

**Małgorzata GIZELSKA, Dorota KOZANECKA, Zbigniew KOZANECKI**

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH,  
ul. Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź

## Procedury diagnostyczne dla układu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym

**Dr inż. Małgorzata GIZELSKA**

Absolwentka Wydziału Fizyki Technicznej Informatyki i Matematyki Stosowanej PŁ kierunku informatyka. Studia doktoranckie ukończyła na Wydziale Mechanicznym na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn. Od 2011 roku jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Maszyn Przepływowych na Wydziale Mechanicznym PŁ. W pracy zawodowej zajmuje się tworzeniem oprogramowania diagnostycznego dedykowanego mechatronicznym systemom wirującym maszyn.

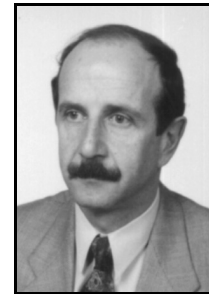
e-mail: [malgorzata.gizelska@p.lodz.pl](mailto:malgorzata.gizelska@p.lodz.pl)



**Prof. PŁ dr hab. inż. Zbigniew KOZANECKI**

Ukończył studia na Wydz. Mechanicznym PŁ. W 1980 r. wyjechał na staż naukowy do Electricite de France w Chatou. W 1986 r. obronił pracę doktorską na Uniwersytecie Poitiers we Francji, a w 1987 r. pracę doktorską w PŁ. W 1999 uzyskał stopień doktora habilitowanego. Od 2003 r. jest kierownikiem Zakładu Automatyki i Diagnostyki Urządzeń Przemysłowych. Zajmuje się projektowaniem i diagnostyką systemów wirujących przemysłowych maszyn przepływowych.

e-mail: [zkozan@p.lodz.pl](mailto:zkozan@p.lodz.pl)



**Prof. dr hab. inż. Dorota KOZANECKA**

Ukończyła studia na Wydz. Elektrycznym PŁ. Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym i zastępcą dyrektora ds. kształcenia w IMP PŁ. Od kilku lat jest kierownikiem Studium Doktoranckiego. Prace naukowo-badawcze prowadzi w Zakładzie Diagnostyki i Automatyki Urządzeń Przepływowych. Są one poświęcone technologii aktywnego łożyskowania magnetycznego w zastosowaniu do systemów wirujących maszyn przemysłowych o specjalnych wymaganiach technologicznych.

e-mail: [dorota.kozanecka@p.lodz.pl](mailto:dorota.kozanecka@p.lodz.pl)



### Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję i wybrane procedury specjalistycznego oprogramowania przy wykorzystaniu zaawansowanych technologii informatycznych dla systemu diagnostycznego dedykowanego układom wirującym maszyn z aktywnym łożyskiem magnetycznym. Jest on wykorzystywany w czasie normalnej eksploatacji maszyny, co pozwala na zwiększenie jej niezawodności.

**Słowa kluczowe:** oprogramowanie diagnostyczne, monitoring, aktywne łożysko magnetyczne, układ wirujący.

### Diagnostic procedures for the rotating System with an active magnetic bearing

#### Abstract

The paper presents possibilities and current trends in the advanced diagnosis of rotating machine systems with active magnetic suspension. The diagnostic systems designed for this type of unconventional rotating systems have their own specificities, which distinguish them from classical ones. The proposed procedures of the specialized diagnostic software dedicated to rotating systems with an active magnetic bearing allow for automatic execution of measurements, their analysis, and generation of information for an operator about the state of the machine in different phases of the machine work in real-time. It is very important from the viewpoint of the safe operation and the increased reliability of this type of unconventional solutions of rotating machine systems. An important feature of the designed diagnostic system is an open architecture that allows for modifications and extension of the number of the analyzed parameters. The constructed laboratory test stands, where the diagnostic tests were performed, have practical application in industrial machines: to control the vibration of a long flexible shaft of the industrial machinery by an additional magnetic support - safe crossing of the critical frequency, in the exploitation of an active magnetic support as a damper - the drive transmission system for the rear rotor of the helicopter.

