

ANALIZA DRGAŃ I BADANIA TRIBOLOGICZNE W DIAGNOSTYCE TURBINOWEGO SILNIKA ŚMIGŁOWEGO

ZDZISŁAW GOSIEWSKI*, PAWEŁ MAJEWSKI**, MARIUSZ ŻOKOWSKI**

Instytut Lotnictwa, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych***

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z pracami, mającymi na celu zwiększenie re-sursu silnika M-601T, dla których skończył się międzyremontowy resurs kalendarzowy oraz li-czony według cykli, przy dużej pozostałości resursu godzinowego.

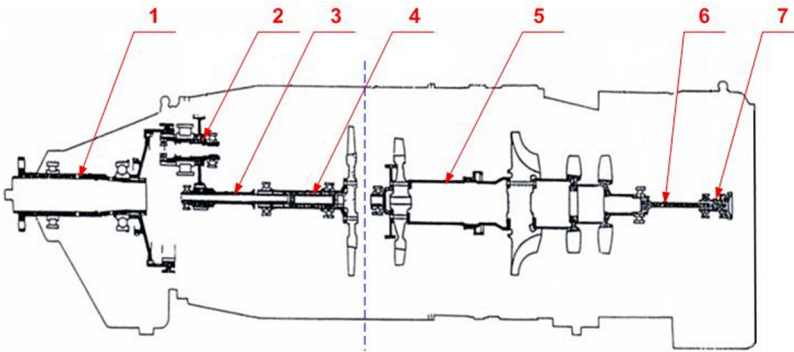
Badania i analizy, jakie zostały przeprowadzone na tym silniku polegały, między innymi, na pobieraniu próbek oleju i ich analizie tribologicznej oraz pomiarze drgań kadłuba silnika i ich analizie zgodnie z wcześniej zaplanowanym harmonogramem prac. W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z wymienionymi metodami badawczymi.

Słowa kluczowe: analiza drgań, analiza tribologiczna, turbinowy silnik śmigłowy M-601T

WSTĘP

Statki powietrzne eksploatowane w Siłach Powietrznych RP bardzo często posiadają niewy-korzystany zasób trwałości przy jednoczesnym wyczerpaniu, tzw. re-sursu kalendarzowego. W związku z powyższym Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych uczestniczy w pracach mających na celu opracowanie metodyk, pozwalających na wykorzystanie tych zasobów. Stosowane do tego metody są zazwyczaj metodami eksperckimi, mające swoje podłoże w długoterminowych pracach związanych z techniką lotniczą, jakie prowadzi Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Jednym z przykładów były prace nad zwiększeniem re-sursu silnika M-601T. Dla części silni-ków tego typu skończył się międzyremontowy resurs kalendarzowy oraz liczony według cykli, przy dużej pozostałości re-sursu godzinowego. W związku z powyższym podjęto prace zmie-rzające do zwiększenia bezpiecznego czasu użytkowania tego silnika.

Silnik M-601T zbudowany jest z następujących podzespołów: sprężarki, posiadającej dwa stopnie osiowe i jeden odśrodkowy oraz jednostopniowej turbiny wysokiego ciśnienia i jed-nostopniowej turbiny napędowej, schemat silnika przedstawiono na Rys. 1.

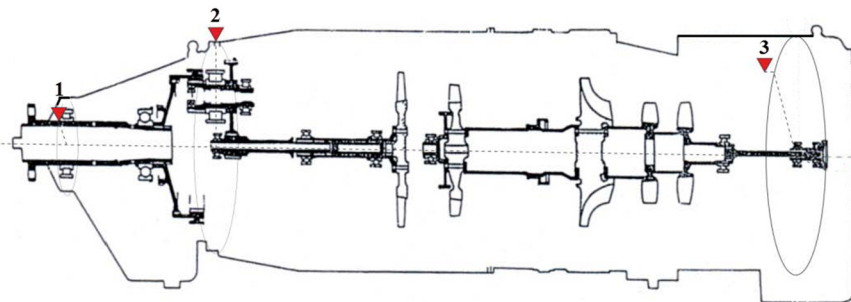


Rys. 1. Schemat silnika M-601T z widocznymi zasadniczymi elementami jego budowy
 1-wał śmigła, 2-przekładnia redukcyjna, 3-wał napędu reduktora, 4-wirnik oddzielnej turbiny napędowej „wolnej”, 5-wirnik wytwornicy spalin, 6-wał napędowy skrzynki przekładniowej, 7-główne koło, przekazujące napęd do skrzynki napędów

