



## Aspekty metrologiczne bezdotykowego diagnozowania wirujących łopatek sprężarki

MIROSŁAW WITOŚĆ, MIROSŁAW KOWALSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6

**Streszczenie.** Przedstawiono podstawy teoretyczne stosowania elastycznego znacznika fazy — wirującej i drgającej łopatki sprężarki — do kompleksowego diagnozowania turbinowego silnika lotniczego (metoda tip timing). Wskazano na rolę numerycznych metod analizy w rozdzieleniu składowych sygnału pomiarowego (aperiodycznej i oscylacyjnej) oraz potrzebę weryfikacji istniejących algorytmów analizy danych, pochodzących z nierównomiernego próbkowania. Omówiono 15-letnie spostrzeżenia eksploatacyjne stosowania metody na samolotach TS-11 „Iskra”.

**Słowa kluczowe:** odstęp czasu, nierównomierne próbkowanie, łopatki, zmęczenie, silniki lotnicze — diagnostyka

**Symbole UKD:** 629.735.036

### Wstęp

Bezdotykowy pomiar drgań łopatek sprężarki czy turbiny [1] jest coraz częściej stosowaną metodą kompleksowego monitorowania maszyn wirnikowych [2]. Metoda znana jest w literaturze pod nazwą „tip timing” (TTM). Spotyka się również lokalne nazwy, tj. TOA, MDF, MDR [3], FAM-C [4], które zawierają informację o głównym algorytmie przetwarzania danych lub celu analizy, m.in.:

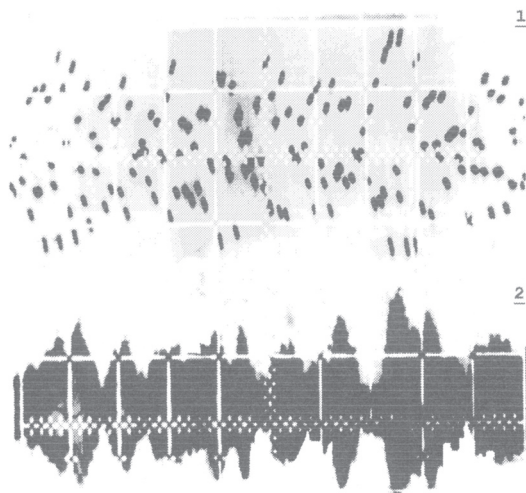
- pozyskaniu równoległej informacji o amplitudzie drgań wszystkich łopatek badanego wieńca;
- identyfikacji niekorzystnych zjawisk dynamicznych, tj. flutter, wirujące strefy oderwań, rezonans synchroniczny i asynchroniczny;
- diagnozowaniu stanu technicznego łopatki, w tym wczesnej fazy pęknięcia zmęczeniowego;
- identyfikacji stanu technicznego układów funkcjonalnych silnika i płatowca;

— identyfikacji stanu naprężeń łopatki — np. system NSMS Gen 4. Coraz nowsze obszary zastosowania TTM są ściśle związane z rozwojem techniki pomiarowej i algorytmów analizy numerycznej.

Rozwój TTM stymulowany jest równoległe przez producentów maszyn i problemy techniczne spotkane w eksploatacji istniejących maszyn. Zespoły badawcze zajmujące się TTM skupione są m.in. w EVI-GTI ([www.evigti.com](http://www.evigti.com), kraje europejskie), PIWG ([www.piwg.org](http://www.piwg.org), USA) i w ośrodkach akademickich (Azja).

### Istota metody tip timing

Początki szerszego zastosowania TTM sięgają lat 50. minionego wieku, kiedy to do badań fabrycznych wdrożono alternatywną metodę bezdotykowego pomiaru naprężeń w wirujących łopatkach [1]. Wykorzystano związki pomiędzy parametrami modalnymi łopatki i lokalnym naprężeniem w piórze. W zakresie małych odkształceń są to związki liniowe (rys. 1).