**Keywords:** diagnostic software, monitoring, active magnetic bearing, rotating system.

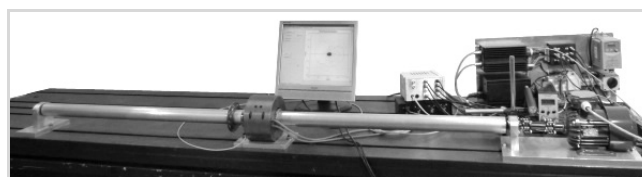
### 1. Wstęp

W wielu dziedzinach techniki, również w budowie maszyn, pojawia się coraz więcej urządzeń, których zaprojektowanie jest możliwe tylko na drodze integracji układów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych oraz informatycznych. Urządzenia te nazywane są systemami mechatronicznymi.

Przykładem niekonwencjonalnego rozwiązania węzła łożyskowego jest mechatroniczny system aktywnego łożyska magnetycznego. System aktywnych, sterowanych cyfrowo łożysk magnetycznych stanowi interesującą alternatywę w konstrukcjach nowoczesnych maszyn, których zadaniem jest realizacja procesów technologicznych związanych ze spełnieniem szczególnych wymagań eksploatacyjnych.

Magnetyczne zawieszenie wirników maszyn jest technologią jakościowo różną w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami łożyskowania. Jego cechą charakterystyczną jest bezkontaktowa lewitacja wirnika maszyny w polu magnetycznym generowanym przez układ automatycznej regulacji, który umożliwia sterowanie dynamiką wirnika w czasie jego ruchu.

Modelowe stanowisko badawcze, dla którego zaprojektowano oprogramowanie diagnostyczne, stanowi wirujący wał (ciężkościenne rura o długości 1923 mm wykonana z duraluminium o średnicy zewnętrznej 54 mm i grubości ścianki 2 mm), podparty na obydwu końcach w łożyskach tocnych.



Rys. 1. Stanowisko badawcze układu wirującego z łożyskiem magnetycznym  
Fig. 1. Test stand of the rotating system with a magnetic bearing

Napęd stanowi elektryczny silnik, sterowany falownikiem i połączony z wałem za pośrednictwem elastycznego sprzęgła membranowego. Między łożyskiem a końcem wału montowane są układy wykonawcze systemu aktywnej magnetycznej podpory pomocniczej.

Aktywne łożysko magnetyczne pracuje tu jako poprzeczne łożysko pomocnicze modyfikujące właściwości dynamiczne linii wału (rys. 1).

### 2. Budowa systemu diagnostycznego

System diagnostyczny został zaprojektowany w celu analizy i interpretacji danych pomiarowych zbieranych w czasie pracy układu wirującego maszyny z łożyskiem magnetycznym [2, 3].

Źródłem mierzonych sygnałów dla bazy danych systemu diagnostycznego są czujniki pomiarowe zainstalowane w łożysku magnetycznym, które stanowią niezbędną część modułów sterujących pracą łożyska.

Dane pomiarowe dostępne w systemie sterowania łożyskiem zbierane są z czujników przemieszczenia wału  $s$  w osiach sterowania  $X, Y$ , prądów w uzwojeniach elektromagnesów  $I_{XT}, I_{XB}, I_{YT}, I_{YB}$ , ( $T$  - top - górny,  $B$  - bottom - dolny) oraz częstości obrotów  $n$ .

Są one transmitowane poprzez odpowiednio skonfigurowany interfejs, który zapewnia akwizycję tych danych dla systemu diagnostycznego.

