

*Dr inż. Wojciech MIĄSKOWSKI*  
*Dr inż. Krzysztof NALEPA*  
*Dr inż. Paweł PIETKIEWICZ*  
*Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie*  
*Dr inż. Grzegorz ŻYWICA*  
*Mgr inż. Paweł BAGIŃSKI*  
*Mgr inż. Łukasz BREŃKACZ*  
*Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku*

## **STANOWISKO DO BADANIA ŁOŻYSK FOLIOWYCH W CYKLU START-STOP**

*Streszczenie: W artykule przedstawiono stanowisko do badań typu Start-Stop, które zostało zaprojektowane do testów przydatności materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych aerodynamicznych łożysk foliowych. Jest to jeden z modułów stanowiska badawczego wykorzystywanego w badaniach łożysk maszyn szybkoobrotowych opracowywanych w ramach projektu POIG.01.03.01-00-027/08 pt. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikroturbin energetycznych”.*

## **STAND FOR THE FOIL BEARING TEST IN THE START-STOP CYCLE**

*Abstract: A laboratory stand for Start-Stop type tests, that was designed to research materials and different aerodynamic foil bearing construction variants usability is presented in this paper. It is one of blocks of the test stand utilized in the high-speed rotor machine bearings research conducted within the project POIG.01.03.01-00-027/08 entitled “Using intelligent materials and structures to develop and implement the concept of the innovative bearing system in power microturbine rotors”.*

### **1. WPROWADZENIE**

Szybkoobrotowe maszyny energetyczne charakteryzują się złożonym cyklem pracy. Jest to przeważnie długi czas pracy w warunkach ustalonych i krótkie czasy rozbiegu i wybiegu. Łożyska foliowe, element systemu łożyskowania, pracując w warunkach ustalonych, działają jako aerodynamiczne łożyska z odkształcalną panwią. W zakresie obciążeń nieprzekraczających nośności łożyska, nie występują w nich zjawiska kontaktowe między wałem a elementami systemu łożyskowania. Najbardziej newralgiczne pod względem powodowania zużycia elementów systemu łożyskowania są rozbieg i wybieg. Na początku rozbiegu folia ślizgowa jest zaciśnięta na czopie wału, a więc występują tu intensywnie zjawiska tarcia, a co za tym idzie – zużycia elementów węzła łożyskowego. Wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej wału, folia ślizgowa odrywa się od powierzchni czopa, tworząc szczelinę, w której formuje się warstwa nośna powietrza, zanika tym samym kontakt między czopem wału a folią ślizgową – łożysko przechodzi w tryb pracy w warunkach ustalonych. Wybieg maszyny następuje w sposób przeciwny do rozbiegu. Wraz ze spadkiem prędkości obrotowej zmniejsza się wielkość szczeliny powietrznej aż do ponownego kontaktu folii ślizgowej z powierzchnią wału i jej zaciśnięcia.

