

Michał MICHALAK*, **Remigiusz MICHALCZEWSKI***,
Witold PIEKOSZEWSKI*, **Marian SZCZEREK*,****,
Jan WULCZYŃSKI*

URZĄDZENIE DO BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE MATERIAŁÓW PRZEZNACZONYCH NA ELEMENTY ŁOŻYSK FOLIOWYCH

DEVICE FOR TESTING THE WEAR RESISTANCE OF MATERIALS FOR PARTS OF FOIL BEARINGS

Słowa kluczowe:

łożysko foliowe, stanowisko badawcze, tarcie, zużycie, folia ślizgowa, folia falista, mikroślownia kogeneracyjna, ORC, cykl start–stop

Key words:

foil bearings, tribological test device, friction, wear, top foil, bump, foil, ORC-based micro combined heat and power, Start-Stop test

Streszczenie

W artykule przedstawiono urządzenie do badania odporności na zużycie materiałów przeznaczonych na łożyska foliowe, będących m.in. węzłami kinema-

* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, Radom, Polska, e-mail: witold.piekoszewski@itee.radom.pl.

** Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, Polska.

tycznymi mikroślowni kogeneracyjnych ORC. Konieczność odpowiedniego doboru materiałów pod kątem trwałości, na folię ślizgową łożyska foliowego pracującego w otoczeniu czynnika niskowrzącego, spowodowały opracowanie i wykonanie takiego urządzenia badawczego.

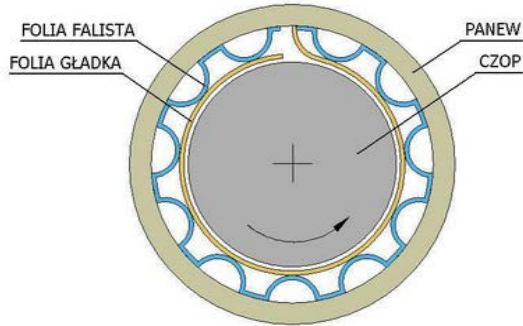
Prezentowane w artykule tribologiczne urządzenie badawcze pozwala na prowadzenie badań w skojarzeniach modelowych (folia–rolka, klocek–rolka), w otoczeniu zbliżonym do otoczenia pracy komponentowego łożyska foliowego w mikroślowniach kogeneracyjnych ORC.

WPROWADZENIE

Łożyska foliowe (**Rys. 1**), ze względu na swoje zalety, znajdują szerokie zastosowanie w budowie szybkoobrotowych i wysokotemperaturowych maszyn pracujących w technologii oil-free. Do takich maszyn można zaliczyć turbosprężarki, turbiny czy mikroturbiny [**L. 2, 4**]. Coraz szersze zastosowanie wspomnianych urządzeń oraz ciągle zwiększanie parametrów ich pracy (prędkości, temperatury pracy czy obciążenia), powodują poszukiwania innowacyjnych rozwiązań z dziedziny łożyskowania. Aby zapewnić prawidłową pracę tych urządzeń, należy w pierwszej kolejności zadbać o łożyskowanie węzłów maszyn. Parametry pracy łożysk foliowych, jakimi są wysoka prędkość obrotowa sięgająca nawet ponad 100 000 obr./min, wysoka temperatura (ponad 700°C), wymaga zastosowania odpowiednich materiałów spełniających takie warunki eksploatacyjne.

Najkorzystniejszą, ze względów ekonomicznych, drogą do dobru materiałów na współpracujące ze sobą elementy łożyska foliowego (folia ślizgowa–czop) są badania modelowe. Pozwalają one na skrócenie czasu i kosztów w odniesieniu do badań kompletnych łożysk foliowych w warunkach laboratoryjnych (badania komponentowe). Najprostszym skojarzeniem modelowym, który symuluje warunki pracy łożyska foliowego, wydaje się być skojarzenie folia–rolka. Dzięki prostemu rozwiązaniu możliwy jest szeroki dobór materiałów oraz konstytuowanie powierzchni roboczych współpracujących ze sobą elementów różnymi metodami, m.in. poprzez osadzanie cienkich powłok [**L. 7**].

Należy zaznaczyć, że w obszarze produkcji i badań łożysk foliowych obecnie na świecie przoduje Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej [**L. 1, 3**] oraz przedsiębiorstwo o charakterze jednostki badawczo-rozwojowej – Mohawk Innovative Technology Inc. (MiTi). W swojej ofercie posiadają specjalizowane rozwiązania do bezolejowych sprężarek czy prototypowe łożyska foliowe do silników odrzutowych. Zespołowi autorów zaproponowano opracowanie stanowiska, które umożliwiłoby określenie charakterystyk tribologicznych skojarzeń materiałów przeznaczonych na elementy ślizgowe łożysk foliowych przeznaczonych do mikroślowni kogeneracyjnych ORC.



