

Andrzej GĘBURA, Krzysztof OBŁĄKOWSKI, Janusz PARUCKI, Tomasz KUCHARZEWSKI, Tadeusz KWIATKOWSKI
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

URZĄDZENIE LUZES JAKO PLATFORMA EKSPERYMENTALNA DO BADAŃ USZKODZEŃ DLA METODY FAM-C

Ground power unit LUZES as an experimental platform for studying defects for the FAM-C method

Streszczenie: *W artykule przedstawiono badania podstawowych wad mechanicznych przeprowadzone autorską metodą FAM-C na stanowisku badawczym powstałym na bazie urządzenia LUZES. W warunkach laboratoryjnych zamodelowano uszkodzenia mechaniczne, takie jak: przekoszenie połączeń, mimośrodowość połączeń, zwiększone luzy obwodowe, zwiększone luzy międzyzębne i inne. Postawiona została teza, że badania wykonane na prostym urządzeniu typu LUZES umożliwią przeniesienie doświadczeń na bardziej skomplikowany zespół napędowy śmigłowców. Celem jest wczesne diagnozowanie uszkodzeń tych napędów.*

Słowa kluczowe: wał transmisji śmigłowca, rezonans łożyska tocznego, sprzężenie rezonansowe, modulacja częstotliwości napięcia.

Abstract: *This article addresses studies of basic mechanical defects conducted with the proprietary FAM-C method on a test bench created on the basis of ground power unit LUZES. The following mechanical defects were modelled in laboratory conditions: skewed connections, eccentricity of connections, increased circumferential clearance, increased intertooth clearance, etc. The thesis was put forward that tests on LUZES equipment enable to transfer experience onto the more complex helicopter power unit. The aim is the early defect detection of these units.*

Keywords: helicopter transmission shaft, resonance of a roller bearing, resonance coupling, voltage frequency modulation

1. Wprowadzenie do konstrukcji układów elektromaszynowych typu LUZES

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych jest projektodawcą i współtwórcą kompleksowego systemu naziemnego zasilania wojskowych statków powietrznych pod nazwą LUZES (Lotniskowe Urządzenie Zasilania Elektroenergetycznego Samolotów) [11].

W ramach systemu wykonano m.in. następujące typy urządzeń:

1. **LUZES II** – umożliwiający zasilanie urządzeń i SP energią elektryczną prądu stałego 27 V, 2×27 V, 27/54 V oraz prądu przemiennego 115/200 V, 1×115 V, 3×36 V, 400 Hz na centralnych płaszczyznach przygotowania SP oraz w schronohangarach i hangarach eskadr technicznych. Zasilany jest z sieci elektrycznej 220/380 V, 50 Hz i składa się z dwóch kontenerów: przekształcającego energię sieci elektrycznej na energię prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz oraz przekształcającego energię prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz na energię prądu stałego. Po zakończeniu pełnych badań prototypów wariant został wdrożony do produkcji w 1991 r. przez Wojskowe Centralne Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne w Warszawie. Dotychczas wykonano ok. 50 kompletów urządzenia. Jak do tej pory ma ono najszersze zastosowanie, jeśli chodzi o rozwinięcie systemu LUZES na lotniskach.
2. **LUZES III** – umożliwiający zasilanie urządzeń i SP energią elektryczną prądu przemiennego 400 Hz o zwiększonej stabilności częstotliwości i możliwości regulacji częstotliwości w zakresie od 50 do 600 Hz: 115/200 V, 1×115 V, 3×36 V w schronohangarach i hangarach eskadr technicznych. Wariant III jest zasilany z sieci elektrycznej 220/380 V, 50 Hz. LUZES III wdrożony został do produkcji w 1991 r. Jest to najbardziej rozbudowana i złożona wersja urządzenia, z uwagi na specyfikę zapotrzebowania energetycznego eskadr technicznych. W jej skład wchodzi trzy odrębne kontenery o następującym przeznaczeniu:
 - kontener A2 – przekształcający napięcie przemiennie 115/200 V, 400 Hz na energię prądu stałego;
 - kontener B2 – przetwornica elektromaszynowa w postaci zespołu napędowego o regulowanej prędkości obrotowej, składająca się z silnika prądu stałego napędzającego prądnicę prądu przemiennego;
 - kontener C – przekształtnik przemysłowego napięcia przemiennego na napięcie stałe.

