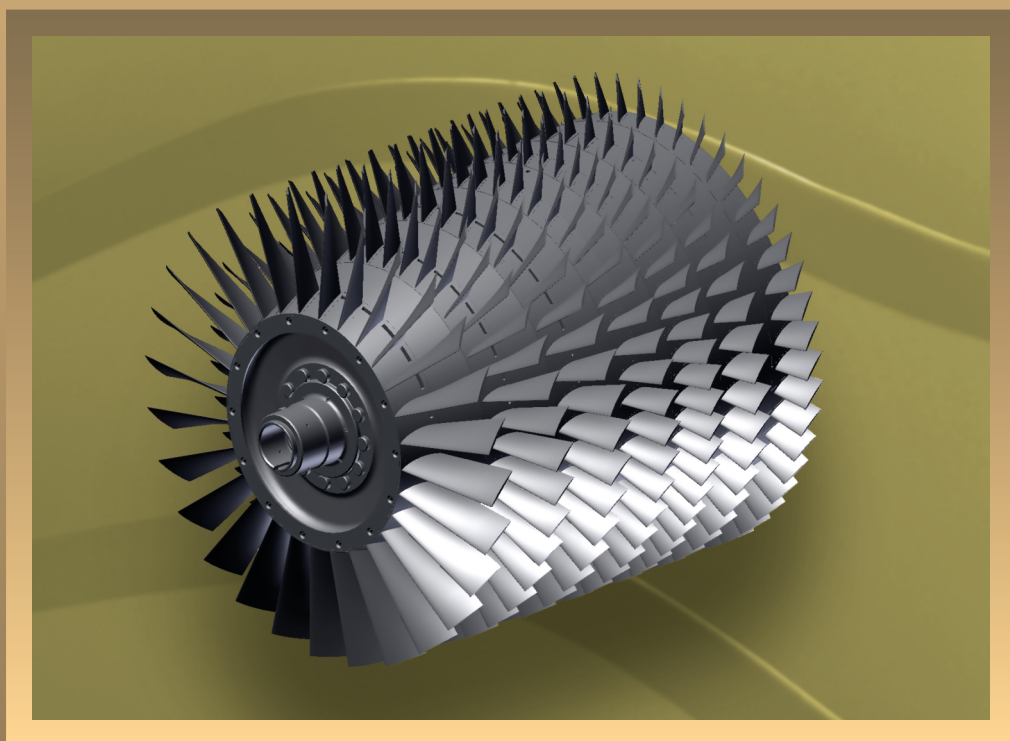


RADOSŁAW PRZYSOWA

Metody estymacji parametrów drgań łopatek sprężarki osiowej



INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH

Radosław Przysowa

Metody estymacji parametrów drgań łopatek sprężarki osiowej



WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

WARSZAWA 2018

OPINIODAWCY

prof. dr hab. inż. Romuald RZĄDKOWSKI
dr hab. inż. Mirosław KOWALSKI, prof. ITWL

REDAKCJA TECHNICZNA

mgr inż. Krzysztof BUBRZYK

ADIUSTACJA I KOREKTA

mgr Magdalena MALCZEWSKA

ŁAMANIE TEKSTU

Piotr TARASIEWICZ

PROJEKT OKŁADKI

Piotr TARASIEWICZ

Projekt był finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (NCN)
na podstawie decyzji DEC-2011/01 / D / ST8 / 07612

© Copyright by Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, wyd. I, 2018 r.

ISBN 978-83-61021-26-1

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH
01-494 Warszawa 46, skr. poczt. 96, ul. Księcia Bolesława 6

Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

SPIS TREŚCI

WYKAZ TERMINÓW I SKRÓTÓW	5
PRZEDMOWA.....	9
Rozdział 1. BEZDOTYKOWE POMIARY DRGAŃ ŁOPATEK	11
1.1. Metoda pomiarowa.....	11
1.1.1. Wprowadzenie	11
1.1.2. Przygotowanie eksperymentu.....	13
1.1.3. Liczba i rozłożenie czujników	13
1.1.4. Numeracja łopatek	14
1.2. Układ pomiarowy.....	14
1.2.1. System akwizycji danych.....	15
1.2.2. Struktura danych.....	16
1.2.3. Cyfrowa dyskryminacja fazy	16
1.3. Wyrównywanie sygnałów czujników	17
1.3.1. Weryfikacja wyrównania czujników	18
1.3.2. Przykład wyrównywania.....	20
1.4. Metody monitorowania i wizualizacji drgań łopatek.....	25
1.4.1. Analiza drgań łopatek on-line.....	27
1.4.2. Ocena stanu technicznego łopatek.....	27
1.4.3. Raportowanie	27
1.4.4. Oprogramowanie	28
Rozdział 2. INTELIGENTNE UKŁADY WYZWALANIA.....	31
2.1. Pomiar czasu przyjscia.....	31
2.1.1. Wprowadzenie	31
2.1.2. Błędy wyzwiania.....	32
2.1.3. Rozwiązania sprzętowe.....	35
2.1.4. Układy FPGA	37
2.2. Programowy detektor fazy	38
2.2.1. Założenia.....	38
2.2.2. Koncepcja	38
2.2.3. Implementacja.....	40

2.3. Weryfikacja.....	40
2.3.1. Testy sygnałem symulowanym.....	40
2.3.2. Testy modulowanym sygnałem sinusoidalnym	42
2.3.3. Testy sygnałem rzeczywistym	43
2.3.4. Przetwarzanie zapisu próby silnika.....	45
Rozdział 3. METODY ANALIZY DRGAŃ ŁOPATEK.....	47
3.1. Drgania wymuszone pojedynczych łopatek.....	47
3.1.1. Drgania synchroniczne	49
3.2. Obwodowe dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów	51
3.2.1. Regresja liniowa	53
3.2.2. Dopasowanie funkcji sinus	54
3.2.3. Symulacja numeryczna	55
3.3. Analiza danych pomiarowych.....	58
3.3.1. Wyznaczanie rzędowości rezonansów.....	59
3.3.2. Estymacja parametrów drgań.....	61
3.3.3. Widmo pojedynczych łopatek	63
3.3.4. Widmo wszystkich łopatek	64
Rozdział 4. PRZYGOTOWANIE POMIARÓW DRGAŃ	67
4.1. Wprowadzenie	67
4.2. Czujniki drgań łopatek	69
4.2.1. Rozstawienie czujników	69
4.2.2. Montaż czujników na silniku odrzutowym.....	70
4.3. System akwizycji danych.....	72
4.4. Wizualizacja sygnału od łopatek.....	74
4.5. Program prób silnika odrzutowego	76
Rozdział 5. WYBRANE WYNIKI ANALIZY DRGAŃ	81
5.1. Dopasowanie wybranych rezonansów	81
5.2. Analiza drgań łopatek I stopnia sprężarki	84
5.3. Drgania asynchroniczne	91
5.4. Drgania łopatek II stopnia sprężarki	93
PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	101
LITERATURA	103

WYKAZ TERMINÓW I SKRÓTÓW

0-pk	amplituda właściwa <i>peak amplitude</i>
<i>aliasing</i>	nieodwracalne zniekształcenie sygnału w wyniku próbkowania
<i>alignment</i>	wyrównywanie
A	amplituda <i>amplitude</i>
<i>arm level</i>	próg uzbrajania
AI	wejście analogowe <i>analog input</i>
ASIC	specjalizowany układ scalony <i>application specific integrated circuit</i>
BHM	monitorowanie stanu technicznego łopatek <i>blade health monitoring</i>
BTT	metoda bezdotykowa, metoda dyskretno-fazowa <i>blade tip-timing</i>
CFD	obliczeniowa mechanika płynów <i>computational fluid dynamics</i>
ctr	licznik <i>counter</i>
DC	składowa stała sygnału <i>direct current</i>
DFT	dyskretna transformata Fouriera <i>discrete Fourier transform</i>
EHM	monitorowanie stanu technicznego silnika <i>engine health monitoring</i>
EO	rzędowość – krotność prędkości obrotowej silnika <i>engine order</i>
FEM	metoda elementów skończonych (MES) <i>finite element method</i>
FFT	szybka transformata Fouriera <i>fast fourier Transform</i>

<i>fitting</i>	dopasowanie krzywej, aproksymacja
<i>flutter</i>	flutter, drgania samowzbudne łopatek
FPGA	bezpośrednio programowalna macierz bramek <i>field-programmable gate array</i>
<i>f</i>	częstotliwość <i>frequency</i>
GUI	graficzny interfejs użytkownika / powłoka graficzna <i>graphical user interface</i>
HCF	zmęczenie wysokocyklowe <i>high cycle fatigue</i>
IC	układ scalony <i>integrated circuit</i>
ITWL	Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
LE	krawędź natarcia <i>leading edge</i>
LS	dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów <i>least-squares method / fitting</i>
M1, M2	pierwsza, druga postać drgań <i>1st, 2nd vibration mode</i>
mod	tu: postać (forma) drgań <i>mode</i>
MR	czujnik magnetorezystancyjny <i>magnetoresistive sensor</i>
nd / ND	liczba średnic węzłowych <i>nodal diameter</i>
NI	National Instruments – dostawca systemów pomiarowych
NSMS	system bezdotykowego pomiaru naprężeń <i>non-contact stress measurement system</i>
OEM	producent oryginalnego wyposażenia <i>original equipment manufacturer</i>
OPR	czujnik raz na obrót <i>one-per-rev</i>
<i>outlier</i>	element odstający

pcm	sposób cyfrowej reprezentacji sygnału analogowego <i>pulse-code modulation</i>
<i>phase</i>	faza
PHM	prognozowanie stanu technicznego i zarządzanie (zdadnością) <i>Prognostics and Health Management</i>
pp	amplituda międzyszczytowa <i>peak-to-peak amplitude</i>
PXI	modułowa platforma akwizycji danych i sterowania PCI eXtensions for Instrumentation
RMS	średnia kwadratowa <i>root mean square</i>
rpm	obr/min (obroty na minutę) – jednostka prędkości obrotowej <i>revolutions per minute</i>
RD-33	typ silnika odrzutowego
RT	układ / system czasu rzeczywistego <i>real time</i>
<i>sampling</i>	próbkowanie sygnału
SDOF	układ o jednym stopniu swobody <i>single degree-of-freedom system</i>
SNDL-1b	sygnalizator nadmiernych drgań łopatek
SPŁ-1b	sygnalizator pęknięć łopatek
SO-3	typ silnika odrzutowego
SSD	dysk półprzewodnikowy <i>solid state drive</i>
<i>stack pattern</i>	wzorzec położenia równowagi łopatek
<i>stall</i>	wirujące strefy oderwań w sprężarce <i>rotating stall</i>
STFT	krótkookresowa transformata Fouriera <i>short time Fourier transform</i>
<i>surge</i>	pompaż sprężarki / silnika
TC	luz wierzchołkowy <i>tip clearance</i>
TE	krawędź spływu <i>trailing edge</i>

<i>threshold</i>	próg (alarmowy, uzbrajania)
<i>tip-timing</i>	metoda bezdotykowa, metoda dyskretno-fazowa
TOA	czas przyjscia (łopatki pod czujnik) <i>time-of-arrival</i>
<i>triggering</i>	wyzwalanie
TTL	klasa cyfrowych układów scalonych zasilanych napięciem 5V <i>transistor-transistor logic</i>
vi	moduł kodu (podprogram) w systemie programowania LabVIEW <i>Virtual Instrument</i>
VBA	język programowania skryptowego <i>Visual Basic for Applications</i>
VHDL	język opisu architektury układów scalonych <i>Very high speed integrated circuits Hardware Description Language</i>
<i>zeroing</i>	zerowanie

PRZEDMOWA

Przeplływowe maszyny wirnikowe odgrywają bardzo ważną rolę w otaczającej nas przestrzeni. Są szeroko wykorzystywane m.in. w przemyśle ciężkim do napędu maszyn i instalacji, w energetyce do wytwarzania energii elektrycznej oraz w transporcie lotniczym do napędu statków powietrznych. Wzrost ruchu lotniczego i rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną wymusza na zespołach inżynierskich projektujących maszyny wirnikowe zwiększanie ich sprawności i wytrzymałości przy zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa.

Procesy zachodzące podczas pracy silników turbinowych są bardzo złożonymi zjawiskami gazodynamicznymi oraz aerosprężystymi. Interesujące nas procesy związane z drganiami łopatek roboczych sprężarek oraz turbin są niezmiernie trudne do zmierzenia oraz wymagają dużej liczby różnego rodzaju czujników pomiarowych. Dopiero przeprowadzenie badań numerycznych i eksperymentalnych pozwala na poznanie pełnych charakterystyk pracy oraz określenie zakresów roboczych danego obiektu badań.

Pomiary i monitorowanie drgań łopatek roboczych umożliwiają poznanie rzeczywistych wymuszeń i odpowiedzi łopatek, co jest niezbędne w projektowaniu i rozwoju silników i turbin o większej sprawności i trwałości. Pomiary drgań łopatek wykonuje się również przy wprowadzaniu nowych powłok ochronnych do istniejących konstrukcji w celu zapewnienia integralności strukturalnej. Prace takie są prowadzone przez przemysł lotniczy i wytwarzania energii w Polsce i Europie.

W publikacji przedstawiono wybrane wyniki badań dynamiki łopatek wirnikowych metodą bezdotykową. Uzyskane wyniki ułatwiają zrozumienie szczególnych cech sygnałów pomiarowych oraz złożonych właściwości dynamicznych łopatek i drgającej tarczy z łopatkami.

W pracy zaproponowano metodykę planowania i prowadzenia eksperymentu obejmującą procedury zarządzania danymi pomiarowymi i metody analizy drgań. Do określenia czasu przyścia łopatki wykorzystywano algorytmy przetwarzania próbek sygnału działające na komputerze lub matrycy FPGA. Opracowano metody dopasowania odkształceń łopatek do modelu oscylatora harmonicznego. Wykonano estymację parametrów drgań łopatek zarówno podstawowej, jak i drugiej postaci drgań, wykorzystując nowo opracowane modele i narzędzia.

W celu weryfikacji przyjętych modeli oraz opracowanych metod estymacji parametrów drgań wykonano pełen cykl działań związanych z zastosowaniem metody bezdotykowej do pomiaru drgań łopatek roboczych sprężarki osiowej, który obejmował:

- testy algorytmów na danych symulowanych i archiwalnych,
- planowanie przebiegu eksperymentu,

- projektowanie instalacji pomiarowej,
- wykonanie prób silnika odrzutowego,
- wyznaczenie parametrów drgań synchronicznych i asynchronicznych,
- wizualizację i analizę wyników.

Przedstawiona metoda i algorytmy znajdują praktyczne zastosowanie w przemyśle do analizy drgań i oceny stanu technicznego łopatek wirnikowych. Najważniejszymi odbiorcami technologii są operatorzy przepływowych maszyn wirnikowych, tj. turbin, wentylatorów, kompresorów, szczególnie tych z błędami konstrukcyjnymi lub widmem eksploatacji odbiegającym od pierwotnych założeń projektowych. Drugą grupą odbiorców są producenci maszyn wirnikowych, którzy wykorzystują metodę przede wszystkim w procesie badań i rozwoju produktu.

Badania przeprowadzono w ramach projektu 2011/01/D/ST8/07612, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, który dotyczył rozwoju bezdotykowej metody pomiaru drgań łopatek przepływowych maszyn wirnikowych.

BEZDOTYKOWE POMIARY DRGAŃ ŁOPATEK

1.1. Metoda pomiarowa

1.1.1. Wprowadzenie

Zagadnienie określenia rzeczywistych właściwości dynamicznych łopatek jest istotną częścią analizy strukturalnej przepływowych maszyn wirnikowych, niezbędną dla zapewnienia ich trwałości. Wykonywanie pomiarów drgań za pomocą tensometrów lub akcelerometrów wiąże się z trudnością przesyłania informacji z czujników zamocowanych na obracających się łopatkach do urządzeń zbierających, przetwarzających i obrazujących wyniki pomiarów, które mogą znajdować się na korpusie nośnym maszyny lub w pewnej odległości od niej.

Przewagą metod bezdotykowych pomiarów drgań łopatek jest to, że nie wymagają one ingerencji w wewnętrzną strukturę maszyny w celu zabudowy aparatury pomiarowej. W odróżnieniu od pomiarów dotykowych tensometrami lub akcelerometrami, metoda *tip-timing* wykorzystuje standardowo tylko jeden punkt pomiarowy przy każdym przejściu łopatki. Wielkością mierzoną jest czas przyjscia łopatki do umownego punktu pomiarowego (TOA, *time-of-arrival*), określonego przez miejsce montażu i konstrukcję czujnika. Zwykle w celu wyznaczenia TOA stosuje się analogowy układ wyzwiania, który generuje impuls cyfrowy TTL w momencie przejścia zbocza opadającego sygnału czujnika przez zero.

Czas przyjscia może być również wyznaczany przez mikroprocesor lub programowany układ cyfrowy w wyniku numerycznego przetwarzania próbkowanego sygnału z czujnika. Pomiar czasu przyjscia odbywa się raz na obrót wirnika, tak

więc położenia wierzchołków łopatek są próbkowane zbyt rzadko w stosunku do częstotliwości drgań.

Wielkości charakteryzujące drgania łopatek wyznacza się na podstawie odkształceń łopatek w wirującym układzie odniesienia. Układ związany z tarczą jest nieinercyjnym układem odniesienia, w którym występują prędkości unoszenia i przyspieszenia Coriolisa. W analizie drgań łopatek zaniedbuje się te czynniki i dla uproszczenia przyjmuje się, że prędkość wirowania w momencie mijania czujnika się nie zmienia, a wierzchołek łopatki przemieszcza się w kierunku obwodowym. Przejście z układu stacjonarnego opisuje równanie Galileusza:

$$x' = x - vt \quad (1.1)$$

x' – przemieszczenie w układzie wirującym,

x – przemieszczenie w układzie stacjonarnym mierzone wzdłuż wewnętrznej płaszczyzny kanału przepływowego,

$v = \omega r$ – prędkość wirowania,

r – promień wierzchołka łopatki.

W analizie drgań na podstawie pomiarów czasów przyścia łopatek przejście ze stacjonarnego układu odniesienia do wirującego wykonuje się zwykle za pomocą sygnału odniesienia (fazy wirnika).

$$x' = \omega r (t - t_0) \quad (1.2)$$

t – czas przyścia wierzchołka łopatki pod czujnik (TOA),

t_0 – czas fazy wirnika.

W przypadku braku możliwości uzyskania sygnału odniesienia czasy przyścia danej łopatki zmierzone różnymi czujnikami odejmuje się od siebie (metoda różnicowa) [83] albo fazę znacznika t_0 uzyskuje się numerycznie jako średni czas przyścia wszystkich łopatek z danego obrotu.

$$t_0 = \frac{1}{N} \sum t_i \quad (1.3)$$

N – liczba łopatek w wieńcu,

i – numer łopatki.

Różnicę czasu czujnik–czujnik lub czujnik–znacznik przelicza się na długość łuku, czyli chwilowe położenie wierzchołka łopatki na obwodzie. W dalszym kroku analizie podlega tzw. błąd fazy impulsu, równy różnicy zmierzonego i oczekiwanego położenia. Błąd fazy związany jest bezpośrednio z poszukiwanym od-

kształceniem wierzchołka łopatki, a jego składowa szybkozmienna z drganiami łopatki. Sygnał odkształcenia analizuje się na wykresach i dopasowuje się do modelu łopatki w celu estymacji parametrów drgań.

Oczekiwanym wynikiem pomiaru i analizy drgań jest:

- wyznaczenie parametrów drgań pojedynczych łopatek: częstotliwości, amplitudy i fazy;
- identyfikacja rezonansów – określenie formy drgań i rzędowości wymuszenia;
- wskazanie łopatek, których widma drgań odbiegają od pozostałych;
- wyznaczenie parametrów drgań ułopatkowanej tarczy – liczby średnic węzłowych oraz częstotliwości, amplitudy i fazy.

1.1.2. Przygotowanie eksperymentu

Sposób wykonania pomiarów drgań łopatek powinien być szczegółowo planowany. Metodę zbierania i analizy danych pomiarowych należy projektować równoległe z konfiguracją torów pomiarowych i rozmieszczeniem czujników. Przygotowana „strategia przetwarzania danych” wraz z programem lub metodyką badań powinna definiować używane segmenty danych, metody i algorytmy, oprogramowanie i oczekiwane rezultaty oraz wyznaczyć odpowiedzialnych inżynierów. Stosowanie tych zasad jest szczególnie ważne w przypadku metody bezdotykowej, ze względu na dużą wrażliwość uzyskiwanych wyników analizy od przyjętej konfiguracji pomiarowej.

Poniżej przedstawiono założenia do pomiaru i przetwarzania danych z bezdotykowych systemów pomiaru drgań łopatek. Zaproponowano sposób zapisu danych oraz podzielono ich przetwarzanie na etapy, takie jak:

- wyzwalanie,
- odjęcie składowej statycznej,
- dopasowanie do modelu,
- wizualizacja i raportowanie.

Przewidziano udostępnianie i sprawdzanie poprawności wyników cząstkowych. Zaproponowano strukturę oprogramowania do realizacji tych celów i sposób raportowania.

1.1.3. Liczba i rozłożenie czujników

W celu zwiększenia ilości zbieranych danych o ruchu łopatek w czasie każdego obrotu stosuje się kilka czujników na stopień, co umożliwia wyznaczenie parametrów drgań z układu równań ruchu łopatki. Wymagane jest stosowanie $2k + 2$

czujników do analizy k równocześnie występujących postaci drgań (patrz podrozdz. 3.2). Zazwyczaj stosuje się od czterech do dziewięciu czujników.

Każdy czujnik dostarcza ciągu danych o ruchu łopatek w sposób niezależny od innych. Konieczne jest wyrównywanie ich sygnałów (*alignment*), czyli odpowiednie złożenie ciągów czasu przyścia z różnych czujników. Umożliwia to dopasowanie odkształceń mierzonych przez czujniki do modelu i estymację parametrów drgań. Wyrównywanie realizuje się poprzez wprowadzenie opóźnień związanych z różnymi położeniami czujników.

Czujniki zwykle rozmieszczone są na obwodzie niejednostajnie, gdyż wówczas uzyskuje się różne odpowiedzi od wymuszeń synchronicznych. Rozłożenie czujników na obwodzie optymalizuje się do postaci i rzędowości spodziewanych rezonansów synchronicznych, naniesionych na wykres Campbella. Określone rozłożenia uniemożliwiają pomiar rezonansów o pewnej rzędowości (np. dwa czujniki w odstępnie 90° nie widzą odpowiedzi o rzędowości EO4).

Opracowano zatem metody i narzędzia do optymalizacji rozłożenia czujników na podstawie wskaźnika uwarunkowania (*condition number*), dzięki czemu rozwiązanie układu równań jest lepiej uwarunkowane [24]. W analizie należy uwzględnić istniejące strefy, w których fizycznie nie da się zamontować czujników.

Dla wyższych form drgań czujniki w środku cięciwy mogą być nieskuteczne. Do wybrania miejsc z największymi odkształceniami, np. przy krawędzi natarcia, w środku cięciwy, wykorzystuje się wyniki analizy modalnej. Dla wybranej konfiguracji czujników mówi się o ich wrażliwości modalnej [36], tzn. zdolności pomiaru danych form drgań.

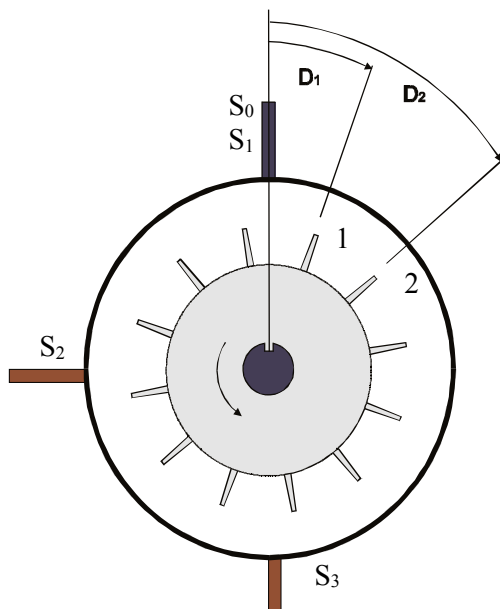
1.1.4. Numeracja łopatek

Łopatkę rozróżnia się (numeruje) na podstawie czasu przyścia względem znacznika na wale. W przypadku braku możliwości zainstalowania w maszynie czujnika fazy wirnika poszczególne łopatki rozróżnia się na podstawie wzorca statycznych położań łopatek na obwodzie (*stack pattern*) lub podziałek międzyłopatkowych uśrednionych dla określonej części zapisu. Obrazuje on naturalne zróżnicowanie właściwości wierzchołków łopatek widzianych przez czujniki. Kolejność łopatek dla każdego zapisu dopasowuje się do wzorcowego rozkładu podziałek.

1.2. Układ pomiarowy

Stosowana aparatura zapewnia synchroniczny pomiar czasów przyścia łopatek z różnych czujników poprzez taktowanie wspólnym zegarem i łączny start liczników. W przykładzie na rys. 1 zastosowano czujnik fazy S_0 , nazywany „raz na

obrót”, jako odniesienie dla danych z trzech czujników drgań łopatek zamontowanych w jednej płaszczyźnie.



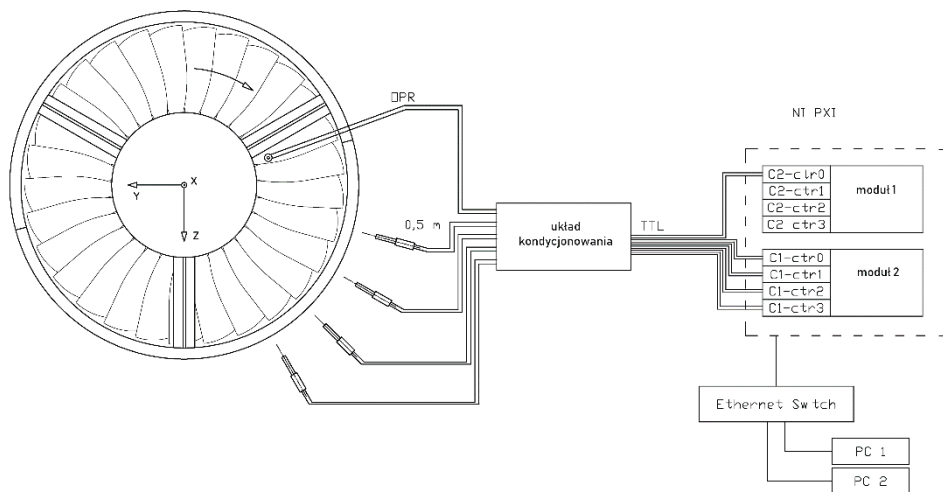
Rys. 1. Przykładowa konfiguracja pomiarowa z czujnikiem fazy i trzema czujnikami drgań

Kąt na obwodzie sprężarki mierzono względem pionu przeciwnie do wskazówek zegara. Czujnik fazy S_0 i czujnik drgań łopatek S_1 zamontowano w jednakowym położeniu kątowym 0° , a kolejne czujniki w następująco: $S_2 = 90^\circ$, $S_3 = 180^\circ$. Czujnik fazy w momencie przedstawionym na rysunku widzi znacznik fazy na wale, a pozostałe czujniki czekają na pojawienie się łopatek. Jest to umowny początek kolejnego obrotu. Łopatki numeruje się w kierunku przeciwnym do obrotu, czyli w kolejności, w jakiej przychodzą do nieruchomego obserwatora.

W praktyce analizuje się również drgania bez sygnału fazy wału, korzystając z różnic w rozłożeniu łopatek na obwodzie do ich identyfikacji.

1.2.1. System akwizycji danych

Dane systemu pomiarowego (rys. 2) będą pobierane przez udostępnianie plików w małej sieci lokalnej i wstępnie przetwarzane przez autorskie oprogramowanie [42, 51] zainstalowane na komputerze klienta PC 1.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego – przykład

1.2.2. Struktura danych

Dane z czujników zapisuje się w oddzielnych plikach w dwóch formatach równocześnie:

- .pcm – jako próbki przebiegów czasowych 16-bit,
- .u32 – czasy przyścia łopatek wyrażone stanem licznika 32-bit, taktowanego zegarem 80 MHz, zawierającego fazę cyfrowych impulsów TTL, wygenerowanych przez analogowy układ wyzwalania.

Kanały pomiarowe są sprzętowo zsynchronizowane ze sobą. Częstotliwość próbkowania jest kilkadziesiąt razy większa od częstotliwości przechodzenia łopatek (np. 500 kHz).

1.2.3. Cyfrowa dyskryminacja fazy

Fazę impulsów generowanych przez łopatki można wyznaczyć programowo na podstawie przetwarzania próbek sygnału czujnika za pomocą cyfrowego dyskryminatora [44]. Czas przyścia (TOA) mierzy się na zboczu opadającym impulsu, wcześniej uzbrajając detektor na zboczu narastającym na określonym poziomie. W ten sposób algorytm działa dla impulsów o określonej amplitudzie, co zabezpiecza przed zakłócaniem wyników przez szum w sygnale wejściowym. Dla impulsów o amplitudzie zależnej od prędkości obrotowej można dostosowywać adaptacyjnie poziom uzbrojenia do wartości np. 50% średniej amplitudy impulsów.

1.3. Wyrównywanie sygnałów czujników

Właściwa synchronizacja danych z różnych czujników jest niezbędna do poprawnego przetwarzania danych od wirujących łopatek i estymacji parametrów drgań. Zaproponowana metoda wyrównywania (*alignment*) wykorzystuje znajomość obwodowych położzeń czujników.

Jeśli założymy, że zmiana prędkości w czasie danego obrotu jest pomijalna, czujnik S_1 zaobserwuje łopatkę 1 po chwili:

$$t_1 = \frac{D_1}{360^\circ} T = \frac{D_1}{360^\circ} \frac{60}{n} \quad (1.4)$$

D_1 – położenie katowe łopatki 1 względem znacznika,

T – okres obrotu,

n – prędkość obrotowa.

Kolejna łopatka (nr 2) dotrze do czujnika po czasie t_2 od początku obrotu, związanym z kątem D_2 jak wyżej.

Czujnik 2 zobaczy łopatkę nr 1 i 2 o 90° , czyli ćwierć obrotu później, a czujnik 3 o 180° , czyli pół obrotu później od czujnika S_1 . Po odjęciu składnika związanego z położeniem czujnika przesuwamy umowny początek obrotu do wybranego czujnika, dzięki czemu można porównywać wyniki czasu przyjscia danej łopatki uzyskane z różnych czujników.

$$t_{ij}^* = t_{ij} - T S_j / 360^\circ \quad (1.5)$$

i – nr łopatki, j – nr czujnika,

S_j – położenie katowe czujnika j względem czujnika fazy,

t_{ij} – czas przyjscia łopatki zmierzony względem znacznika,

t_{ij}^* – czas przyjscia łopatki po wyrównaniu.

Korzystając ze związku czasu przyjscia z kątem (1.4), uzyskujemy chwilowe położenia katowe łopatek D_{ij} odniesione do znacznika na wale:

$$D_{ij} = \frac{t_{ij}}{T} 360^\circ - S_j \quad (1.6)$$

Położenie katowe można wyrazić jako uogólniony numer łopatki d_{ij} , mnożąc kąt przez liczbę łopatek N w danym stopniu:

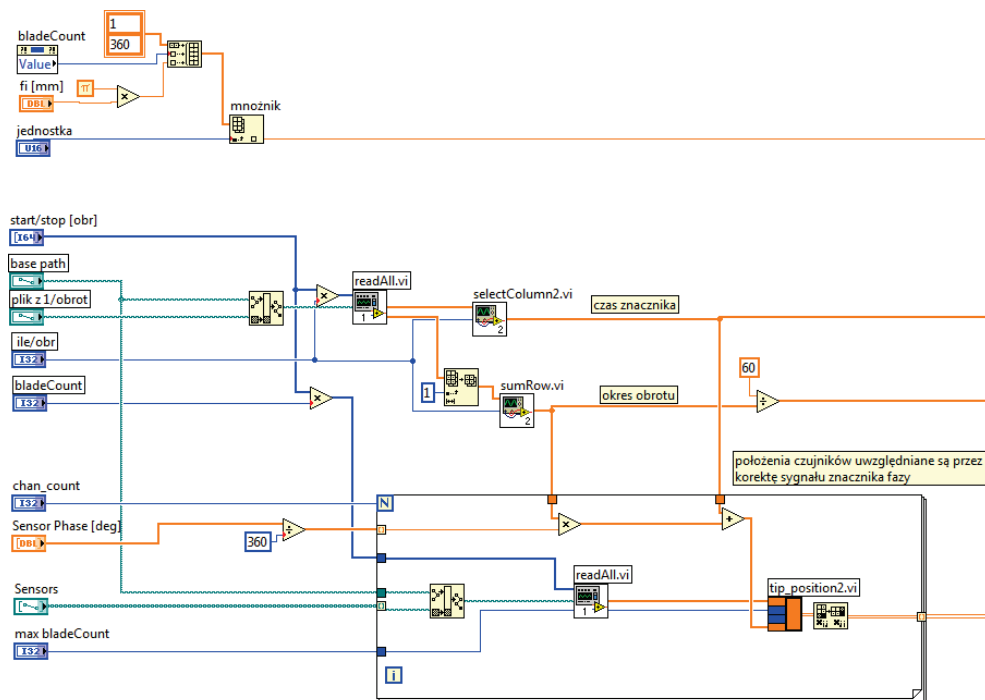
$$d_{ij} = N \frac{D_{ij}}{360^\circ} \quad (1.7)$$

Wówczas część całkowita d_{ij} to numer łopatki, a ułamkowa zawiera wychylenie wierzchołka, które można łatwo wizualizować.

Często w celu pomiaru wyższych postaci drgań stosuje się osiowe przesunięcie wybranego czujnika względem płaszczyzny, w której znajdują się pozostałe czujniki, np. w kierunku splywu. Wyrównuje się go w podobny sposób, uwzględniając dodatkowo opóźnienie wynikające ze skrzywienia profilu łopatek. Opóźnienie to może się zmieniać ze zmianą zakresu pracy maszyny.

Na rys. 3 przedstawiono kod programu w LabVIEW, który realizuje omówioną procedurę wyrównania. Zamiast odejmować opóźnienie czujników od czasów łopatek dodaje się je do czasów przyścia znacznika, co daje identyczny efekt.

W kolejnym kroku procedura `tip_position2.vi` odejmuje od czasów przyścia łopatek czas przyścia znaczników, co pozwala podzielić ciągi czasów przyścia na kolejne obroty i przypisać je konkretnym łopatkom.



Rys. 3. Kod programu do wyrównywania sygnałów z kilku czujników

1.3.1. Weryfikacja wyrównania czujników

Po wyrównaniu dane z różnych czujników powinny być przypisane tym samym łopatkom, a różnica fazy między zapisami powinna być jak najmniejsza.

W praktyce często zdarza się, że położenia czujników są podane niedokładnie lub zamienione są tory pomiarowe, więc zawsze sprawdza się poprawność wyrównania. Zaproponowana metoda opiera się na sprawdzeniu dopasowania wzorca podziałek międzyłopatkowych, co wykorzystuje nierównomierne rozłożenie łopatek na obwodzie.

Podziałka znormalizowana p_i równa jest różnicy czasów przyjscia sąsiednich łopatek odniesionej do okresu obrotu T :

$$p_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{T} \quad (1.8)$$

Po usunięciu składowej szybkozmiennej sekwencja podziałek znormalizowanych nie podlega większym zmianom i jest charakterystyczna dla danego stopnia.

Poprawność numeracji łopatek w danej sekwencji można sprawdzić, porównując ją z wzorcem. Sekwencję podziałek w danym obrocie można potraktować jako punkt w przestrzeni N -wymiarowej.

$$P(p_1, p_2, \dots, p_N) \quad (1.9)$$

Po poprawnym wyrównaniu punkt ten powinien być blisko punktu wzorcowego P' . Odległość punktów (długość odcinka) określa się za pomocą normy (sumy kwadratów):

$$|PP'| = \sum_{i=1}^N (p_i - p'_i)^2 \quad (1.10)$$

Najlepiej porównać ten wynik z odległością od wzorca sekwencji podziałek przesuniętej o jeden:

$$P_2(p_2, p_3, \dots, p_N, p_1) \quad (1.11)$$

a następnie o 2, 3, ... $N-1$.

