

	Organizatorzy: Politechnika Łódźka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Badania teoretyczne i konstrukcja łożyskowania gazowego wrzeciona szlifierskiego

Theoretical research and design of gas bearing spindle grinding

FRANCISZEK ORYŃSKI
 SŁAWOMIR KAWCZYŃSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.378

W artykule zaprezentowano nową konstrukcję łożyska gazostatycznego. Łożysko powstało na podstawie analizy istniejących konstrukcji, jednak ma prostszą budowę. W drugiej części artykułu zaprezentowano metodę obliczeń i wyniki analizy matematycznej łożyska.

SŁOWA KLUCZOWE: łożysko gazostatyczne, MATLAB, SIMULINK, analiza matematyczna, dynamika wału, strumień masy

The article presents a new gasostatic bearing design. Bearing was established on the basis of existing structures, but has a simpler design. In the second part of the article the calculation method and the results of mathematical analysis have been presented.

KEYWORDS: gasostatic bearing, MATLAB, SIMULINK, mathematical analysis, shaft dynamics, mass flow

Wstęp

W obecnie wykorzystywanych urządzeniach stosuje się różne systemy łożyskowania. Najbardziej popularnym jest łożyskowanie toczne oparte na coraz bardziej rozwiniętych łożyskach kulkowych lub wałeczkowych. Ich stosowanie jest jednak kłopotliwe z kilku powodów. W przypadku dużych prędkości wymagana dokładność wykonania powoduje ograniczenia cenowe, często przekraczające dopuszczalny poziom wydatków. W przypadku dużych nośności i wymiarów ich gabaryty i masa stają się przeszkodą w zabudowie.

Dlatego też coraz większą popularnością cieszą się łożyska olejowe, gazowe, lub magnetyczne. Zastosowanie każdego z tych łożysk ma również swoje ograniczenia. W przypadku gazowych – nośność, olejowych i magnetycznych – konieczność budowy dodatkowych, często skompli-

kowanych układów zasilających. Ich wspólną zaletą jest możliwość stosowania w układach szybkoobrotowych o małych gabarytach. Nie wymagają one również stosowania wyrafinowanych technologii.

Przegląd konstrukcji łożysk

Od początków techniki, gdy zaczęto stosować elementy wirujące, poszukiwano rozwiązań umożliwiających ich stabilną pracę. Dla poprawy warunków pracy stosowano przeróżne rozwiązania. Początkowo były to układy drewniane, w których jeden element obracał się wewnątrz drugiego bez jakichkolwiek elementów ułatwiających ruch. Powodowało to duże wibracje układu i straty energii. Były to pierwsze układy łożysk ślizgowych.

Bardziej zaawansowanymi były układy z łożyskami tocznymi, o znacznie mniejszych oporach ruchu. Wskutek tego otrzymano komfort pracy i znaczne zwiększenie prędkości obrotowych. Obecnie są one najczęściej stosowane spośród wszystkich rodzajów łożysk. Nie trzeba specjalnych układów zasilających, mają wystarczającą nośność, a technologia wykonania jest przystosowana do produkcji wielkoseryjnej. Są one stosowane we wszystkich dziedzinach techniki, od sprzętu AGD po najbardziej skomplikowane układy w transporcie i obrabiarkach. Mogą być stosowane nawet w układach szybkoobrotowych wrzecion szlifierskich, gdzie wymagane są wysokie prędkości obrotowe przy znacznych siłach obciążających.

Szukając innych rozwiązań zwrócono uwagę na możliwość stosowania łożysk hydraulicznych lub powietrznych, zarówno wykonanych w formie łożysk hydro- czy gazostatycznych, jak i dynamicznych.

Stosowane w niektórych rozwiązaniach łożyska hydrodynamiczne z segmentami wahlowymi są jednym z rozwiązań łożysk, w których ciecz jest elementem nośnym. W innych rozwiązaniach nie ma segmentów wahlowych, a w ich miejsce wykonywane są w korpusie komory, poprzez które

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

doprowadzany jest czynnik nośny, czyli łożyska hydrostatyczne. Jak wiele dziedzin podlegają one ciągłemu rozwojowi, czego dowodem są pojawiające się wciąż nowe rozwiązania oraz patenty.