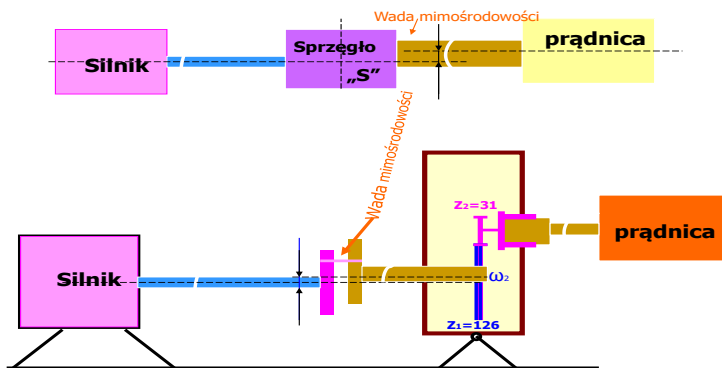
Z uwagi na zbyt niską sprawność energetycznego przetwarzania toru wyjściowego prądu stałego, część egzemplarzy została wycofana z eksploatacji lotniskowej i przekazana autorom. Aktualnie wprowadzana jest wersja uproszczona urządzenia pod nazwą LUZES III/M, która wytwarza tylko prąd przemienny. W oparciu o tę konstrukcję w ITWL zbudowano kilka stanowisk napędowych wykorzystywanych m.in. do modelowania różnego typu wad mechanicznych i obserwowania ich metodami FAM-C i FDM-A – dlatego stanowisko to będzie szczegółowo opisane w następnym podrozdziale.

Aby metodę wykalibrować i wstępnie zweryfikować, zespół Zakładu Produkcji Prototypowej ITWL wykonał wiele modyfikacji umożliwiających dostosowanie

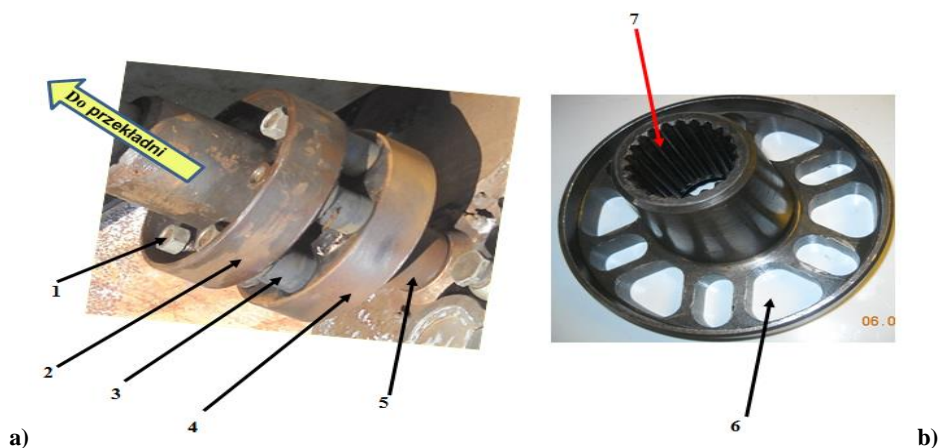
(produkowanych z przeznaczeniem do innych celów) urządzeń typu LUZES. Po tych przeróbkach urządzenie stało się stanowiskiem badawczym spełniającym wymagania modelu fizycznego lotniczych zespołów napędowych. Stanowiska są wykorzystywane do sprawdzania relacji pomiędzy kontrolowanymi uszkodzeniami mechanicznymi a odzwierciedleniem tych uszkodzeń w obrazowaniach FAM-C. Mają one względnie prostą budowę i niewiele węzłów mechanicznych – wszelkie ich uszkodzenia są stosunkowo łatwe do interpretacji. Dzięki pomiarom FAM-C na zmodyfikowanych stanowiskach możliwe było utworzenie wiarygodnego atlasu obrazowań FAM-C z przyporządkowaniem do uszkodzeń mechanicznych.

2. Opis stanowiska badawczego

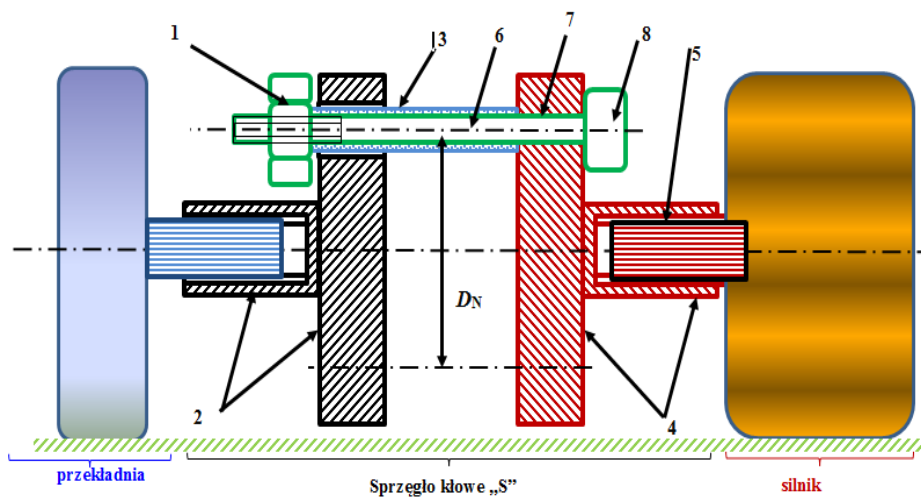
Badania laboratoryjne wykonano na urządzeniach LUZES-II i LUZES-III (rys. 1). Są to duże elektromechaniczne zespoły napędowe pierwotnie służące do zasilania naziemnego statków powietrznych. Każdy z nich napędzany jest silnikiem elektrycznym o mocy 45÷75 kW. Sprzęgła umożliwiają modelowanie mechanicznych wad montażowych [4, 12, 15]: przekoszenia połączenia, zmianę przesunięcia równoległego wałów oraz luzów obwodowych połączeń mechanicznych. Bardzo oryginalnie dokonano modelowania zmian wielkości luzów obwodowych – odbywa się ono poprzez zmianę szerokości otworów w części biernej sprzęgła (rys. 2b, rys. 3). W praktyce odbywało się to się poprzez wymianę piasty biernej sprzęgła kłowego o różnej szerokości okna (rys. 2b, szczegół 6).



