-9 oraz łopatkę wieńca wentylatorowego sprężarki niskiego ciśnienia silnika RD-33. Pomiary drgań rezonansowych przeprowadzono w sposób bezdotykowy przy użyciu dopplerowskiego wibrometru skanującego Polytec PSV-400-3D. Tarczę turbinową zawieszoną do pomiaru na podatnych odcigiach zapewniając w ten sposób warunki zbliżone do warunków swobodnych. Z kolei łopatkę zamocowano w sposób sztywny umieszczając jej stopkę w szczękach nieruchomego zacisku. Opisano procedurę pomiarową oraz zasadę działania użytej aparatury. W celu weryfikacji wyników pomiarowych opracowano modele dyskretne obu elementów, które posłużyły do numerycznej analizy modalnej (MSC Software). Modele geometryczne tarczy i łopatki opracowano z wykorzystaniem technik inżynierii odwrotnej. Modele strukturalnego MES przygotowano w preprocesorze MSC Patran stosując dyskretyzację elementami bryłowymi.

Częstotliwości podstawowych postaci rezonansowych zbadanych doświadczalnie porównano z częstotliwościami analogicznych postaci numerycznych. Analiza porównawcza jest punktem wyjścia do kalibracji modeli numerycznych, które w kolejnym etapie badań będzie można wykorzystać do określania krytycznych prędkości obrotowych wirujących elementów.

**Słowa kluczowe:** doświadczalna analiza modalna, drgania własne, wibrometria laserowa

## 1. WSTĘP

Wraz z podjęciem przez Instytut Techniki Lotniczej WAT realizacji prac badawczo-rozwojowych poświęconych rozwojowi silników lotniczych uruchomiono program badań doświadczalnych i symulacyjnych ukierunkowany na identyfikację własności drganiowych wirników silnikowych i ich elementów. Małe silniki turbinowe są powszechnie stosowane jako jednostki napędowe w śmigłowcach oraz lekkich samolotach. Znajdują również zastosowanie w dużych samolotach dostarczając powietrze do instalacji rozruchowych silników zasadniczych lub pełniąc funkcję pomocniczych jednostek napędowych (APU) służących do awaryjnego zasilania pokładowych instalacji elektrycznych lub ciśnieniowych. Obecnie w przemyśle lotniczym obserwowany jest wzrost liczby nowych lekkich konstrukcji latających. Opanowana technologia wytwarzania oraz szerokie zastosowanie materiałów kompozytowych przekładają się na spadek cen i jednoczesny wzrost popularności samolotów klasy *General Aviation*, zarówno z napędem śmigłowym jak i odrzutowym. W związku z intensywnością rozwoju lekkich konstrukcji płatowcowych wzrasta również potrzeba opracowania nowych, bardziej ekonomicznych, niezawodnych i jednocześnie ekologicznych małych jednostek napędowych. Jedną z metod szybkiego opracowania nowego wariantu jednostki jest modyfikacja silnika eksploatowanego i już sprawdzonego. Inny sposób zapewniający względnie szybkie rozwiązanie to wykorzystanie gotowych podzespołów do zmontowania analogicznego silnika w zmienionej nieco konfiguracji (np. zmiana przekroju wybranych odcinków wału, zmieniony układ łożysk, poszerzony bądź zwężony profil kanału przepływowego).

Postacie drgań własnych elementów wirujących są wysoce istotne dla bezpiecznej eksploatacji jednostek napędowych. Nieprzekraczalność dopuszczalnych naprężeń w elementach wirujących oraz przesunięcie częstości rezonansowych poza zakres eksploatacyjnych pulsacji wirowania to zasadnicze aspekty bezpieczeństwa pracy silnika. Ze względu na szczelną zabudowę i utrudniony dostęp pomiar drgań wirujących elementów silnikowych jest znacznie utrudniony, często wręcz niemożliwy.

Znacznie łatwiej jest przeprowadzić pomiary częstości własnych elementów roboczych izolowanych, tzn. wymontowanych z wirnika i zamocowanych stacjonarnie na stanowisku.

Drgania rezonansowe pojedynczej łopatki można zidentyfikować w sposób uproszczony zamocowując uprzednio jej zamek w sztywnym uchwycie (np. w szczękach imadła). Pomiar drgań tarcz jest znacznie bardziej skomplikowany. Zasadniczym problemem jest trudność zamocowania tarczy w sposób odpowiadający mocowaniu do wirnika. Kłopotliwe jest także wymuszanie oddzielnego elementu, jako że w konfiguracji stanowiskowej (stacjonarnej) wzbudzenie takie nie wynika z naturalnego ruchu wirowego. Wibracje elementu należy wzbudzić w sposób sztuczny np. poprzez zastosowanie układu wymuszającego ze wzbudnikiem drgań. Do realizacji drgań pojedynczych, często dość lekkich elementów zalecane są metody bezkontaktowe, zapewniające możliwość analizy konstrukcji o niezmiennym rozkładzie masy. Niniejsze opracowanie przedstawia uproszczony sposób pomiaru drgań wybranych dwóch elementów wirnikowych. Pierwszy z nich to zintegrowana tarcza turbinowa wymontowana z turbinowego silnika rozruchowego AI-9, natomiast drugi element to łopatka wieńca wentylatorowego sprężarki niskiego ciśnienia silnika odrzutowego RD-33. Wyniki pomiarów skonfrontowano z wynikami numerycznej analizy modalnej. Zbieżność częstotliwości własnych (modelowych) z częstotliwościami rezonansowymi (zmierzonymi) to kluczowy wymóg kalibracji modeli MES w kontekście ich zastosowania do kolejnych bardziej zaawansowanych analiz drgań zespolonych (identyfikacji postaci własnych wirnika rotującego).

