

Dr hab. inż. Dorota Kozanecka, prof. PŁ
Inż. Andrzej Kaczmarek
Instytut Maszyn Przepływowych
Politechnika Łódzka

OPROGRAMOWANIE TESTOWO - WIZUALIZACYJNE SYSTEMU AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

Streszczenie: Cyfrowa technika stosowana obecnie w nowoczesnych rozwiązaniach układów pomiarowo – sterujących aktywnego łożyskowania magnetycznego maszyn oferuje duży potencjał możliwości diagnostycznych elementów struktury systemu. W pracy przedstawiono autorskie oprogramowanie testowo – wizualizacyjne systemu, które stanowi czytelne i łatwe w obsłudze narzędzie wykorzystywane na odpowiednich etapach projektowania oraz w fazie rozruchu i badań systemu aktywnego łożyskowania wirnika rzeczywistej maszyny.

VISUAL - TEST APPLICATION SOFTWARE OF ACTIVE MAGNETIC BEARING SYSTEMS

Abstract: An application of digital techniques in modern measurement and control systems for active magnetic bearings of machines gives wide diagnostic capabilities of their elements. A visual – test application software developed by the authors of the present paper, which is a tool in designing, start-up and testing phases of rotor with active magnetic bearing systems of real machines, is discussed.

1. WPROWADZENIE

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. Do ich realizacji potrzeba zarówno komponentów mechanicznych i elektronicznych, specjalistycznego oprzyrządowania pomiarowego, układów sterujących, układów wykonawczych a także odpowiednio dostosowanych technik informatycznych, które poprzez właściwe oprogramowanie pozwalają na wzajemną współpracę tych komponentów.

Mechatronika w dziedzinie konstruowania systemów i urządzeń jest ukierunkowana na osiągnięcie optymalnej równowagi między podstawową strukturą mechaniczną i jej całkowitym sterowaniem. Jest ona widziana jako synergiczna integracja inżynierii mechanicznej z elektroniką i inteligentnym sterowaniem komputerowym [2].

Przykładem systemu mechatronicznego, który znalazł zastosowanie w budowie maszyn jest aktywne magnetyczne podparcie wirnika. Jest to technologia jakościowo różna

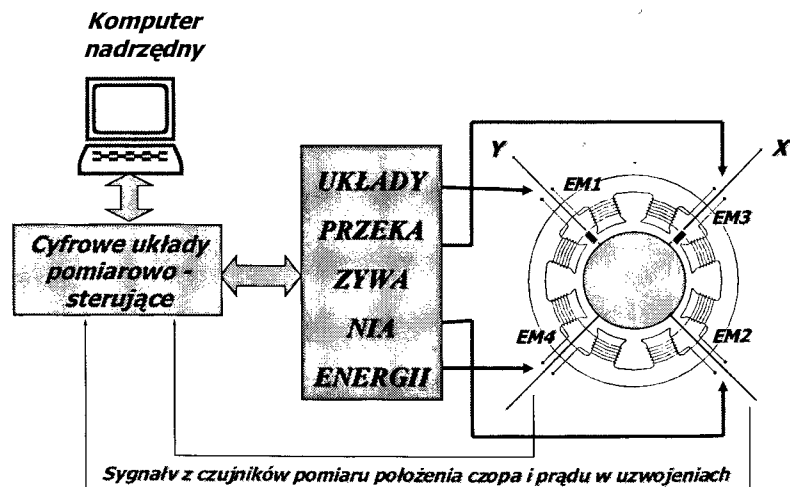
w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami łożyskowania. Jej cechą charakterystyczną jest bezkontaktowe zawieszenie wirnika maszyny w polu generowanym przez elektromagnesy, które spełniają rolę panwi. Osiąga się to poprzez układ automatycznej regulacji, w którym sprzężenie zwrotne jest realizowane na bazie sygnałów przemieszczenia określających w czasie rzeczywistym położenie czopa względem panwi [1,10].

2. ARCHITEKTURA SYSTEMU ŁOŻYSKOWANIA MAGNETYCZNEGO

W mechatronicznym systemie aktywnego łożyska magnetycznego współpracują dwa zasadnicze komponenty:

- mechaniczny, który stanowi czop łożyska i panew z uzwojeniami,
- elektroniczny, który stanowią czujniki pomiaru położenia czopa względem panwi, czujniki pomiaru prądu w uzwojeniach elektromagnesów, regulatory oraz układy przekazywania energii (wzmacniacze mocy).