1. REALIZACJA BADAŃ

W trakcie cyklu prób długotrwałych silnika M-601T, wykonano szereg czynności mających na celu określenie jego bieżącego stanu technicznego, sprawdzanego w określonych przedziałach czasowych. Wykonano między innymi badania endoskopowe elementów silnika, pomiar drgań kadłuba silnika, analizę zapisu parametrów silnikowych, analizę tribologiczną próbek olejowych oraz demontaż końcowy i weryfikację elementów silnika. Dla uzyskania wiarygodnych ocen stanu technicznego skoncentrowano się na wynikach badań drgań i tribologicznych.

W celu pomiaru drgań silnika zastosowano czujniki drgań zamocowane w punktach pomiarowych, przedstawionych schematycznie na Rys. 2. Rejestrację sygnałów z czujników wykonywano co 10 godzin pracy silnika.



Rys. 2. Miejsce mocowania czujników drgań
 1-kadłub przedniego łożyska wału śmigłowego, 2-kadłub pośredniej przekładni reduktora,
 3-podpora końcówki wału napędu skrzynki agregatów

W celu przeprowadzenia analizy tribologicznej próbki oleju pobierano z trzech punktów: zbiornika olejowego, reduktora oraz skrzynki napędu agregatów, również po każdych 10 godzinach pracy silnika na ziemi zgodnie przygotowanym profilem próby specjalnej.

Ze względu na fakt, iż przeprowadzone badania miały charakter przyspieszonych badań dowodowych odpowiadających warunkom normalnej eksploatacji, podczas prób nie symulowano dodatkowych obciążeń niszczących, np. w postaci niewyważenia, itp.

2. ANALIZA TRIBOLOGICZNA

Analiza tribologiczna próbek olejowych z silnika, oparta była o dwie metody badawcze:

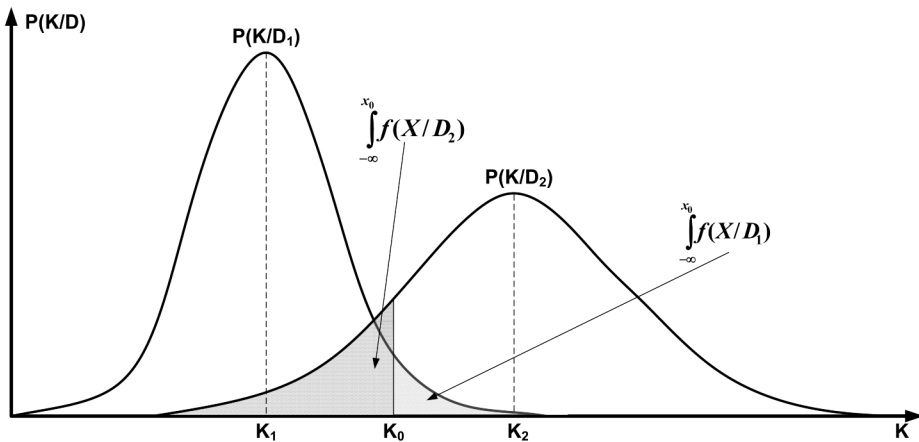
- optyczną spektrometrię emisyjną;
- ferrograficzną.

Degradację systemu tribologicznego silników lotniczych można uznać za proces losowy. Zauważyć można istnienie liniowej zależności pomiędzy skumulowanym zużyciem badanego systemu tribologicznego, a wartościami koncentracji produktów zużycia. Probabilistyczny model diagnostyczny dopuszcza sposób wnioskowania za pomocą wartości progowych parametru Z_p , skumulowanego zużycia, wyznaczonych metodami statystycznymi. Na wstępie należało zdefiniować łączne ryzyko decyzji diagnostycznej, przyjmując dwie diagnozy D_1 – system sprawny i D_2 – system niesprawny [7].

Pierwszym krokiem było wyznaczenie wartości progowej K_0 parametru diagnostycznego. Wartość progowa parametru K_0 , jest wartością, która w sposób optymalny rozdziela obszary: sprawny i niesprawny. Wybór K_0 daje zawsze dwa rodzaje błędów:

fałszywy alarm – gdy przyjęto decyzje o niesprawności, gdy w rzeczywistości system znajduje się w stanie sprawnym;

niewykrycie stanu niezdatności – gdy przyjęto decyzje o sprawności, gdy w rzeczywistości system znajduje się w stanie niesprawnym.



