

## Możliwości diagnostyczne systemów aktywnego magnetycznego zawieszenia wirników maszyn

*Streszczenie: Zastosowanie łożysk magnetycznych jako układów podparcia wirników maszyn stwarza dodatkowe, niespotykane w klasycznych rozwiązaniach łożyskowania, możliwości diagnostyczne. Wynikają one z faktu, że aktuator generuje siłę działającą na wirnik, która może być m. in. funkcją luzu oraz prądu w uzwojeniach elektromagnesu. W pracy przedstawiono i scharakteryzowano rodzaje układów sterujących stosowane w systemach aktywnego łożyskowania magnetycznego wirników oraz związane z nimi możliwości diagnostyczne stanu pracy maszyny.*

### Diagnostic Capabilities of the Rotating Systems Suspended in the Active Magnetic Bearings

*Abstract: Application of the magnetic bearings as a system of the rotors suspensions gives supplementary, unparalleled in classic solution, diagnostic capabilities. This capability stems from the fact that the magnetic actuator component produces a force acting on the shaft which depends primarily on clearance within the actuator and its electromagnet coil currents. Starting with a general model of an AMB-system, the basic ideas of various control concepts for active magnetic bearings are discussed in the paper. The final part describes the possibility of the bearing as a measurement device.*

#### 1. WPROWADZENIE

Przetwarzaniu energii w maszynach wirnikowych towarzyszą zjawiska, które powodują dodatkową dysypację energii, zakłócają proces technologiczny, obniżają trwałość elementów maszyny, a niekiedy prowadzą nawet do zniszczenia konstrukcji. Są to na przykład przecieki wewnętrzne i zewnętrzne czynnika roboczego, drgania synchroniczne i samowzbudne wirników oraz chwilowe skoki amplitudy drgań związane z przechodzeniem częstości krytycznych struktury wirnik - łożyska - fundament.

Wynikają one z niesymetrii układu wirującego, ze zjawiska sprzęgania się różnych postaci drgań a także ze zmiennych w czasie parametrów dynamicznych maszyny. Zagadnienia te dotyczą szczególnie maszyn pracujących w skrajnych temperaturach oraz w warunkach stawiających konstrukcji specjalne wymagania np. maszyn przepływowych stosowanych w przemyśle kriogenicznym do transportu ciekłych gazów i ich skraplania lub w przemyśle chemicznym do realizacji procesów technologicznych wymagających absolutnej czystości czynnika roboczego maszyny.

Przenoszenie sił pomiędzy wirnikiem i nieruchomymi elementami maszyny odbywa się za pośrednictwem łożysk, a więc problem łożyskowania jest problemem podstawowym dla dynamiki maszyn wirnikowych.

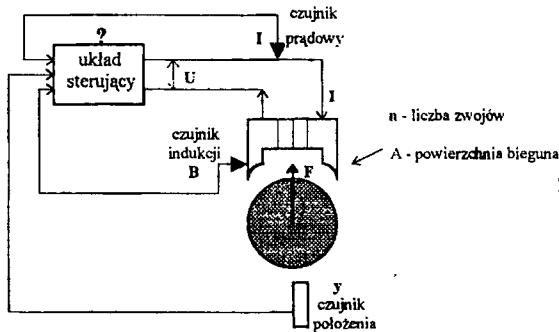
W konstrukcjach nowoczesnych maszyn wirnikowych w ostatnich latach coraz szersze praktyczne zastosowanie znajdują nowe rozwiązania łożyskowania. Należą do nich łożyska magnetyczne, które umożliwiają aktywne sterowanie drganiami wirnika maszyny wyposażonej w takie łożyska [2,3,5]. W ostatnich latach obserwuje się aktywne łożyskowanie magnetyczne wirników maszyn stosowanych w wielu dziedzinach techniki. Należą do nich przede wszystkim maszyny przepływowe (sprężarki, pompy, turbiny) oraz elektrowrzeciona stosowane w konstrukcji obrabiarek (szlifierki, frezarki).