Rys. 1. Urządzenie LUZES II/III – uproszczony schemat kinematyczny



Rys. 2. Sprzęgło kłowe „S”: a) widok ogólny sprzęgła kłowego: 1 – nakrętka mocująca sworzień do piasty biernej, 2 – piasta bierna (napędzana), 3 – tuleja gumowa na sworzniu łączącym, 4 – piasta czynna (napędzająca), 5 – miejsce mocowania piasty czynnej do wału silnika elektrycznego; b) piasta bierna sprzęgła kłowego z poszerzonymi oknami symulującymi zwiększone luzy obwodowe: 6 – poszerzone okno (pod sworzień); 7 – wielowypusty wewnętrzne do połączenia z wielowypustem zewnętrznym wału przekładni



Rys. 3. Sprzęgło kłowe „S”: 1 – nakrętka mocująca sworzień do piasty biernej; 2 – piasta bierna (napędzana); 3 – tuleja gumowa na sworzniu łączącym; 4 – piasta czynna (napędzająca); 5 – miejsce mocowania piasty czynnej do wału silnika elektrycznego; 6 – sworzień; 7 – miejsce wciskowego pasowania sworznia z otworem w piastą czynną (napędzającą); 8 – łeb sworznia; D_N – odległość pomiędzy sworzniami

3. Wprowadzenie do metody FAM-C

Metoda FAM-C (opracowana w ITWL [3, 11–13]) początkowo (1990) stosowana była do diagnozowania dynamiki zespołu napędowego w układach elektroenergetycznych LUZES. Metodą FAM-C monitorowano osiowe i promieniowe bicie wału napędowego, jak również oceniano dynamikę obrotową prowadzącą do ukręcania wałów prądnicy [10]. Następnie, służyła do monitorowania skrzyni napędowej statków powietrznych (przekładnia główna śmigłowca, skrzynka napędu akcesoriów) oraz do diagnozowania zużycia jednokierunkowych elementów sprzęgła oraz zapowietrzenia bloku hydraulicznego [19] samolotu myśliwskiego MiG-29 (1993), a następnie w latach 2005–2015 do diagnozowania stanu technicznego podpór łożyskowych silnika turbodrzutowego SO-3 samolotu TS-11 „Iskra” [10]. Aktualne badania ITWL skupiają się na monitorowaniu układu napędowego i układu transmisji mocy śmigłowców wojskowych [9, 14].

W metodzie FAM-C [3, 12] wykorzystuje się czas przejścia (ang. Time of Arrival – TOA) zezwoju elektrycznego wirnika prądnicy pomiędzy nabiegownikami stojana prądnicy. Sposób ten jest podobny do metody pomiaru przejścia łopatki turbiny pod czujnikiem zamontowanym na korpusie tej turbiny, znanej pod skrótem TTM [16–18, 20, 21]. FAM-C przetwarza przebieg prędkości kątowej danego mechanizmu na przebieg częstotliwości chwilowej danego podzespołu mechanicznego za pomocą pokładowej prądnicy synchronicznej zamontowanej na badanym zespole napędowym.

W przeciwieństwie do klasycznej metody dyskretno-fazowej TTM stosowanej w turbinach, FAM-C nie wymaga instalacji dodatkowych czujników, ponieważ wykorzystuje typową, pokładową prądnicę elektryczną prądu przemiennego [10]. Każdy biegun prądnicy służy jako czujnik reluktancyjny, który obserwuje ruch obrotowy wirnika prądnicy pomiędzy nabiegownikami.

4. Mimośrodowość połączeń

Ponieważ nowoczesne maszyny mimo wyższych obrotów i większych obciążeń są coraz lżejsze i mają coraz mniejsze rezerwy wytrzymałościowe, należy dążyć do zapewnienia im optymalnych warunków pracy. Jednym z nich jest optymalne ustawienie maszyny, polegające m.in. na dokładnym ustawieniu współosiowości zespołów maszyn. Utrata współosiowości wałów i korpusu powoduje niebezpieczeństwo nadmiernego obciążenia łożysk, wałów, uszczelnień i sprzęgieł, co w ostatecznym rezultacie powoduje ich zniszczenie [1, 7, 10, 15]. Wielu naukowców problem ten próbuje rozwiązać metodą symulacji komputerowej [8]. Autorzy niniejszego artykułu preferują badania na modelu fizycznym. Mimośrodowość połączeń mechanicznych została uzyskana poprzez podkładanie podkładek (o grubości a) pod podstawę silnika napędowego [12] (rys. 1, element 4b). Wówczas uzyskiwano efekt równoległego przemieszczenia się osi symetrii wałów silnika elektrycznego względem wału wejściowego przekładni o wartość a . Sprzęgło kłowe umożliwiło, dzięki podatności tulejek gumowych na sworzniach łączących (rys. 3, element 3), pracę zespołu z takim przesunięciem wałów. Obserwując przebiegi