## **2. APARATURA POMIAROWA**

Wibrometr laserowy POLYTEC PSV-400-3D to urządzenie umożliwiające analizę i wizualizację wszelkiego rodzaju drgań strukturalnych. Zasada działania opiera się na rozdzieleniu generowanej w głowicy wiązki laserowej. Jedna część pozostaje wewnątrz i jest wiązką referencyjną, natomiast druga jest wiązką emisyjną kierowaną na powierzchnię badanego obiektu. Powracająca wiązka jest wychwytywana przez kamerę i porównywana z referencyjną. Na tej podstawie aparatura określa przemieszczenia na elemencie i dopasowuje do częstotliwości zadawanej na generator. Pomiar 3D polega na określeniu trzech wektorów przemieszczeń (trzy głowice skanujące), a następnie na ich podstawie określeniu składowych we wszystkich trzech kierunkach.



Rys. 1. Skanujący wibrometr laserowy PSV-400-3D z trzema głowicami pomiarowymi.  
Na górnej głowicy zainstalowana jednostka skanowania geometrii

Fig. 1. Laser scanning vibrometer PSV-400-3D. On top scanning head the geometry scan unit is installed

Poprzez użycie trzech niezależnych głowic skanujących i trzech kontrolerów prędkość drgań mierzona jest prędkość ruchu punktów wibrującej struktury jednocześnie we wszystkich trzech kierunkach. Trzy przetworniki sterowane są jednocześnie poprzez jednostkę centralną PSV i dedykowane oprogramowanie. Całkowita powierzchnia danego obiektu może być automatycznie zeskanowana według zadanej siatki punktów pomiarowych. Dedykowane oprogramowanie analizuje zebrane dane pomiarowe i na ich podstawie tworzy animacje przedstawiające postacie drgań danego obiektu w szerokim zakresie częstotliwości. Dodatkowy moduł skanowania geometrii służy do pomiaru i wirtualnego odwzorowania powierzchni pomiarowej obiektu. Główne zastosowania laserowego wibrometru skanującego to rozwiązywanie problemów związanych z hałasem oraz drganiami eksploatacyjnymi, ze szczególnym uwzględnieniem drgań w produktach przemysłu samochodowego i lotniczego.

Interferencja optyczna może być obserwowana, gdy dwie koherentne wiązki światła zbiegają się. Powstałe natężenie na przykład na fotodetektorze różni się od różnicy faz  $\Delta\varphi$  pomiędzy dwoma wiązkami zgodnie z równaniem:

$$I(\varphi) = \frac{I_{max}}{2} \cdot (1 + \cos\varphi) \quad (1)$$

Różnica faz  $\Delta\varphi$  jest funkcją różnicy ścieżki  $\Delta L$  pomiędzy dwoma wiązkami, zgodnie z formułą:

$$\varphi = \frac{L}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (2)$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali lasera.

Jeśli jedna z dwóch wiązek jest odbita od obiektu ruchomego (wiązka obiektu), różnica ścieżki staje się funkcją czasu  $\Delta L = \Delta L(t)$ . Wzór prążków zakłóceń przemieszcza się na detektorze, a przemieszczenie obiektu może zostać określone za pomocą kierunkowego zliczania przejść prążków zakłóceń. Składową prędkości w kierunku wiązki obiektu jest funkcją różnicy ścieżki  $L$  w zależności od:

$$\frac{dL(t)}{dt} = v(t) \cdot 2\pi \quad (3)$$

Dla stałej prędkości propagacji  $v$  można określić zależność:

$$\left| \frac{dL(t)}{dt} \right| = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = f_D \cdot \lambda = |v| \cdot 2 \quad (4)$$

Prowadzi to do przesunięcia częstotliwości określonej wyrażeniem:

$$f_D = \frac{|v|}{\lambda} \cdot 2 \quad (5)$$

Zatem ruch obiektu powoduje przesunięcie częstotliwości na wiązkę obiektu, która nazywa się przesunięciem Dopplera  $f_D$  i jest funkcją składową prędkości w kierunku wiązki obiektu. Nadrzędne wiązki obiektu i wewnętrzna wiązka odniesienia, tzn. dwie fale elektromagnetyczne o nieco różnych częstotliwościach generują częstotliwość pobudzenia w detektorze, która jest równa przesunięciu Dopplera. Wyrażenie (5) służy do określenia prędkości i jest niezależne od jej znaku. Kierunek prędkości można określić przez wprowadzenie dodatkowego przesunięcia częstotliwości stałej  $f_B$  w interferometrze, do którego dodano przesunięcie dopplerowskie z odpowiednim znakiem. Tak więc ostatecznie uzyskana częstotliwość w detektorze  $f_{mod}$  jest obliczana wg wzoru:

