

METODYKA I WERYFIKACJA TECHNIK POMIAROWYCH ZASTOSOWANYCH W DIAGNOSTYCE AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

Małgorzata GIZELSKA¹

1. WSTĘP

Większość eksploatowanych maszyn w zastosowaniach przemysłowych są to urządzenia zawierające system przekazywania energii mechanicznej w postaci wirującego wału podpartego w łożyskach. Obecność ruchomego, wirującego elementu związanego ze stacjonarną częścią struktury maszyny implikuje dwa podstawowe zjawiska: drgania oraz tarcie w węzłach łożyskowych, które wiążą się z rozpraszaniem strumienia przekazywanej energii oraz zużyciem. Monitorowanie tych zjawisk stanowi jeden z podstawowych problemów w eksploatacji maszyn.

Przykładem węzła łożyskowego, w którym wyeliminowano tarcie i zużycie jest aktywne łożysko magnetyczne. Aktywne, magnetyczne podpory wykorzystują technologie, które zasadniczo różnią się od klasycznych rozwiązań łożyskowania. Mogą pracować w zakresie bardzo niskich lub bardzo wysokich temperatur, w środowiskach agresywnych chemicznie lub w próżni.

Zapewnienie niezawodności pracy maszyny z niekonwencjonalnym systemem łożyskowania, wymaga zaprojektowania specjalistycznych narzędzi diagnostycznych umożliwiających kontrolę jej stanu technicznego i parametrów funkcjonowania łożysk w trybie *on-line*. Kluczowe znaczenie ma zatem pozyskiwanie i przetwarzanie w czasie rzeczywistym informacji pomiarowych, które determinują stan dynamiczny układu wirującego.

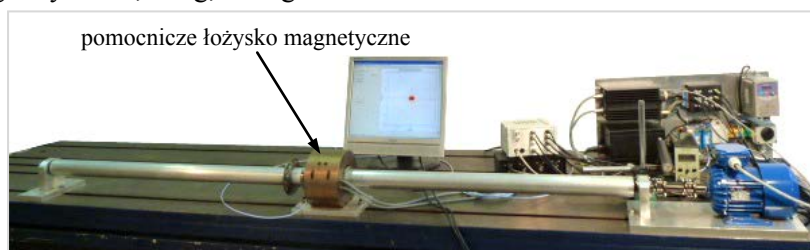
W artykule zaprezentowana zostanie metodyka pozyskiwania danych pomiarowych, weryfikacja jej poprawności oraz specjalistyczne procedury informatyczne zastosowane w diagnostyce aktywnego łożyska magnetycznego.

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn Przepływowych, 90 - 924 Łódź, ul. Wólczańska 219/223

2. STANOWISKO BADAWCZE

Modelowe stanowisko badawcze, dla którego zbudowany został system diagnostyczny, stanowi poziomy, wiotki wał podparty w dwóch łożyskach tocznych montowanych na obu końcach (rys. 1). Między łożyskiem a prawym końcem wału zamontowano system aktywnej magnetycznej podpory pomocniczej. Aktywne łożysko magnetyczne pracuje jako poprzeczne łożysko pomocnicze modyfikujące właściwości dynamiczne linii wału [1, 3].

Strukturalnie wał stanowi cienkościenna rura wykonana z duraluminium o średnicy zewnętrznej 80 mm i grubości ścianki 2,1 mm. Napęd zrealizowano za pomocą silnika elektrycznego z płynną regulacją obrotów, który połączony jest z wałem za pośrednictwem elastycznego sprzęgła membranowego. Masa układu wirującego wynosi 4,85 kg, a długość linii wału 1923 mm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym

3. KONCEPCJA BUDOWY SYSTEMU DIAGNOSTYCZNEGO

Specyfika konstrukcji rzeczywistego obiektu – długi wiotki wał transmitujący moc stawia specjalne wymagania związane z budową systemu diagnostycznego [2], który nadzoruje jednocześnie pracę aktywnego łożyska magnetycznego, prawidłowość funkcjonowania układu wirującego oraz efektywność sterowania drganiami poprzecznymi wału. Te uwarunkowania powodują, że elementy wejściowe systemu diagnostycznego stanowią integralną część systemu aktywnej kontroli drgań wału [8].

