

# DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE OPORÓW RUCHU ŁOŻYSKA SKOŚNEGO

Jan Kosmol<sup>1a</sup>, Piotr Chwieduk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska*

<sup>a</sup>*jkosmol@polsl.pl*

## Streszczenie

Na 52. sympozjone "Modelowanie w mechanice" przedstawiono model matematyczny do obliczeń oporów ruchu w łożyskach skośnych. Obecnie chcemy eksperymentalnie zweryfikować opracowany model. W referacie przedstawione zostało stanowisko badawcze umożliwiające pomiar oporów ruchu łożysk tocznych skośnych w postaci momentu oporów na wałku napędzającym. Stanowisko to umożliwi badanie wpływu napięcia wstępnego łożysk skośnych na opory ruchu oraz wpływu prędkości obrotowej (do 18.000 obr/min) łożysk na opory ruchu. Napięcie wstępne łożysk jest realizowane za pomocą sprężyn talerzowych, dlatego w referacie przedstawiono wyniki wzorcowania tych sprężyn. Odkształcenia tych sprężyn posłużyły równocześnie do identyfikacji wielkości napięcia wstępnego. W referacie przedstawiono przykładowe wyniki badań w postaci oporów ruchu 2 łożysk skośnych w funkcji napięcia wstępnego i w funkcji prędkości obrotowej dla łożysk suchych i ze środkiem smarnym.

**Słowa kluczowe:** łożysko skośne, opory ruchu

## EMPIRICAL IDENTIFICATION OF BALL BEARING RESISTANCE

### Summary

At 52 Symposium "Modeling in Mechanics" a mathematic model for a ball bearing resistance was presented. Now, we would like to verify the worked out model on empirical way. In the paper an empirical stand for the ball bearing resistance is shown. We have a possibility to measure the torque of resistance on the drive shaft. It is possible to investigate the influence of preload of bearings and of rotational speed (up to 18.000 rev/min) on torque of resistance. Because the preload of bearings is realized by springs, results of determination of their character are shown too. Displacements of the springs were used for identification of preload at once. Examples of experimental results for 2 ball bearings are shown, it means, the influence of preload and of rotational speed on resistance torque for dry bearing and bearing fulfilled with grease

**Keywords:** ball bearing, resistance of movement

### 1. WSTĘP

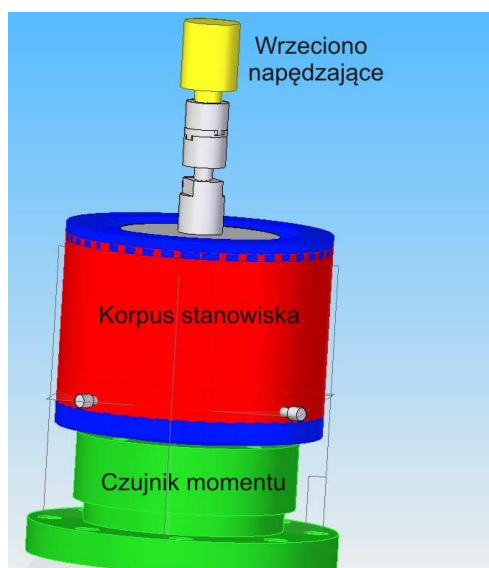
Rozwój obróbki ubytkowej w kierunku tzw. szybkościowego skrawania HSC (High Speed Cutting) wymusza znaczące zmiany w konstrukcji obrabiarek przeznaczonych do takich technologii. Zmiany konstrukcyjne mają umożliwiać prace z wyraźnie większymi parametrami kinematycznymi, tj. z większymi prędkościami obrotowymi, nierzadko kilka, kilkanaście a czasami i kilkadziesiąt tysięcy obr/min oraz prędkościami ruchów postępowych, sięgających 30 - 60 m/min i więcej. Ponadto maszyny takie muszą charakteryzować się wyraźnie lepszymi parametrami dynamicznymi, tzn., wysokimi

przyspieszeniami ruchów w stanach przejściowych (1 - 3)g, znacznie wyższą odpornością na drgania (wibrostabilnością), a także wyraźnie większą termostabilnością.

