

Andrzej GĘBURA, Jerzy BOROWSKI, Bogdan PIETNOCZKO,
 Jan DAROWSKI, Mieczysław PIGŁAS, Ewelina SIEKIEŃSKA
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

ANALIZA BŁĘDÓW APARATURY POMIAROWEJ WYKORZYSTUJĄCEJ METODY FAM-C I FDM-A

Analysis of measuring apparatus errors using the FAM-C and FDM-A methods

Streszczenie: *W artykule omówiono błędy zbudowanej w ITWL elektronicznej aparatury pomiarowej wykorzystującej metody FAM-C i FDM-A, dedykowane do monitorowania stanu technicznego lotniczych zespołów napędowych. Przedstawiono podstawowe elementy składowe i warianty zastosowania zbudowanej aparatury elektronicznej: zagadnienie optymalizacji doboru parametrów konstrukcyjnych i zmianę poziomu błędów przy doborze różnych typów konstrukcji danego układu. Opisano także wpływ czynników zewnętrznych na błędy układu pomiarowego, m.in.: zmiany amplitudy sygnału wyjściowego prądnicy i wpływ częstotliwości nośnej w zależności od konfiguracji fazowej układu pomiarowego. Przedstawiono sposób kompleksowego sprawdzania elektronicznej aparatury pomiarowej dla metod FAM-C i FDM-A w warunkach laboratoryjnych.*

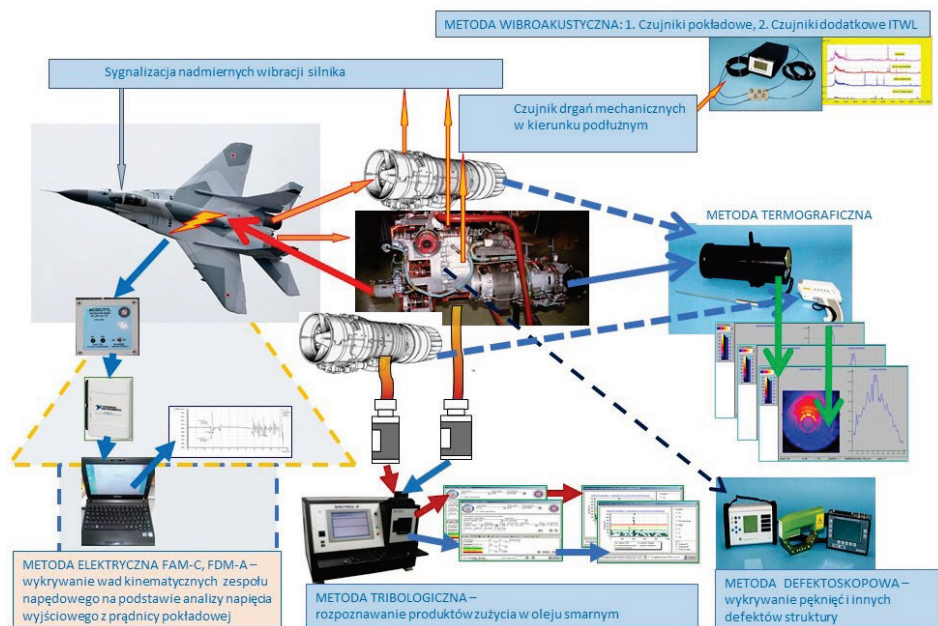
Słowa kluczowe: metrologia, analiza błędów pomiarowych, komparator przejścia przez zero, generator podstawy czasu, metoda FAM-C, metoda FDM-A

Abstract: *The article discusses the errors of the electronic measuring apparatus built at AFIT using the FAM-C and FDM-A methods, dedicated to monitoring the technical condition of aircraft power units. The basic components and variants of the use of the built electronic apparatus are presented: the optimization of the selection of construction parameters and the change of the error level in the selection of various types of construction of a given system. The influence of external factors on errors of the measuring system was also described, including changes in the amplitude of the electrical power generator output signal and the influence of the carrier frequency depending on the phase configuration of the measuring system. The method of comprehensive checking of electronic measuring equipment for FAM-C and FDM-A methods in laboratory conditions was presented.*

Keywords: metrology, measuring errors analysis, zero crossing comparator, time base generator, FAM-C method, FDM-A method

1. Wprowadzenie

Jednym z ważnych problemów eksploatacyjnych jest problem identyfikacji i oceny poziomu zużycia par kinematycznych w lotniczych zespołach napędowych [1, 7, 12, 26]. Do diagnozowania stanu technicznego przekładni zębatych, podpór łożyskowych wałów oraz innych elementów składowych lotniczych zespołów napędowych w ITWL zostały opracowane dwie metody: FAM-C (ang. Frequency Alternat Current Modulation) i FDM-A (ang. Frequency Direct Current Modulation). Istota działania tych metod (rys. 1) polega na wykorzystywaniu informacji, zawartych w zmodulowanym częstotliwościowo sygnale napięciowym generowanym przez prądnicę pokładową prądu przemiennego (o częstotliwości nośnej 400 Hz) lub stałego (o wartości średniej napięcia 28,5 V), do lokalizacji i klasyfikacji diagnostycznej uszkodzonych elementów mechanicznych w lotniczych zespołach napędowych [4, 5, 10–14].



Rys. 1. Schemat poglądowy sposobu wykorzystania metody FAM-C na tle innych metod diagnostycznych w zakresie monitorowania stanu technicznego wybranych elementów składowych zespołu napędowego samolotu MiG-29

Metody FAM-C [4] i FDM-A [5] synchronicznie przetwarzają sygnał diagnostyczny (wahań prędkości kątowej poszczególnych par kinematycznych badanego mechanicznego zespołu napędowego) w dyskretno-częstotliwościowy przebieg zmian częstotliwości chwilowej, z którego można otrzymać tzw. zbiory charakterystyczne [12, 13].

Przetworzenie sygnału diagnostycznego niosącego informacje o zmianach chwilowej prędkości kątowej uszkodzonego zespołu mechanicznego odbywa się w dwóch etapach [12]. Pierwszy etap realizuje prądnica pokładowa, stanowiąca integralną część struktury zespołu napędowego, która przetwarza zmiany chwilowej prędkości kątowej kół zębatych, występujących w wadliwej parze kinematycznej badanego zespołu napędowego, na zmiany częstotliwości zaburzeń napięcia wyjściowego, stanowiące użyteczny sygnał diagnostyczny. Drugi etap polega na konwersji zmodulowanego napięcia wyjściowego z prądnicy na postać cyfrową w celu dalszego jego przetwarzania w karcie licznikowej elektronicznego układu pomiarowego [12, 15, 20, 21].

Głównym elementem układu pomiarowego jest przystawka diagnostyczna (rys. 2), która umożliwia wygenerowanie impulsów otwierających i zamykających proces liczenia przyrostów czasu i wyznaczania częstotliwości sygnału z prądnicy pokładowej.



Rys. 2. Przystawka pomiarowa dla prądnicy jednofazowego prądu przemiennego

Metody FAM-C i FDM-A z powodzeniem identyfikują i określają poziom zużycia takich par kinematycznych, jak łożyska toczne, luzy kół zębatych, przekoszenia wałów itp. [10–14]. Natomiast identyfikacja poszczególnych uszkodzonych par kinematycznych metodami tradycyjnymi, np. wibroakustycznymi, powoduje wiele trudności [6, 7, 17, 18]. Jednak aby diagnoza w oparciu o metody FAM-C i FDM-A była skuteczna i trafna, niezbędne są wysokiej klasy układy pomiarowe, umożliwiające dokładne odzwierciedlenie dynamiki ruchu (prędkości kątowej) elementów badanego zespołu napędowego w postaci zmian częstotliwości chwilowej [3, 8, 14].