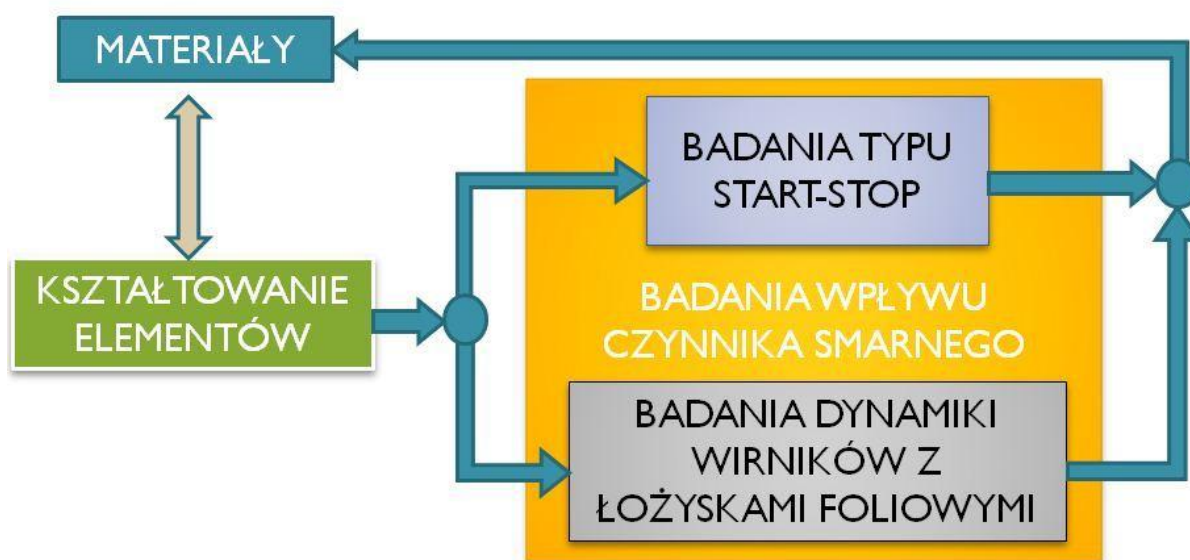
Dobór materiałów na współpracujące ze sobą elementy węzła łożyskowego (folia ślizgowa – czop wału; folia ślizgowa – folia sprężysta; folia sprężysta – obudowa modułu łożyskowego), powoduje konieczność przeprowadzenia badań eksploatacyjnych umożliwiających określenie przydatności badanych materiałów do wytworzenia z niego poszczególnych elementów łożyska foliowego.

W związku z przesłankami opisanymi wyżej, niezbędne jest zbudowanie wyspecjalizowanego stanowiska badawczego umożliwiającego przeprowadzenie badań wielokrotnego cyklu rozruch – praca – wybieg – przerwa.

Badania prowadzone na tym stanowisku, odtwarzając charakter pracy łożyska w warunkach eksploatacyjnych, pozwalają na określenie trwałości łożysk, ale również na dokonanie wyboru materiałów tworzących pary kinematyczne w węźle łożyskowym.

## 2. PLAN BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono schemat badań związanych z opracowaniem wstępnych prototypów łożysk foliowych [2]. Jednym z elementów schematu są badania typu Start-Stop. Na schemacie widoczne jest jednak powiązanie tego etapu badań z pozostałymi aspektami pracy nad konstrukcją łożysk.



Rys. 1. Schemat planu badań

Działania prowadzone są w konsorcjum realizującym projekt POIG.01.03.01-00-027/08-00 pt. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikro turbin energetycznych”. Badania materiałowe pozwalają na wytypowanie materiałów na pary tribologiczne występujące w budowie łożysk foliowych. W dalszej kolejności wykonywane są badania technologiczne, mające na celu opracowanie technologii kształtowania poszczególnych elementów, w szczególności folii falistych. Na tym etapie prac możliwa jest potrzeba modyfikacji opracowanych materiałów. Po wstępnym opracowaniu technologii kształtowania elementów łożysk, można przystąpić do badań eksploatacyjnych. Ze względu na przesłanki opisane we wstępie do niniejszego artykułu, wyodrębniono badania w cyklu Start-Stop oraz w cyklu normalnej pracy łożysk. Założeniem badań eksploatacyjnych jest:

- weryfikacja doboru materiałów na elementy robocze łożysk
- weryfikacja konstrukcji elementów i całego łożyska
- weryfikacja technologii kształtowania elementów roboczych
- sporządzenie charakterystyki pracy urządzeń w różnych warunkach.

Badania eksploatacyjne, w tym w cyklu Start-Stop, będą prowadzone w dwóch trybach. Wstępne badania wykonane zostaną w środowisku powietrza (łożysko gazowe smarowane powietrzem), następnie badania zostaną powtórzone w środowisku czynnika smarnego z grupy rozpuszczalników organicznych. Są one trudniejsze ze względu na fakt, że wybrany do budowy systemu łożyskowania czynnik należy do tzw. niskowrzących. Badania eksploatacyjne będą wspomagane symulacjami numerycznymi [3]. Wyniki eksperymentu pozwolą na dostrojenie modeli numerycznych, natomiast wyniki badań symulacyjnych pozwolą ograniczyć liczbę wykonywanych cykli doświadczenia.