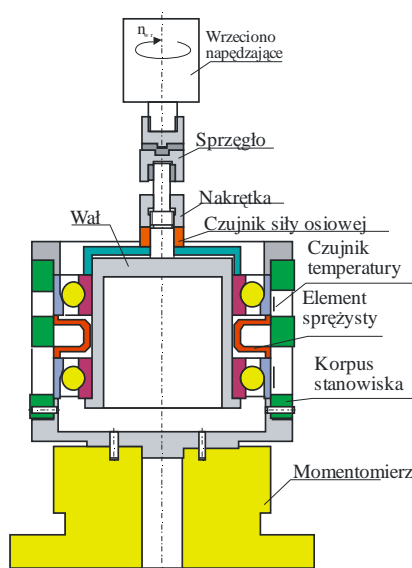
Jedną z istotniejszych konsekwencji wyższych parametrów kinematycznych jest wzrastająca ilość ciepła, jaka powstaje w ruchowych parach kinematycznych. Dotyczy to przede wszystkim wrzecion i ich łożyskowań. Proporcjonalnie, jakkolwiek nie w sposób liniowy, do wzrastającej prędkości obrotowej wrzeciona rośnie ilość ciepła powstającego w łożyskach. Zmiana prędkości obrotowej skutkuje bowiem nie tylko wprost proporcjo-

nalną zmianą mocy strat ( $N_{\text{strat}} = M_{\text{oporow}} \omega_{\text{wrzeciona}}$ , gdzie:  $N_{\text{strat}}$  jest stratami mocy,  $M_{\text{oporow}}$  jest momentem oporów ruchu na wrzecionie,  $\omega_{\text{wrzeciona}}$  jest prędkością kątową wrzeciona), ale i zmianami sił kontaktowych w strefach kontaktu elementów tocznych z pierścieniami łożyskowymi (wzrost prędkości obrotowej wrzeciona przyczynia się do wzrostu sił odśrodkowych i żyroskopowych od wirujących elementów tocznych, a tym samym i do zmian sił kontaktowych) wpływających na moment oporów ruchu. W [1] przedstawiono analityczną próbę oszacowania sił kontaktowych w funkcji napięcia wstępnego łożyska skośnego i jego prędkości obrotowej (prędkości obrotowej pierścienia wewnętrznego). Przyjmując, że siły tarcia tocznego w strefach kontaktowych są proporcjonalne do sił kontaktowych, gdzie współczynnik proporcjonalności jest równy współczynnikowi tarcia tocznego, można dokonać próby oszacowania oporów ruchu na drodze analitycznej. Jednakże takie oszacowanie będzie obarczone błędem doboru współczynnika tarcia tocznego, którego wartość jest w jakiejś mierze funkcją odkształcenia kontaktowego. Ponadto, jak wykazują badania eksperymentalne [4], w łożysku tocznym powstaje także tarcie poślizgowe, którego wpływ na opory ruchu łożyska może być większy niż tarcia tocznego. Ostatecznie tak wyznaczone opory ruchu muszą zostać zweryfikowane na drodze doświadczalnej.

a)



b)



Rys. 1. Koncepcja pomiaru momentu oporów ruchu łożysk skośnych (a) i schemat stanowiska badawczego (b)

Moment napędowy, przekazywany na wał napędowy stanowiska, uzyskuje się z wrzeciona głównego centrum obróbkowego DMU 60MB, które umożliwia bezstopniową zmianę prędkości do 18.000 obr/min. Całe stanowisko badawcze jest umieszczone na stole centrum obróbkowego a wał napędowy jest sprzęgnięty z wrzecionem obrabiarki (rys. 2b).

Wał stanowiska jest połączony poprzez sprzęgło z wrzecionem napędzającym, umożliwiając tym samym nadanie ruchu obrotowego dwom łożyskom skośnym.

W literaturze nie ma zbyt wielu informacji z badań doświadczalnych oporów ruchu łożysk tocznych skośnych. W [5] przedstawiono bardzo skromne wyniki takich badań w postaci jednego wykresu wpływu prędkości obrotowej na moment oporów ruchu dla konkretnej pary łożysk skośnych. Wydaje się, że tego typu badania nie są powszechnie ujawniane, jakkolwiek na pewno są prowadzone.