System diagnostyczny został zaprojektowany w celu analizy i interpretacji danych pomiarowych zbieranych w czasie pracy układu wirującego maszyny z łożyskiem magnetycznym. Źródłem mierzonych sygnałów dla bazy danych systemu diagnostycznego są czujniki pomiarowe zainstalowane w łożysku magnetycznym, które stanowią niezbędną część modułów sterujących pracą łożyska. Dodatkowe układy pomiarowe mierzą wartości prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska oraz częstość obrotów [4, 5, 6, 7].

Dane pomiarowe zbierane są z czujników:

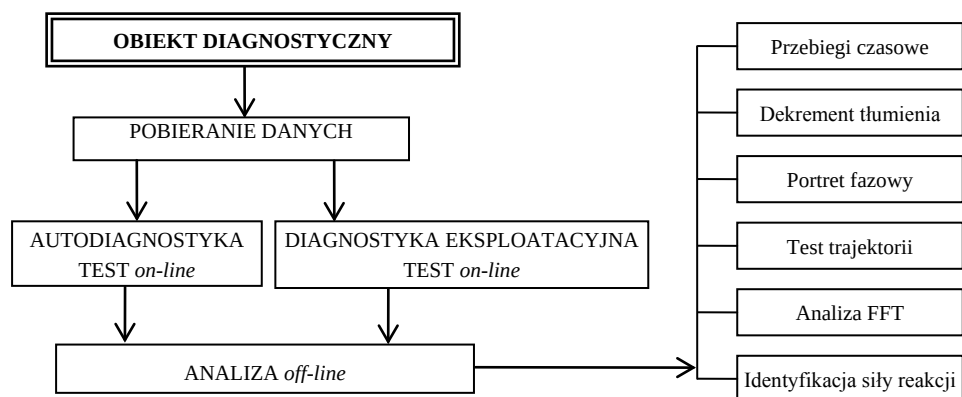
- przemieszczenia wału w osiach sterowania X , Y ,
- prądów w uzwojeniach elektromagnesów I_{XT} , I_{XB} , I_{YT} , I_{YB} ,
- częstości obrotów n .

Są one transmitowane poprzez specjalnie 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 pracy mechatronicznego układu wirującego:

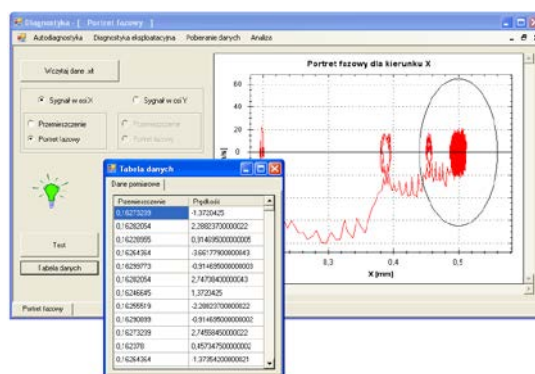
- w fazie zawieszania wału w łożysku magnetycznym – realizowana opcja - AUTODIAGNOSTYKA,
- po uruchomieniu napędu układu wirującego – realizowana opcja - DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA

Poglądowy schemat budowy systemu diagnostycznego przedstawiony został na rys. 2.



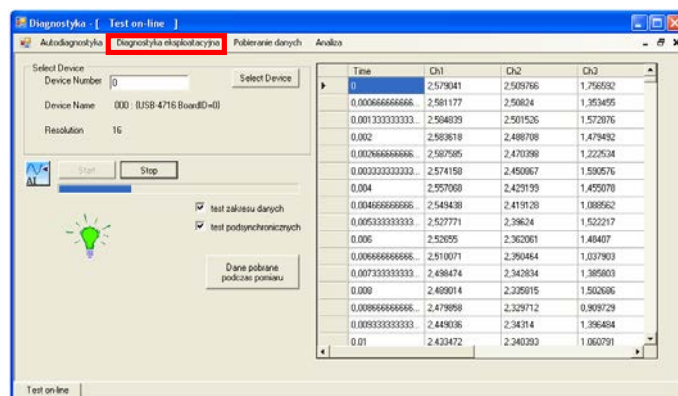
Rys. 2. Schemat koncepcyjny systemu diagnostycznego