częstotliwości chwilowej, stwierdzono (po przesunięciu mechanicznym osi symetrii silnika napędowego o wartość a) wyraźne zwiększenie amplitudy oscylacji (rys. 4), wielkości ΔF_{max} , ΔF_{min} – o okresie równym pierwszej harmonicznej prędkości kątowej silnika, co obrazuje również wzór (1) [12]:

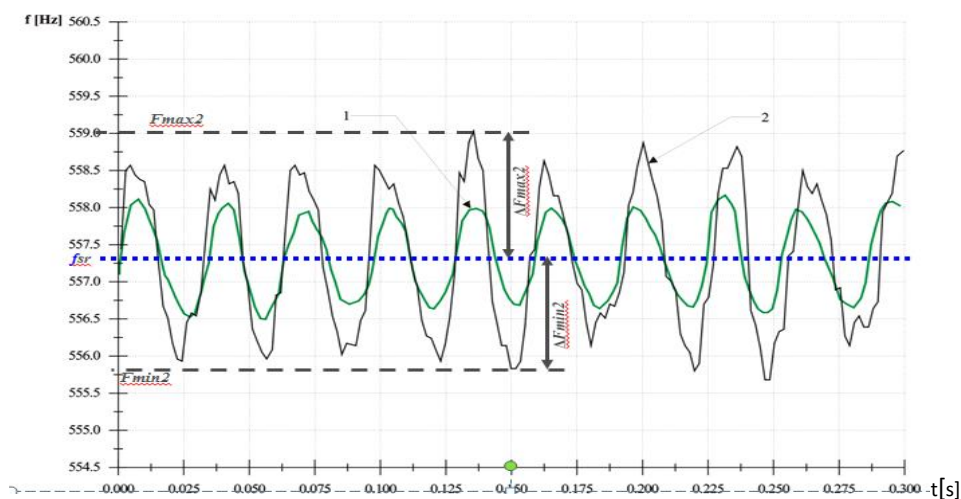
$$\omega_2 = \frac{D_N \cdot \omega_1}{D_N - 2a \sin \cdot \omega_1 t} \quad (1)$$

Obserwując wartość amplitudy wahań chwilowej wartości oscylacji częstotliwości chwilowej, można wtórnie obliczyć wartość przesunięcia mimośrodowego zgodnie ze wzorem:

$$a = \frac{D_N}{4} \frac{|\Delta F_{max}| + |\Delta F_{min}|}{f_{sr}} \quad (2)$$

gdzie:

ω_1 i ω_2 – chwilowe wskazania prędkości kątowej, ΔF – wartość amplitudy odchylenia częstotliwości chwilowej od częstotliwości średniej, D_N – średnica wewnętrzna tulei gniazda napędu, a – przemieszczenie (mimośród) wałów silnika i przekładni.



Rys. 4. Przesunięcie równoległe osi symetrii podłużnej wału wyjściowego silnika napędowego względem osi symetrii wału wejściowego przekładni o wartość a : 1 – mimośrodowość sprzęgła kłowego $a = 2$ mm; 2 – mimośrodowość sprzęgła kłowego $a = 3,5$ mm

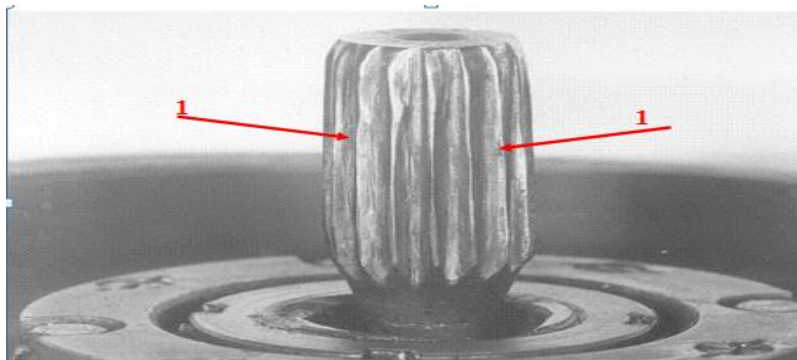
Przy wartości ustawionego mimośrodu $a_1 = 2$ mm, a następnie $a_2 = 4$ mm, wartości błędu ich odwzorowania metodą FAM-C (rys. 4) po przeliczeniu z wykorzystaniem wzoru (2) nie przekraczały 8% zadanej wartości, tj. grubości podkładek (rys. 2, element 4b). Błąd ten ulega zwiększeniu przy ustawianiu mniejszych wartości mimośrodu – przy zwiększaniu mimośrodu sprzęgła kłowego “S” z poziomu $a = 0,4$ mm do 1,6 mm uzyskano

zwiększenie wysokości zbioru charakterystycznego z poziomu ($|\{\Delta F_i\}_{\max}| + |\{\Delta F_i\}_{\min}|$) = 1,4 Hz do poziomu ($|\{\Delta F_i\}_{\max}| + |\{\Delta F_i\}_{\min}|$) = 3,65 Hz, tj. nastąpił wzrost wysokości o 161%. Wyniki te wskazują, że metoda FAM-C odznacza się dużą czułością.