## 2. KONCEPCJA STANOWISKA DO WYZNACZANIA OPORÓW RUCHU

W Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej opracowano stanowisko badawcze, umożliwiające doświadczalne wyznaczenie oporów ruchu łożyska tocznego skośnego. Opory ruchu łożyska są w tym przypadku definiowane, jako moment obciążenia na wale napędowym (w tym przykładzie napędzany jest pierścień wewnętrzny łożyska a pierścień zewnętrzny jest unieruchomiony). Przyjęto założenie, że moment obrotowy, przenoszony z korpusu stanowiska na czujnik momentu (rys. 1) jest momentem oporów ruchu. Do badań wykorzystywano czujnik Kistler 7292, umożliwiający pomiary momentu i trzech składowych siły.

Pierścienie wewnętrzne tych łożysk są osadzone na napędzanym wale. Natomiast pierścienie zewnętrzne łożysk są osadzone w nieruchomym korpusie (tulei). Pasowanie pierścieni wewnętrznych i zewnętrznych zostało tak dobrane, aby można było je przemieszczać względnie swobodnie, pod działaniem nakrętki, wytwarzającej napięcie wstępne. Jest to pasowanie luźniejsze niż zazwyczaj się stosuje w układach napędowych wrzecion obrabiarek, ale dzięki temu zmniejszono niekontrolowany wpływ sił tarcia pomiędzy pierścieniami łożysk.

skowymi a wałem napędowym i tuleją na napięcie wstępne łożysk. O wielkości napięcia wstępnego decyduje element sprężysty, który podlega ścisaniu w miarę obrotu nakrętki. Znajduje się on pomiędzy pierścieniami zewnętrznymi dwóch takich samych łożysk skośnych. Od wielkości jego ściśnięcia zależec będzie napięcie wstępne obu łożysk. Dla wyznaczania rzeczywistej, bieżącej wartości tego napięcia wstępnego zastosowano podwójny układ pomiarowy, składający się z czujnika siły osiowej Kistler 9102A oraz zegarowego czujnika przemieszczeń (niepokazanego na rys. 1b). Czujnik siły osiowej pozwala na bezpośredni pomiar siły, z jaką nakrętka oddziałuje na pierścień wewnętrzny łożyska górnego (za pośrednictwem pokrywy dociskowej). Tak zmierzona siła osiowa nie może być utożsamiana z napięciem wstępnym łożysk skośnych, ponieważ część tej siły idzie na pokonanie oporów tarcia, towarzyszących przemieszczaniu się pierścieni łożyskowych po powierzchni wałka i korpusu stanowiska. Tak więc siła napięcia wstępnego łożysk jest różnicą pomiędzy zmierzoną przez czujnik siły osiowej wartością siły a nieznaną siłą tarcia. Dlatego zastosowano drugi pomiar napięcia wstępnego, mierząc przemieszczenia ściskanego elementu sprężystego i wyznaczając je (napięcie wstępne) na podstawie charakterystyki wzorcowania tego elementu.

a)



b)



Rys. 2. Widok stanowiska do pomiaru oporów ruchu łożysk tocznych skośnych [2]; 1-czujnik siły osiowej, 3,6-urządzenia rejestrujące, 5,7,9-wzmocniacze sygnałów, 4-czujnik momentu, 8,11-czujniki temperatury PT-100, 10-pirometr, 11-kamera termowizyjna

### 3. WZORCOWANIE STANOWISKA

Ponieważ wiedza o rzeczywistej wartości napięcia wstępnego łożysk skośnych jest istotna dla celu badawczego, dokonano wzorcowania elementu sprężystego. Wzorcowanie przeprowadzono dwuetapowo. Najpierw wyznaczono zależność przemieszczenia ściskanego elementu sprężystego od siły ściskającej. Dokonano tego poza stanowiskiem badawczym, czyli bez wpływu sił tarcia pierścieni łożyskowych o wał napędowy i tuleję korpusu na wielkość siły napięcia wstępnego. Na rys. 3a przedstawiono wynik takiego wzorcowania.