2. Aparatura pomiarowa wykorzystująca metody FAM-C i FDM-A jako obiekt analizy

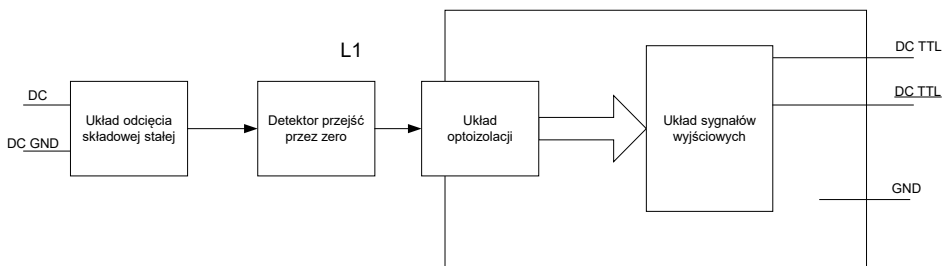
Struktura zbudowanego w ITWL jednokanałowego układu pomiarowego (rys. 2), stosowanego w metodach FAM-C i FDM-A, została opisana w [12, 13].

Jego pierwszy element stanowi blok standaryzacji sygnału napięciowego, w którym najpierw odbywa się „obcinanie” przebiegu sinusoidalnego napięcia wyjściowego do poziomu $0,1 \pm 0,6$ V w celu dopasowania go do standardu TTL. Dzięki temu zmniejsza się także poziom szumów. Następnie odbywa się pomiar częstotliwości chwilowej metodą pośrednią, poprzez wyznaczenie kolejnych czasów przejścia wartości generowanego napięcia przez zero [13, 19, 24, 27, 28].

Typowy tor pomiarowy dla elektronicznego układu pomiarowego jest przyłączony tylko do jednej prądnicy i ma określone tzw. pasmo obserwowalności podzespołów mechanicznych danego lotniczego zespołu napędowego. Zagadnienie obserwowalności stosowane w metodach FAM-C i FDM-A [12, 13], w odróżnieniu od typowego podejścia stosowanego w automatyce (dotyczącego obserwowalności systemu dynamicznego w celu wyznaczenia jego stanu początkowego), jest rozumiane jako „okno informacyjne” w widmie mierzonego napięcia wyjściowego z prądnicy, umożliwiające identyfikację zakłóceń występujących w torze kinematycznym danego lotniczego zespołu napędowego. Identyfikacja zakłóceń polega na ich „przywiązaniu” do wybranych wad kinematycznych występujących w danym torze kinematycznym (mających wpływ na przebieg procesów dynamicznych opisanych w [2, 12, 13, 22, 23, 29]) i jest realizowana na podstawie analizy częstotliwości ich występowania, mających swoje odzwierciedlenie w zbiorze charakterystycznym (m.in. częstotliwości zazębienia poszczególnych kół zębatych).

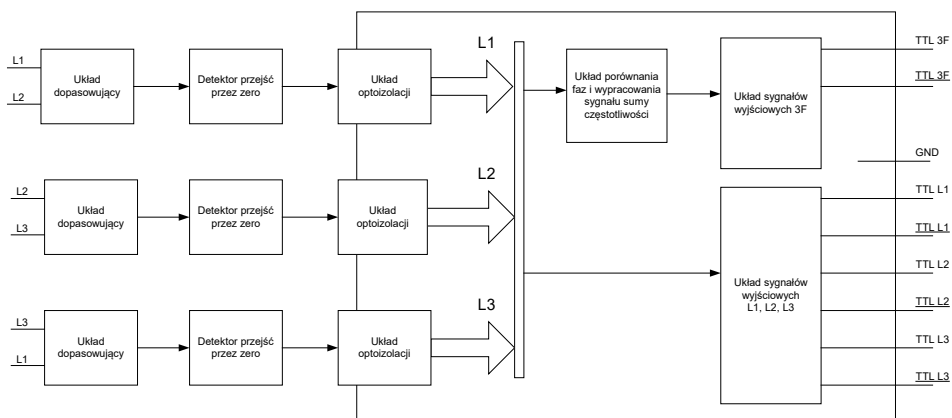
Kluczowe znaczenie w metodach FAM-C oraz FDM-A ma proces pozyskiwania danych niezbędnych do dalszej analizy i diagnostyki elementów mechanicznych zespołów napędowych. Danymi tymi są chwilowe częstotliwości składowej zmiennej napięcia stałego dla metody FDM-A oraz chwilowe częstotliwości napięć fazowych dla metody FAM-C [12, 13].

Schemat blokowy układu dopasowującego sygnał napięciowy z prądnicy prądu stałego (rys. 3) obejmuje jeden tor pomiarowy z uwzględnieniem GND.



Rys. 3. Schemat blokowy elektronicznego układu dopasowującego sygnał DC dla prądu stałego

Schemat blokowy układu dopasowującego sygnały napięciowe z prądnicy prądu przemiennego (rys. 4) obejmuje trzy tory pomiarowe.



Rys. 4. Schemat blokowy elektronicznego układu dopasowującego sygnały AC dla prądu przemiennego

Zbudowane w ITWL układy pomiarowe są tak zaprojektowane i wykonane, aby wprowadzały jak najmniejsze błędy pomiarowe. W tym celu konieczne było zastosowanie odpowiedniej klasy elementów i układów elektronicznych, charakteryzujących się dużą szybkością działania i małymi zniekształceniami sygnałów. Ponieważ mierzone sygnały elektryczne mają charakter analogowy (napięcie wyjściowe z prądnicy), a wyniki pomiarów postać zbiorów liczbowych, zbudowany układ pomiarowy został podzielony na część analogową i cyfrową, pomiędzy którymi konieczne było zastosowanie układów optoizolacji [8, 9, 19, 24].

W związku z różnymi właściwościami konstrukcji poszczególnych prądnic prądu stałego i trójfazowego prądu przemiennego (liczba nabiegowników stojana, różna liczba żłobków wirnika prądnicy) różnią się także pasma obserwowalności poszczególnych prądnic. Zróżnicowanie pasm obserwowalności można osiągnąć również poprzez zróżnicowanie konfiguracji fazowej, np. stosując pomiar jednofazowy dla jednego układu pomiarowego oraz pomiar w konfiguracji trójfazowej [12, 13] dla drugiego układu pomiarowego. W układzie pomiarowym trójfazowym przyrosty czasu pomiędzy przejściami sinusoidy napięcia wyjściowego prądnicy przez poziom zero są mierzone w każdej fazie i rzutowane na jedną wspólną oś czasu. Tak więc liczba przejść przez poziom zero jest trzykrotnie większa i w związku z tym pasmo obserwowalności przemieszcza się ok. trzykrotnie w kierunku wyższych częstotliwości.

W układach pomiarowych wielokanałowych skonstruowanych w ITWL [12, 13], gdzie każdy z kanałów jest przyłączony do innej prądnicy, lub do tej samej prądnicy, ale w innej konfiguracji fazowej, poszczególne kanały mają inne pasmo obserwowalności. Pasma obserwowalności wzajemnie się uzupełniają i dlatego możliwe jest monitorowanie wszystkich podzespołów mechanicznych badanego zespołu napędowego (tab. 1).

