

## WPŁYW ZMIANY OTOCZENIA REPREZENTOWANEGO PRZEZ PRĘDKOŚĆ OBROTOWĄ NA ZMIANY PARAMETERÓW MODELI DIAGNOZOWANIA ŁOPATKI PRACUJĄCEJ MASZYNY WIRNIKOWEJ Z ELIMINACJĄ JEJ NIEMIERZALNEGO OTOCZENIA

Paweł LINDSTEDT\*, Rafał GRĄDZKI\*\*

Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,  
ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

Zakład Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,  
ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

[p.lindstedt@pb.edu.pl](mailto:p.lindstedt@pb.edu.pl), [r.gradzki@pb.edu.pl](mailto:r.gradzki@pb.edu.pl)

**Abstract:** W artykule przedstawiono wpływ zmiany otoczenia (prędkości obrotowej) na zmianę parametrów modeli  $A_{T12,T01}^2$  i  $\varphi_{T12,T01}$  wykorzystywanych w nowej metody monitorowania stanu technicznego łopatek maszyn wirnikowych podczas ich użytkowania. Metoda wykorzystuje specjalne modele diagnostyczne w postaci ilorazu wzmocnienia amplitudowego sygnału diagnostycznego  $y(t)$  wynikającego z działania łopatki i sygnału  $x(t)$  jej otoczenia podczas zbliżania się wierzchołka łopatki do czujnika ( $A_{T01}^2$ ) i wzmocnienia amplitudowego tych sygnałów podczas oddalania się wierzchołka łopatki od czujnika ( $A_{T12}^2$ ) oraz różnicy przesunięcia fazowego tychże sygnałów podczas oddalania się łopatki od czujnika i zbliżania się wierzchołka łopatki do czujnika ( $\varphi_{T12} - \varphi_{T01}$ ). Przyjęte modele diagnostyczne pośrednio uwzględniają aktualne otoczenie łopatki  $x(t)$  bez konieczności jego pomiaru. Zatem metody te są mało wrażliwe na zmianę otoczenia, a czule tylko na zmiany stanu technicznego łopatki. Proponowana metoda może odegrać istotną rolę w diagnostyce łopatek wirnikowych podczas użytkowania maszyn wirnikowych (sprężarek, turbin itp.).

### 1. WSTĘP

Jednym z podstawowych elementów odpowiedzialnych za niezawodną i bezpieczną pracę maszyny wirnikowej jest łopatka, której uszkodzenie może prowadzić do uszkodzenia maszyny, a w szczególnych przypadkach (urwanie fragmentu lub całej łopatki) do całkowitego zniszczenia maszyny wirnikowej a to w konsekwencji przeważnie prowadzi do tragicznych w skutkach katastrof. Stąd w procesie obsługi tych maszyn bardzo dużo uwagi poświęca się problemom niezawodności i diagnostyki łopatek maszyn wirnikowych.

Obecnie stosuje się wiele metod diagnozowania stanu technicznego łopatek podczas pracy maszyny wirnikowej (metoda prądów wirowych, metoda ultradźwiękowa, metoda radiograficzna, metoda defektoskopii kolorowej i luminescencyjnej oraz metoda wibroakustyczna).

Badania diagnostyczne metodą wibroakustyczną bazują na tzw. „bezdotykowym” pomiarze wartości bieżących przemieszczeń wierzchołka łopatki w krótkich chwilach, gdy znajduje się ona w strefie pod specjalizowanym czujnikiem. Opracowano i wdrożono wiele „bezdotykowych” systemów pomiarowych. Są to powszechnie znane i stosowane systemy pomiarowe wykonane przez firmy: Hood, Aqilis, Prat & Whi-they (USA), Rolls Royce (UK), Turbocharges (Szwajcaria), MTU (Niemcy), a także firmy rosyjskie, chińskie i indyjskie (Bovishanskii, 2000; Duan i inni., 2005; Von Flotow i Mercadal, 2000; High Cycle Fatigue

S & program 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002; Klein, 2004; Roberts, 2007; Zieliński i Ziller, 2005).

Znane i stosowane są także polskie bezdotkowe układy pomiarowe szczególnie te zaprojektowane, wykonane i wdrożone przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL) – Warszawa.

Wśród układów bezdotkowego pomiaru przemieszczeń łopatki wykonanych przez ITWL wymienia się (Lindstedt i inni, 2009; Szczepanik i Przsowa, 2004; Szczepanik, 1999):

- sygnalizator pęknięć łopatek: SPŁ – 29;
- sygnalizator nadmiernych drgań łopatek: SNDŁ – 2b;
- czujniki mikrofalowe: MUH, PIT.

Z dużym powodzeniem pracują one na konkretnych eksploatowanych obiektach technicznych (silniki SO-3).

Wnioskowanie diagnostyczne stosowane w dotychczasowych metodach oceny stanu technicznego łopatek bazują tylko na przetwarzaniu zmierzonych podczas badań diagnostycznych, sygnałów wynikających z działania łopatki bez wystarczającego (zdaniem autorów) uwzględnienia sygnałów (o znacznej mocy) jej zmiennego otoczenia.

Pomiary sygnałów otoczenia łopatki podczas pracy maszyny wirnikowej są trudne a często niemożliwe i właśnie, dlatego są w niewystarczającym stopniu uwzględniane w diagnostyce łopatek.

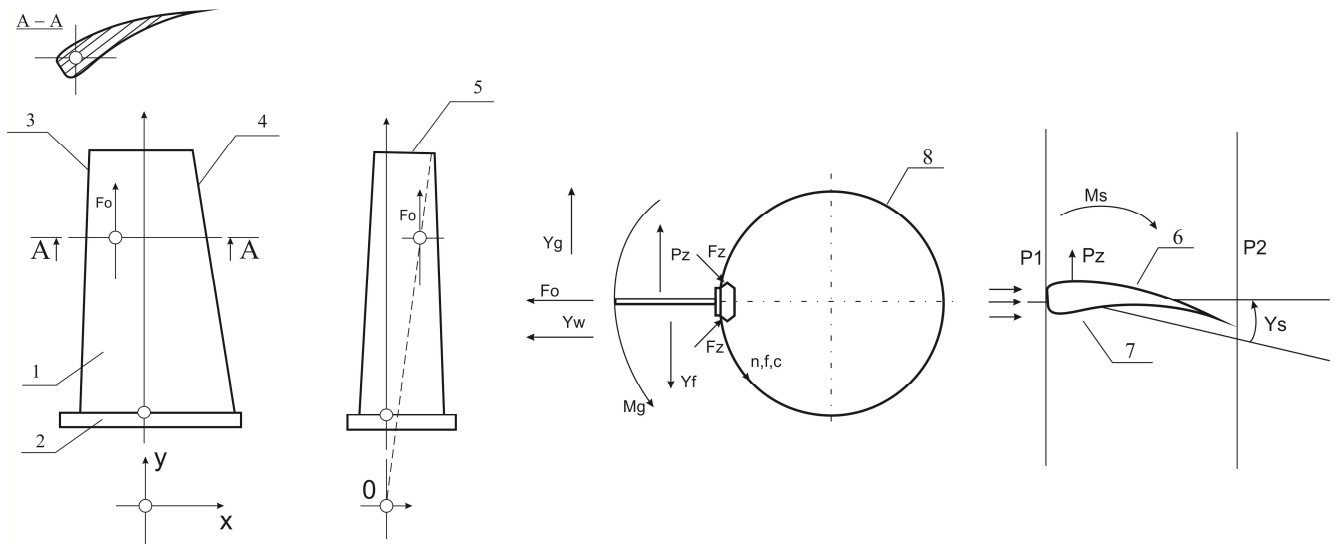
Dlatego można stwierdzić, że dotychczasowe metody oceny stanu technicznego łopatek podczas pracy maszyn wirnikowych nie w pełni realizują podstawową zasadę diagnostyki technicznej nakazującej badanie i analizę stanu