Charakterystyka na rys. 3a dotyczy elementu sprężystego (dwóch sprężyn talerzowych) i jest zbliżona do liniowej o współczynniku kierunkowym 0,2702 mm/N.

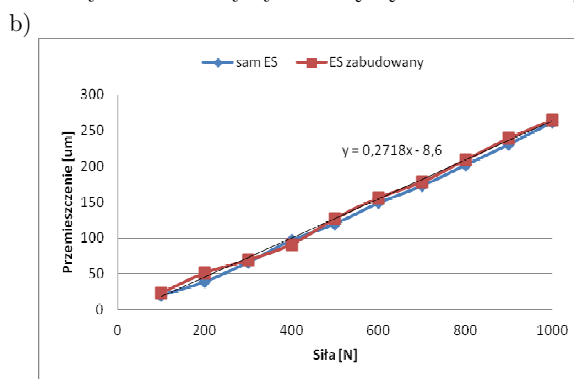
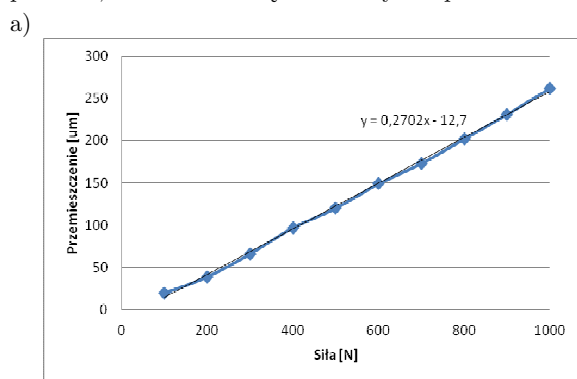
Na rys. 1 nie zaznaczono wszystkich możliwości pomiarowych stanowiska. Dotyczy to zwłaszcza temperatur. Oporom ruchu towarzyszy powstawanie ciepła i wzrost temperatury. Ten wzrost temperatury oddziałuje zwrótnie na opory ruchu, np. poprzez zmianę współczynnika lepkości smaru. Zachodzi więc konieczność kontrolowania temperatury podczas badań.

W tym celu na pierścieniach zewnętrznych łożysk naklejono czujniki temperatury typu PT 100. Pozwalają one na bieżące śledzenie i rejestrację temperatury pierścieni zewnętrznych. Podobnie postąpiono z korpusem stanowiska, naklejając na nim takie same czujniki temperatury. Natomiast w przypadku pierścieni wewnętrznych, ruchomych, kiedy nie można zastosować podobnej metody pomiarowej, temperaturę mierzono metodami pirometrycznymi (używano pirometru Optris Ctlaser). Wymagało to pokrycia tego pierścienia specjalną farbą odbłaskową, pozwalającą na uzyskanie wysokiego współczynnika emisyjności oraz na wzorcowanie takiego sposobu pomiaru temperatury. Ponadto wykorzystywano kamerę termowizyjną, typu VIGOCAM V50, do monitorowania rozkładu temperatur całego stanowiska. Na rys. 2 pokazano stanowisko badawcze do pomiaru oporów ruchu łożysk tocznych, skośnych [2].

Na tej podstawie można szacować wielkość napięcia wstępnego, mierząc przemieszczenia ściskanego elementu sprężystego. W drugim kroku zmontowano kompletne stanowisko badawcze i powtórzono procedurę wzorcowania elementu sprężystego. W tym przypadku wynik wzorcowania jest bardziej adekwatny do rzeczywistych warunków działania mechanizmu wstępnego napinania łożysk, ponieważ uwzględnia również efekty tarcia, jakie występują pomiędzy pierścieniami zewnętrznymi łożysk a tuleją korpusu oraz pomiędzy pierścieniami wewnętrznymi łożysk a wałkiem napędowym.

Na rys. 3b zestawiono obie charakterystyki wzorcowania, tj. samego elementu sprężystego (jest to, ta sama charakterystyka, co na rys. 3a, oznaczona, jako "sam ES") i po zmontowaniu całego stanowiska (oznaczona,

jako "ES zabudowany"). Obie charakterystyki są bardzo podobne, tzn. zbliżone są do liniowych i prawie równoległe.



