

## DIAGNOZOWANIE METODĄ FAM-C PODPÓR ŁOŻYSKOWYCH LOTNICZEGO SILNIKA TURBINOWEGO

Andrzej GĘBURA, Tomasz TOKARSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,  
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa 46, skr. Pocz. 96  
tel. 0-22-685 22 42 e-mail [andrzej.gebura@itwl.pl](mailto:andrzej.gebura@itwl.pl)

### Streszczenie

Metoda diagnostyczna FAM-C częstotliwości prądu przemiennego oraz metoda FDM-A [1, 2] bazująca na pomiarze modulacji częstotliwości składowej pulsacji, zostały opracowane w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Istotą ich dokładności jest „naturalne” zsynchronizowanie sygnału próbkującego z prędkością kątową obserwowanych ogniw kinematycznych – im szybsze procesy dynamiczne powstają w obserwowanym obiekcie, tym szybsze jest również próbkowanie. Jednocześnie wokół „punktu synchronizacji” powstają, na skutek istnienia luzów w układzie napędowych, naturalne względne wahania pomiędzy obserwowanym ogniwem kinematycznym a wirnikiem prądnicy – powstaje swoiste „zmodulowanie próbkowania” umożliwiające dodatkowe zwiększenie rozdzielczości i dokładności metody. Metody te umożliwiają określenie poziomu zużycia ściernego podzespołu oraz jego identyfikację podczas normalnej pracy zespołu napędowego. Diagnostyka przeprowadzona ww metodami umożliwia określenie licznych parametrów łożysk łożyskowych i węzłów łożyskowych oraz zespołu wirnikowego takich jak: poziom tarcia tocznego każdego z łożysk, płynność ruchu koszyka, wielkość luzów promieniowych. Metoda umożliwia wykrywanie rezonansów poszczególnych elementów poprzez obserwację kształtu i wysokości względnej zbiorów charakterystycznych, z których można wyznaczyć m.in. wielkość dobroci mechanicznej danego węzła. Ponadto określane są liczne parametry i zjawiska związane z zespołem wirnikowym jak określenie wielkości przekoszeń i niewspółosiowości wałów, poziom zużycia ciernego na styku koszyk – element toczny i inne.

Podstawową zaletą metody jest to, że układ diagnostyczny jest przyłączany do dowolnego miejsca (np. złącza elektrycznego) zasilanego napięciem stałym<sup>1</sup> lub przemiennym<sup>2</sup> z etatowego źródła energii elektrycznej diagnozowanego obiektu.

Przedstawiono materiał badawczy otrzymany z badań eksploatacyjnych zespołu lotniczego silnika turbinowego, w którym rolę „prądnicy – obserwatora” pełniła lotnicza prądnica prądu stałego oraz trójfazowa prądnica tachometryczna.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, diagnostowanie traktów przenoszenia napędu, skoszenie<sup>3</sup>, modulacja częstotliwości, zbiór charakterystyczny, silnik turbinowy, łożysko toczne.

### DIAGNOSIS BY FAM-C METHOD OF A SUPPORT'S BEARINGS TURBINE ENGINE

#### Summary

Diagnostic FDM-A method [2] based on a measurement of frequency modulation of a pulsation component as well as FAM-C method based on a measurement of a alternating current's frequency have been developed in Air Force Institute of Technology. As a diagnostic sensor an onboard generator (alternator) is used. The sensor is coupled with an investigated power unit. The generator or alternator is a converter of diagnostic signals into electric signal – accomplishes digital (discrete) conversion of signals contained in components of an angular velocity of a generator's or alternator's shaft. An original diagnostic signal is the angular velocity carrying diagnostic information about faults and failures of power unit's parts. Each part of the power unit is a specific vibration generator or modulator. An essence of their accuracy is “natural” synchronization of a sample signal with an angular velocity of an observed kinematics link – as quicker dynamic processes arise in an observed object, a sampling is also quicker. Simultaneously round about “synchronization point” arise, as a result of clearances in a drive, natural relative oscillation between the observed kinematics link and an alternator's rotor – arise characteristic “sample modulation” which provides an additional extension of a method's resolution and accuracy. These methods provide to define a level of a sub-assembly's abrasive wear and its localization during normal work of a power unit. It is possible to

<sup>1</sup> Metodę tę nazwano FDM-A (FM- modulacja częstotliwości, D - prąd stały, A - poziom zaawansowania metody)

<sup>2</sup> Metodę tę nazwano FAM-C (FM- modulacja częstotliwości, D - prąd przemienny C - poziom zaawansowania metody- oznacza, są stosowane aplikacje w postaci automatycznego testera)

<sup>3</sup> Zwane także przekoszeniem.

define numerous parameters of bearings and their kinematics pairs as well as a rotor assembly. They are: a level of a bearing rolling friction, smoothness of a bearing cage's motion, a quantity of a radial clearance. It also provides to detect resonances in elements as well as observe a shape and a relative height of characteristic patterns, from which it is possible to calculate, among others, a quantity of a mechanical quality factor of a kinematics pair – it is possible to define an operating time reserve of the kinematics pair to resonance. Numerous parameters and effects related to a rotor assembly are also defined. They are: a quantity of a skew of shafts, a level of a frictional wear on a bearing cage – rolling element contact, an ovalization of a bearing mounting and a quantity of a bearing journal's skew.