Rys. 1. Łożysko foliowe – budowa [L. 5]

Fig. 1. Foil bearing [L. 5]

URZĄDZENIE BADAWCZE

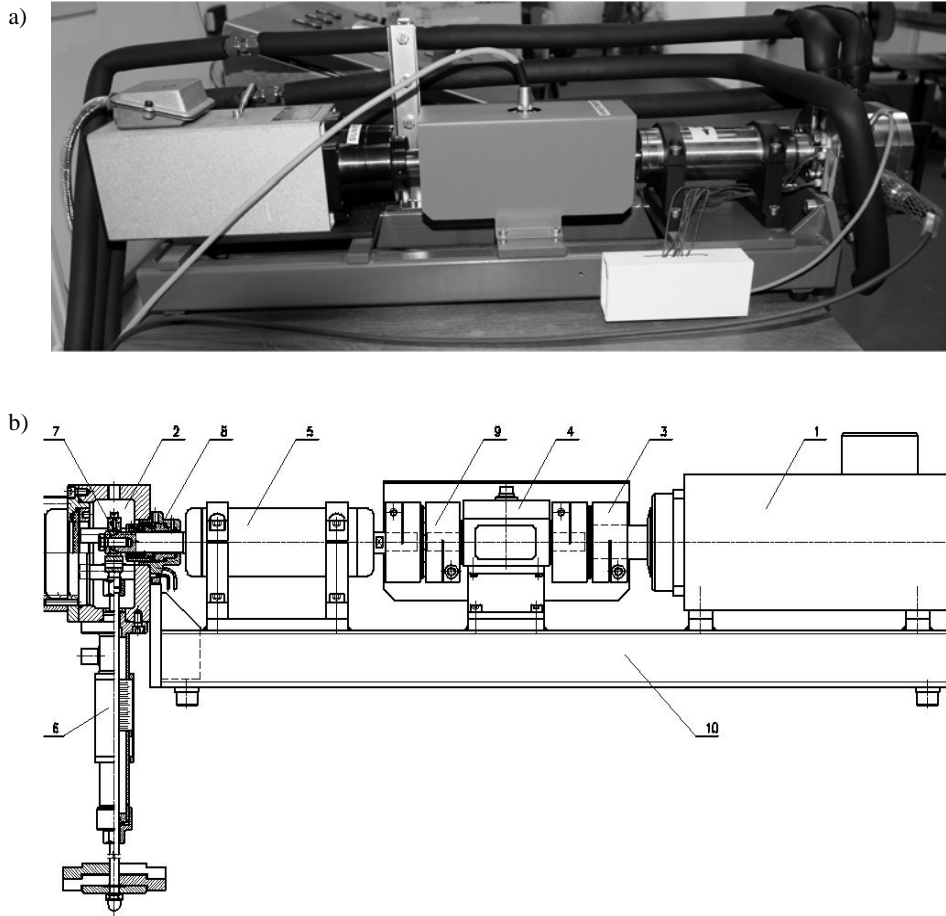
Urządzenie składa się z trzech autonomicznych zespołów: części mechanicznej, zespołu dystrybucji czynnika niskowrzącego oraz systemu sterująco-pomiarowego.

Urządzenie badawcze, zaprojektowane zostało do pracy w cyklu start–stop jak i do pracy ciągłej. Funkcjonalność ta umożliwia zbliżenie się do warunków pracy rzeczywistego łożyska foliowego [L. 6].

Część mechaniczna

Głównym elementem napędowym urządzenia badawczego (**Rys. 2**) jest asynchroniczny silnik prądu przemiennego **1** stosowany do napędu wrzecion w obrabiarkach numerycznych CNC. Istotnymi parametrami przy doborze silnika (elektryczny, pneumatyczny) były prędkość obrotowa, moment rozruchowy oraz rodzaj regulacji. Zdecydowano się na silnik elektryczny zasilany z przełącznika częstotliwości, pracującego w trybie quasi-wektorowym. Maksymalna prędkość obrotowa elektrowrzeciono **1** wynosi 18 000 obr./min, a moc znamionowa 5,5 kW.

Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na dynamiczny rozruch urządzenia, jak i pełną kontrolę prędkości obrotowej. Elektrowrzeciono **1** przekazuje energię mechaniczną do komory badawczej **2**, poprzez sprzęgła z łącznikiem płytowym **3**, czujnik momentu tarcia **4** oraz wrzeciono wysokoobrotowe **5**. Wrzeciono wprowadzone jest do komory badawczej **2**, w której za pośrednictwem układu obciążania **6** przenosi obciążenie na skojarzenie badawcze **7**. W celu zapewnienia szczelności połączenia wrzeciono–komora zastosowano uszczelnienie czołowe **8**. Wszystkie elementy wirujące zostały zakryte osłoną **9**. Całość urządzenia umieszczona jest na podstawie **10**. Zastosowanie stoppek antywibracyjnych pozwoliło na skuteczne tłumienie drgań występujących podczas pracy urządzenia.

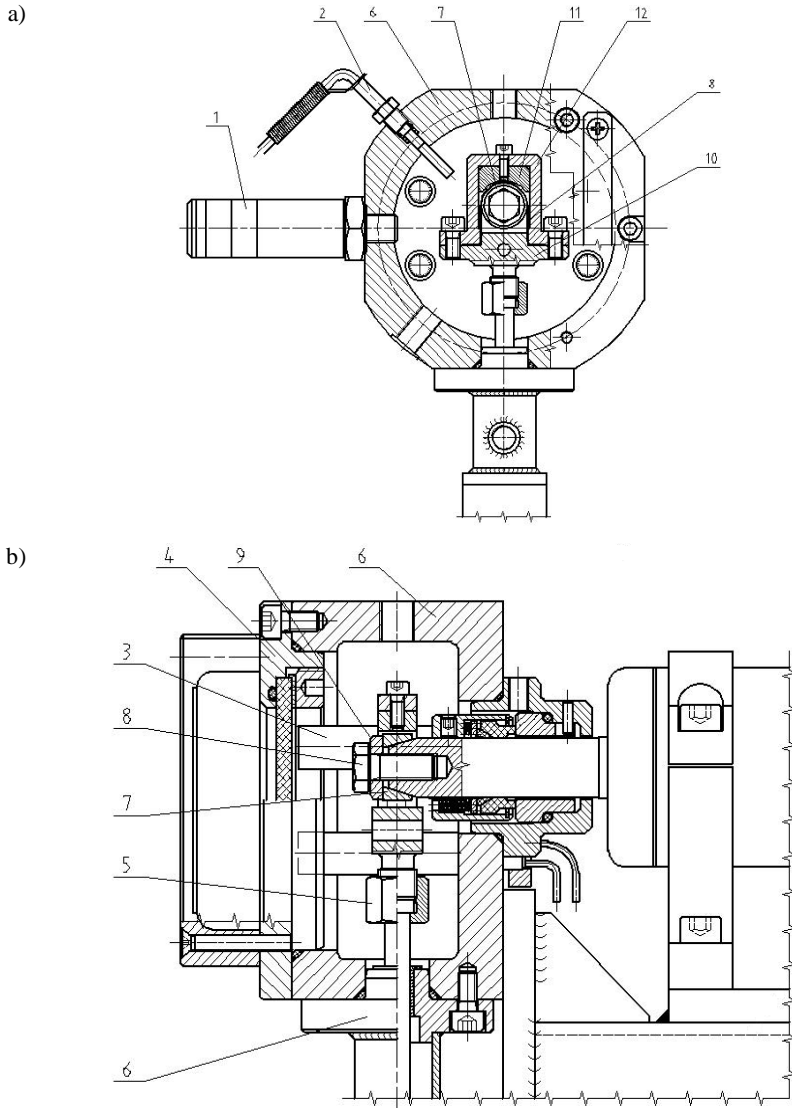


Rys. 2. Zespół mechaniczny tribologicznego urządzenia badawczego T-27 do badania materiałów na elementy łożysk foliowych: a) widok, b) schemat

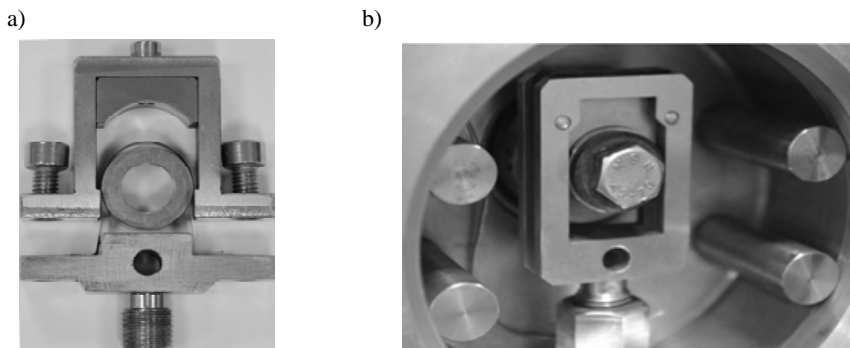
Fig. 2. Mechanical part of T-27 tribological test device for testing materials dedicated to parts of foils bearings: a) overall view, b) draft