Rys. 3. Przebieg funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa (stanów: sprawny i niesprawny) dla wyznaczenia wartości progowych w modelu probabilistycznym

Prawdopodobieństwo dopuszczalnego zagrożenia równe jest prawdopodobieństwu zajścia dwóch przypadków: wartości prawdopodobieństwa sprawnych systemów dla $K < K_0$ i wartości prawdopodobieństwa warunkowego sprawnych systemów dla $K > K_0$:

$$p(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(K > K_0 / D_1) = P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K / D_1) dK$$

gdzie:

$$P_1 = P(D_1)$$

przyjęte prawdopodobieństwo diagnozy D_1 – sprawnych systemów obliczonych na bazie danych statystycznych, np. poprzez przyjęcie, że występuje 90% sprawnych.

Jest kilka sposobów na wyznaczenie wartości progowej, różniących się liczbą czynników w ocenach, a także stopniem znajomości apriorycznych rozkładów prawdopodobieństw dla stanów: sprawny i niesprawny. Wszystkie one jednak prowadzą do wyznaczenia takiej wartości progowej, dla której w zbiorze parametrów ryzyko decyzji diagnostycznej jest minimalne. Zależność tę można zapisać w postaci:

$$K_0 \Rightarrow K(R = R_{\min})$$

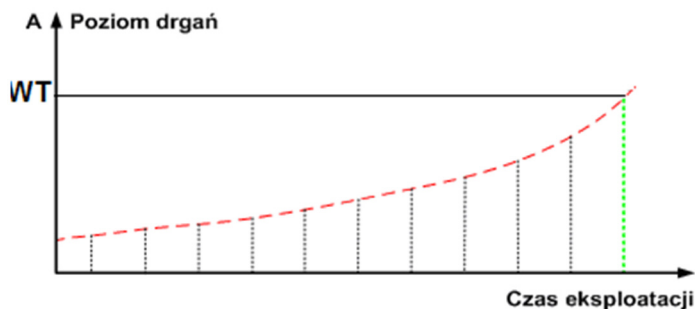
Istnieje wiele metod obliczania wartości progowej, jednak na podstawie obliczeń, doświadczeń i praktyki stosowanej na świecie i w Zakładzie Silników Lotniczych ITWL, przyjęto metodę trzech sigm.

Optyczna spektrometria emisyjna pozwala określić koncentrację w [ppm] pierwiastków metalicznych w próbce oleju pobranej z danej lokalizacji. Dla silnika M-601T znaczącymi pierwiastkami są: Al – aluminium, Cu – miedź, Fe – żelazo, Si – krzem, Sn – cyna, Zn – cynk.

Natomiast metoda ferrograficzna oparta jest na wizualnej ocenie produktów zużycia wydzielonych w polu magnetycznym za pomocą ferroskopu i ocenie zachodzących procesów zużycia na podstawie wyznaczonych wskaźników. Za pomocą ferrografu z bezpośrednim odczytem, tzw. DR (ang. Direct Reading), można określić parametr D_L (cząstki duże o wielkości powyżej 5 [μm]) i D_S (cząstki małe o wielkości poniżej 5 [μm]) i na ich podstawie wyznaczyć: współczynnik intensywności zużywania (WIZ), procentowy udział cząstek dużych (%D) oraz współczynnik produktów zużywania (KPZ).

3. ANALIZA WIDMOWA

Obserwacja drgań eksploatacyjnych turbinowego silnika śmigłowego pozwala na wyznaczenie krzywej życia maszyny. Poziom drgań mierzonych na kadłubie, obudowy łożyska zmienia się w sposób przedstawiony na Rys. 4.



Rys. 4. Krzywa życia maszyny obserwowana za pomocą pomiarów drganiowych

Na podstawie pomiarów drgań, mierząc prędkość V , można przewidzieć czas wystąpienia ewentualnej awarii. Przeprowadzając analizę i skład widmowy drgań w porównaniu z częstotliwością obrotową f_0 i znajomością kinematyki silnika można określić element (zespół), który należy poddać naprawie, wymianie, bądź tak jak to bywa w lotnictwie przerwać na czas eksploatację danego silnika w celu uniknięcia katastrofy. I tak na przykład składowe widmowe o częstotliwościach podanych niżej są symptomami: f_0 – niewyważenia, $2f_0$ – luzy, $2f_0 \div 3f_0$ – nieosiowość, $n \cdot f_0$ – częstotliwość zębowa koła o liczbie zębów n i obrotach f_0 .