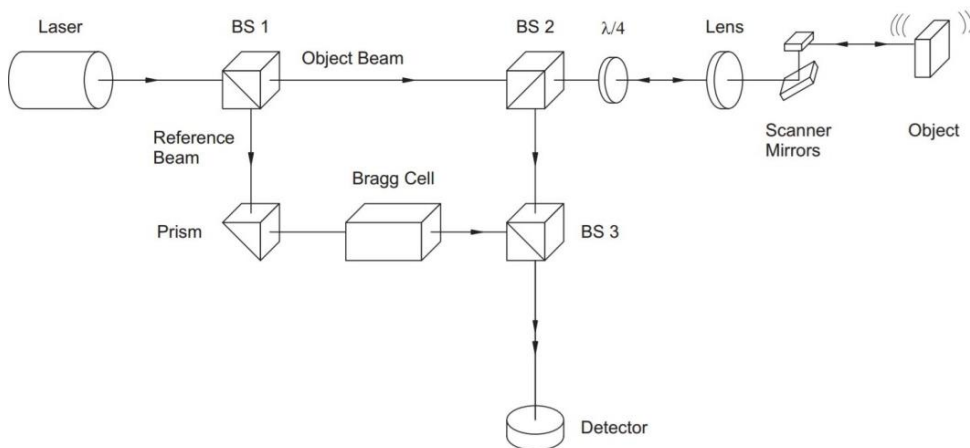
$$f_{mod} = f_B + \frac{v}{\lambda} \cdot 2 \quad (6)$$

W wibrometrze pomiar prędkości przeprowadza się za pomocą zmodyfikowanego interferometru Macha-Zehndera. Konfiguracja optyczna w głowicy skanera jest przedstawiona na rysunku 2. Źródłem światła jest laser neonowy generujący koherentną wiązkę spolaryzowaną. Rozgałęźnik polaryzacyjny BS1 dzieli wiązkę na wiązkę pomiarową i wiązkę referencyjną.

Promień obiektu przechodzi przez rozdzielacz światła polaryzacyjnego BS2, a także płytkę  $\lambda/4$ , a następnie zostaje skupiony przez soczewkę na obiekcie i ponownie rozproszony.

Rozgałęźnik polaryzacyjny BS2 działa wtedy jako łącznik kierunkowy optyczny wraz z płytką  $\lambda/4$  i odbija wiązkę obiektu do rozdzielacza wiązki BS3. Ponieważ obie ramiona wewnętrznego interferometru są symetryczne, różnica ścieżki optycznej pomiędzy wiązką obiektu a wiązką odniesienia zanika w interferometrze.

Wynikająca różnica ścieżki jest równa dwukrotnej odległości pomiędzy rozgałęźnikiem BS2a obiektem. Komórka Bragga w ramieniu odniesienia interferometru generuje dodatkowe przesunięcie częstotliwości w celu określenia prędkości. Powstały sygnał zakłóceń wiązki obiektu i wiązki odniesienia jest przekształcany w sygnał elektryczny w fotodetektorze, a następnie dekodowany w sterowniku.



Rys. 2. Konfiguracja optyczna w głowicy skanującej.

Fig. 2. Optical configuration in the scanning head

### 3. POMIARY DRGAŃ ELEMENTÓW

Pierwszym elementem poddanym analizie pomiarowej była tarcza turbiny pomocniczego silnika rozruchowego AI-9. Turbina jednostopniowa została wykonana w technologii BLISK. Oznacza to, że tarcza oraz łopatkę stanowią jednolitą integralną strukturę (brak mechanizmów połączeniowych). Łopatkę będącą nierozłącznym elementem tarczy ze względu na swoją krzywiznę są bardzo problematyczne w pomiarach bazujących na analizie obrazu. W trybie pomiaru z trzema głowicami obiektywne powinny być rozstawione w punktach wierzchołkowych trójkąta równobocznego.

W takim przypadku często jedna z wiązek była przysłaniana lub „ześlizgiwała” się z badanego punktu, co doprowadzało do przerwania procesu pomiarowego lub wprowadzała znaczne błędy.

Jako że zasadnicze składowe przemieszczeń tarczy występują w kierunku osiowym, zastosowana została jedna głowica skierowana na wprost elementu. W celu odwzorowania rzeczywistego ustawienia, tarcza została zamocowana wewnątrz sztywnej drewnianej ramy za pomocą naciągniętych zawiesi sznurowych przeciągniętych przez otwory montażowe.

Przez skrajnie dolny otwór przepuszczony został popychacz prętowy wzbudnika (tzw. stinger), za pomocą którego wymuszano wibracje tarczy. Stinger swobodnie przechodzi przez otwór i jest obustronnie skręcony nakrętkami zapewniając sztywne połączenie między tarczą a wzbudnikiem. Do wzbudzania został wykorzystany wzbudnik elektrodynamiczny firmy The Modal Shop 2100E11 z wzmacniaczem QSC RMX 450. Sygnał wymuszający był generowany przez urządzenie pomiarowe (*Junction Box*) ze względu na pomiar światłem laserowym połyskującego elementu metalowego pomiarowa strona tarczy została pokryta materiałem matującym.