Obok łożysk tocznych, hydrodynamicznych i hydrostatycznych coraz częściej stosowane są łożyska, w których jako czynnik nośny stosuje się powietrze – są to łożyska gazostatyczne. Mogą być one stosowane w niemal każdej dziedzinie techniki. Ich cechą charakterystyczną jest prosta budowa i możliwość otrzymania wyższych prędkości obrotowych w stosunku do łożysk tocznych i hydraulicznych. Łożyska gazostatyczne są doskonałym rozwiązaniem dla szybkoobrotowych układów szlifierek. Ich konstrukcja oparta jest na łożysku z komorami powietrznymi rozmieszczonymi na obwodzie tulei.

Innym typem łożysk gazowych są łożyska membranowe. W tym przypadku przestrzeń pomiędzy wałem a tuleją wypełniona jest dwiema warstwami folii: płaską (górną) i karbowaną (dolną). Czynnik nośny, czyli gaz, w czasie ruchu obrotowego wytwarza film powietrzny pomiędzy wałem a płaską folią. Folia karbowana stanowi elastyczne podparcie folii górnej oraz zabezpieczenie wału i panewki przed uszkodzeniem w przypadku zaniku zasilania lub awaryjnego wyłączenia urządzenia.

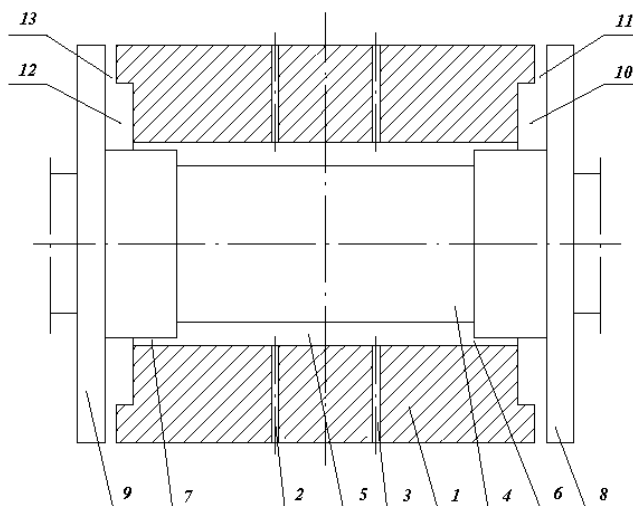
Kolejnym typem stosowanych obecnie łożysk są łożyska magnetyczne. Zasada ich działania jest podobna do działania elektromagnesu, którego zwora jest przyciągana do jarzma. Mają one zastosowanie w ekstremalnych warunkach lub wysokoobrotowych minimaszynach. Ich zaletą jest brak strat związanych ze zjawiskiem tarcia. Wiele konstrukcji ma zarówno cechy łożysk osiowych, jak i promieniowych.

Analizując istniejące rozwiązania poszukiwano łożyskowania, które ma prostą konstrukcję, a zastosowanie, które pozwoli na uzyskanie sztywności odpowiedniej do zastosowania w szlifierekach.

Opis badanych łożysk

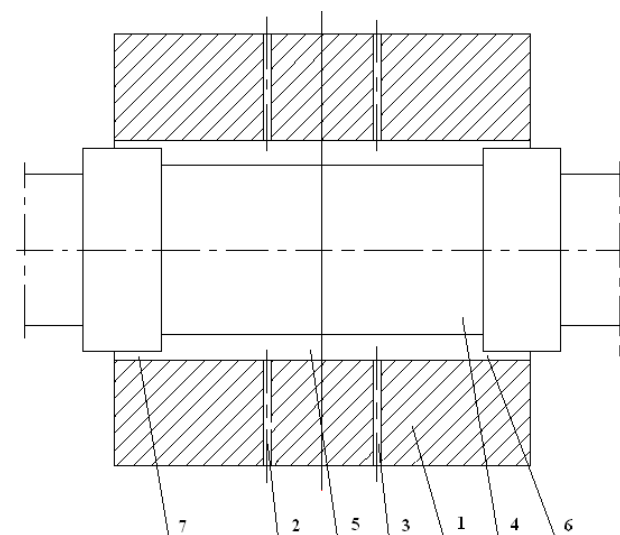
Po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań, do badań zastosowano układ łożysk złożony z łożyska poprzeczno-wzdłużnego szeregowego oraz łożyska poprzecznego z dławieniem na powierzchniach nośnych.