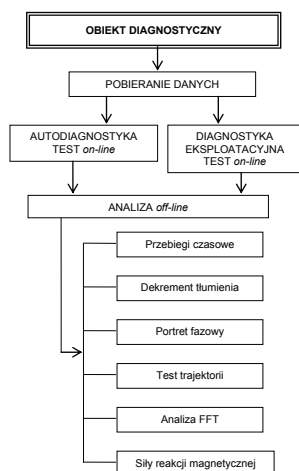
Praca systemu diagnostycznego jest możliwa w dwóch trybach pracy *on-line* oraz *off-line*, a jego oprogramowanie pozwala na realizację funkcji testowych w dwóch fazach funkcjonowania mechatronicznego układu wirującego:

- w fazie zawieszania wału w łożysku magnetycznym – Pakiet *Autodiagnostyka*
- po uruchomieniu napędu układu – Pakiet *Diagnostyka eksploatacyjna*

W każdej fazie funkcjonowania obiektu użytkownik ma dostęp do opcji, która w trybie *off-line* pozwala na wybór formy prezentacji zarejestrowanych danych i ich analizę w postaci:

– *Przebiegów czasowych* – *Dekreментu tłumienia* – *Portretu fazowego* – *Testu trajektorii* – *FFT* – *Sily reakcji magnetycznej*.

Bardzo istotną z punktu widzenia eksploatacji są opcje pozwalające na automatyczne wykonanie w czasie rzeczywistym pomiarów (*Test on-line*), ich analizę i wygenerowanie informacji dla użytkownika o stanie obiektu diagnostycznego (rys. 2).



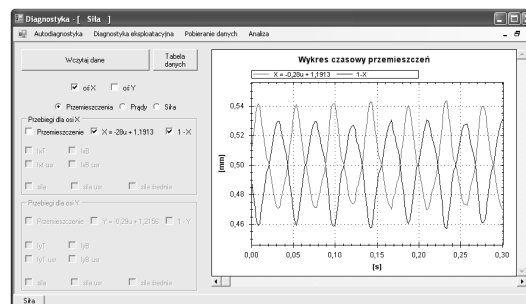
Rys. 2. Schemat koncepcyjny systemu diagnostycznego  
Fig. 2. Concept scheme of the diagnostic system

### 3. Procedury programowe

Zaprojektowane oprogramowanie diagnostyczne zawiera pakiety programowe umożliwiające wykonywanie wielu złożonych procedur, które są odpowiedzialne za diagnostykę *on-line* poprawności działania podpory magnetycznej zarówno przy układzie nieruchomym jak i wirującym. Zapewnia także możliwość analizy, w trybie *off-line*, danych zapisywanych automatycznie do pamięci i związanych z nietypowymi zachowaniami systemu [2, 3].

#### 3.1. Przebiegi czasowe

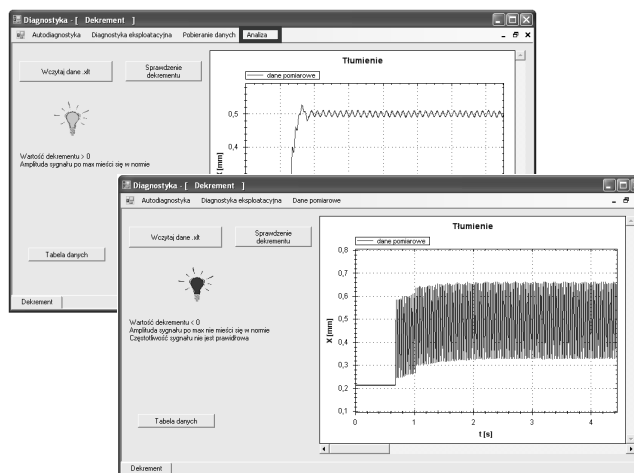
Przebiegi czasowe wielkości rejestrowanych w zaprojektowanym systemie diagnostycznym: przemieszczenia wału w osiach sterowania  $X, Y$ , oraz prądów w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów  $I_{XT}, I_{XB}, I_{YT}, I_{YB}$  stanowiły bazę do opracowania pozostałych form prezentacji wyników, dlatego wierna rejestracja przebiegów czasowych *on-line* i możliwość ich odtwarzania *off-line* było warunkiem poprawności działania systemu diagnostycznego (rys. 3).