W każdej fazie pracy obiektu użytkownik ma dostęp do opcji ANALIZA, która w trybie *off-line* pozwala na wybór formy prezentacji zarejestrowanych danych i ich analizę w postaci: przebiegów czasowych, dekrementu tłumienia, portretu fazowego, testu trajektorii, analizy FFT oraz identyfikacji siły reakcji magnetycznej.



Rys. 3. AUTODIAGNOSTYKA – Analiza *off-line* – Portret fazowy - zawieszanie wału - tabela danych

Bardzo istotną z punktu widzenia eksploatacji jest opcja – TEST *on-line* – pozwalająca na automatyczne wykonanie w czasie rzeczywistym pomiarów, ich analizę i wygenerowanie informacji dla użytkownika o stanie obiektu diagnostycznego.



Rys. 4. DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA – Test *on-line* – rozruch - pozytywny wynik testu

4. DIAGNOSTYCZNA BAZA DANYCH

Zaprojektowany system diagnostyczny wymaga dostępu do danych pomiarowych generowanych przez diagnozowany obiekt. Zostało to zrealizowane poprzez zaprojektowanie dodatkowego urządzenia, które pozwala na akwizycję i rejestrację tych danych, aby możliwa była ich analiza za pomocą dedykowanych pakietów diagnostycznych.

Do zbierania i rejestracji danych pomiarowych wykorzystano przenośny moduł USB-4716 firmy Advantech wyposażony w interfejs użytkownika USB, który zapewnia odpowiednią szybkość i dokładność transmisji danych w aplikacjach pomiarowych.

Urządzenie wyposażone jest w 16 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, który wraz z układami multiplekserów, programowalnym wzmacniaczem i pamięcią FIFO udostępnia użytkownikowi 16 wejść oraz dwa wyjścia analogowe, 8 wejść i 8 wyjść cyfrowych oraz licznik zdarzeń o pojemności 16 bitów. Moduł USB nie wymaga dodatkowego źródła zasilania. Zaciski do podłączania wszystkich sygnałów we/wy umieszczone są na obudowie urządzenia.



Rys. 5. Moduł zbierania danych

Przygotowany w ten sposób interfejs pozwolił na transmisję danych diagnostycznych do komputera, na którym realizowane są funkcje diagnostyczne, kontrolujące poprawność funkcjonowania łożyska magnetycznego.

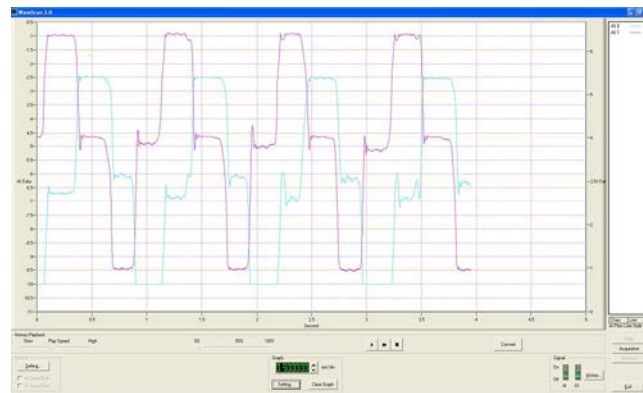
5. ARCHIWIZACJA DANYCH POMIAROWYCH

Wraz z modulem USB producent dostarcza pakiet sterowników pozwalających na swobodne wykorzystanie urządzenia we własnych programach tworzonych w środowisku Visual Basic, Visual C++, Visual C#, Delphi, C++ Builder oraz LabVIEW (jedynie dla systemów operacyjnych Windows 2000/XP/Vista). Przed podłączeniem modułu do komputera, zainstalowano menedżer urządzeń (Advantech Device Manager), sterownik oraz pakiet bibliotek dll.