Gazostatyczne łożysko poprzeczno-wzdłużne szeregowo z dławieniem wewnętrznym przedstawione na rysunku 1 zgłoszono do opatentowania [7]. Takie łożysko (rys. 1) wyposażone jest w panewkę 1 z wykonanymi w niej kilkoma małymi otworami promieniowymi w dwóch rzędach 2 i 3. Panewka 1 otacza stopniowany wał 4. Wewnątrz pomiędzy nimi są trzy walcowe szczeliny 5, 6 i 7. Środkowa z nich, czyli 5, jest większa od jednakowych szczelin 6 i 7. Po obu stronach panewki 1 na wałe 4 są zamocowane pionowe tarcze 8 i 9 łożyskowania wzdłużnego. Pomiedzy tarczami 8 i 9 i panewką są po dwie czołowe szczeliny z jednej strony 10 i 11, a z drugiej 12 i 13, ale wewnętrzne 10 i 12 są większe od zewnętrznych 11 i 13. Ma ono prostą konstrukcję o łatwej technologii wykonania, przeznaczone może być do wirników maszyn i urządzeń.



Rys.1. Schemat łożyska poprzeczno-wzdłużnego w przekroju wzdłużnym

Budowa łożyska poprzecznego (rys. 2) oparta została na podobnej zasadzie jak poprzeczno-wzdłużnego. Różnica polega na tym, że nie posiada ono tarcz po obu stronach korpusu.



Rys.2. Schemat łożyska poprzecznego w przekroju wzdłużnym

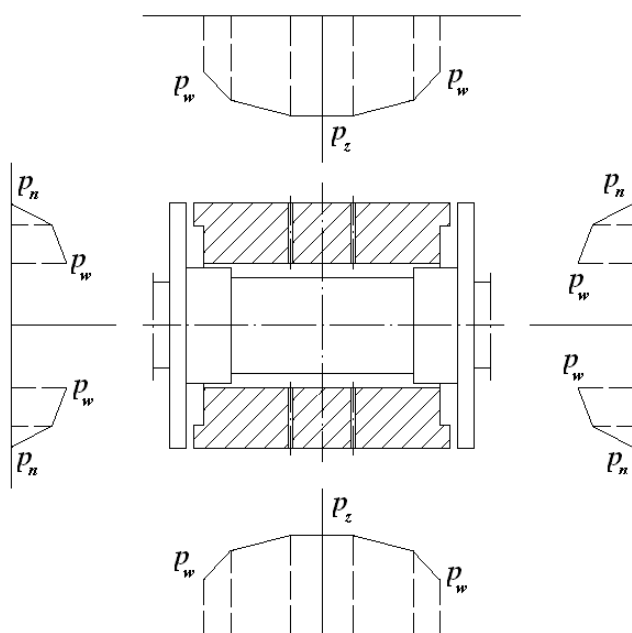
Gazostatyczne łożysko poprzeczne (rys. 2), również zgłoszone do opatentowania [6], zawiera wał 4, który na zewnętrznej powierzchni części środkowej posiada podtoczenie. Wał 4 jest umieszczony w cylindrycznej panewce 1 tak, iż między powierzchnią zewnętrzną wału 4 i powierzchnią wewnętrzną panewki 1 jest szczelina. Grubość części 6 i 7 szczeliny między końcami wału 4 i panewką 1 jest mniejsza od grubości części 5 szczeliny między środkową częścią wału 4 z podtoczeniem i panewką 1. W panewce 1, w połowie jej długości, są przelotowe, promieniowe otwory, rozmieszczone równomiernie na obwodzie panewki 1 wzdłuż dwóch łuków okręgów 2, 3 jednakowo odległych od pionowej osi symetrii łożyska.

Urząd Patentowy uznał innowacyjność prezentowanych konstrukcji przyznając tym konstrukcjom znaki patentowe.

■ Opis działania

Działanie gazostatycznego łożyska szeregowego poprzeczno-wzdłużnego z dławieniem wewnętrznym, przedstawionym na rysunku 3, jest następujące. Gaz jest