technicznego obiektu w otoczeniu (PN-90/N-04002) i stąd nie są odpowiednio dokładne i wiarygodne.

Stąd pojawiła się potrzeba opracowania nowej metody diagnozowania stanu technicznego łopatkę podczas pracy maszyny wirnikowej z uwzględnieniem otoczenia, ale (jeśli to możliwe) bez konieczności wykorzystywania pomiaru niedostępnych często trudno mierzalnych sygnałów otoczenia. Problem ten rozwiązuje metoda diagnozowania łopatkę bazująca na specjalnym modelu diagnostycznym pozwalającym specjalnymi zabiegami eliminować jej realnie istniejące otoczenie.

## 2. DZIAŁANIE ŁOPATKI W NIEMIERZALNYM OTOCZENIU

Łopatkę, jej budowa i działanie, podczas pracy w zmiennym otoczeniu (Lindstedt i inni, 2009; Skubaczewskij, 1974) przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Łopatkę maszyny wirnikowej w zmiennym otoczeniu

1 – pióro łopatkę; 2 – zamek łopatkę; 3 – krawędź spływu; 4 – krawędź natarcia; 5 – wierzchołek łopatkę; 6 – grzbiet łopatkę; 7 – korytkę łopatkę; 8 – bęben wirnika;  $F_0$  – siła odśrodkowa;  $F_z$  – siła zacisku zamka;  $n$  – prędkość obrotowa;  $P_z$  – aerodynamiczna siła nośna łopatkę;  $P_x$  – siła oporu;  $M_s$  – moment skręcający;  $M_g$  – moment zginający;  $P_1$  – ciśnienie gazu na wejściu wieńca wirnika;  $P_2$  – ciśnienie gazu na wyjściu wieńca wirnika;  $Y_g$  – ugięcie łopatkę;  $Y_s$  – kąt skręcania łopatkę;  $Y_w$  – przemieszczenie wzdłużne łopatkę;  $Y_f$  – sygnał różnych postaci drgań (zginające, skręcające, wzdłużne);  $Y_c$  – odkształcenie cieplne;  $f$  – sygnał drgań;  $f_{ob}$  – sygnał drgań obudowy;  $c$  – sygnał rozkładu temperatury;

Odształcenia te pochodzą od otoczenia i wywołane są wieloma przyczynami, którymi są:

- obciążenia od sił odśrodkowych  $F_0$  zależnych od prędkości obrotowej wywołujących odkształcenia wzdłużne i zginające (Rys. 1) –  $Y_w, Y_g$
- obciążenia gazodynamiczne  $P_z$  i  $P_x$  od strumienia powietrza (gazu) zależne też od prędkości i wysokości lotu (Rys. 1) –  $Y_s$  (gdy maszyną wirnikową jest sprężarka lub turbiną silnika)
- obciążenia spowodowane lotem samolotu po torach krzywoliniowych (Rys. 1) –  $Y_g, Y_s$
- obciążenia dynamiczne towarzyszące drganiom mechanicznym (zwłaszcza w zakresie rezonansowym) od pulsacji ciśnienia  $P_1$  i  $P_2$ , wahań obrotów itp. (Rys. 2) –  $Y_f$
- drgania łopatkę i obudowy  $f, f_{ob}$  (Rys. 1) i stąd  $Y_g, Y_s$

Łopatkę składa się z dwóch części: roboczej zwanej również profilową – 1 (pióro łopatkę) i części mocującej – 2 (zamka). Dodatkowo w części roboczej wyróżnia się krawędź spływu – 3, krawędź natarcia – 4, wierzchołek – 5, grzbiet – 6, korytkę – 7.

Łopatkę wirnika zamocowane są w tarczy przy pomocy zamków trapezowych zwanych „jaskółczym ogonem”, a szczeliny między zamkami łopatek a wycięciami tarcz wypełnione są żywicą poliestrową. Dla zwiększenia odporności na korozję łopatkę pokryte są emalią epoksydową.

Podczas użytkowania łopatkę zmienia się jej stan techniczny aż do pojawienia się bardzo różnych uszkodzeń (pęknięć, odkształceń, wżerów, urwania fragmentu pióra). (Skubaczewskij, 1974).

Z Rys. 1 i 2 widać, że łopatkę (sprężarki, turbiny) jest obiektem technicznym, o złożonym sposobie działania, który musi być opisany wielowymiarowym stanem odkształcenia łopatkę.

- obciążenia cieplne  $c$  od nierównomiernego rozkładu temperatur (Rys. 2 – odkształcenie złożone np. I – 6) –  $Y_c$ .