Tabela 1

Zakresy pasm obserwowalności poszczególnych kanałów pomiarowych FAM-C dla prądnicy GT-40PCz6 w czasie monitorowania mechanicznego zespołu napędowego śmigłowca Mi-24

| l.p. | Pasma drgań mechanicznego zespołu napędowego śmigłowca Mi-24 | | | Określenie toru pomiarowego elektronicznego układu FAM-C | | | |
|------|--|------------|------------|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Symbol zbioru | f_{pmin} | f_{pmax} | 1x115 V, 400 Hz | | 3x200 V, 400 Hz | 3x47 V, 800 Hz |
| | | | | Pełnokresowe $f_s = 400$ Hz | Półokresowe $f_s = 800$ Hz | Półokresowe $f_s = 800$ Hz | Półokresowe $f_s = 4800$ Hz |
| | Hz | Hz | Hz | Hz | Hz | Hz | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | A_1 | 2 | 6 | | | | |
| 2 | A_2 | 6 | 25 | | | | |
| 3 | A_{01} | 26 | 321 | | | | |
| 4 | A_{02} | 32 | 37 | | | | |
| 5 | A_3 | 37 | 45 | | | | |
| 6 | A_4 | 45 | 60 | | | | |
| 7 | A_{51} | 60 | 100 | | | | |
| 8 | A_{52} | 100 | 155 | | | | |
| 9 | A_6 | 165 | 295 | | | | |
| 10 | A_{71} | 295 | 550 | | | | |
| 11 | A_{72} | 560 | 640 | | | | |
| 12 | A_{81} | 670 | 1100 | | | | |
| 13 | A_{82} | 1070 | 1340 | | | | |
| 14 | A_9 | 1340 | 3500 | | | | |
| 15 | A_{10} | 1900 | 7000 | | | | |

W zbudowanej aparaturze wykorzystującej metody FAM-C i FDM-A wykorzystuje się przetwarzanie pierwotne (elektromaszynowe) i przetwarzanie wtórne (elektroniczne).

Przetwarzanie pierwotne (elektromaszynowe) realizowane jest z wykorzystaniem prądnicy jako przetwornika, który stanowi integralną część struktury zespołu napędowego. Prądnica przetwarza pierwotny sygnał diagnostyczny (występujący w postaci zmodulowań chwilowej prędkości kątowej wirnika prądnicy generowanych przez wadliwe pary kinematyczne badanego zespołu napędowego) na zmodulowania częstotliwości napięcia wyjściowego z prądnicy (występującego w sieci elektroenergetycznej).

W próbkowaniu pierwotnym (elektromaszynowym) prądnica pokładowa (traktowana w metodach FAM-C i FDM-A jako przetwornik sygnału diagnostycznego) dokonuje dyskretyzacji spektrum zmian modulacji mechanicznych dozorowanego zespołu napędowego i koduje je w postaci zmian przyrostów czasu przejścia przez poziom zero. Próbkowanie elektromaszynowe ma wiele zalet, z których za najważniejszą należy uznać synchronizm zjawisk mechanicznych z elektrycznymi.

Następnym etapem jest przygotowanie sygnału napięcia wyjściowego z prądnicy do postaci standaryzowanej pod kątem przetwarzania w karcie licznikowej [8, 9, 12, 13, 19]. Służy do tego przystawka diagnostyczna, która umożliwi wygenerowanie impulsów (w standardzie TTL) otwierających i zamykających proces liczenia przyrostów czasu.

Próbkowanie wtórne (elektroniczne) jest realizowane w typowy dla TTM sposób poprzez zliczanie liczby impulsów f_s zegara podstawy czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez zero przebiegu napięcia wyjściowego prądnicy (przetwornika). Próbkowanie wtórne ma na celu określenie tych zmian i ich przetransponowanie w sposób akceptowalny dla maszyny cyfrowej (w metodach FAM-C i FDM-A – komputera PC z wbudowaną kartą licznika). Aby uzyskać odpowiednią jakość sygnałów wejściowych do karty pomiarowej, został opracowany i zbudowany układ kondycjonowania sygnałów.

W próbkowaniu wtórnym (elektronicznym) do pomiaru częstotliwości chwilowej w metodach FAM-C i FDM-A zastosowano metodę pośrednią [12, 13, 14]. Trudno jest ustalić poziomy zadziałania dokładnie w pobliżu zera, gdzie zapewnione jest minimum błędu pomiaru kąta przesunięcia fazowego. W przypadku, kiedy jednak napięcie wejściowe zostanie wzmocnione, efektywny poziom uruchomienia czasomierza i jego zmiany ulegną podzieleniu przez wzmocnienie wzmacniacza, zapewniając większą dokładność pomiaru. Z uwagi na powyższe aparatura pomiarowa dla metody FDM-A (przystawka elektroniczna prądu stałego) ma w swej strukturze wzmacniacz napięciowy.

Prądnica (przetwornik) prądu stałego generuje składową pulsacji prądu stałego o wartości amplitudy $U_{pp} = 0,2 \div 2,1$ V. Dla porównania, w metodzie FAM-C lotnicza prądnica prądu przemiennego generuje napięcie międzyfazowe prądu przemiennego $U_{RMS} = 200$ V, czyli $U_{pp} = 560$ V. Dlatego też dla „wyrównania szans” sygnał składowej pulsacji dla prądnicy prądu stałego powinien być silnie wzmocniony [8, 12].

2.1. Układ kondycjonowania sygnału diagnostycznego z prądnicy

Układ kondycjonowania sygnału [8] stanowi pierwszy blok układu pomiarowego wykorzystującego metodę FAM-C i FDM-A. Jego zadanie polega na odbieraniu i wzmacnianiu sygnału analogowego napięcia wyjściowego prądnicy (przetwornika).

Jak wcześniej opisano sygnał ten zawiera cenne informacje zakodowane w modulacji częstotliwości tego przebiegu. Modulacje realizowane są w prądnicy (przetworniku) i diagnosta steruje rozdzielczością poprzez zmianę konfiguracji struktury fazowości układu pomiarowego. Zmiana konfiguracji wymaga równoległe działania torów pomiarowych o liczbie równej liczebności faz. Układ kondycjonowania sygnałów, pomimo formalnego przyporządkowania do rozdziału dotyczącego próbkowania wtórnego, wykonuje zadania związane z próbkowaniem pierwotnym.

W bloku kondycjonowania sygnału odbywa się przygotowanie odbieranego (wejściowego) sygnału analogowego napięcia z prądnicy (przetwornika) do przemiany w postać cyfrową. W tym celu odbierany sygnał napięcia jest wzmacniany, obcinany symetrycznie (u góry i od dołu) na pewnym poziomie napięcia.

2.2. Układ karty licznikowej współpracującej z komputerem

W zbudowanej w ITWL aparaturze pomiarowej dla metod FAM-C i FDM-A [8, 12] zastosowane zostały specjalizowane karty pomiarowe, które umożliwiają pomiar czasu trwania impulsu (poziomy wysoki sygnał) w standardzie TTL. Karty zostały wyposażone w jeden lub kilka niezależnych liczników pomiarowych. Liczniki kart stosowanych w diagnozowaniu lotniczych zespołów napędowych są rozmiaru dwubajtowego (16-bitowego) i mają możliwość zapisania maksymalnej wartości $2^{16} = 65536$ [15, 19].

Największą dokładność pomiaru karty licznikowej można uzyskać wtedy, gdy wartość licznika zliczającego impulsy będzie bliska pojemności licznika. W związku z powyższym karta licznikowa o wyższej częstotliwości zegara podstawy czasu ma możliwość pomiaru częstotliwości wahań mechanicznych o wyższym progu częstotliwości minimalnej f_p niż karta o niższej częstotliwości.

W torach pomiarowych prądu przemiennego często stosowany jest pomiar modulacji częstotliwości przy zliczaniu dwupołówkowym (półokresowym). Wymaga ono dwóch torów pomiarowych na karcie licznikowej. Powyższe tory winny mieć możliwie najbardziej do siebie zbliżone wartości przesunięcia fazowego [8, 12, 16, 26].

2.3. Układ kalibratora trójfazowego jako wzorcowe źródło zakłóceń

Z uwagi na wykorzystanie w procesie diagnostycznym m.in. sygnału wyjściowego z trójfazowej prądnicy tachometrycznej należało zastosować także trójfazowe źródło wzorcowe w postaci kalibratora trójfazowego z możliwością kształtowania przebiegu zmodulowania częstotliwości.

