

Zbigniew KOZANECKI, Dorota KOZANECKA,
Jakub ŁAGODZIŃSKI, Eliza TKACZ
Politechnika Łódzka
Instytut Maszyn Przepływowych
zkozan@p.lodz.pl, dkozan@p.lodz.pl, jakub.lagodzinski@p.lodz.pl
eliza.tkacz@p.lodz.pl

NIEKONWENCJONALNE BEZOLEJOWE ŁOŻYSKA WYSOKOOBROTOWE TURBOGENERATORA DLA OBIEGU ORC

Streszczenie: Obecnie w małych nowoczesnych systemach produkcji energii najczęściej stosowane są mikroturbiny o mocy rzędu od 1 do 20 kW. Niezwykle istotny jest rozwój niezawodnej technologii łożyskowania wirników tych miniaturowych maszyn przepływowych. Prezentowany w artykule układ wirujący turbogenerators podparto w bezolejowych łożyskach foliowych. Podatne łożyska foliowe są rodzajem łożysk hydrodynamicznych, które wykorzystują gaz z otoczenia jako czynnik smarujący, co znacząco upraszcza ich konstrukcję.

Słowa kluczowe: podpora bezolejowa, wysokoobrotowe maszyny przepływowe, łożyska gazowe, łożyska foliowe.

UNCONVENTIONAL OIL-FREE HIGH-SPEED BEARING FOR ORC TURBOGENERATOR

Abstract: In modern low-power generation systems, microturbines of the power output ranging between 1 and 20 kW are applied. The development of reliable bearing technology for high-speed small turbomachinery could be essential to these power-generating devices. The rotating system presented in the paper is supported in oil-free, airfoil bearings. Compliant surface foil gas bearings are a class of hydrodynamic bearings that use the ambient gas as their working fluid and, thus, require no dedicated lubrication systems, which makes their design much simpler.

Keywords: Oil-free support, High-speed turbomachinery, Gas bearings, Foil bearings.

1. WPROWADZENIE

Systemy generowania energii najczęściej funkcjonują w obwodach przepływu realizujących obieg Braytona lub Rankina. W realizacjach tych

podstawową maszyną jest turbina napędzająca generator elektryczny. Dla wygenerowania odpowiedniej mocy w mikrosystemach produkcji energii elektrycznej, wirnik turbogeneratorsa musi obracać się z prędkością rzędu $10 \div 100$ tys. obr/min. Określenie „mikroturbina” zarezerwowano dla maszyn charakteryzujących się mocą w zakresie od kilku watów do kilkuset kW.

W tej dziedzinie można wyróżnić:

- mikroturbiny tzw. Power – MEMS (*Micro Elektro Mechanical System*) o średnicy wirnika rzędu kilku milimetrów, osiągające prędkość obrotową nawet do 1 mln obr/min.
- mikroturbiny służące do produkcji energii elektrycznej o mocach w zakresie od kilku do kilkuset kW i prędkości obrotowej od 10 do 100 tys. obr/min.

Tak wysokie prędkości obrotowe stanowią granicę stosowalności łożysk tocznych lub konwencjonalnych łożysk ślizgowych smarowanych olejem, zwłaszcza, jeżeli istotna jest stabilność pracy łożyska lub generowane straty mechaniczne.

Coraz bardziej powszechne zastosowania niekonwencjonalnych rozwiązań w konstrukcji maszyn pozwala na rozważenie możliwości zastosowania medium roboczego realizowanego obiegu cieplnego jako czynnika smarującego łożyska w małej wysokoobrotowej maszynie przepływowej (turbinie). Zastosowanie w maszynach przepływowych łożysk smarowanych medium roboczym (cieczą lub gazem) o niskiej lepkości pozwala na:

- zwiększenie całkowitej sprawności maszyny poprzez redukcję strat tarcia w łożyskach oraz wyeliminowanie oleju smarującego i uszczelnień,
- zachowanie absolutnej czystości medium roboczego,
- w przypadku integracji konstrukcyjnej generatora z wałem zbudowanie maszyny „hermetycznej” bez wyprowadzania wału z korpusu i wyeliminowanie uszczelnień na granicy „medium robocze – otoczenie”.

Materiały i technologie wykorzystane do budowy tego typu łożysk powinny zapewnić:

- warunki dla krótkotrwałego, nieniszczącego kontaktu czopa z panwią w czasie rozruchu i zatrzymania maszyny, przy niskich obrotach,
- niski współczynnik tarcia pomiędzy czopem i panwią łożyskową,
- odporność chemiczną na oddziaływanie medium roboczego maszyny.

Możliwość aplikacji niekonwencjonalnych łożysk wymaga analizy dynamiki systemu „rotor – łożyska – korpus” w całym zakresie prędkości obrotowych maszyny.

Rozważana w artykule koncepcja małej maszyny przepływowej z niekonwencjonalnymi łożyskami jest związana z następującymi założeniami:

- moc maszyny około $2 \div 5$ kW,
- maksymalne obroty turbogeneratorsa do 50 tys. obr/min,
- wykorzystanie gazu lub pary suchej czynnika niskowrzącego (w przypadku obiegów ORC) jako czynnika roboczego zespołu łożyskowego,
- generator z magnesami trwałymi lub silnik elektryczny maszyny zintegrowany z wałem.

2. TECHNOLOGIA ŁOŻYSKOWANIA GAZOWEGO

Łożyska gazowe są interesującą alternatywą w łożyskowaniu wirników małych wysokoobrotowych maszyn przepływowych. Można je odnaleźć w różnorodnych zastosowaniach, począwszy od małych pomiarowych urządzeń laboratoryjnych, do relatywnie dużych wysokoobrotowych maszyn.

W pewnych specyficznych rozwiązaniach o ich zastosowaniu decydują następujące zalety:

- eliminacja zanieczyszczeń obecnych w przypadku stosowania klasycznych czynników smarujących (olej),
- brak zjawisk odparowania, zestalenia lub degradacji czynnika roboczego w ekstremalnych temperaturach,
- niewielkie opory ruchu (związane z niską lepkością gazów).

Główne wady łożysk gazowych to:

- relatywnie niewielka nośność statyczna, zwłaszcza w przypadku łożysk aerodynamicznych (samodziałających),
- ograniczone wartości tolerancji wykonania współpracujących elementów związane z niewielkimi grubościami filmu smarnego.

Rozwój łożysk gazowych jest stymulowany możliwością ich stosowania w realizacjach technicznych, w których tradycyjne rozwiązania łożyskowania są utrudnione lub wręcz niemożliwe. Należą do nich, np. maszyny funkcjonujące w bardzo niskich lub bardzo wysokich temperaturach (np. turbo-ekspandery kriogeniczne lub mikroturbiny Power MEMS).

Obecnie, rozwijane są trzy rodzaje łożysk gazowych dla potrzeb łożyskowania małych wysokoobrotowych maszyn przepływowych. Są to:

- łożyska aerostatyczne (zasilane z zewnątrz sprężonym gazem lub parą),
- łożyska aerodynamiczne (samodziałające) z wahliwymi klockami,
- łożyska aerodynamiczne z podatną folią.

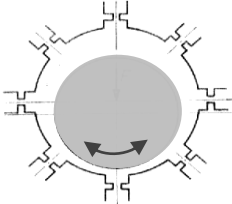
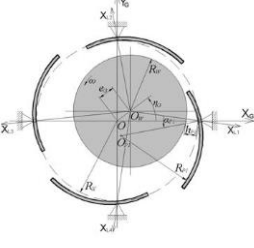
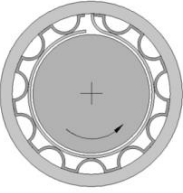
Główne problemy związane z praktycznym zastosowaniem łożysk aerostatycznych (zewnątrznie zasilanych) i łożysk aerodynamicznych (samodziałających – foliowych i z wahliwymi panewkami) zestawiono w Tabeli 1.

Jednym z kluczowych zagadnień związanych ze stosowaniem łożysk gazowych jest ich niezawodność eksploatacyjna w różnych warunkach pracy. Spełnienie tego warunku wymaga odpowiedniej adaptacji koncepcji maszyny już na wczesnym etapie projektowania. Obejmuje on:

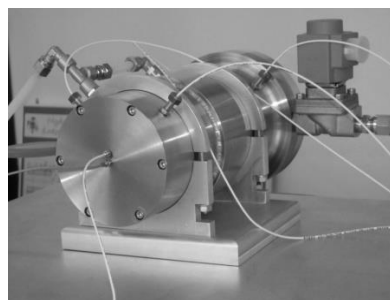
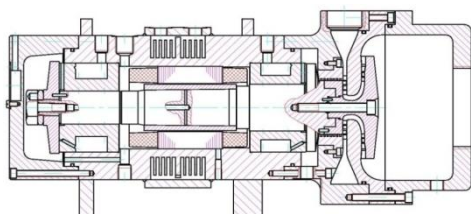
- ograniczenie wartości wzdłużnych i poprzecznych sił statycznych obciążających łożyska przez odpowiednie zaprojektowanie układu przepływowego maszyny,
- dobór właściwego typu łożyska gazowego dla rozważanej aplikacji.

Ostateczna weryfikacja poprawności wyselekcjonowanej koncepcji konstrukcyjnej maszyny przepływowej z niekonwencjonalnymi gazowymi łożyskami powinna obejmować budowę prototypu i eksperymentalną analizę jego funkcjonowania w szerokim zakresie prędkości obrotowych i obciążeń.

Tabela. 1. Główne problemy związane z niezawodnością zastosowań łożysk gazowych
 Table 1. Main problems connected to the reliability of gas bearing applications

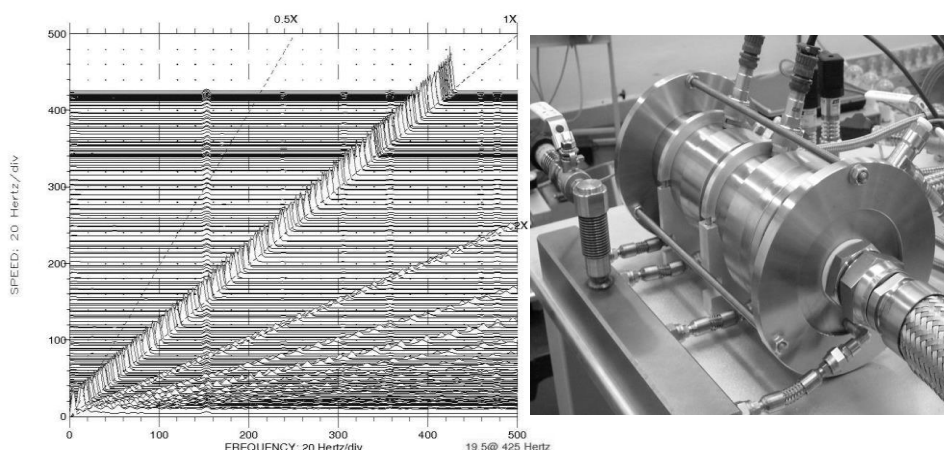
Łożysko aerostaticzne	Łożysko aerodynamiczne z wahliwymi klockami	Aerodynamiczne łożysko foliowe
		
Relatywnie niewielka nośność statyczna		
Wymagane jest zasilanie łożyska sprężonym gazem	Zjawisko tarcia przy niskiej prędkości obrotowej – ograniczona liczba cykli start/wybieg	
Precyzja wykonania	Wymagany wysoki moment rozruchowy	
Niewielki margines stabilności	Tarcie w punkcie podparcia panewki wpływa na ograniczenie stabilności łożyska	Relatywnie duże przemieszczenia promieniowe
Wymagana wysoka czystość gazu roboczego	Specjalne wymagania materiałowe (odporność na zużycie w trakcie rozruchu i wybiegu)	

Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcji i prototyp turbogeneratora z aerostaticznymi łożyskami gazowymi dla potrzeb realizacji obiegu ORC. Czterostopniowa konfiguracja turbiny (2 stopnie dośrodkowe i 2 stopnie odśrodkowe) pozwoliła na zrównoważenie znacznej siły osiowej, związanej z rozkładem ciśnienia na wirniku turbiny.



Rys. 1. Schemat konstrukcji i prototyp mikro-turbogeneratora podpartego w łożyskach aerostaticznych wraz z układem pomiarowym drgań względnych
 Fig. 1. General design and a prototype view of the micro-turbogenerator equipped with an aerostatic gas bearing and a vibration measuring system

Na rys. 2 przedstawiono prototyp turbogeneratora ORC z łożyskami aerostaticznymi. Wykres kaskadowy drgań względnych, przedstawiający rozruch maszyny w trakcie testów dynamicznych potwierdza poprawną pracę łożysk aż do maksymalnej wartości obrotów wynoszących 25 tys. obr./min.



Rys. 2. Bezolejowy prototyp turbogeneratora dla obiegu ORC w czasie testów oraz wykres kaskadowy przedstawiający stabilną pracę maszyny w całym zakresie prędkości obrotowej

Fig. 2. Oil-free ORC turbogenerator prototype during tests and a cascade plot illustrating the stability of the machine rotating system in the whole range of rotational speed

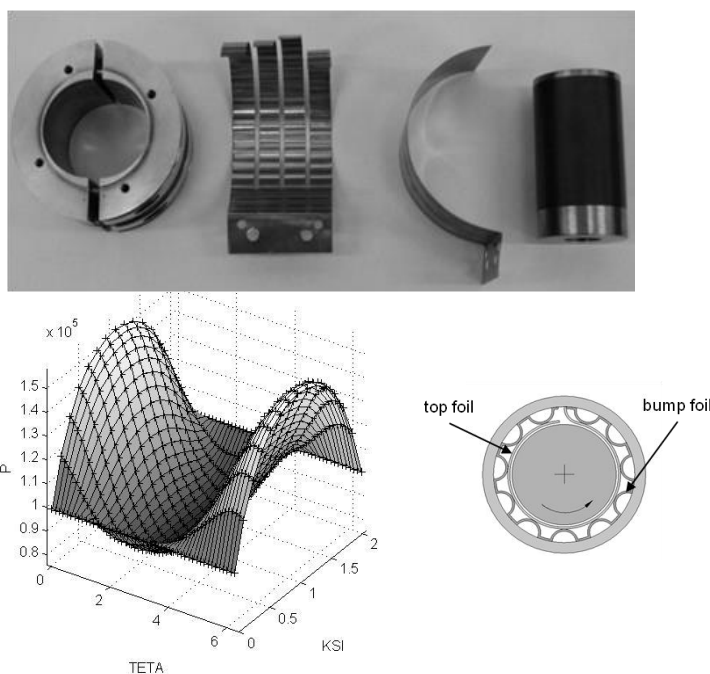
Przy maksymalnej prędkości obrotowej, rotor maszyny jest nadal podkrytyczny, przy czym szacuje się, że prędkość krytyczna dla tej konfiguracji systemu wirującego pojawi się przy około 35 tys. obr./min. W zakresie testowanych obrotów postać drgań rotora można sklasyfikować jako ruch ciała sztywnego (ang. „*rigid body mode*”), co oznacza, że o właściwościach dynamicznych systemu wirującego decydują właściwości dynamiczne układu podparcia wirującego wału.

Pomimo w pełni akceptowalnej dynamiki zbudowanej maszyny, zastosowane tu łożyska aerostaticzne wymagają zasilania świeżą parą pobraną ze strumienia masy zasilającego turbinę. Z punktu widzenia bilansu energii, należy dokładnie przeanalizować i uwzględnić ilość pary niezbędnej do zasilania łożysk.

Ta zużyta dla potrzeb zasilania łożysk para zmniejsza wartość strumienia masy płynącego przez turbinę, tym samym przyczyniając się do zmniejszenia mocy i sprawności turbogeneratora. Z tego powodu, zastosowanie aerodynamicznych łożysk foliowych wydaje się bardziej interesujące.

3. AERODYNAMICZNE ŁOŻYSKA FOLIOWE

Unikalne właściwości łożysk foliowych wynikają z ich budowy – folia nośna (ang. *top foil*) jest zaciśnięta w czasie pracy na czopie wału z napięciem wstępnym wynikającym z kształtu folii sprężystej (ang. *bump foil*). W wyniku wzajemnego ruchu powierzchni czopa i podpartej elastycznie folii nośnej, siły lepkości gazu otoczenia powodują uformowanie się ciągłego filmu gazowego. Istotną zaletą tego typu łożysk jest fakt, że nie wymagają one zewnętrznego zasilania gazem smarującym. Na rys. 3 przedstawiono konstrukcję eksperymentalnego łożyska foliowego, jak również obliczony, teoretyczny rozkład ciśnienia w jego uformowanym filmie gazowym.



Rys. 3. Łożysko foliowe rozwijane dla celów badań

Fig. 3. Aerodynamic foil bearing developed for the experimental needs

Główny problem eksploatacyjny łożysk aerodynamicznych jest związany z kontaktem i tarcie pomiędzy powierzchnią czopa i folią nośną w trakcie rozruchu i wybiegu maszyny, co pociąga za sobą następujące ograniczenia:

- wymagany jest duży moment rozruchowy (co jest sprawą szczególnie istotną w przypadku napędu turbiną),
- ze względu na zużycie powierzchni folii i czopa istnieje ograniczona liczba startów i wybiegów łożysk maszyny.

Analiza teoretyczna funkcjonowania łożysk foliowych jest zagadnieniem trudnym ze względu na istniejące interakcje pomiędzy filmem gazowym i elastyczną strukturą zespołu folii nośnej i folii sprężystej. Zgodnie z założeniami teorii liniowej, właściwości dynamiczne łożysk hydrodynamicznych są opisane za pomocą zestawu ośmiu sprzężonych współczynników dynamicznych, zlinearyzowanych wokół ustalonego punktu równowagi statycznej. Istotne jest tu jednak ograniczenie wartości sił wzbudzających do takiego poziomu, aby spełnione było założenie niewielkich przemieszczeń znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu położenia równowagi.

Wzajemne przemieszczenia względne elastycznych folii są nieodłącznie związane ze zjawiskiem tarcia. Oczywistym jest, że charakter elastycznych odkształceń podatnych folii może znacząco wpływać na dynamiczne właściwości kompletnego łożyska. Dlatego wiarygodny model teoretyczny kompletnego łożyska, uwzględniający jego charakterystyczne cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne (tarcie wewnętrzne zespołu podatnych folii oraz film gazowy o geometrii zależnej od rozkładu ciśnienia pomiędzy cylindrycznym czopem a podatnie podparta folią nośną), staje się niezbędnym elementem obliczeń teoretycznych dynamiki maszyn z łożyskami foliowymi.

Wpływ zjawiska tarcia wewnętrznego zespołu podatnych folii na charakterystykę łożyska aerodynamicznego przy dużej prędkości obrotowej, jak również tarcie czopa i folii nośnej w trakcie rozruchu i wybiegu maszyny wymaga starannego doboru materiałów, potwierzonego skrupulatnymi testami trwałościowymi [4]. Wyniki przeprowadzonych symulacji pozwalają sformułować następujące hipotezy związane z działaniem poprzecznych łożysk foliowych:

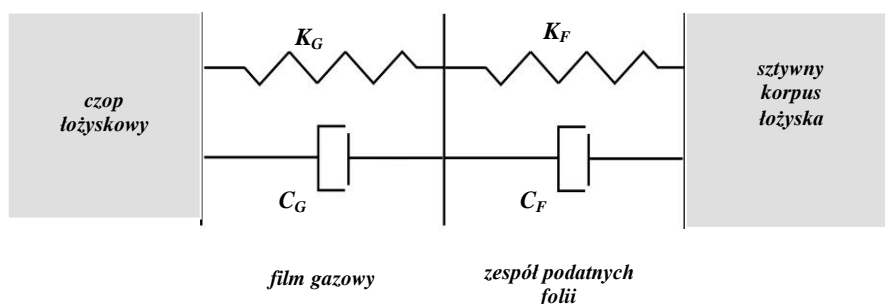
- Nawet przy znacznych obciążeniach, część „gazowa” łożyska pracuje przy niewielkiej mimośrodowości.
- Wysoka sztywność filmu gazowego (o rząd wyższa od sztywności zespołu podatnych folii) wynika z jego niewielkiej grubości wymuszonej przez wstępny zacisk folii sprężystej. W związku z tym, o dynamicznych właściwościach kompletnego łożyska decyduje przede wszystkim sztywność zespołu folii. W konsekwencji znajomość właściwości dynamicznych zespołu podatnych folii pozwala na określenie dominujących właściwości dynamicznych całego łożyska.

4. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE PODATNEJ STRUKTURY ŁOŻYSKA FOLIOWEGO

Obecnie badania związane z opracowaniem finalnej konstrukcji łożyska foliowego są prowadzone w następujących kierunkach:

- Dobór pary materiałowej (pokrycia czopa i folii nośnej), która zapewni wystarczającą trwałość łożysk w różnych warunkach pracy maszyny [3, 4].
- Wyselekcjonowanie akceptowalnego z punktu widzenia technologii wytwarzania wariantu konstrukcyjnego łożysk poprzecznych i wzdłużnych.
- Opracowanie wiarygodnej metodyki określania właściwości dynamicznych podatnego łożyska foliowego.

Na rys. 4. Przedstawiono uproszczony model fizyczny łożyska foliowego.



Rys. 4. Uproszczony model fizyczny łożyska foliowego

Fig. 4. Simplified physical model of the bump foil bearing

Teoretycznie, statyczne i dynamiczne właściwości łożyska foliowego są sumą właściwości wynikających z szeregowego połączenia dwóch elementów podatnych. Jednym z nich jest cienka warstwa gazu o bardzo małej grubości i stosunkowo dużej sztywności statycznej i dynamicznej. Drugim elementem elastycznym jest wstępnie napięta folia sprężysta.

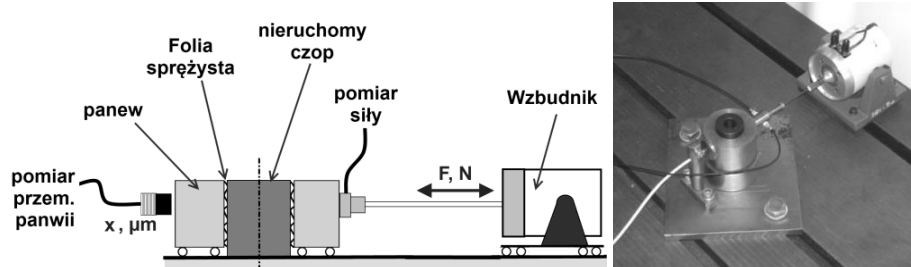
Należy zauważyć, że w zależności od napięcia wstępnego folii sprężystej, film gazowy pojawia się przy prędkości obrotowej od kilku do kilkunastu tys. obr/min. Powyżej tej prędkości, na skutek obecności ciągłego filmu gazowego, czop traci kontakt z panwią łożyskową.

Przyjęty fizyczny model rozruchu łożyska foliowego opiera się na następujących założeniach:

- Dla prędkości obrotowej wału poniżej n_{lim} , gdzie n_{lim} oznacza prędkość graniczną, przy której pojawia się ciągły film gazowy przyjęto, że właściwości dynamiczne łożyska zależą wyłącznie od sztywności folii sprężystej, ponieważ $K_G \gg K_F$
- Dla prędkości obrotowej wału powyżej n_{lim} , dynamiczne właściwości łożyska są sumą złożonej sztywności dwóch elementów elastyczno-sprężystych połączonych szeregowo.

Złożoność analizy modelu teoretycznego łożyska foliowego jest spowodowana istnieniem tarcia pomiędzy folią sprężystą i tuleją łożyskową, jak również pomiędzy foliami. Tarcie pojawia się na skutek względnego ruchu wymienionych elementów. Wynikiem tego zjawiska fizycznego są silnie nieliniowe właściwości dynamiczne foliowej podpory łożyskowej.

Dla zidentyfikowania wspomnianych właściwości dynamicznych przeprowadzono próby eksperymentalne na stanowisku badawczym (rys. 5).



Rys. 5. Schemat funkcjonalny i zdjęcie stanowiska zbudowanego dla potrzeb identyfikacji dynamicznych współczynników podpory łożyska foliowego

Fig. 5. Functional diagram and a photo of the test rig built for the experimental identification of dynamic properties of the foil bearing support structure

Stanowisko badawcze składało się z nieruchomego czopa oraz ruchomej tulei łożyskowej i wzbudnika drgań, który oddziaływał na tuleję siłą o przebiegu sinusoidalnym. Podczas eksperymentu mierzono siłę F_1 przemieszczenie x tulei łożyskowej.

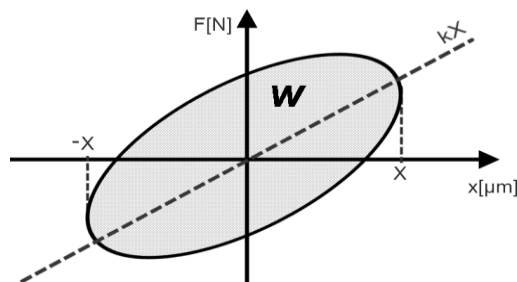
Typową odpowiedź układu przedstawiono na rys. 6. Można z niej wyznaczyć globalną sztywność k oraz pole powierzchni pętli histerezy W , które jest miarą energii dyssypowanej na skutek ugięcia zespołu folii sprężystej w trakcie pojedynczego cyklu drgań. Dyssypacja energii ma związek z tarciem pomiędzy foliami, i może zostać wyznaczona ze wzoru (1):

$$W = \oint F dx = \pi \omega C_{eq} X^2 \tag{1}$$

gdzie: W – pole pętli histerezy, X – amplituda drgań, ω – częstość kołowa drgań, C_{eq} – zastępczy współczynnik tłumienia.

Przekształcając wzór (1) otrzymujemy:

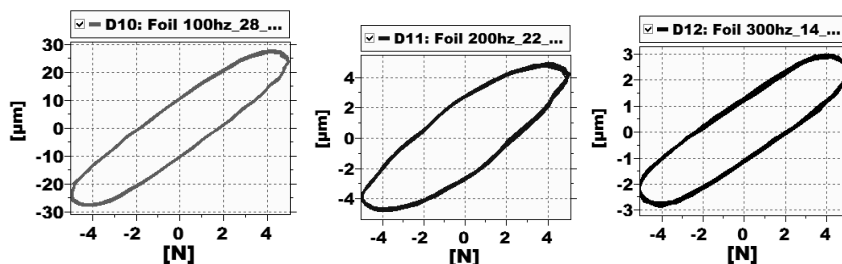
$$C_{eq} = \frac{W}{\pi \cdot \omega \cdot X^2} \tag{2}$$



Rys. 6. Odpowiedź układu w postaci pętli histerezy związanej z tarciem i sztywnością podatnej podpory foliowej

Fig. 6. Image response as a hysteresis loop associated with friction and elasticity of the compliant foil bearing assembly

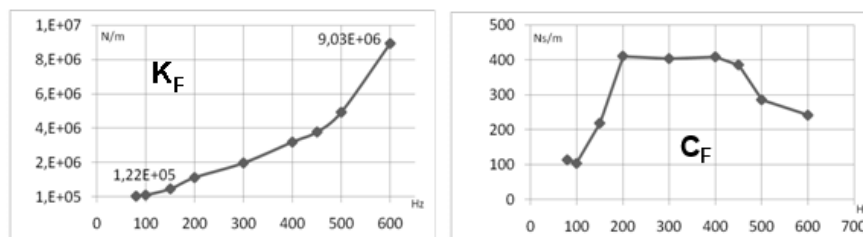
W trakcie eksperymentu mierzono amplitudę przemieszczeń tulei łożyskowej, przy stałym wymuszeniu wynoszącym 10 N p-p , dla zakresu częstotliwości wzbudzenia od 80 do 600 Hz . Przykładowe wyniki otrzymanych pętli histerezy przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Przykładowe pętli histerezy dla różnych częstotliwości wzbudzenia

Fig. 7. Exemplary hysteresis loops obtained from the excitation at different frequencies

Otrzymane pętli histerezy pozwoliły na identyfikację eksperymentalnej sztywności (K_F) oraz tłumienia (C_F) podatnego łożyska foliowego, które następnie wykorzystano do budowy modelu systemu wirującego (rys. 8).

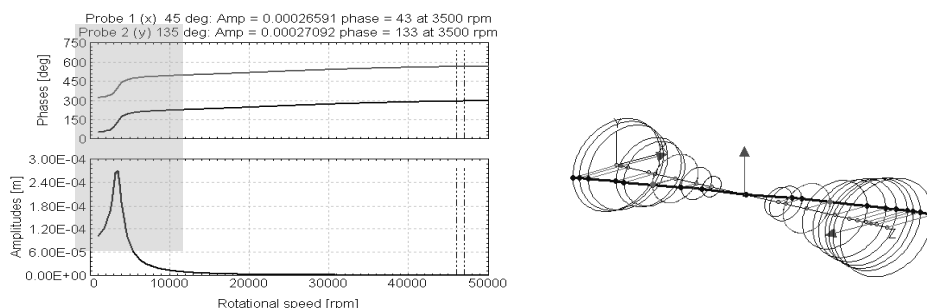


Rys. 8. Sztywność i zastępczy współczynnik tłumienia w funkcji częstotliwości wzbudzenia

Fig. 8. Stiffness and equivalent damping coefficients of the compliant foil bearing support system vs. excitation frequency

Uzyskane charakterystyki pokazują, że sztywność zespołu podatnych folii łożyska rośnie wykładniczo ze wzrostem częstotliwości wzbudzenia. Współczynnik tłumienia obliczony ze wzoru (2) osiąga maksimum przy wartości częstotliwości wzbudzenia rzędu 200 Hz , natomiast wyraźnie maleje powyżej częstotliwości wzbudzenia rzędu 400 Hz . Charakterystyki dynamiczne zespołu podatnych folii łożyska są zatem silnie nieliniowe.

Otrzymane wartości sztywności i tłumienia zespołu elastycznych folii zostały wykorzystane w obliczeniach dynamicznych modelowej maszyny przepływowej. Na rys. 9 pokazano teoretyczny wykres Bodego dla rozważanego rotora podpartego w łożyskach foliowych.



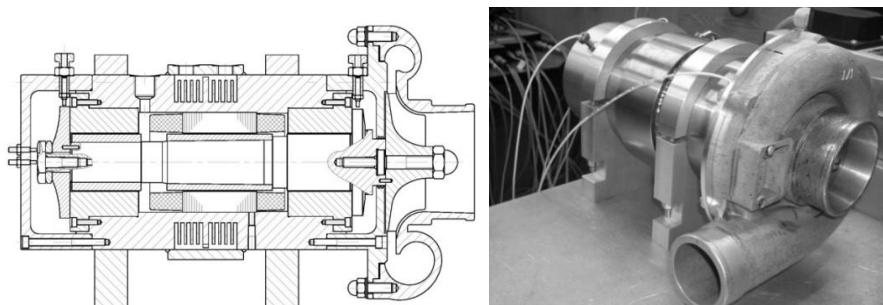
Rys. 9. Teoretyczny wykres Bodego rozważanego rotora i synchroniczna, precesyjna postać drgań przy prędkości nominalnej, będąca odpowiedzią rotora na zadane wymuszenie zewnętrzne

Fig. 9. Theoretical Bode plots of the investigated rotating system and a synchronous precessional response of the rotor at the nominal speed due to the imposed external excitations

Kolorem szarym oznaczono obszar związany ze zjawiskiem tarcia między folią nośną a czopem łożyska spowodowanym zbyt małą prędkością obrotową brakiem ciągłego filmu gazowego. Warto zauważyć, że częstość krytyczna modelowego zespołu wirującego znajduje się w tym obszarze funkcjonowania łożysk poprzecznych maszyny.

Na rys. 10 przedstawiono zbudowany dla potrzeb badań kompresor małej mocy, z wirnikiem podpartym w łożyskach foliowych promieniowych i wzdłużnych. Na fotografii widoczne są czujniki wiropędowe służące do pomiaru drgań względnych rotora maszyny.

Przeprowadzone testy rozruchu i pracy ciągłej zbudowanej maszyny oraz zarejestrowane w ich trakcie charakterystyki dynamiczne drgań względnych zespołu wirującego modelowej maszyny potwierdziły sformułowane w artykule hipotezy związane z funkcjonowaniem foliowych łożysk poprzecznych i wzdłużnych.



Rys. 10. Mała wysokoobrotowa sprężarka promieniowa podparta w łożyskach foliowych

Fig. 10. Small high-speed compressor supported in the compliant foil bearings

5. WNIOSKI

Podczas badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym i w trakcie badań modelowej maszyny przepływowej wyposażonej w opracowane i zbudowane łożyska foliowe zebrano istotne informacje nt. globalnych właściwości dynamicznych podatnej struktury foliowej. Pozwoliło to na potwierdzenie przyjętych hipotez związanych z funkcjonowaniem łożysk foliowych oraz posłuży do weryfikacji opracowywanego nieliniowego modelu kompletnego łożyska foliowego.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia, zbudowane i badane łożyska foliowe posiadają korzystną charakterystykę tłumienia. W użytecznym zakresie prędkości obrotowej, podatna struktura elastycznych folii charakteryzuje się znacznymi właściwościami tłumiącymi związanymi z rozpoznanymi zjawiskami tarcia strukturalnego w zespole podatnych folii.

Połączenie modelu struktury folii z opracowanym wcześniej numerycznym modelem filmu gazowego o dowolnej geometrii uformowanej pomiędzy cylindrycznym czopem i elastyczną folią nośną pozwoli na opracowanie wiarygodnego modelu teoretycznego kompletnego łożyska foliowego.

LITERATURA

- [1] Agrawal G.L., (1997) *Foil air/gas bearing technology – an overview*. ASME Int. GT & A Congress., Orlando (USA), 97-gt-347.
- [2] Andres L., Rubio D., Kim T., (2006) *Rotordynamic performance of a rotor supported on bump type foil bearings: experiments and predictions*. ASME Turbo Expo, Barcelona (Spain), GT2006-91238.
- [3] Kozanecki Z., Kozanecka D., (2010) *Theoretical and experimental investigations of oil-free support systems to improve the reliability of industrial turbomachinery* The 8th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics, 2010/KIST, Seoul, Korea, pp. 686-692.
- [4] Kozanecki Z., Miazga K., Tkacz E., Łagodziński J., (2011) *Investigations of Coating Materials for Air-Foil Bearings*, Ciepłe Maszyny Przepływowe nr 140, s.149-156, IMP PŁ, Łódź, 2011.