



## Analiza modalna łopatek jako metoda badań nieniszczących

MIROŚLAW WITOŚ, JAN ZALEWSKI\*

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6  
\*Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 3, 08-521 Dęblin

**Streszczenie.** Omówiono wpływ komputeryzacji stanowiska prób zmęczeniowych na nowe możliwości badawcze i niezawodność remontowanych silników. Przedstawiono wybrane wyniki z laserowego badania właściwości modalnych stalowych i tytanowych łopatek sprężarki osiowej. Omówiono możliwość eksperckiej oceny stanu technicznego łopatek, obejmującej nie tylko detekcję otwartego pęknięcia, ale również identyfikację fazy umocnienia i osłabienia materiału pióra.

**Słowa kluczowe:** nieliniowa analiza modalna, łopátka, zmęczenie, JCF, silniki — badania

**Symbole UKD:** 621.43

### Wstęp

Potrzeba zapewnienia wysokiej niezawodności i bezpieczeństwa pracy maszyny jest ściśle związana z doskonaleniem metod pomiarowych (*jak obserwować?*) i narzędzi analitycznych (*jak wydzielić symptomy diagnostyczne?*). W ten obszar działań wpisują się prace nad nowymi, wysokoczułymi metodami badań nieniszczących (NDT). Metodami bazującymi m.in. na ocenie właściwości nieliniowych materiału [1-3]. Są one mało znane w Polsce i nie unormowane. Jedną z nich zweryfikowano w WZL-3 Dęblin i opisano w artykule.

Metoda bazuje na precyzyjnym, laserowym pomiarze drgań badanego elementu (pobudzanego na wzbudniku) i analizie numerycznej właściwości modalnych I modu. Wyniki, w tym kształt krzywej rezonansowej, odwzorowują wypadkowy wpływ geometrii i właściwości materiałowych obiektu. Są obiektywnym wskaźnikiem stanu technicznego, i poziomu zmęczenia materiału, m.in. fazy umocnienia,

osłabienia lub otwartego pęknięcia zmęczeniowego. Obiektem badań były stalowe i tytanowe łopatki sprężarki osiowej z silników lotniczych.

## Charakterystyka problemu

Wirujące łopatki sprężarki są krytycznymi elementami turbinowego silnika lotniczego. Są to elementy silnie wyężone, pracujące w różnych warunkach obciążenia, nawet na tym samym silniku. Materiał łopatki narażony jest na przedwczesne zmęczenie, skutkujące pękaniem i urwaniem piór. Minimalizacja zagrożenia bezpieczeństwa eksploatacji silnika wymaga okresowej kontroli stanu technicznego łopatek.

W remoncie łopatki kontrolowane są przy pomocy klasycznych metod NDT (defektoskopia fluoroscencyjna, magnetyczną, prądów wirowych). Dla zagrożonych stopni wirnika wykonywana jest również próba zmęczeniowa trzech losowo wybranych łopatek.

Kontrolowane właściwości modalne łopatki: częstotliwość drgań własnych I modu (CzDW) i moment masowy są tylko parametrami pomocniczymi. Weryfikują one pośrednio geometrię łopatki, a nie stan techniczny. Kontrola CzDW realizowana jest na wzbudniku sterowanym z ręcznie przestrajanego generatora. Drgania pióra łopatki mierzone są mikrofonem współpracującym z układem wzmacniającym i analogowym woltomierzem. Kalibrację amplitudy drgań łopatki wykonuje się tylko podczas prób zmęczeniowych (tensometryczny pomiar naprężeń). Za częstotliwość rezonansową łopatki uznaje się wartość, przy której obserwuje się maksymalne wskazania napięcia w torze mikrofonu. W przypadku stwierdzenia odstępstwa częstotliwości od warunków technicznych (WT), pióro łopatki podlega polerowaniu (strojeniu).