Rys. 3. Zintegrowana tarcza turbiny silnika rozruchowego AI-9

Fig. 3. Turbine disk from power turboengine AI-9

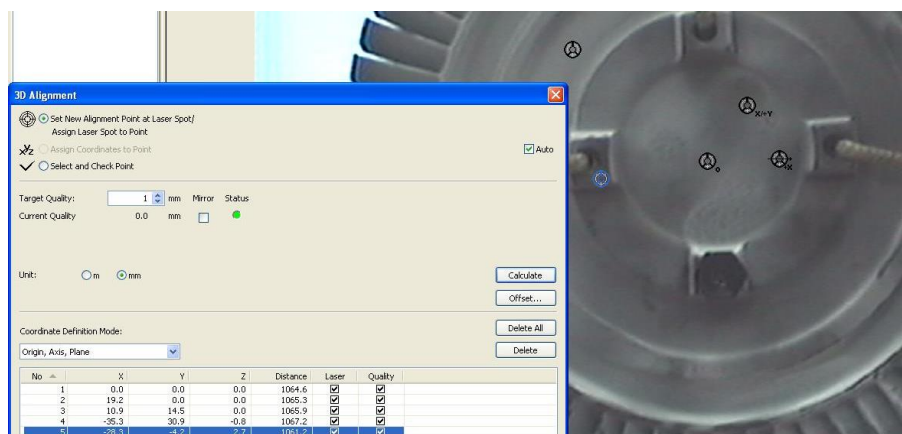


Rys. 4. Sposób zamocowania tarczy na stanowisku pomiarowym

Fig. 4. The method of mounting the disc on the bench

Oprogramowaniem służącym do akwizycji i pomiarów jest dedykowany przez producenta program PSV 8.7. Podstawą pomiarów bezdotykowych z użyciem wibrometru laserowego jest obraz. Ponieważ otwór lustra z wiązką laserową nie znajduje się w tym samym miejscu co obiektyw, występuje rozbieżność między wskazaniami na monitorze, a rzeczywistą pozycją plamki laserowej.

Konieczne jest wykonanie osiowania 2D. Ma ono na celu wskazanie oprogramowaniu różnicy odczytu z kamery i rzeczywistym położeniem plamki. Ponieważ od tego momentu wiązka laserowa przemieszczają się według punktów wskazanych na monitorze, każde poruszenie głowicą powoduje konieczność przerwania pomiaru i powrót do tego kroku. Następnie wykonuje się osiowanie 3D, którego celem jest utworzenie na elemencie układu współrzędnych.



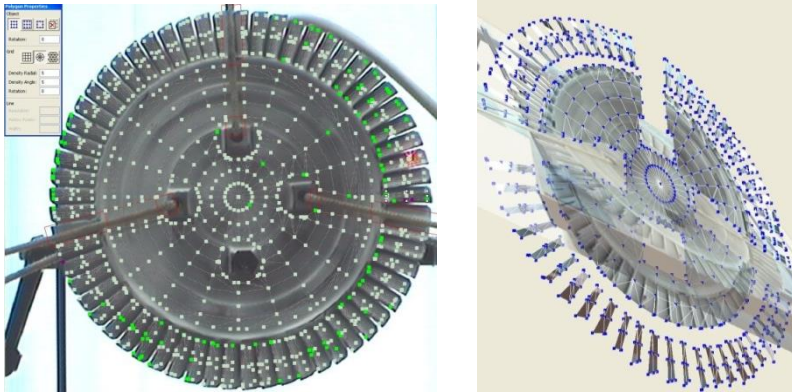
Rys. 5. Osiowanie 3D

Fig. 5. 3D alingment

Następnym etapem jest utworzenie siatki pomiarowej. Oprogramowanie pozwala na wybór rodzaju siatki, jej kształtu, zagęszczenia punktów oraz rotacji. Dla badanej tarczy została stworzona siatka kołowa na części wewnętrznej i prostokątna na łopatkach. Powstała siatka składa się z 1223 punktów. Dodatkowo zostały odcięte obszary, na których znajdują się ciągną i wzbudzenie. Na gotowej siatce należy ocenić stopień widoczności plamki laserowej w różnych punktach oraz czy na elementach krawędziowych promień lasera nie trafia poza element.

Zamontowana dodatkowa jednostka skanowania geometrii pozwala, na podstawie punktów siatki, zeskanować i utworzyć trójwymiarową geometrię elementu. Gotowy element w widoku 3D może być odchylony o pewien kąt, ponieważ usytuowanie geometrii zależy od przyjętego układu w osiowaniu 3D, jednakże nie wpływa to na wynik pomiaru.

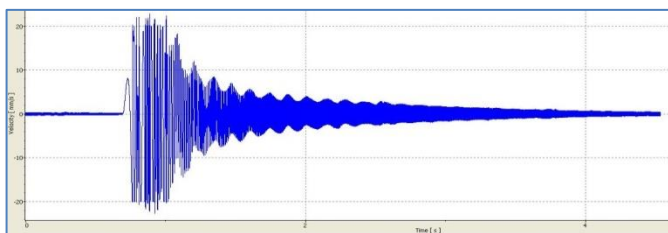




Rys. 6. a) Siatka pomiarowa tarczy, b) – skan 3D

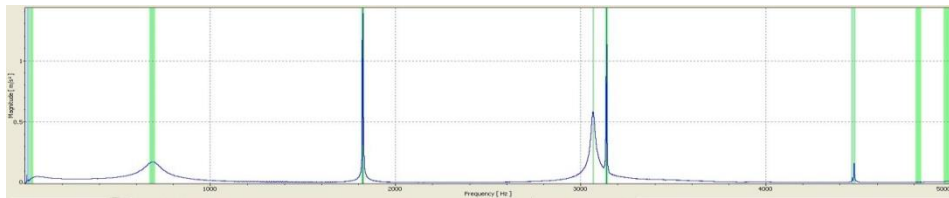
Fig. 6. a) Blade measurement grid, b) – 3D scan