Wzajemna współpraca ich wymaga opracowania odpowiedniego algorytmu sterowania oraz programu dla układów pomiarowo-sterujących. Sterowanie pracą systemu łożyskowego i nadzorowanie poprawności jego funkcjonowania odbywa się zgodnie z zaprogramowanym cyklem pracy układów pomiarowo-sterujących.



Rys. 1. Schemat systemu aktywnego łożyska magnetycznego – łożysko poprzeczne

Mechaniczną, a dokładniej mechaniczno-elektryczną strukturę poprzecznego łożyska magnetycznego tworzy czop oraz panew z czterema parami elektromagnesów równomiernie rozłożonymi na obwodzie. Położenie czopa względem panwi jest kontrolowane za pomocą czujników przemieszczenia. Są one montowane w dwu osiach regulacji X , Y wzajemnie prostopadłych. Osie sterowania współpracują z odpowiednimi parami elektromagnesów (rys. 1).

- oś sterowania Y , z dwiema parami elektromagnesów - górną $EM1$ i dolną $EM2$
- oś sterowania X , z dwiema parami elektromagnesów - górną $EM4$ i dolną $EM3$.

Zmiana położenia wału względem zadanej pozycji uruchamia w systemie elektronicznego sterowania regulację prądu przepływającego przez uzwojenie panwi łożyska. Efektem regulacji jest zmiana sił oddziaływania elektromagnesów sprowadzająca wał do zadanego położenia. Odpowiednia wartość prądu jest generowana przez elektroniczne układy wykonawcze na podstawie sygnału wypracowanego przez regulator zgodnie z zadaniem algorytmem sterowania w funkcji aktualnego położenia wału.

Pełny układ podparcia wału realnej maszyny musi zawierać co najmniej dwa łożyska poprzeczne i jedno łożysko wzdłużne, a więc w przypadku aktywnego zawieszenia magnetycznego system wymaga pięciu osi pomiaru położenia i sterowania – po dwie dla każdego łożyska poprzecznego X, Y oraz U, V i jedną dla łożyska wzdłużnego Z .

Każda para elektromagnesów łożyska współpracuje z elektronicznym układem przekazywania energii, a więc dla pełnego systemu aktywnego zawieszenia wirnika maszyny trzeba zbudować 10 takich układów. Informacja o przemieszczeniach wału w każdej osi sterowania przekazywana jest do układów pomiarowo-sterujących, które na ich podstawie wypracowują odpowiednie sygnały dla układów elektronicznych, a te przetwarzają je na sygnały sterujące prądami w uzwojeniach elektromagnesów łożysk. Generowane przez prądy, zmienne siły wzdłuż każdej osi sterowania powodują utrzymanie wirnika maszyny w zadanej pozycji równowagi [1,9,10].

3. OPROGRAMOWANIE SYSTEMU ŁOŻYSKOWEGO

Przy projektowaniu klasycznych układów mechanicznych rozważa się problem od strony analizy, np., jakie ruchy wykonuje ciało, gdy działa na nie siła, a jego ruch jest ograniczony przez więzy. Projektowanie systemów mechatronicznych wymaga odwrotnego postawienia zagadnienia, tzn., jakie siły należy wywierać na ciało, aby wykonywało ono określony ruch? Przy tym ruch ten ma się odbywać również przy występujących zakłóceniach. Przez odwrócenie pytania przechodzi się do problemu syntezy, który jest filozofią projektowania właściwą dla systemów mechatronicznych. W projektowaniu urządzeń mechatronicznych, zaczynając od fazy koncepcyjnej dąży się do przestrzennie i funkcjonalnie zintegrowanego systemu [2].

Problem ten dotyczy systemu aktywnego łożyskowania magnetycznego, bowiem filozofia projektowania jego komponentów musi zapewnić generowanie siły magnetycznej niezbędnej do uzyskania statecznej pracy łożyska, również w obecności zewnętrznych zakłóceń.

W rzeczywistym systemie łożyskowym, aby uzyskać właściwą współpracę wzajemnie powiązanych, poprzez odpowiednie oprogramowanie, komponentów: układów pomiarowo-sterujących, torów wykonawczych oraz struktury mechaniczno-elektrycznej łożyska (czopa i panwi) niezbędna jest znajomość ich charakterystyk. Na podstawie tych charakterystyk możliwe jest dokonywanie analizy czynników mających wpływ na generowanie sił magnetycznych, a więc na funkcjonowanie systemu. Taką filozofię podejścia do projektowania aktywnych łożysk magnetycznych przyjęto przy realizacji prac z tej dziedziny w Instytucie Maszyn Przepływowych PŁ [4,5,6,9].