Nowe podejście do parametrów modalnych łopatki zaproponowano w WZL-3 Dęblin. W wyniku modernizacji stanowiska prób zmęczeniowych powstały warunki do zautomatyzowania analizy właściwości modalnych łopatek. Mierzone parametry modalne, w tym kształt krzywej rezonansowej, zostały zaproponowane jako obiektywna metoda NDT.

## Podstawy teoretyczne nieliniowego NDT

Stale stopowe i stopy tytanu, stosowane do produkcji łopatek sprężarki, cechują się uporządkowaną mikro- i makrostrukturą oraz pomijalnie małą nieliniowością kierunkową [2]. Właściwości modalne łopatki opisuje dynamika obiektów liniowych, do której zastosowanie ma zasada superpozycji. Łopatki rozpatruje się jako sumę równoległych filtrów wąskopasmowych.

Dla jednotonowego wymuszenia sinusoidalnego (stosowanego w próbach zmęzeniowych) oczekiwaną odpowiedzią pióra łopatki są drgania sinusoidalne o częstotliwości równej wymuszeniu, przesunięte w fazie. Amplituda drgań łopatki jest wprost proporcjonalna do poziomu wymuszenia. Drgania danego punktu pióra łopatki opisuje model numeryczny układu o jednym stopniu swobody (SDOF), z punktową masą modalną  $m$ , sztywnością  $k$  i rozpraszaniem wiskotycznym  $c$

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t). \quad (1)$$

Odwzorowaniem graficznym rezonansu danego modu są „symetryczne” krzywe rezonansowe (amplitudowa i fazowa), które opisują parametry:

- częstotliwość drgań własnych (maksimum amplitudy)

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

- częstotliwość drgań wymuszonych (przesunięcie fazy  $90^\circ$ )

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (3)$$

- tłumienie

$$\xi = \sqrt{1 - \left(\frac{f_d}{f_o}\right)^2}. \quad (4)$$

Wraz z narastającym zmęczeniem materiału (osłabieniem) wzrasta niejednorodność struktury (liczba dyslokacji, stref poślizgu, wytrąceń, umocnień punktowych), co skutkuje lokalnym wzrostem nieliniowości i zmianą globalnych właściwości modalnych łopatki [1, 2]. Oczekiwanyymi symptomami diagnostycznymi, dla danego modu drgań, są parametry opisujące nieliniowy układ zastępczy o jednym stopniu swobody [4]. Mierzone i obliczane parametry modalne są zależne od amplitudy drgań pióra. Charakterystyki rezonansowe są niesymetryczne. Są one wypadkową dwóch gałęzi (atraktorów): rezonansowej i nierezonansowej. W zobrazowaniu krzywej rezonansowej nie występują jeszcze strefy przeskoków lub są one pomijalnie małe.

Pełne cechy obiektu nieliniowego wykazuje dopiero łopátka z otwartym pęknięciem pióra. Głównym źródłem nieliniowości jest tarcie na szczelinie pęknięcia oraz zmiany masy modalnej układu (powyżej i poniżej pęknięcia) wywołane fazą drgań (otwieraniem i zamykaniem szczeliny). W zobrazowaniu krzywej rezonansowej ujawniają się strefy przeskoków [4-6]. Do wyznaczenia pełnej charakterystyki rezonansowej podczas testów jednotonowych niezbędna jest dwukierunkowa wobulacja (zwiększania i zmniejszania częstotliwości wymuszeń).

Rozpoznanie właściwości modalnych łopatki może być realizowane podczas analizy systemowej lub sygnałowej.

**Analiza sygnałowa** — badanie odpowiedzi obiektu na nieznanne z założenia wymuszenia, z zobrazowaniem wyników analizy w postaci łatwej do interpretacji, np. widma FFT, WDT czy portretu fazowego.

Taką analizą jest obserwacja rzeczywistych warunków pracy wirujących łopatek metodą tip timing [7, 8].

**Analiza systemowa** — równoczesny pomiar wymuszeń i odpowiedzi oraz zobrazowanie wyników w postaci funkcji przejścia lub charakterystyk rezonansowych.

Dla łopatek wykonywana jest na wzbudniku podczas remontu silnika.