### 3. UKŁAD NAPĘDOWY

Napęd stanowiska ma za zadanie dostarczyć energię mechaniczną do rozruchu łożyska foliowego. W chwili startu, ze względu na występowanie tarcia między folią ślizgową a powierzchnią czopa wału, łożysko foliowe generuje moment hamujący o pewnej wartości. Aby możliwy był rozruch, zespół napędowy musi być w stanie wytworzyć moment napędowy większy od momentu startowego łożyska foliowego oraz osiągać prędkości obrotowe powyżej 10 000 obr/min.

Elektrowrzeciono stanowiące silnik napędowy stanowiska do badań cyklu Start-Stop zostało połączone z układem sterowania, zabezpieczeń i regulacji prędkości obrotowej. Całość układu elektrycznego i elementów automatyki zabezpieczeniowej oraz sterującej umieszczono w szafie sterowniczej. W zespole napędowym zastosowano elektrowrzeciono RV73 firmy Colombo. Jego moc znamionowa wynosi 2,2 kW przy maksymalnej prędkości obrotowej 24000 obr/min. Jest to elektrowrzeciono wysokoobrotowe, którego zakres dostępnych prędkości obrotowych pozwala na użycie go w układzie napędowym prezentowanego w niniejszym opracowaniu modułu stanowiska badawczego.

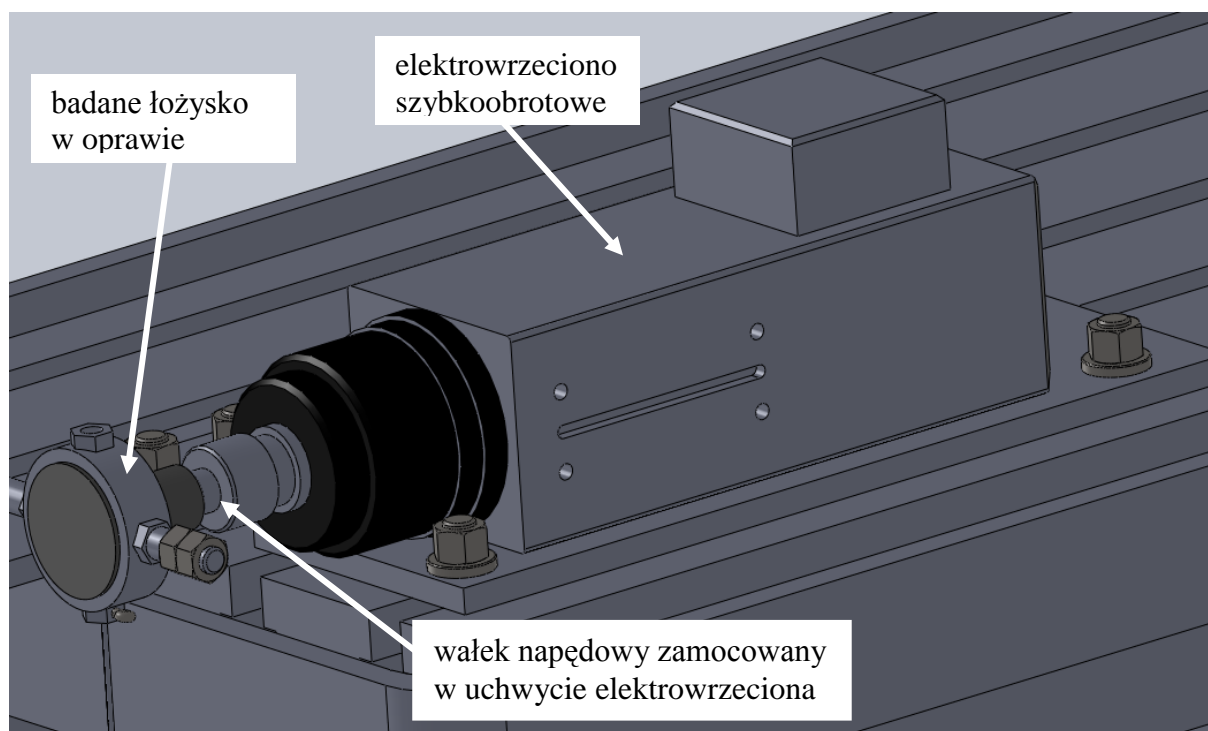
Realizacja cyklu rozpędzania, utrzymania prędkości roboczej i wybiegu możliwa jest dzięki programowalnemu falownikowi Integrator AC 690+ firmy Parker. Jest to uniwersalny napęd prądu przemiennego wyposażony w 32-bitowy mikroprocesor, zawierający model sterowania silnika.