Aby wypracować taką możliwość, na etapie projektowania systemu łożyskowego, niezbędne jest zastosowanie komputera nadrzędnego, który pozwala na komunikację online i dostęp do odpowiednich poziomów oprogramowania sterującego systemem.

Jest to technologia znana w praktyce jako technologia prototypowania, która, między innymi, daje możliwość szybkiej implementacji oraz modyfikacji algorytmów sterowa-

nia, charakteryzuje się także prostotą tworzenia warstw programowych w celu akwizycji danych pomiarowych i komunikacji z urządzeniami nadrzędnymi. Dodatkową jej zaletą jest skrócenie czasu projektowania i eliminacja błędów, które mogą pojawiać się na etapie uruchamiania prototypu. Taka technologia została opracowana i jest stosowana przy projektowaniu i konstrukcji sterowanych cyfrowo systemów aktywnych łożysk magnetycznych budowanych w IMP PŁ. Na bazie doświadczeń wynikających z wieloletniej pracy nad tą problematyką w fazie koncepcyjnej podjęto decyzję o konieczności opracowania autorskich programów narzędziowych dla komputera nadrzędnego systemu łożyskowego, które czynią czytelnym etap projektowania łożyska i fazę badań w ruchu modelowych maszyn z wirnikami podpartymi w aktywnych łożyskach magnetycznych [9].

4. ZAŁOŻENIA OPROGRAMOWANIA TESTOWO – WIZUALIZACYJNEGO

Głównym zadaniem, jakie spełnia opracowane oprogramowanie jest komunikacja *on – line* i wymiana danych między komputerem nadrzędnym i układem pomiarowo – sterującym łożyska. Oprogramowanie testowo – wizualizacyjne dla fazy projektowania i strojenia systemu łożyskowego a następnie badań w ruchu modelowej maszyny z wirnikiem podpartym w aktywnych łożyskach magnetycznych zostało przygotowane w środowisku *Windows*. System operacyjny *Windows* dostarcza niezbędnych elementów pozwalających aplikacjom na generowania *Graficznego Interfejsu Użytkownika – GUI* w celu zapewnienia interakcji użytkownika z aplikacją za pomocą grafiki.

W aplikacji *Windows GUI* składa się z elementów interfejsu wyświetlanych na ekranie monitora. Głównymi elementami są okna, okna dialogowe i obiekty sterujące. Atrybuty funkcjonalne przypisane tym elementom zostały z góry zdefiniowane przez system *Windows*. Aplikacja zwykle wyświetla w oknach swój tekst i grafikę. Okna dialogowe zawierają przeważnie obiekty sterujące, które wyświetlają niewielkie porcje informacji i pozwalają użytkownikowi wprowadzać nowe informacje.

System *Windows* zawiera bogaty zbiór gotowych obiektów a także zestaw funkcji *API – Application Programming Interface*, który jako interfejs do programowania aplikacji jest biblioteką funkcji napisanych w języku *C* należąca do systemu *Windows*. Przy jej wykorzystaniu zostały utworzone kolejne biblioteki takie, jak *MFC – Microsoft Foundation Class*. *MFC* zapewnia łatwiejsze w użyciu funkcje zawierające w sobie funkcje *API*. Język *C++* oparty o klasy tzn. wzorce dla tworzenia obiektów nie nadaje się do programowania małych procesorów o małych zasobach pamięci.

Stosując programowanie obiektowe korzysta się z *MFC – Microsoft Foundation Class*, zawierającego opisy różnych zdarzeń, które mogą być zrealizowane w tym programie. Jest to rodzaj biblioteki funkcji związanych z możliwościami systemu *Windows*. Zwykle do tego celu wykorzystuje się aplikacje z architekturą typu *dokument- widok*. Obiekt dokument przechowuje dane, obiekty widoku dane te prezentują. Elementami tworzącymi interfejs program – operator są okienka edycyjne, przyciski itp. Biblioteka *MFC* jest istotnym elementem kompilatora *Microsoft Visual C++*. Pozwala tworzyć programy zgodne ze wszystkimi aplikacjami systemu *Windows* [11].

Wykorzystując możliwości systemu operacyjnego *Windows*, oprogramowanie narzędziowe dla systemu łożyskowego zostało przygotowane w dwóch wersjach:

- 1 oprogramowanie testowo – wizualizacyjne dla łożyska poprzecznego,

- oprogramowanie testowo – wizualizacyjne dla pięcioosiowego systemu aktywnego magnetycznego podparcia układu wirującego maszyny.