## Metoda badań

Identyfikację właściwości modalnych łopatek przeprowadzono na wzbudniku elektrodynamicznym 4802T firmy B&K, używanym podczas remontu silników typu SO-3 i TW3-117. Stanowisko prób zmęczeniowych zostało doposażone w:

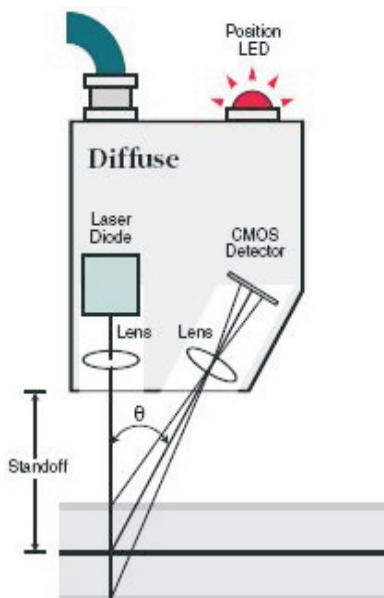
- laserowy układ pomiaru odległości MicroTrack<sup>TM</sup> II z głowicą pomiarową LTC-120-40 firmy MTI Instrument [9];
- moduł VR-8500 (zawierający trzy 24-bitowe przetworniki A/C oraz programowo sterowany generator sygnału wymuszającego) z oprogramowaniem VibrationView firmy Vibration Research Corporation.

Podczas badań łopatki poddawane były jednotonowym wymuszeniom sinusoidalnym w paśmie częstotliwości gwarantującym odtworzenie krzywej rezonansowej ( $A_{\min} < 0,1 A_{\max}$ ). Na tym etapie badań pominięto wpływ:

- siły odśrodkowej — głównego quasistatycznego obciążenia łopatki podczas pracy silnika;
- sprzężenia drgań pióra z obciążeniami aerodynamicznymi.

Ideą zastosowanej metody pomiaru drgań pióra jest **proporcjonalne** odwzorowanie amplitudy przemieszczeń powierzchni podświetlanej laserem na matrycy CMOS głowicy pomiarowej (rys. 1). W układzie wzmacniającym pasmo sygnału jest ograniczone filtrem dolnopasmowym do 20 kHz — sygnał spełnia warunek

Nyquista podczas dyskretyzacji. Wzmocnienie napięciowe laserowego pomiaru przemieszczeń wynosi 100 mV/mm.



Rys. 1. Optyczny pomiar drgań łopatki [9]

Wyniki pomiarów (informacja o częstotliwości, amplitudzie i fazie drgań głowicy wzbudnika i pióra łopatek) dostępne są w dziedzinie częstotliwości i czasu rejestracji. Dostępna jest również informacja (przebiegi czasowe) o poziomie szumu w każdym z rejestrowanych kanałów. Szczegółowa analiza wyników pomiaru była realizowana z wykorzystaniem programu EXCEL oraz programów autorskich. Podczas analizy numerycznej bazowano na funkcji odpowiedzi rezonansowej, wyrażonej w postaci transmitancji operatorowej  $G(\omega)$  (5), i współczynnika symetrii  $WS$  (6), opisującym kształt krzywej rezonansowej na danym poziomie amplitudy drgań.

$$G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \text{const} \frac{U_L(\omega)}{U_A(\omega)} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] \quad (5)$$

$$WS = 100 \frac{f_o - f_L}{f_P - f_o} \quad [\%], \quad (6)$$

gdzie:  $X(\omega)$  — amplituda wymuszeń sinusoidalnych głowicy wzbudnika;

- $Y(\omega)$  — amplituda drgań łopatki w zadanej odległości od zamka i krawędzi natarcia pióra;  
 $U_L(\omega)$  — napięcie na wyjściu wzmacniacza głowicy LTC-120-40;  
 $U_A(\omega)$  — napięcie na wyjściu wzmacniacza akcelerometru głowicy wzbudnika;  
 $f_o$  — częstotliwość drgań własnych;  
 $f_L$  — częstotliwość lewostronna;  
 $f_P$  — częstotliwość prawostronna.

## Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań:

- zweryfikowano rzeczywiste cechy metrologiczne zmodernizowanego toru pomiarowego, w tym właściwości modalne wzbudnika;
- oceniono wpływ obowiązujących WT kontroli CzDW łopatek na wyniki pomiarów;
- wyznaczono właściwości modalne dla pojedynczych łopatek sprężarki (*profilu NACA-65*), wykonanych ze stali 18H2N4WA i stopu tytanu WT-8M (*Ti5.8Al-3.7Mo*);
- wyznaczono cechy krzywej rezonansowej łopatek w pobliżu częstotliwości rezonansowej I modu;
- wyznaczono wstępne symptomy narastającego zmęczenia materiału, bez analizy korelacji obserwowanych zmian właściwości modalnych łopatek ze strukturą;
- wstępnie przeanalizowano wpływ nieciągłości charakterystyki rezonansowej na dynamikę propagacji pęknięcia;
- oceniono wpływ rozrzutu technologicznego właściwości modalnych populacji łopatek na oczekiwane symptomy diagnostyczne.

## Cechy metrologiczne toru pomiarowego

Ocenę właściwości metrologicznych zmodernizowanego toru przeprowadzono przy pomocy stalowych łopatek (*pióro: emaliowane,  $h/c = 2,65$ ; zamek trapezowy,  $R_{0,2} = 800$  MPa,  $R_m = 1100$  MPa*), mikroskopu optycznego i pomiarów tensometrycznych. Stwierdzono, że nowa metoda badań gwarantuje wiarygodne wyniki pomiaru amplitudy, częstotliwości i fazy drgań przy amplitudzie przemieszczeń punktu pomiarowego powyżej 2  $\mu\text{m}$ . Programowo sterowane stanowisko gwarantuje wręcz laboratoryjną dokładność, umożliwiając tym samym:

- precyzyjną identyfikację właściwości modalnych łopatki w żądanym paśmie częstotliwości;
- analizę wpływu czynników metrologicznych na rejestrowane charakterystyki rezonansowe;
- analizę trendów parametrów modalnych podczas prób zmęczeniowych.

## Wpływ warunków pomiaru drgań łopatki

Analizie poddano czynniki metrologiczne, mające wpływ na wyznaczone charakterystyki rezonansowe (tab. 1).

TABELA 1

Wpływ czynników metrologicznych na charakterystykę rezonansową łopatki

Parametr charakterystyki rezonansowej	Czynnik metrologiczny
<b>Kształt</b> krzywej rezonansowej	Szybkość wobulacji wymuszeń Poziom wymuszeń
<b>Wzmocnienie</b> w rezonansie	Położenie punktu pomiarowego na powierzchni pióra Poziom wymuszeń Wzajemne ustawienie głowicy pomiarowej i łopatki
<b>Częstotliwość</b> rezonansowa	Szybkość wobulacji wymuszeń Poziom wymuszeń Warunki mocowania łopatki w głowicy wzbudnika

Wiarygodne odwzorowanie kształtu krzywej rezonansowej uzyskano dla stalowych łopatek przy wobulacji częstotliwości wymuszającej do: **2,5 Hz/min** — dla I modu giętnego ( $Q_s > 350$ ) i **1,0 Hz/min** — dla I modu skrętnego ( $Q_s > 1000$ ). Dokładny pomiar krzywej rezonansowej łopatek tytanowych wymaga jeszcze mniejszych szybkości wobulacji, co wynika z gorszych właściwości tłumienia drgań dla stopu tytanu.

Wraz ze wzrostem szybkości wobulacji obserwuje się: pogorszenie dobroci układu rezonansowego, zmniejszenie współczynnika wzmocnienia w rezonansie i zmianę częstotliwości rezonansowej.

Wraz ze zmniejszaniem siły zacisku obserwuje się zmniejszanie częstotliwości rezonansowej i współczynnika wzmocnienia w rezonansie. Obserwowane zmiany są zależne od geometrii zamka.