Eliminacja układu olejowego maszyny i związanych z nim uszczelnień i napędów pomocniczych oraz zmniejszenie o rząd strat tarcia w łożyskach jest często wystarczającym argumentem przemawiającym na korzyść łożysk magnetycznych.

Odmierna zasada działania łożysk magnetycznych w porównaniu z klasycznym ułożyskowaniem powoduje powstanie szeregu nowych, niespotykanych możliwości eksploatacyjnych i diagnostycznych maszyny.

## 2. RODZAJE UKŁADÓW STERUJĄCYCH AMB

Aktywne łożysko magnetyczne (Active Magnetic Bearing-AMB) pracuje w systemie składającym się z elementów wykonawczych (elektromagnesów) utrzymujących wirnik maszyny w zadanym położeniu równowagi, czujników pomiarowych kontrolujących to położenie oraz sterownika pracującego w pętli sprzężenia zwrotnego. Zadaniem sterownika AMB jest zapewnienie statecznej pracy wirnika podpartego w łożyskach magnetycznych w założonym zakresie zmian prędkości obrotowej maszyny. Osiągnięcie tego celu wiąże się, już na etapie projektowania, z wyborem rodzaju sterownika, który zapewni programową realizację wymagań stawianych układowi.



Rys. 1. Schemat systemu aktywnych łożysk magnetycznych

W budowie wirników podpartych w aktywnych łożyskach magnetycznych może być wykorzystywanych szereg koncepcji układów sterujących, które wynikają z podstawowych zależności opisujących zjawiska zachodzące w układzie wirnik-łożysko magnetyczne [1,2].

Siła magnetyczna generowana w polu elektromagnesu może być wyrażona jako funkcja napięcia U zasilającego uzwojenie, indukcji B w szczelinie, prądu I płynącego przez uzwojenie oraz położenia wirnika względem nieruchomego elektromagnesu y (rys. 1).

Jeśli rozpatrzy się jednorodne pole magnetyczne, wówczas zmiana energii tego pola w szczelinie w funkcji położenia wirnika określa siłę działającą na ferromagnetyczny czop łożyska. Przy założeniu, że histereza oraz efekty prądów wirowych i nasycenia są pomijalne jest ona wyrażona wzorem (1):

$$F = \frac{A B^2}{\mu_0} \quad (1)$$

w którym:  $B$  - indukcja w szczelinie [ $\text{Vs}/\text{m}^2$ ],  $A$  - powierzchnia bieguna [ $\text{m}^2$ ],  
 $\mu_0$  - przenikalność  $1.257 \cdot 10^6$  [ $\text{Vs}/\text{Am}$ ]

Korzystając z zależności określających strumień indukcji  $\phi$  w funkcji napięcia  $U$  uzyskuje się siłę  $F$  daną wzorem (2):

$$F = \frac{1}{An^2\mu_0} [\int U dt]^2 \quad (2)$$

w którym:  $A$  - powierzchnia bieguna [ $\text{m}^2$ ],  $n$  - liczba zwojów

Siłę generowaną wskutek przepływu prądu  $I$  w uzwojeniu elektromagnesu oraz w funkcji zmiany położenia wirnika  $y$  względem elektromagnesu (statora) wyraża wzór (3):

$$F = \frac{An^2\mu_0}{4} \left(\frac{l}{y}\right)^2 \quad (3)$$

Zależności (1), (2), (3) są nieliniowe i określają siłę magnetyczną dla jednego elektromagnesu. W rzeczywistym układzie łożyskowania elektromagnesy pracują w układzie różnicowym. Pozwala to, dla pewnych przypadków rozwiązań, na uzyskanie wypadkowej siły, która jest liniową funkcją napięcia lub indukcji, jeśli zastosuje się dodatkowe uzwojenie tzw. uzwojenie magnesowania wstępnego zasilane prądem  $I_0 = \text{const}$ . [1,2]