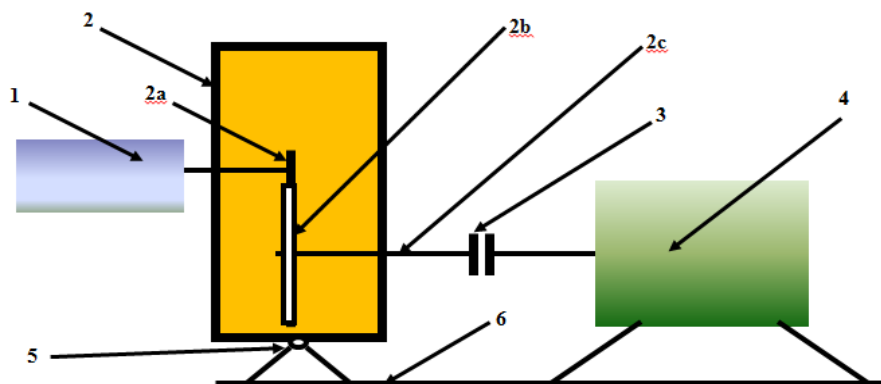
5. Przekoszenie połączeń

O ile wada mimośrodowości nie wywołuje (według posiadanych danych) zjawisk łamania lub ukłęcia elementów połączeń mechanicznych, o tyle wada polegająca na przekoszeniu była przyczyną wypadków, a nawet katastrof lotniczych [2, 4, 9–11, 13, 14, 19]. Wynika to z charakteru współpracy zębów wielowypustów, gdzie przy mimośrodowości ścieranie następuje całą powierzchnią, zaś przy przekoszeniu – punktowo. Punktowa koncentracja naprężeń powoduje lokalne wzmożone wydzielanie ciepła i zwiększone zużycie ściernie pośrodku wielowypustu. Pośrodku też obserwuje się silniejsze wycieranie wielowypustów współpracujących ze sobą, co może doprowadzić do przerwania połączenia mechanicznego pomiędzy elementem napędzającym a napędzanym.

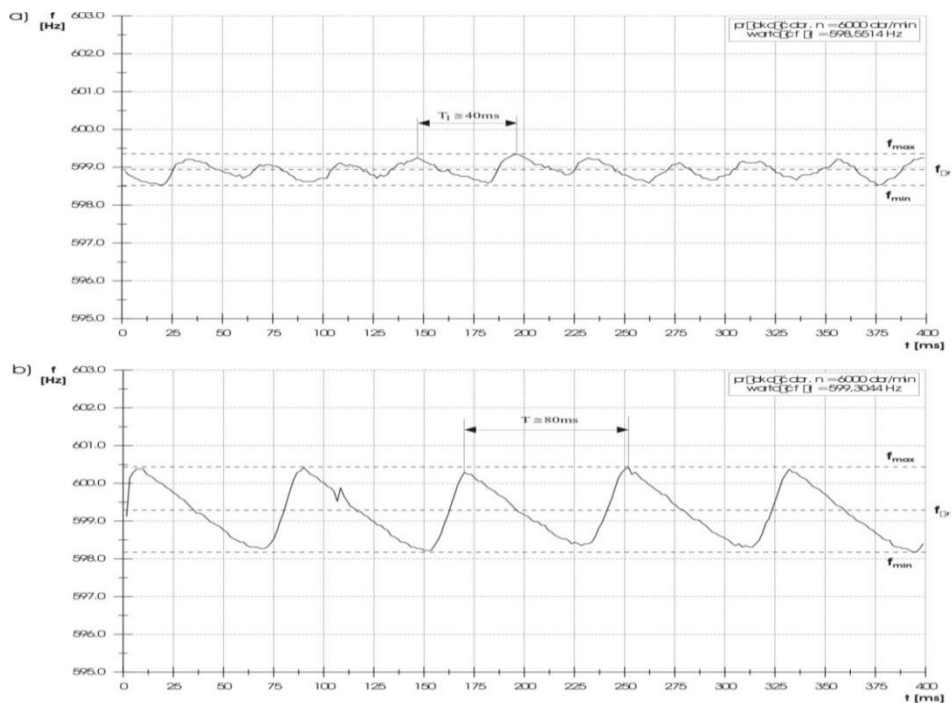
Wspomniany punkt styku wielowypustów przemieszcza się wzdłuż wielowypustu podczas obrotu wałka, co powoduje koncentrację ciepła szczególnie w środkowej części wypustu, gdzie dochodzi do powstania charakterystycznego wyrobienia o kształcie beczułkowatym. Udowodniono to po długotrwałej (około 800 h) współpracy wałka napędowego prądnicy z wielowypustową tuleją napędzającą z ich wzajemnym przekoszeniem $\beta = 1,5^\circ$ (rys. 5) [10]. Przekoszenie uzyskano poprzez podłożenie podkładki przeszlifowanej pod kątem $1,5^\circ$ pod kryzę połączenia mechanicznego korpusu prądnicy (rys. 6, element 1) z obudową przekładni TUN-75R (rys. 6, element 2).