doprowadzany z zewnątrz pod jednakowym ciśnieniem do wszystkich małych otworów w dwóch rzędach 2 i 3 panewki 1 łożyska szeregowego poprzeczno-wzdłużnego z dławieniem wewnętrznym (rys. 3). Gaz, przepływając przez małe otwory ulega częściowemu zdławieniu do wartości ciśnienia p_z , a następnie przy braku obciążenia opływa wał 4 z tym samym ciśnieniem p_z pomiędzy otworami w rzędach 2 i 3. Począwszy od otworów w rzędach 2 i 3 gaz płynie na zewnątrz w obu kierunkach najpierw wzdłuż większej promieniowej szczeliny 5, a potem wzdłuż mniejszej promieniowej szczeliny 6 lub 7. Następnie gaz z łożyska poprzecznego przepływa promieniowo do otoczenia przez czołowe szczeliny łożyskowania wzdłużnego kolejno większą 10 i mniejszą 11 lub większą 12 i mniejszą 13. Przepływający gaz przez szczeliny promieniowe i oporowe obniża swoje ciśnienie. Obniżenie ciśnienia jest tym większe im mniejsze są szczeliny. Bez obciążenia wału 4 rozkłady ciśnień działających na wał oraz oporowe tarcze 8 i 9 są jednakowe względem osi symetrii. Ciśnienie gazu przemieszczającego się w obie strony wzdłuż osi łożyska poprzecznego obniża się z wartości p_z do wartości p_w na jego brzegu. Następnie w łożysku wzdłużnym (oporowym) ciśnienie gazu przemieszczającego się promieniowo obniża się również według dwóch charakterystyk z wartości p_w do wartości p_n na jego wyjściu. Dzięki zastosowaniu dwóch rzędów otworów 2 i 3 oraz sztywno osadzonych tarcz na wałe 4 zabezpieczono łożysko przed pochylaniem się jego osi wzdłużnej.



Rys. 3. Rozkład ciśnień w łożysku nieobciążonym

Po przyłożeniu do wału 4 siły poprzecznej następuje jego poprzeczne przemieszczenie. Wskutek tego walcowe szczeliny przeciwstawiające się obciążeniu ulegają zmniejszeniu, a walcowe szczeliny po drugiej stronie wału 4 są powiększane zgodnie z działającym obciążeniem. Zmniejszenie szczelin jest przyczyną wzrostu ciśnień i odwrotnie, w powiększonych szczelinach zmniejszają się ciśnienia przepływającego gazu. Wytworzona różnica ciśnień po obu stronach wału 4 równoważy przyłożoną siłę poprzeczną. W ten sposób zostaje wytworzona poprzeczna siła nośna łożyska.

Po przyłożeniu siły wzdłuż osi do wału 4 działanie łożyska jest analogiczne, jak w przypadku siły poprzecznej, z tą różnicą, że zamiast walcowych szczelin zmieniają się czołowe szczeliny. Natomiast wytworzona różnica ciśnień po

obu stronach panewki 1 równoważy przyłożoną siłę wzdłużną.

Jak widać ze schematu (rys. 2) łożysko poprzeczne ma bardzo podobną zasadę działania. Z tą tylko różnicą, że ciśnienie gazu przepływającego wzdłuż osi łożyska jest zredukowane od wartości p_z do wartości p_n . Zasada tworzenia siły nośnej i odpowiedzi na zakłócenie jest dokładnie taka sama jak w części poprzecznej łożyska poprzeczno-wzdłużnego szeregowego.

Analiza matematyczna

Mając opracowaną konstrukcję łożyska napisano program analizujący zjawiska zachodzące w łożysku i wyznaczający zachowanie wału w czasie pracy.

Przygotowania do tworzenia modelu matematycznego rozpoczęto od wyboru metody analitycznej do opisu zjawisk w łożyskach aerostatycznych [2], [4], [8]. Przystępując do analizy matematycznej łożyska poprzeczno-wzdłużnego przyjęto metodę obliczeń opartą na dwóch aspektach: przepływów masowych gazu i równań dynamicznych ruchu wału. W łożysku gazostatycznym ciśnienie gazu ulega zmianie wzdłuż tworzącej wału i jego obwodu, a przepływ jest wymuszany m.in. jego zmianami. Chcąc analizować przepływy masowe podzielono przestrzeń pomiędzy wałem i korpusem na fragmenty nazwane „komorami”. Analizując budowę łożyska poprzeczno-wzdłużnego (rys. 1) uznano, że najlepszym jest podział na osiem fragmentów po obwodzie, czyli jeden otwór zasilający na jedną komorę. W ten sposób otrzymano układ, w którym komory są na osiach symetrii łożyska i pod kątami $\pi/4$. Dokonując podziału wzdłuż osi łożyska założono podział w skali $2/3 : 1/3$ (założenia te potwierdziły późniejsze badania eksperymentalne). Wynika z nich, że należy dokonać podziału wzdłuż osi na trzy równe części, dwie o większej szczelinie i jednej o mniejszej. Wobec tego przestrzeń jednej części łożyska poprzecznego lub wzdłużnego podzielono na dwadzieścia cztery komory.