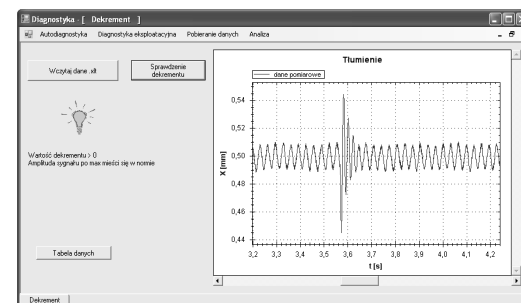
Rys. 3. Czasowy przebieg przemieszczenia  
Fig. 3. The displacement waveforms of the shaft

#### 3.2. Logarytmiczny dekrement tłumienia

Kontrola poprawności funkcjonowania łożyska magnetycznego obejmuje sprawdzenie jakości tłumienia drgań. Odbywa się ona w dwóch etapach pracy łożyska: podczas uruchamiania łożyska (rys. 4) oraz przy włączonym łożysku, dla nieruchomego jeszcze wału (rys. 5).



Rys. 4. Ocena działania łożyska magnetycznego w fazie jego uruchamiania  
Fig. 4. Assessment of the rotating system to start the shaft suspension



Rys. 5. Wymuszenie impulsowe – pozytywny wynik testu  
Fig. 5. Impulse forcing – the positive test result

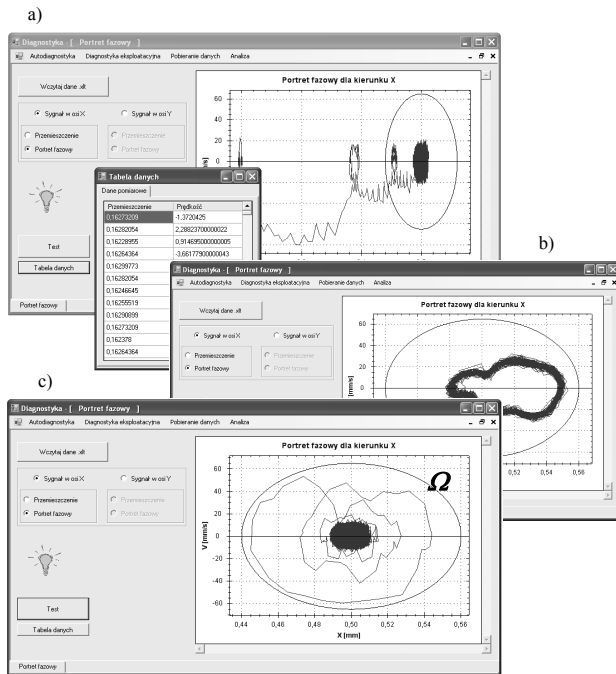
Zastosowana procedura rejestruje rzeczywiste dane pomiarowe, a następnie wyciąga i sprawdza charakterystyczne parametry:

- logarytmiczny dekrement tłumienia,
- wartości przemieszczeń wału po wytłumieniu drgań.

#### 3.3. Portret fazowy

Moduł kontroli portretu fazowego analizuje zależności między prędkością a przemieszczeniem wału w poszczególnych osiach sterowania łożyskiem  $X, Y$ .

Kontrola poprawności portretu fazowego obejmuje różne fazy pracy łożyska magnetycznego tzn.: podanie impulsowego sygnału wymuszającego, pracę ze stałą częstotliwością obrotów oraz załączanie łożyska i zawieszanie wału (rys. 6 a, b, c).



Rys. 6. Trajektoria fazowa ruchu wału a) załączanie łożyska b) stała częstość obrotowa c) wymuszenie impulsowe

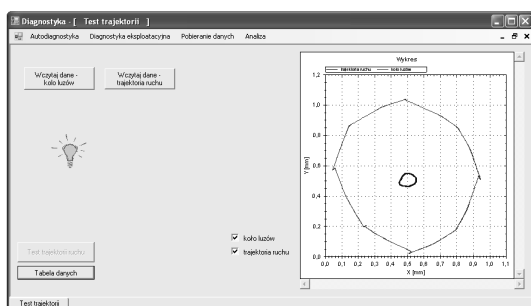
Fig. 6. Phase trajectory of the shaft movement a) for the bearing switching b) for the constant frequency of the shaft c) for the impulse force

We wszystkich przypadkach sprawdzane jest, czy zebrane wartości parametrów w chwili przeprowadzania testu mieszczą się w obszarze dopuszczalnych odchyżeń od stanu równowagi  $\Omega$ , charakteryzującym poprawną pracę systemu wirującego. Obszar  $\Omega$  został dobrany doświadczalnie i odpowiada przestrzeni fazowej, dla której badany obiekt uznany jest za stateczny technicznie, co oznacza powrót do warunków równowagi statycznej, w przypadku gdy został z tych warunków wytrącony [1].