Kalibracje polegają na podawaniu na wejście badanego układu pomiarowego, odpowiednio dla metody FAM-C lub FDM-A, wykalibrowanych zmian i zniekształceń napięcia trójfazowego.

Dla sygnału kalibracyjnego można wyróżnić następujące rodzaje parametrów:

- częstotliwość nośna napięcia,
- wartość skuteczna napięcia,
- asymetria napięć fazowych,
- wartość współczynnika amplitudy,
- całkowita zawartość harmoniczných,
- wartości poszczególnych harmoniczných,
- składowa stała napięcia,
- zmiany kąta fazowego pomiędzy poszczególnymi wektorami fazowymi napięcia,
- głębokość modulacji amplitudy.

Cały proces kalibracyjny ma na celu dokonanie oceny i wymierne oszacowanie błędów metrologicznych elementów składowych poszczególnych zestawów pomiarowych stosowanych w metodach FAM-C i FDM-A [12, 13].

3. Podstawy teoretyczne analizy błędów aparatury pomiarowej wykorzystującej metody FAM-C i FDM-A

Funkcjonowanie opracowanych w ITWL metod FAM-C i FDM-A oparte jest na wykorzystaniu parametrów modulacji częstotliwości i fazy, co zgodnie z teorią sygnałów powinno zapewnić dużą odporność na zakłócenia [27, 28]. W metodach FAM-C i FDM-A częstotliwość chwilowa jest obliczana metodą pośrednią – poprzez obliczanie przerostów czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zerowy. W tym miejscu (w pobliżu przejścia przez zero) gradient zmian napięcia wyjściowego z prądnicy jest największy, a więc możliwości zakłócenia są minimalne [12, 13].

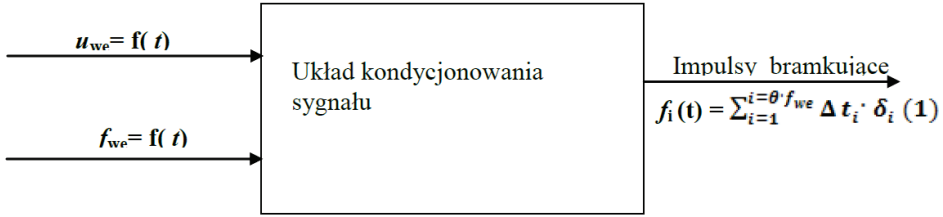
Przetwarzanie pierwotne (elektromaszynowe) prądnica realizuje przez wykorzystanie zależności jej napięcia wyjściowego od chwilowej prędkości kątowej wirnika prądnicy [20, 29], stanowiącego element kinematyczny bezpośrednio podłączony do lotniczego zespołu napędowego. Zmiany chwilowej prędkości kątowej wirnika mają swoje odzwierciedlenie w zmianach amplitudy i częstotliwości generowanego napięcia.

Przetwarzanie wtórne (elektroniczne) realizowane jest w metodach FAM-C i FDM-A przez układ komparacji w przystawce elektronicznej (układ elektroniczny kondycjonowania sygnałów) oraz przez zegar podstawy czasu karty licznikowej [8, 14]. Jest to klasyczny sposób próbkowania, opisany w licznych opracowaniach z dziedziny TTM. W radiotechnice z kolei realizuje się w podobny sposób pomiar czasu trwania powrotu sygnału wysyłanego z radiowysokościomierzy i dalmierzy impulsowych, pomiar współrzędnych geograficznych w systemach radionawigacyjnych LORAN [16].

W środowisku elektrotechnicznym z kolei istnieją opracowania dotyczące próbkowania przebiegu analogowego, np. napięcia prądnicy i ewentualnie cyfrowego odtwarzania jego amplitudy. Rozważane są wówczas liczne typy błędów, np. błąd kształtu odtworzonego sygnału, błąd od zakłóceń radiowych [16, 27] itp. W przypadku aplikacji metod FAM-C i FDM-A [10–14] przedmiotem zainteresowania nie jest przebieg zmian amplitudy napięcia prądnicy, lecz jej częstotliwość, a dokładniej zmiany przyrostów czasu pomiędzy kolejnymi położeniami zezwoju wirnika prądnicy-przetwornika w strefie magnetycznie obojętnej stojana. Odzwierciedlenie historii tych kolejnych położen umożliwia wtórne, cyfrowe odtworzenie przebiegu zmian chwilowej prędkości kątowej poszczególnych ogniw kinematycznych badanego zespołu napędowego.

3.1. Błędy układu kondycjonowania sygnału diagnostycznego

Dla układu kondycjonowania sygnałów (rys. 5) sygnałem wyjściowym są impulsy bramkujące generowane w chwili przejścia sygnału napięcia wyjściowego prądnicy (przetwornika) przez poziom zero. W ten sposób tworzy się zbiór impulsów, a informacja diagnostyczna zakodowana jest w odległościach czasowych pomiędzy tymi impulsami. Na wyjściu generowany jest ciąg impulsów prostokątnych (1). Nośnikiem informacji jest odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi impulsami – ciąg $\{\Delta t_i\}$.



Rys. 5. Układ kondycjonowania sygnału jako trójnik

Liczba elementów tego ciągu jest równa iloczynowi czasu obserwacji pomiarowej θ i wartości częstotliwości wejściowej f_{we} . Zgodnie z literaturą [8, 9, 24], układ formowania impulsów ma pewien próg działania i opóźnienie, powodujące błąd przyrostu czasu Δt_i . Błąd ten zależy od stromości narastania napięcia przebiegów wejściowych i jest tym mniejszy, im stromość jest większa. Stromość uzależniona jest od wartości wzmacnienia w układzie kondycjonowania sygnału oraz od wartości szczytowej sygnału napięcia prądniczy (przetwornika).

Znaczny wpływ na błąd przyrostu czasu Δt_i ma odkształcenie sygnału przebiegu napięcia prądniczy $u(t)$ w pobliżu przejścia przez poziom zero.

3.2. Błędy układu karty licznikowej współpracującej z komputerem

Obecnie w diagnozowaniu lotniczych zespołów napędowych stosowane jest próbkowanie równomierne, które nie jest zsynchronizowane z przebiegiem napięcia badanego. Jednakże w przyszłości korzystne byłoby, gdyby podczas chwilowego zwiększenia częstotliwości (w stosunku do częstotliwości znamionowej), częstotliwość zegara podstawy czasu f_s ulegała zwiększaniu i odwrotnie. W ten sposób wyrównywałyby się błąd hiperbolicznej zależności pomiędzy przyrostami czasu a częstotliwością.

$$f_{ik} = \frac{1}{\zeta_s + \Delta t_i} \quad (1)$$

gdzie:

ζ_s – zakłócenia fazy impulsów zegara podstawy czasu,

Δt_i – przyrost czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zero napięcia prądniczy (przetwornika) określany liczbą impulsów zegara podstawy czasu.

Dla właściwego pomiaru kąta przesunięcia fazowego pomiarowo niezbędny jest tylko odcinek przebiegu w pobliżu wartości zerowej. Dlatego na wejściu każdego wzmacniacza stosuje się równoległy układ obcinania przebiegu napięciowego na diodach krzemowych.

