

Prof. dr hab. inż. **ROMUALD RZĄDKOWSKI**  
**Instytut Maszyn Przepływowych PAN**  
ul. Fiszer 14, Gdańsk 80-952  
tel. (058 –3411271 w 169) Fax (058-341 –61-44)  
e-mail [z3@imp.pg.gda.pl](mailto:z3@imp.pg.gda.pl).

Gdańsk 2.07.2015

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**Mgr inż. Elizy Tkacz p.t.**  
**Dynamika poprzecznego łożyska gazowego z podatnie podatną folią.**

Celem rozprawy było opracowanie algorytmu i programu numerycznego do obliczeń dynamiki porzecznego łożyska foliowego. W modelu uwzględniono wzajemne liniowe i nieliniowe oddziaływania filmu gazowego, czopa i folii sprężystej. Takie zagadnienie jest bardzo trudne do realizacji, gdyż należy do zagadnień pełnego sprzężenia pomiędzy czynnikiem smarującym łożysko gazowe, deformacji podatnej struktury łożyska oraz ruchu czopa. Przedstawiono analizę statyczną i dynamiczną.

Przedstawiono również analizę eksperymentalną promieniowego łożyska foliowego.

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, literatury, spisu rysunków i tabel.

Po spisie treści zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń. W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie i tezę pracy. W rozdziale drugim cel i zakres pracy. W rozdziale trzecim przegląd literatury. Warto zapoznać się z pracami: Fluid -structure interaction modeling of Air Bering, H.R. Javani, P. Kagan, F. Huizinga, gdzie wykorzystano program ANSYS do modelowania trójwymiarowego oddziaływania FSI, czy A Fully Coupled Fluid-Structure-Interaction Model for Foil Gas Bearings , Wei Zhang, Abbas A. Alahyari and Louis Chiappetta , ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference, Denver, Colorado, USA, October 7–10, 2012, gdzie również wykorzystano program ANSYS do zamodelowania trójwymiarowego oddziaływania FSI.

W rozdziale 3.5 przedstawiono granice funkcjonowania łożyska foliowego, z podaniem liniowych równań ruchu rozważanego układu.

W rozdziale 3.6 przedstawiono nieliniowa metodę modelowania dynamiki łożyska poprzecznego. Model nieliniowy pozwoli na zbadanie trajektorii ruchu czopa podpartego na łożysku foliowym, który wywołany jest działaniem sił wymuszających. Przedstawiono również strukturę opracowanego modelu w którym łożysko pracuje w ustalonej temperaturze. Przy założeniach nieodkształcalności wirnika z równań ruchu obliczono zmianę pozycji środka masy czopa pod wpływem sił wymuszających, dla filmu gazowego przy złożeniu przepływu laminarnego rozwiązano niestacjonarne równanie

Reynoldsa dla płynu ściśliwego i izotermicznego. Obliczono odkształcenia struktury sprężystej łożyska, dla określonej jej sztywności i tłumienia wynikającego z obecności tarcia suchego.

Algorytm rozwiązania zagadnienia polega na określeniu dla każdego kroku czasowego siły wypadkowej działającej na czop łożyska oraz wypadkowych sił działających na folię nośną. Chwilowe wartości tych sił są funkcjami położenia i prędkości czopa, odkształcenia foli sprężystej oraz ciśnienia w filmie gazowym łożyska.

W rozdziale czwartym przedstawiono geometrię łożyska foliowego, układy współrzędnych, geometrię filmu gazowego. Na str. 42 kąt  $\alpha$  na rys. 32 jest zaznaczony niepoprawnie, gdyż dla takiego przyjęcia kąta  $\alpha$  zależności (11) nie są prawdziwe. Zapis wektorowy w (11) nie jest konieczny. Na str. 43-45 zapisy muszą być wektorowe a nie mieszane skalarno-wektorowe.

W rozdziale 5 przedstawiono analizę teoretyczną zjawisk zachodzących w poprzecznym łożysku foliowym. W rozdziale 5.1 przedstawiono model dynamiki wirnika, w rozdziale 5.2 model przepływu gazu w filmie łożyskowym a w rozdziale 5.3 analizę odkształceń struktury sprężystej. Równania wyprowadzone są bardzo starannie.

W rozdziale 6 przedstawiono model numeryczny dynamiki poprzecznego łożyska foliowego. Przyjęto uproszczoną dwuwymiarową siatkę dla filmu gazowego, która nie odkształca się w podczas ruchu wirnika i foli sprężystej. Nie przedstawiono w rozdziale analiz numerycznych dla różnych wielkości oczek siatki, celem określenia błędów obliczeń numerycznych. Jak program numeryczny został zweryfikowany ?

W analizie flatteru łopatek, zawsze przyjmujemy ruchome siatki, przy czym stosujemy metodę objętości skończonych, i myślę że taką analizę można byłoby przeprowadzić z wykorzystaniem programu ANSYS dla modelu 3D.

Jako bardzo drobny błąd edycyjny w bardzo starannie przygotowanej pracy zauważyłem na str. 73, że  $h_{i,j}^0$  napisana w indeksie górnym.

