

	<b>Organizatorzy:</b> Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA          OBRÓBKI ŚCIERNEJ</b> Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Stanowisko badawcze i badania doświadczalne modelu wrzeciona łożyskowanego gazostatycznie

### Workstation for researching and testing of experimental gasostatic bearing spindle

FRANCISZEK ORYŃSKI  
 SŁAWOMIR KAWCZYŃSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.379

Niniejszy artykuł jest kontynuacją publikacji dotyczącej nowo opracowanej konstrukcji łożysk gazostatycznych. Przedstawiono w nim konstrukcję zaprojektowanego stanowiska badawczego oraz przedstawione zostaną przykładowe wyniki badań i wnioski wynikające z badań i porównania ich z wynikami analizy matematycznej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** stanowisko badawcze, badanie wrzeciona szlifierskiego, łożysko gazostatyczne

*This article is a continuation of the publication on newly developed design of the gasostatic bearings. It presents structure designed test bench and will be presented examples of the results of research and the study's conclusions and compare them with the results of mathematical analysis.*

**KEYWORDS:** workstation, spindle research, gasostatic bearing

#### Opis stanowiska badawczego

Przeprowadzona analiza rozwiązań konstrukcyjnych układów łożyskowych pozwoliła na opracowanie konstrukcji nowego typu łożyska. Należało teraz skonstruować model łożyska i wykonać badania celem określenia jego właściwości i parametrów technicznych.

Przed przystąpieniem do badań opracowano plan badań. W pierwszej kolejności opracowano stanowisko do badań łożyska poprzecznie – wzdłużnego. Uznano, że dalsze badania będą kontynuowane po otrzymaniu zadowalających wyników badań. Kolejnym etapem było opracowanie stanowiska badawczego i przeprowadzenie badań układu łożysk. Wyniki badań były porównywane z wynikami otrzymanymi w wyniku analizy numerycznej. W tym celu opracowano w

środowisku MATLAB – SIMULINK program matematyczny opisujący zjawiska zachodzące w łożysku.

Rozpoczęcie badań było poprzedzone działaniami mającymi na celu dobór parametrów łożyska i opracowanie poszczególnych elementów stanowiska badawczego.

#### ■ Dobór parametrów geometrycznych łożyska

Opracowana dotychczas koncepcja zawierała tylko ogólny zarys kształtu łożyska i wałka. Wiadomym było, że na jego sztywność wpływ będzie miało wiele czynników, przede wszystkim wielkości i proporcje długościowe szczelin.

Celem doboru wielkości szczelin wykonano kilka wałków o uproszczonej geometrii. Prowadząc badania zmieniano ich średnice, wysokość uskoku średnic oraz proporcje długości większej i mniejszej szczeliny przy niezmienniej wartości średnicy panewki. Badanie każdego wałka obejmowało kilka prób, m.in. czas obrotu po wprawieniu w ruch, nośność statyczną oraz kontrolę styku wału z panewką. Na tej podstawie dokonano doboru wstępnych parametrów geometrycznych łożyska.

Na podstawie otrzymanych wyników prób przyjęto model łożyska o stosunku długości szczeliny mniejszej do większej 2:1 oraz wartości wielkości szczeliny: 0,03 mm i 0,07 mm na stronę. Z poczynionych obserwacji i kontroli styku powierzchni, wynikało, że jest to układ najkorzystniejszy. W tym przypadku wał obracał się samoczynnie, bez konieczności wprawiania go w ruch, a także nie stwierdzono styku między wałem a panewką. Dowodziło to, że wał jest unoszony filmem powietrznym. Poza tym, łożysko o takich wymiarach miało największą nośność statyczną.

W części wzdłużnej łożyska poprzecznie – wzdłużnego zastosowano podobne proporcje wymiarów geometrycznych szczeliny.

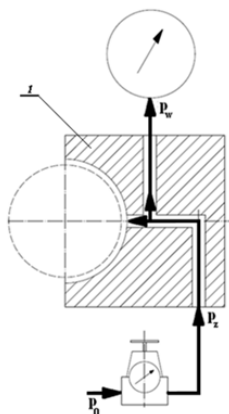
\*prof. dr hab. inż. Franciszek Oryński (franciszek.orynski@p.lodz.pl),  
 dr inż. Sławomir Kawczyński (slawomir.kawczynski@wp.pl)

### ■ Układ obciążania wału

Kolejną częścią stanowiska badawczego wymagającą zaprojektowania był układ obciążania wału. Jako czynnik obciążający zastosowano powietrze.