4.1. Oprogramowanie testowo – wizualizacyjne dla łożyska poprzecznego

Cyfrowa technika stosowana obecnie w nowoczesnych rozwiązaniach układów pomiarowo – sterujących aktywnego łożyskowania magnetycznego maszyn oferuje duży potencjał możliwości diagnostycznych elementów struktury systemu.

Nie jest on jednak w dostatecznym stopniu wykorzystywany na etapie projektowania systemu łożyskowego, ponieważ analizę jego dynamiki zwykle sprowadza do wyznaczenia parametrów regulacji korzystając z metod i kryteriów, które wynikają z teorii sterowania. Jednak interpretacja parametrów dynamicznych wynikająca bezpośrednio z analizy układu automatycznej regulacji, szczególnie na etapie podejmowania decyzji o wyborze typu systemu łożyskowania maszyny, może być mało czytelna dla konstruktora - mechanika.

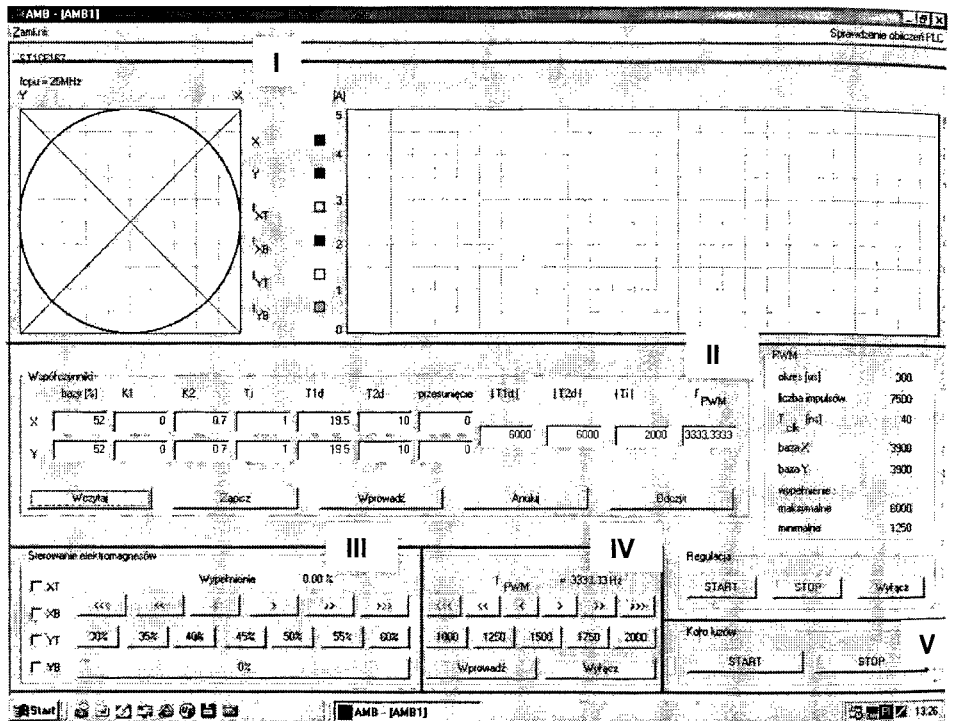
Na tym etapie realizacji pracy przyjęto jako główny cel opracowanie czytelnego i łatwego w obsłudze dla konstruktora, narzędzia inżynierskiego, które w środowisku *Windows* pozwala na wizualizację *on - line* chwilowych przebiegów – prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska, przemieszczenia w obu osiach sterowania oraz zadawanie parametrów regulatora i ich szybką zmianę z klawiatury bez potrzeby kompilacji i wprowadzania do pamięci procesora karty pomiarowo – sterującej.

Oprogramowanie pozwala na testowanie poszczególnych torów wykonawczych łożyska dla uzyskania charakterystyk *wypełnienie – prąd* oraz realizację procedury eksperymentalnego wyznaczania parametrów elektromagnesów panwi łożyska.

Charakterystyki *wypełnienie-prąd* są podstawowym źródłem informacji pozwalającym ocenić symetrię właściwości poszczególnych torów wykonawczych, która przy symetrii parametrów elektromagnesów przekładać się będzie na izotropowe właściwości zbudowanego łożyska.