Obserwując trend zmian amplitud poszczególnych składowych widmowych, będących symptomami drganiowymi elementów, można oceniać ich stan eksploatacyjny.

Oceniając stan techniczny silnika należy mieć na uwadze fakt, iż obiekt ten jest obiektem skomplikowanym, na który działają różnego rodzaju wymuszenia. Dlatego też próba zamodelowania i opisu dynamicznego turbinowego silnika śmigłowego jest procesem trudnym, ponieważ jest to obiekt silnie nieliniowy i zależny od wielu zmiennych.

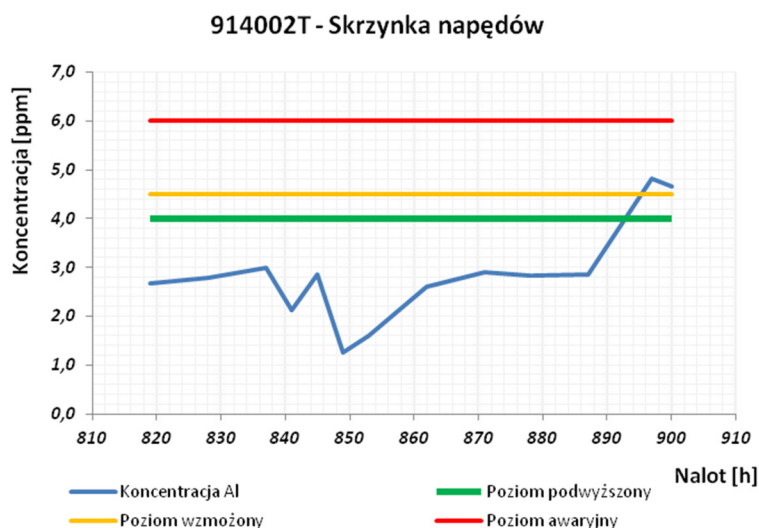
Producent danego silnika określa pewne warunki techniczne na dane parametry użytkowe. Stan dynamiczny silnika opisują związki, jakie zachodzą między rodzajem wymuszenia, własnościami dynamicznymi układu mechanicznego, a amplitudą drgań, czyli ogólnie odpowiedzią układu na wymuszenia.



Rys. 5. Schematyczny model opisu dynamicznego maszyny

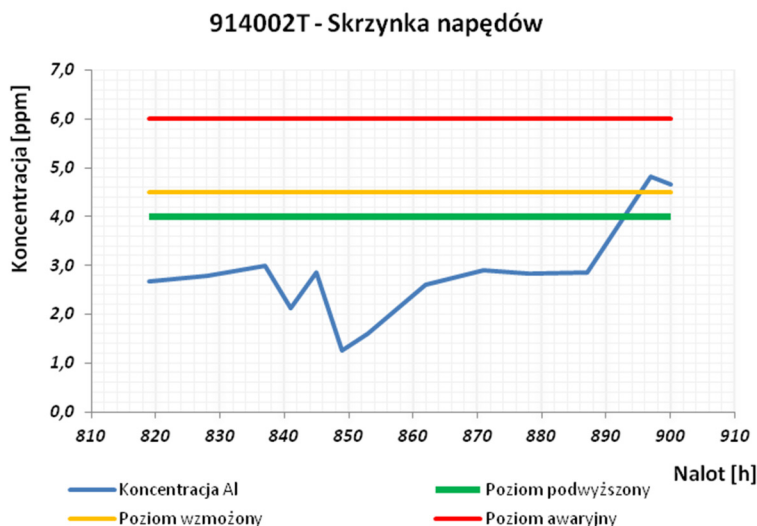
4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ DRGAŃ I TRIBOLOGICZNYCH