Kompleksowo problem ujmując stan działania łopatkę w otoczeniu może być opisany sygnałem przemieszczenia wierzchołka łopatkę  $y(t)$ , który jest wypadkową sygnałów  $Y_w, Y_g, Y_s, Y_f, Y_c$ , (Rys. 1 i Rys. 2):

$$y(t) = f(Y_w, Y_g, Y_s, Y_f, Y_c) \quad (1)$$

oraz sygnałem otoczenia,  $x(t)$  który jest wypadkową sygnałów:  $n, F_0, P_z, P_x, P_1, P_2, f, f_{ob}, c$  (Rys. 1 i Rys. 2):

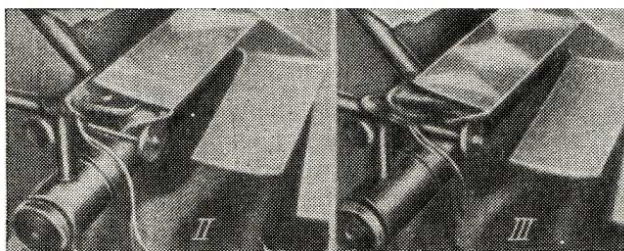
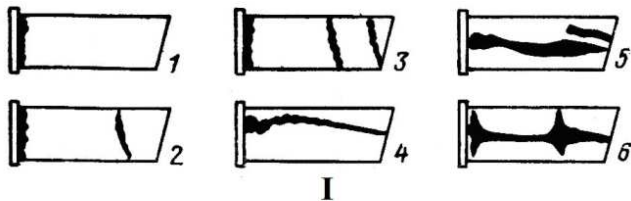
$$x(t) = f(n, F_0, P_z, P_x, P_1, P_2, f, f_{ob}, c) \quad (2)$$

Stan techniczny łopatkę  $S_T(\theta)$  zgodnie z zasadami diagnostyki wynika z relacji między sygnałem działania  $y(t)$

i sygnałem otoczenia  $x(t)$  w chwili aktualnego diagnozowania  $\theta_1$  i chwili początkowego (wzorcowego) diagnozowania  $\theta_0$  (przy czym  $\theta$  to czas przemiany stanu technicznego – ewolucji).

Zatem można zapisać:

$$S_T(\theta) = f(y(t)_{\theta_0}, x(t)_{\theta_0}, y(t)_{\theta_1}, x(t)_{\theta_1}, \theta, t) \quad (3)$$



**Rys. 2.** Formy drgań i linie określające ślady węzłów drgań Schemat I: 1, 2, 3 – pierwsza, druga i trzecia forma drgań zginających; 4 – drgania skręcające pierwszego rodzaju; 5 – drgania skręcające drugiego rodzaju; 6 – złożone drgania zginająco – skręcające. Schemat II: Fotografie śladów węzłów przy drugiej formie drgań zginających. Schemat III: Fotografie śladów węzłów przy trzeciej formie drgań zginających

Praktyka eksploatacyjna wielokrotnie potwierdziła, że istnieją realne trudności w procesie pomiaru sygnałów: zarówno dla  $y(t)$ , a szczególnie  $x(t)$ , a stąd i w ocenie ich stanu technicznego łopatki podczas pracy maszyny. (Kotowski and Lindstedt, 2007; Lindstedt and Kotowski, 2004; Lindstedt et al., 2009).

### 3. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY DIAGNOZOWANIA ŁOPATEK PODCZAS PRACY MASZyny WIRNIKOWEJ

Problem diagnozowania łopatki podczas pracy maszyny wirnikowej jest bardzo złożony gdyż do zrealizowania procesu diagnozowania łopatki dysponuje się tylko jednym mierzalnym i dodatkowo zakłóconym sygnałem  $y(t)$  oraz praktycznie niemierzalnym (oprócz sygnału  $n$  i  $t$  bez  $\Delta n$ ) sygnałem otoczenia  $x(t)$ .

Wstępnie zakłada się, że sygnały  $x(t)$  i  $y(t)$  są przebiegami czasowymi, stochastycznymi i zakłóconymi. W tej sytuacji rozsądnym przedsięwzięciem jest przejście z przestrzeni czasu „ $t$ ” sygnałów  $x(t)$  i  $y(t)$  do przestrzeni czasu „ $\tau$ ” funkcji korelacji  $R_{xx}(\tau), R_{yy}(\tau)$  i  $R_{xy}(\tau)$ .

Efektom takiego podejścia jest:

- odłożenie sygnałów i możliwość ich wzmocnienia
- możliwość prostego wyrażenia sygnałów  $R_{xx}(\tau), R_{yy}(\tau)$  i  $R_{xy}(\tau)$  w postaci funkcji analitycznych, co stwarza sze-

rokie możliwości dalszego przetwarzania tych funkcji na nowe (o szczególnych własnościach) funkcje w przestrzeni częstotliwości ( $\omega$ ), którymi są funkcje gęstości mocy własnej sygnałów  $S_{xx}(\omega)$  i  $S_{yy}(\omega)$  i wzajemnej  $S_{xy}(\omega)$ . Czas obserwacji  $T_{02}$  wierzchołka łopatki dzieli się na dwa podokresy – podokres  $T_{01}$  zbliżania się łopatki do czujnika i podokres  $T_{12}$  oddalania się łopatki od czujnika, chwila  $T_1$  to moment, gdy łopatka znajduje się dokładnie pod czujnikiem.

Wyrażenie funkcji  $x(t)$  i  $y(t)$  w postaci funkcji  $S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$  i  $S_{xy}(\omega)$  pozwoli w bardzo prosty sposób uwzględnić relacje między sygnałami diagnostycznymi  $y(t)$  i sygnałami otoczenia  $x(t)$  dla poszczególnych okresów obserwacji sygnału.

Można, bowiem zapisać:

$$A_{T_{01}}^2 = \frac{S_{yy}^{T_{01}}}{S_{xx}^{T_{01}}} \quad \varphi_{T_{01}} = \text{Arg} \frac{S_{xy}^{T_{01}}}{S_{xx}^{T_{01}}} \quad (4)$$

$$A_{T_{12}}^2 = \frac{S_{yy}^{T_{12}}}{S_{xx}^{T_{12}}} \quad \varphi_{T_{12}} = \text{Arg} \frac{S_{xy}^{T_{12}}}{S_{xx}^{T_{12}}} \quad (5)$$

gdzie:  $A_{T_{01}}^2, \varphi_{T_{01}}^2$  – wzmocnienie amplitudowe i przesunięcie fazowe sygnałów  $x$  i  $y$  w czasie zbliżania się łopatki do czujnika  $T_{01}$ ,  $A_{T_{12}}^2, \varphi_{T_{12}}^2$  – wzmocnienie amplitudowe i przesunięcie fazowe sygnałów  $x$  i  $y$  w czasie oddalania się łopatki od czujnika  $T_{12}$ .

Dalej można założyć, że okres obserwacji sygnałów  $T_{12}$  następuje bardzo krótko (ms) po czasie obserwacji sygnałów  $T_{01}$ .