Pakiet firmowy bibliotek *dll* stawia użytkownikowi do dyspozycji szereg funkcji związanych z możliwością realizacji dostępu do modułu, np. w najprostszym przypadku, aby wykonać pojedynczy pomiar analogowy, należy skorzystać z funkcji: wyboru urządzenia, jego otwarcia, pobrania wartości analogowej, dla której parametrem jest numer kanału i zakres wejściowy. W przypadku konieczności skanowania wejść analogowych z dużymi częstotliwościami, struktura programu staje się bardziej rozbudowana.

Do archiwizacji danych służy firmowa aplikacja *Wavescan*, pozwalająca na zapis danych do pliku tekstowego oraz wygenerowania przebiegu graficznego (rys. 6).

Firmowa aplikacja *Wavescan* nie spełniała jednak wymaganych założeń dla projektowanego systemu diagnostycznego i bezpośrednie korzystanie z niej przy archiwizacji danych okazało się mało efektywne ze względu na przygotowanie danych i ich dalszą analizę.



Rys. 6. Przykładowy przebieg graficzny wygenerowany za pomocą aplikacji *Wavescan*

W aplikacji *Wavescan* dane pomiarowe zostają zapisane automatycznie do pliku *wsp* i mogą być odczytywane jedynie przez tę aplikację. W kolejnym kroku należy je przekonwertować i zapisać do pliku *xlt*, którego format umożliwia wczytywanie tych danych do plików programu Microsoft Office Excel. Taki sposób zapisu w znacznym stopniu wydłuża procedury i dlatego bardzo ważnym etapem pracy było zaprojektowanie własnej, dedykowanej aplikacji do archiwizacji danych

z możliwością ich zapisu w formacie *xlt* bezpośrednio wykorzystywanego w autorskim oprogramowaniu.

Eliminuje to konieczność korzystania z aplikacji *Wavescan*, aby zapewnić wymaganą szybkość działania systemu diagnostycznego, która pozwala na korzystanie z pakietów w opcji *on-line* oraz zastosowanie dowolnego sprzętu komputerowego do analizy diagnostycznej układu wirującego.

Te uwarunkowania spowodowały, że została zaprojektowana własna aplikacja archiwizacji danych *Diagscan*, którą zaimplementowano w przygotowanym oprogramowaniu diagnostycznym. Do tego celu wykorzystano zestaw funkcji *ActiveX* z pakietu *ActiveDAQ*, udostępnionego przez producenta sprzętu, będący nakładką na zestaw funkcji bibliotecznych *dll*.

Zbieranie i rejestrowanie danych analogowych można było realizować po zaimplementowaniu w programie diagnostycznym funkcji *axAICtrl* umożliwiającej poprawną komunikację aplikacji diagnostycznej z wykorzystywanym interfejsem USB-4716.

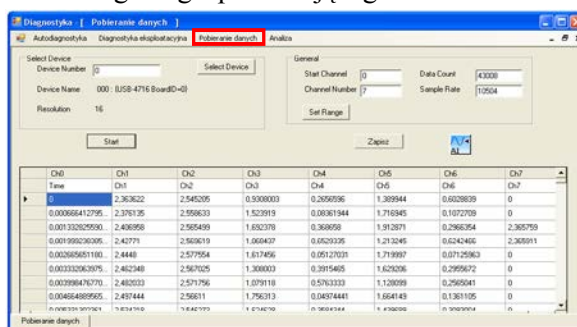
Na bazie funkcji *axAICtrl* przygotowany został program umożliwiający pobieranie danych z kanałów pomiarowych oraz ich zapis dla celów późniejszej analizy pracy układu wirującego z łożyskiem magnetycznym w opcji ANALIZA.

6. POBIERANIE DANYCH

Bardzo ważnym etapem pracy, z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania systemu diagnostycznego, był odpowiedni dobór parametrów wejściowych danych niezbędnych do analizy. Wykonano szereg wstępnych badań eksperymentalnych, które pozwoliły sprawdzić, przy jakich nastawach: częstotliwość próbkowania, liczba zebranych próbek, zakres danych wejściowych, wyniki analizy spełniają założone wymagania.