Właściwy pomiar rozpoczyna się po dobraniu parametrów oraz zadania sygnału wymuszenia. W pomiarach wibrometrycznych preferowanym sygnałem jest modulowany przebieg tłumiony typu *Periodic Chirp* (tzw. sygnał świergotowy – rys. 7). Jest to sygnał o modulacji szerokopasmowej, w której fala nośna dodatkowo jest modulowana w szerokim zakresie częstotliwości i przesyłana w czasie trwania impulsu. Po uruchomieniu aparatura sama dobiera sobie ścieżkę skanowania punktów pomiarowych. W przypadku punktów, w których urządzenie miało problemy z określeniem wartości istnieje możliwość interpolacji lub ponownego zmierzenia. W prezentowanym przypadku wystąpiły zakłócenia sygnału pomiarowego na końcówkach i przy zamkach łopatek. Punkty te zostały interpolowane. Efektem końcowym jest wykres zmian względem częstotliwości – widmo częstotliwościowe. Na wykresie zaznacza się skoki (tzw. piki) wartości, a następnie oprogramowanie przelicza dane z wszystkich punktów siatki pomiarowej i obrazuje przemieszczenie na wcześniej zeskanowanej geometrii. W zakresie przemiatania częstotliwości od 0 do 5 kHz znaleziono 13 wzbudzeń rezonansowych (piki na charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej).



Rys. 7. Przebieg stosowanego sygnału wymuszającego typu periodic chirp

Fig. 7. The course of one exciting signal cycle: periodic chirp



Rys. 8. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe z zaznaczonymi pikami rezonansowymi.

Fig. 8. Amplitude-frequency spectrum with marked resonance peaks

Drugim badanym elementem była łopátka wirnikowa z pierwszego stopnia sprężarki niskiego ciśnienia z silnika dwuprzepływowego RD-33 zabudowanego min. w samolotach MiG-29. Materiał z którego wykonany jest element to stop tytanowy WT3.



Rys. 9. a) badana łopátka, b) sposób mocowania oraz siatka pomiarowa

Fig. 9. a) test blade, b) mounting method and measuring grid

Mocowanie łopátki powinno odzwierciedlać rzeczywiste utwierdzenie w tarczy, dlatego została umieszczona w imadle przymocowanym do granitowego blatu. Łopátkę ułożono tak, aby odpowiadało to osadzeniu w tarczy wewnątrz silnika, dlatego stopa jest ustawiona wzdłuż szczęk. Powstała siatka składa się z 54 punktów pomiarowych. Wymuszenie jest punktowe. Miejsce przyłożenia jest zlokalizowane w końcu pióra przy krawędzi natarcia. Do wzbudzenia został wykorzystany układ identyczny jak w poprzednim badaniu. Sygnałem wymuszającym był również przebieg typu *periodic chirp*. Podczas analizy zidentyfikowano pierwsze postacie drgań: postać giętną oraz skrętną.



Rys. 10. Widmo częstotliwościowe z zaznaczonymi pikami rezonansowymi dla łopatki

Fig. 10. Frequency spectrum with marked resonance peaks for blade

#### 4. MODELE DYSKRETNE DO ANALIZ MES

Model tarczy do analizy numerycznej powstał na podstawie geometrii modelowej odwzorowanej za pomocą skanera 3D. Dyskretyzację bryły przeprowadzono w preprocesorze MSC Patran generując 53815 elementów skończonych typu CTETRA (rys. 11). Zadając następujące parametry materiałowe:

- moduł Younga  $E = 210 \text{ GPa}$
- liczba Poissona  $\nu = 0,3$
- gęstość  $\rho = 7,83 \text{ g/cm}^3$

wypracowano masę modelową tylko o 0,8 g mniejszą od masy obiektu rzeczywistego. Dyskretny model tarczy poddano analizie drgań własnych. Rozwiązanie zagadnienia własnego polega na rozwiązaniu równania drgań nietłumionych:

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = 0 \quad (7)$$

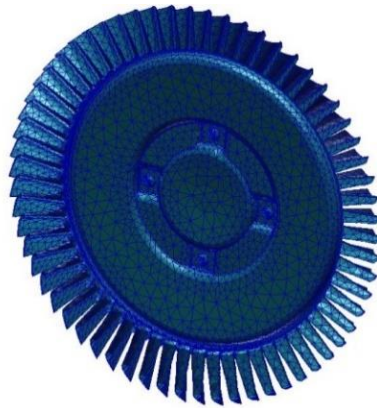
Zakładając, że rozwiązaniem jest funkcja harmoniczna typu  $q = q_0 e^{\lambda t}$ , równanie różniczkowe (11) sprowadza się to do liniowego zagadnienia własnego postaci:

$$(K - \lambda M)q_0 = 0 \quad (8)$$

gdzie  $M$ ,  $K$  są globalnymi macierzami sztywności i bezwładności wyznaczanymi na bazie modelu,  $q_0$  jest wektorem amplitud przemieszczeń w poszczególnych węzłach modelowych,  $\lambda$  jest wartością własną określoną poprzez kwadrat częstości drgań własnych  $\lambda = \omega^2$ .

Numeryczne serie obliczeń przeprowadzono wykorzystując procesor MD Nastran.