Keywords: technical diagnostic, diagnostic of power transmission, bevel, frequency modulation, characteristic pattern, turbine engine, rolling bearing.

## 1. WSTĘP

Silniki turbinowe, których prototypy pojawiły się już przed wojną, m. in. w Polsce, gdzie projektowano ich zastosowanie w okrętownictwie, zostały zastosowane przez Niemców pod koniec drugiej wojny światowej m. in. w samolocie myśliwskim Messersmith Me-262, czy też rozpoznawczo-bombowym Arado. Samoloty te wraz ze swymi nowatorskimi silnikami na stałe wpisały się do historii lotnictwa. Odznaczały się niezwykłą prostotą konstrukcji i olbrzymią siłą ciągu na jednostkę masy silnika. Jednakże pierwsze konstrukcje wniosły kolejne wyzwania m. in. co do łożyskowania tych szybkoobrotowych silników. Najważniejsze problemy z ich smarowaniem, chłodzeniem, wibracjami i ogólnym zużyciem. Szybko obracający się wirnik wytwarza tak dużą siłę odśrodkową w łożysku, że jeżeli osiągnęło ono, na skutek zużycia ściernego, znaczne luzy, to jego elementy toczne przestają być obciążane przy zwiększaniu prędkości obrotowej – nie obtaczają się po bieżni wewnętrznej łożyska. Jest to problem zupełnie odwrotny do tego, z jakim borykał się świat okresu „pary i elektryczności” XIX wieku – kiedy to konstruktorzy mieli kłopoty z przeciążaniem łożysk maszyn wirnikowych w obiektach naziemnych lub nawodnych i pojawianiem się w związku z tym różnego rodzaju pęknięć, zatarć i innych śladów zużycia na bieżniach łożyskowych. W silnikach turboodrzutowych występuje często niedociążenie<sup>4</sup> elementów tocznych łożysk, co powoduje zmniejszenie prędkości kątowej elementów tocznych. Teraz wystarczy nawet stosunkowo niewielki manewr statku powietrznego, żeby siły bezwładności oraz moment żyroskopowy spowodował krótkotrwałe dociążenie łożyska. Ponieważ elementy toczne (na skutek niedociążenia łożyska) wytraciły swoją prędkość obrotową

zostają w takiej sytuacji zmuszone do szybkiego przyspieszenia często ze znacznym poślizgiem. Często powtarzające się takie sytuacje mogą powodować szybkie zużycie ściernie poszczególnych elementów tocznych. Szczególnie narażony na siły dynamiczne jest koszyk łożyska - rys. 1.

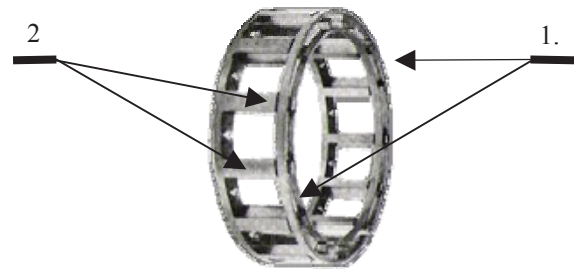


Fig. 1. View of investigated bearing cage of the turbine engine: 1 – rings of cage, 2 – separation elements

Zgodnie z tradycją konstrukcyjną ma on za zadanie rozdzielać elementy toczne, a więc nie jest przewidziany na przenoszenie znacznych sił. W przypadku ogólnego niedociążenia łożysk oraz ostrych zmian poziomu jego dociążania pojawia się „nietypowa” dla tradycji konstrukcyjnych sytuacja, gdy koszyk łożyska jest poddany siłom uderowym. Wynikające z niejednakowych warunków tarcia różnicowanie kinematyczne elementów tocznych powoduje powstawanie sił uderowych w zespole tocznym.

Tego typu zjawiska nietypowe dla wcześniejszych zastosowań łożysk tocznych, spowodowały, że wytwórnie i instytucje lotnicze prowadzą często szeroko zakrojone badania związane z poznaniem i monitorowaniem skomplikowanych procesów niszczenia łożysk tocznych w silnikach lotniczych. Problem ten istnieje do dziś i stanowi jedną z głównych trosk konstruktorów, operatorów i badaczy wypadków lotniczych. Badania takie prowadzone są także w Instytucie Technicznym

<sup>4</sup> niedociążenie łożysk wysokoobrotowych jest często definiowane jako utrata obtaczania się obwodu elementu tocznego po bieżni wewnętrznej łożyska.

Wojsk Lotniczych. Od pewnego czasu do diagnozowania podpór łożyskowych niektórych silników turbinowych wojskowych statków powietrznych stosowane są także metody FAM-C i FDM-A. Na dzień dzisiejszy możliwe jest śledzenie kolejnych etapów życia łożyska tocznego.

Śledzenie tych zjawisk było realizowane dotychczas głównie za pomocą metod wibroakustycznych, analiz składu opiłowania w olejach smarnych i innych. Autorzy proponują metodę alternatywną, gdzie sygnał diagnostyczny z podpór łożyskowych jest przekazywany poprzez połączenia mechaniczne do prądnicy lotniczej, w której jest zamieniany na synchroniczny, cyfrowy sygnał łatwo obrabialny przez współczesne nam narzędzia techniki komputerowej. Metody te autorzy nazwali FAM-C oraz FDM-A. Sygnał diagnostyczny zakodowany w modulacji częstotliwości i fazy prędkości kątowej, która jest (jak od dawna wiadomo z teorii przesyłu fal radiowych) bardziej odporna na zakłócenia niż modulacja amplitudowa [1, 8]. Sygnał diagnostyczny podlega dwuetapowemu próbkowaniu:

- „próbkowaniu synchronicznemu” – przetworzeniu w cyfrowy sygnał (przebieg częstotliwości chwilowej) przez „etatową” prądnicę pokładową,
- „klasycznemu” próbkowaniu w dziedzinie czasu przez zegar karty licznikowej o odpowiednio dobranej częstotliwości.

Pełny opis metody diagnostycznej zawarto w [2-4, 6-7]. Warto jednak wymienić najważniejsze jej elementy niezbędne do zrozumienia kontekstu zagadnień poruszanych w niniejszym opracowaniu. Każdej wadzie montażowej lub zużyciowej, np. skoszeniu połączeń wielowypustowych skrzyń napędów towarzyszy zmodulowanie wyjściowej prędkości kątowej. Okres zmodulowań jest, parametrem charakterystycznym dla typu wady i kątowej prędkości znamionowej danej pary kinematycznej. Wartość dewiacji częstotliwości (amplituda zmodulowań) jest natomiast proporcjonalna do wielkości danej wady. Zmodulowania te przenoszone są, poprzez układ transmisji, do wirnika prądnicy. Prądnica lotnicza, będąca maszyną synchroniczną, odzwierciedla zmiany chwilowej prędkości kątowej w postaci modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego. Mierząc przyrosty czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zerowy i odkładając podwojoną ich odwrotność na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych ( $t, f_i$ ), otrzymuje się zbiór odzwierciedlający, w sposób dyskretny,

przebieg zmian prędkości wirnika prądnicy. Dla każdego odchylenia można przyporządkować dwa parametry:

- czas odchylenia  $t_{odi}$ ,
- amplitudę odchylenia  $\Delta F$ .

Czas odchylenia można zastąpić częstotliwością procesu  $f_p$  zgodnie ze wzorem:

$$f_{pi}=1/(2t_{odi}) \quad (1)$$

Każde odchylenie może być przedstawione na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych w postaci punktów ( $f_p, \Delta F$ ). W czasie liczących prac badawczych stwierdzono, że punkty te mają tendencję do skupiania się w zbiory. Nazwano je zbiorami charakterystycznymi, gdyż charakteryzowały zużycie poszczególnych podzespołów. Stwierdzono, że mają różne kształty, wysokości i położenia względem osi odciętych. Stwierdzono również, że ze zmianą wielkości wady zmienia się wysokość danego zbioru  $\{\Delta F_{max}/+ \Delta F_{min}/\}$ , zaś pasmo zajmowane przez zbiór względem osi odciętych  $0-f_p$  było charakterystyczne dla danego typu podzespołu.

## 2. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA SZUMOWA

Zgodnie z literaturą z dziedziny diagnostyki łożysk tocznych istnieją trzy kolejne etapy (fazy) zużycia łożysk [5]: szumowy, wibracyjny, termiczny. Pierwsza z nich została nazwana w tradycji diagnostyki łożysk, gdyż w pierwszych eksperymentach diagnostycznych z użyciem stetoskopu słyszano dźwięk przypominający do złudzenia szum morza.

Już na początku, po remoncie lub wyprodukowaniu danego silnika metody: FAM-C i FDM-A umożliwiają wykrycie wad montażu łożysk.

Już na początku, **po remoncie** lub wyprodukowaniu danego silnika, metody FAM-C i FDM-A umożliwiają wykrycie wad montażu łożysk. Ogólnie biorąc, po remoncie **opory tarcia tocznego** podpór łożyskowych są bardzo niskie, stąd też wysokość zbiorów charakterystycznych kanału prądu stałego poszczególnych łożysk osiągają niewielkie wartości (wartość średnia od 5% do 30%, wartości maksimum dla poszczególnych prędkości obrotowych od 20% do 40%<sup>5</sup>) – podczas gdy po długotrwałej eksploatacji silniki ze skorodowanymi lub pełnymi opiłków łożyskami osiągają o całe rzędy większe wartości (silniki bliskie zatarcia osiągały poziom około  $A=1800\%$ ). Istotne jest obserwowanie relacji

<sup>5</sup> Jest to odniesienie do poziomów „wzorcowego” zużycia (dla każdego łożyska indywidualnie) określonego doświadczalnie podczas prób na hamowni, przy którym silnik pracował poprawnie.

wysokości zbiorów dla kolejnych prędkości znamionowych.

Poprawnie zmontowany silnik powinien mieć opory tarcia zmniejszające się ze wzrostem prędkości obrotowej – tj. zmniejszające się wysokości zbiorów charakterystycznych - rys. 2.

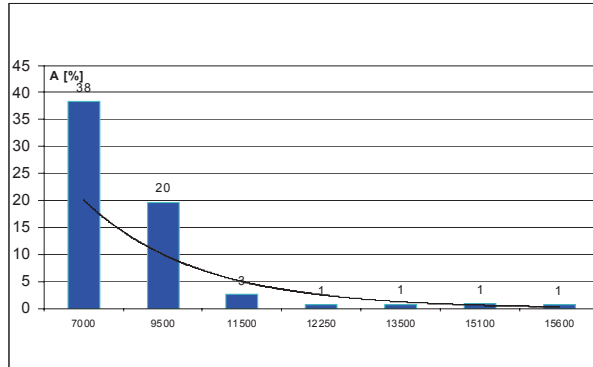


Fig. 2 High of characteristic patterns of direct current channel for correctly mounted bearing different rotational speed of the main shaft

Jest to uzasadnione zwiększaniem się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej sił hydrodynamicznych (oddziaływanie filmu olejowego) zmniejszających opory łożyska. Jednakże na skutek wielu złożonych błędów montażu silnika lotniczego (niewspółosiowość podpór łożyskowych, przekoszenie łożyska względem osi wału, zbyt małych luzów promieniowych np. na skutek zbyt silnego wcisku łożyska na czop) charakterystyka ta często odbiega od opisanej powyżej. Niekiedy przybiera ona zależności wręcz odwrotne – opory tarcia rosną ze wzrostem prędkości obrotowej wału głównego - rys. 3.

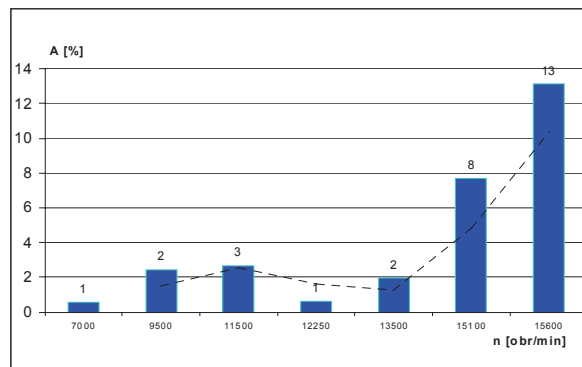


Fig. 3. High of characteristic patterns of direct current channel for incorrectly mounted bearing and different rotational speed of the main shaft

Jak pokazała praktyka eksploatacyjna takie zobrazowanie wiązało się ze znacznym skróceniem eksploatacji łożyska do około 15 godzin pracy – następowało nadmierne zużycie bieżni wewnętrznej i elementów tocznych oraz intensywne zwiększanie luzów obwodowych pomiędzy elementami

tocznymi a koszykiem, zakończone pęknięciem koszyka.

**Wielkość luzów obwodowych pomiędzy elementami tocznymi a elementami separującymi koszyka** jest łatwo określana za pomocą pomiaru pulsacji całkowitej trójfazowej prądnicy tachometrycznej (tor AC) – wielkość luzu jest wprost proporcjonalna do wielkości pulsacji. W całej populacji badanych silników poprawnie zmontowane i eksploatowane łożyska nie miały pulsacji większej niż 10%, zaś nowe łożyska zaledwie kilka procent. Na rys 4 i 5 można zauważyć rozwój luzów dla niepoprawnie zamontowanego łożyska już po 5 godzinach eksploatacji – wartość pulsacji zmieniła się wyraźnie z poziomu 7,5% do poziomu 11,5%. Spotykane łożyska o ekstremalnie zwiększonych luzach obwodowych (pomiędzy oknami separatora a elementami tocznymi) osiągały poziom do 160% - towarzyszyła temu destrukcja koszyka, tj. przerwanie elementów separujących i pęknięcie jego obwodu.

Od pierwszych godzin eksploatacji można zaobserwować **zwiększanie oporów toczenia** na skutek procesów ścierania m. in. złuszczenia warstwy galwanicznej z koszyka – w metodzie FDM-A objawia się to w postaci zwiększenia wysokości zbiorów charakterystycznych.

Zużycie ściernie, zgodnie z [5] powstaje, jeżeli materiał bardziej miękki jest poddany bruzdowaniu przez chropowate powierzchnie materiału twardego lub przez luźne, swobodne twarde cząstki. Wówczas w pewnych miejscach ustaje toczenie się elementu tocznego po bieżni łożyska i dominuje tarcie ślizgowe. Droga poślizgu może być precyzyjnie obserwowana za pomocą metody FDM-A poprzez obserwację zmian tzw. współczynnika toczenia  $p_s$ . Jest on obliczany z ilorazu wartości górnej częstotliwości pasma zbioru charakterystycznego dla danego łożyska do częstotliwości  $N$  - jej harmonicznej prędkości znamionowej wału głównego:

$$p_s = f_{gi} / N_i \cdot n_N \quad (2)$$

gdzie:  $n_N$  – znamionowa (zadana) prędkość obrotowa wału głównego,  $N_i$  – liczba elementów tocznych łożyska nr „i”;  $f_{gi}$  – górna częstotliwość pasma zbioru charakterystycznego łożyska nr „i”.

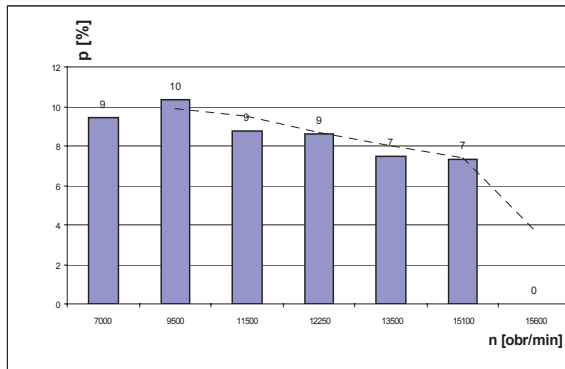


Fig. 4. Relative value of pulsation of alternating current channel for incorrectly mounted during maintenance bearing and different rotational speed of the main shaft ( $\Theta = 0$ )

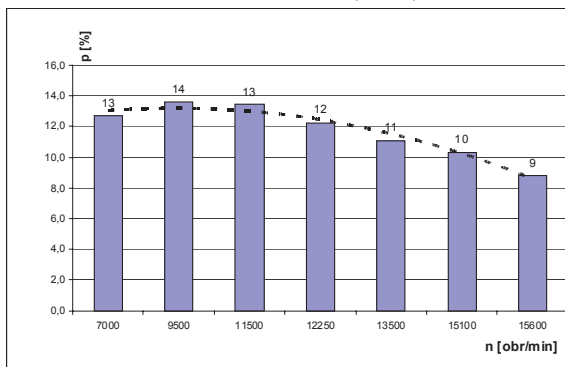


Fig. 5. Relative value of pulsation of alternating current channel for incorrectly mounted bearing and different rotational speed of the main shaft for  $\Theta = 5$  hours

Jak wiadomo, w zależności od relacji geometrycznych pomiędzy średnicami bieżni i elementów tocznych, gdy brak jest poślizgów, to relacje pomiędzy prędkością ruchu osi obrotu elementów tocznych a bieżnią ruchomą, są w ścisłych relacjach geometrycznych, które można ująć wzorem na wartość znamionowa współczynnika toczenia ( $p_{sN}$ ) [7]:

$$p_{sN} = D_w / (2(D_w + 2d_k)) \quad (3)$$

gdzie:  $D_w$  – średnica bieżni wewnętrznej,  $d_k$  – średnica elementu tocznego łożyska.

Wówczas to koszyk łożyska będzie obracał się z prędkością obrotową  $n_k$ :

$$n_k = n_N \cdot p_{sN} \quad (4)$$

Wszelkie odchylenia od tej wartości świadczą o istotnych zjawiskach zachodzących w procesie toczenia się elementów tocznych po bieżni wewnętrznej jak również o płynności przemieszczania się koszyka łożyska. W zależności od wartości współczynnika toczenia można wnioskować, że:

- $p_s = p_{sN}$  - toczenie jest idealne tzn. bez poślizgów. Elementy toczne mają cały czas

kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną a koszyk łożyska obraca się płynnie;

- $p_s > p_{sN}$  - toczenie elementów tocznych po bieżni jest utrudnione z poślizgami. Elementy toczne mają cały czas kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną, lecz koszyk łożyska nie obraca się płynnie;
- $p_s = 1$  - toczenie nie istnieje – elementy toczne są zablokowane, a łożysko toczne zamienia się w łożysko ślizgowe. Elementy toczne mają cały czas kontakt cierny z bieżnią wewnętrzną, a koszyk łożyska obraca się z prędkością kątową czopa;
- $p_s < p_{sN}$  - elementy toczne nie mają całego czasu kontaktu ciernego z bieżnią wewnętrzną (np. z powodu zmniejszenia średnicy elementów), a koszyk łożyska nie obraca się płynnie.

Obserwacja zmian charakterystyki współczynnika toczenia w funkcji prędkości obrotowej wału głównego może dostarczyć wielu cennych informacji diagnostycznych o stanie poszczególnych łożysk, jak również o ich wzajemnej współosiowości. Przy niewspółosiowości łożysk pojawia się ujemne ekstremum (rys. 6).

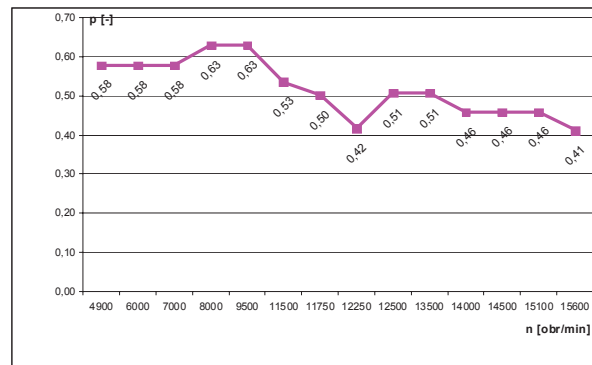


Fig. 6. Diagram of changes of rolling coefficient versus rotational speed of the main shaft

Zazwyczaj nowe łożyska mają charakterystykę  $p_s = f(n)$  liniowo opadającą – tj. odwrotnie proporcjonalną do prędkości obrotowej. W miarę wzrostu luzów łożyskowych wartość średnia  $p_s$  (średnia ze wszystkich prędkości obrotowych) maleje.

### 3. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA WIBRACYJNA

Wraz z intensyfikacją zużycia ściernego pojawiają się coraz większe luzy promieniowe łożyska – można je obserwować, analizując zmiany wysokości pierwszej harmonicznej kanału prądnicę prądu przemiennego (metoda FAM-C). W ten sposób obserwowane są zjawiska łączne –

maksymalny luz dynamiczny z uwzględnieniem mimośrodowego przesunięcia łożyska i oddziaływania siły odśrodkowej i innych sił dynamicznych (np. zjawisk żyroskopowych).

Bardzo ważne w czasie eksploatacji zespołu wirnikowego silnika lotniczego jest śledzenie rozwoju wady przekoszenia. Można łatwo obserwować wielkość tej wady za pomocą metody FAM-C – wartość kąta przekoszenia jest wprost proporcjonalna do pierwszej podharmonicznej prędkości wału głównego. Jeżeli w czasie eksploatacji obserwuje się wzrost przekoszenia a jednocześnie nie następuje proporcjonalne zwiększenie luzu promieniowego, to należy się liczyć ze wzrostem momentu gnącego działającego na czop.

W fazie wibracyjnej stwierdzono kilkakrotnie podczas demontażu opadnięcie koszyka na bieżnię wewnętrzną. Jest to możliwe przy nadmiernym zwiększeniu luzów na styku element separujący koszyka – element toczny. W czasie eksploatacji takiego silnika (przed demontażem) obserwowano na charakterystyce toczenia  $p_s = f(n)$  dodatnie ekstremum, tj. swoisty „garb” charakterystyki (rys. 6). Na bieżni wewnętrznej takiego łożyska można zauważyć ślady współpracy ciernej z pierścieniem spinającym koszyka.

W fazie wibracyjnej następuje systematyczne zmniejszenie oporów tarcia, co powoduje systematyczne zmniejszanie wysokości zbiorów charakterystycznych poszczególnych łożysk – odwrotnie niż dla fazy szumowej, gdzie następował wzrost oporów ze zwiększaniem czasu pracy łożyska. Niezależnie od tego obserwuje się zwiększenie luzów promieniowych i obwodowych – zwiększa się wyraźnie wartość pulsacji całkowitej na przebiegach częstotliwości chwilowej  $f_i = f(t)$  w kanale prądu przemiennego.

#### 4. ZUŻYCIE ŁOŻYSKA - FAZA TERMICZNA

W fazie termicznej opory tarcia tocznego obserwowane metodą FDM-A zaczynają się powoli zwiększać. Objawia się to w postaci zwiększania wysokości zbiorów charakterystycznych poszczególnych łożysk  $\Delta F = f(f_p)$  - rys. 7, rys. 8.

Na charakterystykach toczenia  $p_s = f(n)$  można zauważyć oprócz omówionego wcześniej charakterystycznego ekstremum ujemnego (kształt „siodła”), także ekstremum dodatnie, które to świadczy o bezpośrednim kontakcie koszyka z bieżnią wewnętrzną łożyska (rys. 6 –  $n=8000$ obr/min). Obserwacje łożysk w fazie termicznej wykazały, że z taką charakterystyką wiąże się **zjawiska rezonansu**. Objawiają się one

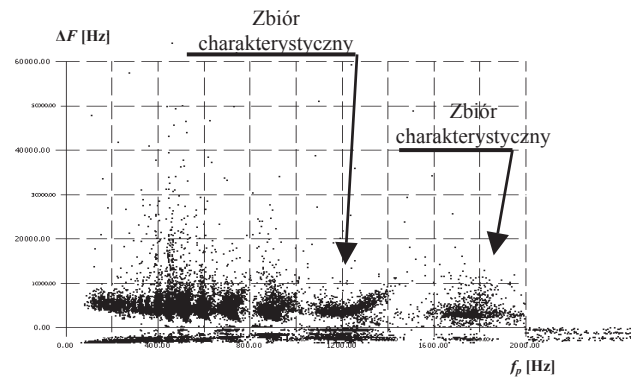


Fig. 7. Characteristic patterns  $\Delta F_i = f(f_p)$  for the generator on bearing supports without resonance

w formie zwiększonej względnej wysokości zbioru charakterystycznego (iloraz wysokości bezwzględnej zbioru charakterystycznego do szerokości pasma tego zbioru) dla danego łożyska. Łatwo można też wyznaczyć dobroć mechaniczną  $Q$  danego łożyska. Zgodnie z literaturą i doświadczeniami autora, przy  $Q > 10$  [1, 5] łożysko jest zagrożone i należy je wymienić. Początkowo w rezonans wpadają pojedyncze elementy podpór łożyskowych, następnie, w miarę rozwoju zużycia, może dojść do rezonansu ogólnego całego zespołu wirnikowego. Znamienne jest, że rezonansom takim towarzyszy rozpad zbiorów charakterystycznych – następuje ich podział i odseparowanie w pionie i w poziomie (rys. 8).

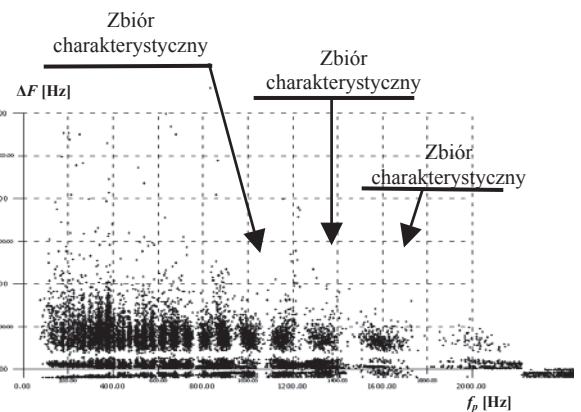


Fig. 8. Resonance impression on outside race of the rolling bearing

W warunkach rezonansu występują znaczne promieniowe siły uderowe pomiędzy elementami tocznymi a bieżniami – powstają charakterystyczne wgłębienia na bieżniach (rys. 9), które w trakcie dalszej eksploatacji, stają się swoistymi „basenami przyciągania” [9] energii uderowej. Ponadto

występują siły uderowe elementów tocznych o okna koszyka.



Fig. 9. Resonance impression on outside race of the rolling bearing

Wynikające z niejednakowych warunków tarcia zróżnicowanie kinematyczne elementów tocznych powoduje powstawanie sił uderowych w zespole tocznym. Energia wprowadzona do koszyka w czasie zderzenia z elementem tocznym powoduje zmianę jego pędu w kierunku obwodowym i promieniowym, a częściowo jest tracona na dodatkowy poślizg elementów tocznych po bieżniach. W wyniku sił uderowych koszyk zaczyna oscylovac w sposób nietlumiony pomiędzy elementami tocznymi. Wiruje on też na ogół wokół innej osi niż oś łożyska [5]. Wykonane demontaże silników turbinowych w kolejnych stadiach eksploatacyjnych udowodniły, że rezonanse węzłów łożyskowych powodują szybką destrukcję łożysk, a w szczególności koszyka łożyska tocznego. Już w pierwszych godzinach pracy w warunkach rezonansu mogą się pojawić na elementach separujących nawisy materiałowe. Czasami pojawiają się też pęknięcia na pierścieniach koszyk łożyska. Podczas dalszej eksploatacji może dojść do przerwania niektórych elementów separujących – wówczas elementy toczne oddziałują na siebie w sposób bezpośredni. Można wówczas zaobserwować metodą FAM-C na obrazowaniach  $f_i = f(t)$  paczki  $k$  – impulsów (rys. 10), gdzie  $k$  oznacza liczbę przerwanych elementów separujących koszyka łożyska tocznego. Amplituda impulsów osiąga poziom około 200÷350% poziomu częstotliwości znamionowej. Najczęściej w takim przypadku siły dynamiczne oddziałujące na koszyk są tak duże, że dochodzi do rozerwania pierścieni koszyk łożyska tocznego.