Komora badawcza **6** urządzenia przedstawiona na **Rys. 3** wyposażona jest w czujnik ciśnienia wraz z integralnym termorezystancyjnym czujnikiem temperatury **1**. Termoelektryczny czujnik temperatury **2** pracujący w układzie regulacji czynnika niskowrzącego ma na celu pomiar i kontrolę temperatury w komorze badawczej. Elementami wykonawczymi układu regulacji temperatury są cztery elementy grzejne **3**, pracujące w dwóch układach. Pracą elementów grzejnych steruje regulator PID. Komorę badawczą zamyka pokrywa **4**, w której znajduje się otwór inspekcyjny. Rozwiązanie to pozwala na ciągłą kontrolę poziomu czynnika niskowrzącego w komorze, jak i jego stanu skupienia. Przeciwpółka **7** montowana jest na wrzecionie badawczym za pomocą

śruby **8** i podkładki **9**, które spełniają również zadanie stabilizacji oraz blokady przeciwoślizgowej. Próbka w kształcie paska folii o wymiarach $80 \times 6 \times 0,2$ mm mocowana jest w uchwycie, który następnie poprzez nakrętkę **5** połączony jest z układem obciążenia **6**. W skład uchwytu węzła badawczego wchodzi stopka **10**, ogranicznik **11** oraz obejma **12** (Rys. 3a).



Rys. 3. Komora badawcza tribologicznego urządzenia T-27: a) widok z przodu, b) przekrój
 Fig. 3. The test chamber of T-27 tribological test device: a) front view, b) profile



Rys. 4. Fotografie uchwytów: a) uchwyt wraz ze skojarzeniem folia–rolka, b) uchwyt ze skojarzeniem klocek–rolka zamontowany w komorze badawczej

Fig. 4. Holders: a) for foil on ring b) for block on ring

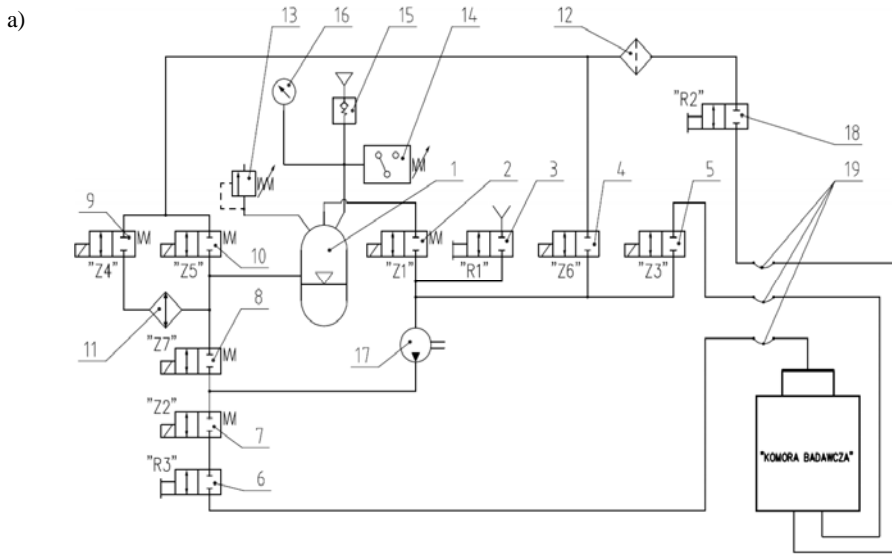
Układ dystrybucji czynnika niskowrzącego

W celu zamodelowania warunków pracy łożysk foliowych pracujących w otoczeniu czynnika niskowrzącego stanowisko badawcze zostało wyposażone w autonomiczny układ dystrybucji czynnika [L. 5, 6]. Schemat układu przedstawiony jest na **Rys. 5a**. Elementem wymuszającym ruch czynnika w układzie jest pompa zębata **17** połączona z trójfazowym silnikiem elektrycznym prądu przemiennego za pomocą sprzęgła magnetycznego. Funkcję magazynującą czynnik spełnia zbiornik **1**. Dystrybucja czynnika realizowana jest poprzez układ siedmiu elektrozaworów pracujących w czterech trybach: tankowania, pracy, odpompowania I. stopnia oraz odpompowania II. stopnia. W każdym z tych trybów uruchamiane są grupy od 2 do 4 elektrozaworów **2, 4, 5, 7, 8, 9, 10**. Układ wyposażony został w wymiennik ciepła **11**, który umożliwia szybką regulację temperatury czynnika.