### 4. KONCEPCJA BUDOWY STANOWISKA DO BADAŃ W CYKLU START-STOP

Rozważano kilka koncepcji budowy stanowiska do badań w cyklu Start-Stop [1]. Najprostszym i przyjętym do realizacji rozważanym rozwiązaniem (rys. 2) jest wykorzystanie elektrowrzeciona szybkoobrotowego, przewidzianego przez producenta do zastosowania w obrabiarkach skrawających. Bezpośrednio w uchwycie narzędziowym elektrowrzeciona umieszczony jest wałek, na którym mocowane będą tuleje o kształcie i średnicy zewnętrznej odpowiadającej wymiarom badanego czopa wału badanego łożyska foliowego. Na tulei osadzone zostaną elementy łożyska foliowego, począwszy od folii ślizgowej przez folię falistą do obudowy łożyska, która umieszczona zostanie w standaryzowanej oprawie



łożyskowej. Oprawa łożyskowa zostanie podparta punktowo poprzez pręt wywierający nacisk na czujnik siły. Umożliwi to pomiar momentu oporów rozruchu w łożysku. Zmiana wartości momentu oporowego w czasie badań może być wskaźnikiem zużycia elementów łożyska



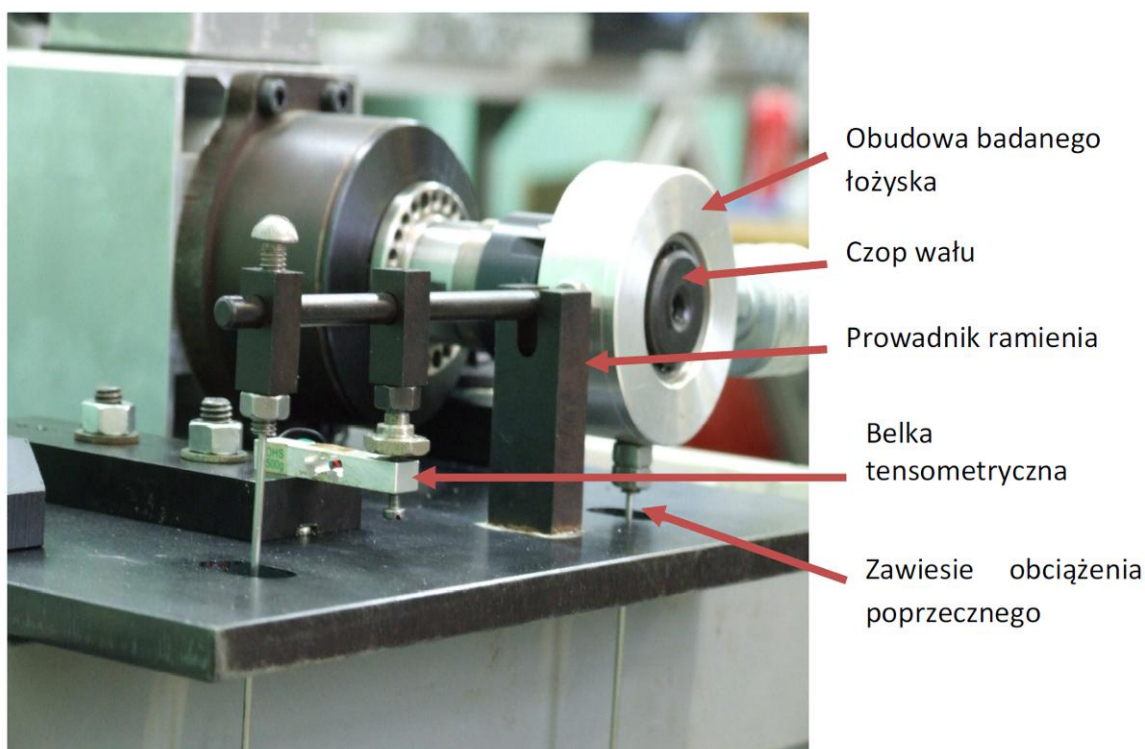
Rys. 2. Układ napędowy z wałkiem łożyska zamocowanym bezpośrednio w uchwycie narzędziowym elektrowrzeciona