Przy pracy z łożyskiem poprzecznym na ekranie monitora mamy do dyspozycji 5 głównych pól operacyjnych (rys. 2.):

- I. lewa strona pola - rejestracja *on-line* chwilowych wartości przemieszczeń w dwu osiach sterowania X i Y i złożona z tych przemieszczeń trajektoria ruchu czopa łożyska na tle koła luzów,
prawa strona pola - rejestracja *on-line* chwilowych wartości prądów dla obu osi sterowania X i Y w uzwojeniach elektromagnesów dolnych I_{XB} , I_{YB} i górnych I_{XT} , I_{YT} .
- II. pole, które pozwala na zmianę parametrów regulatora z klawiatury komputera i po ich wczytaniu zaimplementowanie do rzeczywistej struktury łożyska. Uruchomienie systemu łożyskowego następuje po wciśnięciu przycisku *START*. Wyłączenie *STOP* lub *WYŁĄCZ*. W prawej części pola wyświetlane są dane impulsów *PWM* dla zadanej częstotliwości sterującej i zadanych parametrów regulacji, a także wprowadzone programowo wartości ograniczeń dla maksymalnego i minimalnego wypełnienia, które ograniczają maksymalną i minimalną wartość prądu w elektromagnesach panwi,
- III. pole, które pozwala na wysterowanie poszczególnych elektromagnesów łożyska impulsami o zadawanej z klawiatury wartości wypełnienia. To pole operacyjne pozwala na wyznaczanie charakterystyk *wypełnienie-prąd* oraz stałych elektromagnesów w układzie otwartym tzn. bez sprzężenia z układem sterującym poprzez pomiar przemieszczenia,

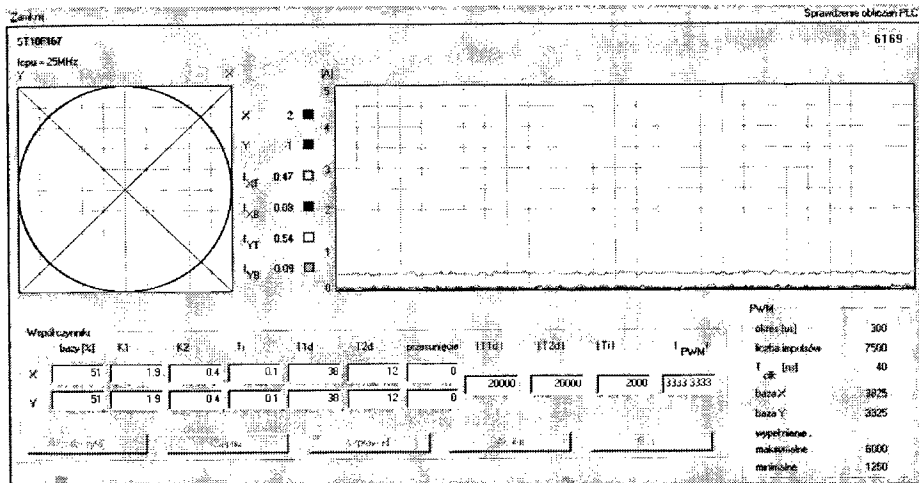


Rys. 2. Widok ekranu komputera przy pracy z łożyskiem poprzecznym

- IV. pole pozwalające na wprowadzanie z klawiatury zadanej wartości częstotliwości impulsów sterujących *PWM*. Daje to możliwość wyznaczania charakterystyk *wypełnienie-prąd* oraz stałych poszczególnych torów wykonawczych dla różnych częstotliwości *PWM*,
- V. pole do realizacji procedury automatycznego obtaczania czopa w panwi łożyska dla uzyskania rzeczywistego koła luzów.

Poszczególne pola na ekranie komputera monitorujące pracę rzeczywistego systemu łożyskowego wykorzystywane są na różnych etapach budowy systemu łożyskowego. W pierwszym etapie konstrukcji systemu łożyskowego projektuje się i buduje trzy zasadnicze elementy składowe (rys. 1): układy pomiarowo-sterujące, układy przekazywania energii i strukturę mechaniczno-elektryczną łożyska tzn. czop i panew, dla zadanych parametrów technologicznych takich jak: nośność oraz stojące do dyspozycji w rzeczywistej maszynie wymiary geometryczne. Ostatni etap wymaga sprzężenia tych elementów w jedną całość, aby mogły działać wspólnie, zgodnie z przyjętymi założeniami. Do sprzężenia w poprawnie funkcjonujący system łożyskowy niezbędne jest zrealizowanie etapu pośredniego, który, pozwala między, innymi na wykonanie charakterystyk elementów wykonawczych *wypełnienie – prąd*, aby ocenić symetrię ich działania a także dokonać eksperymentalnej weryfikacji stałych poszczególnych elektromagnesów łożyska. W pracy [9] przedstawiono metodykę wyznaczania tych charakterystyk, przykładowe przebiegi oraz ich interpretacja z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania systemu łożyskowego.