Rozpoczynając pracę z systemem użytkownik wybiera pole POBIERANIE DANYCH i uzyskuje dostęp do okna dialogowego pozwalającego na zdefiniowanie urządzenia (*Select Device*) oraz definiowanie parametrów zbierania danych w postaci:

- liczby kanałów pomiarowych (*Start Chanel*, *Chanel Number* – wybór kanału początkowego oraz ich liczba),
 - liczby próbek (*Data Count*),
 - częstotliwości próbkowania (*Sample Rate*)
- Możliwość definiowania parametrów



Rys. 7. Definiowanie parametrów pobierania danych

pobierania danych można dopasować do zróżnicowanych potrzeb użytkownika i obiektu, ponieważ system jest dostosowany do współpracy z różnymi wariantami stanowisk badawczych układów wirujących z aktywnym łożyskiem magnetycznym.

W pierwszej kolumnie rejestrowanych plików zapisywany jest czas wykonywania pomiaru, który wyliczany jest na podstawie zadeklarowanej częstotliwości próbkowania, kolejne kolumny zawierają dane rejestrujące przemieszczenia wału X , Y , prądy w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów I_{XT} , I_{XB} , I_{YT} , I_{YB} oraz częstość obrotów n wirującego wału.

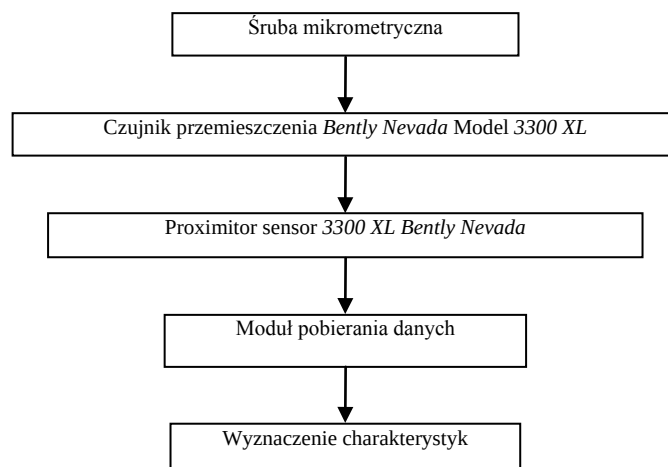
Opcja Start uruchamia procedurę rejestracji danych, które mogą zostać zapisane do pliku *xlt* (opcja *Zapisz*). Można się odwoływać do nich ze wszystkich innych poziomów, dostępnych w modułach diagnostycznych. Format zapisu jest również bezpośrednio odczytywany przez program Microsoft Office Excel.

Z pakietu POBIERANIE DANYCH można korzystać także opcjonalnie, gdy operator chce rejestrować wszystkie dane pomiarowe transmitowane do systemu diagnostycznego przy realizacji pakietu AUTODIAGNOSTYKA lub DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA. Służą one do analizy *off-line* parametrów układu wirującego w różnych fazach jego pracy.

7. WZORCOWANIE TORÓW POMIAROWYCH

Przebiegi czasowe wielkości rejestrowanych w zaprojektowanym systemie diagnostycznym: przemieszczenia wału w osiach sterowania X , Y , oraz prądy w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów I_{XT} , I_{XB} , I_{YT} , I_{YB} stanowiły bazę do opracowania pozostałych form prezentacji wyników jak np.: dekrement tłumienia, portret fazowy, trajektoria, siła reakcji magnetycznej. Dlatego wierna rejestracja ich przebiegów czasowych *on-line* i możliwość ich odtwarzania *off-line* była warunkiem poprawności działania systemu diagnostycznego. W tym celu torzy pomiarowe przemieszczenia w obu osiach sterowania oraz prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska należało wywzorcować. Celem wzorcowania było wyznaczenie rzeczywistych relacji między wartościami napięcia mierzonymi przez przygotowany do celu współpracy z systemem diagnostycznym moduł akwizycji danych a zadanymi wartościami przemieszczenia, które mieściły się w zakresie luzu łożyska magnetycznego. Wiropądowe czujniki przemieszczenia czopa łożyska firmy Bently Nevada montowane były w specjalnym uchwycie i za pomocą śruby mikrometrycznej zadawano wzorcowe wartości tego przemieszczenia. Napięcia wyjściowe rejestrowano w torze pomiarowym za pośrednictwem przygotowanego modułu pobierania danych, aby zachować warunki wzorcowania porównywalne z torem transmisji danych przy normalnej pracy systemu łożyskowego i realizacji funkcji diagnostycznych.