Dynamikę walcowego ruchu czopa łożyska opisano równaniami na podstawie drugiego prawa Newtona oraz wzorów dotyczących tarcia wiskotycznego, które są następujące:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = - \sum_{i=1}^k \left[F p_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + T_{i,i+1} \sin \left(\alpha_i + \frac{\pi}{k} \right) \right] + P_y(t)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = - \sum_{i=1}^k \left[F p_i \sin \alpha_i + T_i \cos \alpha_i + T_{i,i+1} \cos \left(\alpha_i + \frac{\pi}{k} \right) \right] + P_z(t)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - \sum_{i=1}^k F_i p_i + P_x(t)$$

gdzie: m – masa wału zredukowana do środka, x, y, z – przesunięcie wału odpowiednio względem osi x, y, z , P_x, P_y, P_z – składowe siły obciążającej odpowiednio wzdłuż osi x, y, z , i – numer komory, k – liczba komór w jednym rzędzie w łożysku, w tym przypadku 8, F – powierzchnia nośna komory, p_i – ciśnienie w komorze nr i , α_i – położenie komory nr i , η – lepkość dynamiczna gazu, T_i – styczna siła tarcia w obszarze kąta α_i , $T_{i,i+1}$ – styczna siła tarcia w obszarze kąta α_{i+1} , D – średnica panewki, b – długość wydzielonej komory łożyska, n – prędkość obrotowa wału, h_0 – wysokość szczeliny w łożysku nieobciążonym, w zależności od położenia będzie to h_1 lub h_{17} .

Kolejne równania łożyska są związane z bilansem masy czynnika nośnego łożyska. Przepływ masy (natężenie przepływu) dla poszczególnych komór łożyska ma ogólną postać:

$$\sum Q_i = F \dot{w}_i \frac{p_i}{P_N} + \frac{V_i}{P_N} \dot{p}_i$$

gdzie: $\sum Q_i$ – wydatek (natężenie przepływu) czynnika doprowadzanego do oraz odprowadzanego z komory nr i , w_i – przemieszczenie czopa prostopadłe do komory pochodzące od obciążenia zewnętrznego, V_i – objętość komory nr i , P_N – ciśnienie normalne

W ten sposób otrzymano opis matematyczny łożyska poprzeczno – wzdłużnego. Zgodnie z założeniami analiza równań została przeprowadzona za pomocą programu MATLAB – SIMULINK.

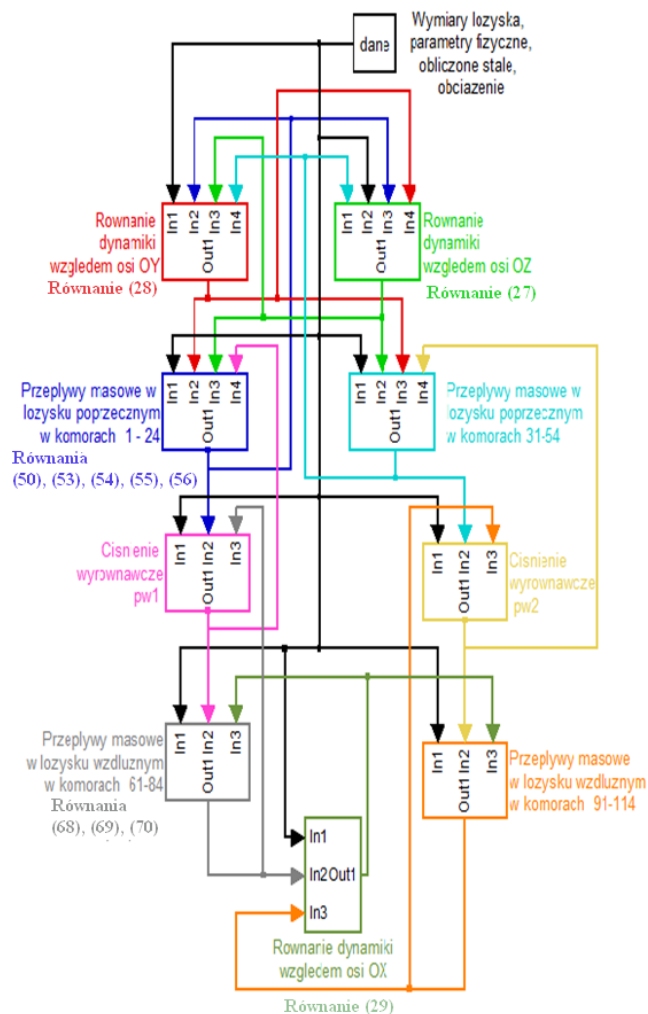
Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy programu napisanego w programie MATLAB - SIMULINK dla otrzymanych równań łożyska. W związku z dużą liczbą równań model został podzielony na części, tzw. subsystemy, z których każdy jest przeznaczony do symulacji poszczególnych części łożyska. Napisano subsystemy do symulacji części łożyska poprzecznego i wzdłużnego, równań dynamiki wału względem osi oraz ciśnień w przestrzeniach wyrównawczych. W odróżnieniu od obrazu na rysunku 4 subsystemy nie mają stałych połączeń, a przesył danych między nimi realizowany jest za pomocą bramek „Goto” i „From” bez konieczności ich łączenia.