Analizie poddano dane uzyskane podczas realizacji prac, mających na celu ocenę stanu technicznego silnika w świetle opracowanego przez Zakład Silników Lotniczych programu badań. Program ten obejmował wykonanie 80 [h] pracy podczas prób naziemnych silnika. Analiza danych z próbek olejowych oraz danych zarejestrowanych poprzez przygotowane tory pomiarowe z urządzeniem rejestrującym prędkości drgań kadłuba silnika została przeprowadzona po każdych 10 [h]. Uzyskane wyniki z poszczególnych sprawdzeń zamieszczono poniżej. Poddając analizie próbki oleju ze wszystkich punktów ich pobierania za pomocą metody optycznej spektrometrii emisyjnej, koncentracje pierwiastków metalicznych Cu, Sn, Zn oraz Si były na poziomie normalnego zużywania. Koncentracja Fe była na poziomie normalnego zużywania w przypadku próbek pobieranych ze zbiornika i reduktora, natomiast w przypadku próbek pobieranych ze skrzynki napędów – wystąpił podwyższony poziom koncentracji żelaza, co przedstawiono na Rys. 6.



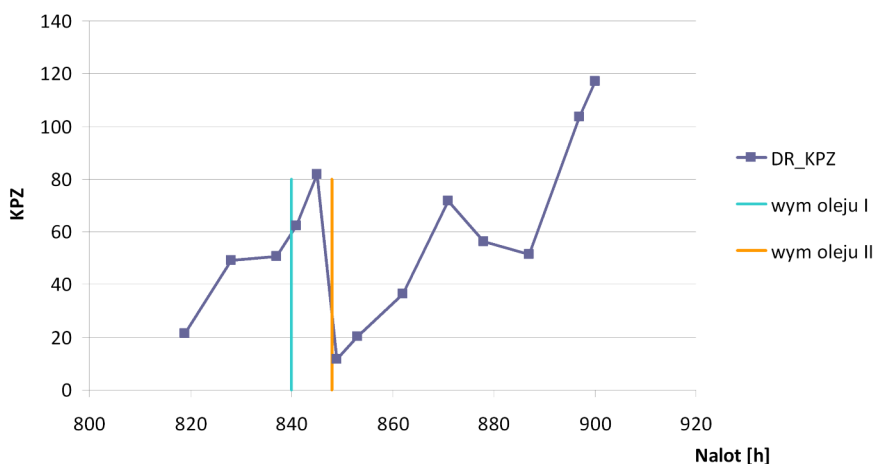
Rys. 6. Przebieg zmian koncentracji żelaza dla próbek ze skrzynki napędów

Koncentracja Al była na poziomie normalnego zużycia (dla próbek pobieranych ze zbiornika i reduktora), natomiast badania próbek oleju, pobieranych ze skrzynki napędów, wskazały na wzrost do poziomu zużycia wzmożonego, Rys. 7.



Rys. 7. Przebieg zmian koncentracji aluminium dla próbek ze skrzynki napędów

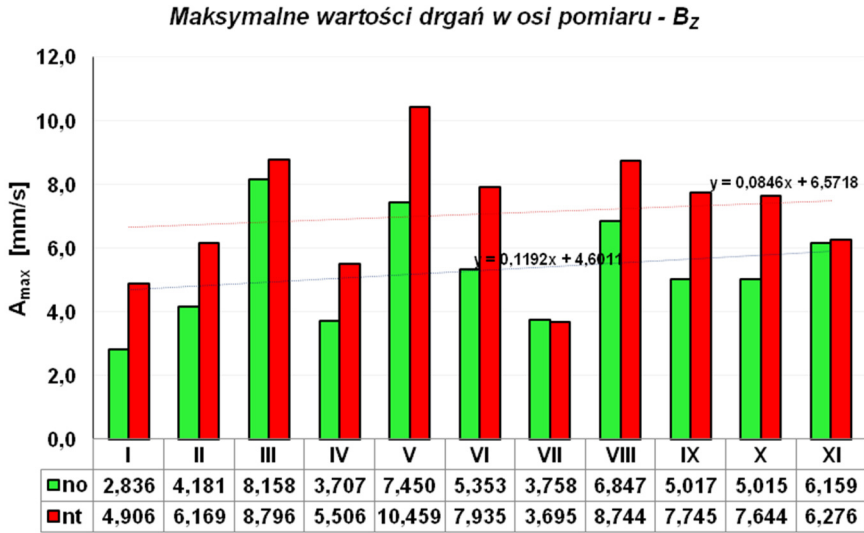
Biorąc pod uwagę współczynniki zużycia wyznaczone metodą ferrograficzną, mają one również charakter rosnący i podobny do zmian otrzymanych za pomocą metody optycznej spektrometrii emisyjnej, Rys. 8. Dodatkowym elementem wspólnym dla przebiegów zaprezentowanych na rysunkach 6, 7 i 8 jest wystąpienie spadku wyznaczonych wskaźników po wykonanych dwóch wymianach oleju w instalacji olejowej silnika, Rys. 8.