## 5. SYSTEM POMIARU PARAMETRÓW CYKLU START-STOP

Konstrukcja prezentowanego stanowiska oprócz prowadzenia badań rozruchu – pracy – wybiegu według zadanego cyklu, umożliwia dokonywanie pomiarów podstawowych parametrów pracy łożyska. Z punktu widzenia optymalizacji konstrukcji łożyska oraz doboru materiałów na pary kinematyczne węzła łożyskowego istotny jest pomiar następujących wielkości:

- momentu oporowego generowanego w łożysku w czasie rozruchu
- prędkości obrotowej, przy której następuje oderwanie folii ślizgowej łożyska od powierzchni czopa wału. Jest to chwila, w której łożysko przechodzi ze stanu pracy w warunkach kontaktu między elementami czynnymi węzła łożyskowego do warunków pracy jako łożysko hydrodynamiczne (aerodynamiczne).

Pomiar momentu oporowego odbywa się za pomocą tensometrycznego czujnika siły nacisku (rys. 3). Siła ta wywierana jest na czujnik poprzez pręt z punktowym elementem kontaktowym o ustalonej odległości punktu nacisku od środka obrotu łożyska.



Rys. 3. Stanowisko badawcze cyklu Start-Stop

Sterowanie przebiegiem badań oraz odczyt mierzonych wielkości odbywa się za pomocą opracowanej aplikacji komputerowej.

Podstawowe funkcje oprogramowania modułu stanowiska do badań cyklu Start-Stop pozwalają na:

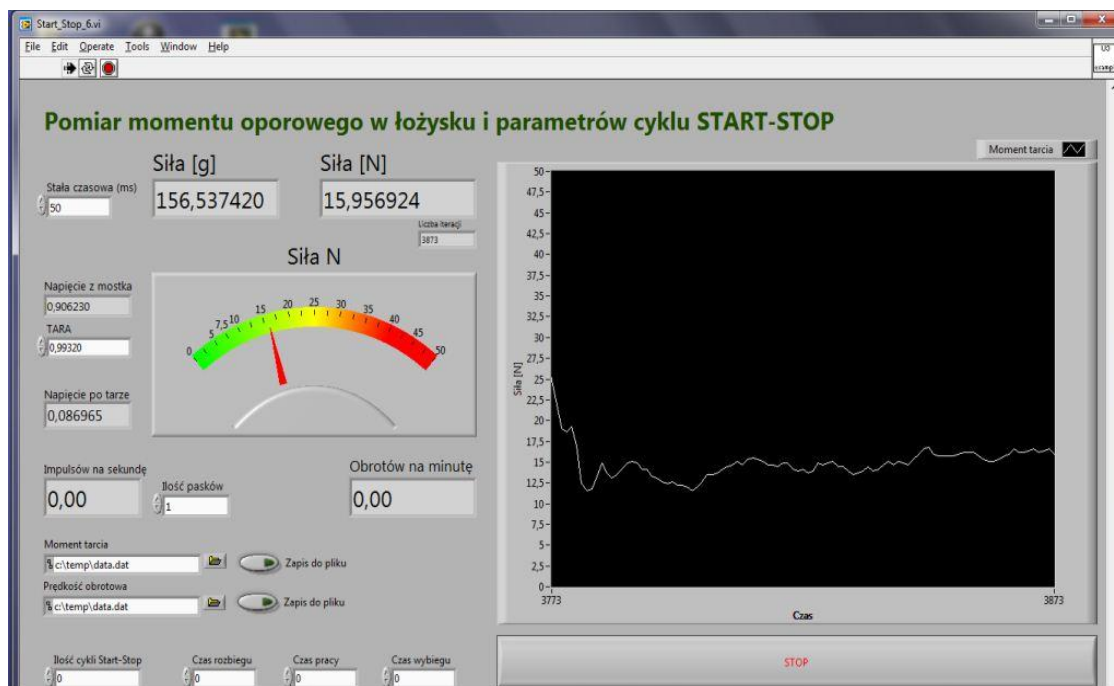
- uruchomienie silnika napędowego i przeprowadzenie procedury rozruchu oraz wybiegu
- pozyskanie informacji z czujników umieszczonych na stanowisku w okresie rozruchu, normalnej pracy i wybiegu
- przetworzenie otrzymanych danych w trakcie pracy stanowiska i ich zapisanie w plikach archiwum.