W badaniach doświadczalnych wykorzystano układ przedstawiony na rysunku 1. W tym układzie powietrze zasilające o ciśnieniu  $p_0$  poprzez reduktor i dysze pod ciśnieniem  $p_z$  kierowane jest do przestrzeni między wałkiem i tuleją. W szczelinie powietrze ulega rozprężeniu, co powoduje obniżenie jego ciśnienia w wężykach zasilających i otworach wewnątrz tulei do ciśnienia  $p_w$ . Wartość ciśnienia mierzona na manometrze jest zależna od wartości siły działającej na wał. W celu określenia wartości ciśnień i odpowiadających im sił wykonano skalowanie układu.

Do wymuszania siły wzdłużnej wykorzystano śrubę 12 z przewierconymi otworami, widoczną na rysunku 2. Również w tym przypadku powietrze było czynnikiem tworzącym siłę, a odczytywane na manometrze ciśnienie zależało od wytwarzanej w układzie siły.



Rys. 1. Schemat układu wytwarzania i pomiaru siły obciążającej

Wartość siły obciążającej była odczytywana na manometrach 14, 15 i 16 (rys. 2). Celem zaadoptowania ich do pomiaru siły dokonano skalowania układu pomiarowego obciążając statycznie badany wałek. Zmieniając ciśnienie zasilające odczytywano na dynamometrze wartość siły oraz odpowiadające tej sile wskazania ciśnienia wyjściowego na manometrach. Wszystkie pomiary powtarzano trzykrotnie, a ich wyniki uśredniano arytmetycznie.

### ■ Układ pomiaru przemieszczenia wału

Do pomiaru położenia wału (rys. 2) podczas badań wykorzystano czujniki indukcyjne 17 i 18 firmy OMRON typu ZX-EM02T o rozdzielczości 0,001 mm oraz wzmacniacze typu ZX-EDA11 19 i 20. Za pomocą czujników mierzono aktualne położenie wału 4.

Wykonując badania dokonywano trzykrotnych pomiarów przemieszczenia wału w każdym punkcie pomiarowym i wyliczano z nich średnią arytmetyczną wartości przemieszczeń.

Kolejnym etapem przygotowań do badań doświadczalnych było określenie nośności statycznej łożyska poprzeczno – wzdłużnego. Wyznaczenie tego parametru miało na celu określenie dopuszczalnej wielkości obciążeń, jakim poddane może być łożysko bez ryzyka uszkodzenia panewki i wału. Pomiaru dokonano obciążając łożysko dynamometrem i kontrolując styk panewki oraz wałka. Średnia arytmetyczna ze zmierzonych wyników wyniosła 75,5 N.

W związku z tym przyjęto, że nośność statyczna tego łożyska wynosi 75 N.

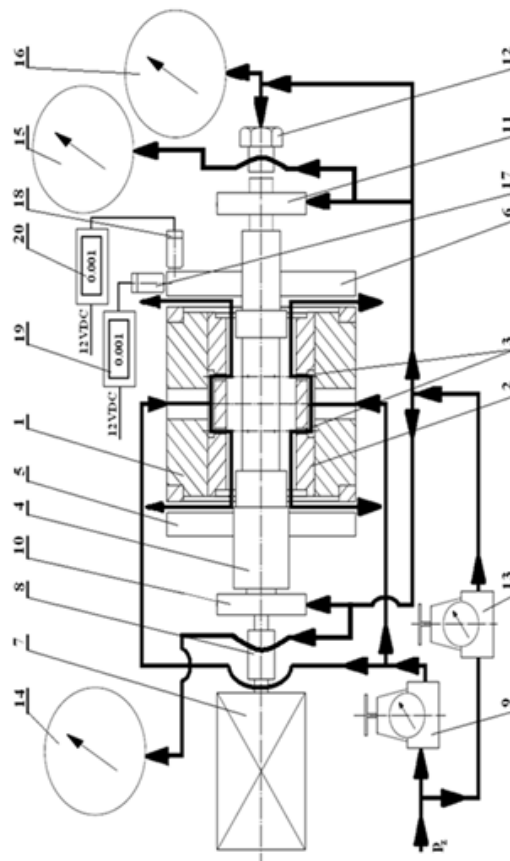
### ■ Badania łożyska poprzeczno - wzdłużnego

Schemat stanowiska do badań doświadczalnych łożyska poprzeczno – wzdłużnego przedstawiono na rysunku 2.