W takim wypadku można założyć, że:

$$S_{xx}^{T_{12}} = S_{xx}^{T_{01}} \quad (6)$$

Wtedy bazując na wzorach 4, 5 i 6 można otrzymać nową abstrakcyjną ale fizycznie interpretowalną wielkość w postaci ilorazu wzmocnień amplitudowych  $A_{T_{01}}^2$  i  $A_{T_{12}}^2$  oraz przesunięć fazowych  $\varphi_{T_{01}}$  i  $\varphi_{T_{12}}$ :

$$A_{T_{12}, T_{01}}^2 = \frac{A_{T_{12}}^2}{A_{T_{01}}^2} = \frac{\frac{S_{yy}^{T_{12}}}{S_{xx}^{T_{12}}}}{\frac{S_{yy}^{T_{01}}}{S_{xx}^{T_{01}}}} \xrightarrow{S_{xx}^{T_{12}} = S_{xx}^{T_{01}}} \frac{S_{yy}^{T_{12}}}{S_{yy}^{T_{01}}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{T_{12}, T_{01}} &= \varphi_{T_{12}} - \varphi_{T_{01}} = \text{Arg} \frac{\frac{S_{xy}^{T_{12}}}{S_{xx}^{T_{12}}}}{\frac{S_{xy}^{T_{01}}}{S_{xx}^{T_{01}}}} = \text{Arg} \frac{A_{T_{12}} e^{-j\varphi_{T_{12}}}}{A_{T_{01}} e^{-j\varphi_{T_{01}}}} = \\ &= \text{Arg} A_{T_{12}, T_{01}} e^{-j(\varphi_{T_{12}} - \varphi_{T_{01}})} \xrightarrow{S_{xx}^{T_{12}} = S_{xx}^{T_{01}}} \text{Arg} \frac{S_{xy}^{T_{12}}}{S_{xy}^{T_{01}}} \end{aligned} \quad (8)$$

Wyrażenie  $A_{T_{12}, T_{01}}^2$  (7) wiąże sygnały diagnostyczne  $y(t)$  z sygnałami otoczenia  $x(t)$ , zatem jest modelem diagnostycznym. Cechą charakterystyczną tego modelu jest to, że jest wyznaczany tylko na podstawie mierzalnego sygnału  $y(t)$  w krótko po sobie następujących czasach obserwacji

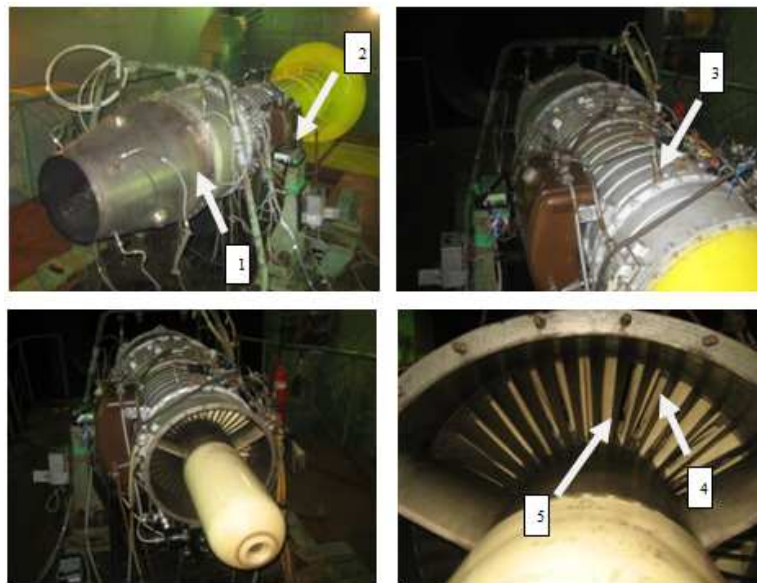
$T_{01}$  i  $T_{12}$  oraz to (co jest najważniejsze), że uwzględnia on otoczenie  $x(t)$  bez konieczności jego pomiaru, a także że sygnał  $y(t)$  został wystarczająco odkłócony (Kotowski i Lindstedt, 2007; Lindstedt i Kotowski, 2004; Lindstedt i inni, 2009).

Wyrażenie  $\varphi_{T_{12}, T_{01}}$  (8) wiąże sygnały diagnostyczne  $y(t)$  z sygnałami otoczenia  $x(t)$ , zatem jest kolejnym modelem diagnostycznym. Jest on tak jak w przypadku modelu  $A^2_{T_{12}, T_{01}}$  wyznaczany bez konieczności pomiaru rzeczywistego sygnału otoczenia  $x(t)$ . Do wyznaczenia sygnałów  $S^{T_{12}}_{xy}$ ,  $S^{T_{01}}_{xy}$  należy wykorzystać dystrybucję w postaci funkcji  $\delta(t, \hat{t})$ . Stąd można łatwo udowodnić, że iloraz funkcji gęstości mocy wzajemnej sygnału  $y$  i sygnału  $x$  jest niewrażliwy na sygnały otoczenia  $x$ , zatem w dostatecznym stopniu eliminuje rzeczywiste otoczenie z modelu  $\varphi_{T_{12}, T_{01}}$  (Bendat i Piersol, 1976; Lindstedt i inni., 2009; Niederliński, 1985; Szabat, 2000).

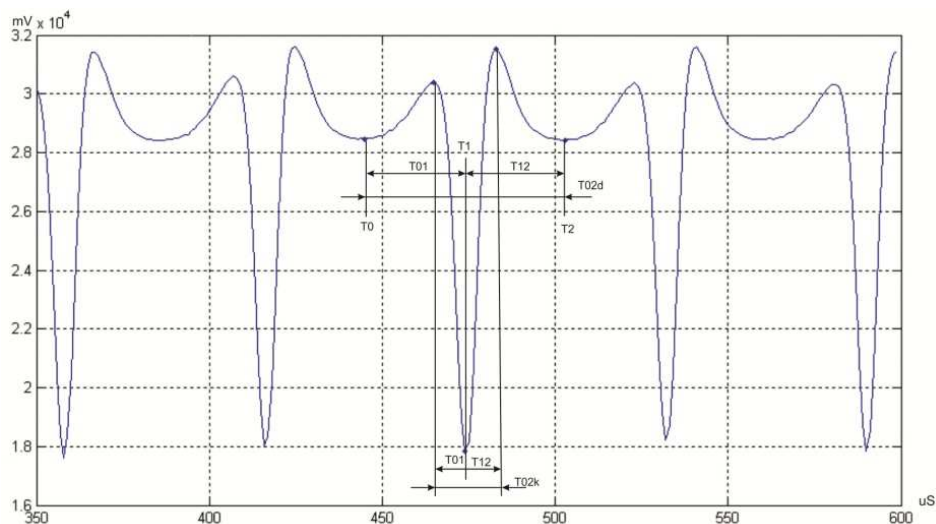
#### 4. SCHEMAT STANOWISKA POMIAROWEGO

Przeprowadzenie badań łopatki zrealizowano na hamowni silników turbinowych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie. Przedmiotem badań są łopatki I stopnia sprężarki osiowej silnika SO-3.