Połączenie pomiędzy elementami mechanicznymi modułu Start-Stop a oprogramowaniem zrealizowano z użyciem wielofunkcyjnego programowalnego modułu interfejsu DAQ typu LabJack U3-HV firmy Eagle wyposażonego dodatkowo w moduł wzmacniacza instrumentalnego do współpracy z tensometrycznym czujnikiem siły.

Budowa i funkcjonalność LabJack U3-HV wyposażonego dodatkowo we wzmacniacz pomiarowy pozwala na zbudowanie w prosty sposób systemu sterowania i akwizycji danych pomiarowych współpracującego z komputerem klasy PC, przy czym komputer ten stanowi jednostkę komunikacji z użytkownikiem oraz pamięć masową do archiwizacji danych pomiarowych.

Aplikacja została zbudowana w środowisku LabView. Widok okna głównego programu pracującego na komputerze klasy PC przedstawia rysunek 4.





Rys. 4. Okno programu do sterowania i akwizycji danych pomiarowych

## 6. PODSUMOWANIE

Opracowane stanowisko oraz metodyka badań pozwoli na zrealizowanie jednego z najtrudniejszych etapów badań dotyczących konstrukcji łożyska foliowego. Procesy zachodzące podczas rozruchu i wybiegu maszyn są nie tylko najtrudniejsze do opisu i badań, ale także mają kluczowe znaczenie dla trwałości elementów wielu urządzeń. W przypadku łożysk wysokoobrotowych wyniki badań typu Start-Stop decydują o ewentualnym zastosowaniu opracowanych konstrukcji. Pozwolą także zweryfikować materiały, technologie kształtowania oraz samą konstrukcję łożyska foliowego.

\*\*\*

*Przedstawione prace zostały wykonane w ramach realizacji projektu POIG.01.03.01-00-027/08 pt. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikroturbin energetycznych”.*

## LITERATURA

- [1] Miąskowski W., Nalepa K., Pietkiewicz P.: *Opracowanie metodyki badań typu Start-Stop łożysk szybkoobrotowych, wykonanie modułu do badań, kalibracja i testy funkcjonowania* UWM, Arch. 019/B/LOZ/2011, Olsztyn 2011.
- [2] Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P.: *Plan badań wstępnych prototypów łożysk*, UWM, Arch. 022/B/LOZ/2011, Olsztyn 2011.
- [3] Kiciński J., Bogulicz M., Żywica G., Czoska B.: *Opracowanie programu do integracji procesu obliczeniowego łożysk foliowych z uwzględnieniem deformacji podatnego zespołu folii wywołanych ciśnieniem hydrodynamicznym*, IMP PAN, nr arch. 436/2011, Gdańsk 2011.