Wraz ze wzrostem amplitudy wymuszeń obserwuje się wyraźne zmniejszanie wzmocnienia i nieznaczne zmiany częstotliwości: zmniejszenie dla łopatki stalowej; zwiększenie dla łopatki tytanowej.

Wszystkie ww. parametry zmieniają symetrię krzywej rezonansowej, zaproponowaną przez autora [5, 6] jako nowy symptom diagnostyczny.

Na tym etapie badań stwierdzono, że obowiązujące WT na ciśnienie zacisku łopatek tytanowych w uchwycie technologicznym (1,2 MPa) nie gwarantują warunków sztywnego ich utwierdzenia. Warunku bardzo często przyjmowanego bezkrytycznie podczas modelowania drgań łopatek. Krzywa rezonansowa odwzorowuje wypadkowe właściwości modalne łopatki i zacisku — jest **niesymetryczna**. Średnia wartość wskaźnika symetrii (6) na poziomie  $0,4A_{\max}$  dla tytanowych łopatek wynosi tylko 57% (populacja ponad 500 łopatek), a dla stalowych 98%.

Obserwowana niesymetryczność krzywej rezonansowej I modu łopatek tytanowych ogranicza możliwość stosowania metody połowy mocy (−3 dB) do dokładnego wyznaczania tłumienia — metoda zawyża wartości. Spostrzeżenie jest istotne również podczas analizy widma sygnału z użyciem transformaty Fouriera i pomiaru drgań własnych łopatki po pobudzeniu impulsowym.

## Właściwości modalne dobrej łopatki

Na podstawie badań potwierdzono założenie, że krótkie łopatki sprężarki osiowej (*stalowe i tytanowe*) mogą być rozpatrywane jako wąskopasmowe mechaniczne filtry. Dla pierwszych trzech modów łopatka jest podatna do drgań tylko w pobliżu odseparowanych częstotliwości modalnych (tab. 2). Charakterystyki kolejnych modów są **ciągłe** w otoczeniu rezonansu.

TABELA 2

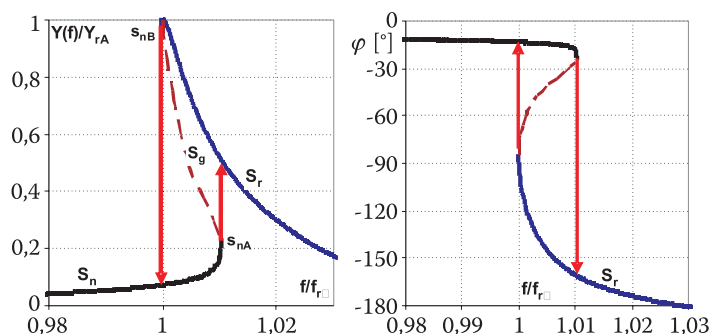
Właściwości modalne stalowej łopatki

MoD	Dane pomiarowe		Współczynnik tłumienia krytycznego $\zeta$	Współczynnik tłumienia $\sigma$ [s <sup>-1</sup> ]	Stała czasowa $\tau$ [s]
	$f_o$ [Hz]	3 dB $\Delta f_{3\text{dB}}$ [Hz]	$\zeta = \frac{\Delta f_{3\text{dB}}}{2f_o}$	$\sigma = \pi \cdot \Delta f_{3\text{dB}}$	$\tau = \frac{1}{\sigma}$
1F	355,1	0,85	0,0012	2,702	0,370
2F	1394,7	2,52	0,0009	7,934	0,126
1T	1938,3	0,83	0,0002	2,600	0,385



## Właściwości modalne pękniętej łopatki

Wpływ naturalnego pęknięcia pióra łopatki na jej właściwości modalne przebadano dla ogniska pęknięcia położonego na grzbiecie i krawędzi spływu pióra. W obu przypadkach stwierdzono wyraźną zmianę jakościową. Podstawowym symptomem diagnostycznym pęknięcia pióra jest **nieciągłość** charakterystyki rezonansowej (rys. 2), oczekiwana dla układu nieliniowego.