W kadłubie silnika turbinowego montuje się na stałe bezdotkowy czujnik indukcyjny (lub innego typu) (Rys.3) do pomiaru chwilowego położenia wierzchołków łopatek sprężarki w czasie pracy. Sygnał z czujnika rejestrowany jest za pomocą specjalistycznej aparatury i zapisywany w komputerze. Przeprowadzone badania zostały wykonane dla trzech prędkości obrotowych minimalnej wynoszącej 6900 obr/min, normalnej 12600 obr/min i maksymalnej 15600 obr/min.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: 1 – silnik turbinowy SO-3, 2 – urządzenie pomiarowe, 3 – bezdotkowy czujnik indukcyjny, 4 – łopatki sprężarki, 5 – łopatki kierownicze



Rys. 4. Sygnał z czujnika indukcyjnego

$T_{02d}$ ,  $T_{02k}$  – odpowiednio – długi i krótki okres obserwacji przebywania wierzchołka łopatki w strefie czujnika,  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  – charakterystyczne chwile obserwacji wierzchołka łopatki pod czujnikiem,  $T_{01}$ ,  $T_{12}$  – podokresy obserwacji wierzchołka łopatki odpowiednio dla  $T_d$  i  $T_k$ , mV – sygnał przemieszczania wierzchołka łopatki, uS – czas przemieszczania łopatki

**5. METODA OCENY BIEŻĄCEGO STANU TECHNICZNEGO ŁOPATKI NA PODSTAWIE OBSERWACJI PARAMETRÓW MODELU  $A^2_{T_{12},T_{01}}$  I  $\Phi_{T_{12},T_{01}}$ .**

Metoda bieżącej oceny zmian stanu technicznego łopatki maszyny wirnikowej bazująca na obserwacji zmian parametrów modelu  $A^2_{T_{12},T_{01}}$  i  $\Phi_{T_{12},T_{01}}$  wymaga odpowiednich badań diagnostycznych. Zarejestrowany sygnał przemieszczania się wierzchołka łopatki pod czujnikiem przedstawiono na Rys. 4.

Ich zmienną cechą jest to, że ustalony czas obserwacji  $T_{02}$  (o wartości  $T_{02d}$  lub  $T_{02k}$ ), przemieszczania się łopatki  $y(t)$  pod czujnikiem jest odpowiednio dzielony na dwa okresy: zbliżania się łopatki do czujnika  $T_{01}$  i oddalania wierzchołka od czujnika  $T_{12}$  (chwila  $T_1$  odpowiada sytuacji, gdy wierzchołek łopatki znajduje się dokładnie pod czujnikiem – rys.4). Przyjęcie długiego  $T_{02d}$  lub krótkiego  $T_{02k}$  czasu obserwacji łopatki (Rys. 4) wynika z konieczności spełnienia równości (6).

Następnie dla przemieszczenia  $y(t)$  w założonych przedziałach obserwacji  $T_{01}$  i  $T_{12}$  wyznacza się estymaty funkcji autokorelacji  $R^{*T_{01}}_{yy}$  i  $R^{*T_{12}}_{yy}$ , a następnie dopasowuje do nich odpowiednie wyrażenia analityczne (Bendat i Piersol, 1976; Kotowski i Lindstedt, 2007; Kurowski, 1994; Lindstedt i Kotowski, 2004; Lindstedt i inni, 2009; Niederliński, 1985).

Zarejestrowane przebiegi sygnałów zostały przemnożone przez okno Hanninga, następnie obliczona została ich autokorelacja. Otrzymane wykresy autokorelacji zostały przybliżone wielomianem piątego rzędu z dokładnością  $R^2 > 0,997$  opisaną współczynnikiem determinacji.

$$R_{yy}(\tau) = a_1\tau^5 + a_2\tau^4 + a_3\tau^3 + a_4\tau^2 + a_5\tau + a_6 \quad (9)$$

Następnie z otrzymanych analitycznych postaci funkcji korelacji własnych  $R^{T_{01}}_{yy}$  i  $R^{T_{12}}_{yy}$  wyznacza się odpowiadające im funkcje gęstości widmowej mocy  $S^{T_{01}}_{yy}(\omega)$  i  $S^{T_{12}}_{yy}(\omega)$  wykorzystując przekształcenie Fouriera:

$$F\{R_{yy}\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

$$S^{T_{01}}_{yy}(\omega) = F(R^{T_{01}}_{yy}(\tau)) \quad (11)$$

$$S^{T_{12}}_{yy}(\omega) = F(R^{T_{12}}_{yy}(\tau)) \quad (12)$$

Ostatecznie można wyznaczyć nowy abstrakcyjny model diagnostyczny (kwadrat modułu), którego parametry niosą informację o stanie technicznym diagnozowanej łopatki:

$$A^2_{T_{12},T_{01}} = \frac{S^{T_{12}}_{yy}}{S^{T_{01}}_{yy}} = \frac{M_0 + M_1s + M_2s^2 + \dots + M_ns^n}{1 + L_1s + L_2s^2 + \dots + L_ns^n} \quad (13)$$

– różnicę stanu technicznego kolejnych łopatek wyznacza się na podstawie względnych zmian parametrów

$$\Delta\bar{L}_i = \frac{L_{i1} - L_{sr}}{L_{sr}}; i = 1, \dots, n \quad (14)$$

gdzie:  $L_{sr}$  – średnia wartość parametru (wartość wzorcowa, początkowa)