Oprogramowanie narzędziowe oraz procedury metrologiczne z tym związane zostały tak przygotowane, aby stworzyć, czytelne kryteria oceny możliwości sterowania drganiami linii wału energetycznej maszyny przepływowej podpartej w aktywnych łożyskach magnetycznych.



Rys. 3. Widok górnej części ekranu komputera w pierwszej fazie pracy systemu łożyska poprzecznego

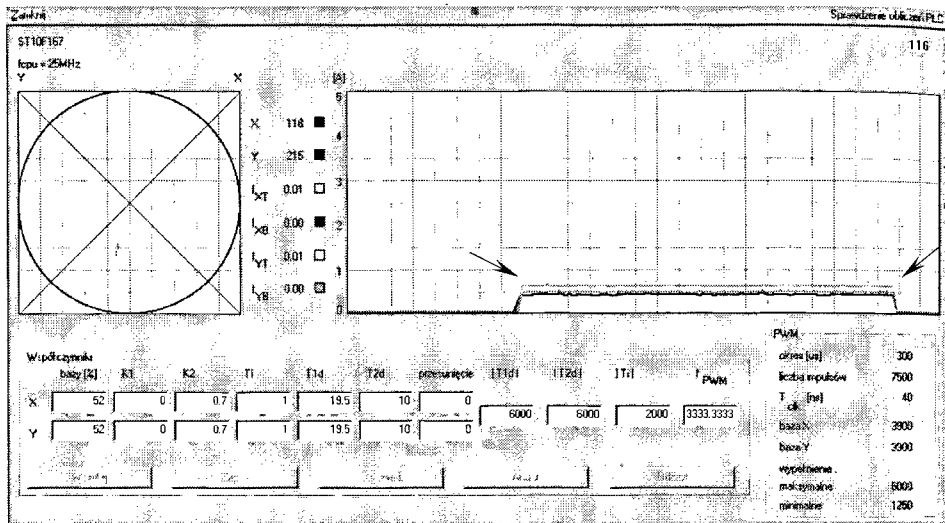
Na rys. 3. pokazano widok ekranu z zarejestrowanymi przebiegami chwilowych wartości prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska poprzecznego w pierwszej fazie pracy łożyska tzn. po zawieszeniu czopa w panwi dla zadanych wartości współczynników regulatora sterującego pracą łożyska. Z lewej strony widoczny jest układ rejestrujący położenie czopa względem panwi (trajektorię ruchu). Zmiana parametrów regulacji powoduje zmianę dynamiki systemu łożyskowego, poprzez zmianę wartości prądów generowanych w elektromagnesach łożyska. Na rys. 4. pokazano widok ekranu z zarejestrowanymi wartościami prądów dla innych wartości współczynników regulatora sterującego oraz momenty załączania i wyłączenia układu sterującego łożyska.

Wywołując zmianę danych – wysyła się do sterownika polecenie wykonania określonej procedury (np. wprowadzenia nowego zestawu parametrów regulacji, zmiany częstotliwości impulsów PWM lub wprowadzenia nowych wartości ograniczeń) i w bloku danych karty pomiarowo-sterującej wstawiany jest nowy zestaw współczynników czy parametrów regulacji i praca systemu jest realizowana dla zmienionych ich wartości.

W ten sposób można także modyfikować algorytm regulacji.

Porównując rys. 3 oraz 4 i zarejestrowane przebiegi prądów w czterech elektromagnesach łożyska pracującego przy nieruchomym wirniku, widać różnicę w wartościach tych prądów spowodowane różnymi wartościami parametrów regulatora.

Jest więc możliwość zadawania parametrów regulacji dla rzeczywistej struktury łożyska, obserwując jednocześnie efekty tych zmian, co ma bardzo istotne znaczenie, również dydaktyczne.



Rys. 4. Widok górnej części ekranu komputera w pierwszej fazie pracy systemu łożyska poprzecznego - inne parametry regulacji

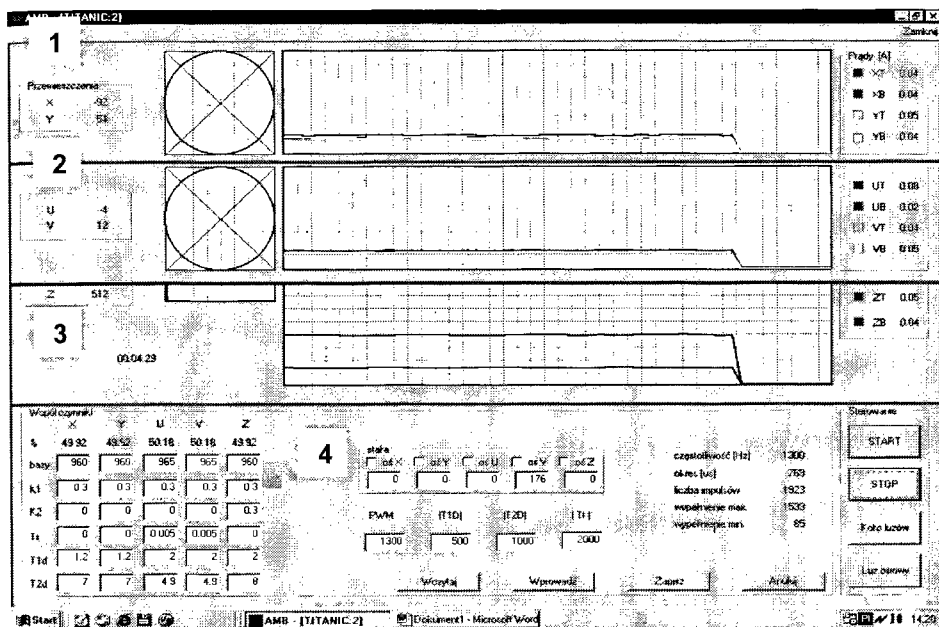
Program jest przyjazny dla użytkownika, łatwy w obsłudze a efekty wprowadzanych zmian są rejestrowane *on-line* i dostępne bezpośrednio do interpretacji.

4.2. Oprogramowanie testowo – wizualizacyjne dla pięcioosiowego systemu aktywnego magnetycznego podparcia układu wirującego maszyny

Pięcioosiowy system podparcia układu wirującego maszyny wymaga oprogramowania wizualizacyjnego, które jest nieco inne niż dla pojedynczego łożyska. Istotną różnicą, w formie prezentacji wyników, jest widok ekranu komputera, na którym w poszczególnych oknach są rejestrowane *on-line* przemieszczenia i prądy w torach wykonawczych każdego z łożysk: dwu poprzecznych i wzdłużnego oraz trajektorii ruchów czopa w łożyskach poprzecznych.

Na ekranie komputera, po załączeniu systemu ukazuje się widok (rys. 5), na którym wydzielić można 4 główne pola operacyjne:

1. łożysko poprzeczne – osie sterowania X, Y
 - lewa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości przemieszczeń w dwu osiach sterowania X i Y i złożona z tych przemieszczeń trajektoria ruchu czopa łożyska na tle koła luzów,
 - prawa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości prądów dla obu osi sterowania X i Y w uzwojeniach elektromagnesów dolnych I_{XB}, I_{YB} i górnych I_{XT}, I_{YT} .
2. łożysko poprzeczne – osie sterowania U, V
 - lewa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości przemieszczeń w dwu osiach sterowania U i V i złożona z tych przemieszczeń trajektoria ruchu czopa łożyska na tle koła luzów,
 - prawa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości prądów dla obu osi sterowania U i V w uzwojeniach elektromagnesów dolnych I_{UB}, I_{VB} i górnych I_{UT}, I_{VT} .



Rys. 5. Widok ekranu komputera do sterowania pięcioosiowym systemem aktywnego łożyskowania wirnika z zarejestrowanym momentem wyłączenia sterowania

3. łożysko wzdłużne – oś sterowania *Z*
 lewa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości przemieszczeń w osi *Z* na tle całkowitego luzu łożyska wzdłużnego,
 prawa strona – rejestracja *on-line* chwilowych wartości prądów w uzwojeniu elektromagnesu I_{ZB} i I_{ZT} dla osi sterowania *Z*,
4. pole, które pozwala na zmianę współczynników w algorytmie regulacji oddzielnie dla każdej osi łożyska. Po wczytaniu zostają one zaimplementowane do układów regulacji poszczególnych osi łożysk. Uruchomienie sterowania systemem łożyskowym następuje po wciśnięciu przycisku *START*. Przycisk *STOP* wyłącza sterowanie. W środkowej części pola operacyjnego 4 wyświetlane są dane impulsów *PWM* dla zadanej częstotliwości sterującej i zadanych parametrów regulacji, a także wprowadzone programowo wartości ograniczeń dla maksymalnego i minimalnego wypełnienia, które ograniczają maksymalną i minimalną wartość prądu w elektromagnesach panwi.
 Istnieje także opcja programowego wprowadzania przemieszczenia dla poszczególnych osi (*STAŁA* – oś *X, Y, U, V, Z* - zadany ekscentryzm) oraz realizować procedury automatycznego obtaczania czopa w panwi dla każdego łożyska poprzecznego dla uzyskania rzeczywistego koła luzów oraz sprawdzenia rzeczywistego luzu osiowego w łożysku wzdłużnym.