Rys. 1. Równoległe zobrazowanie: 1 — drgań łopatki w TTM, 2 — naprężeń u podstawy pióra (pomiar tensometrem) [3]

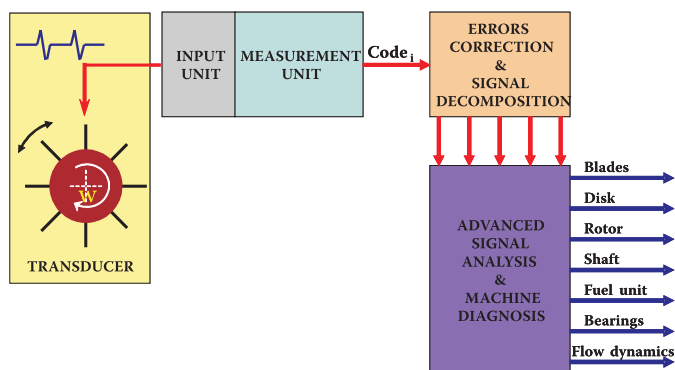
Drgania wirujących łopatek modulują czas ich przyścia TOA (j. ang. — *Time Of Arrival*) względem „nieruchomego” obserwatora (czujnika położenia lub prędkości) mocowanego w drgającym kadłubie maszyny wirnikowej.

$$TOA_i = [1 + \zeta(t)] \cdot TOA_A(t) = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \frac{1}{\omega} d\varphi = \int_{t_i}^{t_i+TOA_i} \frac{1}{\omega} dt, \quad (1)$$

gdzie:  $\zeta(t)$  — głębokość modulacji;  
 $TOA_A(t)$  — czas przyjscia dla sztywnego znacznika;  
 $\phi_i$  — kąt  $i$  znacznika fazy;  
 $t_i$  — czas  $i$  rejestracji;  
 $\omega$  — chwilowa prędkość kątowna wirnika.

Do bezdotykowego monitorowania drgań pióra zastosowano pomiar od-cinków czasu pomiędzy kolejnymi łopatkami (elastycznymi znacznikami fazy). We wczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych pomiar był realizowany przy pomocy analogowych detektorów fazy (rozdzielczość rzędu 1 us), które w latach 90. XX wieku zostały wyparte przez metodę częstotliwościową (rozdzielczość  $100 \div 5$  ns). Dynamiczny rozwój specjalizowanych układów scalonych TDC (j. ang. — *Time to Digital Converter*), bazujących na metodzie linii opóźniającej, zwiększył możliwą rozdzielczość TTM do  $50 \div 10$  ps. Zabezpiecza ona teoretyczną rozdzielczość amplitudy drgań łopatki na poziomie kilku nanometrów. Tymczasem rzeczywista rozdzielczość pomiaru amplitudy drgań cienkich łopatek nie przekracza  $50 \mu\text{m}$ , a grubych łopatek nawet  $200 \mu\text{m}$ . Rozdzielczość jest jeszcze gorsza w przypadku bardzo dużych łopatek, np. z części niskoprężnej turbin parowych.

Metoda tip timing — metoda kompleksowego wykorzystania informacji zawartej w sygnale chwilowej prędkości obrotowej (*kątowej*) znaczników fazy, która umożliwia zmniejszenie liczby kanałów pomiarowych poprzez zastąpienie ich rozwiniętymi algorytmami numerycznego przetwarzania danych (rys. 2).



Rys. 2. Struktura blokowa metody tip timing [2]

TTM nie mierzy: rozkładu obciążenia, lokalnego odkształcenia czy poziomu naprężeń w piórze łopatki. Te wielkości podlegają oszacowaniu na podstawie dodatkowych modeli numerycznych (charakterystyk).

## Problemy metrologiczne metody tip timing

Dynamiczny rozwój techniki pomiarowej i wzrost teoretycznej rozdzielczości pomiaru czasu ujawnił istniejące niedopracowania TTM, wyrażone w pytaniach:

- Gdzie jest wierzchołek łopatki w chwili wygenerowania impulsu bramkującego?
- Jak dokładna jest dekompozycja sygnału pomiarowego na składowe: aperiodyczną i oscylacyjną?
- Jak dokładne jest rozdzielenie składowej łopatkowej od innych składowych oscylacyjnych sygnału?