Dla układu różnicowego siła wyrażona funkcją prądu  $I$  zasilającego uzwojenie oraz wielkością szczeliny  $y$  pozostaje w dalszym ciągu nieliniowa. Do analizy przyjmuje się jej zlinearyzowaną postać dla małych zmian położenia wirnika względem elektromagnesów tzn. dla  $y \ll y_0$  oraz związanego z tym warunku  $I \ll I_0$ . Uzyskuje się wówczas zależność [2]:

$$F_{lin}(I, y) = k_y y + k_I I \quad (4)$$

w której:  $k_y = \frac{n^2 A \mu_0 I_0^2}{y_0^3}$ ,  $k_I = \frac{n^2 A \mu_0 I_0}{y_0^2}$

$y_0$  - nominalna wielkość szczeliny,  $k_y$  - sztywność przemieszczenia,  $k_I$  - sztywność prądowa.

Inny sposób sterowania systemem łożysk magnetycznych uzyskuje się rozpatrując zależności (1), (4), z których wynika następujący wzór:

$$y = \frac{2y_0^2}{n\mu_0 I_0} B - \frac{y_0}{I_0} I \quad (5)$$

Realizacja każdej z przedstawionych koncepcji układu sterującego, oprócz starannego doboru czujników pomiarowych o założonych właściwościach statycznych i dynamicznych, wymaga także zaprojektowania regulatora, który pozwoli na wygenerowanie w panwi łożyska wypadkowej siły oddziałującej poprzez elementy wykonawcze na czop w taki sposób, aby zapewnić wymaganą sztywność i tłumienie układu wirującego [1,2,3].

### 3. CHARAKTERYSTYKA ELEMENTÓW SYSTEMU ŁOŻYSKOWEGO

Łożysko magnetyczne może być wykorzystane w budowie maszyn z punktu widzenia zadań jakie może ono spełniać:

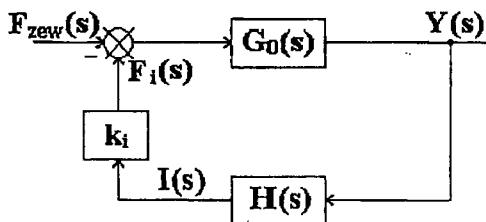
- do sterowania drganiami wirnika podpartego w klasycznych łożyskach (jako dodatkowe łożysko pozwalające na bezpieczne przejście układu wirującego przez prędkość krytyczną)
- do podparcia wirnika oraz aktywnego ograniczenia jego drgań
- jako narzędzie pomiarowe i diagnostyczne np. dla turbomaszyn. ponieważ znajomość obciążeń w łożyskach może być wykorzystana do określania sił hydrodynamicznych lub aerodynamicznych działających na wirnik.

Aby system aktywnych łożysk magnetycznych spełniał rolę narzędzia pomiarowego należy scharakteryzować własności metrologiczne poszczególnych jego elementów: Należą do nich:

- czujnik położenia określający pozycję wirnika zawieszzonego w polu magnetycznym,
- układ wykonawczy tzw. aktuator, który stanowi elektromagnes wraz ze wzmacniaczem mocy,
- układ sterujący, który determinuje wartość siły, jaką należy wygenerować w uzwojeniu, aby wirnik powrócił do pozycji równowagi.

Styczne i dynamiczne właściwości systemu łożyskowego są funkcją właściwości każdego z tych elementów a zmierzona wartość prądu w uzwojeniach wykonawczych zawiera informację o statycznych i dynamicznych obciążeniach wału siłami zewnętrznymi (p.2.).

Możliwość pomiaru reakcji w łożyskach dla każdego stanu pracy maszyny jest unikalną cechą aktywnego łożyskowania magnetycznego i ma podstawowe znaczenie dla jej bezpiecznej eksploatacji. O własnościach dynamicznych wirnika decydują układy sterowania reakcjami łożysk. Uproszczoną wersję schematu blokowego systemu aktywnego magnetycznego zawieszania wirnika dla jednej osi sterowania przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Uproszczony schemat blokowy systemu AMB

Transmitancja  $H(s)$ . reprezentuje szeregowe połączenie elementów systemu:

$$H(s) = G_W(s) G_R(s) G_P(s) \quad (6)$$

$G_W(s)$  – transmitancja operatorowa wzmacniacza

$G_R(s)$  – transmitancja operatorowa regulatora

$G_P(s)$  – transmitancja operatorowa przetwornika

$G_0(s)$  – transmitancja obiektu sterowania (wirnika)