Rozwiązując wyznaczone równania za pomocą programu MATLAB – SIMULINK otrzymuje się odpowiedź łożyska dla dowolnej siły wymuszającej. Na podstawie zbudowanych układów łożyska można obserwować zmiany odpowiedzi układu spowodowane zmianami parametrów wejściowych nawet *on-line*, czyli podczas działania układu. Wskutek tego można wyznaczyć wpływ poszczególnych wielkości na pracę łożyska, a także wyznaczać granice wpływów poszczególnych parametrów oraz określić dopuszczalne parametry eksploatacyjne łożyska. Możliwość przedstawienia wyników w postaci graficznej wykorzystuje się do wizualizacji i oceny wpływu parametrów zmiennych na pracę łożyska.

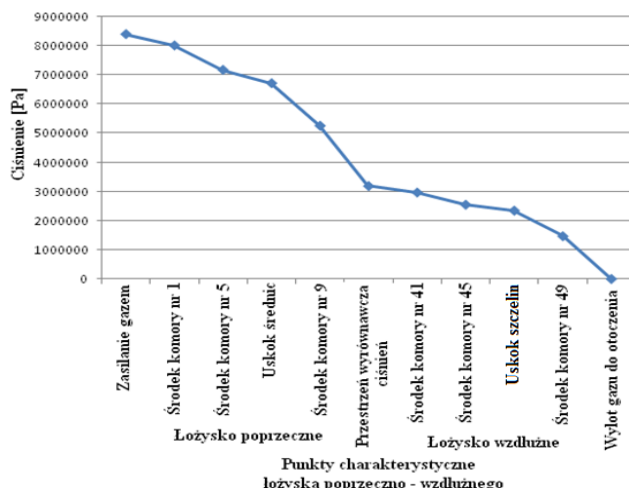
W czasie prób działania programu i analiz okazało się, że tak rozbudowany układ równań jest przyczyną spowolnienia działania komputera i wydłuża się czas obliczeń. W tym celu dokonano uproszczenia układu matematycznego zespalać po dwie komory, z ośmiu w rzędzie otrzymano cztery, czyli jedną komora na dwa otwory zasilające. Przedstawiony układ blokowy (rys. 4) nie zmienia się, a tylko zmniejszy się liczba równań.

Celem wstępnej oceny poprawności wykonywanych przez program symulacyjny obliczeń wykonano wykres obliczonych wartości ciśnień wewnątrz łożyska poprzeczno - wzdłużnego i porównano z danymi literaturowymi. W tym celu wykonano wykres zmian ciśnienia gazu wewnątrz łożyska poprzeczno – wzdłużnego, który przedstawiono na rysunku 5.

Z wykresu (rys. 5) wynika, że wartość zmniejszenia ciśnienia na powierzchniach wału czy tarczy jest nierównomierna. Mniejsze obniżenie ciśnienia można zaobserwować w przestrzeniach o większej szczeliny. Większe obniżenia ciśnienia dają się natomiast zaobserwować na odcinkach, gdzie jest mniejsza szczelina, czyli od uskoku średnic do ciśnienia wyrównawczego i od uskoku szczelin do ciśnienia otoczenia.



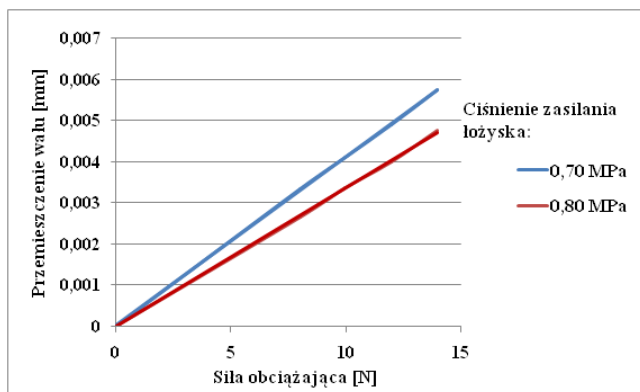
Rys. 4. Schemat blokowy programu symulacyjnego



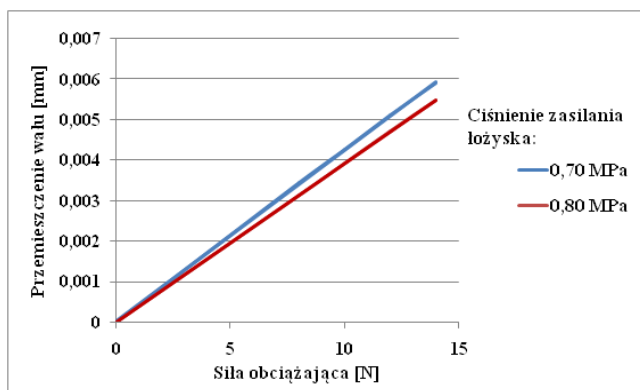
Rys. 5. Wykres zmian obliczonych wartości ciśnienia gazu w łożysku poprzeczno – wzdłużnym szeregowym w punktach charakterystycznych (środki komór i krawędzie uskoków)

Wyniki analizy matematycznej łożyska

Wyniki obliczeń przemieszczenia wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym przy obciążeniach poprzecznych przedstawiono w postaci wykresów przemieszczenia wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym w funkcji poprzecznej siły obciążającej dla poszczególnych prędkości obrotowych na rysunkach 6 ÷ 7.

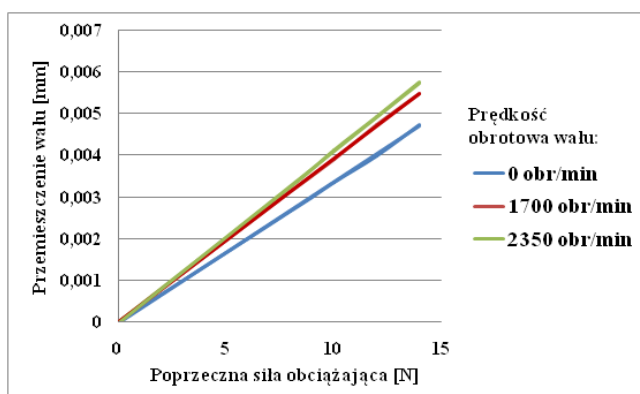


Rys. 6. Wykres obliczonych wartości przemieszczenia poprzecznego wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym w funkcji siły obciążającej dla ciśnień zasilania łożyska 0,70 MPa i 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 0 min^{-1}

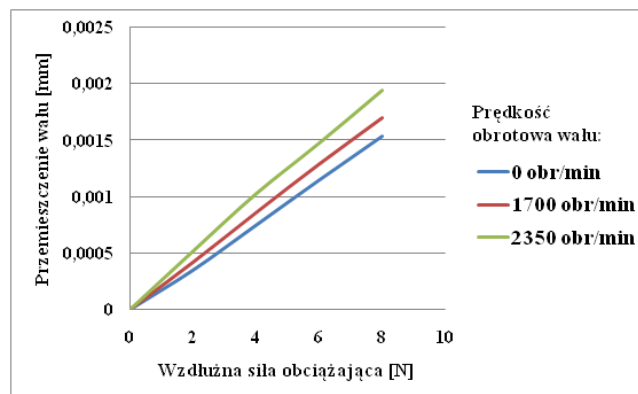


Rys. 7. Wykres obliczonych wartości przemieszczenia poprzecznego wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym w funkcji siły obciążającej dla ciśnień zasilania łożyska 0,70 MPa i 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 1700 min^{-1}

Obliczone wartości przemieszczenia wału w funkcji siły przy obciążeniach złożonych zaprezentowano w postaci wykresów na rysunkach 8 i 9. Obliczenia wykonano dla prędkości obrotowych wału 0 min^{-1} , 1700 min^{-1} oraz 2350 min^{-1} i ciśnieniu zasilającym 0,80 MPa.