Wyznaczono postacie drgań własnych w zakresie częstotliwości od 0 do 5,4296 kHz, z czego 6 pierwszych to postacie sztywne o częstotliwościach zerowych. Do analiz numerycznych łopatki wykorzystano utworzony wcześniej model. Zbudowany jest na podstawie cięciw zmierzonych wzdłuż pióra. Linie te zostały uzyskane poprzez pomiary maszyną współrzędnościową. Finalnie obiekt jest jedną bryłą (solid). Charakterystyczne parametry materiałowo-konstrukcyjne łopatki to min: moduł Younga 72 GPa, gęstość 4,5 g/m<sup>3</sup>, masa łopatki 342,9 g, liczba Poissona 0,34, długość łopatki 219 cm



Rys. 11. Siatka modelu tarczy w programie MSC Patran

Fig. 11. Grid model shield in MSC Patran



Rys. 12. a) model geometryczny łopatki w środowisku NX, b) model dyskretny łopatki

Fig. 12. a) geometric model of the blade, b) discretized blade structure

Do utworzenia modelu w programie Patran można zastosować standardowo dwa podejścia. Pierwszym jest utworzenie modelu płaskiego złożonego z linii szkieletowych, a następnie podzielenie jej wzdłuż rozpiętości

na pasy i nadanie im odpowiedniej grubości. Drugą drogą jest zamodelowanie całości jako jednej bryły.

Ponieważ jest możliwość skorzystania z gotowej geometrii, modeluje się całość jako jeden element za pomocą elementów trójwymiarowych. Jeśli modeluje się osobno pióro i osobno stopę powstaje problem na łączeniu tych elementów, ponieważ węzły nie są spójne i należy je do siebie poprzesuwać, co przy dużej ich ilości bardzo utrudnia modelowanie. Ze względu na spójność siatki najwygodniej jest wygenerować ją automatycznie. Mając na uwadze odpowiednie rozmieszczenie węzłów, należy siatkę zagęścić. Wygenerowano 12654 elementów skończonych typu CTETRA. Utwierdzenie zostało zrealizowane poprzez odebranie dwóch stopni swobody węzłom wzdłuż osi Y na skrajnych brzegach stopy w osi X. Dzięki temu zabiegowi utwierdzenie jest zbliżone do przypadku z badania wibrometrem. Ostatecznie wyznaczono 10 postaci własnych.

## **5. PORÓWNANIE WYNIKÓW**

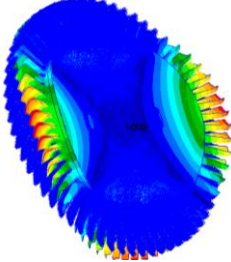
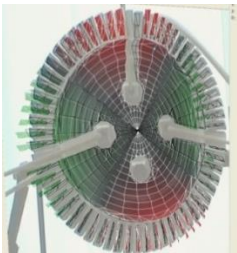
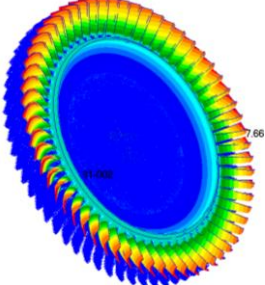
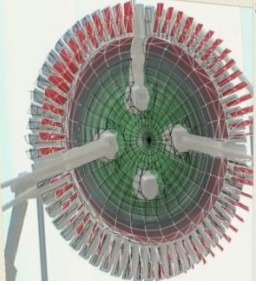
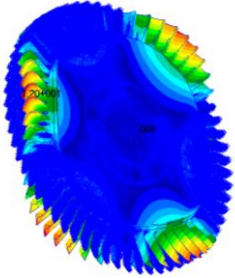
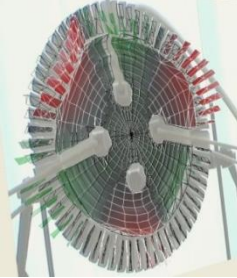
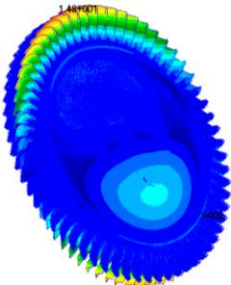
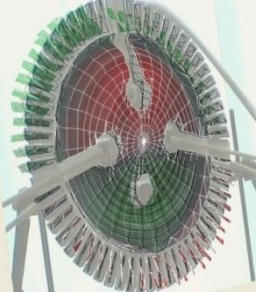
W pracy przedstawiono metodę bezstykowego pomiaru drgań z użyciem dopplerowskiego wibrometru laserowego. Dodatkowo przeprowadzono analizę numeryczną badanego obiektu. Do badań została wytypowana tarcza jednostopniowej turbiny wytwornicy spalin AI-9. Jest wykonana w technologii BLISK, co bardzo komplikuje geometrię i utrudnia procedurę pomiarową. Drugim badanym obiektem była łopatką wentylatora dwuprzepływowego silnika odrzutowego RD-33. Realizacja tematu objęła etap pomiarowy oraz etap numeryczny. W etapie pomiarowym zaprezentowano aparaturę badawczą, zasadę działania i proces pomiarowy. Etap numeryczny składał się z etapu preprocesorowego związanego z przygotowaniem modelu oraz etapu obliczeniowego związanego z rozwiązaniem zagadnienie własnego (Nastran SOL 103).

Efektom badania jest 20 postaci drgań własnych otrzymanych podczas analizy numerycznej oraz 13 z wykorzystaniem aparatury pomiarowej. W obu przypadkach pierwsze 6 to postaci sztywne, które nazywa się zerowymi (mają pomijalnie małe wartości) i nie są brane pod uwagę. Pozostałe postaci w większości występowały podwójnie. Oznacza to, że tarcza posiadała identyczną postać drgań przy dwóch częstotliwościach blisko siebie, lecz różniących się o przesunięcie o kąt (zazwyczaj  $\pi/2$ ). Jedyne postaci zaprezentowane w tabeli 1 na drugiej pozycji była „bez pary”. Wszystkie zestawione parami wizualizacje dotyczą identycznych postaci drgań (identyczna postać deformacji obiektu wirtualnego i rzeczywistego).