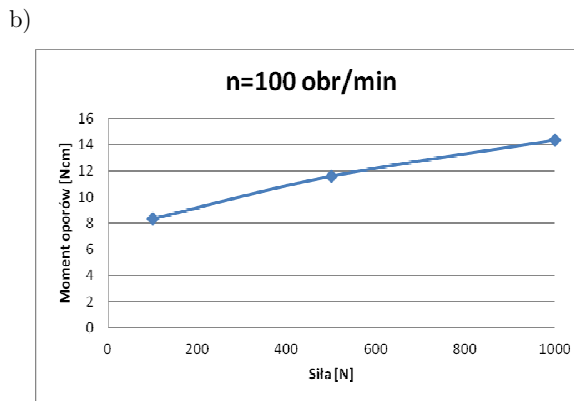
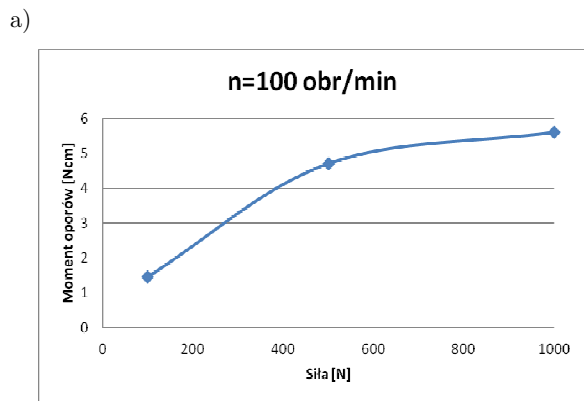
Rys. 3. Wyniki wzorcowania elementu sprężystego: poza stanowiskiem (a), po całkowitym zmontowaniu stanowiska (b) [2]

Tak więc wpływ sił tarcia pomiędzy pierścieniami łożysk a wałkiem i korpusem na wielkość napięcia wstępnego łożysk wydaje się być pomijalnie mały, a pomiar wielkości tego napięcia przy pomocy czujnika siły osiowej (rys. 1b) można uznać za wystarczająco dokładny. W przeprowadzonych badaniach napięcie wstępne mieściło się w granicach do 1000N.

#### 4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania eksperymentalne oporów ruchu łożysk przeprowadzono dwustopniowo. W pierwszym kroku zbadano wpływ napięcia wstępnego łożysk i prędkości obrotowej na moment oporów ruchu dla łożysk suchych, tzn. bez środka smarowego. Tym sposobem wyeliminowano wpływ samego środka smarowego na mierzone opory ruchu, o którym wiadomo, że jest znaczny. Przyjęto ponadto, że temperatura łożysk w trakcie badań nie

ulegała zmianie. Dlatego sam pomiar odbywał się bardzo krótko, 1 - 2 sekundy, w trakcie których wrzeciono obrabiarki rozpędzało się do zadanej prędkości, następnie utrzymywany był stan ustalony przez ok. 1 sekundę, a następnie następowało zahamowanie ruchu. Ponieważ temperatura pierścieni łożyskowych była kontrolowana, zaistniała zatem możliwość weryfikacji tego założenia. W trakcie tych badań zmiany temperatury nie przekraczały 1°C, i wynikały raczej z wahań temperatury otoczenia. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych w postaci zmierzonego momentu. Rys. 4a obrazuje zmianę momentu oporów ruchu w funkcji napięcia wstępnego łożysk bez obecności środka smarowego, a rys. 4b zmianę momentu oporów ruchu w obecności środka smarowego dla prędkości obrotowej wałka 100 obr/min (przyjęto, że dla takiej prędkości obrotowej opory wiskotyczne wywołane środkiem smarowym nie zależą od prędkości).