### 3.4. Test trajektorii

Moduł *Test trajektorii* oprogramowania diagnostycznego w wersji *off-line* umożliwia użytkownikowi przeanalizowanie trajektorii ruchu wału w postaci graficznej w odniesieniu do wyznaczonego koła luzów ograniczającego dopuszczalną przestrzeń poruszania się czopa oraz ocenę poprawności działania układu w postaci czytelnej dla użytkownika.

Procedurą automatycznego obtaczania czopa w panwi łożyska dla uzyskania rzeczywistej geometrii szczeliny łożyska (tzw. koło luzów) polega na wysterowaniu maksymalnym prądem uzwojeń elektromagnesów łożyska i cyklicznym przełączaniu zasilania między uzwojeniami elektromagnesów łożyska (rys. 7).

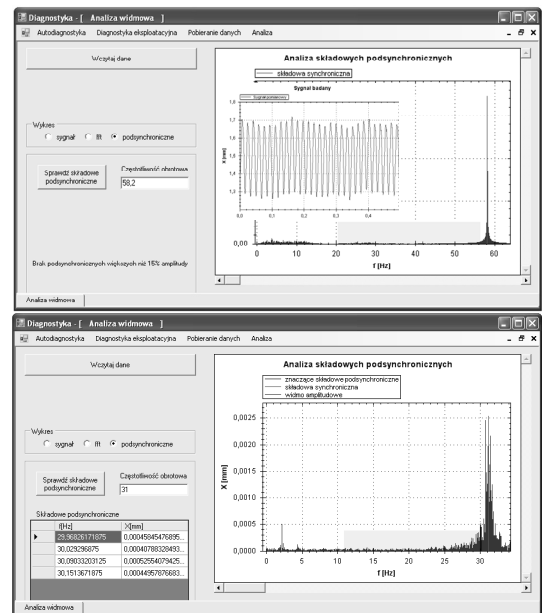


Rys. 7. Test trajektorii ruchu wału

Fig. 7. Test trajectory of the shaft movement

### 3.5. Analiza widma amplitudowego – test składowych podsynchronicznych

Moduł *FFT* umożliwia sprawdzanie obecności znaczących wartości składowych podsynchronicznych, które są symptomem pojawienia się drgań samowzбудnych układu wirującego.



Rys. 8. Identyfikacja składowych podsynchronicznych

Fig. 8. Identification of subsynchronous components

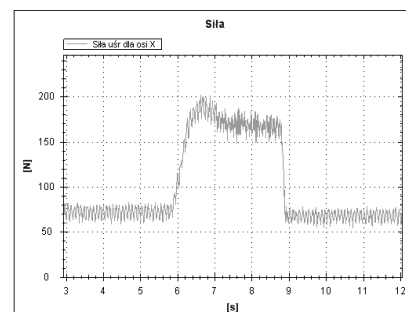
Warunki niestabilnej pracy systemu zostały wyznaczone eksperymentalnie, a zidentyfikowanie znaczącej składowej podsynchronicznej zostanie zasygnalizowane na wykresie za pomocą zmiany koloru prążka oraz odnotowane w tabeli wyników (rys. 8).