W tabeli 1 porównano jedynie kilka najbardziej charakterystycznych postaci modalnych.

Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych postaci drgań tarczy otrzymanych za pomocą analizy numerycznej oraz pomiarów aparaturą

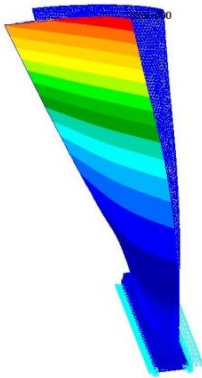
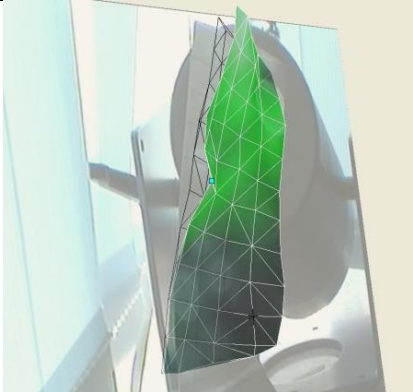
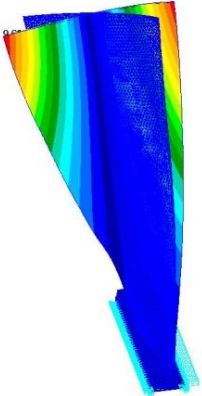
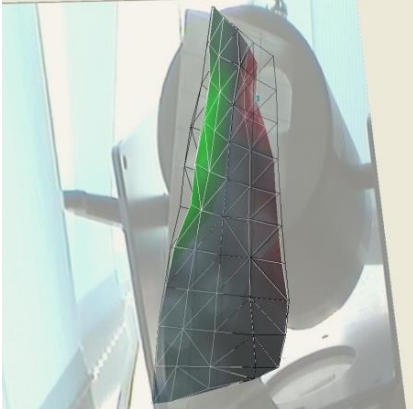
Table 1. Summary of characteristic shield normal modes shapes received with modes numerical analysis and instrumentation measurements

MSC Patran	PSV 8.7
 <p data-bbox="303 636 425 666">1,6471 kHz</p>	 <p data-bbox="798 636 908 666">1,825 kHz</p>
 <p data-bbox="303 954 425 986">2,6896 kHz</p>	 <p data-bbox="778 954 933 986">3,065625 kHz</p>
 <p data-bbox="303 1266 425 1294">2,7654 kHz</p>	 <p data-bbox="778 1266 933 1294">3,135938 kHz</p>
 <p data-bbox="303 1589 425 1629">4,5838 kHz</p>	 <p data-bbox="778 1589 933 1629">4,98125 kHz</p>

Częstotliwości otrzymane w analizie numerycznej różnią się od pomiarowych w przybliżeniu o stałą wartość – wszystkie postacie numeryczne są o około 0,4 kHz niższe. Spowodowane to może być dwoma czynnikami. Ze względu na ograniczony dostęp do danych materiałowych, model numeryczny otrzymał przybliżone właściwości materiałowe stali o wysokiej wytrzymałości termicznej. Drugim powodem może być sposób realizacji wymuszenia. Stinger wymuszający drgania był sztywno zamocowany, przez co mógł wprowadzać nadmiarową sztuczną sztywność podparcia.

Tabela 2. Zestawienie charakterystycznych postaci drgań łopatki otrzymanych za pomocą analizy numerycznej oraz pomiarów aparaturą

Table 2. Summary of characteristic blade normal modes shapes received with modes numerical analysis and instrumentation measurements

MSC Patran	PSV 8.7
 <p data-bbox="347 1072 461 1107">135,37 Hz</p>	 <p data-bbox="829 1077 955 1107">171,875 Hz</p>
 <p data-bbox="347 1513 461 1547">772,99 Hz</p>	 <p data-bbox="835 1518 948 1547">893,75 Hz</p>

Z tabeli 2 można łatwo wywnioskować, że postacie giętnie i skrętne mają zbliżony rząd wartości. Wyniki z programu Nastran są niższe, ale mają zbliżoną różnicę między częstotliwością giętną i skrętną.