Rys. 4. Wpływ napięcia wstępnego łożyska na moment oporów ruchu dla łożysk suchych, bez środka smarowego (a) i w obecności środka smarowego (b) [2]

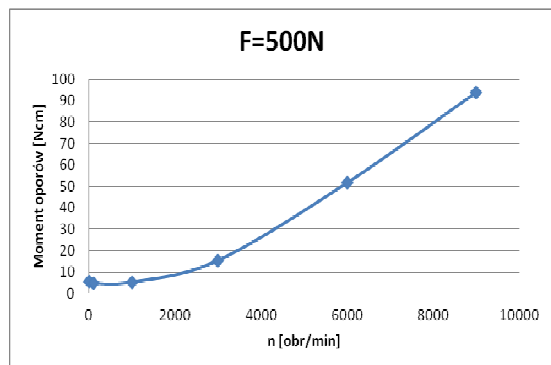
Przebieg oporów ruchu w zależności od napięcia wstępnego dla ruchu bez obecności środka smarowego jest silnie nieliniowy. Dotyczy to jednak zakresu bardzo małego napięcia wstępnego. Wydaje się, że począwszy od ok. 500N można uznać wpływ napięcia wstępnego na moment oporów ruchu za reprezentatywny. Wpływ ten

nie jest duży, można go oszacować na ok. 0,16 Ncm/100N.

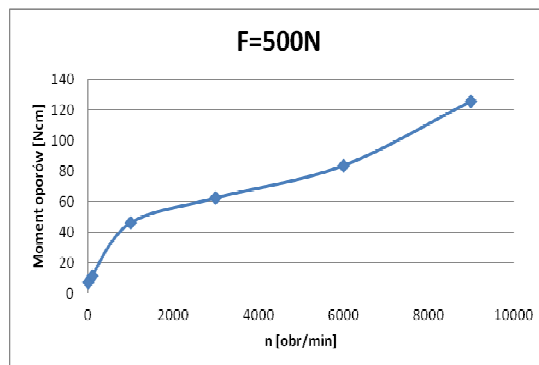
Wpływ obecności środka smarowego na opory ruchu jest znaczny, ponieważ wartości liczbowe momentu oporów, w stosunku do momentu oporów bez obecności smaru, są kilkakrotnie wyższe (ok. 2 - 2,5 raza). Przykładowo, dla minimalnego napięcia wstępnego, na po-

ziomie ok. 100N, moment oporów ruchu, w obecności smaru, jest prawie 8-krotnie większy. To najlepiej obrazuje znaczenie smaru z punktu widzenia oporów ruchu. Można mówić o liniowym wpływie napięcia wstępnego na moment oporów ruchu w badanym zakresie. Stała charakterystyki zlinearyzowanej wynosi ok. 0,67 Ncm/100N, czyli jest ok. 4-krotnie większa niż bez obecności smaru.

a)



b)



Rys. 5. Wpływ prędkości obrotowej pierścienia wewnętrznego (wałka napędowego) łożyska na moment oporów ruchu dla łożysk bez środka smarnego (a) i w obecności smaru (b) [2]

Generalnie wpływ prędkości obrotowej na opory ruchu jest bardzo duży i w zakresie przeprowadzonych badań można mówić o zbliżonym do liniowego, wprost proporcjonalnym przyroście tych oporów (dla prędkości powyżej 3.000 obr/min).

Porównując wyniki badań zamieszczonych na rys. 5a i na rys. 5b, można mówić o zmniejszonym wpływie obecności smaru w porównaniu do wniosków płynących z rys. 4, tj. stanu, w którym nie ma efektów wywołanych dużą prędkością obrotową. Jeżeli porównać wpływ prędkości obrotowej na moment oporów ruchu dla łożyska bez smaru i w jego obecności przez pryzmat współczynników kierunkowych zlinearyzowanych charakterystyk (dla prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min), to dla pierwszego przypadku wynosi on ok. 13,2 Ncm/1000obr/min a dla drugiego przypadku ok. 10 Ncm/1000obr/min. Niemniej jednak opory ruchu znacząco wzrastają wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i ten fakt potwierdza celowość poszukiwania modeli oporów ruchu łożysk skośnych.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję i praktyczną realizację stanowiska badawczego do wyznaczania oporów ruchu łożysk tocznych skośnych. Umożliwia ono pomiar momentu oporów ruchu w funkcji napięcia wstępnego łożysk i prędkości obrotowej wałka napędowego. Zarówno napięcie wstępne jak i prędkość obrotowa mogą być w sposób ciągły nastawiane. Ponadto kontrolowana jest temperatura pierścieni łożyskowych, co pozwala na prowadzenie badań w znanej temperaturze. W stanowisku zastosowano sprężysty sposób wywie-