Na rys. 5. pokazano widok ekranu obrazującego pracę pięcioosiowego systemu łożyskowego maszyny (pionowy nieruchomy wirnik). Zarejestrowane prądy w poszczególnych elektromagnesach obu łożysk poprzecznych mają zbliżone wartości. Łożysko wzdłużne pracuje pod obciążeniem związanym z masą wirnika, ponieważ wirnik maszyny jest pionowy. Dlatego na ekranie dla osi *Z* widoczna jest różnica w wartościach

prądów elektromagnesów łożyska wzdłużnego, które generują siły niezbędne do lewitacji w polu elektromagnesów. Zarejestrowano także moment wyłączenia sterowania systemem łożyskowym maszyny.

5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane, autorskie oprogramowanie testowo – wizualizacyjne stanowi czytelne i łatwe w obsłudze narzędzie inżynierskie a także badawcze, które jest wykorzystywane na odpowiednich etapach projektowania oraz w fazie rozruchu i badań systemu aktywnego łożyskowania wirnika rzeczywistej maszyny.

Ma ono również bardzo istotne znaczenie dydaktyczne, ponieważ poprzez wizualizację *on - line* wartości prądów w uzwojeniach elektromagnesów, przemieszczeń czopa względem panwi oraz trajektorii ruchu czopa pozwala wyjaśnić mechanizm działania systemu łożyskowego studentom Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej a także inżynierom pracującym w przemyśle w ramach organizowanych przez IMPPŁ kursów i studiów podyplomowych. Są oni zapoznawani z ta niekonwencjonalną technologią łożyskowania w czasie zajęć laboratoryjnych.

LITERATURA

1. Gosiewski Z., *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Sterowanie i badanie* cz. II Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa Warszawa (1999).
2. Heimann B., i inni, *Mechatronika Komponenty Metody Przykłady*, PWN 2001.
3. Kozanecka, D., Dynamics of the Flexible Rotor with an Additional Active Magnetic Bearing, *Machine Dynamics Problems*, Warsaw, Vol. 25, No. 2, (2001), pp. 21-38.
4. Kozanecka D., Kozanecki Z., Lech T., Modelling the Dynamics of Active Magnetic Bearing Actuators, *Proc. World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 2001*, July 22-25, USA, Vol. IX, Indust. Parts I (2001), pp. 232-235.
5. Kozanecka, D., Kozanecki, Z., Lech, T., Theoretical and Experimental Investigation of Dynamics of the Flexible Rotor with Active Magnetic Bearings, *Advances in Vibration Engineering*, @Universities Press (India), 1(4) (2002), pp. 412-422.
6. Kozanecka, D., Kozanecki, Z., Lech, T., Świder, P., New Concept of the Spin Test System with Active Magnetic Bearings, *Proc. of the 2nd Int. Symp. on Stability Control of Rotating Machinery*, Bently Nevada Corp., August 4-8 (2003), pp. 199-208.
7. Kozanecka, D., Kozanecki, Z., Lech, T., Kaczmarek A., Identification of the External Load of the Rotating Shaft Supported in Active Magnetic Bearings, *Proc. 7th Conf. on Dynamical Systems Theory and Applications*, Łódź, December 8-11, Vol II (2003), pp. 797-804.
8. Kozanecki Z., Kozanecka D., Application of Unconventional Bearings in Modern Turbomachinery, *State of the Art on Gas Turbine Research in Poland (CAME-GT)*, Nov. (2003), pp. 73-82.
9. Kozanecka D., Sterowanie drganiami linii wału energetycznej maszyny przepływowej podpartej w aktywnych łożyskach magnetycznych, *Raport końcowy grantu KBN nr 4 T10B 04423*, (2005), pp. 153.
10. Schweitzer G., Traxler A., Bleuler H., *Magnetlager*, Springer-Verlag, Berlin, (1993).
11. Wodtke S., *C++ Klasy MFC*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa (1998).