Przedstawiony na rys.2. schemat odpowiada systemowi łożyskowania, który; do niedawna był najczęściej stosowany w praktycznych rozwiązaniach można go opisać wzorem (4). Czujnik położenia przetwarza przemieszczenie czopa  $Y$  z zadanej pozycji równowagi, wywołane np. zewnętrzną siłą  $F_{zew}$  na sygnał napięciowy  $U$ . Regulator nadążając za tymi zmianami formuje na wyjściu taki sygnał napięciowy dla wzmacniacza, aby ten wytworzył w uzwojeniu elektromagnesu prąd  $I$ . Prąd  $I$  generuje w uzwojeniu siłę  $F_i$  sprowadzającą czop do zadanej pozycji równowagi tzn. kompensującą zewnętrzną siłę zakłócającą  $F_{zew} = F_i$ . Regulator ze wzmacniaczem oraz przetwornik przemieszczenia stanowią sterownik systemu aktywnego łożyskowania magnetycznego.

Transmitancja operatorowa systemu AMB będzie postaci:

$$\frac{Y(s)}{F_{zew}(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + k_i G_0(s) H(s)} \quad (7)$$

Obiekt sterowania opisuje transmitancja:

$$G_0(s) = \frac{1}{ms^2 + k_y} \quad (8)$$

A więc po przekształceniu transformatę siły wyraża wzór:

$$F_{zew}(s) = Y(s) [ms^2 + k_y + k_i H(s)] \quad (9)$$

Równanie charakterystyczne zamkniętego systemu regulacji AMB jest postaci:

$$ms^2 + k_y + k_i H(s) = 0 \quad (10)$$

Aby zapewnić stateczność systemu wirnik – łożyska magnetyczne, pierwiastki tego równania muszą mieć ujemne części rzeczywiste. Ze wzoru (10) wynika, że o stateczności systemu decydują parametry sterownika, który opisany jest transmitancją  $H(s)$ . Przejście do analizy zachowania systemu AMB w dziedzinie częstości, przy działaniu zewnętrznych sił zakłócających, wymaga podstawienia we wzorze (10)  $s = j\omega$ .

Po przekształceniach uzyskuje się wyrażenie określające przemieszczenie wirnika w dziedzinie częstości:

$$Y(j\omega) = \frac{F_{zew}(j\omega)}{-m\omega^2 + k_i[\text{Im}H(j\omega)] + k_y + k_i[\text{Re}H(j\omega)]} \quad (11)$$

Jeśli rozpatrzy się zastępczy model systemu, na który działa zmieniająca się harmonicznie zewnętrzna siła  $F_{zew}(t)$ , to jego równanie ruchu ma postać:

$$m\ddot{y} + d_z\dot{y} + k_z y = F_{zew}(t) \quad (12)$$

Stąd transformata przemieszczenia  $Y(s)$ :

$$Y(s) = \frac{F_{zew}(s)}{ms^2 + d_z s + k_z} \quad (13)$$

a następnie po podstawieniu  $s = j\omega$ :

$$Y(j\omega) = \frac{F_{zew}(j\omega)}{-m\omega^2 + jd_z\omega + k_z} \quad (14)$$

Po porównaniu wzorów (11) i (14) uzyskuje się równoważną sztywność i tłumienie systemu łożyskowego:

$$\begin{aligned} d_z &= \frac{k_i}{\omega} [\text{Im}H(j\omega)] \\ k_z &= k_y + k_i [\text{Re}H(j\omega)] \end{aligned} \quad (15)$$

Stateczna praca systemu łożyskowego zależy od parametrów sterownika, który jest opisany transmitancją  $H(j\omega)$ . Ponieważ przetworniki przemieszczenia oraz wzmacniacze stosowane w realnych systemach sterowania mają szerokie pasmo przenoszenia, znacznie przekraczające zakres znamionowej częstości pracy wirnika, a więc o statecznej pracy systemu łożyskowego decydować będzie rodzaj i parametry regulatora.