Najważniejszą częścią stanowiska badawczego (rys. 2) jest łożysko poprzeczno – wzdłużne [5]. Zbudowane jest z korpusu 1 z otworami zasilającymi w górnej i dolnej części, którymi doprowadzane jest powietrze. Łożysko zasilane jest z warsztatowej sieci sprężonego powietrza poprzez reduktor 9. Reduktor zastosowano w celu stabilizacji i regulacji ciśnienia powietrza zasilającego do wartości 0,7 MPa i 0,8 MPa, przy których były prowadzone badania. W korpusie osadzona jest panewka 2 z dwoma rzędami małych otworów 3 po osiem w każdym rzędzie połączonych podtoczeniem na zewnętrznej powierzchni panewki. Powietrze poprzez króćce przyłączeniowe i otwory w korpusie kierowane jest do podtoczenia, a stąd poprzez otwory 3 do przestrzeni między wałkiem a panewką. Całość stanowi element stojana łożyska.

Na stopniowanym wale 4 osadzone są, za pomocą tulejek i tulei dystansowych, tarcze łożyska wzdłużnego 5 i 6. Stopniowanie wału oraz pierścienie osadzone na stojanie tworzą dwa rodzaje szczelin, większą i mniejszą, przez które powietrze przepływa od strony zasilania do otoczenia.

Wał napędzany jest trójfazowym silnikiem asynchronicznym 7 typu Sg80 – 2B poprzez sprzęgło podatne 8. Prędkość obrotową silnika regulowano falownikiem firmy HITACHI typu SJ300 (nieuwidocznionego na schemacie) w celu nastawiania założonych w badaniach prędkości obrotowych: 0  $\text{min}^{-1}$ , 1700  $\text{min}^{-1}$ , 2350  $\text{min}^{-1}$  oraz 2900  $\text{min}^{-1}$ .

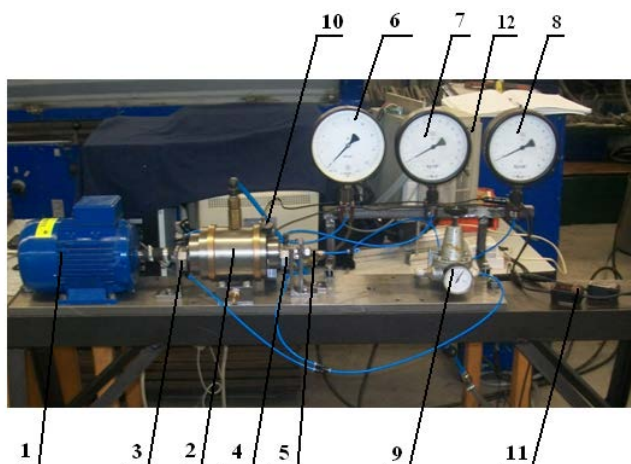


Rys. 2. Schemat stanowiska do badań łożyska poprzeczno - wzdłużnego

Siły obciążające wał 4 (rys.2) w kierunku poprzecznym w stosunku do osi wymuszano za pomocą dwóch dysz, doprowadzających sprężone powietrze na walcowe powierzchnie 10 i 11. Wartość ciśnienia, która była równoważna wymuszanej sile, odczytywano na manometrach odpowiednio 14 i 15, po uprzednim ich skalowaniu. W kierunku wzdłużnym do wytwarzania siły wykorzystano dyszę w śrubie 12 zamontowaną po przeciwległej stronie wału w stosunku do silnika. Wartość ciśnienia, która była równoważna sile, w tym przypadku odczytywano na manometrze 16. Dysze zasilane były z warsztatowej sieci sprężonego powietrza poprzez reduktor 13.