Rys. 8. Przebieg zmian współczynnika zużycia dla próbek ze skrzynki napędów

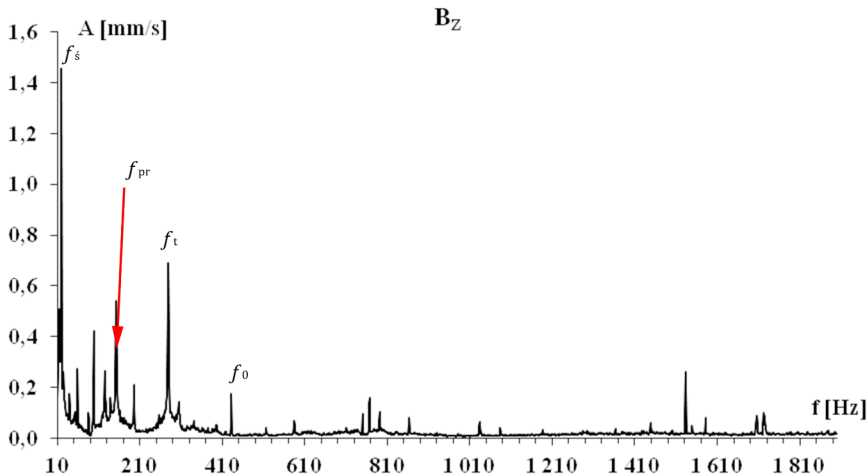
Analiza drgań kadłuba silnika przeprowadzona została w pasmach częstotliwości $\Delta f = 348 \div 623$ [Hz] dla wirnika wytwornicy spalin n_0 oraz $\Delta f = 232 \div 527$ [Hz] dla turbiny napędowej n_t .

W kolejnych próbach zaobserwowano rosnący charakter zmian prędkości drgań w wymienionych pasmach, a uzyskane linie trendu przedstawiają kierunek i tempo zmian drgań w paśmie. W przypadku turbosprężarki (oś pomiarowa w kierunku pionowym B_z), można stwierdzić, że po wykonaniu cyklu prób, średni wzrost drgań w paśmie podniósł się średnio o około 1,2 [mm/s], Rys. 9.



Rys. 9. Zestawienie maksymalnych wartości prędkości drgań uzyskanych w trakcie kolejnych prób, no-wirnika wytwornicy spalin, nt-wirnika turbiny napędowej

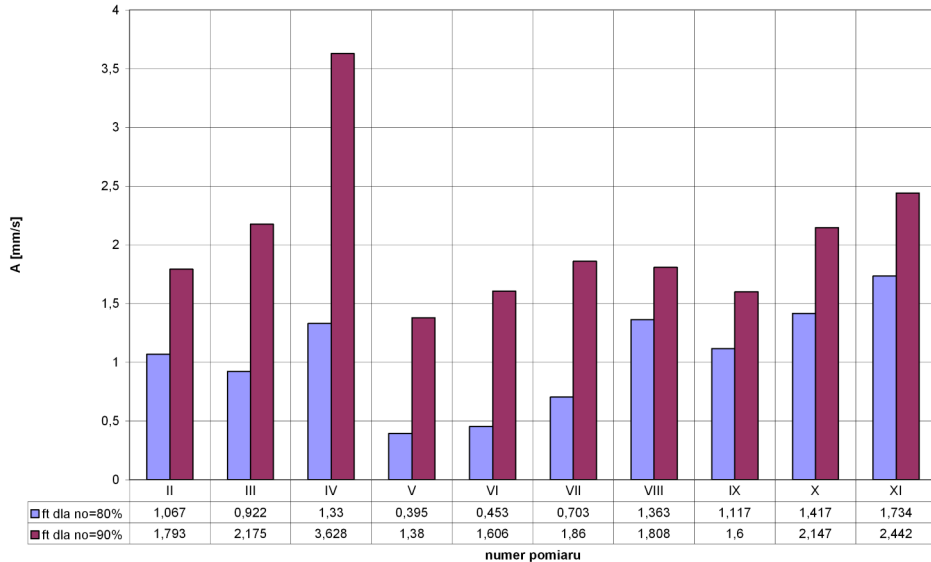
Jedno z zarejestrowanych widm prędkości drgań silnika przy prędkości $n_0=70\%$ z ostatniej próby przedstawiono na Rys. 10.