Rys. 2. Charakterystyka rezonansowa I modu pękniętej stalowej łopatki z silnika SO-3 ( $a = 2,0$  g)

Charakterystyka amplitudowa pochylona jest w lewo lub prawo w zależności od materiału i stopnia umocnienia na szczelinie pęknięcia. Pomiędzy częstotliwościami  $f_{snA}$  i  $f_{snB}$  układ posiada dwa stabilne rozwiązania T-periodyczne (*atraktory T-periodyczne*) [8], oznaczone linią ciągłą:

- $S_r$  — **atraktor rezonansowy**;
- $S_n$  — **atraktor nierezonansowy**.

Częstotliwości rezonansowe pękniętej łopatki: drgań tłumionych (*fazy*) i nietłumionych (*amplitudy*) znajdujące się na krzywej  $S_r$  i zależą od poziomu wymuszeń oraz amplitudy drgań łopatki.

Stwierdzono, że **nieciągłość** charakterystyki rezonansowej i **strefy przeskoków** wpływają na szybkość propagacji pęknięcia [5]. Zjawisko nazwano roboczo **JCF** — **Jump Cycle Fatigue**.

Nieciągłości charakterystyki rezonansowej nie stwierdzono dla naciętego pióra łopatki, stanowiącego uproszczony model pęknięcia. Pominięcie tarcia na szczelinie pęknięcia jest również źródłem dodatkowych różnic we właściwościach modalnych łopatki (tab. 3).

TABELA 3

Uszkodzenia pióra stalowej łopatki o długości 11 mm od krawędzi spływu, położonego 20 mm od zamka

Łopátka	Zmiana częstotliwości [Hz]		
	I mod	II mod	III mod
Pęknięta	-12	+7	-27
Nacięta (szczelina bez tarcia)	-13	-5	-80

### Symptomy narastającego zmęczenia materiału

Pęknięcie zmęczeniowe stalowej i tytanowej łopatki poprzedzone jest fazą umocnienia i osłabienia materiału [10]. Weryfikację oczekiwanych symptomów diagnostycznych wykonano podczas testów LCF i HCF.

Symptodem diagnostycznym *fazy umocnienia* materiału jest wzrost częstotliwości rezonansowej I modu — dla łopatki stalowej o  $0,5 \div 1$  Hz ( $0,1 \div 0,3\%$ ). Wzrasta również dobroć układu rezonansowego.

Symptodem diagnostycznym *fazy osłabienia* materiału jest narastająca asymetria krzywej rezonansowej łopatki, która poprzedzała zmniejszenie częstotliwości drgań I modu łopatki.

Praktyczne zastosowanie powyższych symptomów wymaga uwzględnienia rozrzutu właściwości modalnych populacji danego typu łopatek, w tym wpływu mocowania łopatki w gnieździe.

### Badania populacji łopatek

Do „seryjnej” oceny stanu technicznego łopatek zaproponowano analizę uproszczonej amplitudowej charakterystyki rezonansowej, uzyskanej z jednostronnego testu (na zmniejszanie częstotliwości). Zwiększono również szybkość wobulacji do 20 Hz/min, korygując wyznaczone WT diagnozy. Czas badania pojedynczej łopatki nie przekracza 3 minut i może być skrócony o ponad 50% w wyniku pełnej automatyzacji procesu.

Podczas działań profilaktycznych na wytypowanej grupie silników TW3-117 potwierdzono zalety nieliniowej metody NDT, w tym bardzo małą podatność na zjawisko samoczynnego zamykania się szczeliny pęknięcia (występujące podczas długotrwałego postoju maszyny i odciążenia pióra). Zjawisko to ogranicza realną czułość klasycznych metod NDT. Stwierdzono również możliwość diagnozowania nadmiernych błędów kształtu zamka łopatki.

## Podsumowanie

Analiza modalna sprzęgnięta z precyzyjnym pomiarem drgań może być stosowana jako bardzo czuła obiektywna metoda NDT. Metoda, która w warunkach przemysłowych wykrywa nie tylko otwarte pęknięcie, ale również narastające zmęczenie materiału (*fazę umocnienia i osłabienia*). Analizowanym parametrem i symptomem diagnostycznym jest kształt krzywej rezonansowej, co uniezależnia stawianą diagnozę od nieznannej początkowej wartości częstotliwości drgań i wpływu tolerancji wymiarowej obiektu.

Czułość opisywanej metody NDT stwarza perspektywę jej wdrożenia w remoncie silników lotniczych i zastąpienie mało wiarygodnych badań statystycznych (*próby niszczącej 3 łopatek z wieńca*).

W wyniku modernizacji stanowiska prób zmęczeniowych w WZL-3 Dęblin powstało nowe narzędzie badawcze. Umożliwia ono zainteresowanym ośrodkom naukowo-badawczym rozwijanie i weryfikację nowych metod NDT na bazie dużej populacji obiektów badań (zmniejszenie kosztów badań), lepsze rozpoznanie zjawiska zmęczenia materiałów konstrukcyjnych oraz doskonalenie istniejących modeli matematycznych propagacji pęknięcia.

Prace badawcze zostały sfinansowane ze środków MNiSW w ramach projektu badawczego 4 T12C 009 29 i środków MON.

## LITERATURA

- [1] K.E-A. VAN DEN ABEELE, A. SUTIN, J. CARMELIET, P. A. JOHNSON, *Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)*, NDT&E International, 34, 2001, 239-248.
- [2] L. A. OSTROVSKY, P. A. JOHNSON, *Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials*, Revista del Nuovo Cimento, 2001, vol. 24, no. 7, 1-46, <http://www.lanl.gov/orgs/ees/ees11/geophysics/nonlinear/2001/nrc8730.pdf>
- [3] *Development of Enabling Methodologies for Detection and Characterization of Early Stage of Damage in Aerospace Materials*, DARPA-MURI Grant nr F49620-96-1-0442.
- [4] J. AWREJCWICZ, *Dynamika nieliniowa maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1994.
- [5] M. WITOŚ, B. OLZAK, *Modal Analysis of Compressor Cracking Blade*, in VKI Lecture Series: Tip Timing/Tip Clearance Measurements in Turbomachines, Rhode-Saint-Genèse VKI, 2007.
- [6] M. WITOŚ, *Analiza modalna pękającej łopatki sprężarki*, XI Krajowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa Mechaniki Pękania, 9-12.09.2007, Cedyňa k/Kielc, zeszyty naukowe „Nauki techniczne – Mechanika”, nr 4, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2007 (CD-ROM).
- [7] R. WASHBURN, *Amplitude and Phase Variations Associated with Low Order Resonance Responses Subjected to Time Varying Excitation Sources*, Proceedings of 9th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, 2004, <http://www.hcf.utcd Dayton.com/pages/04-proceed.html>
- [8] M. WITOŚ, *Diagnozowanie stanu technicznego łopatek sprężarki turbinowego silnika spalinowego metodą bezdotykowego pomiaru drgań*, rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa, 1994.

- [9] *High Speed Laser Displacement Sensor MicrotrackTMII*, <http://www.mtiinstruments.com/pdf/products/microtrack2.pdf>
- [10] A. BUCH, *Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej*, PWN, Warszawa, 1964.

M. WITOŚ, J. ZALEWSKI

**Blade modal analysis as non-destructive testing**

**Abstract.** The influence of digitalization of fatigue testing stand on experimental possibilities and reliability of overhauled engines has been discussed. Chosen data from laser determination of axial compressor blades modal characteristics (steel and titanium alloys) have been showed. The expert blade health diagnostics method has been described. It includes not only open-crack detection but also material strengthening and weakening phase.

**Keywords:** nonlinear modal analysis, blades, fatigue, JCF, engines — tests

**Universal Decimal Classification:** 621.43