W celu zapewnienia poprawnej pracy i obsługi układ wyposażony został w wymienny filtr chłodniczy **12**, zainstalowany poza komorą badawczą. Ma on za zadanie oczyszczanie czynnika niskowrzącego z produktów zużycia tak, aby nie przedostawały się do komory badawczej, a następnie do węzła tarcia.

W układzie dystrybucji zainstalowano elementy wskaźnikowe sterujące i regulujące ciśnienie robocze. Bezpośredniego odczytu wartości ciśnienia dokonuje się manometrem mechanicznym **16**. Źródło sprężonego powietrza (sprężarka) przyłączone jest do zaworu zwrotnego **15**. Sterowanie sprężarką realizowane jest przez mechaniczny presostat **14**, bezpośrednio włączony w układ czynnika niskowrzącego. Zabezpieczenie układu przed przekroczeniem zadanej wartości ciśnienia realizowane jest przez regulowany mechaniczny zawór przelewowy **13**. Spełnia on jednocześnie funkcję regulacyjną jak i funkcję zaworu bezpieczeństwa. Wszystkie materiały zastosowane w układzie dystrybucji czynnika niskowrzącego zostały dobrane pod kątem zgodności przy

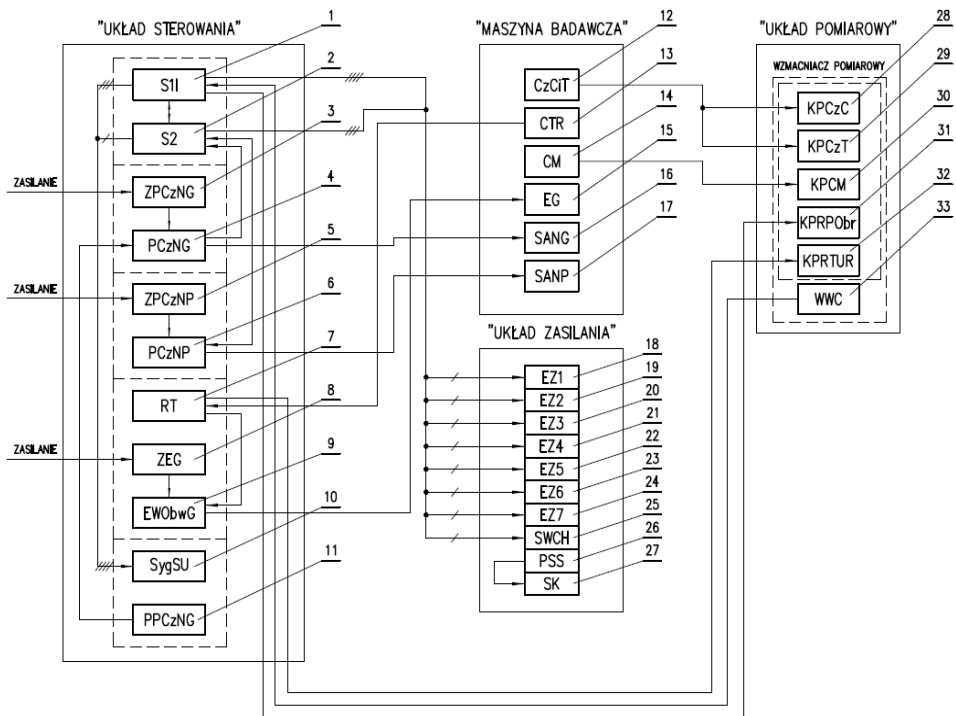
pracy z czynnikiem niskowrzącym. Czynności eksploatacyjne takie jak czyszczenie układu czy tankowanie realizowane są przez ręczne zawory kulowe **3, 6, 18**. Zastosowanie łączników elastycznych **19** pomiędzy komorą badawczą a układem zasilania umożliwi odłączenie maszyny badawczej od układu zasilania czynnikiem celem dokonywania przeglądów obu urządzeń.



Rys. 5. Układ dystrybucji czynnika niskowrzącego: a) schemat funkcjonalny, b) widok układu (ustawienie poziome)
Fig. 5. Distribution system of heat transfer engineer fluid: a) draft, b) system view (description in the text)

System sterująco-pomiarowy

W skład systemu sterująco-pomiarowego (**Rys. 6**) urządzenia, wchodzi obwo-
dy zasilania, sterowania oraz toru pomiarowe sprzęgnięte ze wzmacniaczem
pomiarowym. Obwo-
dy zasilania systemu posiadają zabezpieczenia zwarcio-
we i przeciążeniowe **3, 5, 8**, które przy stanach uszkodzenia zabezpieczają główne
elementy zasilająco-sterujące systemu, takie jak: przemienniki częstotliwości
napędu **4** czy przemiennik częstotliwości napędu pompy **6**.



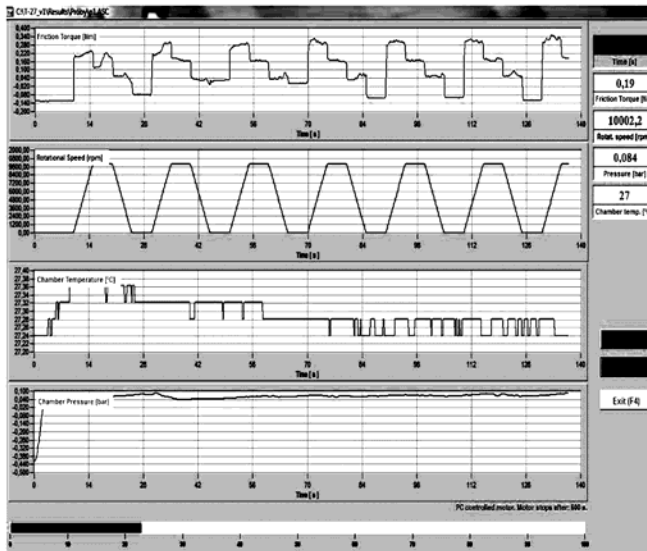
Rys. 6. Schemat układu sterująco-pomiarowego

Fig. 6. Draft of measurement and control system (description in the text)

Funkcję sterującą pełnią dwa sterowniki PLC **1, 2** połączone siecią easynet. Praca w sieci sterowników ma na celu zwiększenie liczby wejść/wyjść sterujących oraz wzajemną kontrolę. Interfejs użytkownika systemu sterowania zabudowany został na sterowniku PLC **2**. Z poziomu interfejsu użytkownik zadaje wartości nastaw, takich jak temperatury czynnika, prędkość obrotowa wrzeciona badawczego, liczbę cykli badawczych oraz czas pojedynczego cyklu. Istotną funkcją sterownika PLC **1** jest obsługa błędów i stanów awaryjnych **10**. Po wystąpieniu stanu awaryjnego użytkownik zmuszony jest zlokalizować i usunąć

usterkę oraz zresetować błąd na sterowniku. Taki algorytm podnosi bezpieczeństwo obsługi oraz badań. Obwody sterujące maszyny (Rys. 6), sprzęgnięte są bezpośrednio z elementami wykonawczymi, zainstalowanymi na urządzeniu badawczym. Są to grupy elektrozaworów 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 układu zasilania, przemienniki napędów 4, 6, asynchroniczne silniki napędów 16, 17, napęd wentylatora wymiennika 25, regulator temperatury 7, 9 z elementami grzejnymi 15 oraz panel przemiennika częstotliwości 11 napędu głównego. Za regulację ciśnienia w układzie odpowiada presostat 26 połączony z silnikiem sprężarki 27.

Głównym elementem systemu pomiarowego jest wielokanałowy cyfrowy wzmacniacz pomiarowy SPIDER 8 wyposażony w analogowe kanały pomiarowe 28, 29 oraz cyfrowe wejścia/wyjścia 30. W skład zestawu czujników pomiarowych wchodzi momentomierz 14 (Rys. 6) posiadający również funkcję pomiaru prędkości obrotowej wrzeciona badawczego oraz czujnik ciśnienia w komorze z czujnikiem temperatury 12. Poza sygnałami z czujników wzmacniacz wyposażony jest w karty obsługujące sygnały analogowe w standardzie 0–10 V oraz 4–20 mA 31, 32. Obsługują one retransmitowane sygnały analogowe ze sterowników PLC.



Rys. 7. Okno przebiegów wartości chwilowych w funkcji czasu wraz z indykatorami

Fig. 7. Screenshot with actual measured values

Na komputerze klasy PC zainstalowana jest aplikacja służąca do wizualizacji wartości chwilowych sygnałów elektrycznych oraz po zakończeniu badań akwizycja danych do pliku. Wielkościami mierzonymi są: moment tarcia, prędkość obrotowa wrzeciona, temperatura w komorze badawczej i czas badania.