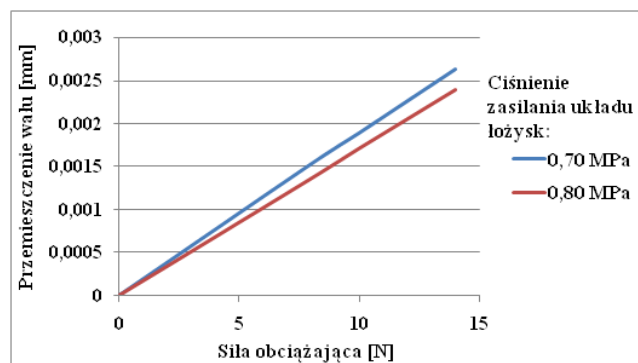


Rys. 8. Wykres obliczonych wielkości przemieszczenia poprzecznego wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym przy obciążeniu złożonym w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożyska 0,80 MPa i trzech prędkości obrotowych wału

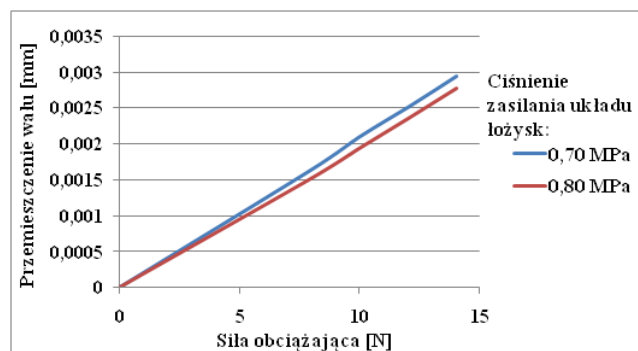


Rys. 9. Wykres obliczonych wielkości przemieszczenia wzdłużnego wału w łożysku poprzeczno – wzdłużnym przy obciążeniu złożonym w funkcji siły obciążającej dla ciśnienia zasilania łożyska 0,80 MPa i trzech prędkości obrotowych

Celem poszerzenia zakresu analizy matematycznej założono wymiary geometryczne wału i układu łożysk. Program matematyczny został poszerzony o dodatkowe elementy i wykonano obliczenia przemieszczenia wału w układzie łożysk. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów przemieszczenia wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla poszczególnych prędkości obrotowych wału na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Wykres obliczonych wielkości przemieszczenia poprzecznego wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla ciśnień zasilania układu łożysk 0,70 MPa i 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 2350 min^{-1}



Rys. 11. Wykres obliczonych wielkości przemieszczenia poprzecznego wału w układzie łożysk w funkcji siły obciążającej dla ciśnień zasilania układu łożysk 0,70 MPa i 0,80 MPa i prędkości obrotowej wału 2900 min^{-1}

Otrzymane wyniki analizy matematycznej były na tyle pozytywne, że kontynuowano prace nad łożyskami. Należało tylko potwierdzić wartości wyznaczonych przemieszczeń wału z danymi laboratoryjnymi. W tym celu zbudowano stanowisko laboratoryjne i wykonano badania przemieszczenia wału dla analogicznych parametrów

fizycznych łożysk. Odpowiednie dane porównano ze sobą i dokonano oceny ich zbieżności, co przedstawiono w kolejnej publikacji.

LITERATURA

1. Brzóska J., Dorobczyński L., Programowanie w MATLAB. Wydawnictwo MIKOM, Warszawa, 1998 r.
2. Bukowski J., Kijkowski P., Kurs mechaniki płynów. PWN, Warszawa, 1980 r.
3. Dabney J. B., Harman T. L., SIMULINK – Dynamic System Simulation for Matlab. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1998 r.
4. Lewandowski D., Lewandowski M., Przybył R., Tłok z podparciem hydrostatycznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Mechanika nr 80, Łódź, 1990 r.
5. Oryński F., Kawczyński S., Wybór łożysk do sprężarek gazowych. Hydraulika i Pneumatyka, 6, 14 – 19, 2009 r.
6. Oryński F., Kawczyński S., Gazostatyczne łożysko poprzeczne otworowe [z podtoczeniem na wale]. Zgłoszenie patentowe P-398003 z dnia 06.02.2012 r.
7. 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.
8. Oryński F., Pawłowski W., Simulation and Experimental Research of the Grinder's Wheelhead Dynamics. Journal of Vibration and Control (USA), vol. 10, No.6, 915-930, 2004 r.