### 3.6. Identyfikacja sił reakcji magnetycznej

Unikatową cechą łożyska magnetycznego jest możliwość identyfikacji, metodą pośrednią, sił reakcji magnetycznej generowanych w osiach sterowania łożyska magnetycznego (1), na bazie pomiarów prądów ( $I$ ) i przemieszczeń ( $s$ ) dla danych wartości stałych elektromagnesów ( $K$ ), ( $T$  - top - górny,  $B$  - bottom - dolny):

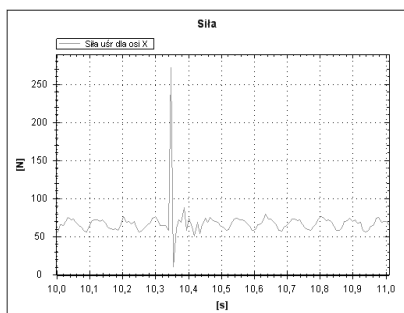
$$F_x = K_{XT} \frac{I_{XT}^2}{s_{XT}^2} - K_{XB} \frac{I_{XB}^2}{s_{XB}^2} \quad (1)$$

Znajomość sił działających w układzie wirującym maszyny ma istotną wartość diagnostyczną, ponieważ umożliwia określenie przyczyny drgań, która pojawia się wcześniej niż skutek tzn. odpowiedź struktury drgającej. Służy temu oddzielna procedura pozwalająca na estymację zewnętrznych sił poprzecznych w układzie wirującym z aktywnym łożyskiem magnetycznym (rys. 9, 10).



Rys. 9. Obciążenie łożyska statyczną siłą zewnętrzną

Fig. 9. The load of the bearing with the static external force

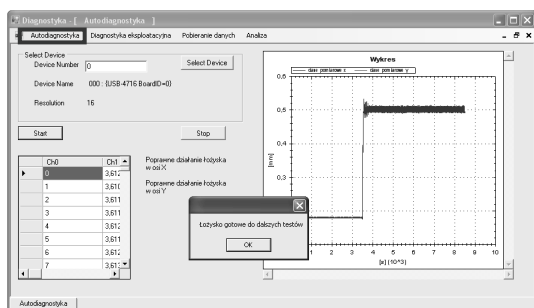


Rys. 10. Odpowiedź łożyska na wymuszenie impulsowe  
Fig. 10. Response of the bearing to the impulse force

#### 4. Pakiet AUTODIAGNOSTYKA

Opcja *AUTODIAGNOSTYKA* realizuje, w trybie *on-line*, sprawdzanie gotowości układu wirującego z łożyskiem magnetycznym do uruchomienia napędu i automatyczne wygenerowanie informacji dla operatora o dopuszczeniu do przeprowadzenia testów eksploatacyjnych przy uruchomionym napędzie [2, 3].

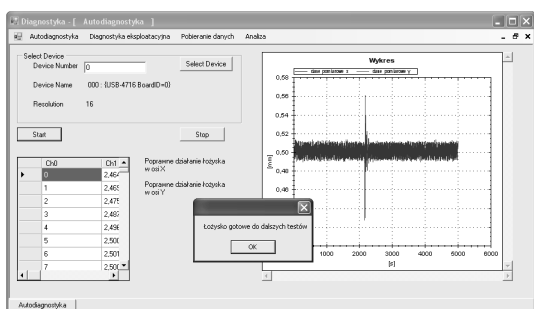
Dla oceny poprawności funkcjonowania układu wirującego w pierwszej fazie pracy, jaką jest załączenie łożyska magnetycznego i zawieszanie wału, przygotowana została procedura, na którą składa się kontrola przemieszczeń wału w każdej osi sterowania oraz analiza logarytmicznego dekrementu tłumienia. Odbywa się to w cyklu automatycznym w rzeczywistym czasie pracy obiektu tzn. przy załączaniu zasilania do układów sterowania łożyskiem. Zakończenie testu powoduje wygenerowanie informacji o stanie obiektu i możliwości (lub nie) przejścia do kolejnego etapu (rys. 11).



Rys. 11. *AUTODIAGNOSTYKA* - sprawdzenie gotowości systemu wirującego do uruchomienia napędu

Fig. 11. *SELF-DIAGNOSTICS* - checking of the rotating system readiness to start the drive

Po uzyskaniu informacji o prawidłowym stanie układu, po uruchomieniu łożyska (rys. 12), wykonywana jest także ocena jego sprawności poprzez analizę tłumienia drgań wału po podaniu impulsowego sygnału wymuszającego.

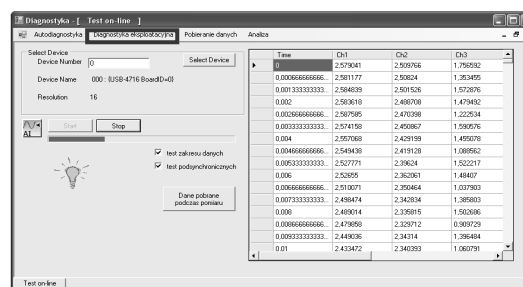


Rys. 12. *AUTODIAGNOSTYKA* - impulsowy sygnał wymuszający

Fig. 12. *SELF-DIAGNOSTICS* - the forcing impulse signal

#### 5. Pakiet DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA

W pakiecie *DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA* opcja test *on-line* pozwala na kontrolę wartości przemieszczeń wału i prądów w elektromagnesach w czasie rzeczywistym funkcjonowania układu wirującego z łożyskiem magnetycznym w fazie rozruchu, wybiegu lub pracy z nominalną częstotliwością obrotów oraz sprawdza wartości składowych podsynchronicznych na podstawie analizy *FFT* [2, 3]. Użytkownikowi systemu udostępniona jest opcja wyboru rodzaju przeprowadzanej analizy (rys. 13).



Rys. 13. *DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA* – Test *on-line* – rozruch  
Fig. 13. *DIAGNOSTICS OF EXPLOITATION* – Test *on-line* – start-up

#### 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono koncepcję i ogólną charakterystykę specjalistycznych procedur programowych dla systemu diagnostycznego dedykowanego mechatronicznym układom wirującym z aktywnym łożyskiem magnetycznym sterującym drganiami długiego wiotkiego wału. Przy opracowaniu systemu wykorzystano zaawansowane technologie informatyczne, które pozwalają na integrację komponentów mechanicznych i elektronicznych oraz specjalistycznego oprzyrządowania pomiarowego, a także bazują na tendencjach, jakie panują w dziedzinie budowy nowoczesnych systemów diagnostycznych [1].

Ważną cechą systemu jest otwarta architektura determinująca podatność na modyfikacje i rozszerzanie liczby analizowanych parametrów. Zbudowany i zweryfikowany na rzeczywistych obiektach system diagnostyczny daje szerokie możliwości analizy poprawności funkcjonowania w różnych fazach pracy układu wirującego: zawieszanie wału w łożysku, rozruch, wybieg, praca przy nominalnej częstotliwości obrotów.

Zbudowane w skali rzeczywistych układów wirujących, stanowiska laboratoryjne, na których wykonywane były testy diagnostyczne mają swoje zastosowanie praktyczne np.:

- do diagnostyki maszyn przepływowych z aktywnymi łożyskami magnetycznymi,
- do sterowanie drganiami wiotkich wałów maszyn z wykorzystaniem pomocniczej podpory magnetycznej,
- przy eksploatacji tłumików magnetycznych służących bezpiecznemu przekraczaniu częstotliwości krytycznych długich wiotkich wałów maszyn.

Zaprojektowany system diagnostyczny ma duże znaczenie aplikacyjne w przypadku decyzji o zastosowaniu takiego rozwiązania w maszynie przemysłowej.

#### 7. Literatura

- [1] Batko W.: Nowe idee w budowie systemów monitorujących, Przegląd Mechaniczny, nr 11/2007, str. 43-47, 2007 r.
- [2] Gizelska M.: Diagnostyka systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym, Praca doktorska wykonana pod kierunkiem prof. Doroty Kozaneckiej, Instytut Maszyn Przepływowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka, 2011 r.
- [3] Gizelska M., Kozanecka D., Kozanecki Z.: Integrated Diagnostics of the Rotating System with an Active Magnetic Bearing, Solid State Phenomena, Vol. 147-149, pp. 137-142, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, ISSN 1012-0394, 2009 r.