Wartości chwilowe wielkości mierzonych, są wyświetlane na ekranie komputera (**Rys. 7**). Po zakończonym biegu badawczym możliwe jest również wygenerowanie raportu z przeprowadzonych badań, na którym przedstawione są wykresy wartości zmierzonych wraz z wartościami warunków badań.

Struktura wewnętrzna aplikacji (oprogramowania) systemu pomiarowo-sterującego pozwala na: konfigurację zewnętrznego urządzenia pomiarowego, konfigurację układów wejście/wyjście, sekwencje kodów poleceń oraz graficzną prezentację wyników badań i ich archiwizację. Oprogramowanie to pozwala również na realizację badań w cyklu automatycznym do zadanej z góry liczby powtórzeń.

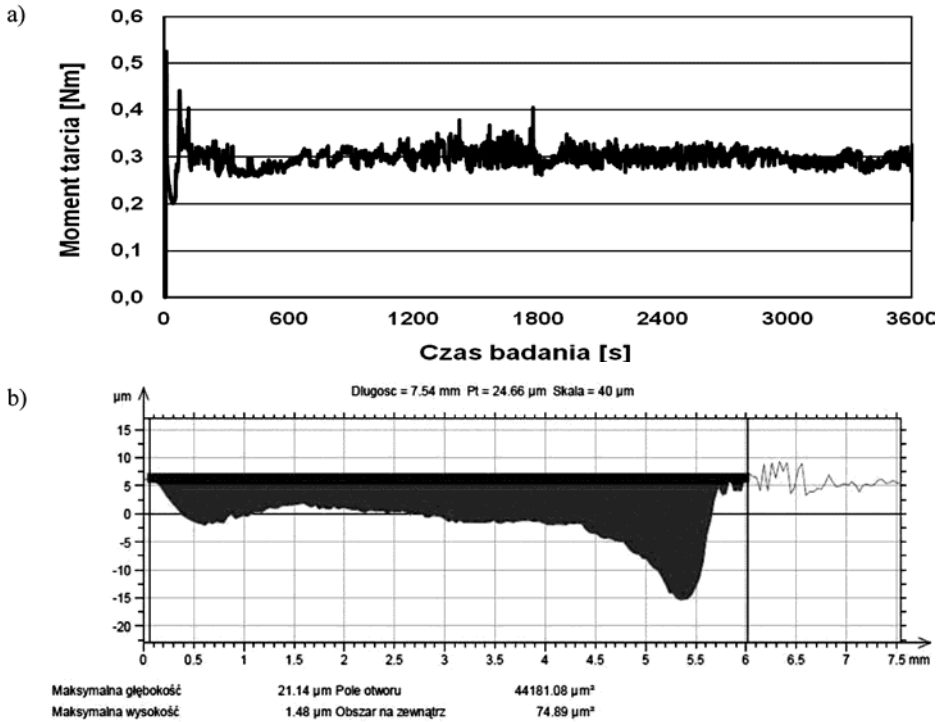
BADANIA WERYFIKACYJNE

Prototyp urządzenia poddano badaniom weryfikacyjnym, które obejmowały: poprawność działania poszczególnych zespołów i systemów sterująco-pomiarowych urządzenia (obciążenie węzła tarcia, opory ruchu, akwizycja danych pomiarowych), możliwości osiągnięcia założonych parametrów oraz spełnienia wytycznych zalecanych w tzw. świadectwie technicznym VAMAS dot. dokładności pomiarów i powtarzalności wyników badań [**L. 8**].

Zgodnie z opracowanym programem przeprowadzono badania skojarzenia wzorcowego, jakim jest rolka wykonana ze stali 100Cr6 oraz folia wykonana z Inconelu. Wyniki tych badań były bazą odniesienia do wyników planowanych do przebadania skojarzeń materiałowych folia ślizgowa (Inconel)/rolka wykonana ze stali 38HMJ ulepszonej cieplnie i azotowanej oraz ze stali 18HGM nawęglanej i hartowanej.

Inconel przyjęto jako podstawowy materiał na folię, gdyż miał podlegać szeregu obróbkom w podwyższonych temperaturach (m.in. PVD i CVD) przy niezmiennych właściwościach wytrzymałościowych. Stal 100Cr6 wybrano ze względu na fakt, że po obróbce cieplnej charakteryzuje się jednolitą strukturą i wobec tego nadaje się na materiał referencyjny, natomiast stal 38HMJ azotowaną i stal 18HGM nawęglaną stosuje się na wytrzymałe części maszyn odporne na zużycie. Badania prowadzone były w obecności czynnika niskowrzącego o temperaturze $50^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ przy obciążeniu skojarzenia trącego 30 N i prędkości obrotowej wrzeciona 10 000 obr./min. Przykładowy przebieg momentu tarcia oraz wyniki z pomiaru śladów zużycia na rolce przedstawiono na **Rys. 8**.