Zaniżone wyniki są spowodowane złym odwzorowaniem mocowania pióra z zamkiem. Model został stworzony z przekrojów, które niedokładnie odwzorowywały początkowy fragment łopatki przy mocowaniu z zamkiem. Efektem jest brak objętości przy mocowaniu, co ma znaczący wpływ na postać drgań. Większe przekroje usztywniają konstrukcję. Model wymagałby korekcji geometrii w miejscu między łączeniem pióra i zamka, a płaszczyzną przyłączenia krawędzi splotu z tyłem zamku równoległą do płaszczyzny XY. Spowodowałoby to dosztywnienie nasady pióra i w efekcie wzrost częstotliwości własnych. Same postacie drgań są jednoznaczne i bardzo łatwe do zinterpretowania. Określenie postaci drgań rzeczywistego obiektu możliwe było dzięki wykorzystaniu laserowego wibrometru. Dzięki możliwości utworzenia geometrii w trzech wymiarach rozpoznanie postaci nie było problematyczne. Jednakże pierwsze trzy postacie należało odrzucić, ponieważ były to postacie sztywne zależne od sposobu mocowania. Dodatkowo przy wnikliwej obserwacji zauważyć można, że postacie nie są do końca czyste. Wszelkie szумы bądź nieciągłości są spowodowane tym, że aparatura interpoluje wartości w punktach, których nie do końca jest w stanie zmierzyć ze względu na jakość powracającej wiązki. Dzieje się to głównie przy krawędziach. Zmierzone częstości są do siebie zbliżone, można przypuszczać, że modyfikacja modelu w programie Patran spowoduje osiągnięcie bardziej zbieżnych wyników. Otrzymane rezultaty pokazują, że drgania giętnie zaczynają występować przy częstotliwościach poniżej 200 Hz. Są one mniej niebezpieczne niż drgania skrętne. Pióro łopatki przemieszcza się w osi Y, co nie powoduje ryzyka kolizji z łopatkami kierowniczymi. Natomiast drgania skrętne są bardzo niebezpieczne dla pracy silnika, ponieważ istnieje ryzyko jej ukręcenia, ponadto skręcająca się końcówka pióra łopatki turbulizuje przepływ, co może doprowadzić do niestatecznej pracy sprężarki. Częstotliwość, przy której tego typu drgania zaczynają występować wynosi około 800 Hz.

## 6. PODSUMOWANIE

Reasumując, przeprowadzone pomiary udowadniają skuteczność i powtarzalność pomiarów z użyciem dopplerowskiego wibrometru laserowego. Badane elementy były bardzo trudnymi obiektami badawczymi ze względu na ich skomplikowaną geometrię.

Wszystkie postacie wyznaczone doświadczalnie znajdują jednoznaczne odzwierciedlenie w analizie numerycznej, a charakter błędu systemowego wskazuje, że uzyskane częstotliwości są poprawnie zmierzone.



Należy mieć na uwadze, że rzeczywiste obiekty były konstrukcyjnie izolowane i w konsekwencji mocowane według sztucznie wprowadzonych uwarunkowań. Warunki sztucznego montażu uzgodniono w taki sposób, aby dało się względnie poprawnie odwzorować je na modelach dyskretnych. Ostatecznie uzyskano postacie i częstotliwości własne zbieżne z wynikami pomiarów.

*Zaprezentowane badania zostały wykonane w ramach projektu nr PBS1/B6/7/2012 pt. „Wykorzystanie nowych technologii inżynierii powierzchni i łożysk magnetycznych w budowie miniaturowego turbinowego silnika odrzutowego” dofinansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych. Nurt badań jest kontynuowany w związku z realizacją przez ITL WAT pracy badawczej statutowej pt. „Doświadczalno-numeryczne badania rozwojowe technologii badawczych z weryfikacją warunkującą osiągnięcie zakładanych celów techniczno-taktycznych powietrznych platform bezzalagowych” (Dec. MNiSW nr 214104/E-410/S/2016).*

## **LITERATURA**

- [1] Kaliski Sylwester. 1966. *Drgania i fale w ciałach stałych*. Warszawa: Wydawnictwo PWN.
- [2] Lipka Jerzy. 1967. *Wytrzymałość Maszyn Wirnikowych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [3] Piszczek Kazimierz, Jerzy Walczak. 1982. *Drgania w budowie maszyn*. Warszawa; Wydawnictwo PWN.
- [4] Kawalec Krzysztof, Włodzimierz Balicki, Ryszard Chachurski, Paweł Głowacki, Adam Kozakiewicz, Jerzy Szczeciński, Stefan, Szczeciński. 2009. *Lotnicze Zespoły Napędowe część 1*. Warszawa: Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej.
- [5] *Software Manual – Polytec Scanning Vibrometer, Software 8.7*. Polytec Deutschland 2009.
- [6] *Hardware Manual, Polytec Scanning Vibrometer PSV-400-3D*.
- [7] *Theory Manual – Polytec Scanning Vibrometer*. Polytec Deutschland 2007.

## **Non-contact Vibration Measurement of Selected Rotor Elements from Aircraft Turbine Engines**

Aleksander OLEJNIK, Robert ROGÓLSKI, Michał SZCZEŚNIAK

*Military University of Technology. Faculty of Mechatronics and Aerospace  
2 Urbanowicza Str., Warsaw, Poland*

**Abstract.** The purpose of this article is to present the method of non-contact measurement of the normal modes of the insulated turbine engine components using a laser vibrometer. Two available components were tested: integrated shield of the AI-9 engine starter turbine and the RD-33 low-pressure compressor fan blade. Resonance vibration measurements were performed in a non-contact manner using the Polytec PSV-400-3D doppler scanning vibrometer. A turbine disc suspended for measurement on susceptible guidewires thus providing conditions close to free conditions. The blade, in turn, was fixed rigidly by placing its foot in the jaws of the stationary clamp. The measurement procedure and operation principle of the apparatus used have been described. In order to verify the measurement results, discrete models of both elements were developed, which were used for numerical modal analysis (MSC Software). Shield and blade geometry models have been developed using reverse engineering. Structural models for FEM were prepared in the MSC Patran preprocessor using discretization of solid elements. The frequencies of the basic resonant modes tested experimentally were compared with the frequencies of analogous numerical shapes. Comparative analysis is the starting point for the calibration of numerical models, which in the next stage of the research and it will be used to determine the critical speeds of rotating elements.

**Keywords:** experimental modal analysis (EMA), normal modes, laser scanning vibrometry