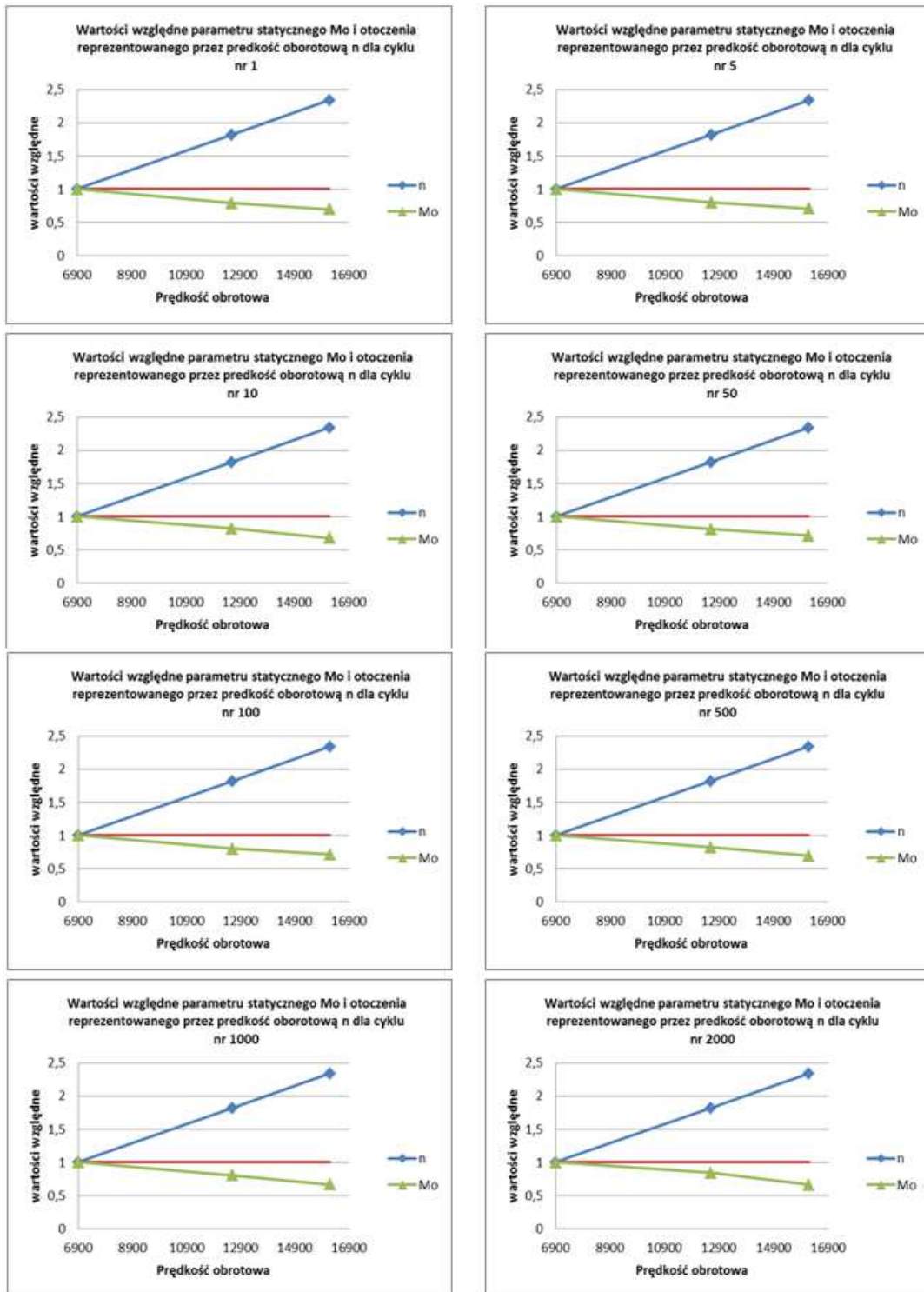
$$\Delta\bar{M}_i = \frac{M_{i1} - M_{sr}}{M_{sr}}; i = 1, \dots, m \quad (15)$$

gdzie:  $M_{sr}$  – średnia wartość parametru (wartość wzorcowa, początkowa)

**Tab. 1.** Wartości średnie i względne parametru statycznego  $M_0$  dla modelu A

Model A – wartości średnie parametru statycznego $M_0$			
	prędkość minimalna	prędkość normalna	prędkość maksymalna
<b>c1</b>	0.8610	0.6813	0.6029
<b>c5</b>	0.8633	0.6899	0.6137
<b>c10</b>	0.8632	0.7099	0.5840
<b>c50</b>	0.8534	0.6902	0.6126
<b>c100</b>	0.8707	0.6953	0.6243
<b>c500</b>	0.8475	0.6963	0.5863
<b>c1000</b>	0.8618	0.6952	0.5756
<b>c2000</b>	0.8610	0.7278	0.5697

Model A – wartości względne parametru statycznego $M_0$			
	prędkość minimalna	prędkość normalna	prędkość maksymalna
<b>c1</b>	1	0.7913	0.7003
<b>c5</b>	1	0.7992	0.7109
<b>c10</b>	1	0.8225	0.6766
<b>c50</b>	1	0.8087	0.7178
<b>c100</b>	1	0.7986	0.7170
<b>c500</b>	1	0.8217	0.6918
<b>c1000</b>	1	0.8067	0.6679
<b>c2000</b>	1	0.8454	0.6617



Rys. 5. Wartości względne parametru statycznego  $M_0$  i otoczenia reprezentowanego przez prędkość obrotową dla różnych cykli dla modelu A

Analogicznie obliczenia przeprowadza się dla modelu  $\varphi_{T12,T01}$  (Lindstedt i Grądzki, 2010), z tym że zakłada się, że otoczenie jest np. szumem  $\delta(t, \hat{t})$  o dużej mocy i że może on być skorelowany z sygnałem  $y(t)$ . W ten sposób otrzymujemy nowy abstrakcyjny model diagnostyczny (różnicy przesunięć fazowych) którego parametry niosą informację o stanie technicznym diagnozowanej łopatką:

$$\varphi_{T12,T01} = \text{Arg} \frac{S_{xy}^{T12}}{S_{xy}^{T01}} = \text{Arg} \frac{B_0 + B_1s + B_2s^2 + \dots + B_ns^n}{1 + A_1s + A_2s^2 + \dots + A_ns^n} \quad (16)$$

– zmianę stanu technicznego wyznacza się na podstawie względnych zmian parametrów