Wyniki badań weryfikacyjnych prototypu urządzenia potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Na ich podstawie opracowano świadectwo techniczne urządzenia zgodnie z wytycznymi międzynarodowego programu badawczego VAMAS, które ujmują cel badań, podstawowe definicje oraz metodykę badań, zwracając szczególną uwagę na: węzeł tarcia, badane materiały, otoczenie, parametry badawcze, przygotowanie próbek, wielkości mierzone i rejestrowane podczas biegu badawczego oraz wyniki i sposób ich określania.



Rys. 8. Przebieg momentu tarcia w funkcji czasu (a), przekrój poprzeczny śladu wytarcia przeciwpróbki (b)

Fig. 8. Results of friction torque curve: a) time function, b) cross section of the wear track

PODSUMOWANIE

Głównym przeznaczeniem opisanego w artykule stanowiska jest wyznaczanie charakterystyk tribologicznych materiałów przeznaczonych na elementy ślizgowe łożysk foliowych pracujących w zmiennych warunkach (otoczenie, obciążenie, prędkość, ciśnienie, temperatura) ze szczególnym uwzględnieniem otoczenia czynnika niskowrzącego.

Wyznaczenie charakterystyk tribologicznych w badaniach modelowych, przy zbliżonych warunkach pracy węzła, pozwolą na wybór najbardziej korzystnego skojarzenia materiałów przeznaczonych na elementy ślizgowe łożyska foliowego i pozwolą na ograniczenie liczby badań komponentowych.

Opracowanemu urządzeniu nadano symbol T-27. Podobnie jak inne urządzenia tribologiczne ITeE – PIB w Radomiu zostało wprowadzone do tzw. Systemu Badań Tribologicznych [L. 8].

Zaprojektowane i wykonane urządzenie może znaleźć zastosowanie w jednostkach zajmujących się innowacyjnymi rozwiązaniami problemów łożysko-

wania, doboru materiałów na łożyska foliowe oraz w laboratoriach wyższych uczelni technicznych.

Urządzenie zostało opracowane i wykonane w ramach projektu POIG.01.03.01-00-027/08-00 pt. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikroturbin energetycznych”.

LITERATURA

1. DellaCorte C.: A new foil air bearings test rig for use to 700°C and 70.000 rpm. Tribology Conference Cosponsored by the society of Tribologists and Lubrication Engineers and the American Aociety of Mechanical Engineers. London, Englad, UK, September 8–12, 1997.
2. Ishino M.: Air Bearing for Automotive Turbocharger. R&D Review of Toyota CRDL , Vol. 41, No. 3, 2006.
3. Howard S.: A new hight-speed oil-free turbine engine rotordynamic symulator test rig.NASA/TN-2007-214489, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio 2007.
4. Agrawal G.L.: Foil Air/Gas Bearings Technology – An Overviwe, International Gas Turbine & Areo engine Congress & Exhibition, Orlando 1997.
5. Kiciński J., Żywica G., Rządkowski R., Drewczyński M.: Modelowanie strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego. Acta Mechanica et Automatica, vol. 2, no. 1, 2008, pp. 45–50.
6. Miąskowski W., Nalepa K., Pietkiewicz P., Żywica G., Bagiński P., Breńkacz Ł.: Stanowisko do badania łożysk foliowych w cyklu start-stop. Mechanik, nr 7/2012, pp. 479–484.
7. DellaCorte Ch., Zaldana A.R.: A Systems Approach to the Solid Lubrication of Foil Air Bearings for Oil-Free Turbomachinery. Journal of Tribology, vol. 126, 2004, pp. 200–207.
8. Czichos H., Becker S., Lexow J.; Multilaboratory Tribotesting: Results from the Versailles Advanced Materials and Standards Programme on Wear Test Methods. Wear, 144 (1987) s. 109–130.
9. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE, Radom 1997.

Summary

The paper presents a tribological test device for testing the wear resistance of materials used in foil bearings used in microturbines operating in combined heat and power plants in an organic Rankine cycle (ORC) with low boiling fluids.

The tribosystem consists of the stationary foil/block made of the tested material and ring rotating at the defined speed. The tribosystem can operate in continuous and cyclical modes in an environment typical for foil bearings, i.e. with the presence of low boiling fluid.