Na rys. 8 przedstawiono schemat blokowy metodyki przeprowadzonego wzorcowania dla czujników przemieszczenia.



Rys. 8. Schemat toru transmisji danych przy wzorcowaniu czujników przemieszczenia

W wyniku wzorcowania uzyskano charakterystyki przemieszczenie-napięcie, wyznaczone dla dwóch wykorzystywanych w diagnostyce łożyska magnetycznego kanałów pomiarowych. Równania tych charakterystyk wprowadzono do odpowiednich procedur oprogramowania diagnostycznego, co zapewniło uzyskanie rzeczywistych wartości przemieszczenia rejestrowanych przez system diagnostyczny.

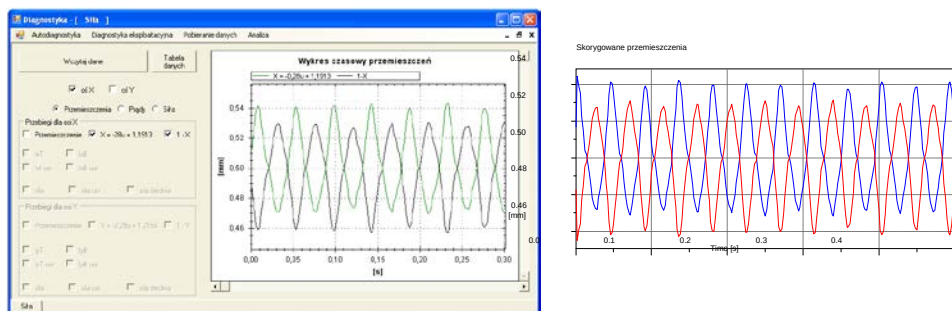
Do pomiaru prądów w uzwojeniach elektromagnesów wykorzystywane są hallotronowe przetworniki typu LEM, które na wyjściu dają sygnał napięciowy. Wzorcowanie torów pomiarów prądu pozwoliło stwierdzić, że współczynnik przetwarzania jest równy jedności, a więc zależność prąd – napięcie jest postaci:

$$I = k U_i, \text{ dla } k = 1A/V.$$

8. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI REJESTRACJI PRZEBIEGÓW CZASOWYCH

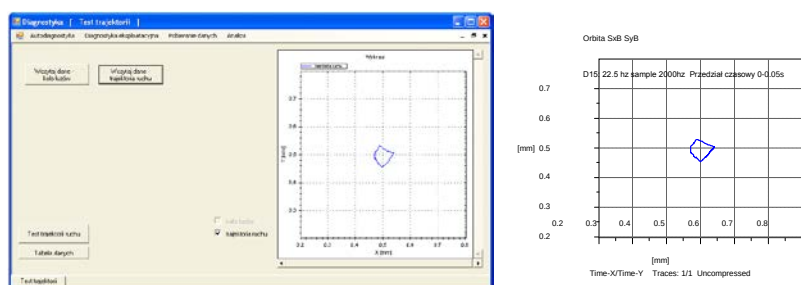
Po wprowadzeniu do procedur programowych charakterystyk przetwarzania, uzyskanych na drodze wzorcowania, torów pomiarowych przemieszczenia w osiach X, Y i prądów w uzwojeniach I_{XT} , I_{XB} , I_{YT} , I_{YB} dokonano weryfikacji poprawności rejestracji ich przebiegów czasowych.