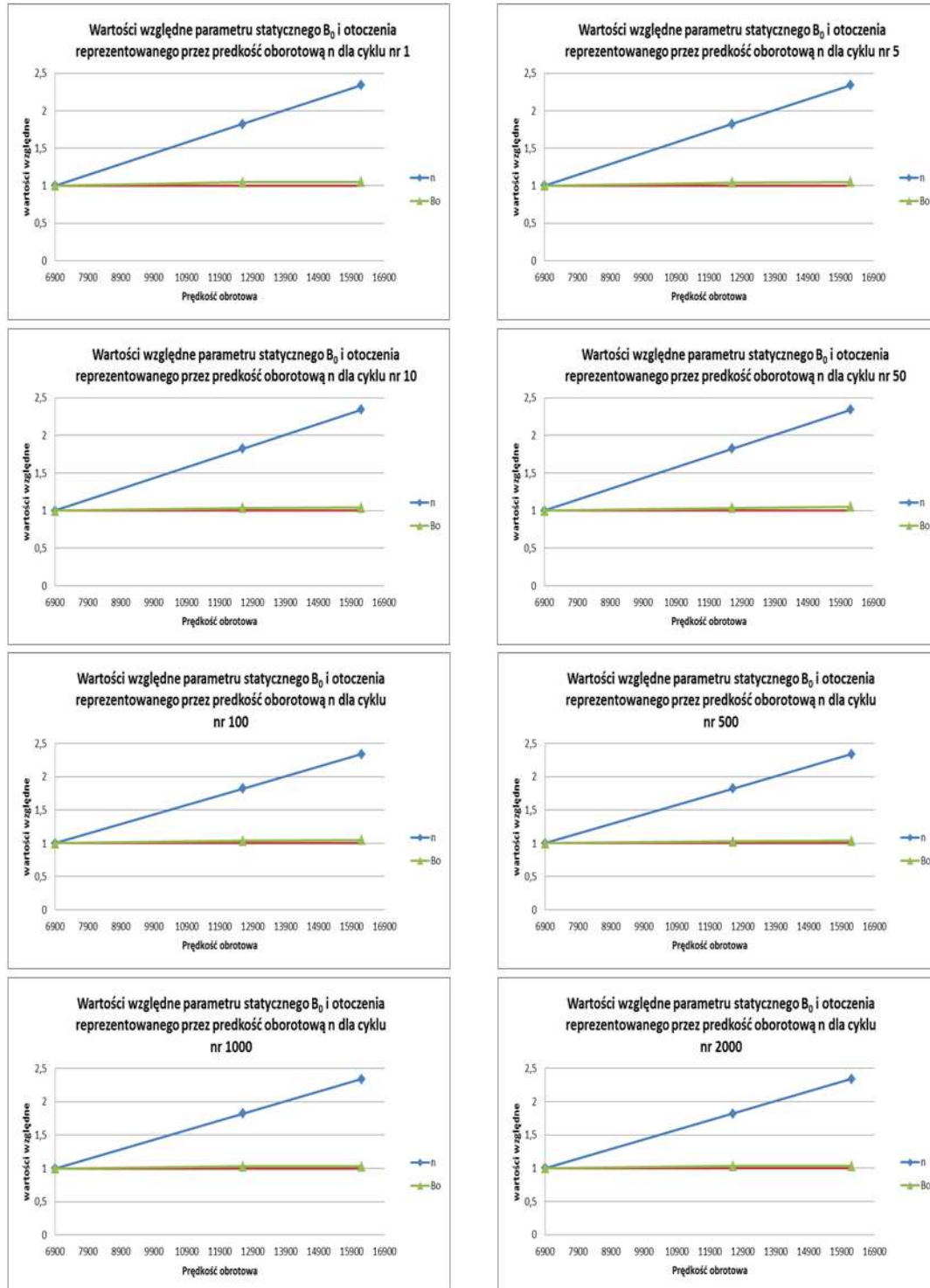
$$\Delta \bar{B}_i = \frac{B_{i1} - B_{sr}}{B_{sr}}; i = 1, \dots, n \quad (17)$$

gdzie:  $B_{sr}$  – średnia wartość parametru (wartość wzorcowa, początkowa)

$$\Delta \bar{A}_i = \frac{A_{i1} - A_{sr}}{A_{sr}}; i = 1, \dots, m \quad (18)$$

gdzie:  $A_{sr}$  – średnia wartość parametru (wartość wzorcowa, początkowa)

Z obu modeli diagnostycznych  $A_{T12, T01}^2$  i  $\varphi_{T12, T01}$  do dalszych wstępnych analiz brana jest pod uwagę wartość średnia parametru statycznego  $M_0$  i  $B_0$  (nawiązującego do odpowiednich charakterystyk statycznych) dla różnych cykli przy różnych prędkościach obrotowych (Tab. 1 i 2). Wartości względne otrzymuje się przyjmując za wartość odniesienia wartość prędkości minimalnej i wartość parametru dla prędkości minimalnej.



**Rys. 6.** Wartości względne parametru statycznego  $B_0$  i otoczenia reprezentowanego przez prędkość obrotową dla różnych cykli dla modelu  $\varphi$

Tab. 2. Wartości średnie i względne parametru statycznego  $B_0$  dla modelu  $\varphi$ 

Model $\varphi$ – wartości średnie parametru statycznego $B_0$			
	prędkość minimalna	prędkość normalna	prędkość maksymalna
<b>c1</b>	1.0208	1.0538	1.0703
<b>c5</b>	1.0216	1.0563	1.0739
<b>c10</b>	1.0215	1.0637	1.0636
<b>c50</b>	1.0179	1.0567	1.0735
<b>c100</b>	1.0233	1.0584	1.0776
<b>c500</b>	1.0132	1.0583	1.0657
<b>c1000</b>	1.0158	1.0573	1.0616
<b>c2000</b>	1.0144	1.0676	1.0616

Model $\varphi$ – wartości względne parametru statycznego $B_0$			
	prędkość minimalna	prędkość normalna	prędkość maksymalna
<b>c1</b>	1	1.0324	1.0485
<b>c5</b>	1	1.0340	1.0513
<b>c10</b>	1	1.0414	1.0413
<b>c50</b>	1	1.0381	1.0546
<b>c100</b>	1	1.0343	1.0531
<b>c500</b>	1	1.0445	1.0518
<b>c1000</b>	1	1.0408	1.0451
<b>c2000</b>	1	1.0524	1.0465

Na podstawie analizy wykresów przedstawionych na Rys. 5 stwierdza się, że dla dużej zmiany prędkości obrotowej (otoczenia) od wartości  $1 \div 2,34$  zaistniała mała zmiana statycznego parametru diagnostycznego  $M_0$  od wartości  $1 \div 0,7$ . Zatem parametr diagnostyczny  $M_0$  jest mało wrażliwy na otoczenie.

Na podstawie analizy wykresów przedstawionych na Rys. 6 stwierdza się, że dla dużej zmiany prędkości obrotowej (otoczenia) od wartości  $1 \div 2,34$  zaistniała bardzo mała zmiana statycznego parametru diagnostycznego  $B_0$  od wartości  $1 \div 1,05$ . Zatem parametr diagnostyczny  $B_0$  jest nie wrażliwy na otoczenie.

## 6. WNIOSKI

Metoda monitorowania stanu technicznego łopatki bazuje na modelach diagnostycznych w postaci ilorazu wzmacnień amplitudowych i różnicy przesunięć fazowych sygnału wyjściowego  $y(t)$  do sygnału otoczenia  $x(t)$  dla czasu obserwacji  $T_{01}$  i  $T_{12}$ . Metoda ta polega na tym, że czas  $T_{02}$  (Rys. 4) przemieszczenia się wierzchołka łopatki  $y(t)$  w strefie czujnika dzielony jest na dwa przedziały: zbliżanie się wierzchołka łopatki do czujnika  $T_{01}$  i oddalenie się wierzchołka łopatki od czujnika  $T_{12}$ .