Rys. 5. Wałek wielowypustowy prądnicy prądu przemiennego SGO-8 po 800 h pracy na laboratoryjnym stanowisku napędowym LUZES-II z przekoszeniem $\beta = 1,50$: 1 – ślad ubytków materiałowych na wielowypustach wałka napędowego w kształcie „beczłkowatych” ubytków na płaszczyźnie przyporu



Rys. 6. Urządzenia LUZES II/III – uproszczony schemat kinematyczny przystosowany do symulacji przekoszenia połączeń wałów: 1 – prądnica lotnicza trójfazowa prądu przemiennego; 2 – mechaniczna przekładnia zębata typu TUN/75R; 2a – koło zębate napędzane; 2b – koło zębate napędzające; 2c – wał wejściowy przekładni; 3 – sprzęgło kłowe „S”; 4 – elektryczny silnika napędowy; 5 – punkt obrotu podstawy mechanicznej przekładni zębatej; 6 – rama podstawy montażowej



Rys. 7. Przebieg zmian częstotliwości chwilowej przy zmianach wartości przekoszenia wałów transmisji o kąt: a) $\beta = 0,2^\circ$, b) $\beta = 0,5^\circ$

Przekoszenie sprzęgła kłowego wykonywano poprzez obrót kątowny przekładni na przegubie zamontowanym przy jej podstawie (rys. 6, element 5) przy pomocy specjalnie w tym celu wykonanych odciągów zaopatrzonych w śruby rzymskie. Z literatury [10] wynika, że przekoszenie połączenia objawia się w postaci sinusoidalnego zmodulowania przebiegu chwilowej prędkości kątowej elementu napędzanego o częstotliwości drugiej harmonicznej prędkości znamionowej danej pary kinematycznej, zgodnie z wzorem (3) [10, 11]:

$$\omega_2 = D_N \omega_1 / (D_N - 2 \operatorname{tg} \beta L_{12} \sin 2\omega_1 t) \quad (3)$$

gdzie:

ω_1 i ω_2 – chwilowe wskazania prędkości kątowej; β – kąt przekoszenia; T – czas; D_N – średnica wewnętrzna tulei gniazda napędu.

Wzór ten w praktyce jest prawdziwy tylko dla niewielkich kątów przekoszenia – do $1,5^\circ$ (rys. 7a). Powyżej tej wartości zwykle przekoszeniu towarzyszą znaczne luzy promieniowe – zmodulowania są dalej wprost proporcjonalne do przekoszenia, lecz okres wahań jest równy nie drugiej harmonicznej prędkości znamionowej sprzęgła „S”, lecz pierwszej podharmonicznej tej prędkości (rys. 7b).

Za granicznie dopuszczalną wartość przekoszenia dla prądnic lotniczych uznaje się przeważnie kąt $\beta \approx 1,5^\circ$ [2, 6]. W metodzie FAM-C odwzorowywane są zmiany z rozdzielczością ok. $0,01^\circ$. Nasuwa się wniosek, że metoda ta zapewnia wystarczającą czułość pomiarową w zakresie diagnozowania lub monitorowania wielkości przekoszeń wałków agregatów. Zaobserwowany na wspomnianym stanowisku LUZES III błąd nieczułości $0,2^\circ$ jest w wielu zastosowaniach praktycznych również akceptowalny. W dodatku, na opisanym wyżej stanowisku badawczym trudno wyeliminować i zmierzyć w warunkach normalnej pracy wartość a mimośrodowości sprzęgła. Prawdopodobne jest, że błąd nieczułości jest znacznie mniejszy niż $0,2^\circ$.