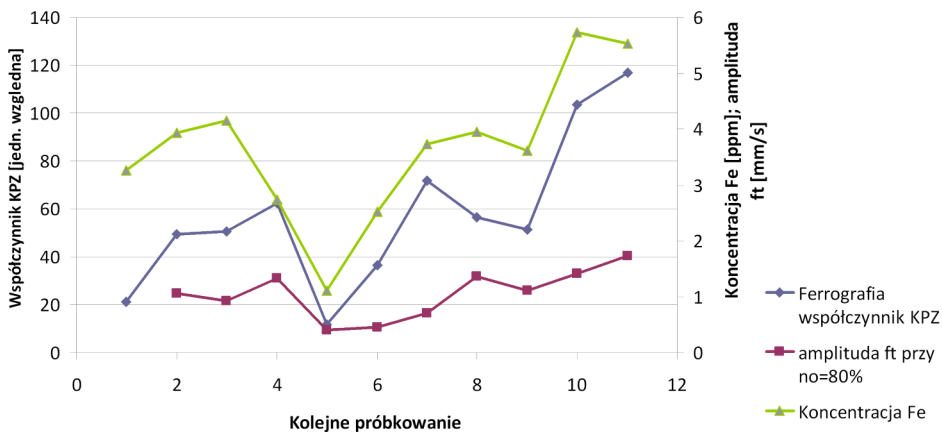
Rys. 10. Widmo prędkości drgań silnika przy prędkości $n_0=70\%$ z ostatniej próby.

- f_s – częstotliwość związana z wałem śmigła;
- f_{pr} – częstotliwość związana z wałem prądorozrusznika;
- f_t – częstotliwość związana z wirnikiem turbiny napędowej;
- f_0 – częstotliwość związana z wirnikiem wytwornicy spalin.

Równocześnie dla punktu pomiarowego nr 2 (Rys. 2), na wybranych zakresach prędkości obrotowej stwierdzono korelację wyznaczonych amplitud (Rys. 11) z rezultatami badań trybologicznych. Widoczny jest spadek wartości wyznaczonych parametrów po wymianie oleju z późniejszą ich tendencją wzrostową, Rys. 12.



Rys. 11. Zestawienie amplitud prędkości drgań f_t uzyskanych w trakcie kolejnych prób dla różnych zakresów prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin n_0



Rys. 12. Zestawienie wyników badań trybologicznych i pomiaru drgań korpusu silnika

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych prac potwierdziły możliwość zwiększenia kalendarzowego rezerwu międzyremontowego oraz przejścia na eksploatację nadzorowaną silników M-601T eksploatowanych w Siłach Powietrznych RP. Na podstawie przeprowadzonych badań określono dokumenty normatywne regulujące zakres sprawdzeń wykonywanych w celu zwiększenia rezerwu silnika oraz sprawdzeń profilaktycznych dla silników ze zwiększonym rezerwem.

BIBLIOGRFIA

- [1] Spychała J., Majewski P., Żokowski M. i inni: *Badanie silników M-601T i opracowanie biuletynu przedłużającego eksploatację silników M-601T*, Sprawozdanie wewnętrzne ITWL, Warszawa 2010;
- [2] *Diagnostyka łożysk tocznych*, Wydawnictwo PAN, Wrocław 1980;
- [3] Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*, Wydawnictwo PWN, 1978;
- [4] Spychała J., Dąbrowski H.: *Zastosowanie rozszerzonych badań wibroakustycznych w procesie eksploatacji samolotów*, AIRDIAG'2001, Ameliówka, 16-19.10.2001;
- [5] Courrech J., Gaudel M.: *Envelope analysis - the key to rolling-element bearing diagnosis*, Brüel & Kjær Application Notes, 1998;
- [6] Chruściel M.: *LabView w praktyce*, Wydawnictwo btc, 2008;
- [7] Sadowski J., Żurowski W.: *Thermodynamische Aspekte über die Verschleißbeständigkeit von Metallen*. Tribologie und Schmierungstechnik 1992.