Z równania (15) wynika, że minimalnym wymaganiem dla zbudowania statecznego systemu aktywnego łożyskowania wirnika maszyny jest regulator typu PD, którego transmitancja widmowa dana jest wzorem:

$$G_R(j\omega) = k_p + \frac{k_D}{j\omega} \quad (16)$$

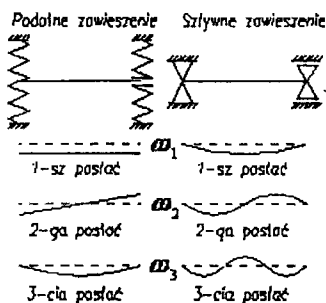
Część proporcjonalna (P) regulatora decyduje o sztywności systemu łożyskowego, natomiast część różniczkująca (D) wpływa na tłumienie jego drgań.

W praktyce jednak stosuje się regulatory typu PID, ponieważ dodatkowo część całkująca (I) eliminuje statyczne przesunięcie wału związane z jego masą, oraz utrzymuje zadaną pozycję niezależnie od zmian obciążenia. Regulator PID pozwala uzyskać bardzo dużą sztywność dla obciążeń statycznych, natomiast dla zmiennych obciążeń sztywność układu łożyskowego jest funkcją częstości. Należy więc przeprowadzić analizę funkcji sterowania regulatora a następnie całego układu w zależności od częstości.

#### 4. KONCEPCJA BADAŃ I WYBRANE WYNIKI

Zaprojektowanie i skonstruowanie układu sterowania obiektami o bardzo wysokich wymaganiach technologicznych, do jakich należą maszyny z wirnikami zawieszonymi w polu magnetycznym jest uwarunkowane znajomością ich rzeczywistego modelu. Opis rzeczywistego obiektu sterowania w praktyce zwykle sprowadza się do przyjęcia jego uproszczonej postaci, która stanowi punkt wyjścia do projektowania systemu oraz wyboru algorytmu sterowania regulatora.

Podatne zawieszenie, jakim w systemie aktywnego zawieszenia wirnika jest sterowane pole magnetyczne, wprowadza dodatkowo dwie postaci drgań wirnika sztywnego. Oznacza to, że pierwsza giętą postać (a trzecia w ogóle) ma częstość większą niż częstość pierwszej giętej postaci (i pierwszej w ogóle) tego samego wirnika lecz zawieszono sztywno (rys 3.).



Rys.3. Porównanie postaci drgań dla podatnego i sztywnego zawieszenia wirnika.

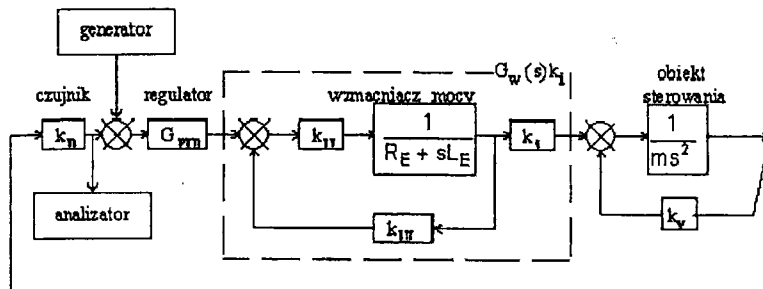
Parametry systemu dynamicznego wirnik – łożyska magnetyczne można ocenić na podstawie jego odpowiedzi czasowych i częstotliwościowych uzyskiwanych dla zawieszono w polu magnetycznym nieruchomego wirnika. Jest to związane z faktem, że system automatycznej regulacji pozwala na zadziałanie sygnałem wymuszającym na obiekt poprzez wprowadzenie odpowiedniego sygnału elektrycznego do systemu, który poprzez wymuszenie skokowe, impulsowe bądź harmoniczne symuluje zakłócenie. Ta cecha jest bardzo przydatna w sytuacji, gdy niezbędne jest przetestowanie różnych algorytmów sterowania dla zoptymalizowania charakterystyk dynamicznych projektowanej maszyny bez ryzyka związanego z jej rozruchem i wybiegiem. Poprawnie zaprojektowany system aktywnego łożyskowania magnetycznego powinien mieć charakterystyki częstotliwościowe, których przebiegi są niezależne od częstości obrotów wału.

Charakterystyki częstotliwościowe mogą dostarczyć informacji, które pozwalają określić takie parametry systemu jak np.:stateczność, poziom tłumienia zakłóceń zewnętrznych, sztywność dynamiczna. Natomiast odpowiedzi czasowe systemu na wymuszenie skokowe lub impulsowe dają możliwość oceny szybkości działania regulatora.

Gdy system łożyskowy chcemy wykorzystać jako element diagnostyczny należy skierować uwagę na właściwości elementów wykonawczych systemu (aktuatory), które generują zadane przez regulator siły działające na wał, kompensując zewnętrzne zakłócenia pochodzące np. od sił hydrodynamicznych lub aerodynamicznych [6].

Zastosowanie systemu aktywnego łożyskowania magnetycznego do realnej maszyny wymaga zatem weryfikacji eksperymentalnej jej charakterystyk dynamicznych, które pozwolą ocenić przydatność przyjętego modelu sterowania do rzeczywistych wymagań. W laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych zbudowane zostało stanowisko badawcze modelowej sprężarki przepływowej z aktywnymi łożyskami magnetycznymi [5].

Stawisko to posłużyło do wykonania charakterystyk maszyny, które pozwoliły, według opracowanej w tym celu procedury na określenie wartości dynamicznej sztywności systemu łożyskowego. Blokowy schemat ilustrujący metodykę badań przedstawia rys.4.



Rys.4. Schemat blokowy układu pomiarowego.

Przyjęta koncepcja badań zakładała wyznaczenie odpowiedzi poszczególnych osi sterowania na sygnał harmoniczny w określonym zakresie zmian częstości tego sygnału.

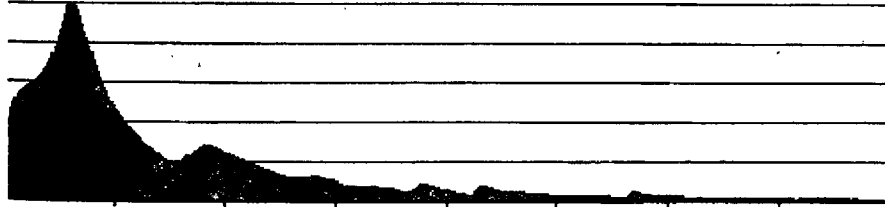
Wymuszenie będące harmonicznym sygnałem napięciowym o zmiennej częstości symuluje zakłócenia ruchu wirnika i w konsekwencji zmiany obciążenia (siły) w danej osi, a mierzona odpowiedź jest reakcją wirnika w postaci napięciowego sygnału z przetwornika przemieszczenia stanowiącego integralną część aktywnego łożyska magnetycznego.

Poniżej zamieszczono przykładową charakterystykę systemu łożyskowego będącą modułem transmitancji widmowej  $|H(j\omega)|$  zarejestrowanej w funkcji częstotliwości zmian sygnału wymuszającego (0-400) Hz wyrażonej stosunkiem odpowiedzi układu (przemieszczenia) do wymuszenia (siła) dla jednej osi sterowania:

```

M2  FREQ RESP H1      MAG      INPUT      MAIN  Y: 350m
Y: 349m      LIN
X: 0.0Hz + 400Hz  LIN
SETUP W21*  #A: 1878

```



Rys.5 Charakterystyka częstotliwościowa przy wymuszeniu w osi A i odpowiedzi w osi A.

Pozwoliło to na wyselekcjonowanie, dla badanej funkcji, częstości rezonansowej (31.5) Hz a następnie na identyfikację wartości współczynników sztywności dynamicznej badanego systemu. Identyfikacja ta została przeprowadzona numerycznie dla zamodelowanej metodą elementów skończonych struktury geometrycznej wirnika stanowiska o sztywności i masie odpowiadającej rzeczywistemu obiektowi (por rys.4 i 6).

Następnie na podstawie obliczonej numerycznie tzw. mapy częstości krytycznych modelowego wału podpartego w podatnych podporach zidentyfikowano sztywności dynamiczne łożysk magnetycznych porównując zmierzone i obliczone wartości częstości krytycznych systemu. Uzyskana w ten sposób wartość niesprzężonego współczynnika sztywności dynamicznej dla jednego kierunku wymuszenia i odpowiedzi wyniosła:

$$K_{AA} = 6.4 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

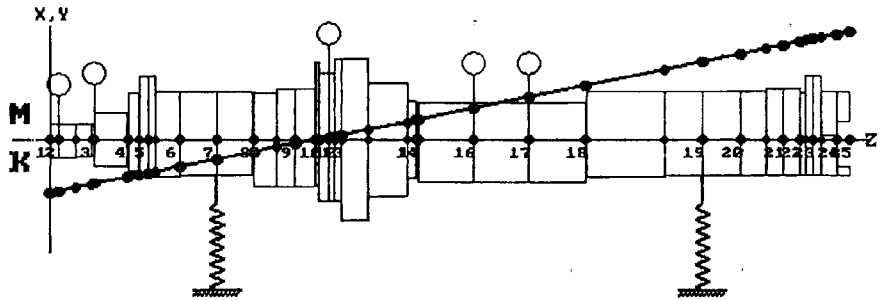
### Critical Speed Mode Shape

IMP PL

Projekt stanowiska badawczego TITANIC  
do badania aktywnego łożyskowania magnetycznego.

IMP PL

Spin/Whirl Ratio = 1.0000 — Kxx used  
Mode No = Z, Critical Speed = 1893 rpm



Rys.7. Druga postać drgań systemu łożyskowego (31,5Hz).

## 5. PODSUMOWANIE

Systemy aktywnego zawieszenia magnetycznego wirników maszyn mają swoją specyfikę, która dotyczy zarówno ich analizy teoretycznej jak i badań eksperymentalnych.

W pracy zaprezentowano możliwości diagnostyczne systemu wynikające z odmiennej zasady działania łożysk magnetycznych w porównaniu z klasycznym ułożyskowaniem stosowanym w budowie maszyn.

Przedstawione wyniki mają duże znaczenie praktyczne, ponieważ mogą służyć do weryfikacji przyjętego modelu teoretycznego systemu. Stanowią one fragment szerokiego programu badawczego realizowanego aktualnie w Instytucie Maszyn Przepływowych pod kierunkiem autora pracy.

## LITERATURA

- [1] Buhler Ph., Siegwart R., Herzog R.: *Digital control for low cost industrial AMB applications*, Proceedings of the V International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 83-88, Kanazawa, Japan, August 28-30, 1996.
- [2] Schweitzer G., Traxler A., Bleuler H.: *Magnetlager*, Springer-Verlag, 1993.
- [3] Gosiewski Z.: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych*, Mon. 33 Koszalin 1993.
- [4] Kozanecka D.: *Łożyskowanie magnetyczne aktywne-problemy metrologiczne*, XXVIII MKM'96, Materiały Konferencyjne, Tom 1 str.317-324, Częstochowa 1996.
- [5] Kozanecka D., Kozanecki Z., Krysiński J.: *Stanowisko badawcze modelowej sprężarki przepływowej z aktywnymi łożyskami magnetycznymi*, CMP Nr.111 Z.773, str. 97-104, Łódź 1996.
- [6] Baun D., Fittro R., Maslen E.: *Force Versus Current and Air Gap Calibration of a Double Acting Magnetic Thrust Bearing*, School of Engineering and Applied Science, Dep. of Mechanical Aerospace and Nuclear Engineering ROMAC Rep.No.397 UVA '96
- [7] Kozanecka D.: *Algorytmy sterowania aktywnych łożysk magnetycznych*, III Konferencja Naukowo Techniczna MECHATRONIKA'97, str. 139-144 T.1. Warszawa 1997.