Położenia wału w obu kierunkach mierzono za pomocą czujników położenia firmy OMRON typu ZX-EM02T. Pomiaru przemieszczenia wału dokonywano mierząc przemieszczenie tarczy 6 łożyska poprzeczno – wzdłużnego, w kierunku poprzecznym czujnikiem 17 i wzdłużnym – czujnikiem 18. Czujniki te zasilane były poprzez wzmacniacze 19 i 20 typu ZX-EDA11 z wyświetlaczami aktualnej wartości położenia wału o rozdzielczości 0,001 mm. Tarcze 5 i 6 są oparte o uskoki i zamocowane na wale 4.

Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie stanowiska badawczego łożyska poprzeczno - wzdłużnego.



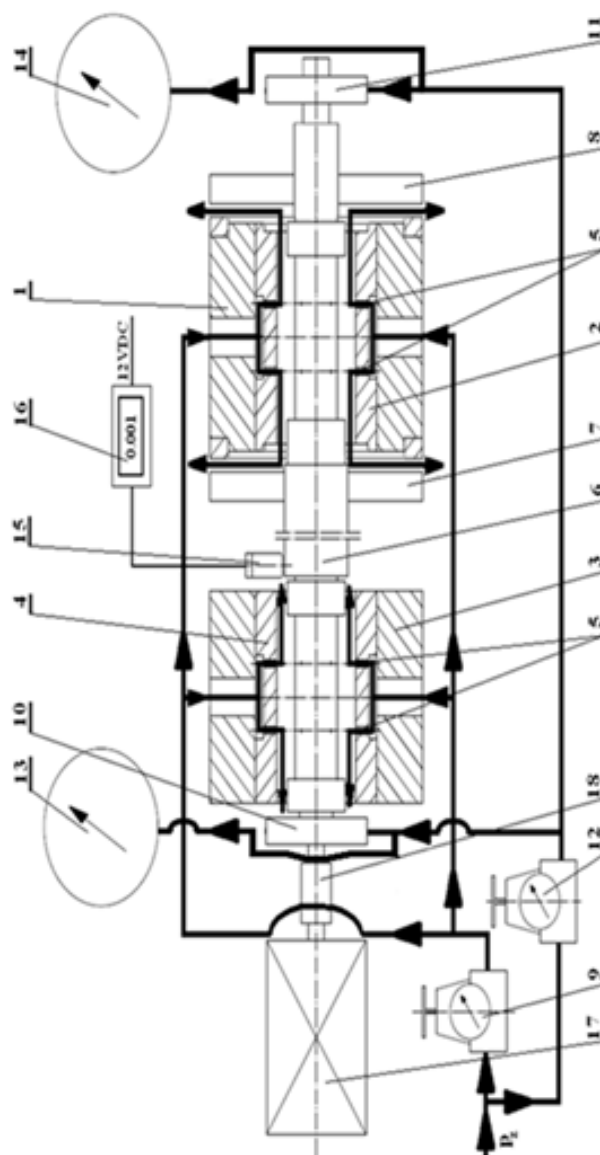
Rys. 3. Widok doświadczalnego stanowiska badawczego łożyska poprzeczno - wzdłużnego

Po lewej stronie widać silnik napędowy 1 wraz ze sprzęgłem łączącym go z wałem. Po prawej stronie silnika widać badane łożysko poprzeczno – wzdłużne 2 wraz z dyszami obciążającymi w płaszczyźnie poprzecznej 3, 4 oraz wzdłużnej 5 i czujnikiem położenia 10. Na zewnętrznych płaszczyznach korpusu łożyska poprzeczno – wzdłużnego osadzone, wykonane z brązu, pierścienie tworzące mniejszą szczelinę łożyska wzdłużnego. Obok łożyska są manometry do pomiaru ciśnienia, które po wyskalowaniu wykorzystywano do pomiaru sił: poprzecznej 6, 7 i wzdłużnej 8, reduktor 9, którym regulowano ciśnienie powietrza obciążającego wał za pomocą dysz. Po prawej stronie zdjęcia widać wskaźniki położenia wału 11. W głębi, za manometrami, widać falownik 12 firmy HITACHI.

#### ■ Badania układu łożysk

Zgodnie z opracowanym planem badań kolejnym etapem prac było wykonanie badań układu łożysk poprzecznego i poprzeczno – wzdłużnego. Dlatego też konieczne było zaprojektowanie i wykonanie drugiego stanowiska badawczego. Schemat stanowiska do badań układu łożysk przedstawiono na rysunku 4. Stanowisko to jest podobne do stosowanego na wcześniejszym etapie badań. Zostało uzu-

pełnione o zmodyfikowany wał i łożysko poprzeczne [6] zamontowane pomiędzy silnikiem a łożyskiem poprzeczno – wzdłużnym. Dysze 10 i 11 przy pomocy, których obciążano wał w kierunku poprzecznym zamontowano na końcach wału, czyli po zewnętrznej stronie obu łożysk. W tym przypadku brak jest układu obciążania wału w kierunku wzdłużnym. Było to podyktowane długim czasem obliczeń wykonywanych przez rozbudowany program symulacyjny. Za takim uproszczeniem pomiarów przemawiał również fakt, że układ łożyska wzdłużnego nie uległ modyfikacji w stosunku do badanego na wcześniejszym etapie prac laboratoryjnych. Czujnik do pomiaru położenia wału 15 zamontowany był pomiędzy łożyskami i mierzono nim przemieszczenie środkowej części wału. Zastosowano czujnik i wzmacniacz firmy OMRON tego samego typu, co przy badaniach łożyska poprzeczno – wzdłużnego.



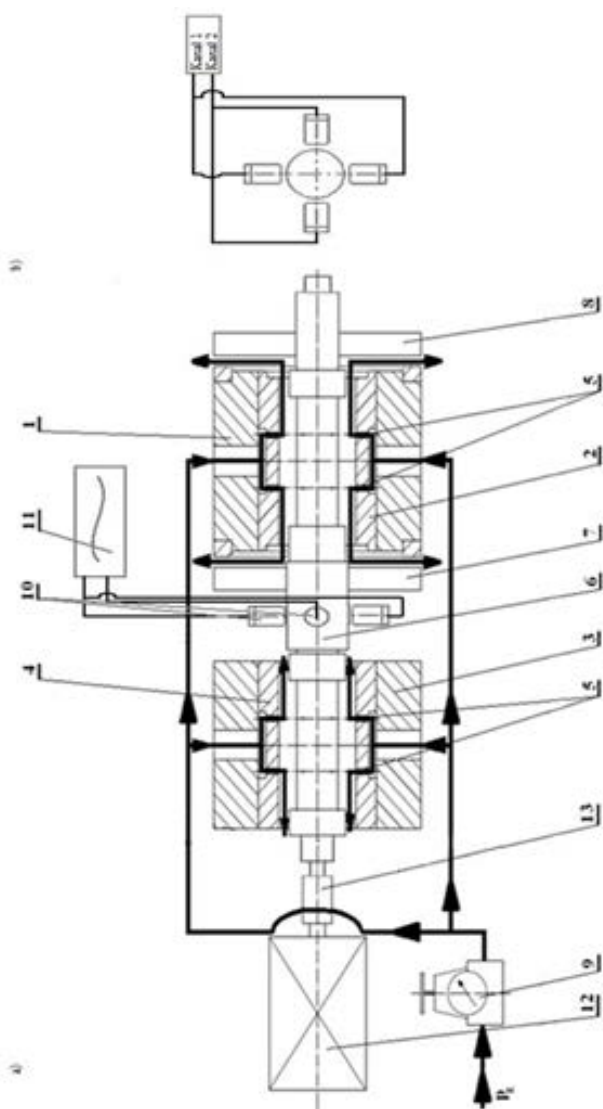
Rys. 4. Schemat stanowiska do badań układu łożysk: poprzeczno i poprzeczno – wzdłużnego

#### ■ Wyznaczenie trajektorii osi wału

Dążąc do możliwie dokładnego zbadania zachowania wału postanowiono dodatkowo dokonać analizy trajektorii środka wału i charakterystyki amplitudowo – prędkościowej.



W tym celu dokonano kolejnej modernizacji stanowiska badawczego (rys. 5). W środkowej części wału, pomiędzy łożyskami, zamontowano w uchwycie 4 indukcyjne czujniki położenia (poz. 10 na rys. 5) o dokładności  $0,01 \mu\text{m}$  i zakresie pomiarowym  $\pm 0,45 \text{ mm}$  podłączone do wzmacniacza Spider 8 firmy HBM (poz. 11 na rys. 5). Zostały one rozmieszczone na obwodzie wału co  $90^\circ$  i podłączone parami do obu kanałów wejściowych wzmacniacza, w ten sposób, że jeden kanał mierzył położenie wału metodą różnicową w płaszczyźnie pionowej, a drugi w poziomej. Następnie sygnał pomiarowy ze wzmacniacza przesłano do komputera, wyposażonego w program CATMAN, w celu dokonania wizualizacji i zapisu wyników. Przed przystąpieniem do pomiarów układ został wyskalowany za pomocą stykowych czujników przemieszczenia o dokładności  $0,1 \mu\text{m}$  firmy OMRON.

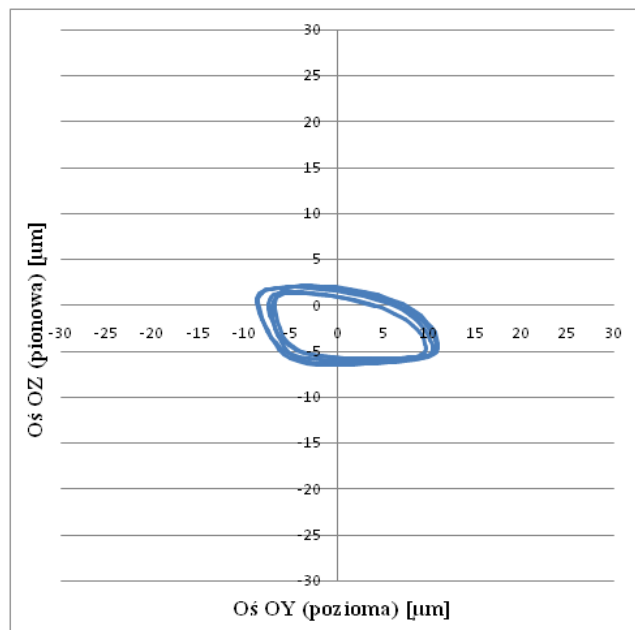


Rys. 5. Schemat stanowiska do pomiaru trajektorii osi wału; a) stanowisko badawcze, b) schemat podłączenia czujników

Na rysunku 6 przedstawiono otrzymany w wyniku badań wykres trajektorii środka wału przy jego walcowym ruchu.

Wyznaczone maksymalne wartości przemieszczeń wału (ok.  $11 \mu\text{m}$ ) są mniejsze od wielkości szczelin łożyska wynoszących  $60 \mu\text{m}$  (po  $30 \mu\text{m}$  na stronę). Z tego wynika, że nie ma miejsc styku między wałem a panewką. W przypadku stożkowego ruchu wału 4 układ pomiarowy 11 z czujnikami indukcyjnymi 10 trzeba zamontować na zewnątrz

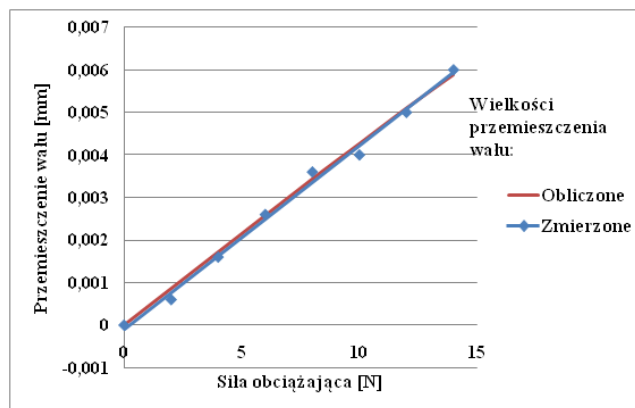
łożysk, a czujniki umieścić wokół walcowej powierzchni swobodnego końca wału 6.



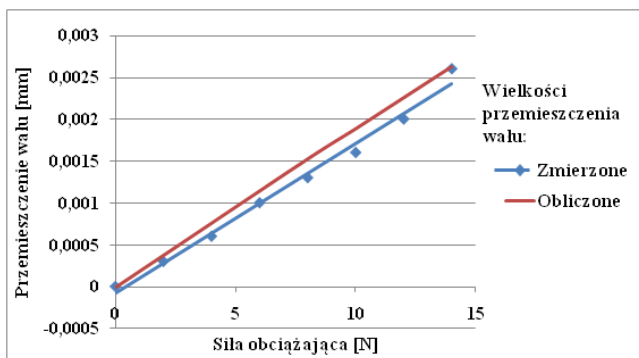
Rys. 6. Otrzymany doświadczalnie wykres trajektorii środka wału dla ciśnienia zasilania układu łożysk  $0,80 \text{ MPa}$ , siły obciążającej  $0 \text{ N}$  i prędkości obrotowej  $2000 \text{ min}^{-1}$

#### Porównanie wyników badań i analizy matematycznej

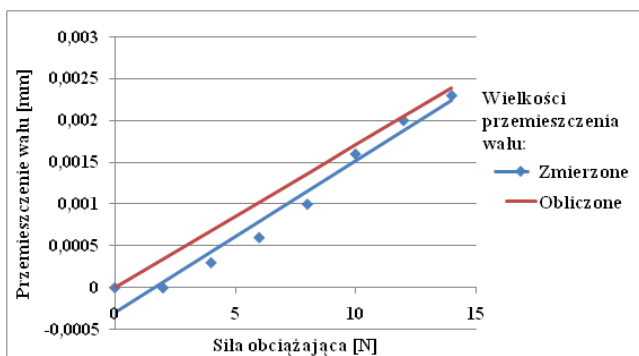
Poniżej przedstawiono wybrane wykresy (rys. 7 – 10) uśrednionych wyników pomiarów przemieszczenia wału zmierzonych w laboratorium w zestawieniu z wynikami obliczonymi z analizy matematycznej łożyska poprzeczno – wzdłużnego i układu łożysk.



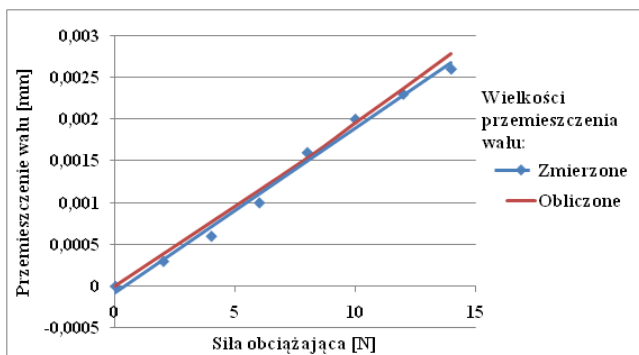
Rys. 7. Wykres porównawczy uśrednionych wyników pomiarów i analizy matematycznej przemieszczenia poprzecznego wału w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożyska  $0,70 \text{ MPa}$  i prędkości obrotowej wału  $1700 \text{ min}^{-1}$



Rys. 8. Wykres porównawczy uśrednionych wyników pomiarów i analizy matematycznej przemieszczenia poprzecznego wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożysk 0,70 MPa i prędkości obrotowej wału 2350 min<sup>-1</sup>



Rys. 9. Wykres porównawczy uśrednionych wyników pomiarów i analizy matematycznej przemieszczenia poprzecznego wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożyska 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 2350 min<sup>-1</sup>



Rys. 10. Wykres porównawczy uśrednionych wyników pomiarów i analizy matematycznej przemieszczenia poprzecznego wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożyska 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 2900 min<sup>-1</sup>

### Wnioski z analizy porównawczej wyników badań i obliczeń

W wyniku analizy przedstawionych powyżej wielkości przemieszczeń wału wyznaczonych laboratoryjnie oraz analitycznie sformułowano następujące wnioski, co do prawidłowości napisanego algorytmu i możliwości wykorzystania go w analizach układów łożyskowych wrzecion, w szczególności szlifierek:

1. średnia rozbieżność wyników badań laboratoryjnych i analizy matematycznej wyliczona z wykresów wynosi 5% (zawiera się w przedziale od 0% do 9%),
2. nie zauważono jednoznacznej tendencji w różnicach wyników – różnice pomiędzy wartościami przemiesz-

czeń wyznaczonych w wyniku pomiarów laboratoryjnych a obliczonych analitycznie są dodatnie i ujemne,

3. różnice wyników mogą być spowodowane różnymi czynnikami, m.in.:

- dokładnością przyrządów pomiarowych zastosowanych do pomiaru ciśnień zasilania i wartości siły obciążającej, manometry wykonano w klasie dokładności 1 i 1,5,
- możliwymi niedokładnościami wynikającymi z zastosowanej metody obciążania układu,
- rozdzielczością czujników położenia wynoszącą 0,001 mm,
- w przypadku analizy matematycznej mamy do czynienia z układem idealnym, model jest układem laboratoryjnym, gdzie na wynik mogą wpływać czynniki zewnętrzne, np. chropowatość powierzchni, nierównoległość płaszczyzn itp.,
- w analizie matematycznej ciśnienie zasilania określane jest na granicy pierwszego rzędu komór łożyska poprzecznego, w laboratorium wielkość ta jest ustawiana na reduktorze i pokonując opory ruchu w wężykach i otworach zasilających ciśnienie ulega obniżeniu.

### Wnioski końcowe

Z analizy otrzymanych wartości przemieszczenia wału wynika, że możliwe jest do wykonania łożyskowanie gazowe wrzeciona poprzez zastosowanie układu gazostatycznych łożysk z dławieniem wewnętrznym. Dowodzi to trafności dokonanego wyboru konstrukcji łożyska spośród przedstawionych propozycji. Prostota konstrukcji i łatwość wykonania oraz niewielkie gabaryty dają możliwość zastosowania go w wielu innych konstrukcjach szybkobieżnych urządzeń wirujących.

Stosując badawczo – analityczną metodę badania łożyska otrzymano wyniki, których dokładna analiza została wykorzystana do sformułowania poniższych wniosków:

1. Możliwe jest wykonanie układu gazostatycznych łożysk poprzecznego i poprzeczno – wzdłużnego z dławieniem wewnętrznym, który będzie miał wystarczającą nośność, aby móc go zastosować do wrzecion szlifierek do małych otworów.
2. Zastosowany w pracy model matematyczny przepływów i dynamiki oraz otrzymane w ten sposób wyniki są zbliżone do wyników przemieszczeń wału otrzymanych z badań doświadczalnych i może być stosowany w procesie projektowania,
3. Program MATLAB – SIMULINK umożliwia rozwiązanie złożonego układu równań opisującego łożyska gazowe.

Opisane stanowisko badawcze zostało zbudowane celem wykonania badań nowej konstrukcji łożyska gazostatycznego z dławieniem wewnętrznym, które opracowano do zastosowania w sprężarkach gazu. W czasie badań pojawiła się idea zastosowania go do łożyskowania wrzecion obrabiarek. Uznano, że takie łożysko może być przydatne do łożyskowania np. szlifierek do małych otworów o średnicach ściernic do 30 mm. Niniejsze stanowisko badawcze należy zatem potraktować jako model łożyskowania wrzeciona, a przedstawione wyniki badań mogą stanowić wstęp do dalszych badań. Ich dalsze rozszerzenie o kolejne zakresy prędkości obrotowych do ponad 1000 obr/s (60 000 obr/min) i sił pozwoli w pełni określić jego przydatność do łożysko-

wania wrzecion szlifierek do małych i bardzo małych otworów.

LITERATURA:

1. Awrejcewicz J., Błażejczyk B., Czołczyński K., Identyfikacja łożyska gazowego na podstawie odpowiedzi na wymuszenie harmoniczne. I Ogólnopolska Konferencja, Układy Dynamiczne w Aspekcie teorii Zastosowań, Łódź, 1992 r.
2. Koch J., Ilczyszyn J., Krzyżanowski J., Wrzeciona obrabiarek. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1982 r.
3. Kozanecki Z., Zespół łożyskowy do mocowania wału wirnika maszyny wirnikowej. Zgłoszenie patentowe P-324957. Biuletyn Urzędu patentowego nr 18/1999
4. Oryński F., Kawczyński S., Gazostatyczne łożysko poprzeczne otworowe [z podtoczeniem na wale]. Zgłoszenie patentowe P-398003." z dnia 06.02.2012 r.
5. Oryński F., Kawczyński S., Gazostatyczne łożysko poprzeczno – wzdłużne otworowe [z podtoczeniami na wale i czołach panewki]. Zgłoszenie patentowe P398005." z dnia 06.02.2012 r.
6. Oryński F., Pawłowski W., The influence of grinding process on forced vibration damping in headstock of grinding wheel of cylindrical grinder. International Journal of Machine Tools and Manufacture (Oxford), vol. 39, No. 2, 229-235, 1999 r.