Natomiast na rys. 5 przedstawiono przykładowy wpływ prędkości obrotowej wałka napędzającego na moment oporów ruchu dla dwóch takich samych przypadków jak poprzednio, tzn. bez obecności środka smarnego na rys. 5a i w obecności środka smarnego na rys. 5b. Wnioski płynące z przykładowych wyników badań obrazujących wpływ prędkości obrotowej wałka napędowego na moment oporów ruchu łożysk są nieco odmienne od poprzednich.

rania napięcia wstępnego, co zapewnia jego dużą zmienność.

Przeprowadzone badania rozpoznawcze potwierdziły znaczący wpływ wielkości napięcia wstępnego i prędkości obrotowej wałka napędowego na opory ruchu. Wpływ prędkości obrotowej, zwłaszcza w zakresie wyższych prędkości, staje się dominujący, z punktu widzenia oporów ruchu.

Potwierdzono także duży wpływ środka smarnego na opory ruchu. Badania wstępne przeprowadzono w warunkach, w których temperatura smaru była zbliżona do temperatury otoczenia. Stąd zmierzone opory ruchu okazały się bardzo duże. Ponieważ lepkość smaru znacząco maleje wraz ze wzrostem temperatury, to opory ruchu w rzeczywistych warunkach pracy łożyska okażą się być wyraźnie mniejsze. To będzie przedmiotem dalszych badań.

Natomiast wpływ środka smarnego na opory ruchu w porównaniu do jego braku w łożysku obracającym się z większą prędkością nie jest już tak radykalnie duży jak to pokazano nr Rys. 4 (prędkość obrotowa była niewielka i wynosiła 100 obr/min). Obecność środka smarnego podnosi opory ruchu, ale tylko o kilkanaście % (w stosunku do oporów ruchu bez obecności smaru). Znaczący wpływ na opory ruchu mają natomiast siły w obszarze kontaktu kulki z bieżniami łożysk, jakie wynikają z sił odśrodkowych czy żyroskopowych. Przykładowo, zwiększenie prędkości obrotowej z 3.000 obr/min do 9.000 obr/min przyczynia się do prawie 6-krotnego wzrostu oporów ruchu w łożysku bez obecności smaru. Taki sam przyrost prędkości w łożysku z obecnością smaru wywołuje już tylko 30% wzrost oporów. Oznacza

to, że współczynnik tarcia, zwłaszcza poślizgowy, ulega zasadniczej zmianie w obecności smaru. Stosowane w praktyce wzory do obliczania tych oporów, opracowane jeszcze przez Palmgrena (za [3]), tych zjawisk nie ujmują.

Wstępna analiza porównawcza wyników badań eksperymentalnych i wyników badań analitycznych przedstawionych w [1] wskazuje na zbyt duże różnice. Oznacza to, że model obliczeniowy musi zostać udoskonalony.

## Literatura

---

1. Kosmol J., Kondziolka Ł.: Modelowanie cieplne elektrowrzeciona. Ref. wygł. na 52. sympozjone "Modelowanie w Mechanice", Gliwice-Ustroń, 2013 (praca niepublikowana).
2. Chwieduk P.: Badania cieplne na stanowisku do badań łożysk tocznych. Praca dyplomowa magisterska. Gliwice: Pol. Śl., 2013.
3. Harris T., Kotzalas M.: Rolling bearing analysis. 5th ed. Essential Concepts of Bearing Technology. London: Taylor&Francis Group, 2013.
4. Harris T., Kotzalas M.: Rolling bearing analysis. 5th ed. Advanced Concepts of Bearing Technology. London: Taylor&Francis Group, 2013.
5. Holkup T., Cao H., Kolař P., Altintas Y., Zeleny J.: Thermo-mechanical model of spindles. CIRP "Annals-Manufacturing Technology" 2010, 59.