Okresy  $T_{01}$  i  $T_{12}$  obserwacji sygnału  $y(t)$  są położone względem siebie tak blisko, że otoczenie  $x(t)$  dla tych okresów obserwacji sygnałów  $y(t)$  można uważać za identyczne.

Cechą charakterystyczną modeli  $A^2_{T12,T01}$  i  $\varphi_{T12,T01}$  jest to, że nie wymagają one pomiaru sygnałów otoczenia, chociaż pośrednio jest ono uwzględnione specjalnie zorganizowanymi badaniami diagnostycznymi (dwa okresy obserwacji, wyznaczenie modelu diagnostycznego jako ilorazu modeli diagnostycznych wiążących sygnały diagnostyczne i otoczenia z parametrami stanu technicznego).

Parametry modeli  $A^2_{T12,T01}$  i  $\varphi_{T12,T01}$  są niewrażliwe na zmienne, trudnomierzalne otoczenie zatem nastąpiła jego eliminacja.

## LITERATURA

1. **Bendat J. S., Piersol A. G.** (1976), *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa.
2. **Bovishanskii K. N.** (2000), A method for continuously monitoring the vibrational state of the rotating blades of turbomachines, *Thermal engineering (Teplonegetika)*, Vol 47 No 5, St. Petersburg.
3. **Dołgolienko G. P.** (1984), *Lietczyje ispytaniya spienialnykh ustrojstw i sistiem samolietow i wiertolietow Maszinostrozeniye*, Moskwa.
4. **Duan F., Fang Z., Sun Y., Ye S.** (2005), Real-time vibration measurement technique based on tip-timing for rotating blades, *Opto-Electronic Engineering*, 30 (1) 29-31.
5. **von Flotow A., Mercadal H.** (2000), *Turbine rotor health management with blade-tip sensors*, From Laboratory Tool To Fielded System.
6. **High Cycle Fatigue S & program 1997** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
7. **High Cycle Fatigue S & program 1998** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
8. **High Cycle Fatigue S & program 1999** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
9. **High Cycle Fatigue S & program 2000** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
10. **High Cycle Fatigue S & program 2001** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
11. **High Cycle Fatigue S & program 2002** Annual Report <http://stimet.dtic.mil>
12. **Klein B.** (2004), Non-Contact Vibration measurements Turbocharges Turbine and Compressor Blades, *Proceedings of 1<sup>st</sup> EVI-GTI International Conference on Gas Turbine Instrumentation*, Barcelona.



13. **Kotowski A., Lindstedt P.** (2007), The using of signals of impulse acoustic response in test of rotor blades in stationary conditions, *The International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery ISCORMA 4*, Calgary Alberta Canada.
14. **Kurowski W.** (1994), *Podstawy teoretyczne komputerowego miernictwa systemów mechanicznych*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok.
15. **Lindstedt P.** (2002), *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstaw*, Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa.
16. **Lindstedt P., Grądzki R.** (2010), Parametrical models of working rotor machine blade diagnostics with its unmeasurable environment elimination, *Acta Mechanica et Automatica*, 56÷63, Białystok.
17. **Lindstedt P., Kotowski A.** (2004), Basic for innovations in vibroacoustic diagnostics of transport machines rotor blades, *The Archives of Transport*, Vd XVI. No 4.
18. **Lindstedt P., Rokicki E., Borowczyk H., Majewski P.** (2009), Application of the correlation function and Fourier transformation to evaluation of technical condition demonstrated by blade of a rotor machine during the operation process, *Journal of KONES Powertrain and transport*, Vol 16 No 2, Warsaw.
19. **Lindstedt P., Rokicki E., Borowczyk H., Majewski P.** (2009), Rotor blades condition monitoring method based on the elimination of the environment signal, *Research Works of AFIT Issue*, 15÷24, Warsaw.
20. **Niederliński A.** (1985), *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej T2 Zastosowania*, WNT, Warszawa.
21. **Roberts J. P.** (2007), Comparison of Tip Timing with strain Gages for rotor blade vibration measurement, *Proceedings of lecture series on Tip Timing and Tip Clearance Problems in Turbomachines von Belgium*.
22. **Skubaczewskij G. S.** (1974), *Авиационные газотурбинные двигатели* Maszynostrojenije, Moskwa.
23. **Szabatın J.** (2000), *Podstawy teorii sygnałów*, WKŁ Warszawa.
24. **Szczepanik R., Przysowa R.** (2004), *Wykonanie badań i pomiarów drgań łopatek metodą bezstykową w odwirowni ALSTOM Power w Elblągu*, Sprawozdanie ITWL nr 36/3/2004 Warszawa.
25. **Szczepanik R.** (1999), *Ocena propagacji pęknięć zmęczeniowych w wirujących łopatkach sprężarki turbinowego silnika lotniczego*, Książka Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej T4, Wyd. ITWL, Warszawa.
26. **Zieliński M., Ziller G.** (2005), Non-contact Blade Vibration Measurement system for aero engine application, *17<sup>th</sup> International Symposium on Airbreathing Engines*, September 4-9 2005 Munich Germany Paper No ISABE – 2005-1220.

#### CHANGES THE ENVIRONMENT REPRESENTED BY ROTATING SPEED FOR MODELS PARAMETERS IN DIAGNOSE WORKING TURBOMACHINE BLADE WITH ELIMINATION OF ITS DISTRIBUTED ENVIRONMENT

**Abstract:** This paper presents how changing the environment affects changes for models parameters  $A_{T12,T01}^2$  and  $\varphi_{T12,T01}$  which are used in new method of monitoring technical condition of turbomachine blades during their operation. This method utilizes special diagnostic models such as a quotient of amplitude amplification and a phase shift of a diagnostic signal  $y(t)$  which is a result of blade operation as well as a signal  $x(t)$  of blade environment while a blade tip approaches a sensor ( $A_{T01}^2$ ), amplitude amplification and phase shift ( $\varphi_{T12} - \varphi_{T01}$ ) of these signals while the blade tip moves away from the sensor ( $A_{T12}^2$ ). The adopted diagnostic models indirectly take into account the existing environment of a blade, represented by the signal  $x(t)$ , without the need to measure it. Therefore, these methods are not so sensitive to the changes in environment, and practically very sensitive only for changes in technical condition of blades. The suggested method may prove very important role in diagnostics of rotor blades during turbomachines operation (compressors, turbines etc.).

Prace wykonano w ramach realizacji prac własnych: Paweł Lindstedt nr W/WM/4/2009, Rafał Grądzki nr W/WM/10/2011 na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej.