

Mgr inż. Paweł BAGIŃSKI

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.209

Dr inż. Sławomir BANASZEK

Dr inż. Grzegorz ŻYWICA

Prof. dr hab. inż. Jan KICIŃSKI

Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku

Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin

## **CHARAKTERYSTYKI CIEPLNE ŁOŻYSKA FOLIOWEGO PRACUJĄCEGO W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE W WARUNKACH ROZBIEGU, WYBIEGU I PRACY ZE STAŁĄ PRĘDKOŚCIĄ OBROTOWĄ**

*Streszczenie: W artykule zaprezentowano pomiary drgań węzłów łożyskowych wirnika posadowionego na aerodynamicznych łożyskach foliowych oraz pomiary rozkładu temperatur łożyska podczas pracy układu wirnikowego w podwyższonej temperaturze. Przeprowadzone badania pozwalają na określenie charakterystyk pracy układu wirnikowego w różnych warunkach, ilości i rozkładu generowanego ciepła, a także własności dynamicznych łożyska. Badania mogą również posłużyć do oceny bezpieczeństwa użytkowania oraz trwałości zaproponowanego układu wirnikowego.*

## **THERMAL CHARACTERISTICS OF THE FOIL BEARING OPERATING AT ELEVATED TEMPERATURE DURING RUN-UP, RUN-DOWN AND CONSTANT SPEED OPERATION**

*Abstract: The paper presents the bearings vibration measurements of the rotor supported by aerodynamic foil bearings and the temperature distribution in the bearing during operation at elevated temperatures. The conducted experimental investigation allows to determine the operating conditions of such a rotor system, the amount and distribution of heat as well as the dynamic properties of the bearing. The results of the studies may help to carry out an evaluation of the durability and safety-in-use of the proposed rotor system.*

*Słowa kluczowe: łożyska foliowe, niestabilność termiczna, dynamika wirnika, mikroturbiny*

*Keywords: foil bearings, thermal instability, rotor dynamics, microturbines*

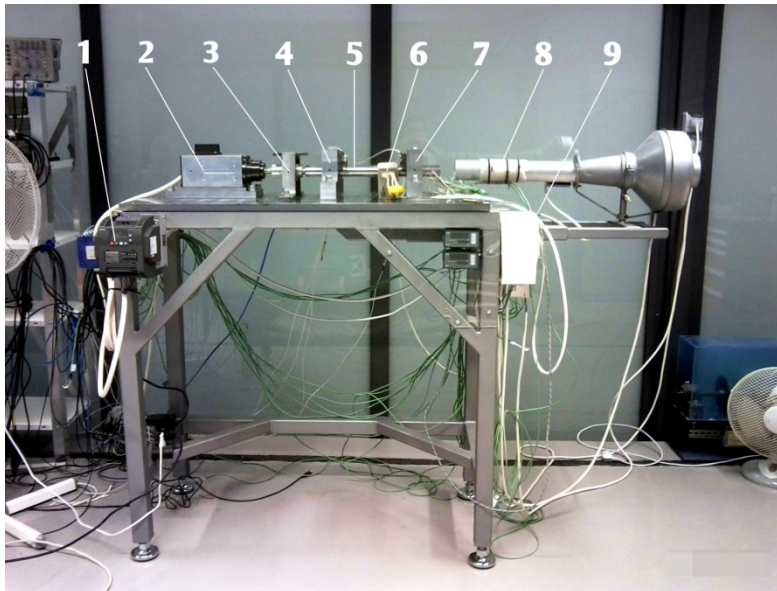
### **1. CEL I ZAKRES PRACY**

Celem prac było określenie wpływu wysokich temperatur otoczenia na dynamikę wirnika posadowionego na łożyskach foliowych. W ramach przeprowadzonych badań porównano wyniki pomiarów dokonanych w pokojowej oraz podwyższonej temperaturze [1-3, 5]. Badania przeprowadzono w Laboratorium Wibrodiagnostyki IMP PAN, na specjalnie do tego

celu zaprojektowanym stanowisku badawczym, wyposażonym w urządzenia grzejne oraz osłony termiczne ograniczające straty ciepła do otoczenia.

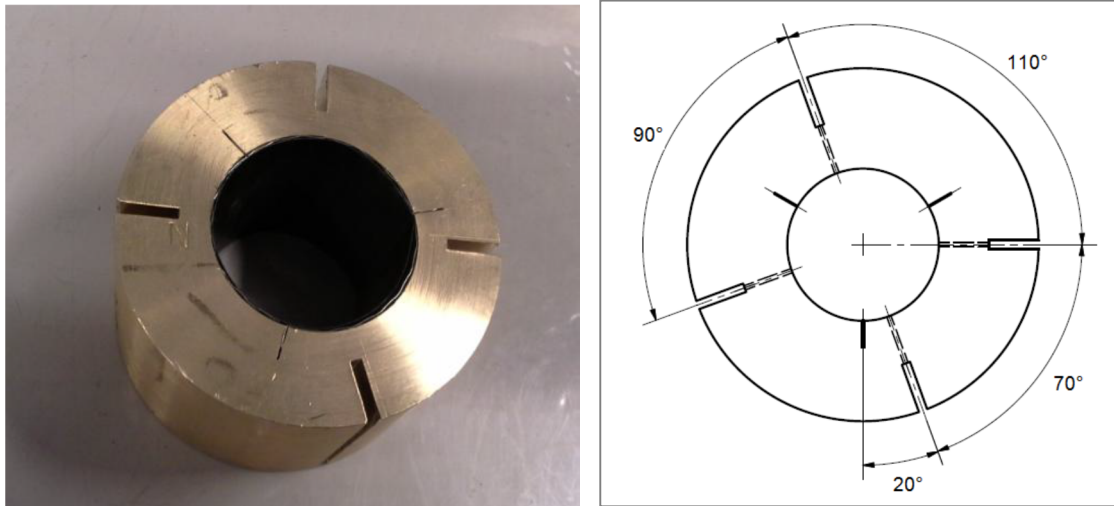
## 2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, wyposażonym w dwupodporowy wirnik laboratoryjny, łożyskowany na łożyskach foliowych. Schemat stanowiska pokazany jest na rys. 1. Podstawę stanowiska stanowi masywna, stalowa płyta z otworami montażowymi, która wraz ze specjalnie zaprojektowaną konstrukcją nośną tworzy rodzaj „stołu”. Na płycie montowane są stojaki łożyskowe oraz podstawki do mocowania czujników. Napęd stanowiska jest realizowany przy użyciu wysokoobrotowego elektrowrzeciona, za pośrednictwem sprzęgła. Stojaki łożyskowe są dzielone, co pozwala na szybką wymianę badanych łożysk. W pobliżu węzła łożyskowego nr 2 umieszczono urządzenia grzejne w postaci tzw. „działa ciepłego” oraz promienników podczerwieni. „Działo ciepłe” (ang. *heat gun*), zbudowane z rury grzejnej i wentylatora kanałowego, realizuje podgrzewanie układu poprzez wymuszony nadmuch powietrza o określonej temperaturze, z możliwością regulacji zarówno temperatury, jak i natężenia przepływu powietrza. Jego strumień jest w tym przypadku skierowany na węzeł łożyskowy, od strony wolnego końca wału.



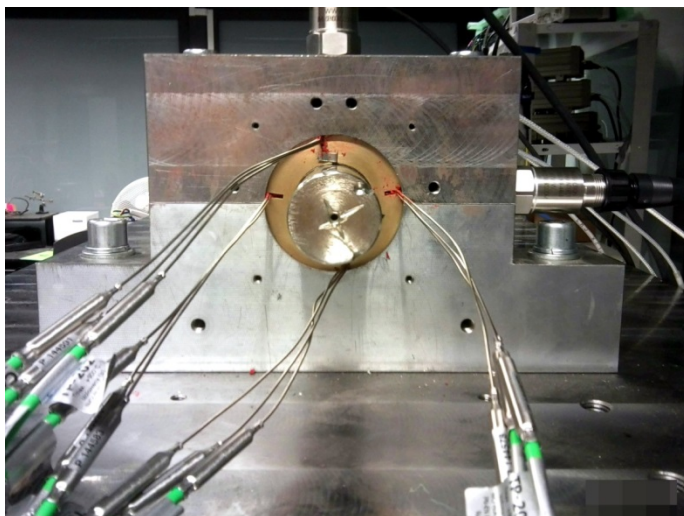
Rys. 1. Stanowisko badawcze dynamiki wirników – widok ogólny, bez osłon termicznych:  
 1 – układ regulacji napędu,  
 2 – silnik napędowy (elektrowrzeciono),  
 3 – sprzęgło,  
 4 – podpora nr 1,  
 5 – wał wirnika,  
 6 – promienniki podczerwieni,  
 7 – podpora nr 2,  
 8 – działo ciepłe, 9 – układ regulacji urządzeń grzewczych

Promienniki podczerwieni realizują dodatkowe podgrzewanie wału poprzez promieniowanie. Umieszczono je w pobliżu łożyska nr 2, od strony napędu. Pełnią one funkcję pomocniczych urządzeń grzewczych. Rysunek 3 pokazuje schemat układu grzewczego stanowiska. Pełny opis urządzeń zastosowanych na stanowisku znajduje się w pracy [2]. Badane łożyska foliowe zostały zbudowane w ramach realizowanego projektu badawczego we współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych PŁ [4]. Geometrię panwi oraz jej widok wraz z zamontowanym zespołem folii przedstawia rys. 2. Rowki na wewnętrznej powierzchni tulei łożyskowej stanowią zamki zespołu folii. Rowki na powierzchni zewnętrznej służą do zamocowania termopar i wyprowadzenia ich na zewnątrz łożyska.



Rys. 2. Panew łożyska z zabudowanym zestawem folii oraz geometria panwi. Nominalna średnica wewnętrzna wynosi 34 mm

Łożysko charakteryzowało się następującymi parametrami: średnica nominalna (średnica czopa): 34 mm, średnica zewnętrzna tulei: 65 mm, długość łożyska: 40 mm, grubość folii: 0,1 mm, materiał folii: Inconel 625, materiał folii ślizgowej: Inconel 625 z powłoką fluoropolimerową, materiał czopa: stal stopowa z powłoką z tlenku chromu ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) [4]. Wcześniejsze doświadczenia zespołu w kwestii pomiarów temperatury wykazały, że sposób zabudowania i umocowania elementów pomiarowych (termopar) ma kluczowe znaczenie nie tylko dla dokładności pomiaru, ale także dla prawidłowego działania łożyska foliowego. W wyniku złego montażu termopar może dojść do uszkodzenia warstwy ślizgowej folii, co skutkuje znacznym, lokalnym wzrostem temperatury i w konsekwencji – zniszczeniem łożyska [2, 3]. Pomiar temperatury folii ślizgowej był realizowany za pomocą termopar typu K, o średnicy 1 mm, z osłoniętą spoiną pomiarową. Sposób montażu termopar miał umożliwiać styk ich końcówek z zewnętrzną powierzchnią folii ślizgowej. W tym celu nawiercono w panwi otwory o średnicy 4 mm, w które wsunięto końcówki termopar tak, aby stykały się z zewnętrzną powierzchnią folii. Przewody termopar wyprowadzono poprzez rowki wyfrezowane w zewnętrznej powierzchni tulei i zamocowano je za pomocą silikonu wysokotemperaturowego.



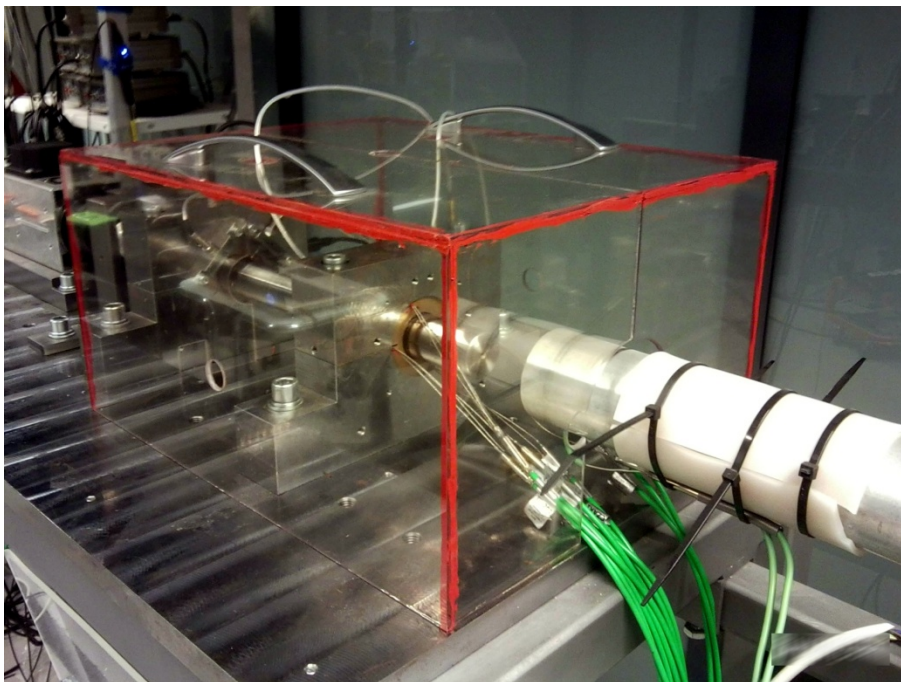
Rys. 3. Widok łożyska grzanego od strony wolnego końca wału; widoczny sposób wyprowadzenia termopar do panwi łożyskowej

Rowki i otwory znajdowały się w pozycjach odpowiadających  $20^\circ$ ,  $100^\circ$  (tzw. termopary „górne”) oraz  $200^\circ$  i  $290^\circ$  (tzw. termopary „dolne”) kąta obrotu wału wirnika (licząc od pozycji „zamka” folii w położeniu pionowo w górę). Dzięki temu jest możliwe określenie obwodowego rozkładu temperatur łożyska. W celu określenia rozkładu temperatur wzdłuż łożyska, w każdym z tych położen kątowych umieszczono po trzy termopary (w trzech równoległych płaszczyznach). Łącznie w łożysku zamontowano 12 termopar (rys. 3).

### 3. PRZEBIEG I WYNIKI POMIARÓW

#### 3.1. Założenia i przebieg badań

Badania polegały na pomiarach drgań układu wirnikowego oraz rozkładu temperatury w aerodynamicznym łożysku foliowym, pracującym w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze podwyższonej. W tym celu realizowano podgrzewanie układu (węzła łożyskowego nr 2) z wykorzystaniem dostępnych urządzeń grzejnych. Zakładano osiągnięcie temperatur łożyska ok.  $150^\circ\text{C}$ , ze względu na to, iż taką, a nawet wyższą temperaturę notuje się wewnątrz korpusów mikroturbin energetycznych zasilanych czynnikami niskowrzącymi. Z drugiej strony, za temperaturę graniczną uznać należy temperaturę  $200^\circ\text{C}$ , ponieważ w nieznacznie wyższej temperaturze była nakładana warstwa ślizgowa na folie gładkie łożyska. Przekroczenie tej temperatury mogłoby spowodować stopienie warstwy ślizgowej i zniszczenie łożyska. Podczas pomiarów w podwyższonej temperaturze wykorzystano osłonę termiczną. Została ona wykonana z tafli szklanych łączonych silikonem wysokotemperaturowym. Rysunek 4 przedstawia widok węzła łożyskowego nr 2 (tzn. gorącego) z zastosowaną osłoną termiczną.

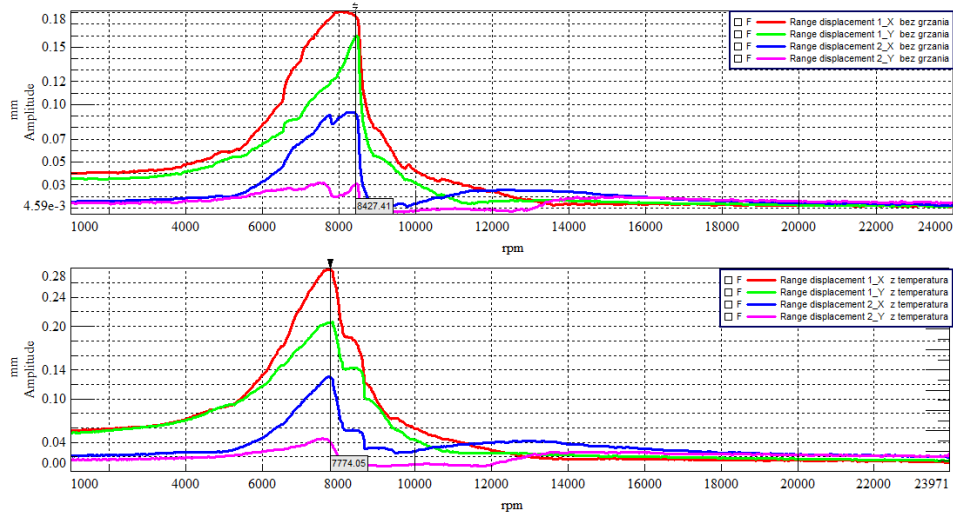


Rys. 4. Widok węzła łożyskowego nr 2 z zastosowaną osłoną termiczną

Wycięte otwory umożliwiają założenie osłony na wirnik, doprowadzenie wylotu działa cieplnego oraz przepływ nagrzanego powietrza. Zastosowanie osłony ma na celu ograniczenie ucieczki gorącego powietrza (strat ciepła) z otoczenia gorącego węzła łożyskowego i zbliżenie się przez to do warunków panujących wewnątrz rzeczywistego urządzenia.

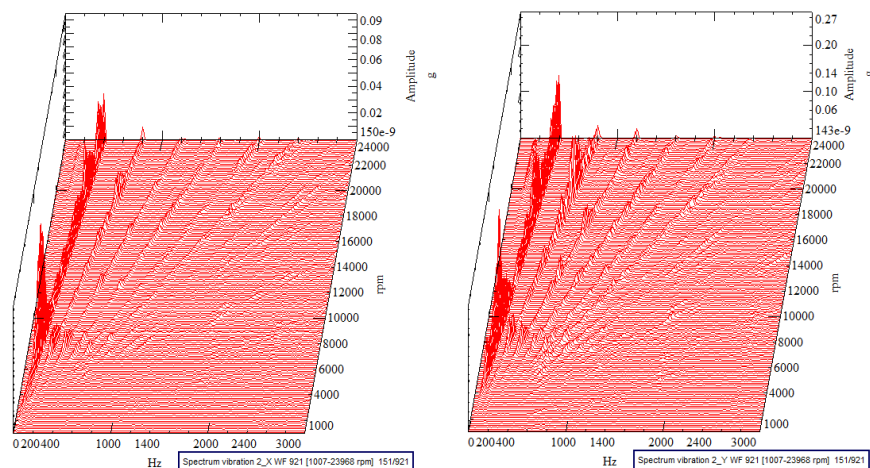
### 3.2. Pomiar podczas rozbiegu i wybiegu na gorąco i zimno

Autorzy przeprowadzili wiele badań w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej. W artykule zaprezentowano tylko niektóre z wyników. Rysunek 5 prezentuje porównanie amplitud drgań wirnika podczas rozbiegu w temperaturze pokojowej i podwyższonej (temp. max. ok. 140°C). Wyraźnie widać, że w podwyższonej temperaturze obniża się prędkość krytyczna układu wirnikowego z 8427 obr/min (140,45 Hz) do 7774 obr/min (129,57 Hz). Jest to spowodowane obniżeniem się sztywności łożyska pod wpływem nagrzania.



Rys. 5. Porównanie amplitud drgań podczas rozbiegu wirnika w temperaturze pokojowej i podwyższonej

Rysunek 6 pokazuje wykresy kaskadowe przyspieszeń drgań łożyska grzanego w kierunku poziomym i pionowym podczas rozbiegu w temperaturze podwyższonej. Można zauważyć, że dominującą składową była ta pochodząca od prędkości obrotowej, choć widocznych było dużo więcej. W kierunku pionowym druga synchroniczna wyróżniała się podwyższonym poziomem drgań.



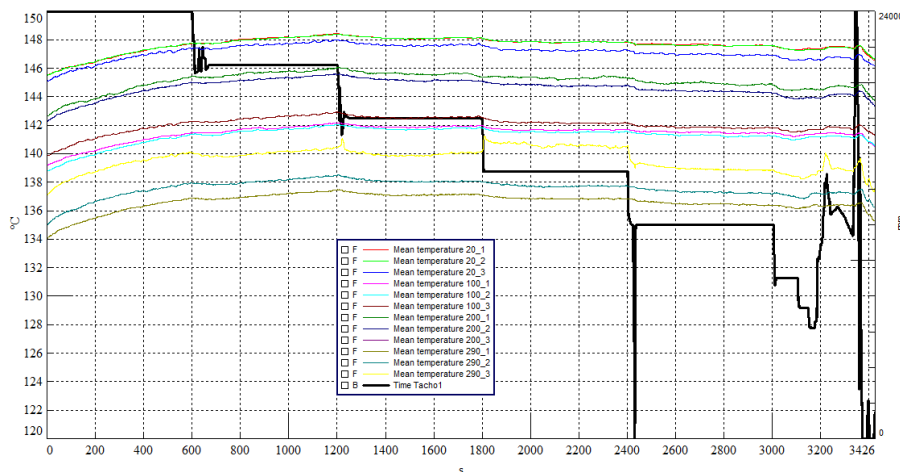
Rys. 6. Wykresy kaskadowe przyspieszeń drgań łożyska grzanego w kierunku poziomym (po lewej) i pionowym (po prawej) podczas rozbiegu w temperaturze podwyższonej

Autorzy porównali także trajektorie drgań na zimno i na gorąco dla różnych prędkości obrotowych wirnika. Po bliższej analizie zaobserwowano zwiększającą się mimośrodowość

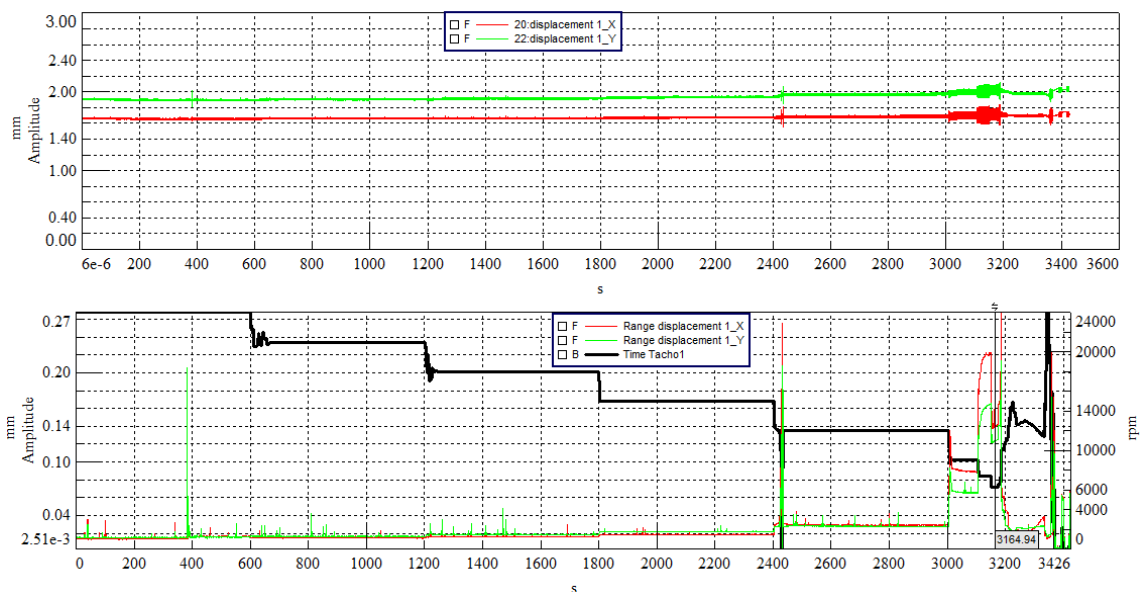
wirnika, czyli przemieszczenie środków trajektorii drgań ku wyższym współrzędnym, a więc dalej od środka łożyska. Zmiany amplitud drgań były stosunkowo niewielkie, a zmiany kształtu trajektorii nie świadczyły o występowaniu zjawiska niestabilności termicznej łożyska w badanym zakresie prędkości obrotowych i temperatur.

### 3.3. Pomiar podczas powolnego obniżania prędkości obrotowej wirnika

Przeprowadzono pomiary drgań podczas stopniowego obniżania prędkości. Układ wirnikowy nagrzano i po rozpedzeniu do prędkości maksymalnej 24 000 obr/min rozpoczęto rejestrację. Następnie prędkość była stopniowo (co 10 min) obniżana o ok. 3000 obr/min. Pomiar ten może mieć znaczenie uzupełniające względem pomiarów rozbiegu i wybiegu. Rysunek 7 przedstawia przebieg zmian temperatur, z kolei rysunki 8 i 9 – odpowiednio drgania łożyska nr 1 i 2. Temperatury w łożysku rosły podczas pracy wirnika z prędkościami 24 000 i 21 000 obr/min. Przy niższych prędkościach ustabilizowały się. Maksymalna temperatura osiągnęła 148°C. Wirnik utrzymywał swoje położenie w obu łożyskach, natomiast amplitudy drgań przy każdej zmianie prędkości zwiększały się, osiągając maksymalnie ok. 35  $\mu\text{m}$ .

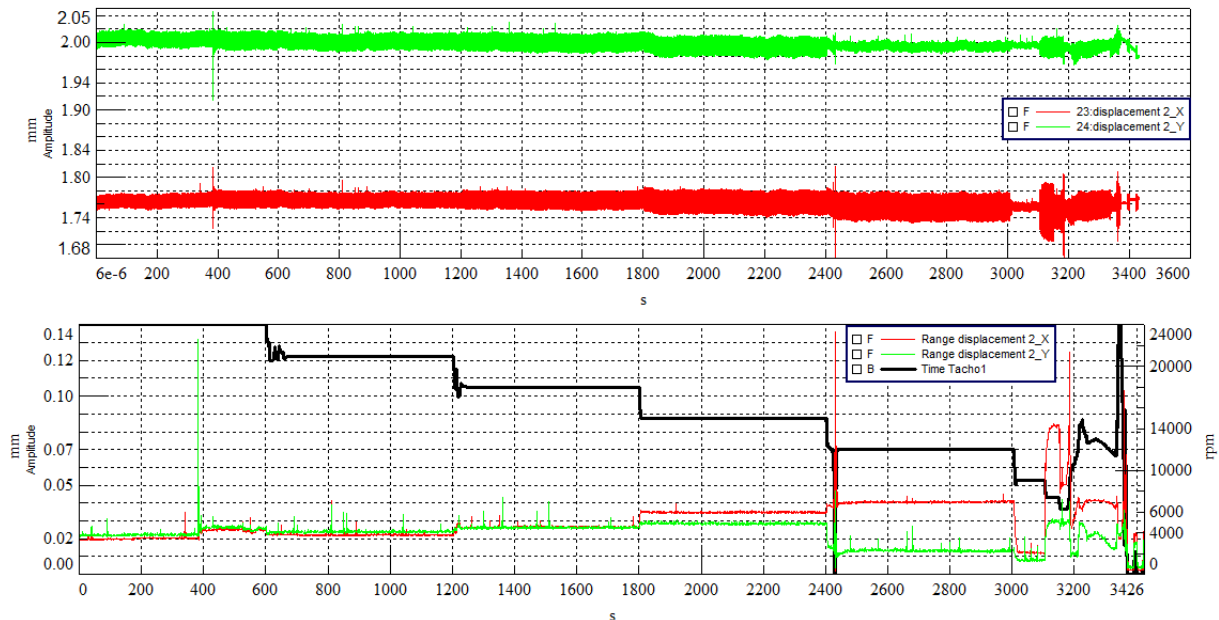


Rys. 7. Temperatury podczas pomiaru przy powolnej zmianie prędkości obrotowej



Rys. 8. Drgania względne w łożysku nr 1 podczas pomiaru przy wolnej zmianie prędkości. U góry – przebiegi czasowe przemieszczeń wału, u dołu – amplitudy drgań

Na rysunkach 8 i 9 można było zaobserwować nagłe wzrosty drgań przy szybkiej zmianie prędkości do 12 000 obr/min (ok. 2450 s). Można stwierdzić, że film smarny nie był trwały w tych warunkach, a w późniejszym czasie odbudował się i łożysko pracowało stabilnie. Zmiana geometrii podatnych folii podczas pracy układu jest główną zaletą łożysk foliowych (geometria dostosowuje się do warunków pracy). Zaobserwowano także wzrost poziomu drgań przy prędkości 9000 obr/min, a poniżej tej prędkości układ tracił stabilność.



Rys. 9. Drgania względne w łożysku nr 2 podczas pomiaru przy wolnej zmianie prędkości. U góry – przebiegi czasowe przemieszczeń wału, u dołu – amplitudy drgań

Różnice pomiędzy łożyskiem pracującym na zimno i w podwyższonej temperaturze były również obserwowane w wartości amplitud drgań. W gorącym węzle łożyskowym drgania były nieznacznie większe. Na sygnale z termopar nie odnotowano tych zjawisk, ponieważ miały one dużą bezwładność cieplną.

#### 4. PODSUMOWANIE

Podczas przeprowadzonych badań udało się uzyskać temperatury zespołu folii łożyskowych rzędu 130÷140°C, wobec zakładanych 150°C. Dla takich temperatur nie zaobserwowano drastycznego wpływu temperatury na dynamikę wirnika. Zaobserwowano wprawdzie zwiększanie się mimośrodowości wirnika oraz amplitud drgań, jednak w badanym zakresie prędkości obrotowych i temperatur wydają się one dopuszczalne, gdyż wynikały przede wszystkim z rozszerzalności cieplnej oraz zmian właściwości materiałów konstrukcyjnych. Różnice temperatur w obrębie łożyska nie były większe niż 10°C, co było wynikiem m.in. zastosowania osłony termicznej – dzięki temu temperatura wewnątrz osłony była bardziej wyrównana. Termopary o średnicy 1 mm okazały się stosunkowo łatwe w montażu i odpowiednio trwałe, jednak ich czas reakcji wydaje się zbyt długi przy badaniach zjawisk szybkozmiennych. W przyszłości planowane jest zastosowanie termopar o mniejszej średnicy – 0,5 mm. Ze względu na długi czas nagrzewania się elementów stanowiska, nie udało się osiągnąć założonej temperatury węzła łożyskowego 150°C. W przyszłości celowe będzie zastosowanie materiałów izolacyjnych na połączeniach stalowych elementów stanowiska oraz na jego powierzchniach zewnętrznych, co powinno znacznie ograniczyć straty ciepłne.

\*\*\*

*Badania zostały wykonane w ramach projektu PBS1/A6/6/2012 pt. „Wykorzystanie materiałów termoelektrycznych do poprawy stabilności termicznej systemów łożyskowania wirników szybkoobrotowych”, który jest realizowany przez konsorcjum AGH w Krakowie i IMP PAN w Gdańsku.*

## LITERATURA

- [1] Bagiński P., Żywica G.: *Opracowanie metody badań eksperymentalnych gazowych łożysk foliowych w warunkach sprzyjających występowaniu niestabilności termicznej. Opracowanie koncepcji oraz dokumentacji wykonawczej stanowiska badawczego*, oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 987/2013.
- [2] Bagiński P., Andrearczyk A., Żywica G.: *Opracowanie metody badań gazowych łożysk foliowych w podwyższonej temperaturze. Konfiguracja i testy rozruchowe układu grzewczego stanowiska badawczego*, oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 384/2014.
- [3] Bagiński P., Żywica G., Banaszek S.: *Badania rozruchowe stanowiska badawczego łożysk foliowych w konfiguracji z dwoma podporami łożyskowymi oraz wstępne pomiary trajektorii drgań czopów i przyspieszenia podpór łożyskowych*, oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 180/2014
- [4] Kozanecki Z., Łagodziński J., Miazga K.: *Opracowanie technologii wykonania i badania gazowych łożysk foliowych*, Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn przepływowych (usługa badawcza wykonana na zlecenie IMP PAN w Gdańsku), opracowanie nr I10/501/12/34/2013, Łódź, styczeń 2014.
- [5] Bagiński P., Banaszek S., Żywica G., Kiciński J.: *Badania eksperymentalne gazowych łożysk foliowych w podwyższonej temperaturze. Wyznaczenie charakterystyk cieplnych węzła łożyskowego w warunkach rozbiegu, wybiegu i pracy ze stałą prędkością obrotową*, oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 387/2014.
- [6] Radil K., Zeszotek M.: *An Experimental Investigation Into the Temperature Profile of a Compliant Foil Air Bearing*, NASA, TM-2004-213100, 2004.