Błąd metody pomiaru przyrostów czasu jest błędem przypadkowym. Można go zmniejszyć, jeżeli istnieje możliwość m -krotnego powtórzenia pomiaru tej samej wartości („obserwacji” tego samego procesu dynamicznego) w identycznych warunkach. Zmniejszenie błędu metody przy jednorazowym pomiarze można uzyskać, stosując dwa układy pomiarowe każdy z inną częstotliwością generatora: pierwszy „główny” z dłuższym okresem powtarzania impulsów T_{w1} , drugi z okresem powtarzania impulsów T_{w2} . Wynik pomiaru przyrostu czasu można określić z równania:

$$T_x = n_1 \cdot T_{w1} + n_2 \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (2)$$

W praktyce opisywaną metodę wykorzystuje się w pomiarach FAM-C, stosując dwa układy pomiarowe o niewielkiej różnicy częstotliwości zegara wewnętrznego jednocześnie do pomiarów z tej samej prądnicy-przetwornika. Efekty zostaną uwzględniane dopiero przy analizie parametrów zbiorów charakterystycznych, gdzie uśrednia się parametry zobrażeń z obu torów pomiarowych. Technicznie możliwe jest także zsynchronizowanie obu torów pomiarowych, aby dokonywać uśredniania już na etapie tworzenia zbiorów paczek impulsów.

3.3. Wpływ zakłóceń zewnętrznych na błędy aparatury pomiarowej

Do pomiaru częstotliwości chwilowej w metodach FAM-C i FDM-A zastosowano metodę pośrednią [12, 13, 19], polegającą na wyznaczeniu czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przebiegu zmian częstotliwości chwilowej przez zero, a następnie obliczaniu okresu i częstotliwości tych zmian. Trudno jest ustalić poziomy zadziałania dokładnie w pobliżu zera, gdzie zapewnione jest minimum błędu pomiaru kąta przesunięcia fazowego.

Trudno jest także określić wpływ zakłóceń zewnętrznych na błędy aparatury pomiarowej, jednak wpływ takich zakłóceń na wyniki pomiaru istnieje. Wspomina o tym wielu autorów [16, 26, 27], wyróżniając m.in. wpływ takich zakłóceń, jak pole elektromagnetyczne generowane przez lotniskowe systemy radiotechniczne.

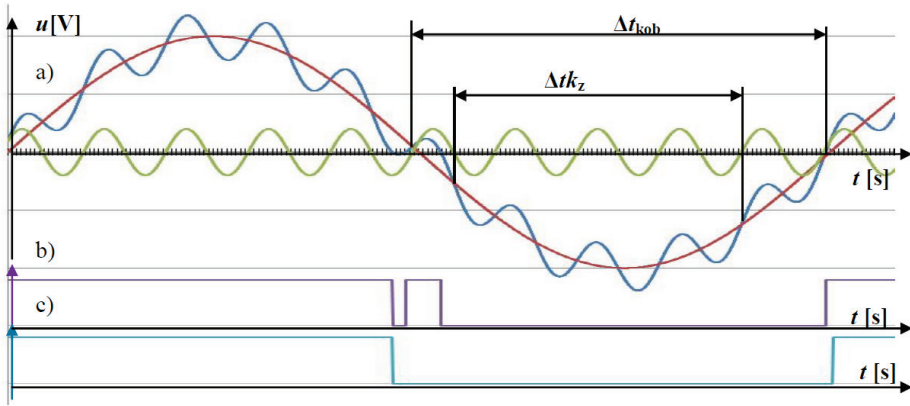
Dla przykładu, w [27] wykazano, że przy „skażeniu” obserwowanego sygnału przebiegu napięciowego (napięcia wyjściowego prądnicy pokładowej)

$$u_{\text{obs}}=f(t)=U_{\text{obs}} \cdot \sin(2\pi f_{\text{obs}}t) \quad (3)$$

sygnałem zakłócającym

$$u_{\text{zak}}=f(t)=U_{\text{zak}} \cdot \sin(2\pi f_{\text{zak}}t) \quad (4)$$

następuje nakładanie sygnału, zaś przyrost czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zerowy ulega statystycznemu zmniejszeniu. Spowoduje to pozorne zwiększenie częstotliwości obliczonej tym sposobem (rys. 6).



Rys. 6. Zobrazowanie sygnału z nałożonymi zakłóceniami wysokoczęstotliwościowymi:
 a) przebieg napięcia wyjściowego prądnicy pokładowej (sinusoida o wyższej amplitudzie) obserwowany z przebiegiem zakłócającym o wyższej częstotliwości (sinusoida o niższej amplitudzie): Δt_{kob} – przyrost czasu sygnału obserwowanego bez zakłóceń, Δt_{kz} – przyrost czasu sygnału wypadkowego: sygnału obserwowanego z nałożonymi zakłóceniami, b) odpowiedź komparatora bez histerezy, c) odpowiedź komparatora z histerezą

W związku z powyższym, przebieg złożony z obu sygnałów (zakłócającego i obserwowanego) może mieć przyrost czasu pomiędzy kolejnymi k -tymi przejściami przez poziom zero Δt_{kzak} mniejszy niż dla sygnału niezakłóconego (Δt_k). Zależności te można opisać w ślad za [26, 27] w postaci zależności:

- a) przyrost czasu sygnału obserwowanego bez zakłóceń

$$\Delta t_{kobs} = \frac{1}{2 \cdot f_{obs}} \quad (5)$$

- b) przyrost czasu sygnału wypadkowego dla sygnału obserwowanego z nałożonymi zakłóceniami

$$\Delta t_{kzak} = \Delta t_{kobs} - 2 \cdot K_1 \cdot U_{zak} [1 - u_{obs}'(t_k)] \quad (6)$$

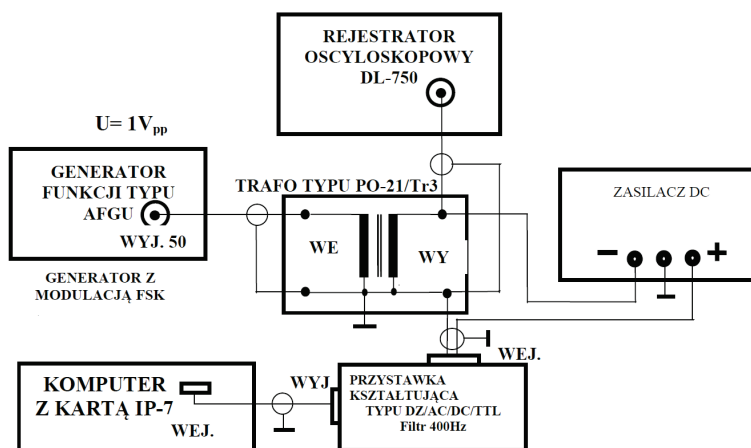
Po podstawieniu do (6) zależności (3) oraz (5) można otrzymać:

$$\Delta t_{kzak} = \frac{1}{2 \cdot f_{obs}} - 4 \cdot K_2 \cdot U_{zak} \cdot U_{obs} \cdot \pi \cdot f_{obs} \cdot \cos(2\pi f_{obs} t_k) \quad (7)$$

Z analizy powyższych zależności wynika, że znaczny wpływ na błąd przyrostu czasu Δt_i ma odkształcenie sygnału w badanym przebiegu napięcia wyjściowego z prądnicy $u(t)$ w pobliżu przejścia przez poziom zero.

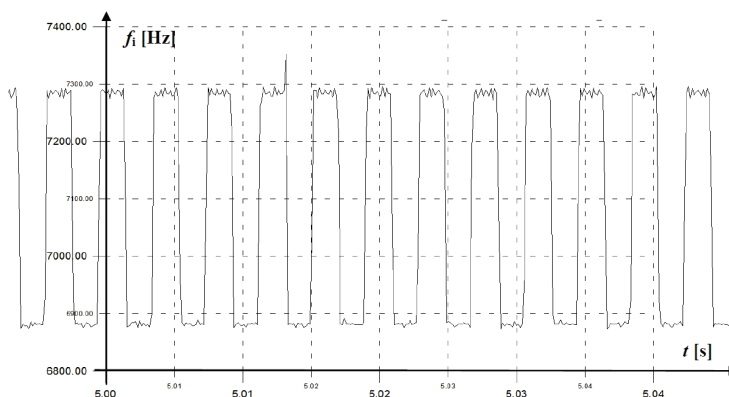
4. Wyniki badań z zastosowaniem aparatury pomiarowej wykorzystującej metody FAM-C i FDM-A

Sprawdzenie poprawności działania aparatury pomiarowej wykorzystującej metody FAM-C i FDM-A wykonuje się w opracowanym w ITWL układzie pomiarowym (rys. 7).