Rys. 9 prezentuje analizę zarejestrowanych przebiegów przemieszczenia dla osi X oraz Y za pomocą systemu diagnostycznego (lewa część rysunku) i za pomocą systemu pomiarowego LMS TestXpress (prawa część rysunku), przy zachowaniu tych samych warunków rejestracji.



Rys. 9. Czasowy przebieg przemieszczenia dla osi X.
Obroty wału: 22,5 Hz, częstotliwość próbkowania: 500 Hz/kanal

Na rysunku 10 pokazano weryfikację przebiegu trajektorii układu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym złożonej z przemieszczeń dla osi X oraz Y.



Rys. 10. Trajektoria - obroty wału: 22,5 Hz, częstotliwość próbkowania: 2000 Hz/kanal,
przedział czasowy rejestracji: 0-0,05 s

Zamieszczone przykładowe rejestracje przebiegów przemieszczeń oraz trajektorii potwierdzają poprawność opracowanych procedur pomiarowych zastosowanych w zaprojektowanym systemie diagnostycznym. Pozwoliło to na realizację kolejnych procedur diagnostycznych zaprojektowanego systemu, umożliwiających analizę dekrementu tłumienia, portretu fazowego, FFT, siły reakcji magnetycznej.

9. PODSUMOWANIE

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. Kluczowym problemem jest zbieranie danych z torów

pomiarowych przemieszczenia w osiach X , Y i prądów w uzwojeniach I_{XT} , I_{XB} , I_{YT} , I_{YB} , które determinują poprawność działania systemu.

Zaprojektowany, zbudowany i zweryfikowany na rzeczywistych obiektach system diagnostyczny daje szerokie możliwości analizy poprawności funkcjonowania mechatronicznego układu wirującego przy wykorzystaniu opcji *AUTODIAGNOSTYKA* i *DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA*, w różnych fazach pracy, jakimi są: zawieszanie wału w łożysku, rozruch, wybieg, praca przy nominalnej częstotliwości obrotów.

Zbudowane w skali rzeczywistych układów wirujących stanowiska laboratoryjne mają swoje zastosowanie praktyczne, np. do:

- diagnostyki maszyn przepływowych z aktywnymi łożyskami magnetycznymi
- sterowania drganiami wiotkich wałów maszyn z wykorzystaniem pomocniczej podpory magnetycznej
- 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.

LITERATURA

- [1] SCHWEITZER G., MASLEN E.H., *Magnetic Bearings. Theory, Design and Application to Rotating Machinery*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2009).
- [2] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., KOWALCZUK Z., CHOLEWA W., *Diagnostyka procesów*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, (2002), (in Polish).
- [3] KOZANECKA D., *Vibrations Control of the Shaft Line of the Turbomachinery Supported in Active Magnetic Bearings*, Final report on the project no. 4 T10B 044 23, (2005), 153 p. (in Polish)
- [4] GIZELSKA M., *Koncepcja diagnozowania systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym*, XXXIV Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Górka (2007).
- [5] GIZELSKA M., KOZANECKA D., *Oprogramowanie diagnostyczne systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym*, Ciepłe Maszyny Przepływowe - Turbomachnery, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 1001 (2007) Łódź, 39-50.
- [6] GIZELSKA M., KOZANECKA D., KOZANECKI Z., *Integrated Diagnostics of the Rotating System with an Active Magnetic Bearing*, Solid State Phenomena, Vol. 147-149, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland ISSN 1012-0394 (2009) 137-142 (Online available since 2009/Jan/06, at <http://www.scientific.net>).
- [7] GIZELSKA M., *Diagnostics of the Rotating System with an Active Magnetic Bearing*, PhD Dissertation (in Polish), Insitute of Turbomachinery, Technical University of Łódź, (2011).
- [8] KOZANECKA D., *Diagnostics of Rotating Machinery Mechatronic System* (in Polish), Monographic Series of Publications: Maintenance Problems Library, Scientific Publishing House of Institute for Sustainable Technologies in Radom, ISBN 978-83-7204 966-7 (2010).