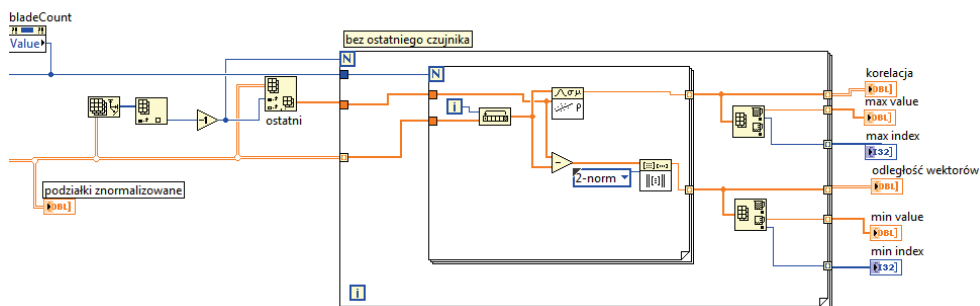
Norma będzie najmniejsza dla sekwencji z właściwą numeracją łopatek.

Podobnie można porównywać punkty P i P' , wyznaczając współczynnik korelacji liniowej Pearsona [8]:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad (1.12)$$

z_x, z_y – współrzędne punktów $P(x_i)$ i $P'(y_i)$ z odjętą wartością średnią i znormalizowane do ich odchylenia standardowego.

Wartość współczynnika korelacji rzędu 0.9 i większa świadczy zwykle o poprawnym wyrównaniu. Rys. 4 przedstawia przykład programu do wyliczenia funkcji korelacji oraz odległości wektorów w funkcji przesunięcia łopatek. Wyznacza on również ekstrema tych funkcji, co można wykorzystać do automatycznego wyrównywania czujników.



Rys. 4. Procedura wyliczania współczynnika korelacji liniowej sekwencji podziałek

1.3.2. Przykład wyrównywania

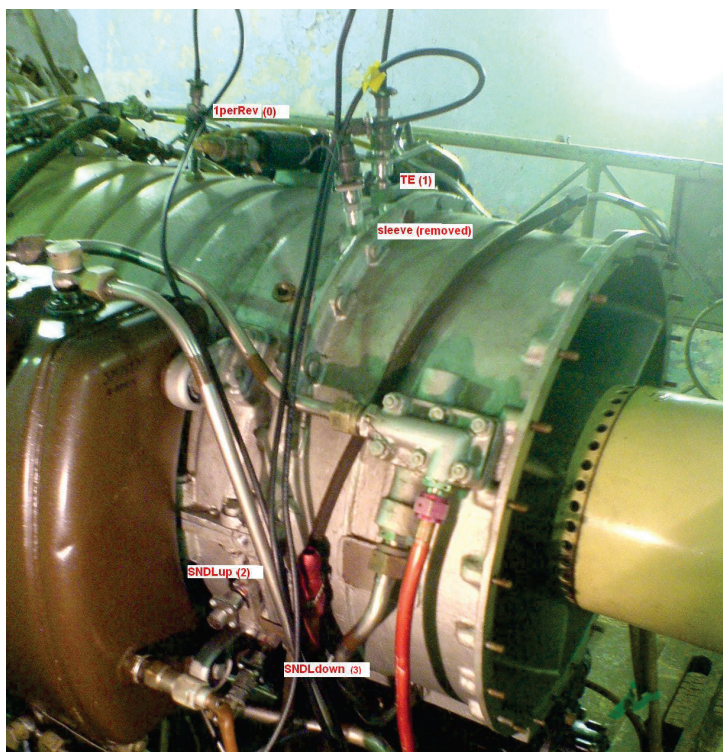
Metodę przetestowano dla zapisów z prób silnika SO-3 wykonanych w marcu 2007 r. [47]. Zastosowano trzy standardowe czujniki SNDŁ-1b oraz jeden przedłużony, który skierowany był w kierunku otworu w bębnie sprężarki i pełnił funkcję czujnika fazy (tab. 1). Dwa czujniki drgań łopatek zamontowano w gniazdach systemu SNDŁ-1b, a jeden obok znacznika fazy z pewnym przesunięciem w kierunku spływu (rys. 5).

Tabela 1

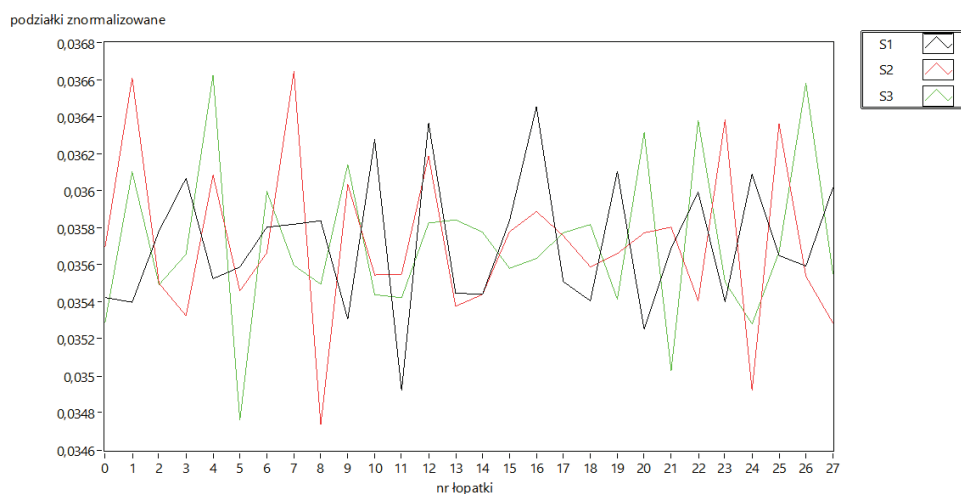
Zestawienie zamontowanych czujników i ich położen obwodowych

Nazwa czujnika	Numer	Położenie (od pionu w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, patrząc w kierunku lotu)*					Numer łopatki widzianej przez czujnik
		kąt [°]	część okręgu	radiany	mm	podziały	
<i>podziałka międzyłopatkowa</i>		12.9	3.57%	0.224	46.5	1.00	
znacznik fazy	0	0.0	0.00%	0.000	0.0	0.00	0.30
TE	1	-1.4	-0.39%	-0.024	-5.1	-0.11	0.41
SNDŁ górny	2	-102.1	-28.36%	-1.782	-368.9	-7.94	8.24
SNDŁ dolny	3	-121.4	-33.72%	-2.119	-438.7	-9.44	9.74

* znak minus oznacza kierunek przeciwny kierunkowi obrotu, czyli zgodny z ruchem wskazówek zegara.



Rys. 5. Czujniki drgań łopatek zamontowane w sprężarce silnika SO-3 (opis w tab. 1)

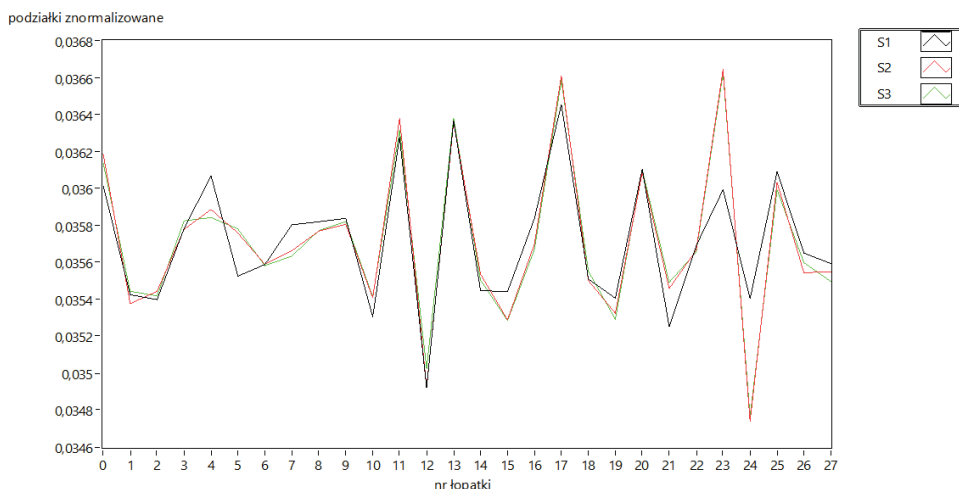


Rys. 6. Rozsynchronizowane położenia równowagi – błędnie wprowadzone położenia czujników

Położenia czujników względem czujnika znacznika wygodnie było mierzyć w kierunku przeciwnym do obrotu i tak początkowo wpisano do programu. Okazało się, że podziałki są zupełnie rozszynchronizowane (rys. 6). Po dodaniu znaku minus do położen kątowych czujników (tab. 1) uzyskano pełną zgodność (rys. 7).

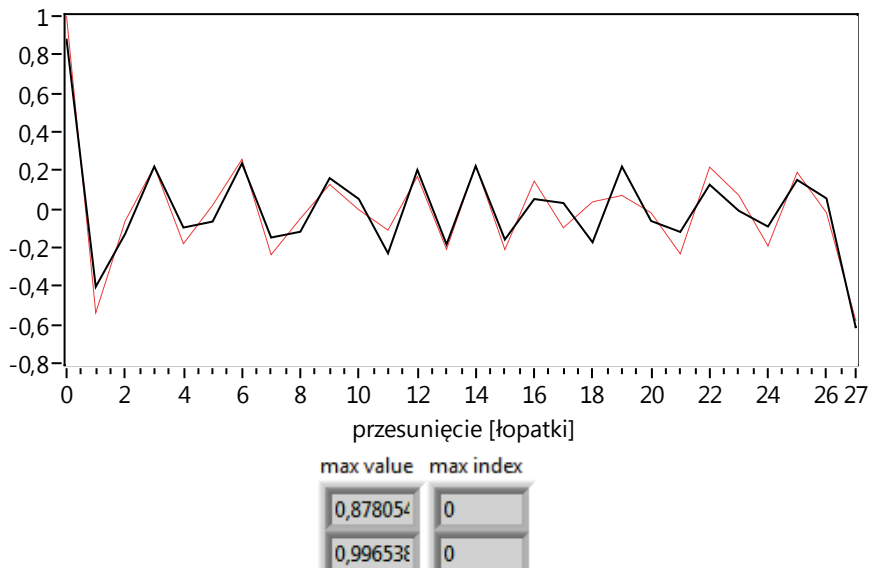
Sprawdzono współczynnik korelacji oraz odległość (sumę kwadratów) sekwencji podziałek czujników pierwszego i drugiego względem trzeciego (rys. 8 i rys. 9). Widoczne jest, że niektóre podziałki z czujnika na krawędzi sływu różnią się od podziałek ze standardowych czujników i dlatego uzyskuje się niższy współczynnik korelacji.

Obie metody weryfikacji wyrównania sygnałów są skuteczne. Wyznaczenie korelacji wymaga większej ilości obliczeń, ale daje obiektywny wynik w procentach. Norma kwadratowa jest łatwa do wyznaczenia i może być stosowana w procedurze automatycznej identyfikacji łopatek.



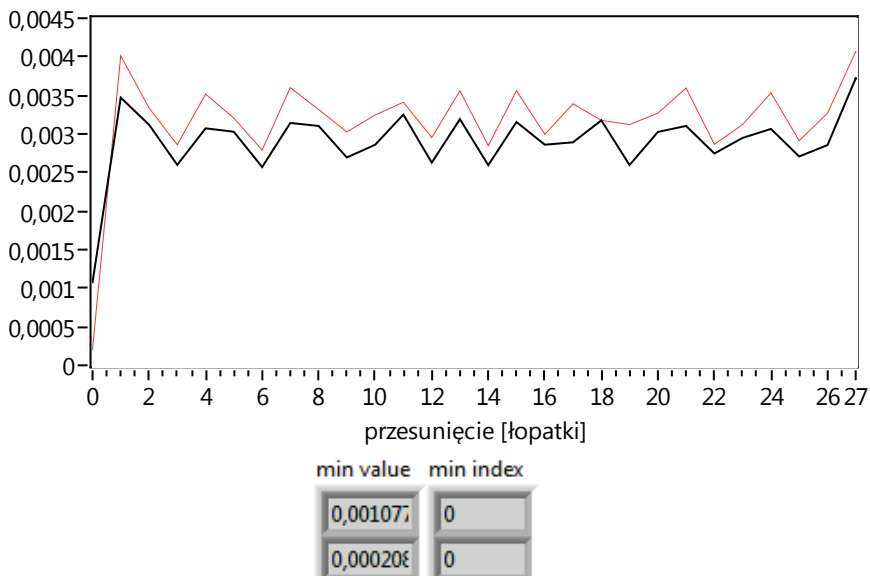
Rys. 7. Położenia równowagi przy poprawnie wyrównanych czujnikach

korelacja

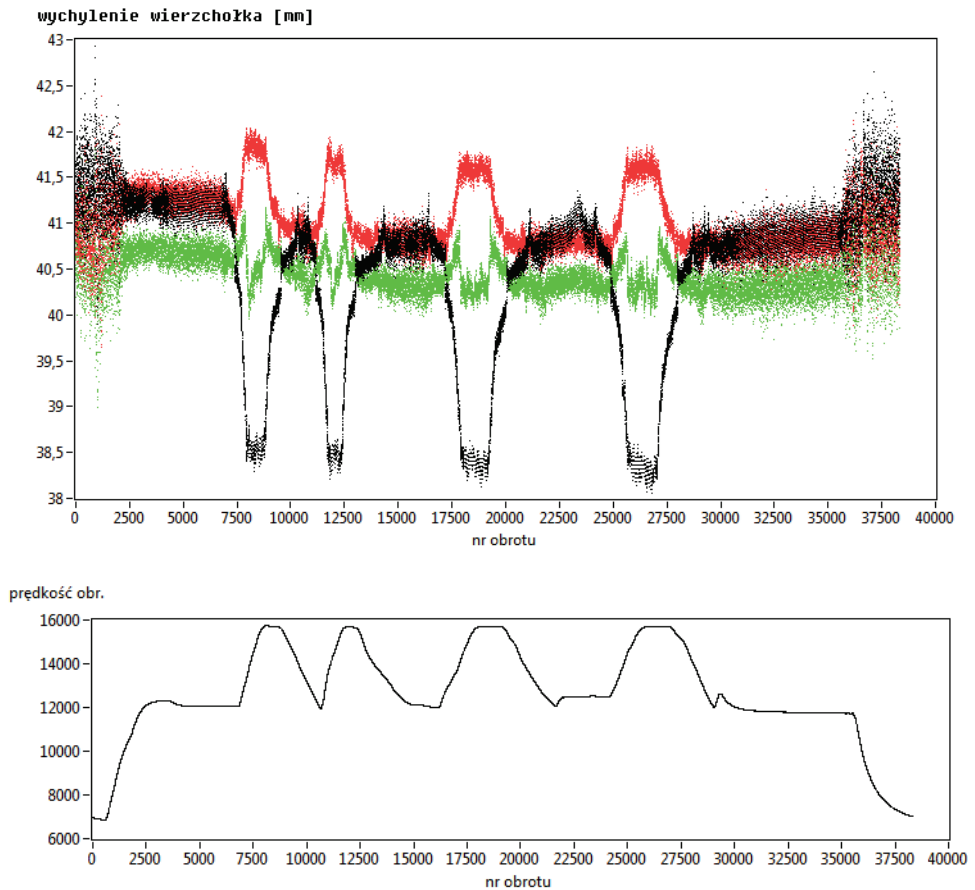


Rys. 8. Funkcja korelacji podziałek czujników 1 i 3 (czarna) oraz 2 i 3 (czerwona)

odległość wektorów



Rys. 9. Odległość sekwencji podziałek dla czujników 1 i 3 (czarna) oraz 2 i 3 (czerwona)



Rys. 10. Wychylenie łopatki nr 1 uzyskane z trzech czujników: zapis test_15-33-28_0; przyjęte opóźnienia: $S_1 = 0,9^\circ$; $S_2 = -114,5^\circ$; $S_3 = -121^\circ$

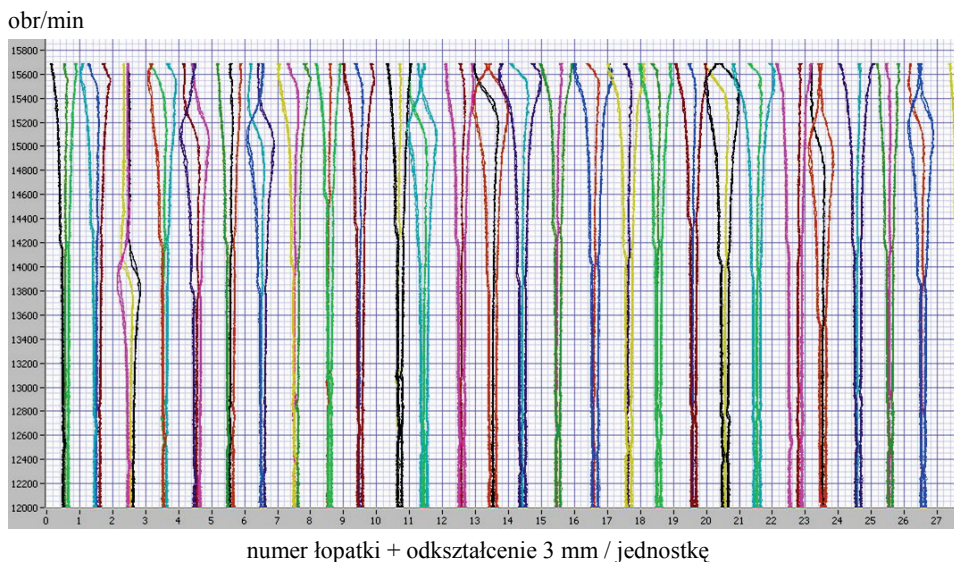
Po poprawnej identyfikacji łopatek sygnały z czujników nadają się do wizualizacji i dalszego przetwarzania. Na rys. 10 przedstawiono przykład odkształceń pierwszej łopatki z trzech czujników po wyrównaniu.

1.4. Metody monitorowania i wizualizacji drgań łopatek

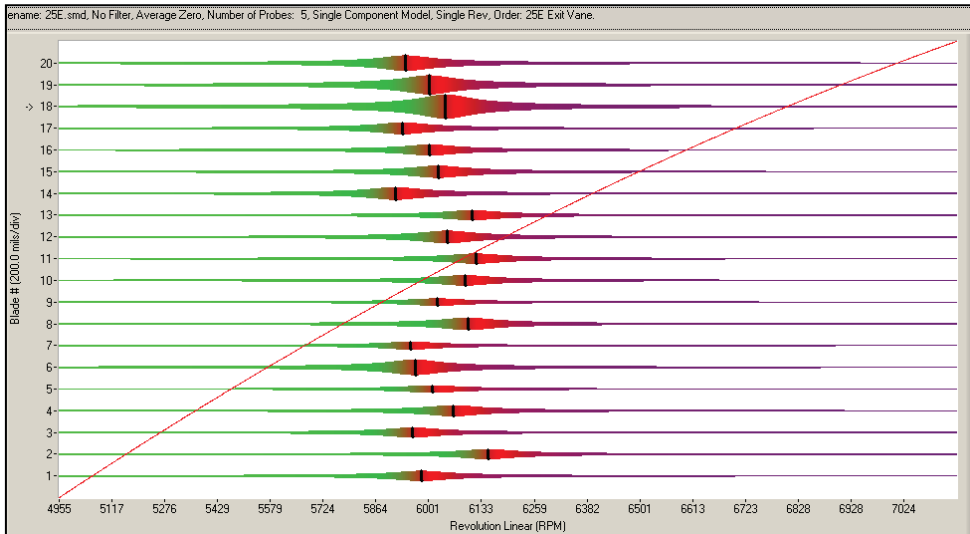
Podstawowym sposobem zobrazowania pomiarów drgań łopatek jest wyświetlenie przebiegu odkształceń łopatek w kolejnych obrotach, pozbawionych składowej stałej (rys. 10). Wykres typu „widmo drgań” (rys. 11) umożliwia szybką identyfikację łopatki o odmiennej charakterystyce drgań i wyznaczenie częstotliwości rezonansów metodą Zabłockiego [81]. Dopiero po dopasowaniu do modelu oscylatora możliwe jest wykonanie zbiorczego wykresu amplitudy na podstawie kilku czujników oraz zobrazowanie fazy drgań kolorem [36] (rys. 12).

Finalną formą prezentacji parametrów drgań wymuszonych wybranej łopatki jest wykres Campbella [45] (rys. 13), zawierający informacje o:

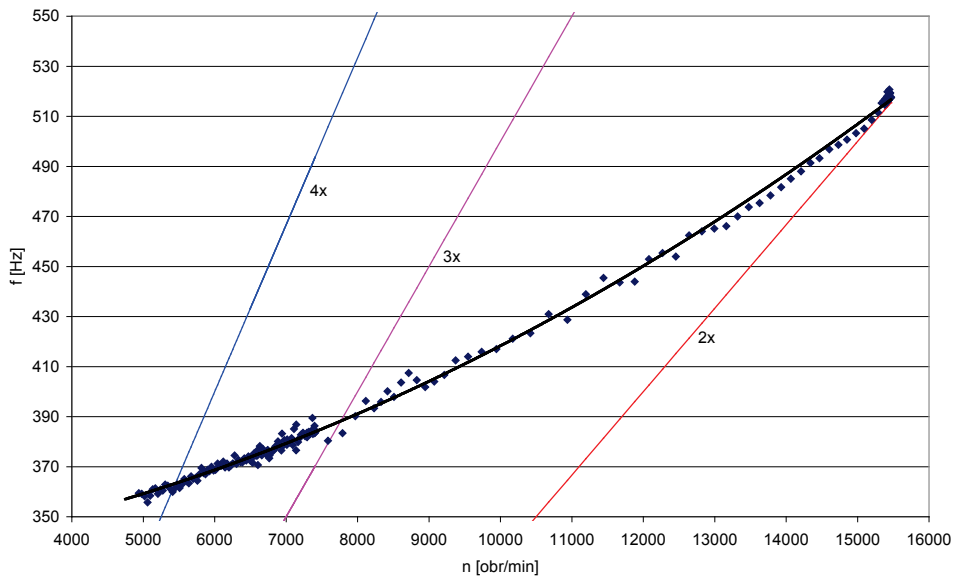
- zależności amplitudy i częstotliwości od prędkości obrotowej,
- rzędowości rezonansów.



Rys. 11. Widmo drgań, czyli zależność odkształceń mierzonych przez czujniki od prędkości obrotowej



Rys. 12. Zobrazowanie fazy drgań kolorem dla przejścia przez rezonans w programie Agilis AATAS



Rys. 13. Przykład wykresu Campbella – zależność częstotliwości drgań wybranej łopatki I stopnia sprężarki silnika SO-3 od prędkości obrotowej dla I postaci drgań

1.4.1. Analiza drgań łopatek on-line

Dane zbierane przez system pomiarowy powinny być odpowiednio buforowane w kolejkach lub plikach pośrednich, aby możliwe było wyliczanie i wyświetlanie wielkości charakteryzujących drgania łopatek. Preferowane są algorytmy, które nie wymagają od razu pełnego zestawu danych wejściowych, ale działają krok po kroku (np. filtry) i dostarczają wyników na bieżąco. Możliwe jest również zastosowanie procedur działających na skończonym zakresie danych wejściowych, takich jak dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów. W tym celu spływające dane dzieli się na fragmenty typu akceleracja, deceleracja, stan ustalony [75] i przetwarza cykl po cyklu.

W trakcie pomiarów przede wszystkim mierzony i wizualizowany jest poziom drgań poszczególnych łopatek. Amplitudę drgań porównuje się z ustalonymi progami i sygnalizuje przekroczenia.

Częstotliwość wybranej formy drgań określa się na podstawie zmienności czasów przyścia łopatek oraz założonej rzędowości wymuszenia, określonej z wyników modelowania MES i dostępnych danych eksperymentalnych. Generowane wykresy zapisuje się do raportu roboczego.

1.4.2. Ocena stanu technicznego łopatek

Podstawą oceny stanu technicznego łopatek są uzyskane z pomiarów parametry drgań łopatek odniesione do wartości referencyjnych. Do symptomów niewłaściwej pracy łopatek zalicza się:

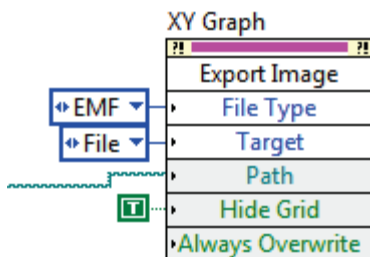
- wysoką amplitudę ich drgań, wynikającą z pracy w rezonansie, zmniejszenia tłumienia w układzie lub występowania dużej siły wymuszającej,
- zmniejszanie się częstości drgań monitorowanej łopatki, związane z rozwojem pęknięcia zmęczeniowego,
- niewłaściwe położenie łopatki na okręgu wirowania, wynikające z wad elementu lub uszkodzeń mechanicznych.

Warunki techniczne w postaci wartości parametrów drgań, które nie mogą być przekroczone, uzyskuje się od producenta lub ustala na podstawie badań właściwości materiałowych i modelowania dynamiki układu metodą elementów skończonych.

1.4.3. Raportowanie

Wyniki analizy powinny być wygenerowane i automatycznie opisane w dokumencie MS Word (docx), który będzie później ręcznie uzupełniony o komentarze i wnioski i stanie się załącznikiem do sprawozdania. Wykresy generowane

w programach LabVIEW lub MATLAB najlepiej automatycznie zapisywać do plików jako bitmapy lub grafiki wektorowe EMF. W tym celu w LabVIEW najlepiej stosować funkcję Export Image – klikając na wykresie i z menu podręcznego wybierając Create, Invoke Node, Export Image. Funkcjonalnością odpowiada to funkcji Export Simplified Image, przekształcającej wykres do postaci odpowiedniej do wydruku. Kolor tła zostaje zmieniony na biały i można usunąć siatkę (Hide Grid).



Rys. 14. Zapisywanie wykresu w LabVIEW

W MS Word rysunki, podpisy i ich numerację najlepiej wstawić za pomocą skryptu VBA. Można korzystać z funkcji:

- Selection.InlineShapes.AddPicture – wstawianie rysunku,
- Selection.InsertCaption – wstawianie podpisu,
- Scripting.FileSystemObject, For Each – wyszukiwanie plików i podkatalogów.

Alternatywnie można wygenerować prosty raport w LabVIEW za pomocą funkcji Report Generation lub Diadem Report Wizard. Narzędzia te lepiej nadają się do tworzenia gotowych wydruków lub slajdów niż do przygotowania dokumentów Worda, które można później edytować do postaci sprawozdania. Nawet z wykorzystaniem Report Generation Toolkit for Microsoft Office nie było możliwe uzyskanie dokumentu MS Word z automatyczną numeracją rysunków.

1.4.4. Oprogramowanie

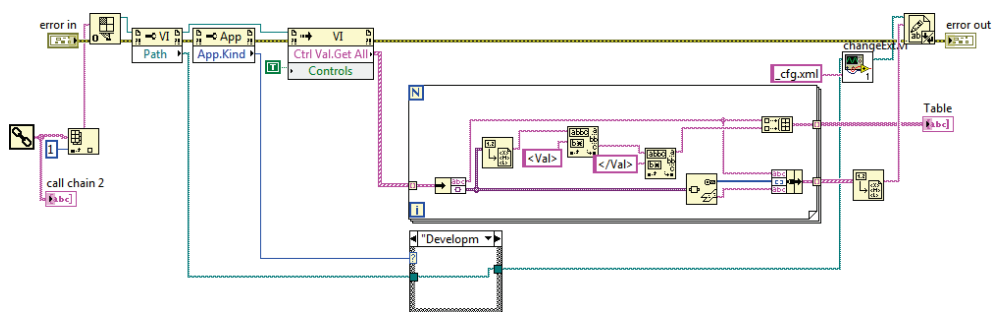
Dotychczas opracowano programy realizujące określone zadania przetwarzania danych pomiarowych drgań łopatek, wykonane przez różnych autorów najczęściej w LabVIEW. Ze względu na różnorodność prowadzonych eksperymentów stosowane narzędzia są stale modyfikowane i testowane dla różnych zestawów danych.

Proponuje się wykorzystać przetwarzanie wsadowe i skrypty do integracji i testowania programów oraz automatyzacji prowadzonych analiz, stosując język Matlab lub jego klon MathScript w LabVIEW oraz język VBA w MS Word, Excel i NI Diadem. W szczególności należy:

- uruchamiać programy w LabVIEW wsadowo bez konieczności ustawiania parametrów ręcznie,
- przechowywać parametry i częściowe wyniki analizy w systemie plików,
- kolejne analizy zapisywać w numerowanych katalogach,
- automatycznie wstawiać wykresy do Worda, numerować rysunki i wstawiać automatyczne opisy (nr czujnika, nr zapisu itp.)
- umożliwiać dostęp do wyników cząstkowych i przeglądanie ich wartości na wykresach roboczych (w Excelu lub Diademie).

LabVIEW posiada bogatą bibliotekę procedur numerycznych i sprawnie przetwarza duże macierze. Dobrze wspiera szybkie prototypowanie algorytmów, ponieważ nie jest trudne stworzenie programu ze standardowym interfejsem graficznym, według najprostszego wzorca Immediate SubVi. Jednocześnie napisanie większego programu jest równie złożone jak w przypadku innych narzędzi i wymaga zastosowania zaawansowanych technik i wzorców projektowych, takich jak maszyny stanu, kolejki i pętle zdarzeń [3]. Do integracji w większy program prototypowych podprogramów potrzebna jest dobra znajomości pakietu.

LabVIEW nie pamięta w kodzie zmian parametrów wejściowych dokonywanych w panelu, więc najlepiej je zapisywać razem z wynikami analizy do pliku .xml oraz tekstowego (rys. 15), aby wiadomo było, z jakimi nastawami została wykonana. Można również użyć Configuration File Vis do tworzenia plików .ini lub rejestru Windows (Windows Registry Access Vis).



Rys. 15. Sposób zapisu kontrolek do pliku .xml oraz tekstowego [67]

Wyniki pośrednie są zwykle przechowywane tylko w pamięci, a ich poprawność jest sprawdzana jedynie na wykresach. Warto więc je zapisywać do plików typu .tdms, które można szybko przejrzeć w Excelu lub Diademie. Pliki tekstowe najlepiej sprawdzają się dla liczb całkowitych, ponieważ:

- nieuniknione są kłopoty z przecinkiem i kropką dziesiętną,
- zwykle nie jest zapisywana pełna precyzja typu double,

- są mało czytelne ze względu na notację wykładniczą i różną interpretację tabulatora.

Wyniki analizy autor proponuje zapisywać w katalogu z danymi w utworzonym podkatalogu o nazwie zawierającej określenie początku wybranego fragmentu rejestracji, np. 0010 oznacza „od 10 sekundy”. Kolejne analizy tego fragmentu nie mogą nadpisywać poprzednich. Pliki wynikowe powinny mieć kolejny numer analizy w nazwie [9].

Z LabVIEW można bezpośrednio wywoływać MS Excel, NI Diadem, MATLAB i odwrotnie, a także przekazywać dane z pamięci [31]. MS Excel i NI Diadem dobrze nadają się do ręcznego przeglądania danych i prostych operacji na sygnałach. Jest w nich zaimplementowany język VBA, dzięki czemu można zautomatyzować rutynowe operacje. VBA nie obsługuje w prosty sposób operacji wektorowych na macierzach, co jest z kolei ogromną zaletą języka systemu MATLAB.

W Matlabie zebrano praktycznie wszystkie potrzebne narzędzia do przetwarzania danych, łącznie z tabelą umożliwiającą ręczne przeglądanie i poprawianie komórek macierzy. Zaletą pakietu jest również duża dostępność darmowego kodu źródłowego do rozwiązania różnych zagadnień. Niestety, programy w języku MATLAB są interpretowane i działają wolniej w porównaniu z LabVIEW.

Skrypty w Diademie lub Matlabie można wykorzystać do wsadowego przetwarzania danych i raportowania z wykorzystaniem różnych podprogramów, także w LabVIEW [4]. Może to być mniej pracochłonne niż wykonanie dużego systemu w LabVIEW. Dzięki testowej formie skryptów można w kodzie zawrzeć parametry analizy i swobodnie projektować i modyfikować etapy przetwarzania danych.

2

INTELIGENTNE UKŁADY WYZWALANIA

2.1. Pomiar czasu przyścia

2.1.1. Wprowadzenie

Do monitorowania stanu technicznego łopatek zwykle używa się czujników wiropływowych, mikrofalowych lub pojemnościowych, które traktowane są jako technologie alternatywne w stosunku do czujników optycznych, stosowanych w pracach rozwojowych. Generują one sygnały wyjściowe o różnych kształtach impulsu i wymagają dedykowanych układów kondycjonowania i metod wyzwalań.

W metodzie dyskretno-fazowej kluczową operacją jest wyznaczenie czasu przyścia łopatek (TOA), który niesie informację o chwilowym położeniu wierzchołka. Analogowe impulsy pochodzące od łopatek są przekształcane w impulsy prostokątne przez układy wyzwalań, zwane inaczej detektorami fazy. Wytworzony sygnał cyfrowy w standardzie TTL jest odpowiedni do pomiaru czasu przyścia za pomocą specjalizowanych kart licznikowych.

Czas przyścia łopatek stalowych najłatwiej mierzy się za pomocą czujnika indukcyjnego, ponieważ jego sygnał wyjściowy zawiera zróżniczkowane impulsy ze stromym zboczem opadającym i można w takim przypadku stosować przemysłowe detektory przejścia przez zero.

Modernizacja lub rekonfiguracja sprzętowych układów wyzwalań jest kosztowna i czasochłonna. Mają one ograniczenia charakterystyczne dla układów analogowych i trudne jest przystosowanie ich struktury do sygnałów czujników

nowej konstrukcji lub pochodzących od innego typu łopatek. W szczególności impulsy od obiektów wirujących wykonanych z materiałów, które nie są ferromagnetykami, nie są zróżniczkowane i nie zawierają przejścia przez zero.

Zmiana układu wyzwalania może być konieczna, gdy system zostanie zaadaptowany do innej maszyny wirnikowej, ze względu na różnice w zakresie zasięgu czujników, zakresu prędkości, geometrii wierzchołka lub materiału łopatki.

W rozdziale przedstawiono wybrane rozwiązania mające zapewnić większą elastyczność układów wyzwalania. Zamiast sprzętowych układów analogowych, w nowych systemach pomiaru drgań łopatek coraz częściej stosuje się szybkie próbkowanie sygnału i numeryczne przetwarzania próbek.

Cyfrowy dyskryminator zastosowany w komputerze zastępuje analogowy układ wyzwalania i kartę licznikową, redukując tor pomiarowy do czujnika, wzmacniacza i karty przetworników AC. Do realizacji tego zadania mogą być wykorzystane standardowe komputery i moduły akwizycji danych. Oferują one wystarczającą przepustowość do przetwarzania dziesięciu lub więcej kanałów TOA jednocześnie w czasie rzeczywistym. Zastosowanie typowych komponentów ułatwia ich wymianę na nowsze wersje o lepszych parametrach.

Jednak w niektórych zastosowaniach, takich jak pokładowe systemy monitorowania stanu technicznego łopatek, może być preferowane sprzętowe wyzwalanie, ponieważ dostępna moc obliczeniowa jest ograniczona lub procedury certyfikacji oprogramowania są zbyt złożone. W takim przypadku rozwiązaniem mogą być rekonfigurowane sprzętowe układy wyzwalania. Są to sterowane mikrokontrolerem układy, których wzmocnienie i inne nastawy ustawiane są w zależności od parametrów sygnału lub też logiczne matryce FPGA wyposażone w przetworniki analogowo-cyfrowe, które przetwarzają próbki bez obciążenia procesora.

2.1.2. Błędy wyzwalania

Niskie parametry sygnału wejściowego lub niewłaściwe działanie detektora fazy prowadzi do błędów w danych pomiarowych, które utrudniają lub nawet uniemożliwiają analizę drgań. Jeśli czujnik lub detektor pracuje nieprawidłowo, np. dla sygnału o niskiej amplitudzie, niepewność pomiaru czasu rośnie, a rzeczywiste wychylenia łopatek giną w szumie. Ze względu na *aliasing* wybielanie sygnałów TOA filtrami pasmowo-przepustowymi nie jest skuteczne.