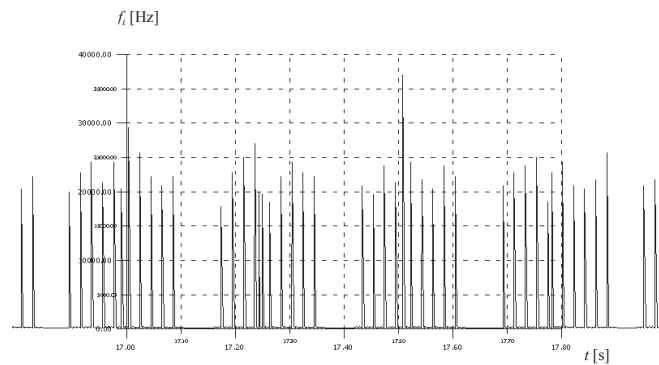


Fig. 10. Diagram of frequency of alternating current channel for bearing with broken separation elements of the bearing's cage

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy opisano teorię i zastosowanie metod diagnostycznych FAM-C i FDM-A opartych o analizę parametrów modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego do diagnozowania stanu technicznego podpór łożyskowych silników turbinowych. Dzięki zastosowaniu tych metod możliwe jest wcześniejsze wykrywanie defektu podzespołu, zanim stanie się on groźny np. dla bezpieczeństwa lotu statku powietrznego. Możliwe jest określanie wielu błędów montażowych oraz monitorowania efektów zużyciowych zachodzących w węzłach łożyskowych. Precyzyjnie można śledzić liczne parametry łożysk: zmiany oporów tarcia, zmiany luzów promieniowych łożyska, zmiany wielkości luzów obwodowych pomiędzy koszykiem a elementem tocznym, zmiany współczynnika toczenia. Jednocześnie możliwe jest obserwowanie zjawisk występujących w zespole wirnikowym, w tym wielkości przekoszeń pomiędzy wałem turbiny a wałem sprzężarki. Na wiele godzin wcześniej, niż sygnalizują to dotychczas „tradycyjnie” stosowane metody, można obserwować, bez ingerencji w układ, szereg zjawisk zużyciowych prowadzących do groźnych uszkodzeń węzłów łożysk tocznych silników turbinowych poprzez: wykrywanie i lokalizację rezonansów lokalnych i ogólnych, obserwację rozerwania elementów separujących koszyka lub całego pierścienia koszyk łożyska tocznego. Dla wielu tych zjawisk opracowano precyzyjne parametry metryczne, które w przyszłości mogą posłużyć jako istotne elementy algorytmów w automatycznych układach diagnozowania łożysk tocznych. Systematyczne stosowanie metod FAM-C i FDM-A w sposób precyzyjny umożliwia określenie bezpiecznego momentu przerwania eksploatacji diagnozowanego obiektu.

**LITERATURA**

- [1] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [2] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 175664B1: Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu przemiennego*, Zgłoszenie 08.07.1996, udzielenie patentu 29.01.1999.
- [3] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 175674B1 Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu stałego*.
- [4] Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: *Opis patentowy PL 182554 B1, Sposób diagnostowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu przemiennego*, zgłoszenie 19.05.1997, udzielenie patentu 02.04.2002r.
- [5] Furmanek S.: Kraszewski Z.: *Niezawodność łożysk tocznych*. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, Warszawa 1989.
- [6] Gębura A.: *Diagnostic of aircraft power transmission track based on the analysis of generator's frequency*. Journal of Technical Physics, Vol. XLIII No. 1 Warszawa 2002.
- [7] Gębura A., Tokarski T.: *The FDM-A method as applied to evaluate the rolling-element spin and misalignment of bearing support elements* Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 22, s. 135-146, Warszawa 2007.
- [8] Wojnar A.: *Teoria sygnałów*. WNT, Warszawa 1980.
- [9] Andrejewicz J.: *Chaos i synchronizacja w układach fizycznych*, Monografie, Łódź 1995.