W rozdziale 6.4 przedstawiono sposób obliczenia współczynników sztywności  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{xy}$ ,  $K_{yx}$  oraz tłumienia  $B_{xx}$ ,  $B_{yy}$ ,  $B_{xy}$ ,  $B_{yx}$  w modelu liniowym, nie przedstawiono jednak żadnych wyników obliczeń ani w tym rozdziale ani w rozdziałach następnych. Proszę o przedstawienie tych wartości.

W rozdziale 6.5 zaprezentowano model nieliniowy łożyska. Tłumienie siły w łożysku przy wymuszeniu funkcją Heaviside'a przedstawiono na rys. 59 a trajektorie czopa na rys. 60. Dla wymuszenia harmonicznego trajektorię czopa przedstawiono na rys. 63, ale nie uwzględniono tłumienia wynikającego z dyssypacji energii przez tarcie. Proszę wyjaśnić dlaczego tłumienie nie zostało uwzględnione? Przeprowadzono również trzeci i czwarty test o różnych wartościach sił wymuszających na odpowiednich osiach. Pozwoliło to na pozytywną ocenę działania programu w analizowanym zakresie.

W rozdziale 7 przedstawiono eksperymentalną metodę badania promieniowego łożyska foliowego. W podrozdziale 7.1 określono współczynniki sztywności i tłumienia struktury sprężystej. Analiza polegała na wzbudzeniu struktury sprężystej siłą harmoniczną o zadanej częstotliwości oraz obserwacji zachowania badanego układu drgającego. Zbudowano stanowisko pomiarowe. Stwierdzono, że charakterystyki dynamiczne łożyska są silnie nieliniowe i niezwykle trudno jest odpowiednio zamodelować dynamikę struktury sprężystej.

W rozdziale 7.2 przedstawiono wyniki pomiarów drgań mikrosprężarki podpartej na łożyskach foliowych podczas startu oraz pracy na obrotach nominalnych. Na zarejestrowanym wykresie można zaobserwować niski poziom drgań w całym zakresie prędkości obrotowych oraz brak zmiany fazy. Zbudowano następnie model numeryczny dynamiki rotora i rozważono dwa przypadki A i B. W przypadku A uwzględniono charakterystykę dynamiczną struktury, w przypadku B własności dynamiczne folii jak i filmu gazowego. Porównano wyniki obliczeń numerycznych i eksperymentalnych, szkoda że nie przedstawiono ich na jednym wykresie. Jeżeli zastosowano model liniowe proszę o podanie współczynników sztywności  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{xy}$ ,  $K_{yx}$  oraz tłumienia  $B_{xx}$ ,  $B_{yy}$ ,  $B_{xy}$ ,  $B_{yx}$ . Jakie wartości sił wymuszających przyjęto przy analizie numerycznej, skąd je oszacowano.

W rozdziale 7.3 przeanalizowano dynamikę turbiny podpartej w łożyskach foliowych. Wstępnie testy na stanowisku badawczym wykazały stabilną pracę systemu wirującego podczas rozruchu, przy obrotach nominalnych oraz podczas wybiegu. Z wykresu Bodego rys. 89 można zauważyć nieciągłość filmu gazowego do 15000 obr./min. Nie przedstawiono jednak wyników obliczeń numerycznych.

### **Uwagi końcowe**

1. Opracowano model i program numeryczny do obliczeń dynamiki poprzecznego łożyska foliowego według metody liniowej i nieliniowej, który może być wykorzystany zarówno podczas projektowania, eksploatacji oraz dla celów diagnostycznych.
2. Przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem napisanego programu i wyniki porównano w wynikami badań eksperymentalnych uzyskując dobrą zbieżność.
3. Praca doktorska napisana jest bardzo starannie z pełnym wyprowadzeniem wzorów strukturalnych i przepływowych.
4. Bardzo się cieszę, że w przyszłości w modelu uwzględniony zostanie przepływ turbulentny w filmie gazowym łożyska foliowego oraz gradienty temperaturowe w łożysku, co pozwoli na analizę bardzo ciekawych zjawisk drgań samowzbudnych.

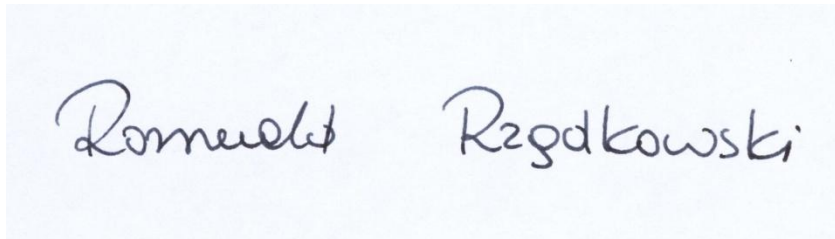
## **Wniosek końcowy**

Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych.

Może stanowić podstawę do nadanie mgr inż. **Elizie Tkacz** stopnia doktora nauk technicznych.

Stawiam wniosek o dopuszczenia Autorki do publicznej obrony pracy.

Stawiam również wniosek o wyróżnienie pracy ze względu na zaproponowanie i zweryfikowanie modelu teoretycznego i napisanego programu numerycznego na rzeczywistych obiektach, co jest zagadnieniem bardzo trudnym w szeroko rozumianym wzajemnym oddziaływaniu drgającej konstrukcji z przepływem.



Romuald Rządowski