Rys. 7. Schemat stanowiska generującego stan modulacji częstotliwości w pokładowej prądnicie prądu stałego statku powietrznego, umożliwiającego kalibrację układu diagnostycznego („detektor”, „komputer z kartą IP-7”)

Rzeczywisty sygnał w postaci przebiegu częstotliwości, uzyskiwany z generatora funkcji w zbudowanym układzie pomiarowym, przedstawiono na rys. 8.

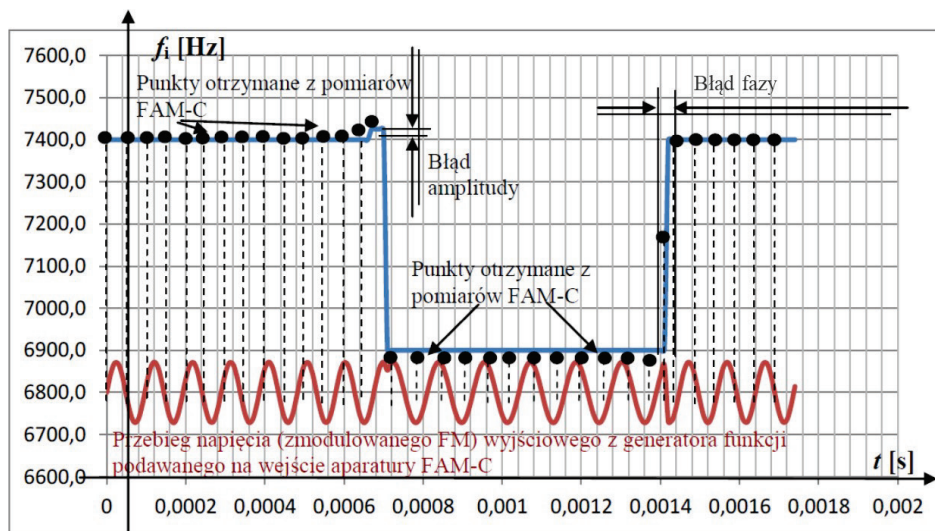


Rys. 8. Przebieg częstotliwości chwilowej dla zmodulowań częstotliwości w formie przebiegu prostokątnego podczas sprawdzania funkcjonowania układu pomiarowego metodą FDM-A w warunkach laboratoryjnych

Sprawdzenie to jest realizowane przy podawaniu napięcia z generatora (rys. 9, czerwona quasi-sinusoida) o częstotliwości zmieniającej się zgodnie z prostokątnym przebiegiem częstotliwości o współczynniku wypełnienia 50%.

Zmiany częstotliwości symulują zmodulowania częstotliwości prędkości kątowej ogniwa kinematycznego mechanicznego zespołu napędowego i odzwierciedlają kształt sygnału sterującego zmianą częstotliwości generatora funkcji (generator z modulacją FSK). Wprost proporcjonalnie do wspomnianego przebiegu powstaje zmodulowanie FM „napięcia prądnicy-przetwornika” na wyjściu generatora funkcji.

W kolejnym kroku wykonywany jest dyskretny przebieg częstotliwości chwilowej w funkcji czasu (co zostało zobrazowane w postaci czarnej kropki). Porównując fazę sygnału wzorcowego (niebieska ciągła linia) z fazą odzwierciedlenia dyskretnego tego przebiegu (czarne punkty na przebiegu quasi-prostokątnym) określa się błąd fazy. Analogicznie możliwe jest śledzenie odchylenia amplitudy krzywej, poprowadzonej pomiędzy zbiorem czarnych punktów a wzorcowym przebiegiem prostokątnym. W ten sposób można określić błąd amplitudy i fazy poszczególnych zespołów pomiarowych FAM-C i FDM-A (szczegóły: „błąd amplitudy”, „błąd fazy”).

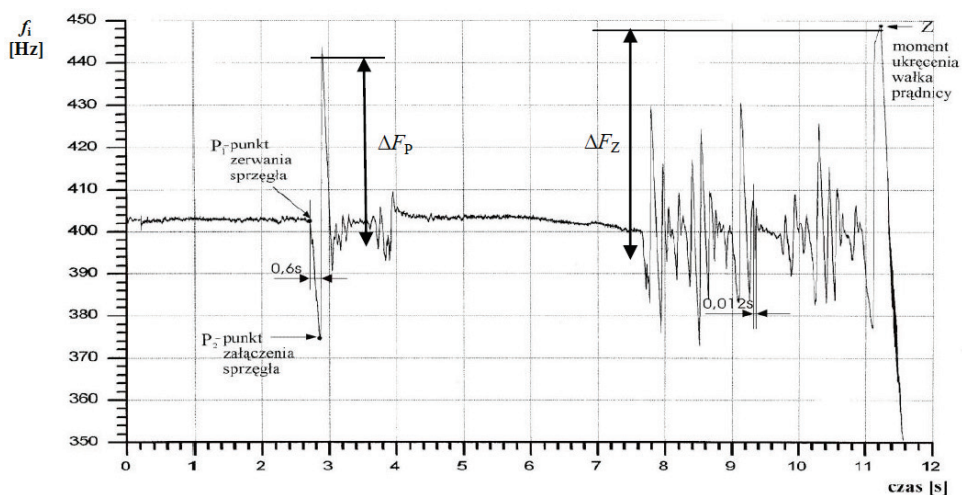


Rys. 9. Przebieg częstotliwości chwilowej dla zmodulowań częstotliwości w formie przebiegu prostokątnego podczas sprawdzania funkcjonowania układu pomiarowego metodą FAM-C w warunkach laboratoryjnych

Z uwagi na specyfikę elektronicznego przygotowania impulsów pomiarowych powstają liczne błędy przesunięć czasowych. Dodatkowo karta licznikowa jest źródłem takich błędów, jak np. błąd stabilności zegara kwarcowego. Paczki impulsów zostają odłożone w buforze karty licznikowej i są przesyłane do dysku twardego, gdzie tworzą pliki pomiarowe (rozszerzenie „pom”).

- Zbiory takich plików są przetwarzane do dwóch postaci [4, 5, 10–14]:
- przebiegów czasowych częstotliwości $f_i = f(t)$,
 - zbiorów charakterystycznych zaburzeń częstotliwości $\Delta F = f(f_p)$.

W odniesieniu do przykładowego pomiaru (rys. 10), wykonanego na samolocie MiG-29, analiza przebiegu wyznaczonej częstotliwości pozwala na identyfikację zdarzeń o znaczeniu krytycznym dla bezpieczeństwa lotu, m.in. momentu zerwania i załączenia sprzęgła jednokierunkowego w pokładowej skrzyni napędów oraz momentu ukrećenia wałka prądnicy, powodującego nagły spadek prędkości kątowej wirnika i zależnej od niej częstotliwości generowanego napięcia wyjściowego z prądnicy [12].