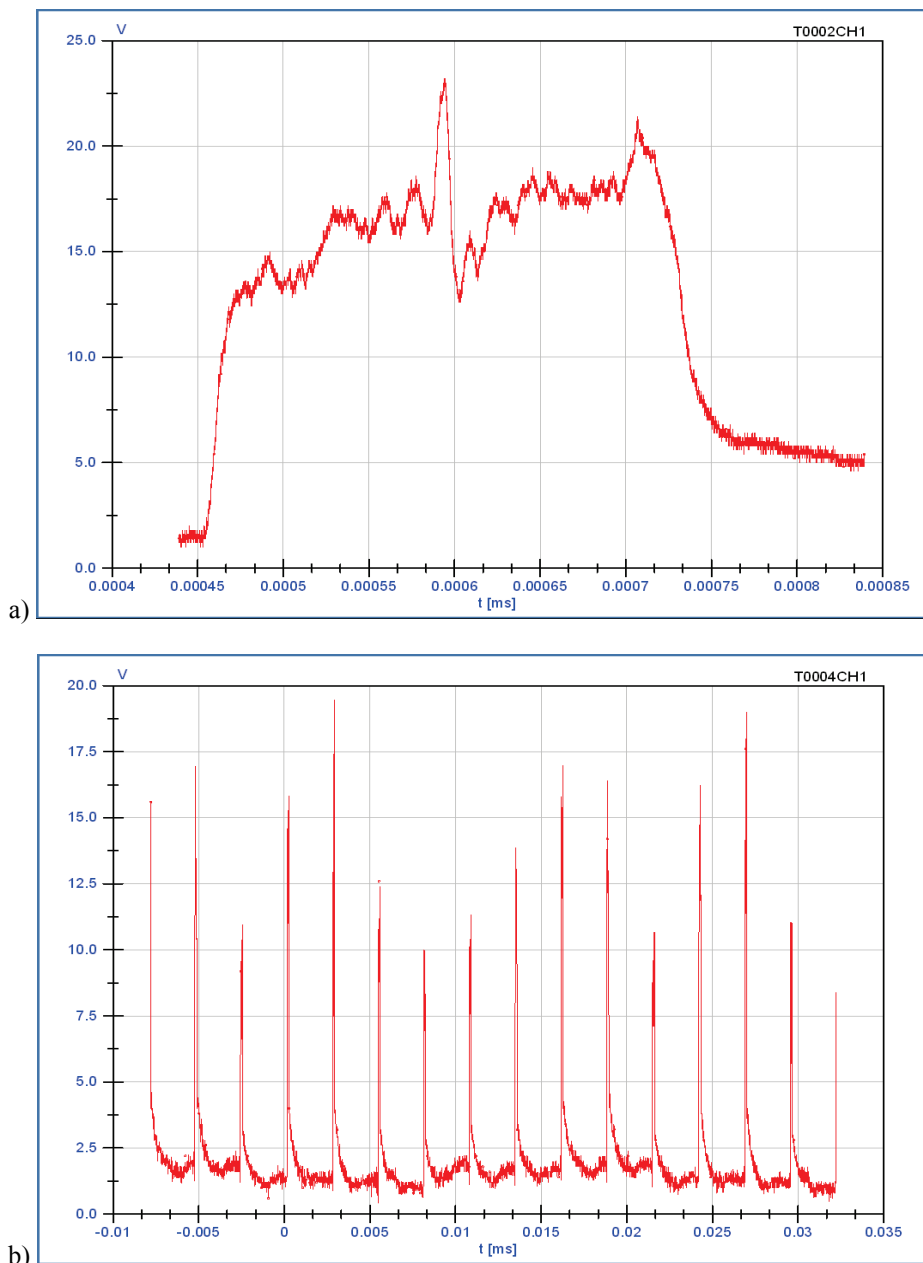
Charakterystyczne dla niepoprawnej pracy detektora fazy są grube błędy pomiaru czasu nazywane nadmiarowymi i brakującymi łopatkami (*extra/surplus* albo *missing blades*). Zwykle powodują je zakłócenia lub nieprawidłowa konfiguracja układu wejściowego, ale w określonych przypadkach powstają nawet przy prawidłowo ustawionych i podłączonych czujnikach, kiedy ze względu na cechy sygnału trudne jest dobranie nastaw układu wyzwalania, np.:

- oba zbocza impulsu są słabo związane z wierzchołkiem łopatki i nie nadają się do pomiaru jej chwilowego położenia,
- brak wartości progowej, odpowiedniej do wyzwalania wszystkich łopatek,
- ze względu na szum nie można zmierzyć dokładnie wierzchołka impulsu,
- poziom DC przebiegu analogowego nie jest stały,
- występują podwójne impulsy, które np. zawierają doliny w części wierzchołkowej (rys. 16a),
- łopatki wytwarzają impulsy o różnych amplitudach z powodu różnic w namagnesowaniu, przekroju poprzecznym, czystości wierzchołka itp.

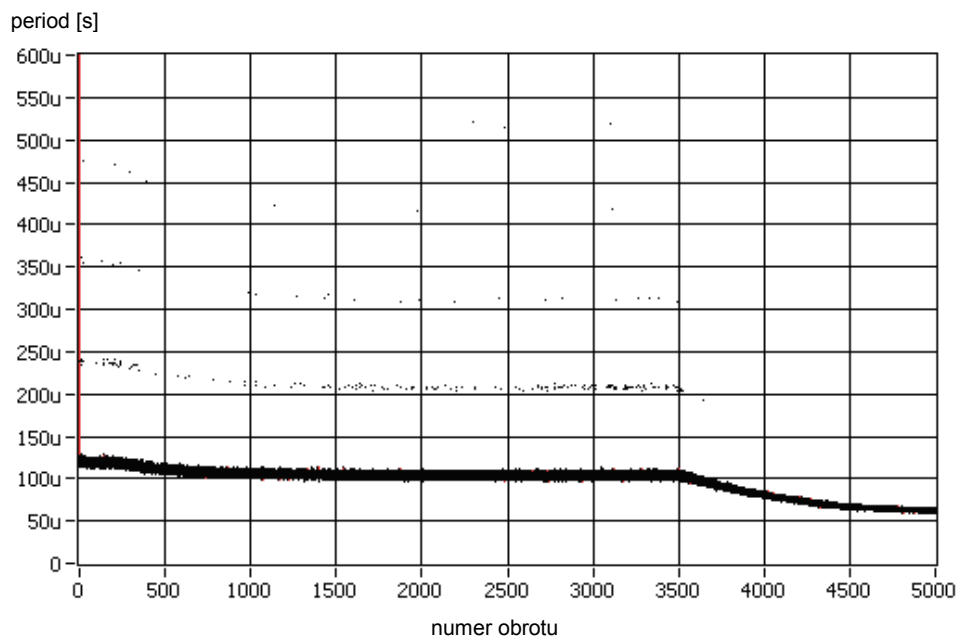
Tak zwane brakujące łopatki to wynik pominięcia pojedynczego impulsu. Analogicznie, „dodatkowe” łopatki generowane są przez szpilki w sygnale lub podwójne impulsy. W efekcie dochodzi do zmiany położenia pozostałych łopatek w ciągu danych wejściowych.

Grube błędy czasu na ogół można wykryć i zignorować programowo. Jeśli stracono kilka kolejnych łopatek w wyniku chwilowego zakłócenia, to najlepiej pominąć dany obrót. Jeśli pewna łopatka jest często tracona, a pozostałe są wyzwalane prawidłowo, oznacza to, że jej wierzchołek nie jest widziany prawidłowo z powodu wytarcia, wygięcia, namagnesowania itp. Kiedy dane są uszkodzone w wielu miejscach, należy skorygować tor pomiarowy i wykonać zapis ponownie.

Niewykryte brakujące i dodatkowe łopatki zaburzają statystyki obliczone na podstawie danych, takie jak średnia i odchylenie standardowe. Lepiej jest w ich miejsce używać mediany lub filtru medianowego, które są w większym stopniu odporne na obecność elementów skrajnych.



Rys. 16. Przykład sygnału czujnika optycznego: a) podwójny impuls, b) impulsy o różnej amplitudzie



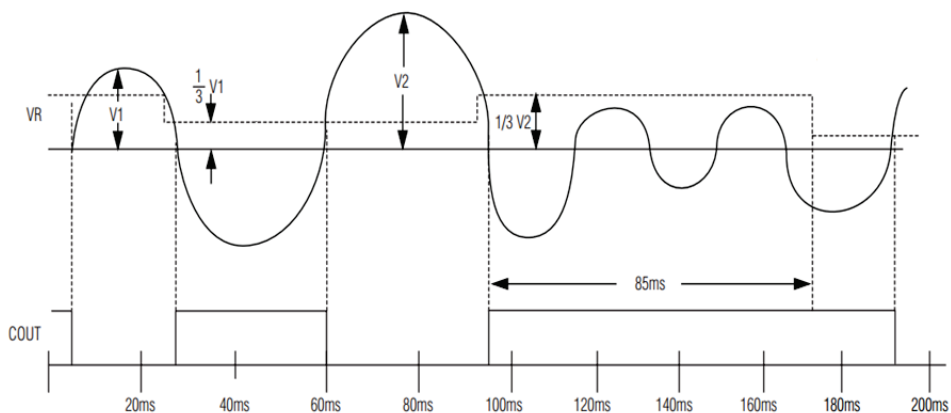
Rys. 17. Przykład uszkodzonego zapisu okresu obrotu z licznymi brakującymi łopatkami

2.1.3. Rozwiązania sprzętowe

Podstawową metodą wyznaczania fazy impulsów w elektronice przemysłowej jest wyzwalanie na zboczu na wybranym poziomie. Zadanie to jest wykonywane przez analogowy układ wytwarzający impulsy cyfrowe niezwłocznie, gdy napięcie wejściowe przekracza określony próg. Faza lub okres tych impulsów są mierzone przez liczniki zaimplementowane w układzie ASIC lub FPGA [45].

W większości przypadków prosty komparator nie nadaje się do wyzwalania, ponieważ jest zbyt wrażliwy na szum. W związku z tym stosuje się przerzutniki Schmitta, które posiadają funkcję histerezy, czyli wchodzą w tryb „włączony”, gdy przekroczony jest wyższy próg, a w tryb „wyłączony” – poniżej dolnej wartości progowej [39]. Takie podejście sprawdza się dla sygnałów od łopatek szczególnie z czujników indukcyjnych i optycznych. Poziom wyzwalania w układzie optycznym jest wybierany arbitralnie w taki sposób, aby uniknąć utraty poprawnych impulsów albo generowania nadmiarowych [45]. W przypadku czujnika indukcyjnego poziom wyzwalania wynosi zero. Jednakże, jeśli amplituda impulsów nie jest stała, może być wymagany adaptacyjny detektor fazy. Jest on dostępny w formie wyrafinowanego układu scalonego [33], który uzbraja się na rosnącym zboczu i wyzwała na przejściu przez zero (rys. 18).

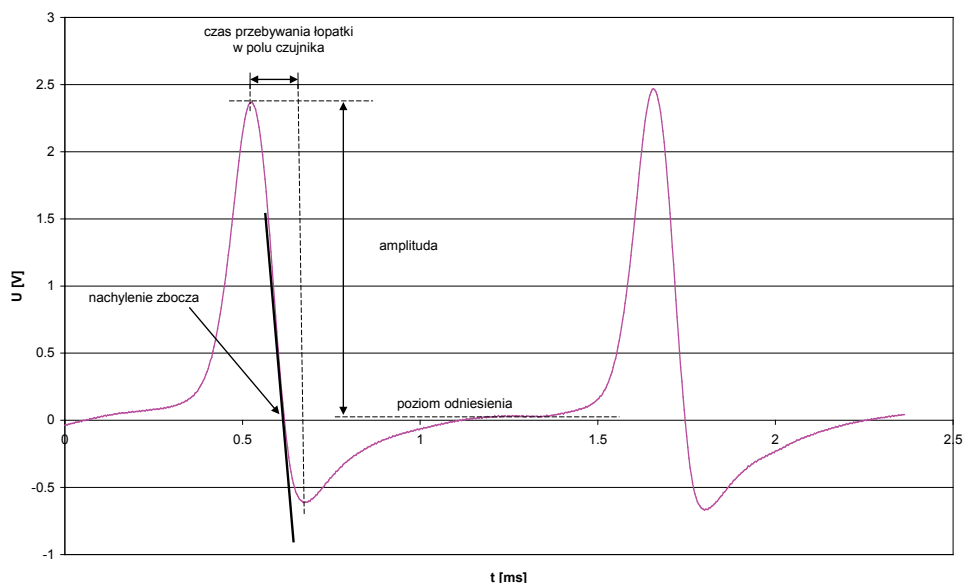
Poziom uzbrajania jest zazwyczaj określoną częścią średniej amplitudy. W efekcie szum i impulsy pasożytnicze o niskiej amplitudzie są ignorowane. Z drugiej strony, jeśli poziom uzbrajania jest zbyt wysoki, pominięta zostanie część prawidłowych impulsów pochodzących od wirujących łopatek.



Rys. 18. Adaptacyjne wyznaczanie progu uzbrajania w układzie scalonym firmy Maxim Integrated [33]

Czujnik wiropędowy opracowany przez QinetiQ wyposażony jest w adaptacyjny układ wyzwalania wykonany w technice analogowej [7]. Zbocze rosnące jest wykorzystywane do uzbrajania obwodu i ładowania kondensatora, aby wyzwolenie nastąpiło na zboczu opadającym na określonej części amplitudy międzyszczytowej, np. 50%.

W systemie opracowanym przez firmę Hood Tech Inc. sprzętowy układ kondycjonowania, zwany BSVI, jest podłączony do komputera i konfigurowany z wykorzystaniem interfejsu graficznego [2], umożliwiając poprawne wyzwalanie dla większości istniejących typów sygnałów. Użytkownik wybiera wzmocnienie, polaryzację, poziom uzbrojenia i wyzwalania, a także może określić okres wstrzymania, co służy do maskowania bliźniaczych impulsów, które zdarzają się w przypadku grubych wierzchołków z szorstką powierzchnią. Mikroprocesor BSVI odbiera te polecenia i odpowiednio konfiguruje wzmacniacze i układ wyzwalania.



Rys. 19. Przykład sygnału czujnika indukcyjnego

2.1.4. Układy FPGA

Do niedawna sprzętowa realizacja wybranego algorytmu polegała na wykonaniu specjalizowanego układu scalonego, tzw. ASIC (*application specific integrated circuit*). Jest to bardzo kosztowne rozwiązanie i zazwyczaj stosuje się je do produktów wykonywanych w ogromnej ilości. W powszechnej sprzedaży znajdują się układy ASIC realizujące gotowe funkcje przetwarzania sygnałów, takie jak FFT, układy konwersji, modulatory itp.

Obecnie, dzięki rozwojowi technologii matryc programowalnych możemy korzystać z układów FPGA (*field-programmable gate arrays*). Są to układy zawierające elementy logiczne, za pomocą których można wykonać struktury przetwarzania sygnału. W odróżnieniu od układów ASIC, umożliwiają wielokrotne programowanie dostępnej struktury, dzięki czemu w łatwy sposób można testować nowe rozwiązanie i na bieżąco usuwać z niego błędy oraz w przyszłości stosować je do innych potrzeb. Typowa struktura FPGA składa się z matrycy makrokomórek otoczonej elementami wejścia/wyjścia. Makrokomórka jest elementem, który po konfiguracji może realizować do kilku funkcji kombinacyjnych lub sekwencyjnych. Projektowanie układu FPGA polega więc na przypisaniu określonych funkcji poszczególnym makrokomórkom oraz ustaleniu pomiędzy nimi połączeń.

Wraz z rozwojem ww. układów rozwinęło się również oprogramowanie, za pomocą którego projektujemy elementy FPGA. Korzystając z języka programowania VHDL lub Verilog, można zaprojektować nowy element cyfrowy, połączyć istniejące, czy dopisać nowe funkcje do istniejących.

2.2. Programowy detektor fazy

2.2.1. Założenia

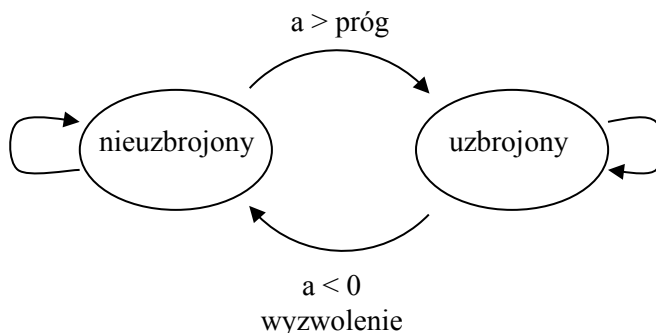
Próbkowany sygnał czujnika cechuje się kwantyzacją amplitudy i czasu. Typowe algorytmy przetwarzania sygnałów cyfrowych operują na próbkach w dziedzinie jednostek czasu zegara sterującego procesem próbkowania. Zwiększanie częstotliwości próbkowania do osiągnięcia wymaganej rozdzielczości w czasie (10–100 MHz) jest zbyt kosztowne, więc przewiduje się zastosowanie interpolacji liniowej lub wielomianowej.

Tworzony dyskryminator docelowo ma być częścią systemów wbudowanych, więc jego złożoność obliczeniowa nie może być zbyt duża. Ponadto algorytm powinien działać ciągle, przetwarzając sygnał punkt po punkcie. Procedury działające na skończonej tablicy (np. FFT) są kłopotliwe w zastosowaniach czasu rzeczywistego, bo trzeba przesuwac okno i zadbać o warunki brzegowe.

Użyteczny detektor przejścia przez zero wyzwala się tylko dla impulsów o określonej amplitudzie, co zabezpiecza przed zakłócaniem wyników przez szum w sygnale wejściowym. Ponadto korzystna jest możliwość adaptacji detektora do średniej amplitudy impulsów, ze względu na zależność poziomu sygnału od prędkości wirnika, charakterystyczną dla czujnika indukcyjnego.

2.2.2. Koncepcja

Dyskryminator można opracować jako automat dwustanowy przedstawiony na rys. 20. W stanie nieuzbrojonym program czeka na impuls od łopatkki, porównując wartości próbek z progiem uzbrojenia. Po jego przekroczeniu automat przechodzi do stanu uzbrojonego. W tym stanie przechodzi przez maksimum impulsu i zboczy opadające aż do momentu napotkania pierwszej próbki o ujemnej wartości. Wówczas automat znów przechodzi do stanu nieuzbrojonego. Zakłócenia i impulsy pasożytnicze nie powinny uzbrajać dyskryminatora.



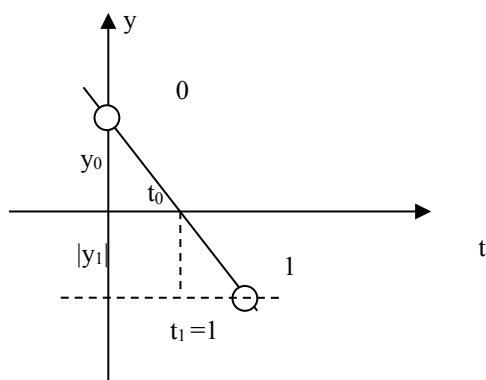
Rys. 20. Cyfrowy detektor przejścia przez zero jako automat dwustanowy

W najprostszym podejściu można przyjąć stałą wartość progu uzbrojenia, równą np. połowie spodziewanej amplitudy sygnału. W praktyce trzeba korygować próg uzbrojenia, śledząc rzeczywiste parametry sygnału.

Na wyjściu dyskryminatora pojawiają się czasy przejścia przez zero, które są wyliczane na podstawie ostatniej próbki z wartością dodatnią o współrzędnych $(0, y_0)$ i pierwszej ujemnej (t_1, y_1) ze wzoru:

$$\frac{y_0}{t_0} = \frac{y_0 - y_1}{1} \quad (2.1)$$

Jest to najprostszy przypadek interpolacji liniowej realizowany na dwóch punktach (rys. 21). Dla uproszczenia przyjęto, że jednostką czasu jest krok próbkowania, więc $t_1 = 1$.

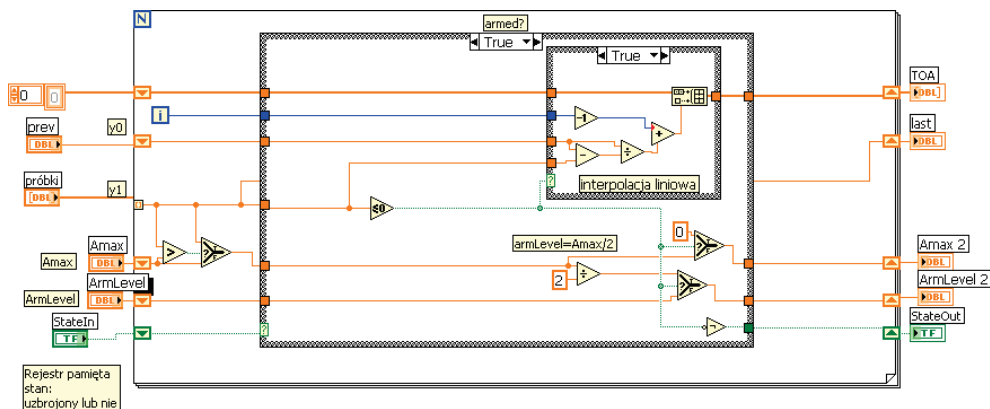


Rys. 21. Wyznaczenie punktu przejścia przez zero

2.2.3. Implementacja

Cyfrowy dyskryminator fazy opracowano w systemie LabVIEW, w którym wygodnie implementuje się maszyny stanu (rys. 22). Automat na bieżąco uaktualnia i pamięta maksymalną wartość sygnału dla ostatniego impulsu (*peak hold*). W stanie nieuzbrojonym jedynie porównuje się próbki z progiem uzbrojenia. Po przejściu do stanu uzbrojonego uaktualnia się wartość progu uzbrojenia i czeka na pierwszą ujemną próbkę. Kiedy się ona pojawi, czas przejścia przez zero t_0 wyliczany ze wzoru (2.1) dodawany jest jako nowa komórka do tabeli wyjściowej.

Wersja przedstawiona na rysunku działa na tablicy skończonej, ale również dobrze może funkcjonować punkt po punkcie w pętli nieskończonej. Dla każdej próbki wykonuje się operacje porównania, które mało obciążają jednostkę obliczeniową. Przy implementacji w systemach wbudowanych kłopot może sprawiać wykorzystanie tutaj liczb zmiennoprzecinkowych i dzielenia.

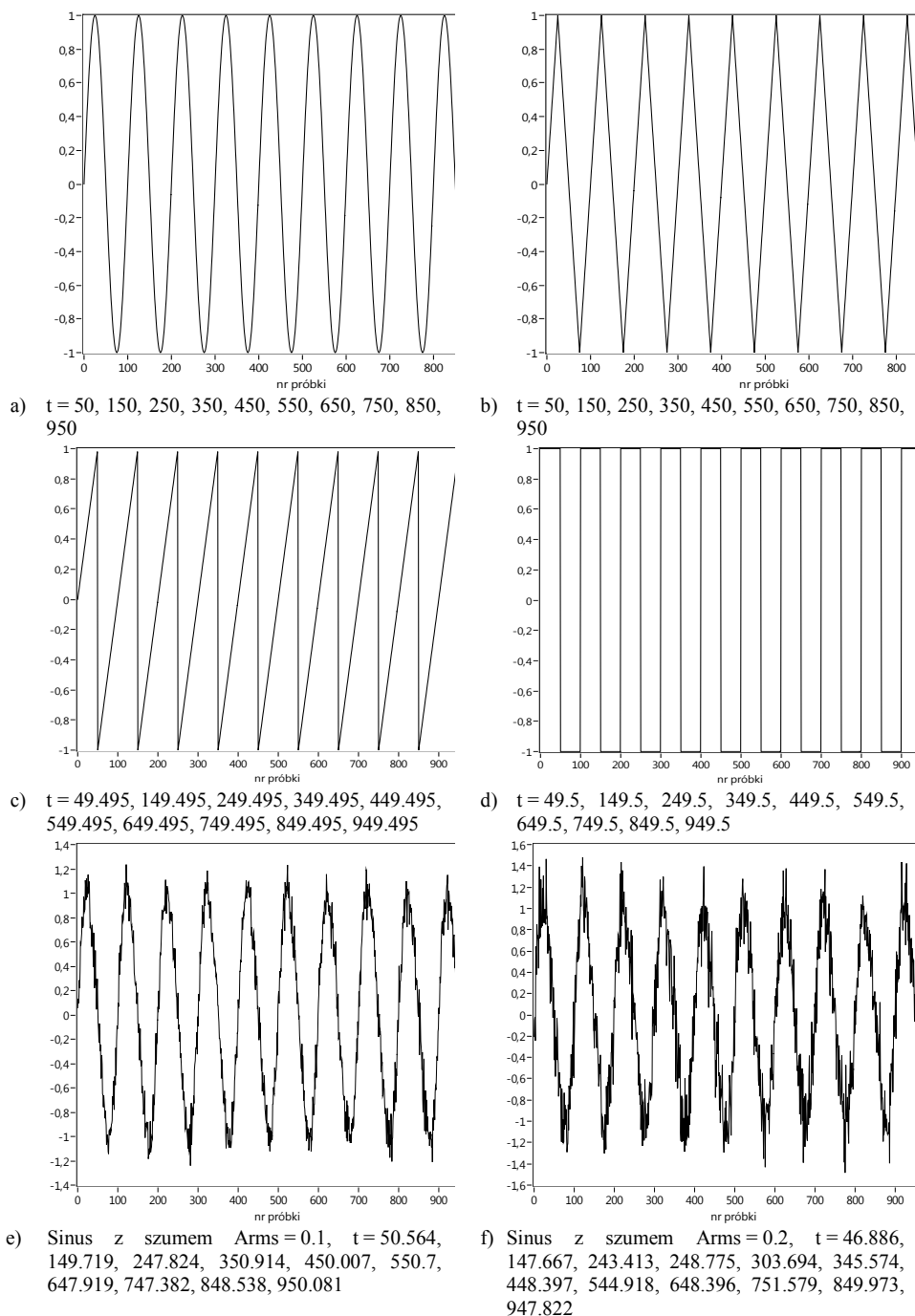


Rys. 22. Przykład implementacji detektora przejścia przez zero w LabVIEW

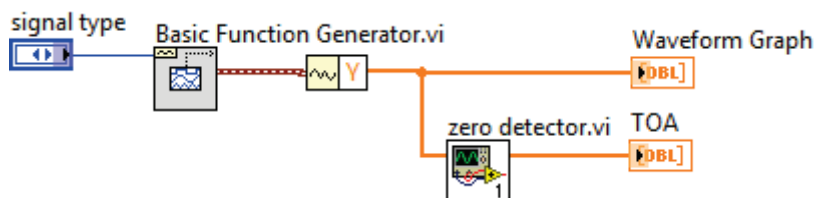
2.3. Weryfikacja

2.3.1. Testy sygnałem symulowanym

Detektor uruchamiano z różnymi podstawowymi sygnałami wejściowymi, tj. sinus, trójkąt, piła, prostokąt (rys. 23), wykorzystując prosty program testujący zawierający generator funkcyjny (rys. 24). Uzyskane wyniki są zgodne z założeniami, tzn. uzyskuje się dziesięć wyzwoleń dla momentu przejścia przez zero zbocza opadającego. Oznacza to, że detektor prawidłowo wykonuje swoją funkcję bez utraty impulsów i generowania nadmiarowych.



Rys. 23. Wyniki testów cyfrowego detektora za pomocą sygnałów generowanych



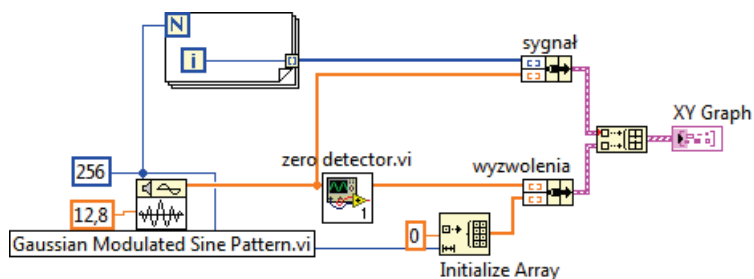
Rys. 24. Program do testów cyfrowego detektora za pomocą sygnałów generowanych

Znacznie ciekawsze są wyniki dla wygenerowanego sygnału funkcji sinus z dodanym szumem za pomocą funkcji „Tones and Noise Waveform VI” (rys. 23e i 23f). Dla szumu o amplitudzie 0.1 liczba wyzwoleń nie zmieniła się, ale wyniki obciążone były niewielkim błędem. Dla szumu o dwukrotnie zwiększonej amplitudzie błędy czasu były większe oraz zaobserwowano dwa nadmiarowe wyzwolenia. W przypadku występowania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych (szpilek) warto zastosować wstępną filtrację dolnoprzepustową.

Przeprowadzone testy potwierdziły koncepcję detektora, ale nie pokazały jego zachowania dla impulsów o różnych amplitudach.

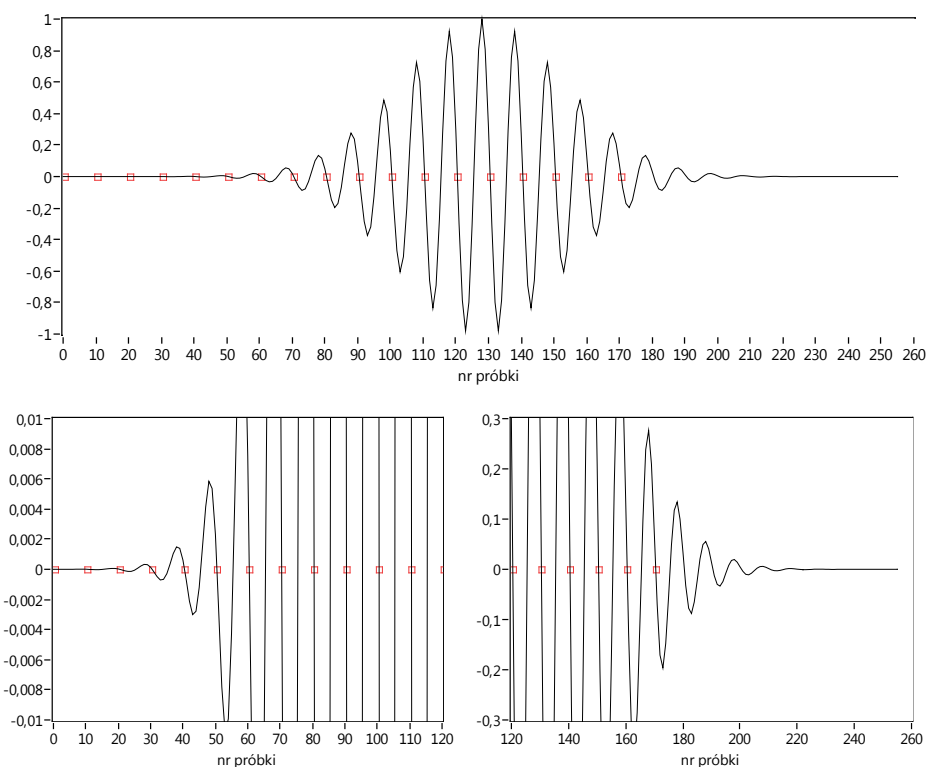
2.3.2. Testy modulowanym sygnałem sinusoidalnym

W celu przeprowadzenia testów sygnałem zmodulowanym amplitudowo opracowano kolejny program (rys. 25), którego działanie prezentują wykresy na rys. 26.



Rys. 25. Program do testów detektora sygnałem zmodulowanym amplitudowo

Detektor łatwo adaptuje się do sygnałów szybko rosnących i przyjmuje nowe maksimum jako odniesienie dla progu wyzwalań. Jest to wada, jeśli w sygnale pojawi się zakłócenie typu szpilka o amplitudzie więcej niż dwa razy większej od amplitudy impulsu. W takim przypadku detektor przestanie zupełnie działać, bo prawdziwe impulsy będą miały poziom mniejszy od progu wyzwalań. Wniosek: próg wyzwalań powinien samoistnie zmniejszać się z czasem do zera, gdy nie pojawiają się nowe wyzwolenia.



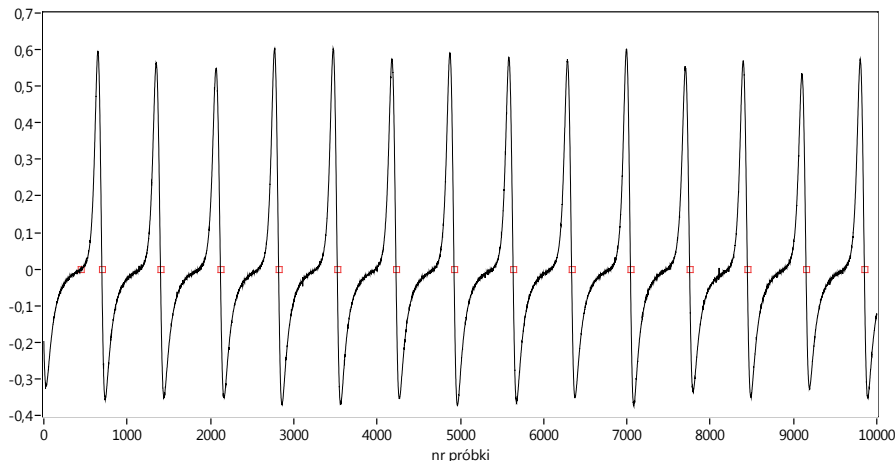
Rys. 26. Wyniki testów detektora sygnałem zmodulowanym amplitudowo

W przypadku sygnałów szybko opadających detektor przestanie działać, gdy kolejny impuls jest dwa razy mniejszy od poprzedniego (rys. 26). Współczynnik wiążący amplitudę wierzchołków z progiem wyzwania można zmniejszyć, ale ryzykujemy generowanie dodatkowych wyzwoleń od impulsów pasożytniczych, kiedy amplituda impulsów (prędkość wirnika) się nie zmienia.

2.3.3. Testy sygnałem rzeczywistym

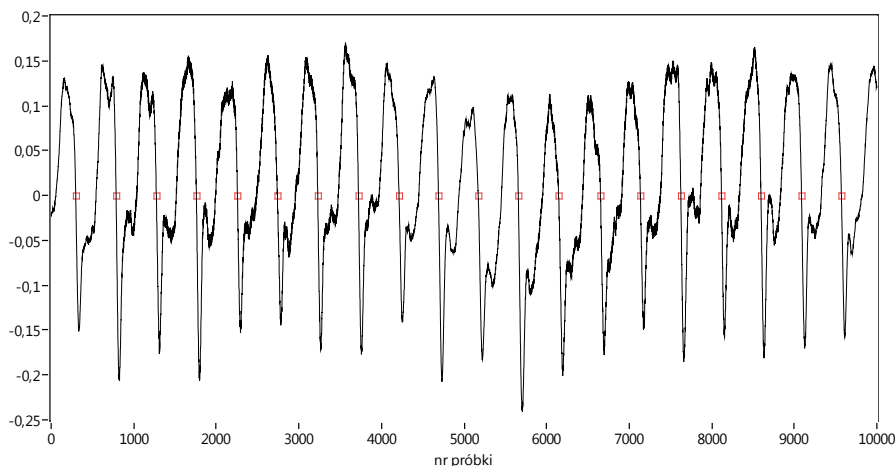
Wykres na rys. 27 przedstawia wynik działania detektora uzyskany programem testowym analogicznym do opisanego w podrozdz. 2.3.2 (rys. 25), w którym generator funkcyjny zastąpiono operacją odczytu próbek sygnału rzeczywistego z dysku. Interesujące jest błędne wyzwolenie widoczne na „siodle” pierwszego impulsu. Przyczyną jego wystąpienia było domyślne ustawienie progu uzbrojenia równego zero. Detektor uzbroił się po napotkaniu pierwszej próbki dodatniej, a wyzwolenie nastąpiło zaraz potem na przypadkowej oscylacji o znikomej amplitudzie.

Wierzchołek pierwszego impulsu łopatkowego ustawił właściwie próg wyzwalania. Kolejne wyzwolenia zarejestrowano we właściwych miejscach, a szum widoczny na „siodłach” kolejnych impulsów został zignorowany.



Rys. 27. Wynik działania cyfrowego detektora dla przykładowego sygnału z czujnika indukcyjnego typu SNDŁ zamontowanego na I stopniu sprężarki silnika SO-3 uzyskanego w czasie rozruchu

Detektor działał prawidłowo również dla przykładowego fragmentu pochodzącego z wentylatora silnika RD-33 (rys. 28), gdzie obserwowana jest znaczna zmienność kształtu impulsów, co powoduje duże trudności przy stosowaniu analogowego detektora.



Rys. 28. Wynik działania detektora dla sygnału od łopatek wentylatora silnika RD-33 na biegu jałowym

2.3.4. Przetwarzanie zapisu próby silnika

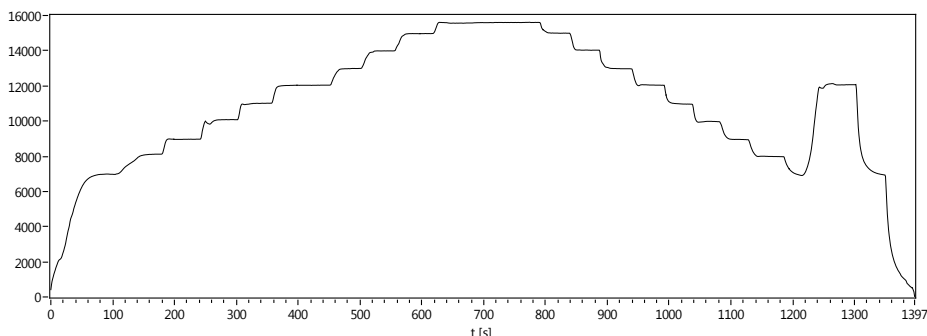
Widmo sygnału czujnika indukcyjnego zawiera wiele harmonicznych koniecznych do odwzorowania stromego zbocza impulsów. Pasma przenoszenia wzmacniacza przeznaczonego do uzyskania sygnału od łopatek silnika odrzutowego jest rzędu stu kiloherców lub więcej i odpowiednio większa powinna być częstotliwość próbkowania. Zapisane w postaci cyfrowej sygnały czujników nawet dla krótkiej próby silnika mają więc stosunkowo duże objętości: kilkaset megabajtów i więcej. Pliku nie wczytuje się z tego powodu w całości do pamięci, tylko przetwarza się go stopniowo mniejszymi fragmentami.

Przyjęto następujący schemat postępowania:

1. Otwarcie pliku źródłowego oraz pliku wynikowego.
2. Wczytanie fragmentu.
3. Zastosowanie detektora do fragmentu.
4. Sprawdzenie wyniku oraz zapis czasów wyzwolenia do pliku.
5. Jeśli zostało jeszcze danych przejście do punktu 2.
6. Zamknięcie plików.

Program opracowany według tej koncepcji zastosowano do przetwarzania archiwalnych zapisów prób silnika SO-3. Przyjęto długość fragmentu równą jednej sekundzie. Sprawdzenie poprawności detekcji ograniczono do zliczania liczby wyzwoleń od łopatek w ciągu kolejnych sekund, co łatwo przeliczyć na prędkość obrotową.

Uzyskany wynik prędkości wirnika przedstawiony na wykresie (rys. 29) jest identyczny z uzyskanym na podstawie czasów przyścia łopatek mierzonych licznikami w momencie wystąpienia impulsów TTL na wyjściu detektora analogowego.



Rys. 29. Prędkość obrotowa silnika SO-3 uzyskana przez zliczanie wyzwoleń detektora cyfrowego w ciągu kolejnych sekund

Zaproponowany cyfrowy dyskryminator fazy w postaci detektora przejścia przez zero jest najprostszym rozwiązaniem problemu, które jest skuteczne dla większości zastosowań. Jego zaletą jest niska złożoność obliczeniowa, co umożliwia jego implementację w technice matrycy bramek FPGA. Słabością zaprezentowanego rozwiązania jest możliwość zablokowania detektora przez zakłócenie typu szpilka. Kod detektora można dopracować, zmieniając np. sposób uzbrajania, dzięki czemu można uzyskać mniej błędnych wyzwoleń dla sygnałów o specyficznych cechach.

Rozwijając przyjętą koncepcję, można opracować bardziej skomplikowane detektory, skuteczne dla sygnałów o gorszych parametrach. Przykładem może być używany w fizyce jądrowej dyskryminator stałofrakcyjny, który jest skuteczny dla impulsów o zmieniającej się znacznie amplitudzie [28].

3

METODY ANALIZY DRGAŃ ŁOPATEK

W rozdziale przedstawiono metody przetwarzania rzadko próbkowanych danych pomiarowych drgań łopatek wykorzystujące model matematyczny wymuszonego oscylatora harmonicznego. W celu estymacji amplitudy i fazy drgań synchronicznych najczęściej używane jest dopasowanie funkcji sinus metodą najmniejszych kwadratów, które realizowane jest dla wybranego obrotu wirnika na podstawie danych pomiarowych z kilku czujników. Do analizy drgań asynchronicznych stosuje się przede wszystkim metody oparte na szybkiej transformacie Fouriera.

3.1. Drgania wymuszone pojedynczych łopatek

Estymacja parametrów drgań wymaga przyjęcia odpowiedniego modelu i sprawdzenia stopnia jego zgodności z badanym zjawiskiem. Praca bezpośrednio z danymi eksperymentalnymi bez wybrania modelu (analiza sygnałowa) może dostarczyć jedynie jakościowych informacji.

Do opisu drgań wymuszonych pojedynczych łopatek mierzonych metodą bezdotykową w pierwszym przybliżeniu stosuje się oscylator harmoniczny, czyli model drgań wymuszonych o jednym stopniu swobody (SDOF). Rozwiązanie wymuszonego oscylatora harmonicznego, określonego równaniem:

$$\ddot{y} + \delta\dot{y} + \omega_0^2 y = F_0 \cos \omega t \quad (3.1)$$

ma postać:
$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

Amplituda i faza drgań zależą od częstości drgań własnych i dekrementu tłumienia δ :

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \delta^2 \omega^2}} \quad (3.3)$$

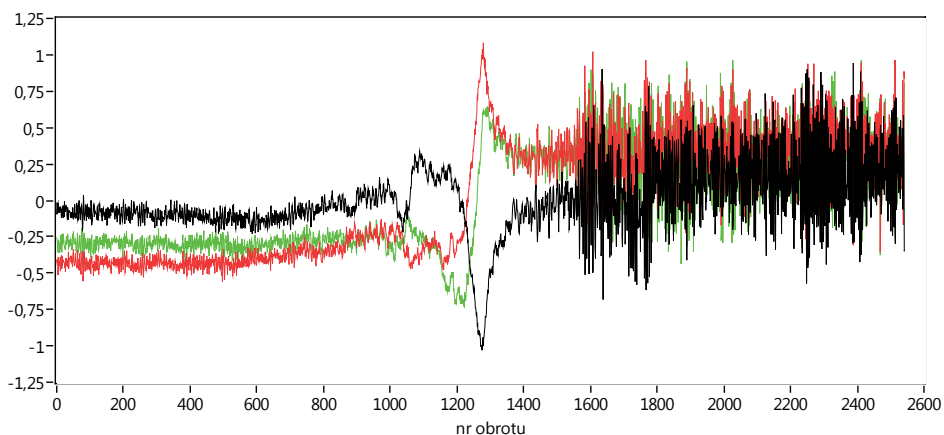
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\delta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3.4)$$

Wychylenie łopatki mierzone przez czujnik i w obrocie j ma postać:

$$y(t_{ij}) = y_{ij} = A(\omega) \cos[\omega t_{ij} + \varphi(\omega)] \quad (3.5)$$

Odształcenie łopatki mierzone przez czujnik i jest odpowiedzią łopatki y_{ij} próbkowaną jedynie raz na obrót. W dziedzinie częstotliwości wynikiem zbyt rzadkiego próbkowania jest *aliasing*, czyli przenoszenie linii widmowych pochodzących od drgań łopatek do pasma ograniczonego przez częstotliwość równą połowie częstości obrotowej [45]. Dla tak zniekształconego sygnału nie można stosować bezpośrednio typowych dla analizy wibroakustycznej filtrów przepustowych ani transformaty FFT.

Położenie równowagi, czyli oczekiwane położenie wierzchołka łopatki otrzymuje się, uśredniając odpowiedź wybranej łopatki dla dużej liczby obrotów. Składowa szybkozmienna sygnału pomiarowego to drgania asynchroniczne (rys. 30, nr obrotu > 1500). Dla drgań asynchronicznych, takich jak wirujące strefy oderwań, pompaż lub flutter, siła wymuszająca drgania $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ nie jest synchroniczna z obrotami wirnika.



Rys. 30. Przebieg deceleracji silnika SO-3 z obrotów maksymalnych do $n = 10\,500$ obr/min z przejściem przez dwa rezonanse

Drgania synchroniczne (rezonansowe) są zsynchronizowane z pomiarem, więc są obserwowane jako quasi-statyczne zmiany wychylenia ($1000 < \text{nr obrotu} < 1500$). Odwzorowują zmianę fazy w czasie zmiany prędkości obrotowej silnika powiązanej z przechodzeniem częstotliwości wymuszenia przez zakres rezonansowy. Zerowaniem nazywa się w metodzie tip-timing odejmowanie składnika statycznego [59], które przeprowadzane jest w sposób pozostawiający rezonanse.

W najprostszym podejściu przyjmuje się, że obserwowana obwiednia przemieszczenia drgań równa jest amplitudzie drgań łopatki A . W rzeczywistości różnica między mierzoną obwiednią przemieszczenia a amplitudą drgań może być duża, ze względu na rzadkie próbkowanie sygnału i możliwość synchronizacji częstotliwości próbkowania z częstotliwością drgań. Amplitudę i częstotliwość drgań wyznacza się przez obwodowe dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów punktów pomiarowych pochodzących z kilku czujników do modelu oscylatora, zapisanego w równoważnej postaci:

$$y_{ij} = a \sin \omega t_{ij} + b \cos \omega t_{ij} + c \quad (3.6)$$

Zagadnienie dopasowania jest liniowe, jeśli częstotliwość drgań wymuszonych jest znana [25]. Zwykle częstotliwość trzeba również wyznaczyć i wówczas rozwiązanie szuka się iteracyjnie, zakładając spodziewaną wartość częstotliwości jako początkową.

3.1.1. Drgania synchroniczne

Dla drgań synchronicznych siła wymuszająca $F_0 \cos(\omega t)$ jest synchroniczna z prędkością obrotową n z rzędowością N (*engine order*):

$$\omega = N \omega_r = 2 \pi N n / 60 \quad (3.7)$$

Faza ruchu obrotowego, przy pominięciu wpływu na nią drgań łopatki wynosi:

$$\alpha = \omega_r t \quad (3.8)$$

Wykonywanie pomiaru wychylenia wierzchołka łopatki y_i jest synchroniczne z fazą siły wymuszającej drgania (nie tylko w rezonansie):

$$N \alpha_i = \omega t_i \quad (3.9)$$

gdzie: t_i – czas przyjscia łopatki do czujnika i , α_i – kąt zamontowania czujnika i .

Można więc wyeliminować czas z równania 3.3.

$$y_i = A(\omega) \cos [N \alpha_i + \varphi(\omega)] \quad (3.10)$$

Zależności $A(\omega)$ i $\varphi(\omega)$ są znanym rozwiązaniem równania oscylatora harmonicznego, a ich parametrem jest częstotliwość drgań własnych ω_0 i dekrement tłumienia δ .

Zależność wychylenia wierzchołka łopatki od obrotów obserwowana przez czujnik $\varphi_i(\omega)$ nazywana jest widmem drgań łopatek lub hodografem. Podczas deceleracji wirnika widoczne są charakterystyczne dla rezonansu zmiany wychylenia w kształcie zygzaka. Uzyskiwany przebieg krzywej rezonansowej zależy od położenia fazowego czujnika względem wymuszenia (rys. 31) [73].

Pierwotny sposób analizy drgań synchronicznych, nazywany metodą Zabłockiego [82], polega na oscyloskopowych pomiarach zygzaków widocznych przy deceleracji wirnika. Mierzy się amplitudę międzyszczytową i prędkość obrotową, dla której obserwowana jest zmiana fazy hodografu. Częstotliwość drgań uzyskuje się, mnożąc prędkość przez założoną rzędowość. Metoda Zabłockiego jest skuteczna tylko dla odpowiedzi rezonansowych niskiego rzędu, o wysokiej amplitudzie, ma stosunkowo niską dokładność i nie może być zautomatyzowana.

Ilościową analizę hodografu wykonano w pracach [73 i 81], wyprowadzając rozwiązanie oscylatora harmonicznego w nieruchomym układzie odniesienia związanym z czujnikiem:

$$\varphi_{\text{sensor}} = \frac{r^2/Q^2}{(1-r^2)^2 + r^2/Q^2} A \cos N\theta_0 - \frac{(1-r^2)r/Q}{(1-r^2)^2 + r^2/Q^2} A \sin N\theta_0 \quad (3.11)$$

gdzie:

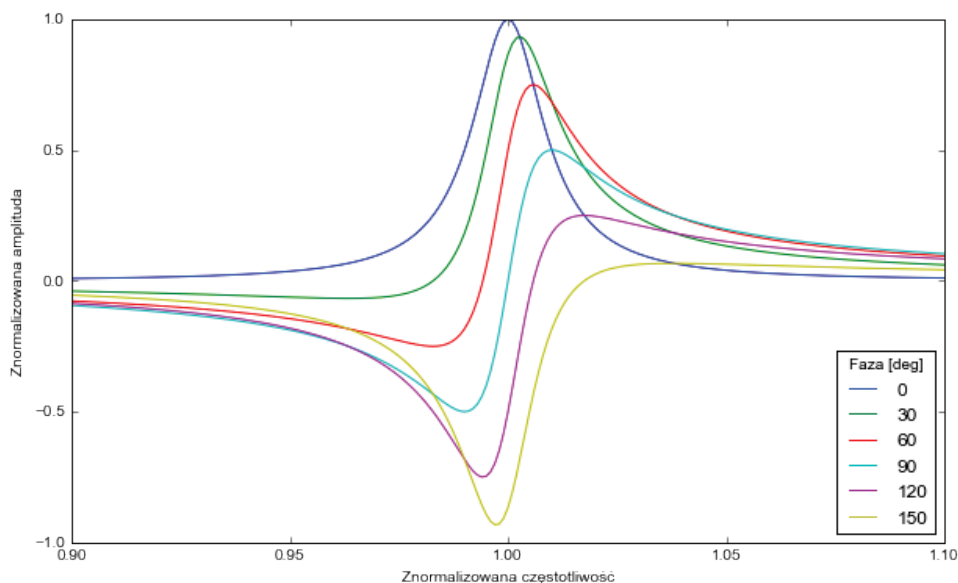
Q – dobroć,

r – znormalizowana częstotliwość,

A – amplituda,

N – rzędowość,

θ_0 – różnica fazy między siłą wymuszającą a położeniem obserwatora.



Rys. 31. Wychylenie łopatki mierzone przez czujnik przy przejściu przez rezonans

3.2. Obwodowe dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów

Przybliżone częstotliwości rezonansowe drgań poszczególnych łopatek i rzędowości wymuszenia są zwykle znane z wcześniejszych pomiarów i analizy MES. Spodziewane odpowiedzi łopatki przedstawia się zbiorczo na wykresie Campbella. Dla wybranego zakresu prędkości obrotowej i postaci drgań określona jest wartość rzędowości, która jest daną wejściową przy określaniu częstotliwości, amplitudy i fazy metodą obwodowego dopasowania.

Obecnie preferowaną metodą wyznaczania parametrów drgań synchronicznych łopatek jest obwodowe dopasowanie odpowiedzi kilku czujników do modelu oscylatora harmonicznego metodą najmniejszych kwadratów [24].

$$y_i = a \sin N \alpha_i + b \cos N \alpha_i + c \quad (3.12)$$

Zakładając rzędowość wymuszenia N , uzyskuje się w wyniku dopasowania wartości amplitudy $A^2 = a^2 + b^2$ i fazy. Częstotliwość rezonansowa jest proporcjonalna do prędkości obrotowej, dla której zeruje się faza lub dla której obserwuje się najwyższą amplitudę:

$$f_0 = N n_0 / 60 \quad (3.13)$$

Model pojedynczej odpowiedzi (3.12) zawiera $2 + 1 = 3$ niewiadome: dwie do opisu części oscylacyjnej a i b oraz składową stałą c . Model podwójnej odpowiedzi zawiera $2 * 2 + 1 = 5$ niewiadomych: a_1, b_1, a_2, b_2 oraz c .

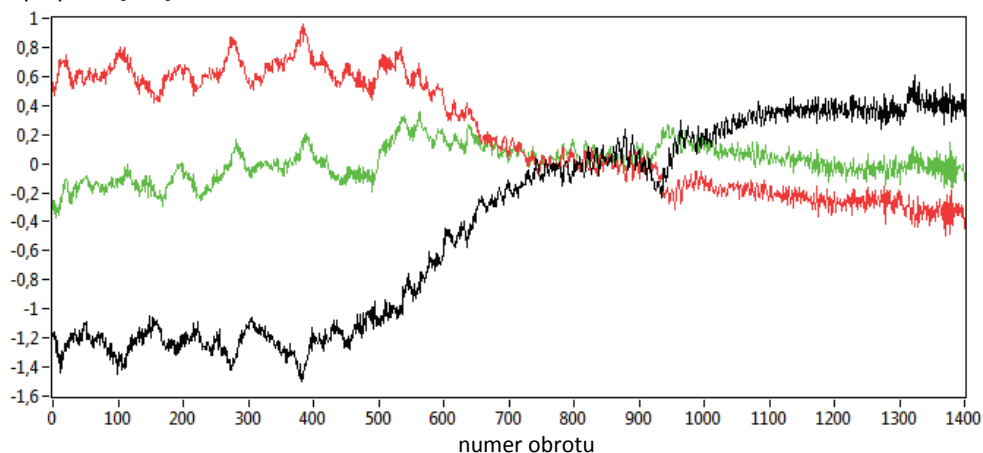
$$y_i = a_1 \sin N_1 \alpha_i + b_1 \cos N_1 \alpha_i + a_2 \sin N_2 \alpha_i + b_2 \cos N_2 \alpha_i + c \quad (3.14)$$

Analogicznie model potrójnej odpowiedzi zawiera $3 * 2 + 1 = 7$ niewiadomych. Dla k odpowiedzi mamy więc $2k + 1$ niewiadomych. Do ich przybliżonego rozwiązania metodą najmniejszych kwadratów potrzeba więcej niż $2k + 1$ równań. Minimalna liczba czujników S_{\min} wynosi więc:

$$S_{\min} = 2k + 2 \quad (3.15)$$

Przypadek graniczny, kiedy liczba czujników równa jest $2k + 1$ (np. 3 dla pojedynczej odpowiedzi, rys. 32), można rozwiązać jedynie teoretycznie. Dla rzeczywistych danych szum ma decydujący wpływ na rozwiązanie, co można sobie wyobrazić, analizując przypadek regresji liniowej wykonywanej dla dwóch punktów pomiarowych.

wchylenie [mm]



Rys. 32. Wychylenia wierzchołka obserwowane przez trzy czujniki podczas deceleracji. Widoczne trzy różne odpowiedzi synchroniczne dla obrotów w zakresie 500–1000, 900 and 1300

Dopasowanie obwodowe jest najbardziej wiarygodną metodą estymacji amplitudy i fazy drgań synchronicznych. Zagadnienie jest liniowe i dobrze uwarunkowane numerycznie, jeśli czujniki są odpowiednio rozmieszczone na obwodzie [24, 73]. Zmodyfikowana wersja metody, posługująca się ułamkowymi rzędowościami, jest wykorzystywana również do analizy drgań asynchronicznych [56].

W praktyce zagadnienie estymacji parametrów drgań synchronicznych nie jest łatwe, ponieważ mierzone odpowiedzi mogą mieć niski stosunek sygnał–szum lub też blisko siebie znajdują się rezonanse różnych postaci o różnych rzędowościach wymuszeń. Analiza pokrywających się (sprzężonych) rezonansów wymaga zastosowania modelu o większej liczbie stopni swobody.

3.2.1. Regresja liniowa

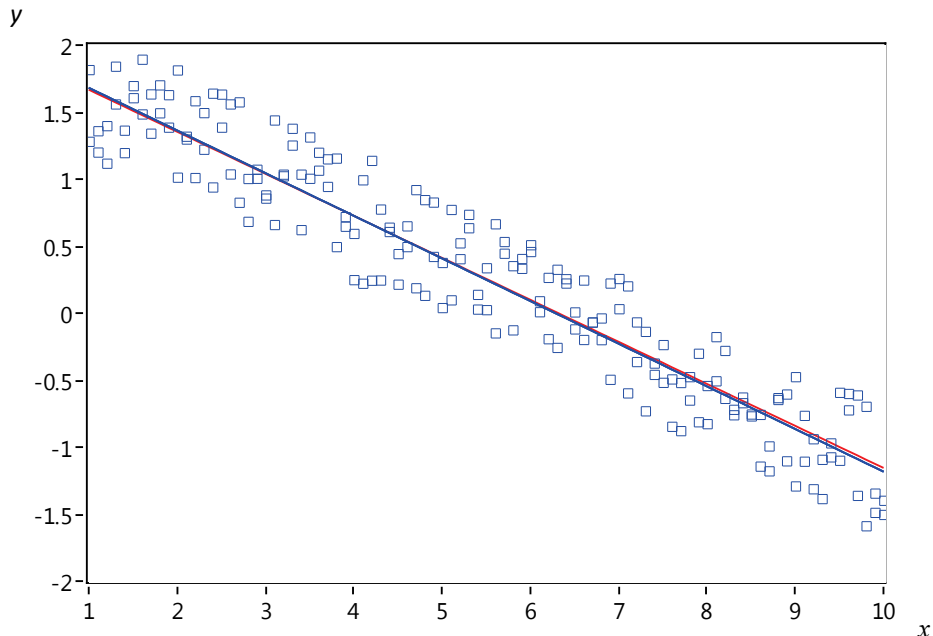
Mimo że pakiety LabVIEW i MATLAB wyposażone są w odpowiednie gotowe narzędzia do dopasowania, warto mieć własne udokumentowane procedury, których działanie się kontroluje. Dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów (liniowa regresja, aproksymacja, optymalizacja) jest jedną z najczęściej stosowanych operacji numerycznych [38]. W Matlabie przeznaczony jest do tego nawet specjalny operator lewostronnego dzielenia macierzowego \backslash (mldivide). Dla prostokątnej macierzy M wyznacza on rozwiązanie przybliżone a układu równań liniowych:

$$M a = y \quad (3.16)$$

w postaci:

$$a = M^{-1} y \quad (3.17)$$

Porównano działanie wbudowanej funkcji fit() oraz operatora lewostronnego dzielenia. Przed wykonaniem dopasowania krzywej trygonometrycznej wykonano testy dla funkcji liniowej. Rys. 33 przedstawia dopasowanie do obciążonych szumem punktów prostej równomiernie rozłożonych w badanym przedziale.



Rys. 33. Wynik dopasowania liniowego: krzywa czerwona – funkcja `fit()`, niebieska – dzielenie macierzowe

Macierz obserwacji M składa się z wierszy zawierających wartości zmiennej x_i i stałą 1.

$$M = [\mathbf{x} \ \mathbf{1}] \quad (3.18)$$

Nawet dla tak podstawowego zagadnienia wyniki dopasowania dwiema metodami różnią się nieznacznie (na korzyść operatora dzielenia):

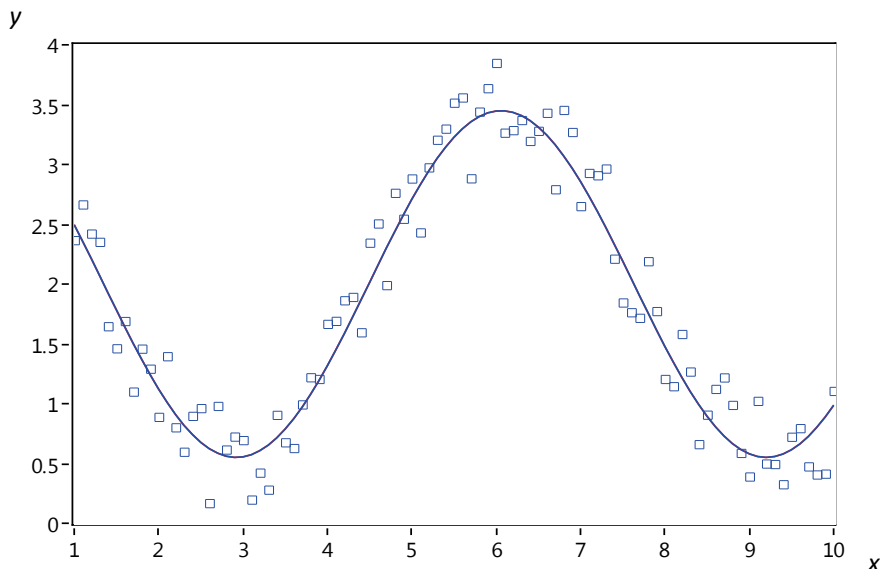
- 1) $a = -0.3136$ $b = 1.9808$, `fit()`
- 2) $a = -0.3183$ $b = 2$, operator dzielenia \

3.2.2. Dopasowanie funkcji sinus

Analogicznie wykonano test dopasowania do rozwiązania oscylatora, tworząc następującą macierz obserwacji:

$$M = [\sin(\mathbf{x}) \ \cos(\mathbf{x}) \ \mathbf{1}] \quad (3.19)$$

Działanie liniowej metody dzielenia macierzowego porównano z działającą iteracyjnie funkcją biblioteczną `lsqfit()`. Tym razem wyniki obu metod są identyczne: $[-0.3183 \ 1.4142 \ 2]$ (rys. 34).



Rys. 34. Dane dopasowane do równania $y = a \sin x + b \cos x + c$

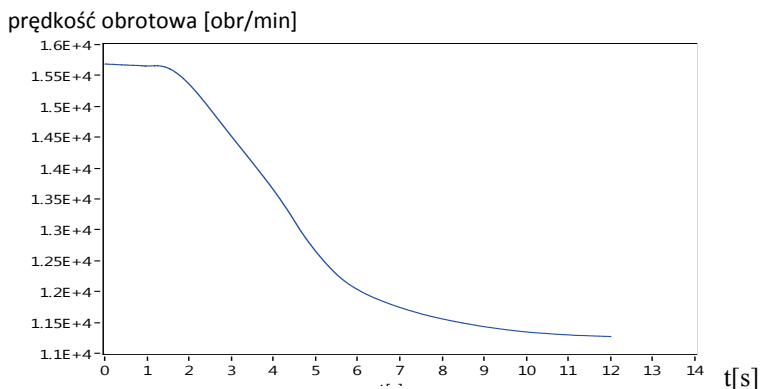
3.2.3. Symulacja numeryczna

Do symulacji przechodzenia przez rezonans w czasie deceleracji silnika wykorzystano model oscylatora harmonicznego. Wczytano przebieg prędkości obrotowej dla rzeczywistej deceleracji z pliku tekstowego (rys. 35). Założono, że częstotliwość drgań własnych wynosi 500 Hz, rzędowość wymuszenia $EO = 2$, a dekrement tłumienia 0.03.

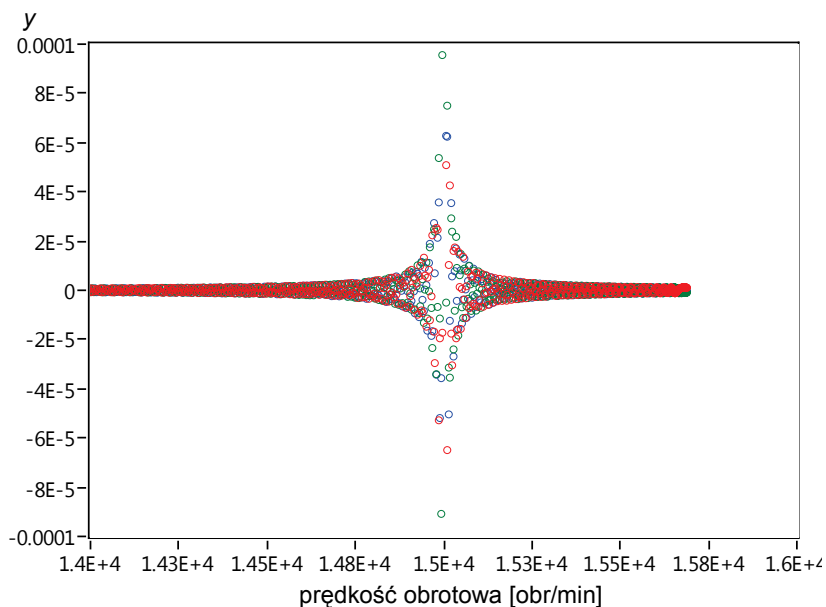
Dla każdego obrotu wyznaczono amplitudę i fazę odpowiedzi na wymuszenie synchroniczne $EO = 2$. Następnie przyjęto rozłożenie trzech czujników na obwodzie stopnia sprężarki takie jak w tab. 1 w podrozdz. 1.3.2. Zgodnie z nimi wyznaczono dla kolejnych obrotów czasy przyjścia łopatki wynikające z wirowania, zanedbując przy tym błąd czasu przyjścia, pochodzący od drgań.

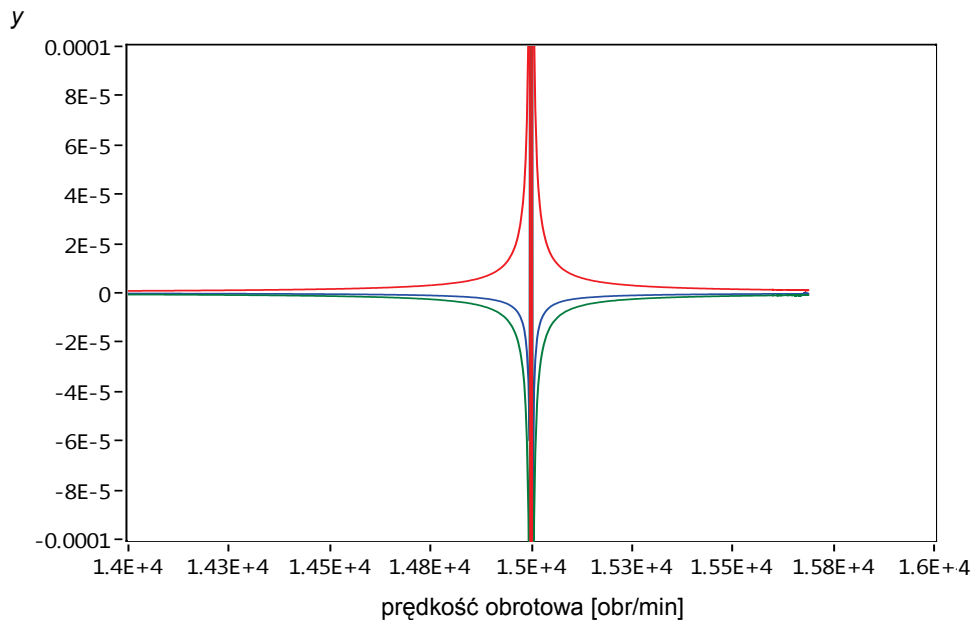
Dla kolejnych chwil przyjścia łopatki pod czujniki obliczono odkształcenie wierzchołka y z rozwiązania równania ruchu oscylatora. W ten sposób ciągły sygnał drgań łopatki został spróbkowany przez wirtualne czujniki. Wynik przedstawiony na rys. 36 jest nieprawidłowy, bo odpowiedzi nie synchronizują się z pomiarem. Wynika to z pominięcia drgań przy wyznaczaniu czasu przyjścia.

Ze względu na związek między fazą drgań i położeniem czujników obowiązujący dla wymuszeń synchronicznych wykorzystano równanie oscylatora w postaci (3.12). Uzyskano odpowiedź z czujników (tzw. hodograf, rys. 37) o przebiegu zbliżonym do wyników eksperymentu i wykresu wykonanego przez Zabłockiego [81, 82]. Wynika z tego, że dla wymuszeń synchronicznych można pominąć obliczenia czasu przyścia i wykonywać działania w dziedzinie numeru obrotu, co istotnie upraszcza analizę.



Rys. 35. Przebieg deceleracji silnika

Rys. 36. Wychylenie wierzchołka y w funkcji prędkości obrotowej niewłaściwie próbkowane przez trzy symulowane czujniki



Rys. 37. Przejście przez rezonans widziane przez trzy czujniki

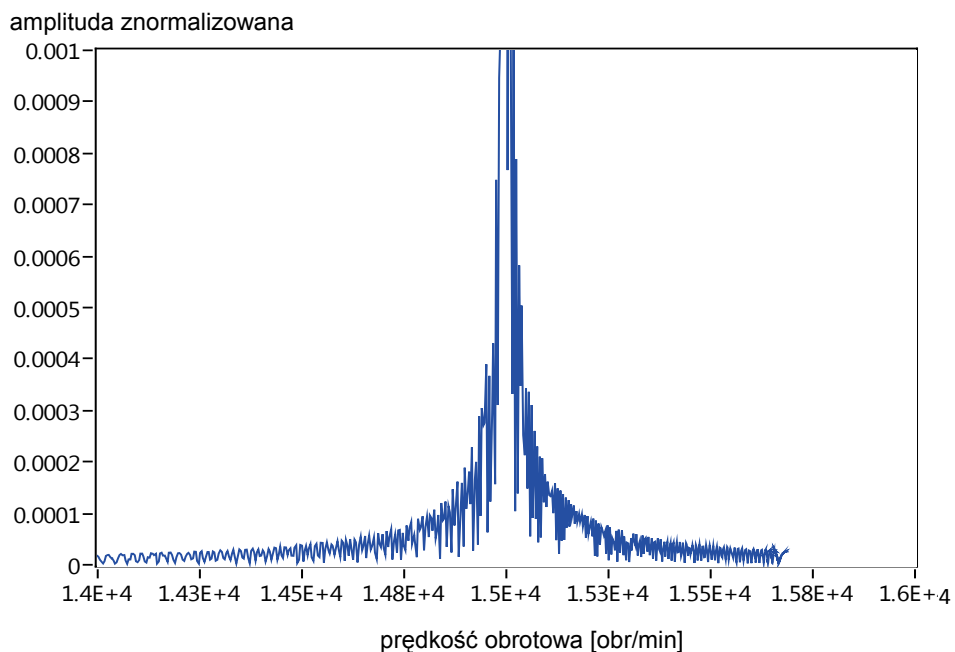
Dla każdego obrotu wykonywane jest dopasowanie punktów z wirtualnych czujników do równania oscylatora (3.12). Przyjęto następującą postać macierzy obserwacji:

$$\mathbf{M} = [\sin(N \alpha) \cos(N \alpha) \mathbf{1}] \quad (3.20)$$

Następnie wyznacza się amplitudę (rys. 38) i fazę ze współczynników a i b ze wzorów:

$$A^2 = a^2 + b^2 \quad (3.21)$$

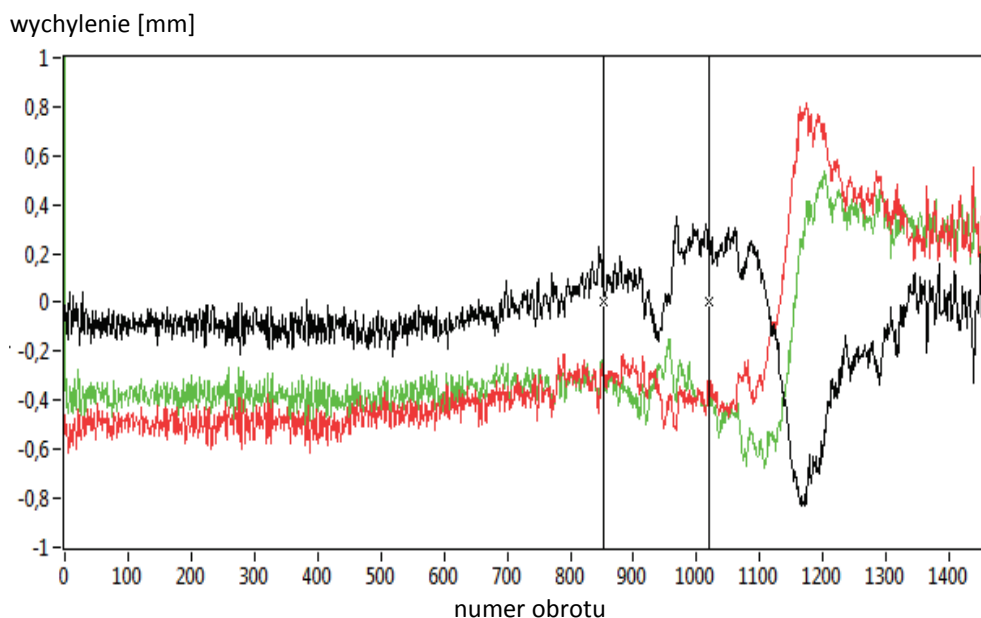
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{b} \quad (3.22)$$



Rys. 38. Wynik estymacji amplitudy dla deceleracji wirnika

3.3. Analiza danych pomiarowych

Do analizy wybrano zapis deceleracji silnika SO-3 (rys. 35) zawierający odpowiedź z trzech czujników indukcyjnych (rys. 39).

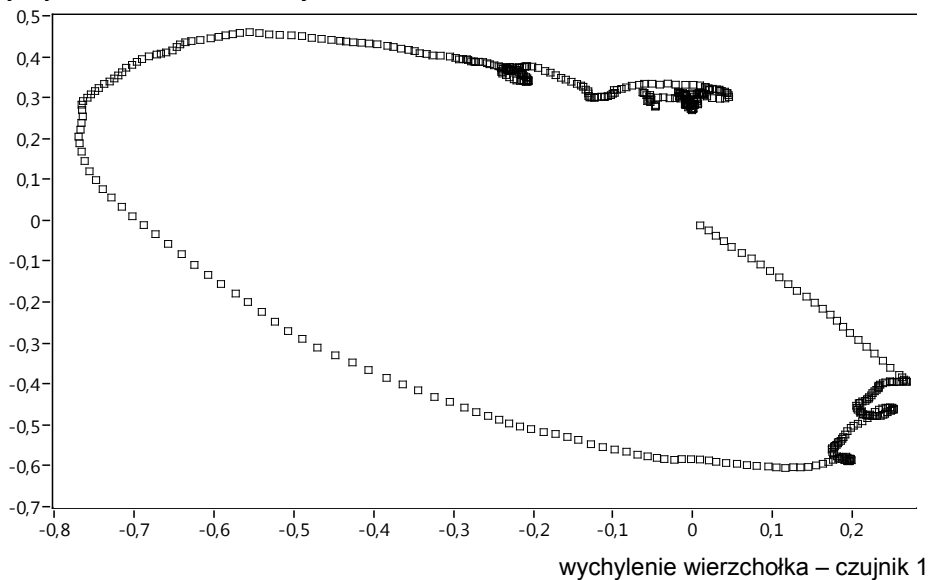


Rys. 39. Wychylenie łopatki zmierzone przez trzy czujniki przy przejściu przez dwa rezonanse

3.3.1. Wyznaczanie rzędowości rezonansów

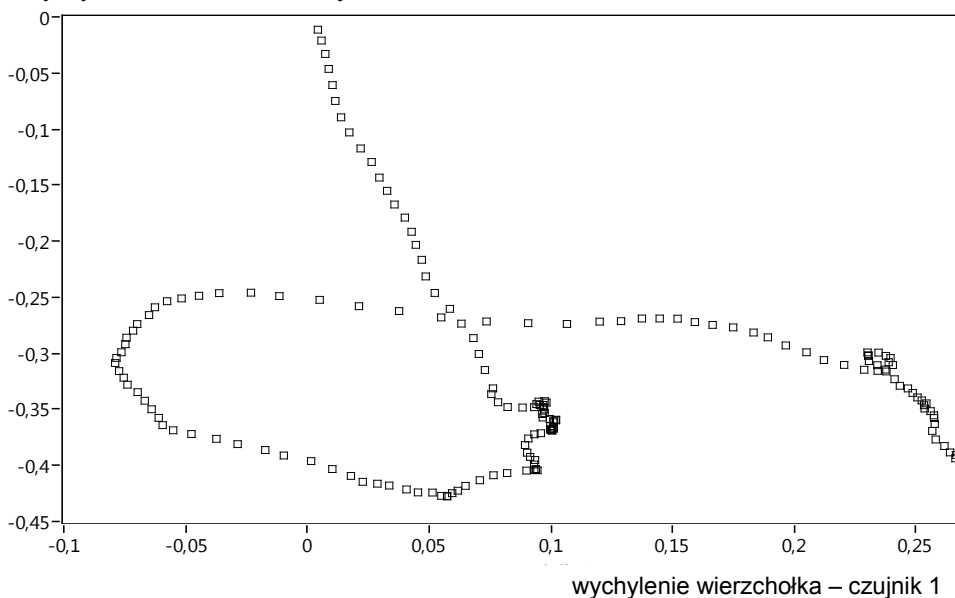
Rzędowość wymuszenia można wyznaczyć metodą zaproponowaną przez Heatha [20] na podstawie stosunku długości osi elipsy na wykresie XY , przedstawiającym trajektorię wierzchołka zmierzoną dla wybranego rezonansu przez parę czujników. Sposób ten ma ograniczone zastosowanie praktyczne, ponieważ kształt elipsy jest zwykle niepełny i zakłócony szumem. Wybrano dwa rezonanse: o niższej odpowiedzi (M1/EO2, obroty nr 850–1020) i wyższej (M2EO7, obroty 1150–1300) i wykreślono dla nich elipsy na rys. 40 i 41.

wychylenie wierzchołka – czujnik 2



Rys. 40. Trajektoria łopatki w rezonansie M1EO2, obroty nr 1150–1300

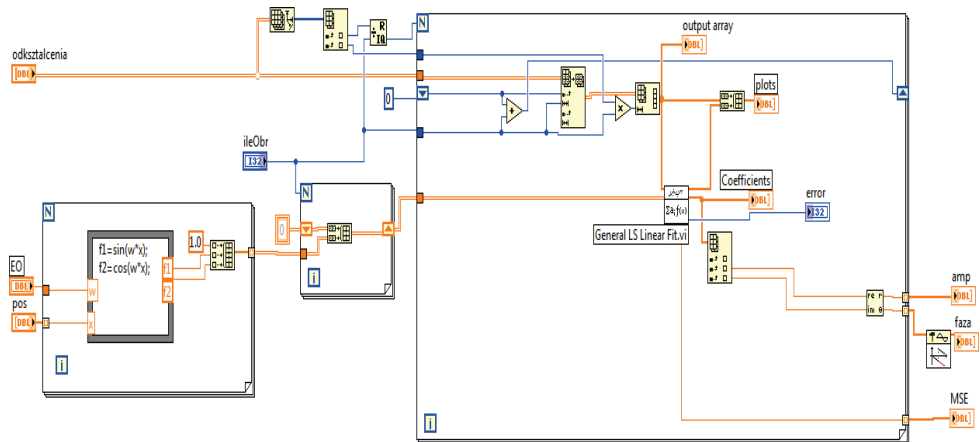
wychylenie wierzchołka – czujnik 2



Rys. 41. Trajektoria łopatki w rezonansie M2EO7 dla obrotów nr 850–1020

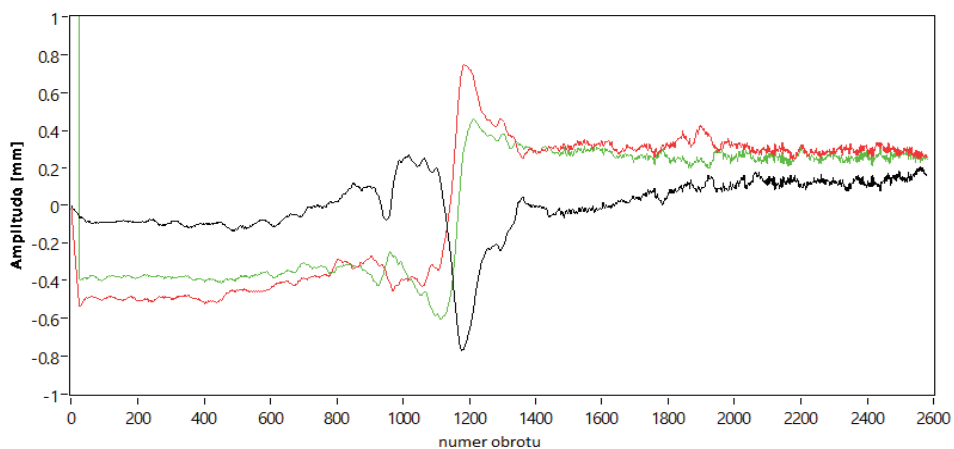
3.3.2. Estymacja parametrów drgań

W LabVIEW wykonano program realizujący dopasowanie za pomocą funkcji bibliotecznej General LS Linear Fit (rys. 42), która potrzebuje macierzy obserwacji, takiej samej jak dzielenie macierzowe w Matlabie. Program może wykonać dopasowanie dla danych z jednego lub więcej obrotów (kontrolka *ileObr*), dzięki czemu rozwiązanie układu powinno być dokładniejsze.

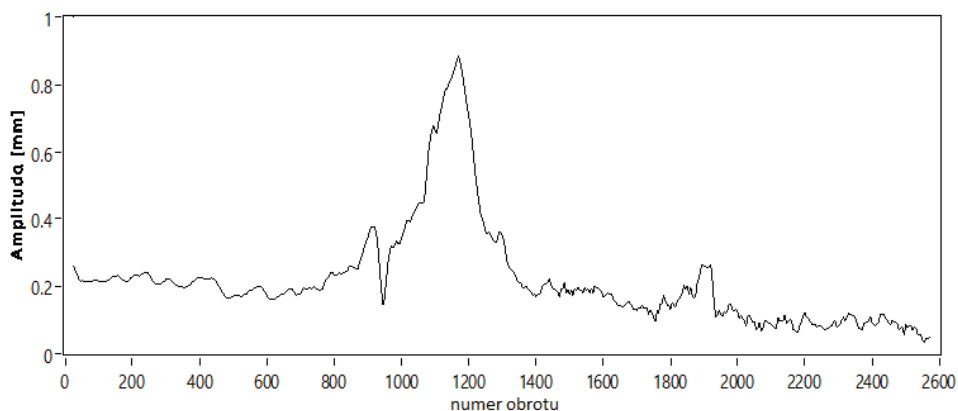


Rys. 42. Kod programu do liniowego dopasowania danych z czujników do funkcji sinus

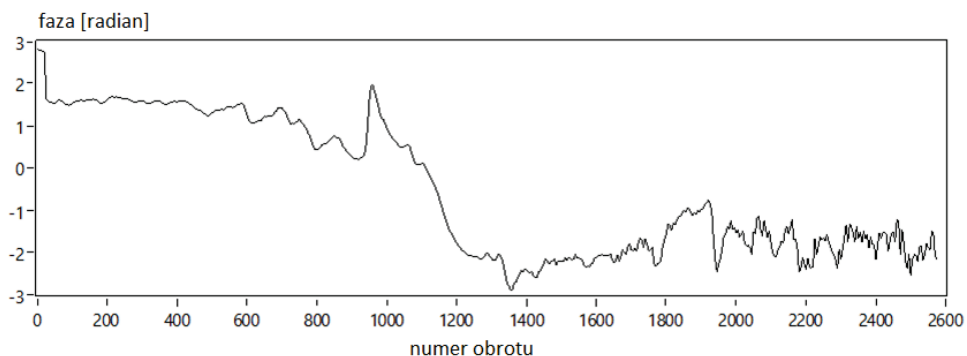
Po wygładzeniu danych filtrem dolnoprzepustowym (rys. 43) i przyjęciu $ileObr = 5$ uzyskano następujące przebiegi amplitudy i fazy (rys. 44 i 45).



Rys. 43. Wyglądzone wychylenie wierzchołka wybranej łopatki obserwowane przez trzy czujniki przy przejściu przez dwa rezonanse



Rys. 44. Estymacja amplitudy drgań wybranej łopatki



Rys. 45. Estymacja fazy drgań wybranej łopatki

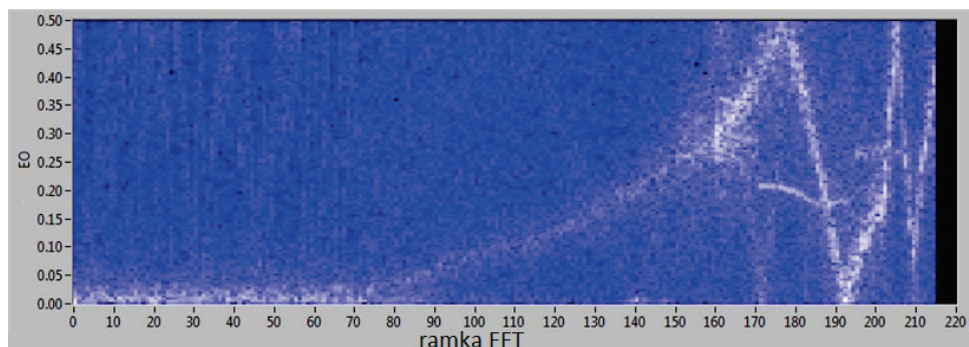
3.3.3. Widmo pojedynczych łopatek

Odształcenia wierzchołka wybranej łopatki w kolejnych obrotach można poddać analizie widmowej szybką transformatą Fouriera, uzyskując widmową gęstość mocy drgań. Dla pojedynczego czujnika pasmo przenoszenia ograniczone jest do połowy częstości obrotowej. Odpowiedzi o wyższej częstotliwości przenoszone są do pasma podstawowego (*aliasing*). Otrzymywane widmo wymaga więc rekonstrukcji, aby możliwe było wyznaczenie rzeczywistej częstotliwości drgań łopatek. Można ją obliczyć, mierząc częstotliwość dominującej linii w widmie sygnału wychylenia łopatki, a następnie dodając lub odejmując ją od założonej krotności częstotliwości obrotowej.

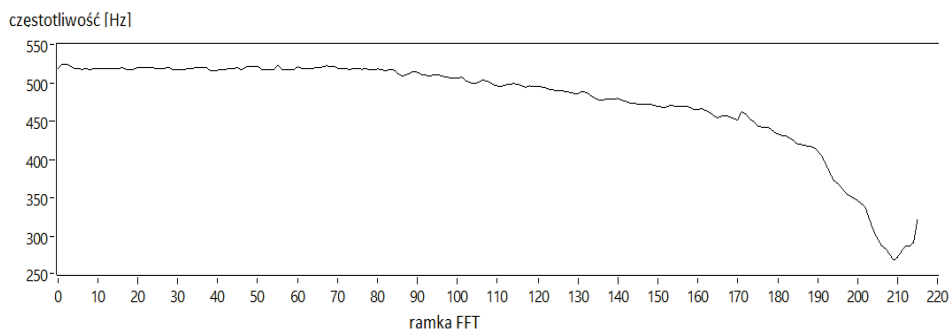
Rozdzielczość pomiaru częstotliwości zależy od szerokości okna FFT. Dane zawarte w oknie zasadniczo powinny być stacjonarne lub quasi-stacjonarne. Ze względu na stosunkowo szybkie zmiany prędkości obrotowej długości okna muszą być zmniejszone, więc rozdzielczości osiągalne metodą FFT w stanach przejściowych są niezadowalające. Można zmniejszyć niepewność pomiaru częstotliwości przez nakładanie kolejnych okien (*overlapping*) lub dodanie sygnału dodatkowego czujnika jako urojonego (kwadraturowego) składnika reprezentacji sygnału.

Wykres na rys. 46 przedstawia przebieg widmowej gęstości mocy wybranej łopatki podczas deceleracji wirnika w paśmie od 0 do połowy prędkości obrotowej ($\frac{1}{2} EO$) uzyskany w wyniku zastosowania krótkookresowej transformaty Fouriera (STFT). Aby utrzymać stałą rozdzielczość wykresu, wykorzystano numer obrotu zamiast czasu na osi x oraz rzędowość zamiast częstotliwości na osi y .

W praktyce użyteczność widma pojedynczej łopatki ogranicza się do wstępnej analizy jakościowej, gdyż uzyskiwane tą metodą estymaty amplitudy i częstotliwości (rys. 47) mają dużą niepewność ze względu na *aliasing*, kwantyzację oraz niski stosunek sygnał / szum składowych drganiowych w widmach.



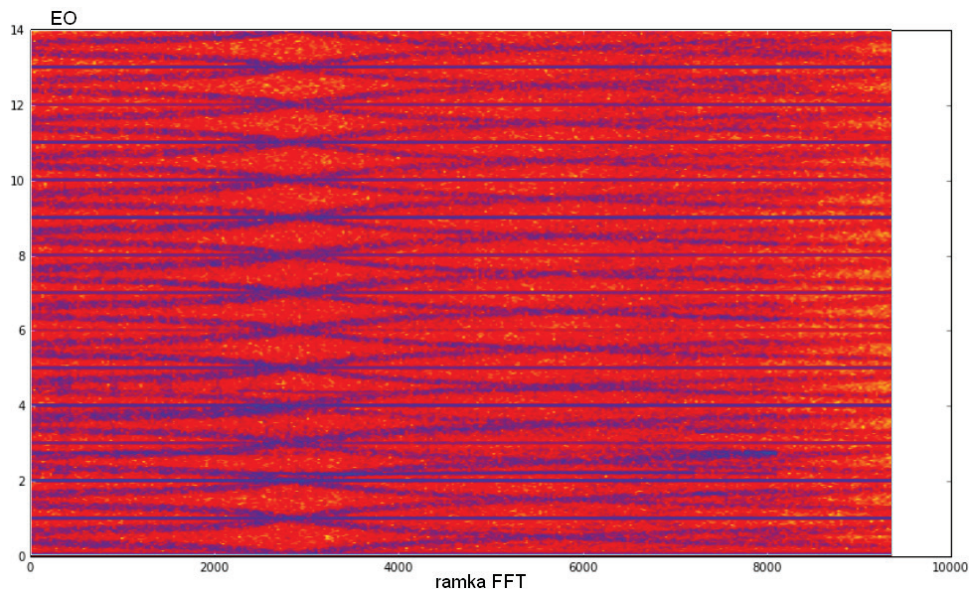
Rys. 46. Widmo pojedynczej łopatki I stopnia sprężarki w trakcie zmniejszania obrotów



Rys. 47. Przebieg częstotliwości drgań łopatek uzyskany w wyniku rekonstrukcji widma pojedynczej łopatek

3.3.4. Widmo wszystkich łopatek

Drgania asynchroniczne obejmują często całą palisadę ze względu na sprzężenie sąsiednich łopatek za pośrednictwem przepływającego czynnika roboczego. Preferowaną metodą ich obserwacji jest widmo wszystkich łopatek (rys. 48). W stosunku do widma pojedynczych łopatek pasmo jest zwielokrotnione o liczbę łopatek b i wynosi $\frac{1}{2} EO b$. Dane z kolejnych łopatek i obrotów są umieszczane w oknie i transformowane algorytmem DFT. Alternatywnie można uzupełnić okno zerami, tak aby jego długość była potęgą liczby 2 i zastosować FFT.



Rys. 48. Widmo wszystkich łopatek I stopnia sprężarki

Widmo wszystkich łopatek zakłada, że pióra drgają w formach z określoną liczbą średnic węzłowych. Ze względu na symetrię kołową postacie drgań ze średnicami węzłowymi występują w ortogonalnych parach, które w wyniku ruchu obrotowego widoczne są jako biegnące fale (*traveling wave*) w nieruchomym układzie odniesienia. Do wyznaczenia średnicy węzłowej drgań wymagane są dwa czujniki o znanych położeniach kątowych [15].

Częstotliwość drgań obserwowana w widmie sygnału czujnika równa jest:

$$f = f_b + nd * n / 60 \quad (3.23)$$

gdzie:

- f_b – częstotliwość drgań pojedynczej łopatki,
- nd – całkowita średnica węzłowa,
- n – prędkość obrotowa.

Jeśli dochodzi do synchronizacji drgań palisady łopatek, obserwowana częstotliwość przeskakuje z linii odpowiadającej częstotliwości drgań własnych do częstotliwości fali biegnącej.

4

PRZYGOTOWANIE POMIARÓW DRGAŃ

4.1. Wprowadzenie

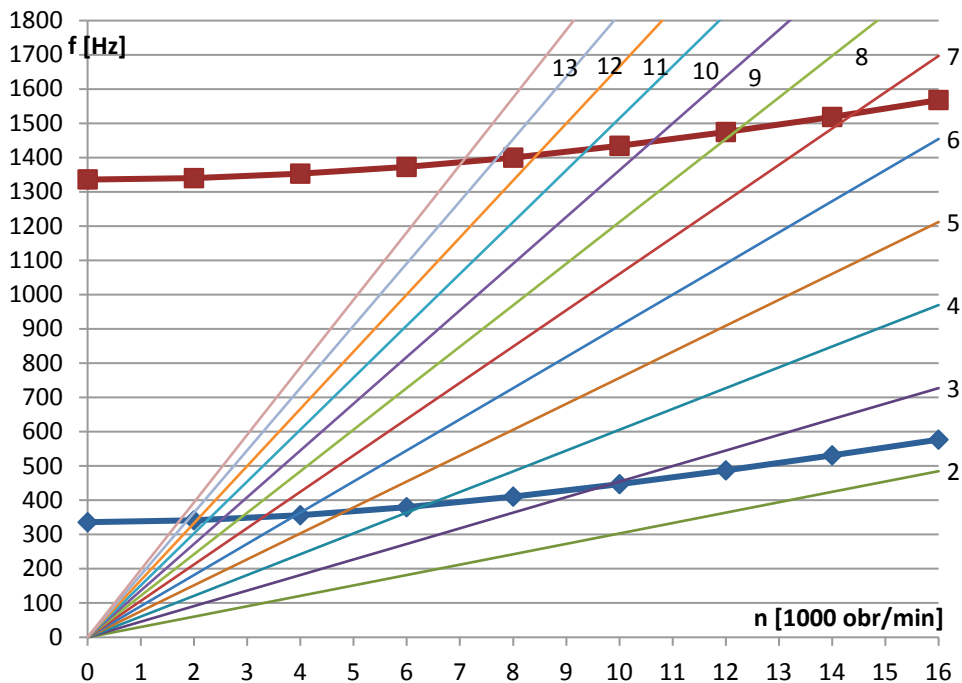
W rozdziale przedstawiono przykład zastosowania opracowanych metod analizy drgań łopatek w praktyce. Obiektem badań są łopatki robocze pierwszego i drugiego stopnia sprężarki silnika odrzutowego SO-3. Próby silnika w hamowni ITWL zaplanowano zgodnie z dobrymi praktykami testowania silników i analizy ich parametrów [41], które opierają się na długoletnim doświadczeniu krajowych i międzynarodowych zespołów badawczych.

Proces analizy danych powinien zostać zaprojektowany przed eksperymentem równoległe z konfiguracją systemu pomiarowego. Plan przetwarzania danych będący częścią programu prób powinien określać format danych, metody analizy, oprogramowanie, zadania uczestników eksperymentu i oczekiwane wyniki.

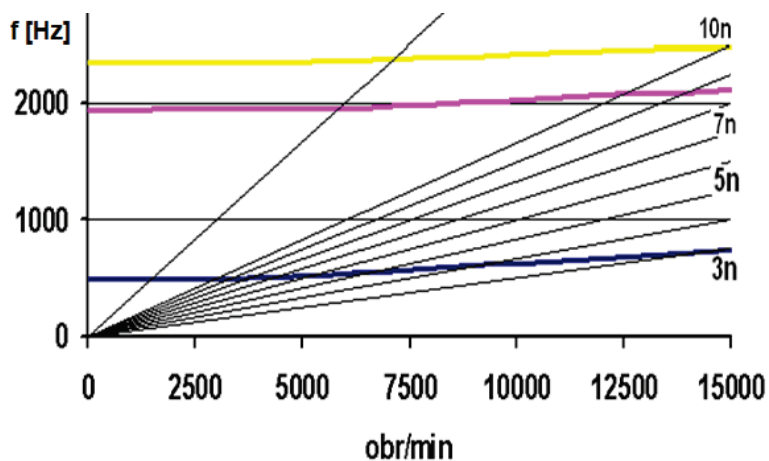
Poniżej udokumentowano prace przygotowujące do bezdotykowych pomiarów drgań łopatek, w wyniku których powstała nowa instalacja pomiarowa. Po raz pierwszy w Polsce zainstalowano kilkanaście czujników drgań łopatek w kadłubie sprężarki. Autor opracował i przetestował nowy system akwizycji danych oparty na komputerze przemysłowym NI PXI i cyfrowym przetwarzaniu próbek sygnałów czujników. Działanie systemu i integralność zapisywanych danych zostały sprawdzone w trakcie wstępnej próby silnika.

Podstawowym celem prób była analiza odpowiedzi drugiej postaci I stopnia oraz drgań II stopnia sprężarki. Odpowiedzi pierwszej postaci pierwszego stopnia sprężarki silnika SO-3 poznano podczas wcześniejszych projektów. Spodziewane rzędowości siły wymuszającej zostały określone dla występujących rezonansów na podstawie wykresów Campbella uzyskanych w wyniku analizy MES [63, 64]. Stwierdzono, że dla drugiej postaci I stopnia spodziewane są rzędowości 6–13x

(rys. 49), a dla pierwszego modu II stopnia 3–5x (rys. 50). Wartości te były podstawą do zaprojektowania rozłożenia czujników po obwodzie sprężarki.



Rys. 49. Wykres Campbella pierwszej i drugiej postaci drgań I stopnia sprężarki



Rys. 50. Wykres Campbella II stopnia sprężarki [64]

Tabela 2

Zależność częstotliwości drgań łopatek II stopnia sprężarki od prędkości obrotowej dla postaci nr 1–5 [64]

nr	0 obr/min (model MD)	0 obr/min (eksperyment)	15000 obr/min (model MD)	15000 obr/min Spin softening
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	494,42	<455 - 494>	713,10	675,45
2	2038,5	<1824 - 1936>	2201,0	2193,2
3	2490,1	<2320 - 2464>	2588,7	2581,4
4	4434,3	<4352 - 4368>	4512,8	4510,6
5	6040,6	<5936 - 6112>	6177,9	6174,5

4.2. Czujniki drgań łopatek

4.2.1. Rozstawienie czujników

W przypadku obserwacji rezonansu za pomocą dwóch czujników optymalne jest dysponowanie sygnałami przesuniętymi w fazie o 90° (ortogonalnymi). Jeśli φ jest kątem między czujnikami, a EO rzędowością rezonansu (krotnością prędkości obrotowej), to iloczyn $EO \varphi$ jest fazą drgań między czujnikami.

Wyrażenie $\sin(EO \varphi)$ przyjęto jako stopień mierzalności rezonansu synchronicznego. Optymalne są więc różnice w fazie równe 90° , 270° , a najgorsze równe 0 i 180° (tab. 3). W przypadku rzędowości $3x$ odstęp między czujnikami powinny wynosić: 30° , 90° , 150° , 210° . Opisana metoda jest skuteczna przy obserwacji pojedynczych rezonansów. W skomplikowanych przypadkach stosuje się bardziej złożone modele optymalizacji rozłożenia czujników [24].

Podczas analizy przemieszczeń łopatek z wykorzystaniem wielu czujników i transformaty Fouriera lepiej jest, aby odstęp między czujnikami były równe lub miały wspólny dzielnik.

Na podstawie tab. 3 wybrano rozłożenie co 10° na pierwszym stopniu do obserwacji rezonansów o rzędowości 6–13x drugiej postaci. Do obserwacji podstawowej postaci odpowiednie są istniejące gniazda systemu SNDŁ, odległe o $19,3^\circ$ od siebie. Na drugim stopniu wybrano rozłożenie co 15° w celu obserwacji rezonansów podstawowej postaci o rzędowości 3-5x. Wybrano położenie osiowe czujnika w środku cięciwy łopatki, ponieważ badane pierwsze dwie postaci obu stopni nie mają węzła drgań u wierzchołka.

Czujniki SNDŁ zamontowano z luzem 0,75 mm do wybranej łopatki, którą zabarwiono na czerwono. Tuleje czujników MR zlicowano z wewnętrzną powierzchnią korpusu sprężarki. Rant tulei uniemożliwiał zbliżenie czujnika MR do łopatki na więcej niż 1,5–2 mm.

Tabela 3

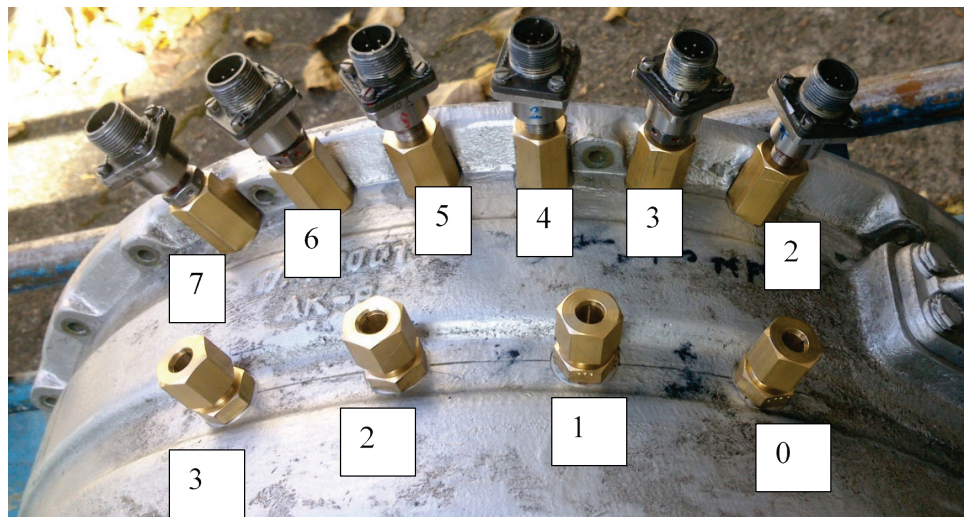
Obserwowalność rezonansu synchronicznego o rzędowości EO przy użyciu pary czujników

EO	Odstęp między czujnikami [°]										
	45	33	30	22,5	20	19,3	18	15	10	7,5	5
2	1,00	0,91	0,87	0,71	0,64	0,62	0,59	0,50	0,34	0,26	0,17
3	0,71	0,99	1,00	0,92	0,87	0,85	0,81	0,71	0,50	0,38	0,26
4	0,00	0,74	0,87	1,00	0,98	0,98	0,95	0,87	0,64	0,50	0,34
5	0,71	0,26	0,50	0,92	0,98	0,99	1,00	0,97	0,77	0,61	0,42
6	1,00	0,31	0,00	0,71	0,87	0,90	0,95	1,00	0,87	0,71	0,50
7	0,71	0,78	0,50	0,38	0,64	0,71	0,81	0,97	0,94	0,79	0,57
8	0,00	0,99	0,87	0,00	0,34	0,43	0,59	0,87	0,98	0,87	0,64
9	0,71	0,89	1,00	0,38	0,00	0,11	0,31	0,71	1,00	0,92	0,71
10	1,00	0,50	0,87	0,71	0,34	0,22	0,00	0,50	0,98	0,97	0,77
11	0,71	0,05	0,50	0,92	0,64	0,53	0,31	0,26	0,94	0,99	0,82
12	0,00	0,59	0,00	1,00	0,87	0,78	0,59	0,00	0,87	1,00	0,87
13	0,71	0,93	0,50	0,92	0,98	0,94	0,81	0,26	0,77	0,99	0,91
14	1,00	0,98	0,87	0,71	0,98	1,00	0,95	0,50	0,64	0,97	0,94
15	0,71	0,71	1,00	0,38	0,87	0,94	1,00	0,71	0,50	0,92	0,97

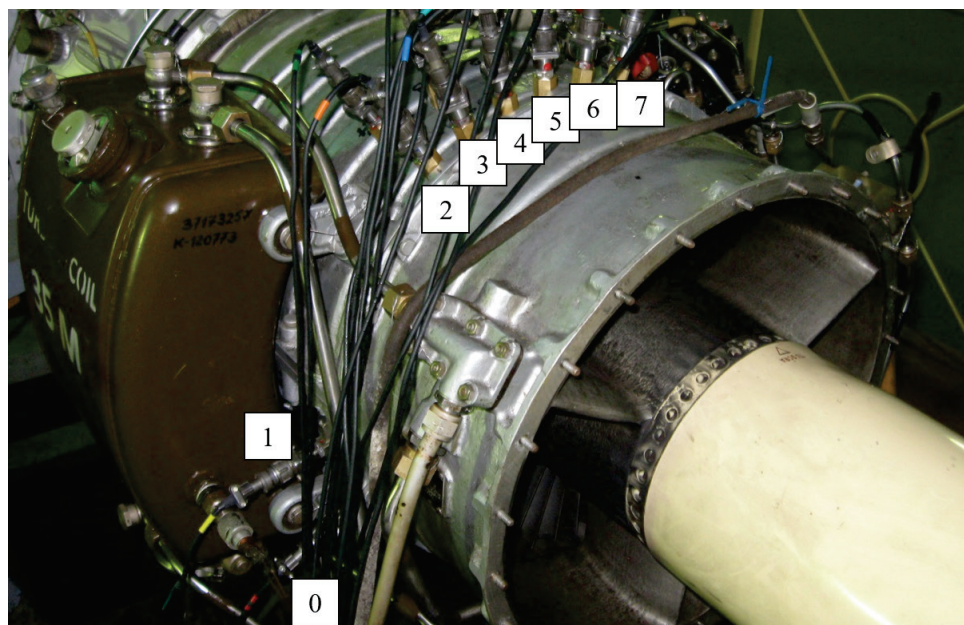
4.2.2. Montaż czujników na silniku odrzutowym

Nad pierwszym stopniem wirnikowym sprężarki zaplanowano wykonanie sześciu otworów pod czujniki indukcyjne SNDŁ konstrukcji ITWL, rozstawionych co 10° na obwodzie (rys. 51). Nad drugim stopniem wirnikowym sprężarki zaplanowano wykonanie czterech otworów pod czujniki indukcyjne SNDŁ, rozstawionych co 15° na obwodzie. Zamiennie z nimi na drugim stopniu stosowano czujniki magnetorezystancyjne (MR) z Instytutu von Karmana.

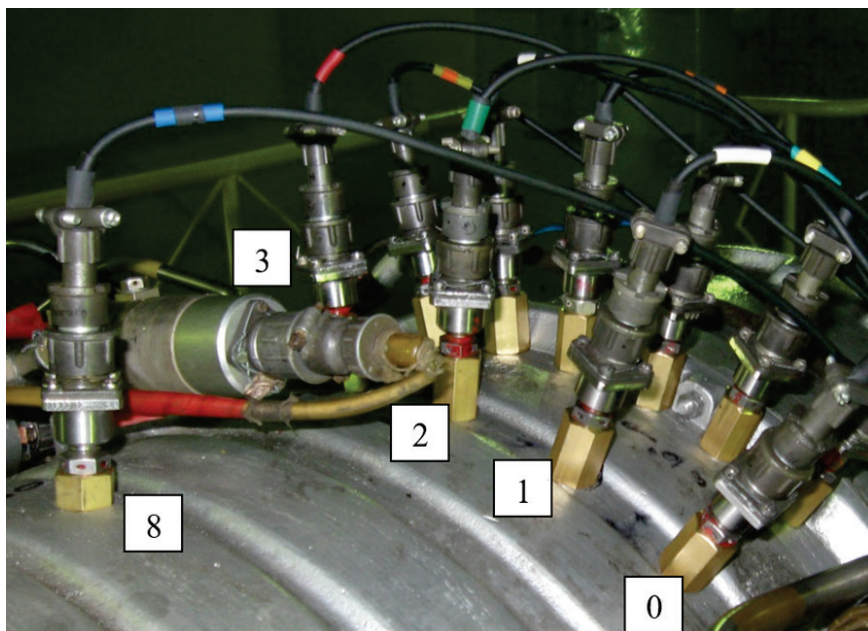
W celu ułatwienia indeksowania (numerowania) łopatek wykonano czujnik znacznika fazy (tzw. czujnik OPR, z ang.: *One per Rev*), który wycelowano w otwór o średnicy 6 mm, wykonany w pierścieniu pośrednim IV wirnika sprężarki.



Rys. 51. Gniazda czujników wykonane w górnej części korpusu sprężarki



Rys. 52. Silnik SO-3 na stoisku z zamontowanym kompletem czujników



Rys. 53. Czujniki na II stopniu sprężarki i czujnik fazy (widok w kierunku lotu)

4.3. System akwizycji danych

Zastosowano komputer przemysłowy NI PXIe-1065 z dyskiem SSD, po raz pierwszy zamontowany w stacji prób obok silnika na gumowej podstawie amortyzującej drgania. Sygnały próbkowano kartami PXIe-6358 z częstotliwością 500 kHz.

Czujniki SNĐŁ podłączano bezpośrednio do wzmacniacza karty przewodami o łącznej długości 4,5 m. Wzmacniacz karty skonfigurowano na zakres $\pm 1V$. Stan techniczny czujników SNĐŁ zweryfikowano wcześniej w laboratorium, wykorzystując model stopnia wirnikowego napędzany silnikiem elektrycznym.

Stosowany dotychczas program do synchronicznego zapisu na komputerach typu PXI został napisany od nowa z wykorzystaniem programowania obiektowego w celu zaimplementowania następujących funkcjonalności, realizowanych *on-line*:

- obsługa nowo zakupionych modułów serii X,
- monitorowanie błędów akwizycji,
- wyzwalanie na próbkach,
- pomiar odchylenia standardowego czasu przyjścia,
- pomiary parametrów sygnału, tj. amplitudy, RMS, poziomu składowej stałej, częstotliwości.

Zaprojektowano klasy:

- cAI – próbkowanie,
- cAI_trig – próbkowanie z wyzwaniem na próbkach,
- cCount – pomiar czasu przyścia licznikami.

Podstawowe metody tych klas to:

- init – konfiguracja karty i utworzenie zestawu plików do zapisu,
- start – uruchomienie akwizycji,
- read & save – odebranie danych od sterownika karty pomiarowej DAQmx i ich za pisanie do plików,
- done – zakończenie akwizycji i zamknięcie plików.

W trakcie akwizycji parametry próbkowanego sygnału analogowego oraz średnie wyniki wyzwania są mierzone online co sekundę i wyświetlane w tabeli w oknie programu (rys. 54), a także zapisywane do pliku w formacie .tdms, który można otworzyć w Excelu. Są to wartości charakteryzujące impulsy pochodzące od łopatek, takie jak:

- amplituda szczytowa górna (*high*) i dolna (*low*),
- poziom średni (DC),
- wartość skuteczna (RMS),
- amplituda międzyszczytowa (A_{pp}),
- częstotliwość przychodzenia łopatek (*frq*),
- znormalizowane odchylenie standardowe podziałki (*delta*)
- prędkość obrotowa (*rpm*).

Parametry te wykorzystywane są do monitorowania jakości sygnałów wejściowych oraz oceny poprawności programowego wyzwania.

DC levels								
	high	low	DC	RMS	App	frq	delta	rpm
2	2,12452	1,9333	2,0266	0,058783	0,191219	728	0,523014	824,393
2	2,18423	1,85455	2,02791	0,113148	0,329676	728	0,47083	824,544
2	2,24854	1,69098	2,02578	0,179981	0,557565	729	0,586722	823,236
2	2,36134	1,53663	2,03378	0,277126	0,824708	728	0,444853	824,198

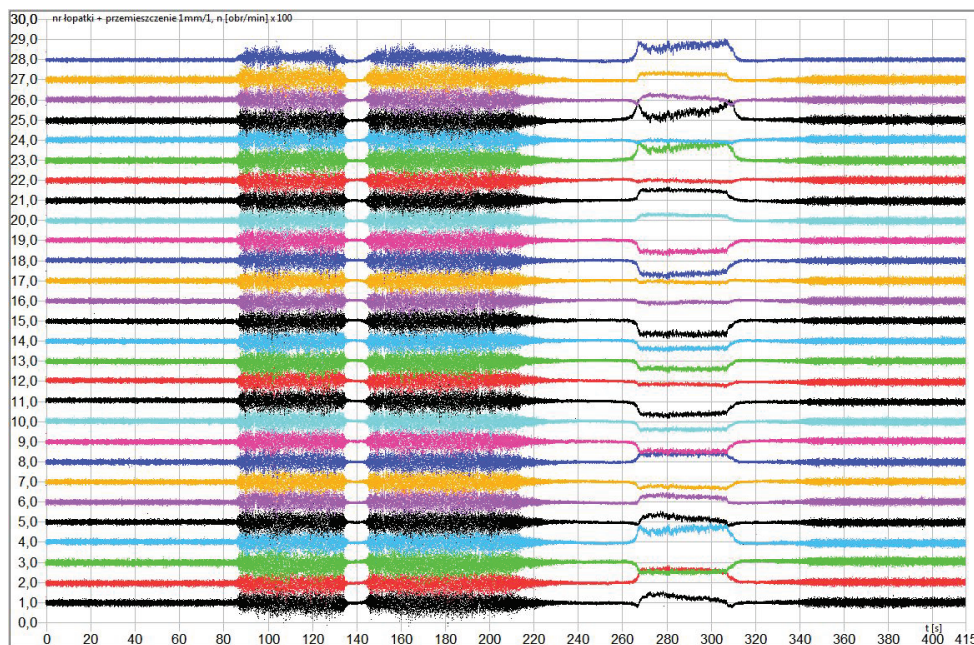
Rys. 54. Parametry sygnału analogowego dla kolejnych czujników – przykład

W celu weryfikacji systemu akwizycji wykonano wstępną próbę innego egzemplarza silnika SO-3, który posiadał jedynie standardowe gniazda systemu SNDŁ na pierwszym stopniu sprężarki. Uzyskano wyniki zbliżone lub lepsze od uzyskiwanych wcześniej licznikami (rys. 55).

4.4. Wizualizacja sygnału drgań łopatek

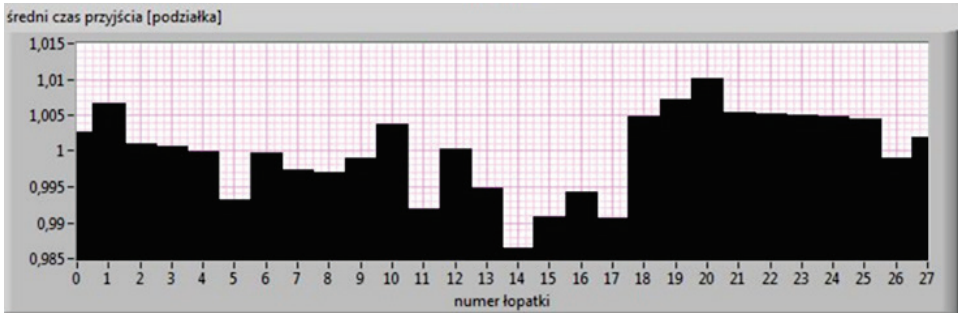
W celu sprawdzenia poprawności działania instalacji pomiarowej wykorzystywano wykresy przebiegów drgań łopatek (rys. 55). Wychylenia łopatek mierzone są raz na obrót wirnika, więc dla przejścia każdej łopatki pod czujnikiem kreślony jest punkt pomiarowy na mapie bitowej, podobnie jak dawniej na oscyloskopie. Punkty te tworzą krzywe, na których są widoczne odpowiedzi poszczególnych łopatek na wymuszenia w trakcie próby silnika, a także ewentualne zakłócenia i błędy wyzwalania w postaci brakujących i nadmiarowych impulsów.

Wychylenia łopatek uzyskano, odejmując czasy przyścia każdej łopatki od odniesienia, tj. średniego czasu przyścia łopatek lub czasu przyścia znacznika. Uzyskaną różnicę (tzw. błąd fazy) w celu wizualizacji wzmacniano i przeliczono na długość łuku wyrażoną w milimetrach.

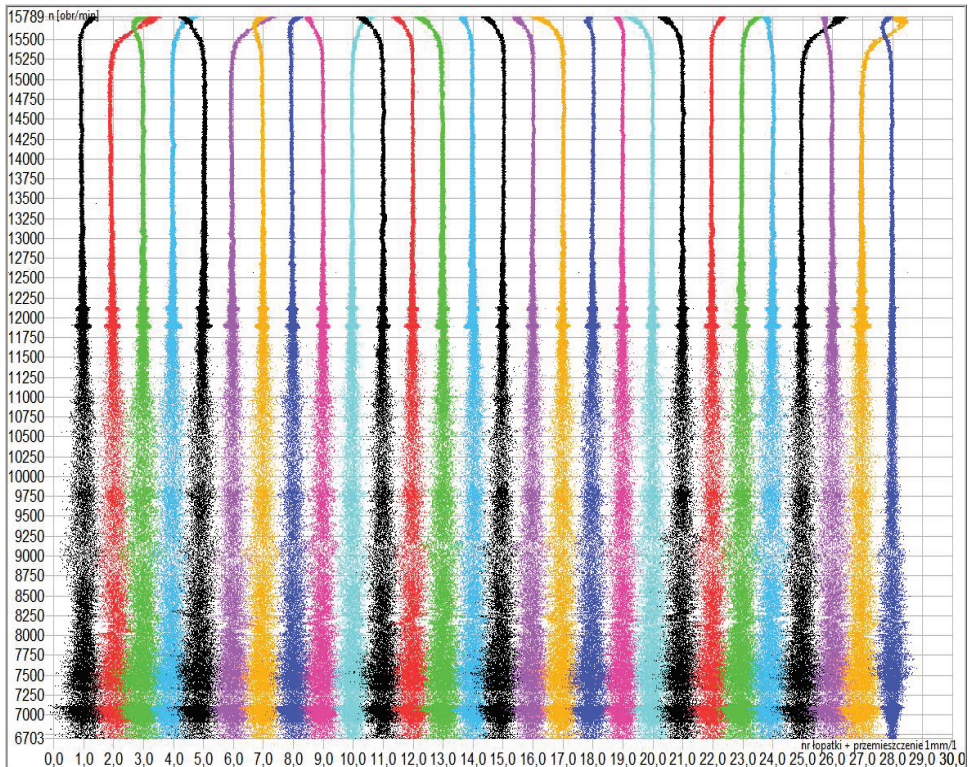


Rys. 55. Przebieg drgań I stopnia sprężarki podczas próby wstępnej

Na rys. 56 przedstawiono wzorec położenia równowagi dla wszystkich łopatek wieńca (*stack pattern*). Znormalizowane położenia łopatek, pomniejszone o numer łopatki są uśrednione dla całego zapisu. Rozkład pokazuje oczekiwany moment pojawienia się łopatki w przypisanym jej oknie o szerokości podziałki i jej statyczne położenie względem tego okna. Rozkład średnich czasów przyścia jest charakterystyczny dla wieńca i jest używany do numerowania łopatek.



Rys. 56. Wzorec położenia równowagi łopatek I stopnia sprężarki



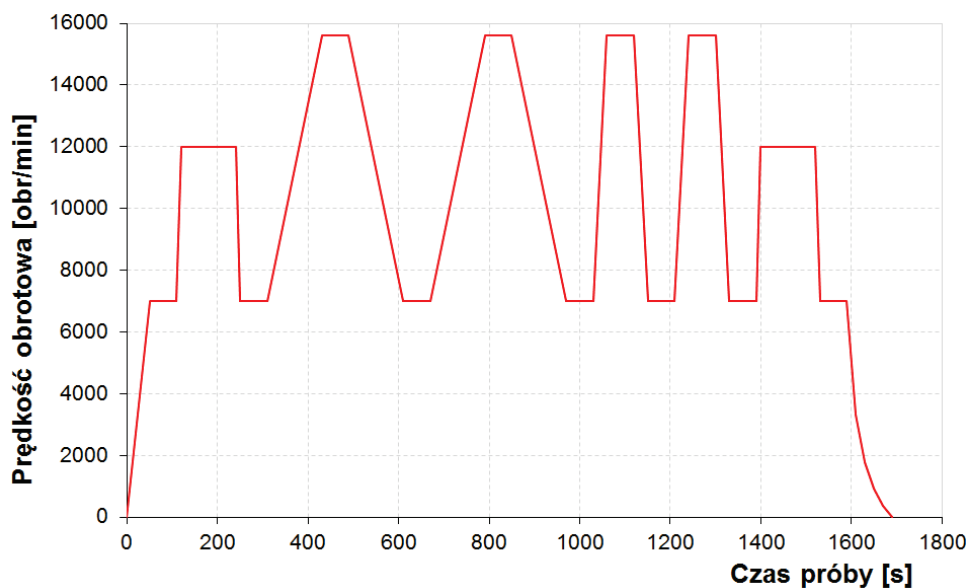
Rys. 57. Widmo drgań łopatek I stopnia sprężarki dla próby wstępnej

Przebiegi drgań łopatek uzyskane w trakcie próby wstępnej zbliżone są do wykresów widma drgań uzyskiwanych za pomocą systemu SNDŁ-1b/SPL-2b [72]. Powiększenie szerokości krzywej w postaci chmury punktów związane jest z drga-

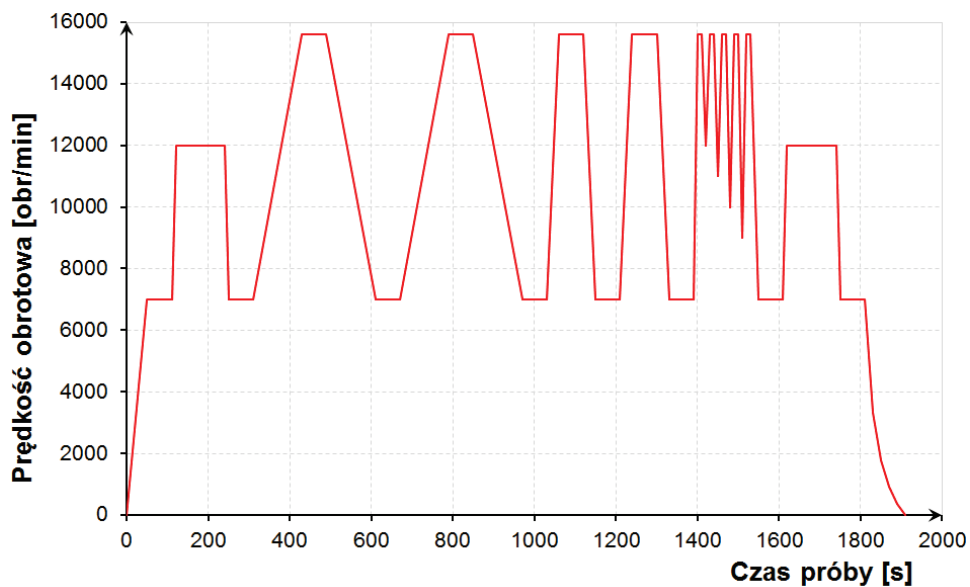
niami asynchronicznymi. Dla prędkości startowej widoczne są przejścia przez rezonanse drgań łopatek w postaci „zygzaków” odwzorowujących zmianę fazy w rezonansie (rys. 57).

4.5. Program prób silnika odrzutowego

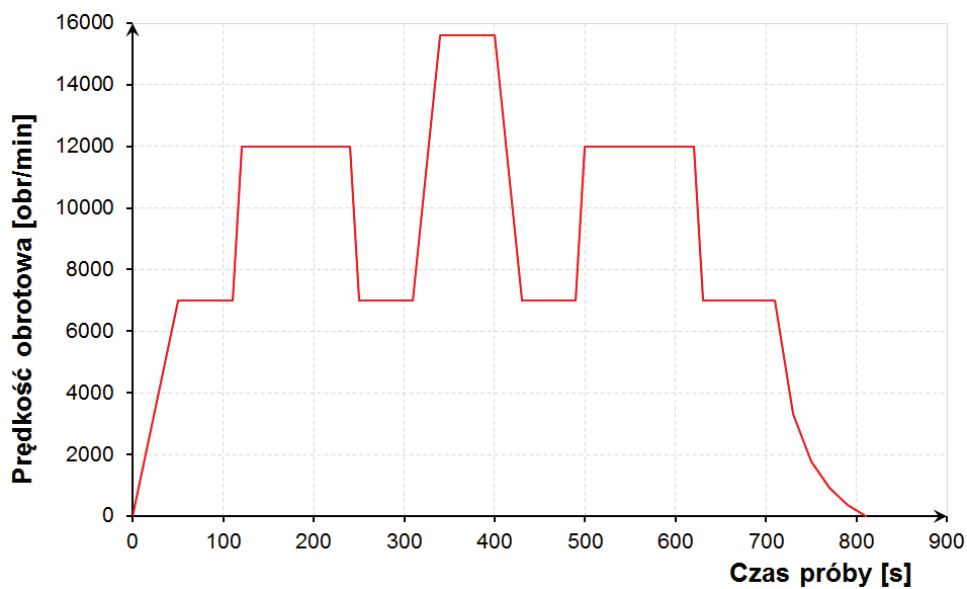
Przyjęte profile prób 1–3 (rys. 58–60) zawierają cykle badawcze oraz operacje wynikające z obowiązujących zasad eksploatacji, tj. rozruch, podgrzewanie, manewr antywibracyjny, sprawdzenie zakresów i przyspieszeń, chłodzenie, wybieg. Cykle badawcze to płynna zmiana prędkości silnika od biegu jałowego do zakresu startowego, jego ustabilizowanie i powrót w takim samym tempie. Program nr 2 zawiera przyspieszenia ponawiane, które generują zwiększone wymuszenia drgań.



Rys. 58. Program nr 1 próby silnika na stanowisku badawczym



Rys. 59. Program nr 2 próby silnika na stanowisku badawczym



Rys. 60. Program nr 3 próby silnika na stanowisku badawczym

Wykonano próbę silnika z zamontowanym pełnym zestawem czujników. Konieczne było wyrównywanie sygnałów z czujników w systemie analizy danych (*alignment*), opisane w rozdz. 1. Do numeracji łopatek wykorzystano sygnał czujnika raz na obrót. Czas przyścia znacznika fazy przyjęto jako początek obrotu, a następnie korygowano o kąt położenia czujnika.

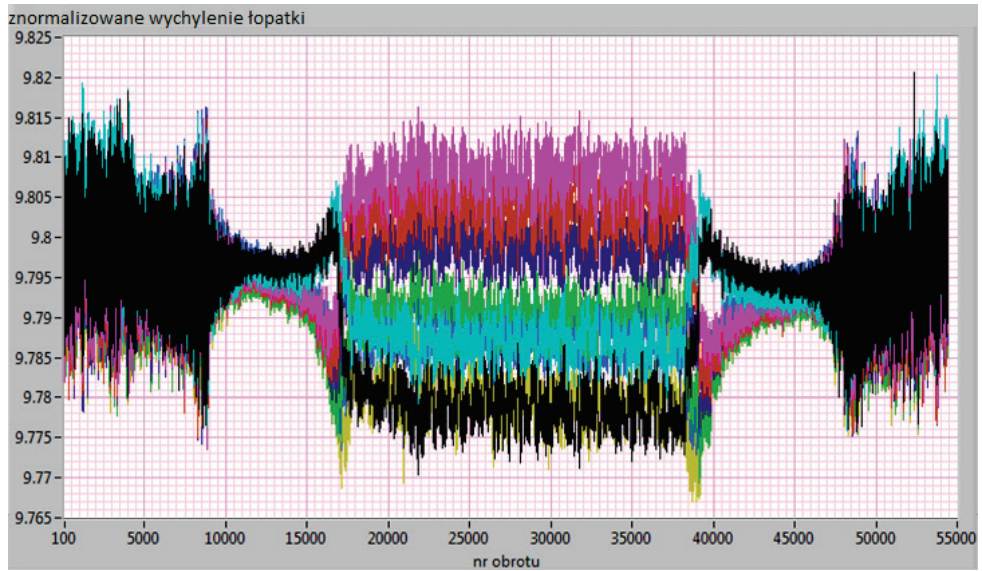
Stosowane narzędzie na podstawie fizycznych położenia czujników przeliczyło zależności fazowe i przypisało czasy przyścia właściwym łopatkom, co potwierdziło poprawność działania systemu rejestracji. Składowa stała sygnału czasu przyścia różniła się jednak nawet o 0.15 podziałki dla różnych czujników, co wynikało z niedokładnego wykonania otworów oraz niewielkich różnic w działaniu torów pomiarowych. Następnie korygowano położenia czujników w taki sposób, aby w zakresie najmniejszych drgań, tj. dla 12 000–14 000 obr/min, składowa stała czasu przyścia łopatki była zbliżona dla wszystkich czujników (tab. 4).

Na rys. 61 przedstawiono wynik wyrównywania sygnałów ośmiu czujników na pierwszym stopniu sprężarki. Wykres przedstawia wychylenia wybranej łopatki względem znacznika w kolejnych obrotach, znormalizowane do długości podziałki międzyłopatkowej (46.5 mm). Na rys. 62 pokazany jest rozkład położenia równowagi łopatek dla ośmiu wyrównanych czujników.

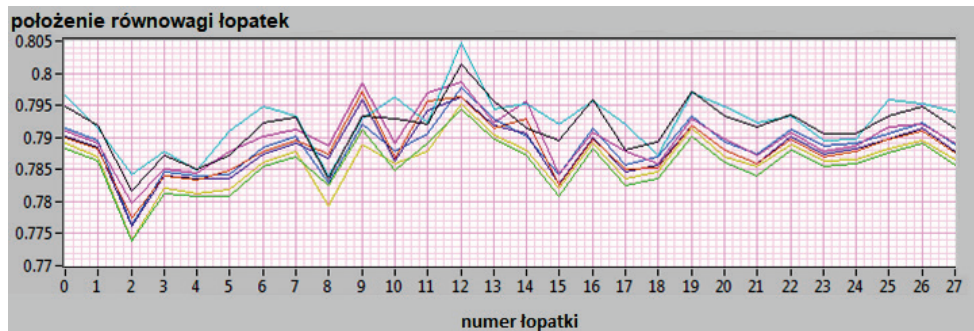
Tabela 4

Położenia czujników: planowane i przyjęte do analizy po korekcie

czujnik	Położenie planowane		Położenie po korekcie	
	kąt	odstęp	kąt	odstęp
0	0.0		0.0	
1	19.3	19.3	19.7	19.7
2	83.9	64.6	83.9	64.2
3	93.9	10.0	93.4	9.5
4	103.9	10.0	103.1	9.7
5	113.9	10.0	113.1	10.0
6	123.9	10.0	122.7	9.6
7	133.9	10.0	132.7	10.0



Rys. 61. Wychylenie wybranej łopatki I stopnia sprężarki w trakcie przejścia z biegu jałowego do zakresu startowego i z powrotem



Rys. 62. Rozkład położenia równowagi łopatek I stopnia sprężarki

5

WYBRANE WYNIKI ANALIZY DRGAŃ

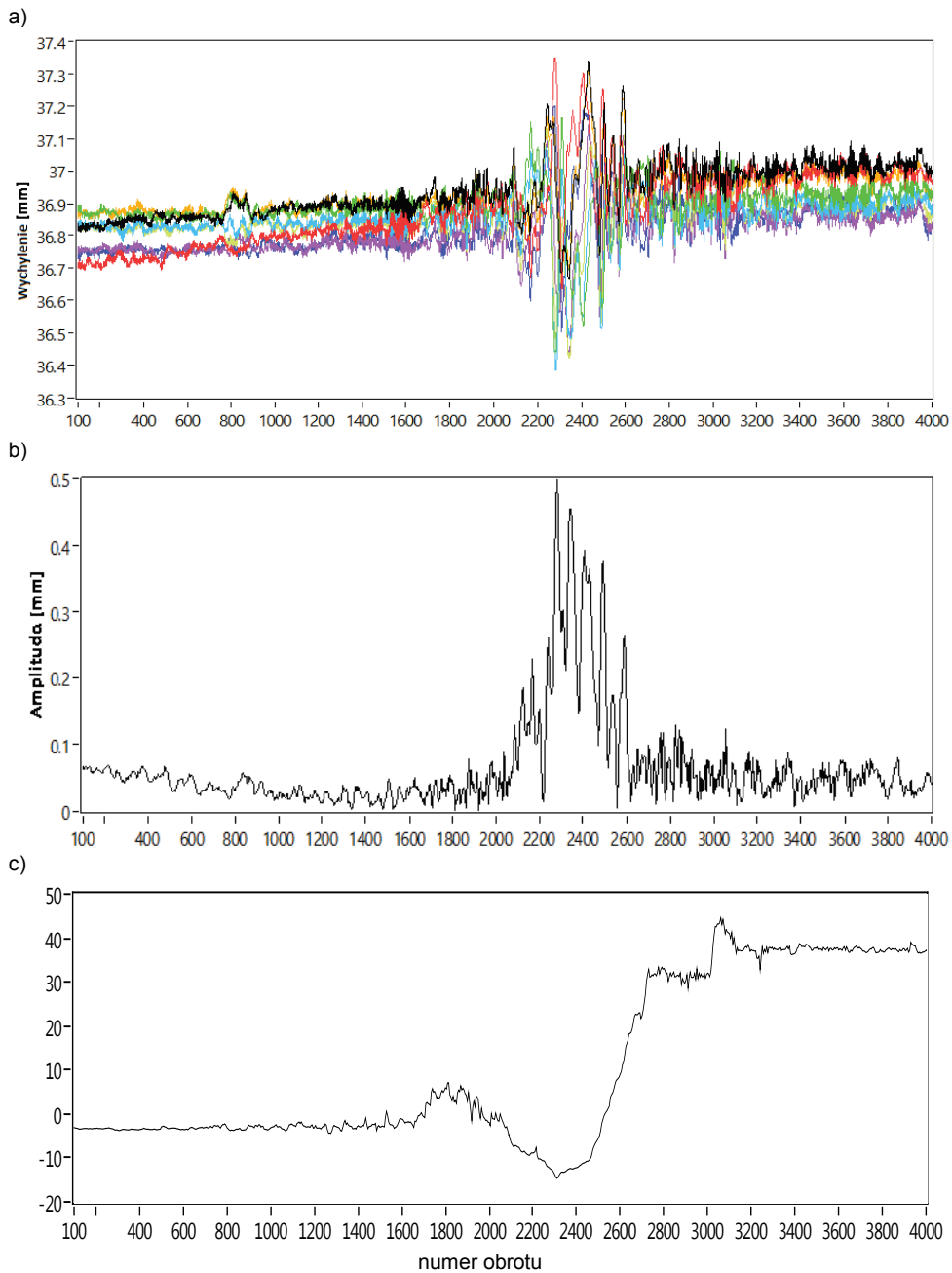
5.1. Dopasowanie wybranych rezonansów

Przedmiotem analizy w pracy są drgania wymuszone łopatek I i II stopnia sprężarki zmierzone podczas prób silnika SO-3 na hamowni. Najważniejszym etapem przetwarzania danych jest obwodowe dopasowanie wychyleń łopatek do modelu oscylatora o jednym stopniu swobody wykonywane dla fragmentów zapisów obejmujących badane rezonanse drgań.

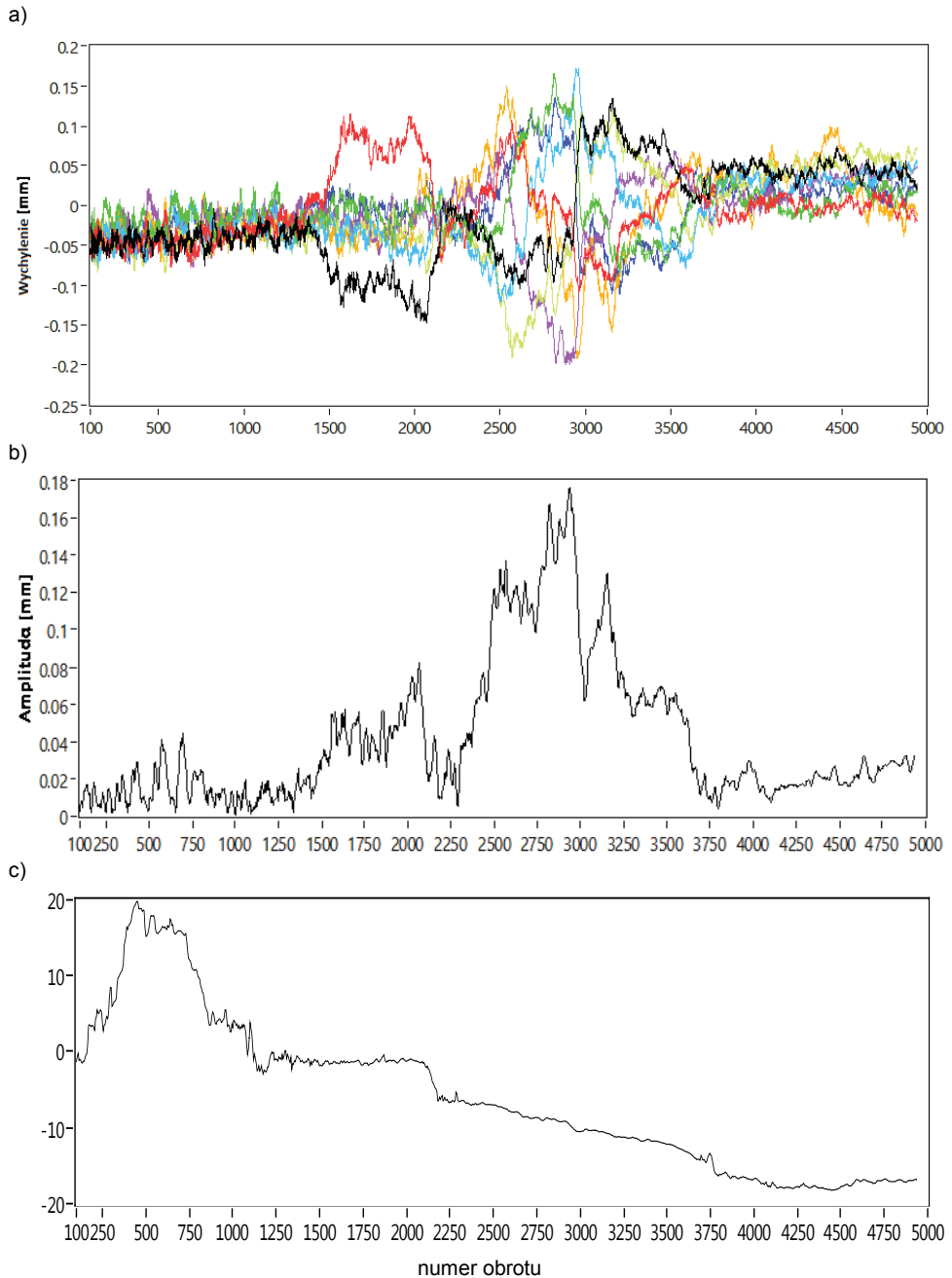
Okazało się, że w zapisanych przebiegach wychylenia łopatek występowały składowe niepożądane, takie jak drgania asynchroniczne i zakłócenia. Aby je usunąć, zastosowano filtr grzebieniowy o oknie długości 25. Składową stałą usuwano, stosując medianę. Przebiegi łopatek z różnych czujników mają różne składowe stałe, a często również trend liniowy. Przed dopasowaniem konieczne jest tzw. zerowanie, czyli usunięcie trendu [59] poprzez regresję liniową przebiegów w wybranym przedziale.

Stosowana metoda i system pomiarowy odpowiednie są do analizy odpowiedzi rezonansowych o amplitudzie rzędu 0.05 mm i większych. Dla wybranych łopatek uzyskano $A = 0.5$ mm dla rezonansu M1/EO3 i 0.18 mm dla M2/EO7 (rys. 63 i rys. 64). Zgodnie z oczekiwaniami amplituda maleje wraz z rzędowością wymuszenia.

Uzyskane wyniki dopasowania pokazują, że amplituda jest w rzeczywistości kilkadziesiąt procent większa niż maksymalne wychylenie odczytane z wykresu pojedynczego czujnika (zygzaka), co opisano w publikacji [20]. Odczyt metodą Zabłockiego [82] powinien być więc używany jako pierwsze przybliżenie, natomiast wiarygodne pomiary drgań synchronicznych wymagają systemu wieloczujnikowego.



Rys. 63. Wychylenia łopatki nr 1 zmierzone przez osiem czujników przy przejściu przez rezonans M1/EO3 oraz wynik dopasowania: $A = 0.5$ mm, $n_0 = 7900$ obr/min, $f_0 = 395$ Hz.



Rys. 64. Wychylenia łopatki nr 13 zmierzone przez osiem czujników przy przejściu przez rezonans M2/EO7; wynik dopasowania: $A = 0.18$ mm, $n_0 = 12\,700$ obr/min, $f_0 = 1481.7$ Hz

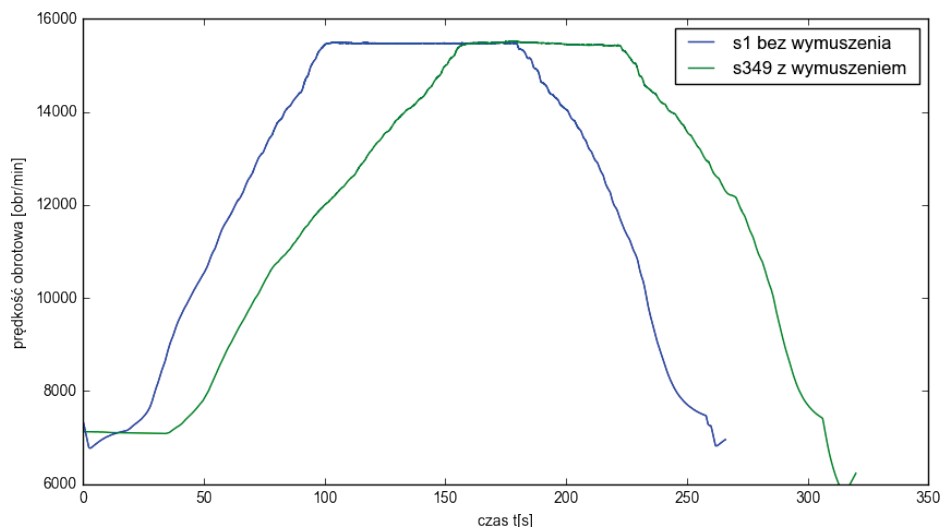
5.2. Analiza drgań łopatek I stopnia sprężarki

W praktyce liczba łopatek i rezonansów do przeanalizowania jest na tyle duża, że operacje filtrowania, zerowania i dopasowania rezonansów muszą być zautomatyzowane. Do analizy danych z prób silnika zastosowano program BTT Batch Processor firmy Rolls-Royce [23]. Algorytmy stosowane w programie opisane są w [24, 57, 56]. Zamiennie stosowano również program EMTD Multitool [60]. Metodyka wykonywania pomiarów i analizy danych została opisana szerzej w artykule [51].

Przygotowano dwa zestawy danych (rys. 65) pochodzące z ośmiu czujników drgań łopatek na I stopniu sprężarki i czujnika fazy, zapisane podczas prób silnika wykonywanych:

- 1) przy braku wymuszenia we wlocie - s1,
- 2) z zainstalowanym wymuszeniem we wlocie - s349.

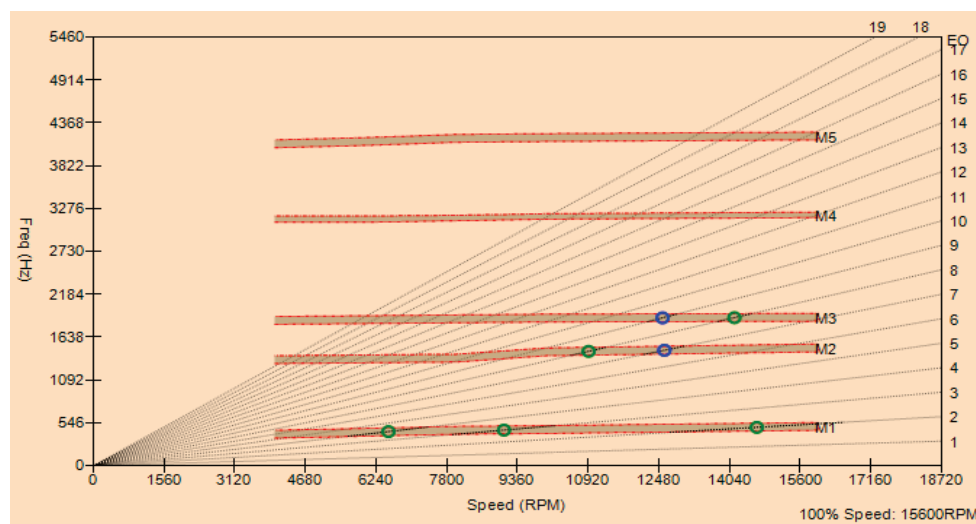
Analizie poddano cykl, nazywany „shot”, zawierający manewry zwiększania i zmniejszania prędkości obrotowej. Niestety program Batch Processor nie był w stanie wczytać zapisu z ciałem obcym we wlocie, ze względu na znacznie odkształcony rozkład położenia równowagi. Aby to obejść, usunięto z pliku zakres startowy.



Rys. 65. Fragmenty prób silnika wybrane do analizy

Przybliżona zależność częstotliwości drgań łopatek od prędkości obrotowej dla wybranych postaci drgań znana jest z wyników analizy numerycznej MES [64].

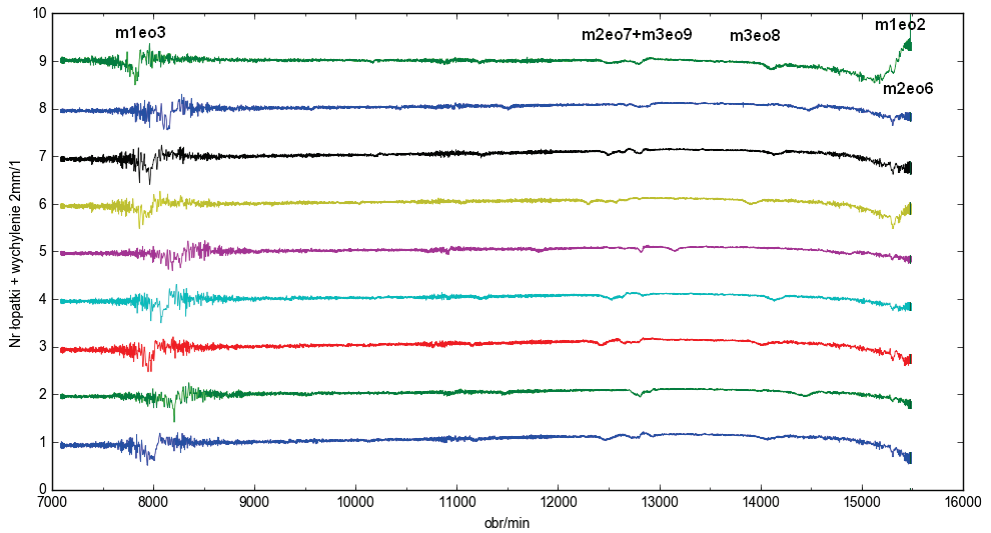
Tabełę z tymi danymi wczytano do Batch Processor, który wykreślił je na wykresie Campbella (rys. 66). Do analizy wybrano najważniejsze rezonanse, tj. M1/EO2, M1/EO3, M2/EO7, M2/EO8, które będą przedmiotem dopasowania obwodowego. Odpowiedzi te zidentyfikowano na wykresie wstępnie przetworzonego sygnału czujnika (rys. 67). Widoczne jest, że rezonanse M1/EO2 i M2/EO6 (15500 obr/min) oraz M2/EO7 i M3/EO9 (12500 obr/min) występują blisko siebie, więc wymagają analizy podwójnej, tzn. modelu o dwóch stopniach swobody.



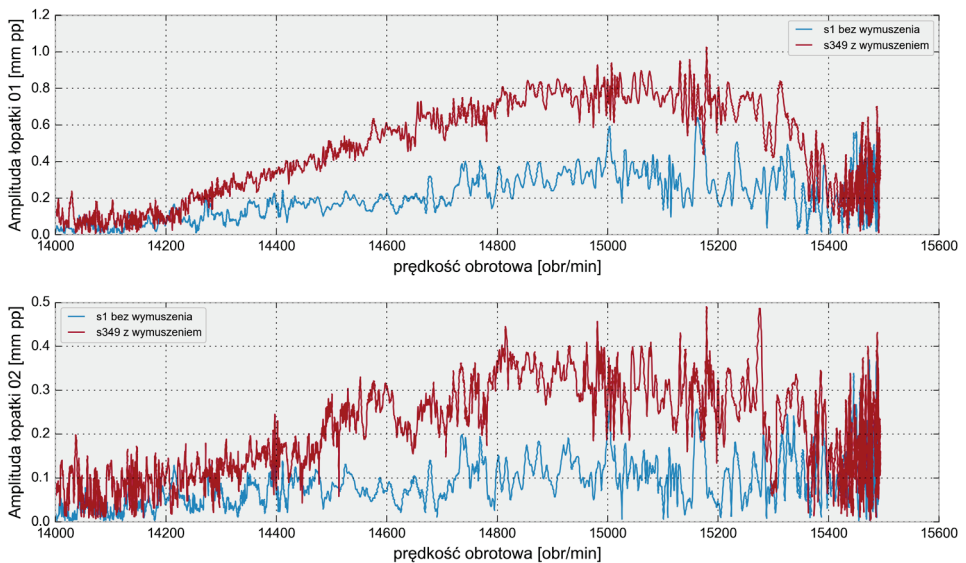
Rys. 66. Wykres Campbella I stopnia sprężarki w programie Batch Processor – wybór rezonansów do dopasowania

Wyniki wykonanej analizy uzyskano w postaci przebiegów amplitudy, zbieżności dopasowania i fazy w plikach *full?.csv (rys. 68 i 69). Zaobserwowano, że wymuszenie zainstalowane we wlocie kilkakrotnie zwiększa odpowiedź rezonansu M1/EO2 i innych odpowiedzi występujących w zakresie dla $n > 12\,000$ obr/min. Dla zapisu s349 położenia średnie są w wyniku silnych drgań rezonansowych pozornie odchyłone powyżej 14 500 obr/min. Oba programy mają trudności z przetworzeniem tego rezonansu, ponieważ nie są zaprojektowane do tak dużych odpowiedzi synchronicznych obecnych w szerokim zakresie prędkości. Batch Processor zgłasza wtedy błąd podziałki, a Multitool próbuje wyprostować przebieg rezonansu metodą regresji liniowej.

Rezonans M1/EO3 występuje w zakresie drgań asynchronicznych obserwowanych w sprężarce silnika SO-3 dla $n < 12\,000$ obr/min, co może zmniejszać dokładność analizy synchronicznej (rys. 69). Wpływ wymuszenia we wlocie na rezonans M1/EO3 jest niewielki.



Rys. 67. Wychylenia łopatek w funkcji prędkości obrotowej po filtracji dolnoprzepustowej dla zapisu z wymuszeniem s349 z czujnika 1

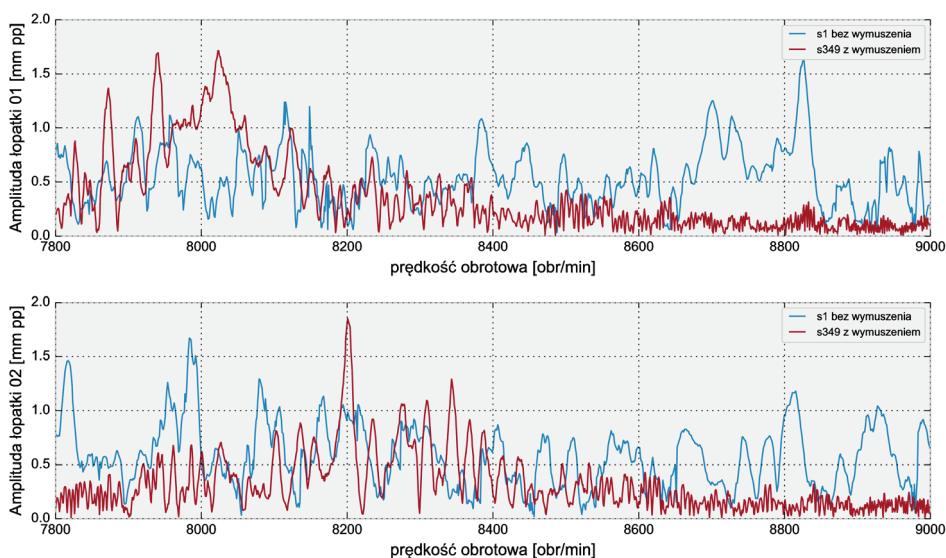


Rys. 68. Amplituda odpowiedzi M1/E02 łopatek nr 1 i 2 w funkcji prędkości obrotowej – wynik dopasowania obwodowego

Wyznaczenie częstotliwości rezonansowej polega na znalezieniu prędkości maksimum krzywej rezonansowej, które jest dobrym przybliżeniem częstotliwości rezonansowej łopatek, ponieważ dobroć rezonansu jest wysoka (>200). W rezonansie faza drgań zmienia znak, więc można wykorzystać wynik fazy do potwierdzenia poprawności jego lokalizacji.

Uzyskane wyniki amplitudy i częstotliwości rezonansowej poszczególnych łopatek zapisywane są w plikach *summary?.csv. Dla części łopatek silnika trudno wiarygodnie ustalić częstotliwość rezonansową M1EO2 ze względu na ograniczenie prędkości silnika (rys. 67). Są to tzw. łopatki słabo odpowiadające, np. nr 1, 5, 7, 14, których częstotliwości drgań są wyższe od 515 Hz (rys. 70). Dla tych łopatek nie obserwuje się przejścia fazy przez zero, co oznacza, że nie osiągnięto prędkości rezonansowej. Podawana częstotliwość i amplituda odpowiada wówczas maksymalnej prędkości do której dotarł solver.

Nie ma prostej metody pomiaru częstotliwości rezonansowej łopatek słabo odpowiadających w zakresie startowym. Metody oparte na analizie widma FFT mają niską rozdzielczość, jeśli rzędowość jest bliska liczbie całkowitej $EO \approx 2$. Rozwiązaniem jest przesunięcie w górę ograniczenia prędkości obrotowej przez regulację agregatu układu sterowania silnikiem.

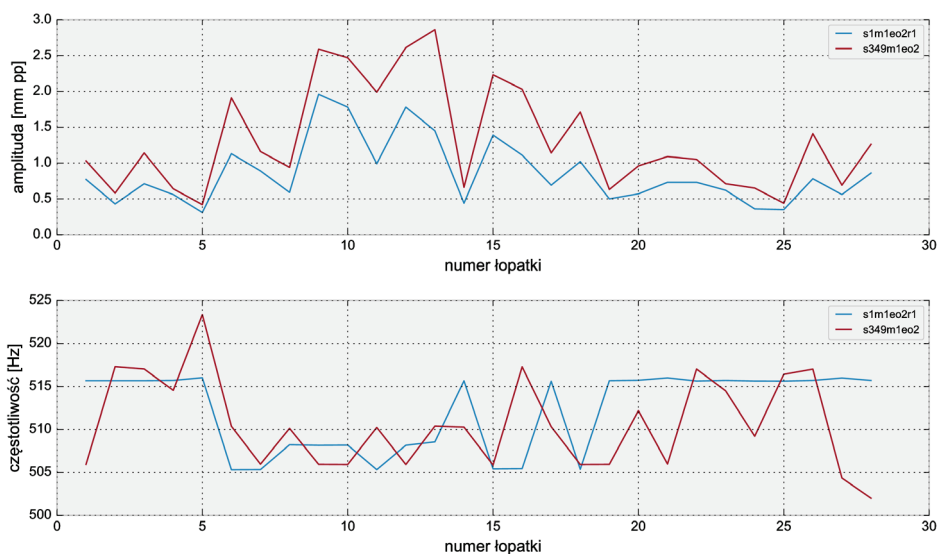


Rys. 69. Amplituda odpowiedzi M1/EO3 łopatek nr 1 i 2 w funkcji prędkości obrotowej – wynik dopasowania obwodowego

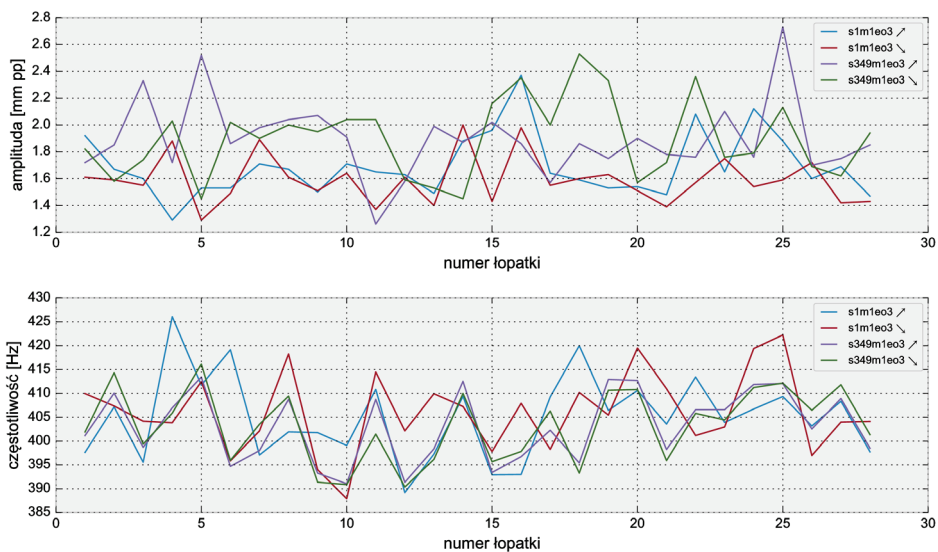
Z drugiej strony jest wiele łopatek silnie odpowiadających, tj. nr 6, 9–13, 15–18, dla których rezonans zostaje osiągnięty i występuje przejście fazy przez zero. Łatwość wzbudzenia ich do drgań o dużej amplitudzie stanowi zagrożenie dla trwałości silnika.

Maksymalne amplitudy drgań wszystkich łopatek dla poszczególnych rezonansów i ich częstotliwości przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości przedstawiono na rys. 70–73. Niektóre rezonanse wyższego rzędu były mierzalne tylko dla próby s349 z zainstalowanym wymuszeniem.

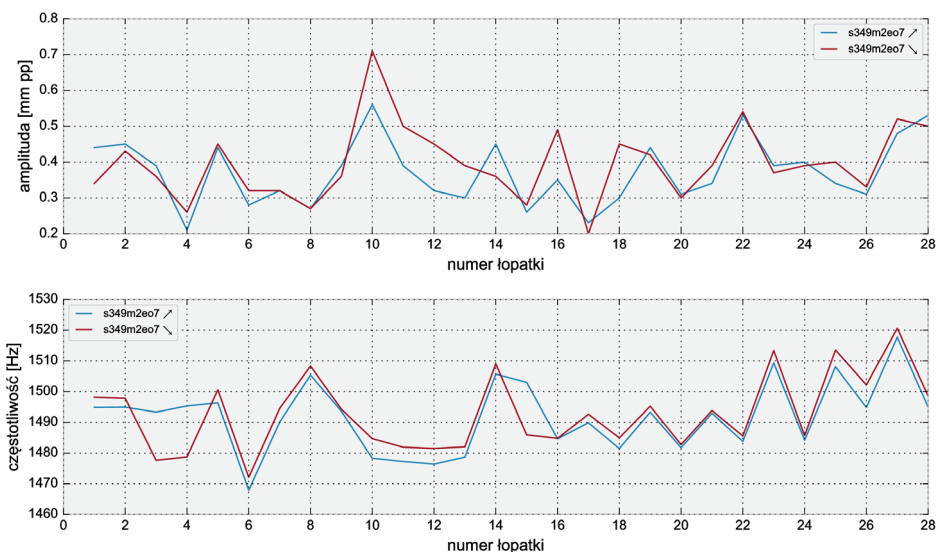
Odpowiedzi pierwszej i drugiej postaci drgań uzyskane dla zapisu s1 przedstawiono zbiorczo na wykresie Campbella (rys. 74).



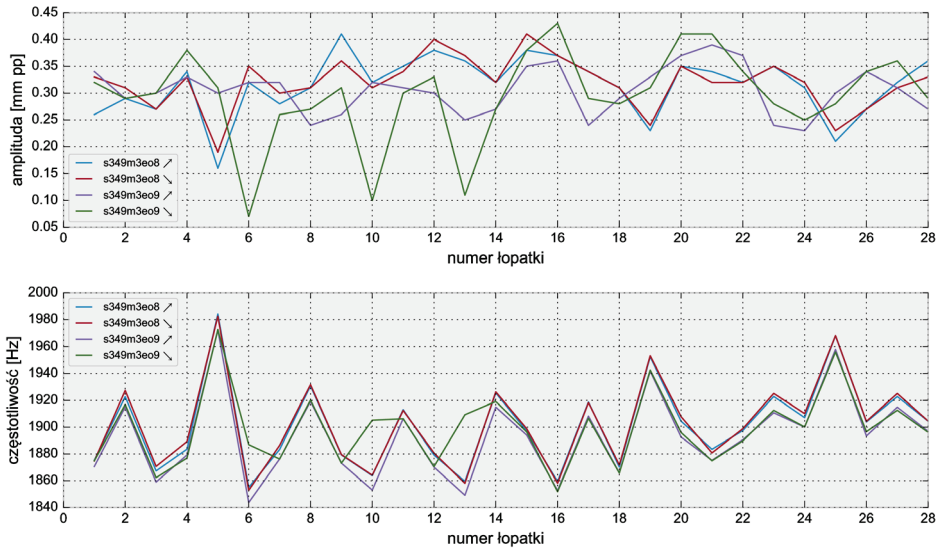
Rys. 70. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M1/EO2 przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości



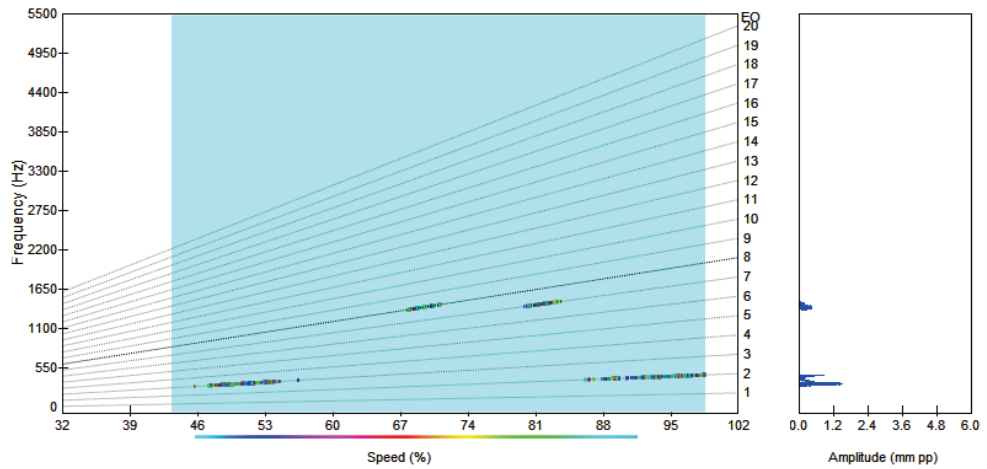
Rys. 71. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M1/EO3 przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości



Rys. 72. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M2/EO7 (12 500 obr/min) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości



Rys. 73. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M3/EO8 (14 000 obr/min) i M3/EO9 (12 500 obr/min) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości



Rys. 74. Wykres Campbella łopatki I stopnia dla zapisu s1 [58]

5.3. Drgania asynchroniczne

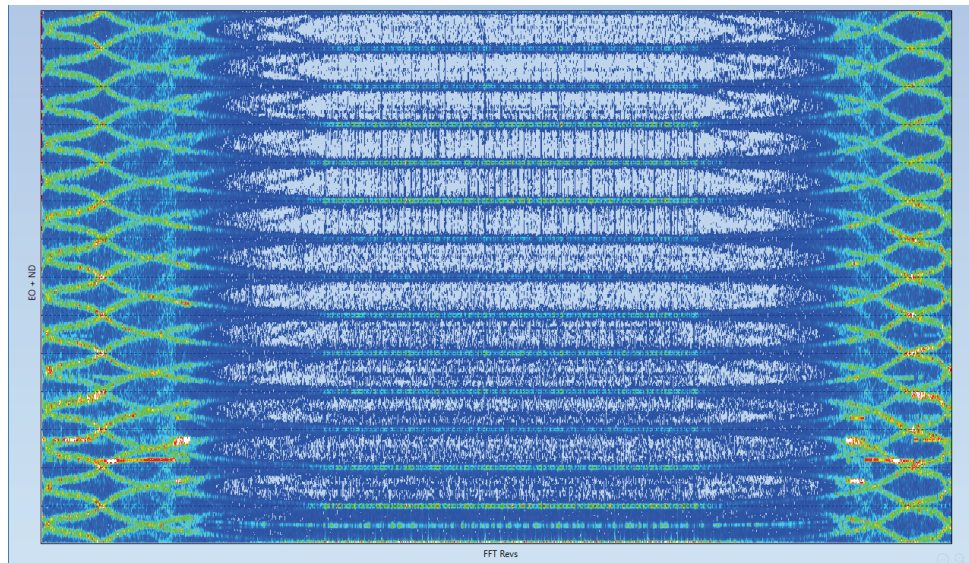
W całym zakresie prędkości obrotowej w widmie drgań I stopnia sprężarki dominują odpowiedzi podstawowej postaci drgań. Są to głównie drgania synchroniczne o rzędowości 3 i 2. Poniżej 12 000 obr/min występują wirujące strefy oderwań i inne drgania asynchroniczne [64], które gasną dla wyższych prędkości.

Potwierdza to wykres widma wszystkich łopatek dla badanego zapisu s1 bez dodatkowego wymuszenia (rys. 75). Kiedy prędkość się zmienia (lewa i prawa część wykresu), drgania synchroniczne pojedynczych łopatek widoczne są w widmie w postaci jasnych ukośnych linii. Drgania asynchroniczne dla prędkości niższych od 12 000 obr/min są tam widoczne jako niebieskie tło.

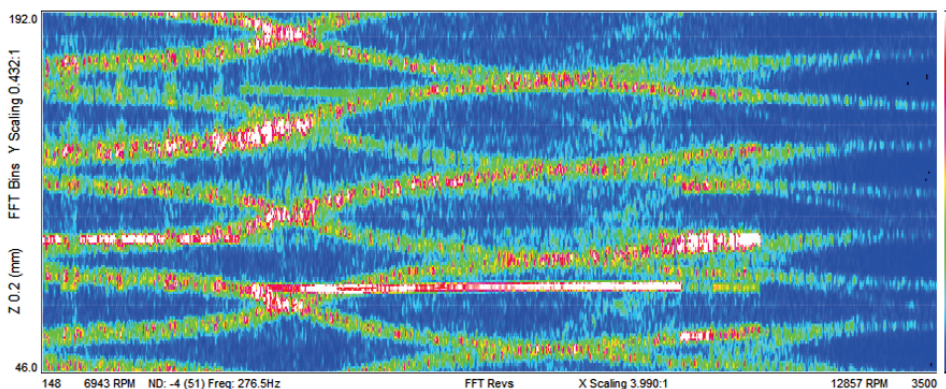
Oprócz tego zaobserwowano w widmie kilka odpowiedzi ułopatkowanej tarczy w postaci płaskich czerwonych linii (rys. 75). Oznacza to stałą rzędowość i średnicę węzłową drgań, mimo zmiany prędkości obrotowej.

Na rys. 76 przedstawiono w powiększeniu odpowiedź wirującej strefy oderwań (*stall*), która powstaje w trakcie zwiększania prędkości z biegu jałowego i utrzymuje się do prędkości ok. 11 500 obr/min. Drgania podstawowej postaci mają średnicę węzłową ND -4 i rzędowość EO1.8.

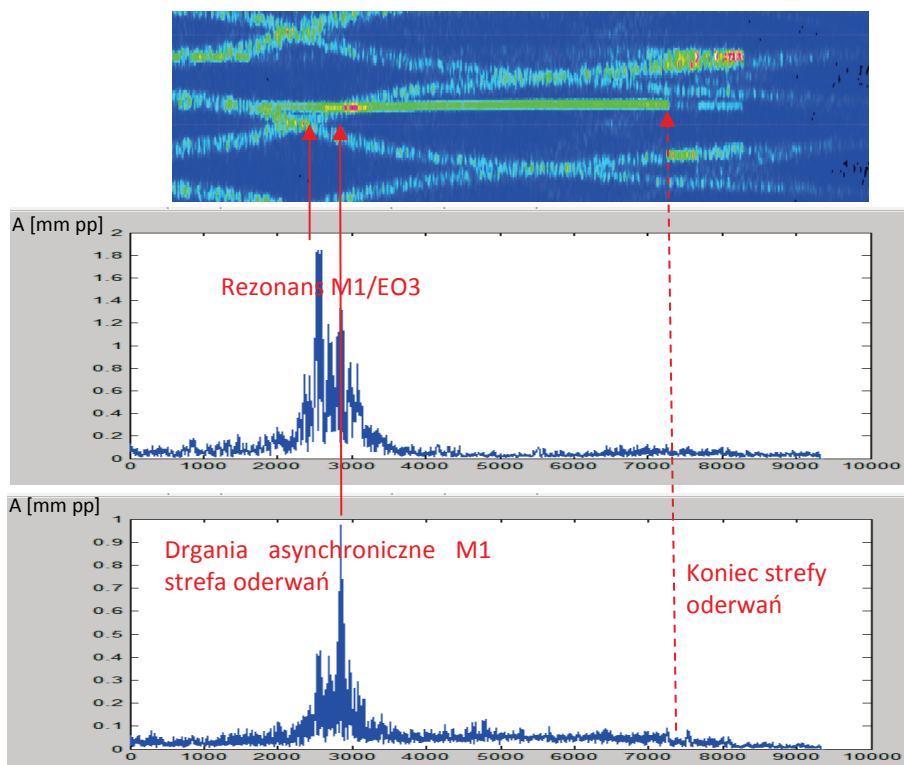
Dla prędkości ok. 8800 obr/min odpowiedź od strefy oderwań sprzęga się z rezonansem M1/EO3. Zjawisko to przeanalizowano metodą obwodowego dopasowania, stosując model drugiego rzędu (rys. 77). Amplituda odpowiedzi wirującej strefy wynosi tylko 0.1–0.2 mm pp, ale w pobliżu rezonansu wzrasta do 1 mm pp w wyniku sprzęgania. Jednocześnie strefa oderwań zwiększa odpowiedzi rezonansu M1/EO3 analizowane w poprzednim punkcie. W ten sposób w próbie bez wymuszenia są one porównywalne z odpowiedziami M1/EO2.



Rys. 75. Widmo wszystkich łopatek dla cyklu z rys. 65



Rys. 76. Odpowiedź strefy wirujących oderwań w powiększeniu [58]



Rys. 77. Sprężenie rezonansu M1/3EO i wirującej strefy oderwań M1/EO1.8 [58]

5.4. Drgania łopatek II stopnia sprężarki

Podobną procedurę analizy drgań zastosowano do danych z II stopnia sprężarki. Wybrano dwa zestawy danych (rys. 78) zawierające sygnały czterech indukcyjnych czujników drgań łopatek i czujnika fazy, zapisane podczas prób silnika wykonywanych:

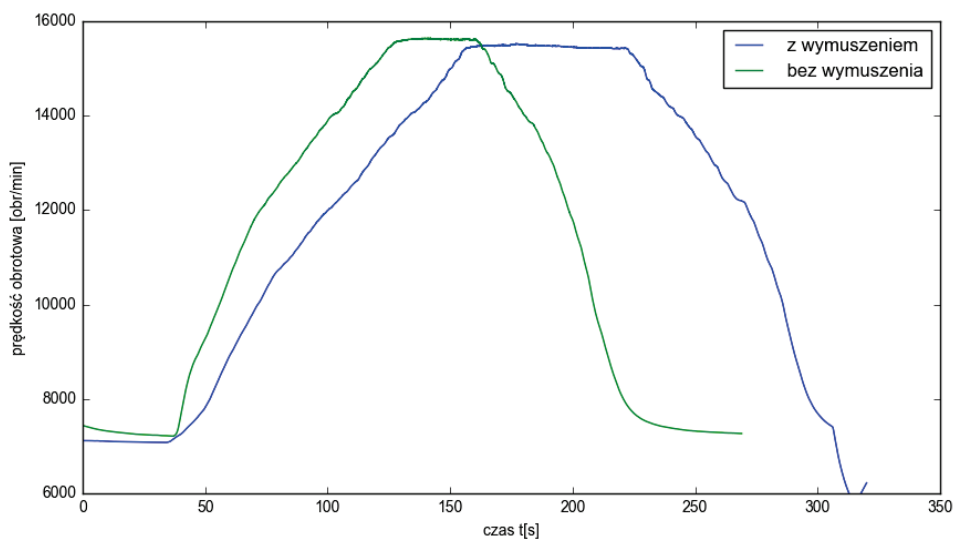
- 1) przy braku wymuszenia we wlocie – ik,
- 2) z zainstalowanym wymuszeniem we wlocie – s1.

Z wyników analizy numerycznej pobrano spodziewaną zależność częstotliwości pierwszej, drugiej i trzeciej postaci drgań łopatek od prędkości obrotowej. W przebiegu drgań (rys. 79) widoczne są rezonanse M1/EO4 dla 8000 obr/min i M1/EO3 dla 12 000 obr/min oraz odpowiedź w zakresie 9500 obr/min, która będzie zidentyfikowana niżej.

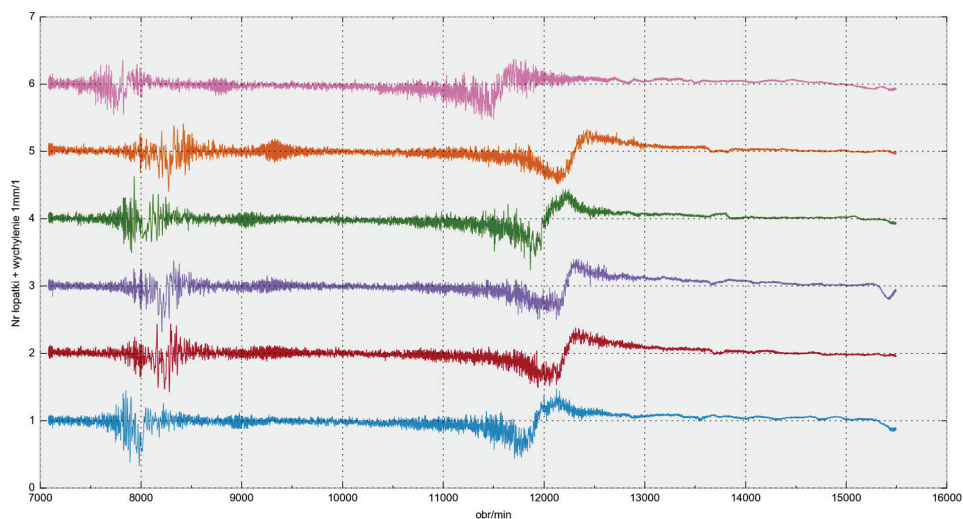
Do analizy synchronicznej wybrano rezonanse M1/EO3, M1/EO4 oraz M2/EO9 (rys. 80). Wyniki dopasowania obwodowego przedstawiono na wykresach (rys. 81–85). Obecność wymuszenia we wlocie wpływa istotnie jedynie na odpowiedź M1/EO3 (rys. 82).

Rezonans M1/EO3 występuje równocześnie z M2/EO10, ale nie jest możliwe przeprowadzenie analizy podwójnej, bo dostępne były tylko cztery czujniki (podrozdz. 3.2). Rezonans M1/EO4 (oraz częściowo M1/EO3) znajduje się w zakresie drgań asynchronicznych (rys. 83), podobnie jak M1/EO3 dla I stopnia.

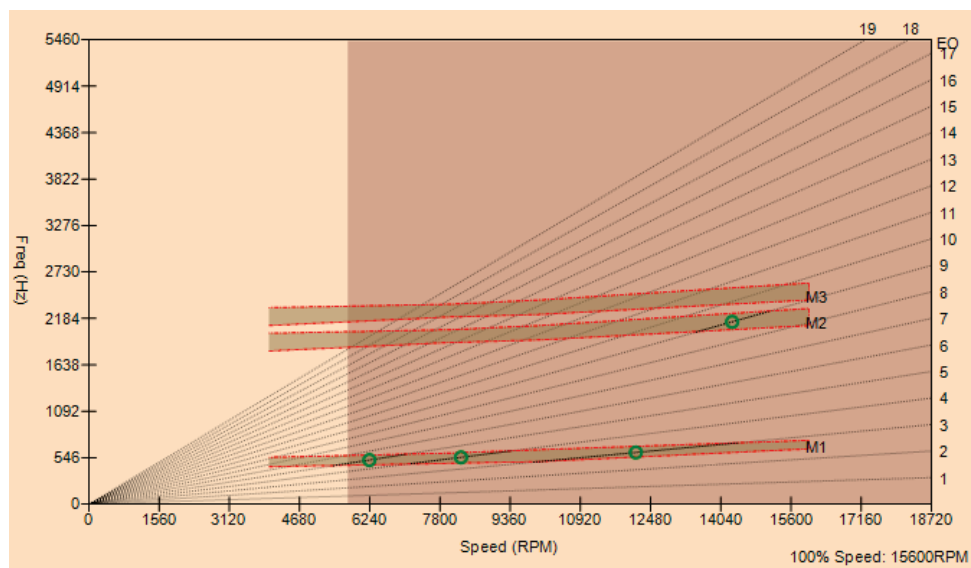
Porównując odpowiedzi rezonansowe dla zapisu z wymuszeniem widoczne jest, że zgodnie z oczekiwaniami średnia amplituda drgań jest kilkadziesiąt procent większa w rezonansie M1/EO3 (rys. 81) niż w M1/EO4 (rys. 84). Wynik 2,11 mm pp uzyskany dla łopatkki 8 w drugim przypadku odbiega od średniej i nie jest wiarygodny. Jest to błąd solvera, do którego przyczyniło się zbyt duże tempo zmniejszania prędkości (rys. 78) i występowanie drgań asynchronicznych.



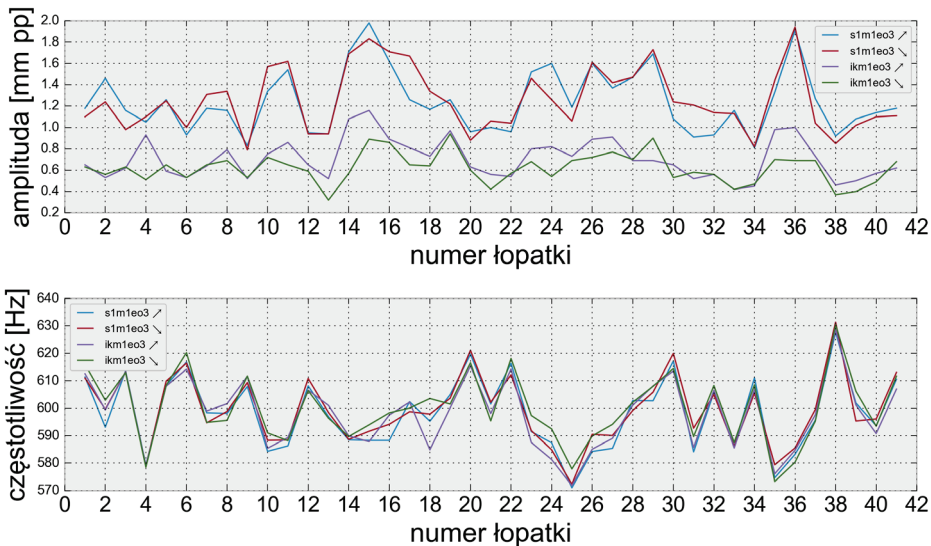
Rys. 78. Zapisy wybrane do analizy



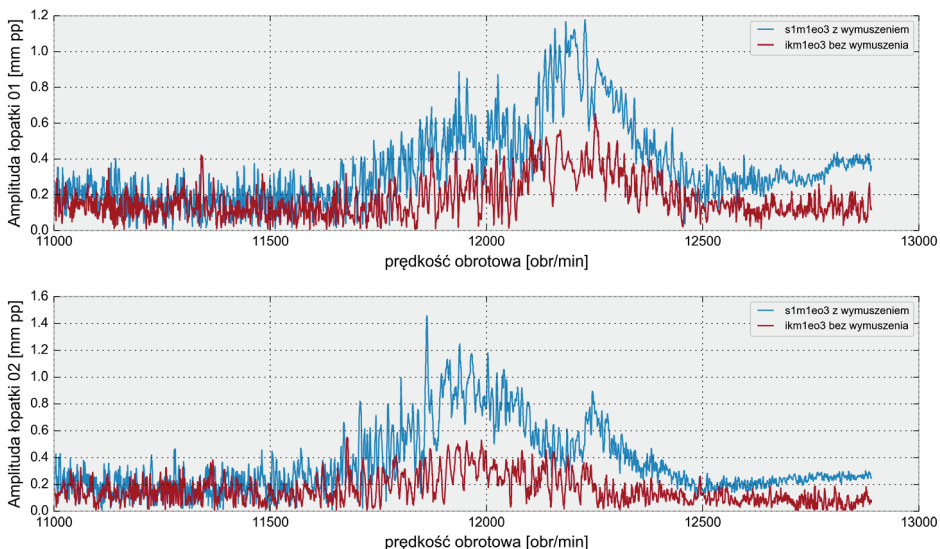
Rys. 79. Wychylenie łopatek nr 1 po filtrze (zapis s1) – widoczne rezonanse M1/EO4 dla 8000 obr/min i M1/EO3 dla 12 000 obr/min



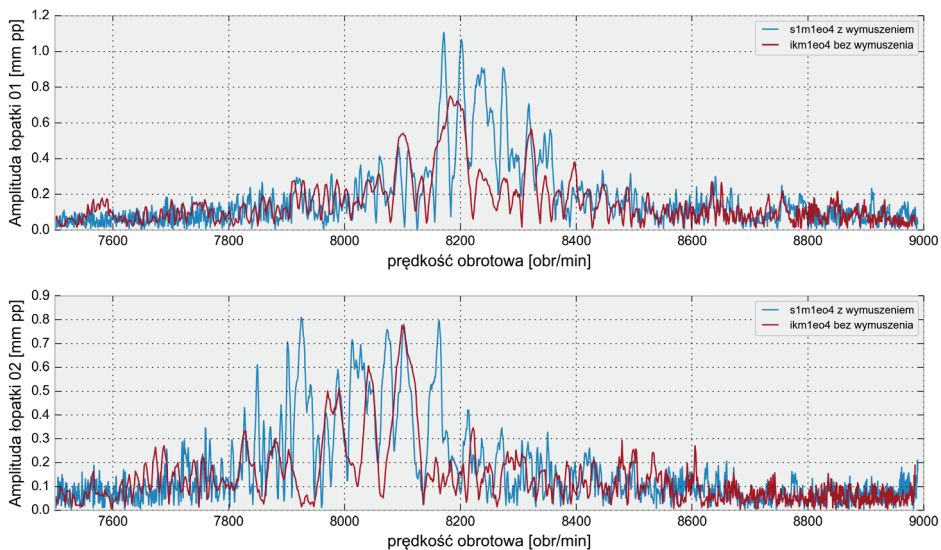
Rys. 80. Wykres Campbella II stopnia sprężarki w programie Batch Processor – wybór rezonansów do dopasowania



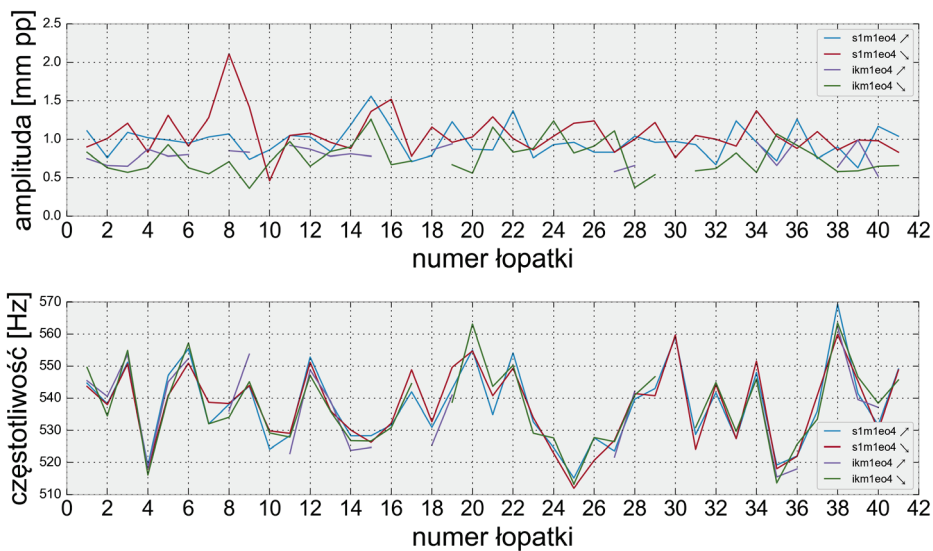
Rys. 81. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M1/EO3 (12 000 obr/min) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości



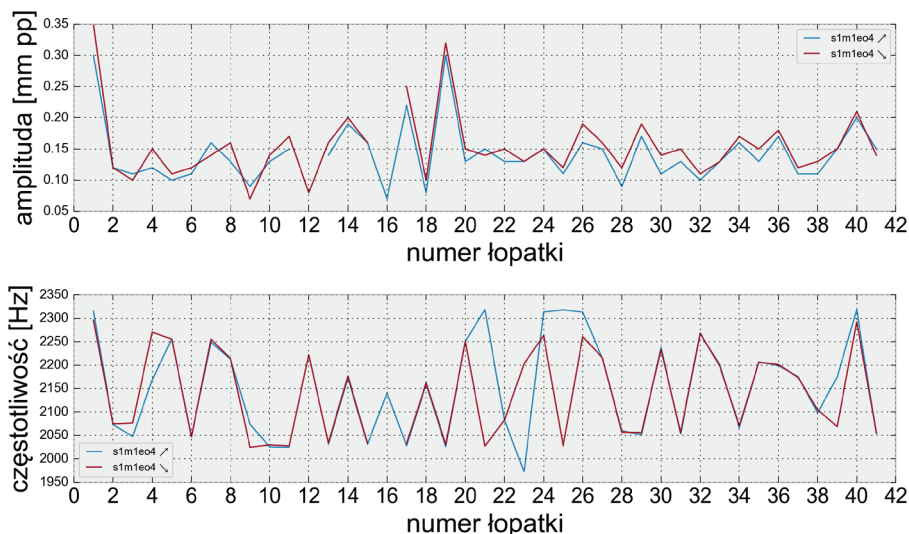
Rys. 82. Amplituda łopatek nr 1 i 2 dla rezonansu M1/EO3 – wynik dopasowania



Rys. 83. Amplituda łopatek nr 1 i 2 dla rezonansu M1/EO4 – wynik dopasowania

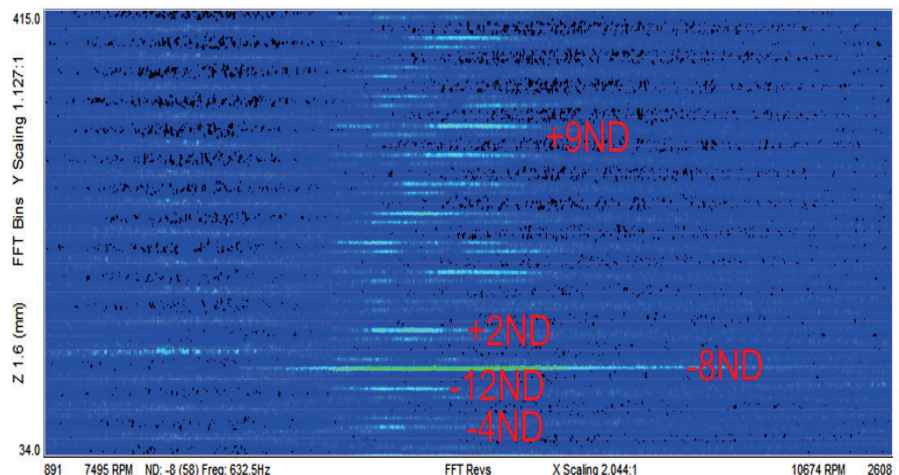


Rys. 84. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M1/EO4 (8000 obr/min) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości

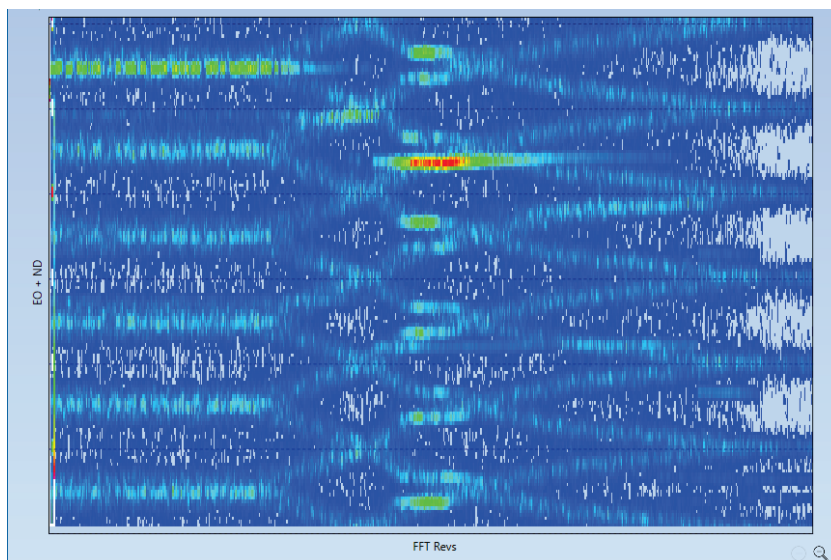


Rys. 85. Amplituda i częstotliwość drgań łopatek w rezonansie M2/EO9 (14500 obr/min) przy zwiększaniu i zmniejszaniu prędkości

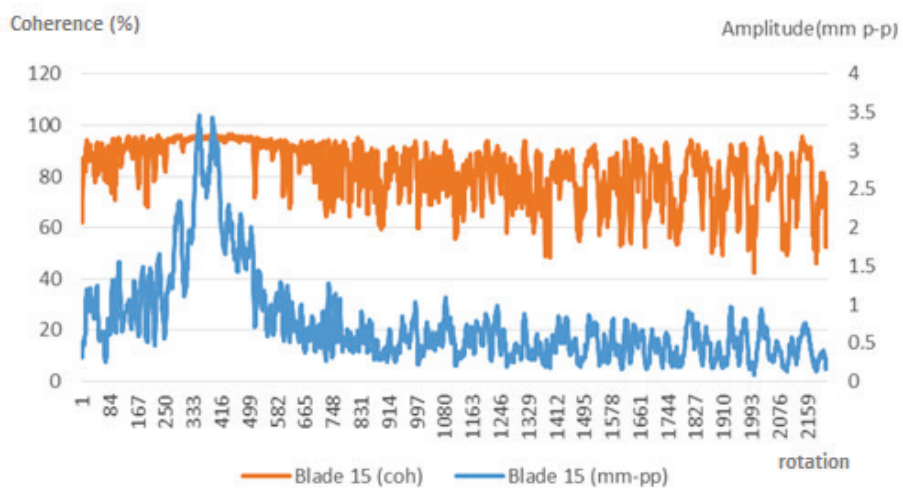
W widmie drgań wszystkich łopatek zaobserwowano liczne odpowiedzi M1 ułopatkowanej tarczy z dominującą średnicą węzłową -8 ND (rys. 86). Jest to wirująca strefa oderwań, która widoczna jest w zakresie 8200–11300 obr/min, ale odpowiada najsilniej przy prędkości 8800–9500 obr/min (rys. 87). Wyniki analizy asynchronicznej przedstawiono na rys. 88 i rys. 89.



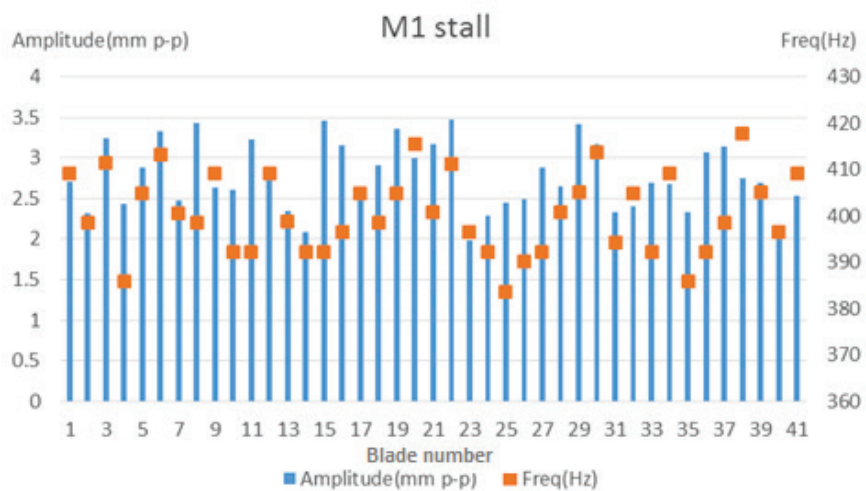
Rys. 86. Widmo wszystkich łopatek dla fragmentu zapisu, podczas którego zwiększano prędkość obrotową



Rys. 87. Odpowiedź wirującej strefy oderwań w powiększeniu



Rys. 88. Przebieg drgań asynchronicznych łopatki nr 15 i zbieżność dopasowania dla wirującej strefy oderwań



Rys. 89. Amplituda i częstotliwość drgań asynchronicznych łopatek dla wirującej strefy oderwań

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono opracowane podstawy teoretyczne, algorytmy i metody przetwarzania sygnału pomiarowego, co zwiększa potencjalne zastosowania badawcze oraz przemysłowe metody bezdotykowej. Wyniki przeprowadzonych badań ułatwiają zrozumienie szczególnych cech sygnałów pomiarowych oraz złożonych właściwości dynamicznych łopatek, co jest ważne zarówno dla inżynierów projektujących maszyny wirnikowe, jak i ich użytkowników.

Stosowane podczas badań standardowe czujniki indukcyjne pochodzące z systemu SNDL-1b mają wytrzymałą konstrukcję, wysoką niezawodność i efektywność i są optymalne do pomiarów drgań łopatek stalowych. Natomiast poziom sygnału czujników magnetorezystancyjnych (MR) nie zależy od prędkości, dzięki czemu oprócz pomiaru drgań można je zastosować i skalibrować do pomiaru luzu wierzchołkowego. Jednocześnie są wrażliwe na stan namagnesowania łopatek, co może utrudniać ich praktyczne zastosowanie w istniejących systemach.

Zebrane doświadczenia i opracowane w trakcie realizacji projektu narzędzia umożliwiły estymację parametrów drgań zarówno podstawowej, jak i wyższych postaci. Analiza jest stosunkowo pracochłonna ze względu na dużą liczbę łopatek i punktów pomiarowych. Dla większości konfiguracji przetwarzanie danych można zautomatyzować przez zastosowanie przetwarzania wsadowego i wyspecjalizowanego narzędzia (solvera).

Wykorzystując opracowane modele i narzędzia, wykonano estymację parametrów drgań łopatek pierwszej, drugiej i trzeciej postaci drgań sprężarki osiowej silnika odrzutowego SO-3, wymuszanych przez rzędowości 2–8. Rezonanse czwartej i wyższych postaci drgań mają o rząd wielkości niższe odpowiedzi, więc trudniej je wymusić i zmierzyć. Ich obserwacja wymaga modyfikacji konstrukcji i rozłożenia czujników oraz sposobu wymuszania.

Dopasowanie rezonansów do modelu oscylatora umożliwia zastąpienie jakościowej oceny widma drgań analizą ilościową, mimo że wymaga znajomości zakresu prędkości i rzędowości rezonansu. Numeryczna estymacja parametrów drgań w mniejszym stopniu jest podatna na wpływ czynnika ludzkiego niż czytanie wykresu widma drgań.

Wyznaczenie częstotliwości rezonansowej opiera się na znalezieniu prędkości, przy której faza drgań przechodzi przez zero. Z drugiej strony dobroć rezonansu jest wysoka dla łopatek (ok. 200), więc maksimum krzywej rezonansowej jest również dobrym przybliżeniem częstotliwości rezonansowej.

Wykorzystywany w badaniach silnik SO-3 należy do napędów pierwszej generacji, a więc konstrukcja sprężarki znacznie odbiega od współczesnych. W widmie drgań łopatek I i II stopnia w całym zakresie prędkości dominuje odpowiedź

pierwszej postaci drgań na wymuszenia synchroniczne i asynchroniczne, ale inne postacie też są obserwowane. Rozkład częstotliwości łopatek wynika z rozrzutu produkcyjnego i doboru łopatek podczas montażu na podstawie częstotliwości drgań własnych. Brak mechanizacji sprężarki wiąże się z pracą piór łopatek z oderwaniami przepływu, czego skutkiem są intensywne drgania asynchroniczne dla prędkości poniżej 12 000 obr/min i powstawanie wirujących stref oderwań.

Zamontowanie ciała obcego we wlocie zwiększa znacząco drgania łopatek, a szczególnie odpowiedzi rezonansowe niższego rzędu. W trakcie opracowania systemów SNDŁ-1b/SPŁ-2b w latach dziewięćdziesiątych [69] i podczas późniejszych badań prowadzonych przez autora [34] wykazano, że praca z ciałem obcym we wlocie skutkuje drganiami rezonansowymi M1EO2 przekraczającymi naprężenia krytyczne i może prowadzić do zmęczeniowego pęknięcia łopatki nawet w ciągu kilkudziesięciu minut. Mimo że problem drgań rezonansowych łopatek I stopnia na zakresie startowym jest dobrze poznany i odpowiedzi łopatek widoczne są na wykresach bez dodatkowych zabiegów, zagadnienie pomiaru rezonansu M1EO2 metodą dopasowania obwodowego ciągle jest wyzwaniem. Ze względu na ograniczenie obrotów rezonans skanowany jest częściowo, co utrudnia wyznaczenie częstotliwości rezonansowej wszystkich łopatek.

Scharakteryzowano także drgania asynchroniczne łopatek I i II stopnia, towarzyszących wirującej strefie oderwań. Są to drgania ułopatkowanej tarczy z określoną średnicą węzłową, które mogą się sprzęgać z rezonansem M1/EO3.

Przy sprzęganiu się drgań różnych postaci model oscylatora o jednym stopniu swobody (SDOF) daje wyniki obarczone zwiększoną niepewnością. W takich przypadkach należy stosować modele z dwoma lub trzema wymuszeniami o różnych rzędowościach. W celu realizacji zadań w ustalonym harmonogramie niezbędne było przyjęcie pewnych uproszczeń i podstawowych modeli.

Celem badania właściwości dynamicznych łopatek jest projektowanie sprężarek i turbin w sposób zmniejszający ryzyko wystąpienia wysokocyklowego zmęczenia materiału, które w określonych warunkach może prowadzić do pęknięcia i urwania łopatek. Zaproponowaną metodykę badań można zastosować w praktyce przemysłowej, dobierając złożoność modeli do oczekiwanego widma drgań. Partnerzy przemysłowi są zainteresowani sprawdzonymi rozwiązaniami pomiarowymi o zwiększonej efektywności, które umożliwiają projektowanie maszyn o większej trwałości. Nowe metody przetwarzania danych pomiarowych przyczyniają się do szerszego stosowania metody bezdotykowej w praktyce.

Zebrane doświadczenie, opracowana metodyka prac i system pomiarowy są również wykorzystywane przez autora przy badaniach turbin stacjonarnych (parowych i gazowych), eksploatowanych w energetyce i przemyśle [52, 66]. Przewiduje się, że wyniki pracy zostaną wykorzystane w postaci usług pomiarowych dla producentów i użytkowników sprężarek osiowych i turbin.

LITERATURA

1. Badami V.V. *Advanced Sensors and Monitoring & Diagnostics for Gas Turbines in GE. EE392n: Intelligent Energy Systems*, Lecture: April 24, 2012. <http://web.stanford.edu/class/ee392n/>, Stanford CA 2012.
2. *Blade Vibration Sensor Interface BVS1 5. User's Manual*. Hood Technology Corporation, Hood River OR 2007.
3. Blume P.A. *The LabVIEW Style Book*. Prentice Hall, Boston 2017.
4. *Calling a LabVIEW SubVI with DIAdem* <http://www.ni.com/white-paper/13595/en/>
5. *Capacitive Blade Tip Clearance & Tip Timing measurement system*, Fogale nanotech, www.fogale.fr, Nîmes 2012.
6. Castanier M.P., Pierre C. *Modeling and Analysis of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions*. AIAA-16345-832. Journal of Propulsion and Power. Vol. 22, No. 2, 2006.
7. Chana K.S. *Eddy current sensors*, U.S. Patent Application No. 12/602,728, 2008.
8. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Taylor and Francis, Hoboken NY 2013.
9. *Create unique filename by auto-increment path*, <https://forums.ni.com/t5/Example-Programs/Create-unique-filename-by-auto-increment-path/ta-p/3503548>.
10. Dimitriadis G., Carrington I.B., Wright J.R., Cooper J.E. *Blade-Tip Timing measurement of Synchronous Vibrations of Rotating Blade assemblies*, Mechanical Systems and Signal Processing, 16(4), 599–622, 2002.
11. Dolman M. *Blade Tip Timing System User Manual*. Rolls Royce EIR 02430 Version 1.2, Derby 2007.
12. Gallego-Garrido J., Dimitriadis G., Wright J.R. *Development of a Multiple Modes Simulator of Rotating Bladed Assemblies for Blade Tip-Timing Data Analysis*, 2002.
13. García I., Przysowa R., Amorebieta J., Zubia J. *Tip-clearance measurement in the first stage of the compressor of an aircraft engine*, MDPI Sensors (Switzerland), vol. 16, no. 11 p. 14, ISSN 1424-8220, DOI 10.3390/s16111897. Basel 2016.
14. García I., Przysowa R., et al. *Tip timing measurements for structural health monitoring in the first stage of the compressor of an aircraft engine*, in International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2016), Trento 2016.
15. Gill J.D., Capece V.R., Fost R.B. *Experimental methods applied in a study of stall flutter in an axial flow fan* Shock Vib., vol. 11, pp. 597–613, 2004.
16. Grant K. *Experimental Testing Of Some Tip-Timing Techniques*. 1st Evi-GTI Conference, Barcelona 2004.
17. Hayes B. (przewodniczący) *Industry Standard File Format for Revolution-Based, Tip Timing Data*. ISA-107.1-2013. ISA Standard Committee 107.1 “Tip Timing for Use in Gas Turbine Engines”, 2013.
18. Heath S. *A new technique for identifying synchronous resonances using tip-timing*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol. 122, No. 2. April 2000.

19. Heath S. *Identification of resonant frequencies of vibration of rotating blades*. US Patent 5,974,882, 1999.
20. Heath S., Imregun M. *An improved single-parameter tip-timing method for turbo-machinery blade vibration measurements using optical laser probes*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, No. 10, 1996.
21. Hill Ch.E. *NSMS Data Acquisition Using an Alternative Multi-Point Approach*. Agilis Measurement Systems, 10th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference. Dayton OH 2005.
22. Hockaday B. *Quantifying Optical Tip-Timing Probe Error with Laboratory Apparatus*. ISA 57th IIS, 2nd Tip-Timing Workshop, St. Louis MO 2011.
23. Jousselin O. *Blade Tip Timing Batch Processor User Guide*. Technical Report, Rolls-Royce 24/02/10, Derby 2011.
24. Jousselin O., Russhard P. *A method for establishing the uncertainty levels for aero-engine blade tip amplitudes extracted from blade tip timing data*. 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery IMECHE, Londyn 2012.
25. Kaźmierczak K., Przysowa R. *Dopasowanie danych do modelu oscylatora harmonicznego*, w: Zadanie 2. Badania symulacyjne. Sprawozdanie ITWL nr 36/34/2012, Warszawa 2012.
26. Kaźmierczak K., Przysowa R. *Standard Sine Fitting Algorithms Applied to Blade Tip Timing Data*. Journal of Konbin, 2/2014, Warszawa 2014.
27. Kłysz S. *Szacowanie trwałości wybranych materiałów i elementów konstrukcji lotniczych w zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych*. Prace Naukowe ITWL, Zeszyt nr 5, ISSN 1234-3544. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 1999.
28. Korbel K. *Ekstrakcja informacji z sygnału radiometrycznego*. Monografia w opracowaniu na prawach rękopisu. Zakład Elektroniki Jądrowej, WFiIS AGH, Kraków 2006. <http://www.ftj.agh.edu.pl/zej/materials/korbel/Ksiazki/ekstrakcja.pdf>
29. Kubitz L., Rządkowski R., Szczepanik R. *Flutter lopatek wirnikowych turbin gazowych i silników lotniczych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2017.
30. Kucher O.G., Kharton V.V., Laine J.P., Thouverez F. *Detection of Cracked Blade from Bladed Disk Forced Response Using Tip-Timing Method: Simulation Study*. Aerospace Engineering and Technology, No 7(64), Charków 2009.
31. *LabVIEW Intermediate II: Connectivity Course Manual*. National Instruments 2009.
32. Łączkowski R. *Drgania elementów turbin cieplnych*. WNT, Warszawa 1974.
33. Maxim Integrated Products *Variable Reluctance Sensor Interfaces with Differential Input and Adaptive Peak Threshold*, MAX9924-MAX9927, Sunnyvale CA 2012.
34. Morris R. J. et al. *Crack Detection and Prognosis Using Non Contact Time of Arrival Sensors for Fan and Compressor Airfoils In Gas Turbine Engines*, in Aeromat 20 Conference and Exposition American Society for Metals, Dayton OH 2009.
35. Nelius A.E. *Development of a Reduced-Cost Blade Timing Generator for the Generation 4 Non-contact Stress Measurement System (NSMS)*. 9th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, 17 March 2004, Village of Pinehurst NC 2004.
36. *Non-Intrusive Stress Measurement Systems Fundamentals*. Agilis Measurement Systems, <https://agilismeasurementsystems.com>, Palm Beach Gardens FL 2012.

37. Osburn N.G. *Implementation of a two probe tip-timing technique to determine compressor blade vibrations*. Naval Postgraduate School, Monterey CA 2000.
38. *Overview of Curve Fitting Models and Methods in LabVIEW*. National Instruments Tutorial. www.ni.com, 2009.
39. Pawlak W. *Metoda wyznaczenia czasu przejścia łopatk silnika i chwilowego luzu wierzchołkowego na podstawie sygnałów czujników ruchu łopatek* [w:] Opracowanie algorytmów przetwarzania sygnałów pod kątem ich wykorzystania do oceny stanu technicznego wirnikowych maszyn przepływowych. Sprawozdanie ITWL nr 71/34/2006, Warszawa 2006.
40. Przynsowa R., Beres W., Carnegie C. *Development of an on-line damage detection, discrimination and tracking system for the spin rig facility*, *J. KONES Powertrain Transp.*, vol. 24, no. 2, 2017, Warszawa 2017.
41. Przynsowa R., Beres W., Jackson R., Brouckaert J.-F., Dieck R. *Data capture, management and analysis, Part 2: Data Analysis Methodologies* [w:] STO-TR-AVT-180 Gas Turbine Engine Test Cell Instrumentation, pp. 281–300. NATO Science and Technology Organization 2015.
42. Przynsowa R., Gazda P. *Direct sampling and phase detection of inductive sensor signal*, NIDays, Warszawa 2015.
43. Przynsowa R., Kaźmierczak K. *Triggering methods in blade tip-timing systems*, in Proceedings of The Twelve International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery, VETOMAC XII, R. Rządkowski and R. Szczepanik, Eds., pp. 129–138, ISBN 9788361021698. ITWL, Warszawa 2016.
44. Przynsowa R. *Model dyskryminatora fazy*. Sprawozdanie nr 1/34/2012 (BN ITWL nr 6989/50), Warszawa 2012.
45. Przynsowa R. *Ocena stanu technicznego zespołu wirnikowego turbinowego silnika lotniczego z wykorzystaniem cyfrowych metod przetwarzania sygnału pomiarowego pochodzącego od łopatek*. Rozprawa doktorska. ITWL, Warszawa 2007.
46. Przynsowa R. *Oprogramowanie do analizy danych pomiarowych pochodzących od wierzchołków łopatek wirnikowych* [w:] Drgania swobodne i wymuszone wirnikowych łopatek turbinowego silnika odrzutowego w trójwymiarowym przepływie lepkim - analiza eksperymentalna. Etap I, poz. 3. Projekt badawczy własny nr 4 T12C 00929. Sprawozdanie ITWL. Warszawa 2007.
47. Przynsowa R., Perz M., Spychała J., Rokicki E. *Blade Health Analysis and Testing: Prognosis Project for Pratt & Whitney*. Sprawozdanie ITWL nr 31/34/2007, Warszawa 2007.
48. Przynsowa R., Rokicki E. *Inductive Sensors for Blade Tip-Timing in Gas Turbines*, Test Cell and Controls Instrumentation and EHM Technologies for Military Air, Land and Sea Turbine Engines, MP-AVT-229-10. NATO STO, Rzeszów 2015.
49. Przynsowa R., Rokicki E. *Inductive sensors for blade tip-timing in gas turbines*. Journal of KONBiN, vol. 36, no. 1, Warszawa 2015.
50. Przynsowa R., Rokicki E., Majewski P. *Optimized magnetic sensors to measure speed and position in adverse environments*. [w:] IET Conference Publications, no. 630 CP. ISSN 15588041, ISBN 9781849198585, doi:10.1049/cp.2014.0552, Londyn 2014.
51. Przynsowa R., Tuzik A. *Data Management Techniques for Blade Vibration Analysis*. Journal of KONBiN, vol. 37, no. 1, 2016.

52. Przysowa R. *Blade Vibration Monitoring in a Low-Pressure Steam Turbine*. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics, and Instrumentation; Education; Manufacturing Materials and Metallurgy, doi:10.1115/GT2018-76657, Oslo 2018.
53. Roorda B. *Prognostic Health Management (PHM) System for Monitoring Blade Vibrations in Turbo Machinery*. Agilis Measurement Systems, Inc., Propulsion - Safety and Affordable Readiness Conference, 2009.
54. Russhard P., Back J.D. *Blade tip timing*. Patent application EP2781897A2, 2014.
55. Russhard P., Back J.D. *Method for analysing vibration in rotor blades*. EP 2 136 189 B1 patent, 2009.
56. Russhard P., Back J.D. *Rotating blade analysis*. GB2491632B patent, 2012.
57. Russhard P. *Blade Tip Timing – Frequently asked Questions*. 57th ISA International Instrumentation Symposium (IIS) – Tip Timing Workshop, 2012.
58. Russhard P. *BTT Data Analysis*. Prezentacja, Rotadata Ltd. 22.10.2014.
59. Russhard P. *BTT Data Zeroing Techniques*. BTT Workshop. MFPT and ISA's 59th International Instrumentation Symposium, Cleveland OH 2013.
60. Russhard P. *MultiTool Blade Tip Timing Acquisition, Analysis and Data Simulation Software. EM0102 – Analysis Manual*, EMTD Ltd, Nottingham 2016.
61. Russhard P. *The Use of Blade Tip Timing Technologies to Assess and Monitor Rotor Blade Health from Design to Production*. Test Cell and Controls Instrumentation and EHM Technologies for Military Air, Land and Sea Turbine Engines, MP-AVT-229-11, Rzeszów 2015.
62. Rządkowki R. *Dynamics of Rotor Steam Turbine Blading, Part Two, Bladed Discs*, Maszyny Przepływowe, Tom 22, Ossolineum, Wrocław 1998.
63. Rządkowski R., Hryniewicz P., Drewczyński M., Kwapisz L. *Analiza drgań własnych i naprężeń kinetostatycznych w łopatkach i ułopatkowanej tarczy pierwszego stopnia silnika odrzutowego SO3*. Opr. Wew. IMP PAN, Nr arch. 5155/05. Gdańsk 2006.
64. Rządkowski R., Szczepanik R., Drewczyński M. *Analiza dynamiczna łopatek wirnikowych i kierowniczych silnika jednoprzepływowego*. Wydawnictwo ITWL. Warszawa 2013.
65. Rządkowski R., Szczepanik R., Drewczyński M. *Drgania wymuszone ułopatkowanych tarcz wirnikowych turbin gazowych i parowych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa 2012.
66. Rządkowski R., Szczepanik R. Ed. *Dynamics of last stage low pressure steam turbine rotor blades*. ITWL, Warszawa 2017.
67. *Save Front Panel Control or Indicator Values to Spreadsheet File*. <https://forums.ni.com/t5/Example-Programs/Save-Front-Panel-Control-or-Indicator-Values-to-Spreadsheet-File/ta-p/3526453>.
68. Schmitt O.H. *A thermionic trigger*, Journal of Scientific Instruments 15.1, 1938.
69. Szczepanik R. *Experimental investigations of aircraft engine rotor blade dynamics*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2013.

70. Szczepanik R., Przysowa R., Spychała J., Rokicki E., Kaźmierczak K., Majewski P. *Application of Blade-tip Sensors to Blade-Vibration Monitoring in Gas Turbines* [in:] *Thermal Power Plants*. ISBN 978-953-307-952-3. InTech - Open Access Publisher, Rijeka 2011.
71. Szczepanik R., Rządkowski R. *Badania dynamiki łopatek wirnikowych silników lotniczych w różnych warunkach eksploatacji*. ITWL, Warszawa 2012.
72. Szczepankowski A., Witoś M. *System Diagnostyczny SNDŁ-1b/SPL-2b*. Materiały szkoleniowe. ITWL, Warszawa 2001.
73. Tappert P., Losh D., Mercadal M. *Analyze Blade Vibration 6.1 User Manual*. Hood Technology Corp., Hood River OR 2007.
74. *Tip Timing and Tip Clearance Problems in Turbomachines*. Von Karman Institute Lecture Series Proceedings. Rhode-St-Genève 2007.
75. Wachłaczanko M. *Automatyczny podział próby silnika na części*. Sprawozdanie nr 1/34/2012 (BN ITWL nr 6989/50), Warszawa 2012.
76. Washburn R. Investigation of hardware transmitted excitation sources and the associated blade responses using tip timing instrumentation. VKI Lecture Series Proceedings. Von Karman Institute, Rhode-St-Genève 2007.
77. Witoś M. *Diagnozowanie stanu technicznego łopatek sprężarki turbinowego silnika spalinowego metodą bezdotykowego pomiaru drgań*. Rozprawa doktorska. ITWL, Warszawa 1994.
78. Witoś M. *Identyfikacja właściwości modalnych łopatek wirnikowych sprężarki silnika SO-3*. Sprawozdanie ITWL. Warszawa 2006.
79. Witoś M. *Theoretical Foundations of Tip Timing Measurements*. VKI Lecture Series Proceedings. Von Karman Institute, Rhode-St-Genève 2007.
80. Witoś M. *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. Prace Naukowe ITWL, zeszyt 29, 2011, s. 1-324, ISSN 1234-3544, Warszawa 2011.
81. Zablotskiy I., Korostelev Yu. *Measurement of Resonance Vibrations of Turbine Blades With Elura Device*. FTD-ID(RS) T-0861-78 (Originally published in Energomashinostroneniye, Nr. 2, Moskwa 1970).
82. Zablotskiy I., Korostelev Yu., Sviblov L.B. *Contactless Measuring of Vibrations in the Rotor Blades of Turbines*. FTD AD-780 365-72 (Originally published as Beskontaktnye izmereniya kolebanij lopatok turbomaszin. Maszinostroneniye. Moskwa 1977).
83. Zielinski M., Ziller G., *Noncontact Blade Vibration Measurement System for Aero Engine Application*. 17th International Symposium on Airbreathing Engines, September 4-9, 2005. Paper No. ISABE-2005-1220. Monachium 2005.

W monografii przedstawiono wybrane wyniki badań dynamiki łopatek wirnikowych metodą bezdotykową. Uzyskane wyniki ułatwiają zrozumienie szczególnych cech sygnałów pomiarowych oraz złożonych właściwości dynamicznych łopatek i drgającej tarczy z łopatkami.

Zaproponowano metodykę planowania i prowadzenia eksperymentu obejmującą procedury zarządzania danymi pomiarowymi i metody analizy drgań. Do określenia czasu przyścia łopatki wykorzystywano algorytmy przetwarzania próbek sygnału działające na komputerze lub matrycy FPGA. Opracowano metody dopasowania odkształceń łopatek do modelu oscylatora harmonicznego. Wykonano estymację parametrów drgań łopatek zarówno podstawowej, jak i drugiej postaci drgań, wykorzystując nowo opracowane modele i narzędzia.

W celu weryfikacji przyjętych modeli oraz opracowanych metod estymacji parametrów drgań wykonano pełen cykl działań związanych z zastosowaniem metody bezdotykowej do pomiaru drgań łopatek roboczych sprężarki osiowej, który obejmował:

- testy algorytmów na danych symulowanych i archiwalnych,
- planowanie przebiegu eksperymentu,
- projektowanie instalacji pomiarowej,
- wykonanie prób silnika odrzutowego,
- wyznaczenie parametrów drgań synchronicznych i asynchronicznych,
- wizualizację i analizę wyników.

Przedstawiona metoda i algorytmy znajdują praktyczne zastosowanie w przemyśle do analizy drgań i oceny stanu technicznego łopatek wirnikowych. Najważniejszymi odbiorcami technologii są operatorzy przepływowych maszyn wirnikowych, tj. turbin, wentylatorów, kompresorów, szczególnie tych z błędami konstrukcyjnymi lub widmem eksploatacji odbiegającym od pierwotnych założeń projektowych. Drugą grupą odbiorców są producenci maszyn wirnikowych, którzy wykorzystają metodę przede wszystkim w procesie badań i rozwoju produktu.