Odpowiedź na powyższe pytania wymaga uwzględnienia specyfiki opisywanej metody:

- a) założenia metody
  - pomiar wykorzystuje nierównomierne próbkowanie;
  - składowa oscylacyjna prędkości obrotowej została uznana za główny nośnik informacji diagnostycznej (w cyfrowym tachometrze uważana jest za szum pomiarowy);
  - efekt strobowania rozróżnia składowe oscylacyjne o stałej i zmiennej rzędowości, względem częstotliwości obrotowej;
  - większość składowych oscylacyjnych sygnału jest wąskopasmowa, a ich częstotliwość nośna jest wielokrotnie większa od częstotliwości obrotowej wirnika. Spełnione jest jednak kryterium Nyquista dla próbkowania równomiernego ( $f_s > 2B$ );
  - podczas dyskretyzacji sygnału następuje powielenie i przesunięcie do dołu częstotliwości nośnych składowych oscylacyjnych;
  - informacja o składowej oscylacyjnej drgań łopatek jest dostępna tylko dla jednego obrotu wirnika dla każdego czujnika (w przybliżeniu z częstotliwością obrotową wirnika);
  - składowa aperiodyczna sygnału umożliwia odniesienie nowych symptomów diagnostycznych względem zakresu pracy maszyny;
- b) w TTM wprowadzono drobne zmiany w torze pomiarowym (w porównaniu z cyfrowym tachometrem) i w algorytmach wstępnego przetwarzania danych:
  - zniesiono ograniczenie sztywności znaczników fazy → drgające i wirujące łopatki pełnią rolę znacznika fazy;
  - zwiększono pasmo przenoszenia filtra analogowego do wartości gwarantującej brak zakłóceń i wpływu szumu pomiarowego → poprawa dynamiki przejścia sygnału przez poziom wyzwalania impulsów bramkujących;
  - zwiększono częstotliwość zegarową → poprawiono teoretyczną rozdzielczość pomiaru składowych oscylacyjnych;
  - zastosowano 16-, 32- lub 48-bitową reprezentację danych pomiarowych;

- wprowadzono automatyczną korekcję błędów pomiarowych → zwiększenie wiarygodności danych i zakresu prędkości obrotowej pomiarów;
  - zastąpiono filtrację dolnopasmową sygnału dyskretnego numeryczną dekompozycją → wydzielenie składowych sygnału;
- c) rozbudowano algorytmy numerycznego przetwarzania danych
- dodano algorytmy identyfikacji parametrów poszczególnych składowych oscylacyjnych sygnału → amplitudy, częstotliwości i fazy;
  - dodano algorytmy rozwiniętego przetwarzania danych na potrzeby diagnozowania maszyny → realizacja celu badań.

### Przetwornik metody tip timing

Wirujące i drgające łopatki, współpracując z „nieruchomym” obserwatorem, tworzą specyficzny, dyskretny przetwornik chwilowej prędkości kątowej wirnika o kilku stopniach swobody. Liczba stopni swobody zależna jest od typu czujnika. Jest mniejsza dla czujników położenia: optycznego, pojemnościowego, wiropładowego lub mikrofalowego; większa dla czujników prędkości, np. reluktancyjnego. Zależy również od liczby dominujących postaci drgań łopatki i miejsca montażu obserwatora.

Przykładowo, dla czujnika reluktancyjnego znana relacja opisująca sygnał napięciowy (2) zależna jest m.in. od: prędkości liniowej znacznika fazy  $V$ , odległości znacznika od czujnika  $h$ , położenia płaszczyzny obserwacji względem krawędzi natarcia pióra  $l/c$  (kąta drgań), pola przekroju profilu znacznika  $A$ , kąta ugięcia pióra  $\alpha$  i zjawisk wtórnych  $\beta$ , m.in. prądów wirowych.

$$U(t) = \frac{d\Phi}{dt} = f(V, h, l/c, A, \alpha, \beta). \quad (2)$$

W ciągłym sygnale wyjściowym przetwornika obecne są składowe: aperiodyczna i oscylacyjna. Składowe sygnału zniekształcone są przez nieliniowe związki wynikające ze zmiennego kierunku drgań pióra (sprzęgania) i geometrii profilu pióra łopatki oraz obecności pozałopatkowych źródeł modulacji, np. drgań skrętnych wirnika.

Rozdzielczość kątowa przetwornika ogranicza od góry częstotliwość analizowanych zjawisk oscylacyjnych, w tym możliwość rozróżniania wyższych postaci drgań łopatki.

Do precyzyjnej identyfikacji amplitudy drgań pióra łopatki (rzędu pojedynczych  $\mu\text{m}$ ) i naprężeń danego modu drgań wymagana jest znajomość:

- właściwości modalnych łopatek (minimum pierwsze trzy mody);
- relacji pomiędzy ciągłym sygnałem analogowym z przetwornika  $U(t)$  i położeniem wierzchołka pióra łopatki (identyfikacja np. na podstawie pomiaru

A/C kształtu sygnału z częstotliwością próbkowania ponad 10 MHz na etapie kalibracji toru pomiarowego).

Powyższa wiedza umożliwia zbudowanie modelu 3D przetwornika, który jest wykorzystywany podczas rozwiniętego przetwarzania danych pomiarowych. Przetwarzanie danych bez modelu łopatki ogranicza rzeczywistą rozdzielczość metody do ok. 50  $\mu\text{m}$  (cienki profil pióra) i ponad 200  $\mu\text{m}$  (gruby profil pióra).

## Konfiguracja przetwornika

W celu uwypuklenia informacji o drganiach łopatek, tarczy czy wirnika stosuje się jedno z poniższych rozwiązań montażowych:

a) konfiguracja czujników umożliwiająca pomiar bezwzględny aperiodycznego przemieszczenia (wnoszonego przez średnie obciążenie pióra) i drgań pióra łopatki (odpowiedzi na obciążenia dynamiczne):

- pomiar dwoma obserwatorami: czujnikiem pomiarowym mierzącym przemieszczenie końca pióra łopatki i czujnikiem odniesienia mierzącym chwilową prędkość obrotową „sztywnego” elementu wirnika, np. podstaw piór łopatek lub punktów charakterystycznych tarczy.

Podstawową wadą tej konfiguracji jest kłopotliwy montaż czujnika odniesienia wewnątrz kanału przepływowego. Konfiguracja stosowana jest najczęściej do pierwszych stopni wirnika.

- pomiar kilkoma czujnikami pomiarowymi rozłożonymi nad łopatkami w jednej płaszczyźnie po obwodzie koła i jednym czujnikiem odniesienia współpracującym z pojedynczym znacznikiem fazy (znacznikiem początku obrotu).

Konfiguracja stosowana jest głównie do identyfikacji wyższych modów drgań pióra z wykorzystaniem algorytmów TOA.

- pomiar kilkoma czujnikami pomiarowymi rozłożonymi nad łopatkami wzdłuż cięciwy pióra i jednym czujnikiem odniesienia współpracującym z pojedynczym znacznikiem fazy (znacznikiem początku obrotu).

Konfiguracja czujników stosowana jest do identyfikacji modów drgań pióra (częstotliwości i kształtu linii drgań). Używana jest również na potrzeby systemów NSMS.

b) konfiguracja czujników umożliwiających pomiar względny drgań łopatek (różnicę składowych aperiodycznych i oscylacyjnych przemieszczeń piór łopatek biorących udział w cyklu pomiarowym).

- pomiar dwoma czujnikami mocowanymi nad łopatkami w jednej płaszczyźnie, w dowolnej odległości kątowej między nimi.
- pomiar dwoma czujnikami mocowanymi nad łopatkami w dwóch płaszczyznach, w dowolnej odległości kątowej między nimi.

- pomiar realizowany tylko jednym czujnikiem mierzącym względne przemieszczenie wierzchołków piór łopatek.

### Układ formowania sygnału

Zadaniem układu formowania sygnału jest wzmocnienie, przefiltrowanie i przekształcenie ciągłego sygnału analogowego przetwornika w strome sygnały bramkujące TTL lub CMOS wymagane przez układ częstotliwościowy lub linię opóźniającą. Od właściwej pracy tego bloku zależy jakość uzyskiwanych wyników pomiaru. Najczęściej popełnianymi błędami konstrukcyjnymi są:

- wyzwalanie impulsów bramkujących na poziomie sygnału analogowego różnego od zera (czujnik prędkości) lub poza wierzchołkiem (czujnik położenia). W efekcie, zmiana amplitudy sygnału analogowego jest źródłem pozornej modulacji fazy (częstotliwości Rice'a);
- niewyznaczenie stałej czasowej opóźnienia sygnału w układzie formowania. Takie zaniedbanie jest źródłem grubych błędów w przypadku wielokanałowego toru pomiarowego lub używania różnych typów czujników

### Układ pomiaru odcinków czasu

Do pomiaru odcinków czasu w TTM najczęściej stosuje się metodę częstotliwościową. Czas obrotu wirnika o żądany kąt między  $N_B$  łopatkami (unormowanymi impulsami bramkującymi  $t_B$ ) mierzony jest w postaci liczby impulsów zegarowych *Code*, wytwarzanych przez stabilny wzorzec czasu  $t_{clock}$  — generator kwarcowy o częstotliwości  $f_{clock}$ .

$$Code = Trunc\left(\frac{t_B}{t_{clock}}\right) = Trunc\left(\frac{f_{clock}}{N_B f}\right), \quad (3)$$

gdzie  $f$  — częstotliwość obrotowa znaczników.

Zliczanie impulsów zegarowych realizuje 16-, 24- lub 32-bitowy licznik. Rozdzielczość pomiaru odcinka czasu wynosi  $t_{clock}$  — jest tym większa, im większa i stabilniejsza jest częstotliwość wzorca czasu. Typowe wartości częstotliwości zegarowej wynoszą od 10 do 350 MHz [2]. Wartość częstotliwości zegarowej dobierana jest do długości pióra łopatki (amplitudy drgań) i maksymalnej prędkości obrotowej maszyny. Jest to drugi parametr ograniczający górną częstotliwość obserwowanych zjawisk oscylacyjnych.

Ten etap przetwarzania danych ma bardzo dobre wsparcie w istniejących kartach licznikowych, np. PCI-6602 firmy National Instruments (8 kanałów,

$f_{clock} = 80$  MHz) i TDC, np. V980VXI firmy Highland Technology (16 kanałów, 48-bitów, rozdzielczość 48 ps).

## Korekcja błędów

W rzeczywistych warunkach pracy maszyny wirnikowej pomiary częstotliwościowe mogą zostać obciążone przez różne błędy i zakłócenia  $K_{i,i+1}$ , powstałe na etapie:

- współpracy wirującej łopatki z czujnikiem pomiarowym (np. zanik lub dodatkowe impulsy);
- formowania sygnału bramkującego z sygnału analogowego przetwornika;
- pomiaru odcinka czasu;
- transmisji danych z układu pomiarowego do komputera.

$$Code_p = K_{i,i+1} \cdot Code. \quad (4)$$

Analiza surowego sygnału pomiarowego  $Code_p$  może skutkować błędną diagnozą i niepotrzebnymi kosztami, np. wycofaniem dobrego silnika z eksploatacji. Dlatego w TTM przyjęto jako regułę wstępne przetwarzanie danych pomiarowych, z **weryfikacją struktury i źródła** danych oraz **identyfikacją i korekcją błędów pomiarowych**. Niewątpliwą zaletą omawianej metody jest możliwość automatycznego korygowania błędów pomiarowych w zakresie niespotykanym w typowych układach przetworników A/C [2].

Na etapie weryfikacji i korekcji danych pomiarowych należy pamiętać, że niektóre błędy, np. dwukrotne przejście znacznika fazy pod czujnikiem podczas jednego obrotu wirnika, są również informacją diagnostyczną. Takie zjawisko może wystąpić w przypadku dużej amplitudy drgań skrętnych lub giętych łopatek albo drgań skrętnych wirnika. W przypadku używania sztywnego znacznika fazy, np. twornika prądniczy w metodzie FAM-C [4], ww. błąd może odwzorowywać zjawiska rezonansowe istniejące w układzie kinematycznym.

## Podstawy teoretyczne analizy sygnału TTM

Po zweryfikowaniu i korekcji błędów dane pomiarowe podlegają dalszej analizie numerycznej. Dokładnie znaną wielkością jest tylko mierzony odcinek czasu (przy zachowaniu staranności pomiaru).

Przyjęcie założenia o elastycznych właściwościach znaczników fazy skutkuje pozornie nierozwiązywalnym problemem matematycznym — wynik pomiaru odcinka czasu  $\Delta T(n, k)$  pomiędzy kolejnymi łopatkami  $i, i+1$  w chwili czasu  $k$



i prędkości obrotowej wirnika  $n(k)$  odwzorowuje równocześnie dwie niewiadome w równaniu (5):

- **chwilową podziałkę**  $L(n, k)$  — miarę łukową pomiędzy wierzchołkami drgających i wirujących piór łopatek, biorących udział w cyklu pomiarowym;
- **średnią prędkość kątową wirowania znaczników fazy**  $\omega_F(n, k)$ , biorących udział w cyklu pomiarowym.

$$\Delta T(n, k) = \frac{L(n, k)}{\omega_F(n, k)} \quad [s] \quad (5)$$

$$n(k) \cong 60 \frac{\omega_F(k)}{2\pi} \quad [\text{obr}/\text{min}].$$

Tymczasem celem pomiarów TTM jest uzyskanie wiarygodnej informacji o:

- **drganiach pióra każdej łopatki**, odwzorowanych przez składową oscylacyjną funkcji modulującej  $\zeta_L(n, k)$ ;
- **błędach podziałki pomiędzy kolejnymi łopatkami**, odwzorowanych przez aperiodyczną dla danej podziałki składową funkcji modulującej  $\zeta_L(n, k)$ ;
- **średniej prędkości obrotowej wirnika**, odwzorowanej przez  $\omega_{avg}(n, k)$ ;
- **chwilowej prędkości obrotowej znaczników i wirnika**, odwzorowanych przez funkcję modulującą  $\zeta_W(n, k)$ .

$$\Delta T(n, k) = \frac{1 + \zeta_L(n, k)}{1 + \zeta_W(n, k)} \frac{L_T}{\omega_{avg}(k)}, \quad (6)$$

gdzie  $L_T$  — podziałka teoretyczna.

Jest to typowe zagadnienie odwrotne — poszukiwane wielkości nie są bezpośrednio dostępne w wynikach pomiarów. Osiągnięcie celu badań TTM wymaga zdefiniowania dodatkowych warunków dotyczących:

- składowych mierzonego sygnału,
- liczby łopatek (okresowości struktury danych),
- identyfikowanych wielkości, w tym ich charakterystyk widmowych,
- konfiguracji czujników.

Realizowany pomiar można rozpatrywać jako modulację oczekiwanego aperiodycznego czasu próbkowania  $\Delta T_A(n, k)$  przez zjawisko jitteru  $\zeta(n, k)$ .

$$\Delta T(n, k) = [1 + \zeta(n, k)] \cdot \Delta T_A(n, k) \quad (7)$$

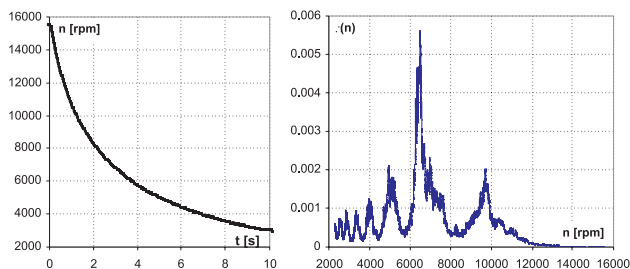
$$\zeta(n, k) = \frac{1 + \zeta_L(n, k)}{1 + \zeta_W(n, k)}.$$

Charakterystyka widmowa jitteru  $\zeta(n, k)$  jest wypadkową właściwości modalnych łopatek, widma wymuszeń, błędów podziałek i właściwości przestrzennych czujnika.

Stosowane algorytmy wstępnej analizy numerycznej dokonują dekompozycji sygnału TTM na składowe. Po dekompozycji sygnał można zapisać w postaci macierzy zawierającej informację o czasie próbkowania, prędkości obrotowej silnika (aperiodycznym trendzie) i jitterze (8). Wiersze macierzy odwzorowują kolejny obrót wirnika.

$$\begin{bmatrix} (t_{11}, n_{11}, \xi_{11}) & \dots & (t_{N_B 1}, n_{N_B 1}, \xi_{N_B 1}) \\ \dots & \dots & \dots \\ (t_{1m}, n_{1m}, \xi_{1m}) & \dots & (t_{N_B m}, n_{N_B m}, \xi_{N_B m}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Jitter odwzorowuje skutki równoczesnej modulacji amplitudy (AM), częstotliwości (FM) i fazy (PM) wnoszone przez wszystkie składowe oscylacyjne sygnału (rys. 3).



Rys. 3. Modulacja prędkości obrotowej wirnika silnika SO-3 wywołana przez drgania łopatki I postacią giętną

Mierzony sygnał i składowe macierzy (8) opisuje addytywny lub multiplikatywny model numeryczny, zawierający trend, składową okresową i składową nieregularną.

## Podsumowanie

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych potwierdzono bardzo wysoką efektywność TTM. Dla silników typu SO-3 (samolot TS-11 „Iskra”) zwiększono m.in. ponad 7-krotnie czas pomiędzy zmęczeniowymi pęknięciami łopatek I stopnia sprężarki. Rozpoznano również podstawowe związki przyczynowe generowania uszkodzeń zmęczeniowych, w tym antropotechniczne.

Na jakość wyników TTM wpływa zarówno część pomiarowa, jak i stosowane algorytmy analizy numerycznej sygnału.

Praktyczna rozdzielczość pomiaru TTM zależna jest głównie od jakości i dokładności odwzorowania relacji pomiędzy kształtem sygnału z przetwornika i bieżącym położeniem znacznika fazy (pióra łopatki).

Podstawowe trudności numerycznej analizy danych TTM wynikają z nierównomiernego próbkowania (składowe oscylacyjne nie są ortogonalne), powielenia widma i przesunięcia do dołu oraz doboru metod numerycznych do rozwiązywanego zagadnienia odwrotnego.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] Patenty USA nr 2575710 (1951), 3058339 (1962), 3289073 (1966), 3467358 (1969), 3597963 (1971), 4593566 (1986), 4827435 (1989), 4887468 (1989), 5111704 (1992), 5148711 (1992), 6094989 (2000).
- [2] Praca zbiorowa, *Tip timing and tip clearance problems in turbomachines*, Lectures Series 2007-3, VKI Belgium 2007.
- [3] M. WITOS, *Diagnozowanie stanu technicznego łopatek sprężarki turbinowego silnika spalinowego metodą bezdotykowego pomiaru drgań*, rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa, 1994.
- [4] A. GEBURA, *Diagnostic Of Aircraft Power Transmission Track Based On The Analysis Of Generator's Frequency*, Journal of Technical Physics, vol. 43, no. 43, 2002, 61-68.

M. WITOŚĆ, M. KOWALSKI

#### **Metrological aspects of non-contact rotating blade measurements**

**Abstract.** The paper presents theoretical background of using elastic key phasor-rotating and vibrating compressor blade — for complex jet engine diagnosis (tip timing method). The role of numerical methods of measurement signal decomposition onto parts (aperiodic and oscillation) is pointed. It also shows the need of existing algorithms (from irregular sampling) verification. Fifteen years' service knowledge of using mentioned method aboard TS-11 "Iskra" is presented.

**Keywords:** tip timing, nonuniform sampling, blades, fatigue, aircraft engine-diagnosis

**Universal Decimal Classification:** 629.735.036