6. Monitorowanie luzów obwodowych sprzęgła wolnoobrotowego

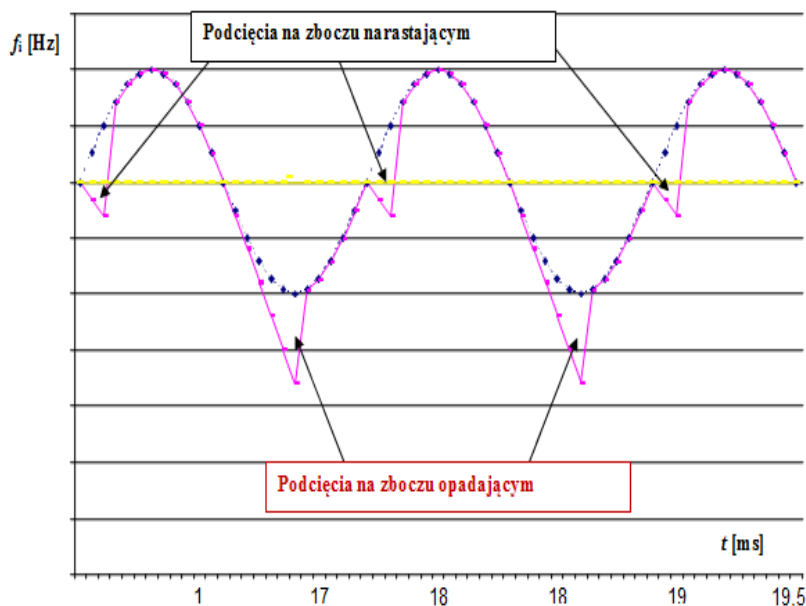
Monitorowanie wartości luzów w urządzeniach mechanicznych można potraktować jako osobne wyzwanie dla metody FAM-C. Badania wykonano na opisanym wcześniej stanowisku napędowym LUZES-III [10]. W piaście biernej (napędzanej) sprzęgła „S” wykonano dodatkowo podfrezowanie zapewniające odpowiedni luz połączenia (rys. 2b). Po jej zamontowaniu ustawiono wadę mimośrodowości. Po włączeniu stanowiska i wykonaniu pomiarów FAM-C otrzymano przebieg częstotliwości chwilowej $f_i = f(t)$ w postaci zmodulowania sinusoidalnego o częstotliwości zmodulowań równych pierwszej harmonicznej prędkości obrotowej sprzęgła „S” (rys. 9, linia przerywana), tj. podobnie jak na rys. 4 (przebieg nr 2 dla mimośrodowości sprzęgła kłowego $a = 3,5$ mm).

Jednakże pojawienie się luzu połączenia na sprzęgle „S” spowodowało zmianę kształtu przebiegu częstotliwości chwilowej (rys. 8, linia ciągła) w postaci podcięć na zboczach (rys. 8, szczegóły: podcięcia na zboczu narastającym, podcięcia na zboczu opadającym). Zgodnie z [10] luz obwodowy powodował zmiany w przebiegu zmian chwilowej wartości prędkości kątowej $\omega_2 = f(t)$ (odzwierciedlone w metodzie FAM-C w postaci przebiegu częstotliwości chwilowej) na zasadzie reguły przekory wynikającej z bezwładności elementu napędzanego (biernego), tj.:

- a) opóźnienie ruchu w chwili przyspieszenia prędkości kątowej;
- b) dążenie do podtrzymania poziomu prędkości kątowej podczas zmniejszania tej prędkości przez element napędzający.

Inaczej mówiąc:

- a) kiedy element czynny przyspiesza, to w oknie (rys. 2, element 6) wyfrezowanym w sprzęgle sworzeń elementu biernego opóźnia się w ruchu kątowym – na przebiegu częstotliwości chwilowej widoczne jest podcięcie (rys. 8, szczegół „podcięcie na zboczu narastającym”);
- b) kiedy element czynny zmniejsza swoją prędkość, to w oknie (rys. 2, element 6) wyfrezowanym w sprzęgle sworzeń elementu biernego siłą bezwładności porusza się dalej aż do osiągnięcia krawędzi tego okna.



Rys. 8. Teoretyczny (wykonany na podstawie symulacji komputerowej) przebieg zmian chwilowych wartości prędkości obrotowej $n = f(t)$ dla sprzęgła „S” z wadą mimośrodowości oraz ze znacznym luzem obwodowym: element napędzający – sinusoida – linia kropkowana; element napędzany – linia ciągła z podcięciami

Na podstawie wielu badań laboratoryjnych na zespole napędowym LUZES-III oraz symulacji komputerowych autorzy doszli do wniosku, że względna głębokość opisanych powyżej wcięć w narastającym zboczku przebiegu $f_i = f(t)$ oraz opóźnień na zboczku opadającym jest wprost proporcjonalna do wartości luzu obwodowego.

7. Podsumowanie

Dzięki przystosowaniu elektromechanicznych stanowisk napędowych do symulacji uszkodzeń mechanicznych można było w warunkach laboratoryjnie powtarzalnych dokonać oceny jakości odwzorowania wielkości tych uszkodzeń. W niniejszej pracy opisano najprostsze do realizacji modelowanie fizycznych uszkodzeń na stanowisku napędowym LUZES:

- a) mimośrodowe przesunięcie osi symetrii wałów,
- b) przekoszenie wałów,
- c) złożenie równoległego przesunięcia wałów i przekoszenia,
- d) luz obwodowy sprzęgła.

Wady tej metoda FAM-C odwzorowuje w postaci przebiegów częstotliwości chwilowej napięcia prądnicy pokładowej, odpowiednio harmonicznych w stosunku do znamionowej prędkości obrotowej wału:

- a) pierwszej harmonicznej,
- b) drugiej harmonicznej,
- c) pierwszej podharmonicznej,
- d) podcięć w przebiegu częstotliwości chwilowej o głębokości wprost proporcjonalnej do wartości luzu obwodowego.