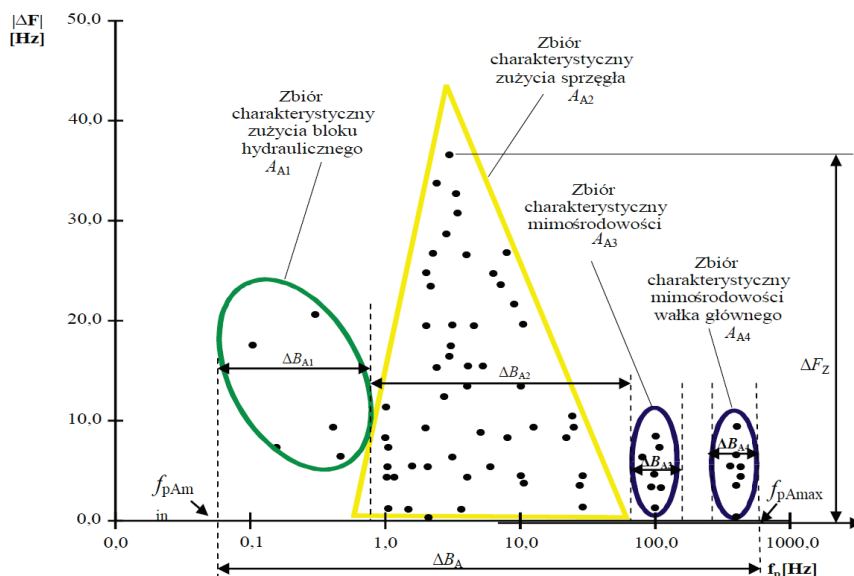


Rys. 10. Zobrazowanie zakłóceń chwilowej częstotliwości napięcia wyjściowego charakteryzujących zmiany chwilowej prędkości kątowej wałka prądnicy w czasie zerwania sprzęgła jednokierunkowego samolotu MiG-29; P1 – punkt zerwania sprzęgła jednokierunkowego – rozpoczęcie serii wahań sprężystych (pierwsza seria wahań), P2 – punkt załączenia sprzęgła jednokierunkowego, ΔF_P – wartość dewiacji częstotliwości (odchylenia częstotliwości chwilowej od częstotliwości średniej) w punkcie „P”, Z – punkt ukrećenia wałka prądnicy (po trzeciej serii wahań sprężystych), ΔF_Z – wartość dewiacji częstotliwości (odchylenia częstotliwości chwilowej od częstotliwości średniej) w punkcie „Z”

Tworzenie zbiorów charakterystycznych dla zaburzeń częstotliwości odbywa się z wykorzystaniem zarejestrowanych wyników pomiaru napięcia wyjściowego prądnicy, dla których poszukuje się ekstremów odchylenia częstotliwości zmian generowanego napięcia oraz oblicza czasy trwania tych odchylenia. Tak utworzony zbiór charakterystyczny, poprzez wyznaczenie odchylenia częstotliwości generowanego napięcia, jednocześnie odzwierciedla częstotliwości zakłóceń chwilowej prędkości kątowej dla poszczególnych elementów badanego podzespołu mechanicznego [12].

Do uzyskania zbiorów charakterystycznych, stanowiących zbiory punktów na przyjętej do analizy płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych (ΔF , f_p), opisujących zmiany częstotliwości w przebiegu generowanego napięcia w funkcji częstotliwości jego składowych harmonicznych, niezbędne jest obliczenie częstotliwości średniej.

Zgodnie z [12], wyznaczone na podstawie analizy wybranych przebiegów zakłóceń częstotliwości zbiory charakterystyczne (rys. 11) pozwalają na identyfikację typowych uszkodzeń skrzyni napędów samolotu MiG-29: stopnia zużycia bloku hydraulicznego, zużycia sprzęgła jednokierunkowego, mimośrodowości wybranych kół zębatych.



Rys. 11. Zbiory charakterystyczne na płaszczyźnie (f_p , ΔF) dla typowych uszkodzeń skrzyni napędów samolotu MiG-29, monitorowanej w kanale pomiarowym FAM-C jednofazowym 1 x 115 V, 400 Hz; f_{pmin} – częstotliwość minimalna pasma obserwowalności toru pomiarowego jednofazowego FAM-C, f_{pmax} – częstotliwość maksymalna pasma obserwowalności toru pomiarowego jednofazowego FAM-C, ΔB_A – pasmo obserwowalności toru pomiarowego jednofazowego FAM-C (otrzymane z pomiaru napięcia wyjściowego prądnicy GŻ-30), ΔB_{A1} – pasmo zbioru charakterystycznego A_{A1} zużycia bloku hydraulicznego, ΔB_{A2} – pasmo zbioru charakterystycznego A_{A2} zużycia sprzęgła jednokierunkowego, ΔB_{A3} – pasmo zbioru charakterystycznego A_{A3} mimośrodowości wału nr 1, ΔB_{A4} – pasmo zbioru charakterystycznego A_{A4} mimośrodowości wału nr 2, ΔF_Z – wartość dewiacji częstotliwości (odchylenia częstotliwości chwilowej od wartości średniej) w punkcie „Z”)

Kolejnym etapem sprawdzenia rzeczywistego układu pomiarowego jest porównanie wartości odchyłek częstotliwości zmian generowanego napięcia, zebranych w postaci zbiorów charakterystycznych, z zestawem parametrów wzorcowych.

Analiza wyników wykonanego sprawdzenia pozwoliła także na określenie zestawu parametrów niezbędnych do oceny błędu amplitudy i fazy dla rzeczywistego kanału DC (metoda FDM-A) przygotowywanego do testowania silnika SO-3 (tab. 2).

Tabela 2

Wartości fali prostokątnej zmodulowań częstotliwości, ustawiane na generatorze funkcji w celu symulowania zmian modulacji częstotliwości składowej pulsacji prądu stałego, powodowanych przez podpory wirnika silnika SO3/3W przy dziesięciokrotnym zmniejszeniu częstotliwości procesu dla $n = 7000$ obr/min i 15600 obr/min – wartości zadane

| Częstotliwość nośna odzwierciedlająca prędkość obrotową wału głównego turbiny | Klasa diagnostyczna | Wartości zadane parametrów modulacji częstotliwości | | | | | |
|---|---------------------|---|------------------|-------|-------|------|-------|
| | | $F_1 = F_{\min}$ | $F_2 = F_{\max}$ | t_1 | t_2 | A | f_p |
| | | Hz | Hz | ms | ms | Hz | Hz |
| 7000 obr/min | O | 3201 | 3151 | 2,435 | 2,435 | 50 | 205 |
| | A | 3216 | 3136 | 2,435 | 2,435 | 80 | 205 |
| | B | 3276 | 3076 | 2,435 | 2,435 | 200 | 205 |
| | C | 3376 | 2976 | 2,435 | 2,435 | 400 | 205 |
| | D | 4076 | 2276 | 2,435 | 2,435 | 1800 | 205 |
| | E | 4426 | 1926 | 2,435 | 2,435 | 2500 | 205 |
| 15600 obr/min | O | 7103 | 7053 | 1,945 | 1,945 | 50 | 257 |
| | A | 7118 | 7038 | 1,945 | 1,945 | 80 | 257 |
| | B | 7178 | 6978 | 1,945 | 1,945 | 200 | 257 |
| | C | 7278 | 6878 | 1,945 | 1,945 | 400 | 257 |
| | D | 7978 | 6178 | 1,945 | 1,945 | 1800 | 257 |
| | E | 8328 | 5828 | 1,945 | 1,945 | 2500 | 257 |

Końcowym etapem sprawdzenia jest archiwizowanie danych i ich wizualizacja dla użytkownika. Archiwizowanie odbywa się poprzez zapisanie danych do pamięci wewnętrznej testera albo do bazy danych prowadzonej przez osoby diagnozujące.

Wizualizacja oceny diagnostycznej odbywa się w formie prezentacji wyników klasyfikacji diagnostycznej najbardziej zużytych elementów mechanicznych wraz z identyfikacją ich miejsca w badanym zespole napędowym [12, 13].

5. Podsumowanie

W artykule rozważano problem strukturalnych błędów metod FAM-C i FDM-A w procesie dozoru mechanicznych zespołów napędowych. Główna uwaga skupiona została na wykorzystującym te metody układzie pomiarowym oraz na błędach z nim związanych. Przeanalizowano m.in. zagadnienie przekształcania sygnału analogowego napięcia wyjściowego prądnicy w sygnał cyfrowy. Przekształcenie to umożliwia śledzenie zmian zakłóceń w dynamice ruchu obrotowego poszczególnych par kinematycznych w badanym lotniczym zespole napędowym.

Omówiono próbkowanie pierwotne dla prądnic lotniczych jako wielofazowych układów pomiarowych oraz wprowadzono pojęcie pasma obserwowalności prądnicy. Sterowanie pasmem obserwowalności jest realizowane nie przez prądnicę, lecz przez zmianę struktury elektronicznego układu pomiarowego. Zmiana taka powoduje istotne zmiany czułości metody i poziomu błędów. Pociąga to za sobą zwiększenie wymagań konstrukcyjnych dla układów pomiarowych. W praktyce wykorzystywanie sygnałów napięcia z dwóch (lub więcej) prądnic przypomina zmianę pomiaru z jednofazowego na trójfazowy. Istotne są relacje błędu wynikowego wynikające z błędu generatora podstawy czasu, tj. zmiany częstotliwości karty licznikowej. Dzieje się tak na skutek niestabilności tej częstotliwości oraz stochastycznych relacji fazowych pomiędzy wybranymi impulsami pomiarowymi a miejscami przejść przez poziom zerowy przebiegu napięcia prądnicy. Wskazano, że oprócz wymienionych błędów, wynikających ze zmiany struktury fazowości układu pomiarowego oraz wynikających z niestabilności zegara podstawy czasu i relacji fazowych pomiędzy impulsami tego zegara a obserwowanym sygnałem z prądnicy, istnieje dodatkowo oddziaływanie zakłóceń amplitudowych na błąd pomiarowy. Zaobserwowano, że udział zakłóceń amplitudowych rozszerza pasmo widma sygnału i zwiększa wartość częstotliwości granicznych. Może to spowodować zmianę wielu parametrów, np. pozorne zmniejszenie wartości dobroci mechanicznej łożyska tocznego w czasie jego rezonansu mechanicznego, przez co takie łożysko nie będzie odpowiednio wcześniej wymienione i może doprowadzić do poważnych uszkodzeń zespołu napędowego, a nawet zagrożić bezpieczeństwu lotu danego statku powietrznego.

Omówiono także zagadnienia metrologiczne związane z działaniem prądnicy realizującej próbkowanie pierwotne (elektromaszynowe), jak i pomiarem przyrostu czasu w procesie realizacji próbkowania wtórnego (elektronicznego). Pokazano wiele różnorodnych kierunków działania mającego na celu zmniejszenie niedokładności pomiarów i zwiększenie wiarygodności diagnozy badanego zespołu napędowego.

Podkreślono, że podstawową zaletą zbudowanej w ITWL aparatury pomiarowej, wykorzystującej metody FAM-C lub FDM-A, jest możliwość jej podłączenia w dowolnym punkcie sieci elektroenergetycznej, z daleka od miejsc niebezpiecznych, gdyż zmodulowania częstotliwości i fazy są takie same w każdym punkcie obwodu sieci elektroenergetycznej statku powietrznego. Dodatkowo, dzięki zaletom metody FAM-C i FDM-A, możliwe jest monitorowanie lotniczych podzespołów napędowych upakowanych w niewielkich nawet objętościach, jak skrzynie przekładniowe.

6. Literatura

1. Augustyn S., Gębura A.: Możliwości diagnozowania skrzyń napędów i zespołów transmisji śmigłowca Mi-24 metodą FAM-C. Prace naukowe ITWL, Zeszyt nr 30, Warszawa 2012.
2. Belahcen A.: Magnetoelasticity, magnetic forces and magnetostriction in electrical machines. Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering Laboratory of Electromechanics, Helsinki 2004.
3. Bendat J.S., Piersol A.G.: Engineering applications of correlation and spectral analysis, New York – Toronto 1980.
4. 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.
5. Biarda, D., Falkowski P., Gębura A., Kowalczyk A.: Opis patentowy PL 175674B1: Sposób diagnozowania technicznego elementów sprzęgających silnik, a zwłaszcza lotniczy silnik spalinowy, z prądnicą prądu stałego, Zgłoszenie 08.07.1996, udzielenie patentu 29.01.1999.
6. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Wyd. PWN, Warszawa 1989.
7. Charchalis A., Grządziela A.: Diagnozowanie stanu współosiowości elementów transmisji momentu obrotowego metodą pomiaru sygnałów wibroakustycznych z łożyska nośnego. Problemy Eksploatacji, Nr 2, 1999.
8. Gajewski T.: Układ kondycjonowania sygnału z izolacją galwaniczną i detektorem fazowym. Praca dyplomowa, Warszawa 2011.
9. Gądek K.: Wzorce czasu w metrologii cyfrowej i mikroprocesorowej, Kraków 2011.
10. Gębura A.: Diagnosing turbine engine bearing structures with the aid of FAM-C and FDM-A methods. Polish Maritime Research, nr 1(59), vol. 16, 2009.
11. Gębura A.: Diagnostic of aircraft power transmission track based on the analysis of generator's frequency. Journal of Technical Physics, No. 1, 2002.
12. Gębura A.: Dozorowanie stanu technicznego węzłów łożyskowych i wybranych elementów transmisji zespołu napędowego. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2014.
13. Gębura A.: Metoda modulacji częstotliwości napięcia prądnic pokładowych w diagnozowaniu zespołów napędowych. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2010.
14. Gębura, A., Markiewicz W.: Presentations in FAM-C and FDM-A methods and some problems of a signals theory. Solid State Phenomena, Vol. 147–149, 2009.
15. Izydoreczyk J., Płonka G., Tyma G.: Teoria sygnałów. Czasopismo „Helion”, 1999.
16. Kinkulkin I.E., Rubcov W.D., Fabrik M.A.: Fazovoi metod opriedieleniya koordinat. „Sovietskoje radio”, Moskwa 1979.
17. Moinaro F., Constanic F., Danjean A.: Knocking recognition in engine vibration signal using the wavelet transform. Proceeding of the IEEE-SP International Symposiumon, Victoria BC, Canada, 1992.

18. Rahman M.Z., Ohba H., Yamamoto T., Yoshioka T.: A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission. *Tribology Transactions*, 51, 2008.
19. Sowiński A.: *Cyfrowa technika pomiarowa*. WKiŁ, Warszawa 1976.
20. Sydenham P. H., *Podręcznik metrologii. Tom I. Podstawy teoretyczne*. WKŁ, Warszawa 1988.
21. Sydenham P. H., *Podręcznik metrologii. Tom II. Podstawy praktyczne*. WKŁ, Warszawa 1990.
22. Szczepanik R., Rządowski R.: *Badania dynamiki łopatek wirnikowych silników lotniczych w różnych warunkach eksploatacji*. Warszawa–Radom 2012.
23. Szklarski L, Jaracz K.: *Wybrane zagadnienia dynamiki napędów elektrycznych*. PWN, Warszawa 1986.
24. Tumański S.: *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa 2007.
25. Witoś M.: *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. Wyd. ITWL, Warszawa 2010.
26. Wojnar A., Zdzieborski T.: *Analiza błędów anomalnych w cyfrowych pomiarach częstotliwości*. Biuletyn WAT nr 2(258), 1974.
27. Wojnar A.: *Statystyczna analiza przejść przez zero w teorii sygnałów*. *Prace Instytutu Tele- i Radiotechnicznego*, tom 9, nr 3, 1965.
28. Wojnar A.: *Teoria sygnałów*. WNT, Warszawa 1988.
29. Žic M.Z.: *Pieriechodnyje processy w maszynach postojannogo toka*. *Energia*, Moskwa 1974.