Badania umożliwiły stwierdzenie, że:

1. Metoda FAM-C odznacza się bardzo dużą czułością – zmiana kąta przekoszenia o $0,2^\circ$, zaś mimośrodu o 0,1 mm powoduje już wyraźne różnice na obrazowaniach FAM-C.
2. Wadzie przekoszenia powyżej $1,5^\circ$ towarzyszą znaczne luzy promieniowe.
3. W przypadku mimośradowości ścieranie następuje całą powierzchnią, zaś przekoszenia – punktowo.
4. Punktowa koncentracja naprężeń w czasie współpracy dwóch elementów z przekoszeniem powoduje lokalne wzmożone wydzielanie ciepła pośrodku wielowypustu – powoduje to zwiększone zużycie ściernie środkowej części wielowypustu. Skrajne zużycie może doprowadzić do rozłączenia mechanicznego napędu agregatu, co może być przyczyną katastrofy lotniczej.
5. Z powodu dużej precyzji monitorowania wad mechanicznych, metoda FAM-C powinna być stosowana w czasie eksploatacji statków powietrznych. Byłby to istotny element diagnostyki eksploatacyjnej niosący zdecydowaną poprawę bezpieczeństwa lotów statków powietrznych.

8. Literatura

1. Baranowski B., Głowala S., Mostowski R., Pohl P., Sydor M., Torzyński D., Wielocha G., Zabłocki M.: Podstawy konstrukcji napędów maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
2. Borgoń J., Stukonis M., Szymczak J.: Czy uszkodzenia połączeń wielowypustowych w silnikach lotniczych mogą spowodować wypadki lotnicze. Informator ITWL nr 311/93, Techniczne problemy eksploatacji i niezawodności wojskowych statków powietrznych, Kiekrz 1993.
3. Biarda D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: Opis patentowy PL 175664B1: Sposób diagnozowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu przemiennego, Zgłoszenie 08.07.1996, udzielenie patentu 29.01.1999.
4. Bratuchin J.P.: Projektowanie i konstrukcje śmigłowców. PWN, Warszawa 1958.
5. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
6. Chaimzow M.E., Korabliev A.I.: Rabotosposobnost aviacionnych zubcattyh soiedinenii. „Transport”, Moskva 1983.
7. Dąbrowski Z.: Wały maszynowe. PWN, Warszawa 1999.
8. Deng D., Braun M.J.: A New Model for Transition Flow of Thin Films In Long Journal Bearings. Tribology Transactions, 51: 2008.
9. Dietrich M. Podstawy konstrukcji maszyn. T2, WNT, Warszawa 1999.
10. Dwojak J., Rzepiela M.: Zastosowanie lasera do ustawiania maszyn. Doświadczenia elektrowni Opole. Warszawawa 2001.
11. Gębura A., Kłysz S., Tokarski T.: Monitoring wear of gear wheel of helicopter transmission using the FAM-C and FDM-A methods. Procedia Structural Integrity 16:184-19, 2019, DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.039.
12. Gębura A.: Metoda modulacji częstotliwości napięcia prądnic pokładowych w diagnozowaniu zespołów napędowych. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2010.
13. Gębura A.: Związki modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy z wybranymi wadami układu napędowego, [w:] „Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym”, red. M. Orkisz, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Lublin 2000.
14. Kowalczyk H., Gębura A., Tokarski T., Kwiatkowski T.: Awaria śmigła ogonowego śmigłowca Mi-24 w efekcie długotrwałego oddziaływania przestrzennego sprzężenia rezonansowego. Journal of KONBiN, Vol. 51, Iss. 4, 2021, DOI 10.2478/jok-2021-0041.
15. Leyko J.: Mechanika ogólna. Tom 1, PWN, Warszawa 1996.
16. Szczepanik R., Witoś M., Kowalski M., Szczepankowski A.: Sposób zmiany częstotliwości drgań wirującej łopatkę maszyny przepływowej, zwłaszcza wirującej łopatkę sprężarki lotniczego silnika turbinowego. Pat.189360, zgł. 29.07.1998.

17. Szczepanik R., Witoś M.: Monitorowanie stanu technicznego turbinowych silników lotniczych w oparciu o metodę dyskretno-fazową i metodę portretów fazowych. *Prace Naukowe ITWL*, nr 10, 2008.
18. Szczepanik R.: System diagnostyczny turbinowych silników odrzutowych SO-3, SO-3W". 5th International Conference „Aircraft and helicopter diagnostic” Airdiag 1997.
19. Ułanowicz L., Jastrzębski G., Szczepaniak P., Sabak R., Rykaczewski D.: Malfunctions of aviation hydraulic pumps. *Journal of KONBIN*, Vol. 50, Iss. 3, 2020, DOI 10.2478/jok-2020-0061.
20. Witoś M.: Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie, *Prace Naukowe ITWL*, nr 29, Warszawa 2011.
21. Witoś M., Kowalski M.: Aspekty metrologiczne bezdotykowego diagnozowania wirujących łopatek sprężarki. *Biuletyn WAT*, Vol. LVII, nr 2, 2008.