

Obciążenie wstępne łożysk tocznych kulkowych zwykłych

Zbigniew Kusznierewicz

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się wprowadzanie do typowych konstrukcji łożyskowań tocznych wstępnego obciążenia w celu podniesienia trwałości łożysk tocznych. W artykule przedstawiono wpływ napięcia wstępnego łożysk oraz występującego obciążenia poprzecznego i wzdłużnego na trwałość i opory ruchu łożyskowań na łożyskach tocznych kulkowych zwykłych. W wyniku analizy potwierdzonej badaniami okazało się, że można dobrać obciążenie wstępne oraz dobrać odpowiedni luz poprzeczny w łożysku kulkowym zwykłym tak, że trwałość łożyska ulegnie zwiększeniu jak i zmniejszeniu ulegną opory ruchu łożyskowania. Opracowana metoda pomiaru momentu oporów ruchu w łożyskach tocznych, nazwana „metodą wybiegu”, wykazała przydatność dając konkretne wyniki w postaci nieznanych dotąd informacji na temat zmniejszania się momentu oporów ruchu dla łożysk z powiększonym luzem poprzecznym w zakresie pracy pod kątem obciążenia mniejszym od kąta działania łożyska. Pokazano jak poszczególne kulki w łożysku są obciążone w zakresie od obciążenia poprzecznego do wzdłużnego oraz co się dzieje z sumą sił oddziaływania kulek na bieżnię przy określonej sile zewnętrznej obciążającej łożysko.

Słowa kluczowe: łożysko toczne kulkowe zwykłe, obciążenie wstępne, kąt działania łożyska, luz poprzeczny w łożysku, moment tarcia

1. Wprowadzenie

W katalogach czołowych producentów łożysk tocznych oraz silników elektrycznych małej mocy, których wirniki są łożyskowane na łożyskach kulkowych zwykłych, zaczęto podawać informacje na temat wymaganych minimalnych obciążeń poprzecznych lub napięcia wstępnego łożysk tocznych. Brak minimalnego obciążenia poprzecznego lub wzdłużnego napięcia wstępnego, w warunkach wysokich prędkości lub częstej pracy start stopowej z dużymi przyspieszeniami, powoduje ryzyko uszkodzenia łożyska w wyniku zatarcia. Poprawna praca łożyska wymaga styku wszystkich elementów tocznych z obu bieżniami przy zachowaniu tarcia tocznego. Brak styku powoduje zakłócenia w ruchu obrotowym elementu tocznego: opóźnienie, przyspieszenie a w najgorszym przypadku zamiast toczenia się – ślizganie.

Firma SKF [1] dla łożysk kulkowych zwykłych a szczególnie dla przypadków, gdzie występują gwałtowne przyspieszenia, praca start stopowa czy prędkość obrotowa powyżej 1/2 prędkości granicznej, zaleca minimalne obciążenie poprzeczne odpowiadające 0,01 C , gdzie C – nośność ruchowa łożyska. Dla łożyskowań, w których nie ma możliwości zapewnienia minimalnego

obciążenia zaleca stosowanie łożysk typu NoWear z powłokami węglowymi na bieżniach i elementach tocznych. SKF zaleca dla łożysk kulkowych zwykłych jednorzędowych wyznaczenie wartości minimalnego obciążenia poprzecznego ze wzoru:

$$F_{rm} = k_r \left(\frac{vn}{1000} \right)^{2/3} \left(\frac{d_m}{100} \right)^2$$

gdzie: F_{rm} – minimalne obciążenie poprzeczne w kN, $k_r = 0,025$ współczynnik obciążenia minimalnego dla łożysk serii 60, 161 i 62, v – lepkość oleju w temperaturze roboczej w mm^2/s , n – prędkość obrotowa w obr./min, $d_m = 0,5(d + D)$ – średnia średnica łożyska w mm.

Wymagania postawione przez producentów łożysk tocznych odnośnie minimalnego obciążenia poprzecznego są trudne do zrealizowania dla producentów silników elektrycznych DC małych mocy. Masowo produkowane silniki komutatorowe ze względu na niską trwałość szczotek mają gwarantowany czas pracy od 5 do 10 tysięcy godzin. łożyska toczne bez obciążenia minimalnego uzyskują podobny okres pracy. W celu znacznego zwiększenia czasu pracy silnika firma Maxon [2] w silnikach serii DCX, stosuje łożyska toczne kulkowe zwykle z określoną wartością napięcia wstępnego wzdłużnego. Katalog zawiera informację o wartości siły napięcia wstępnego i dopuszczalnych obciążeniach łożysk siłami wzdłużną i poprzeczną. Do uzyskania napięcia wstępnego stosowana jest sprężyna naciskowa. Silniki wysokoobrotowe serii EC firmy Maxon w porównaniu z silnikami serii DCX mają większe wartości sił napięcia wstępnego wzdłużnego oraz mniejsze obciążenia poprzeczne ze względu na siły odśrodkowe działające na elementy toczne.

O trwałości łożyska decydują w dużej mierze wartości sił oddziaływania kulek na bieżnię oraz rodzaje tarcia między kul-

Autor korespondujący:

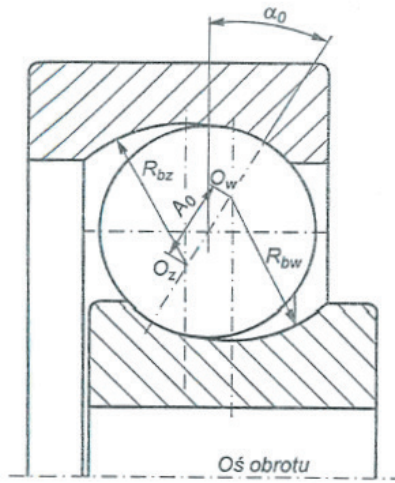
Zbigniew Kusznierewicz, z.kusznierewicz@mchtr.pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 10.10.2016 r., przyjęty do druku 09.12.2016 r.

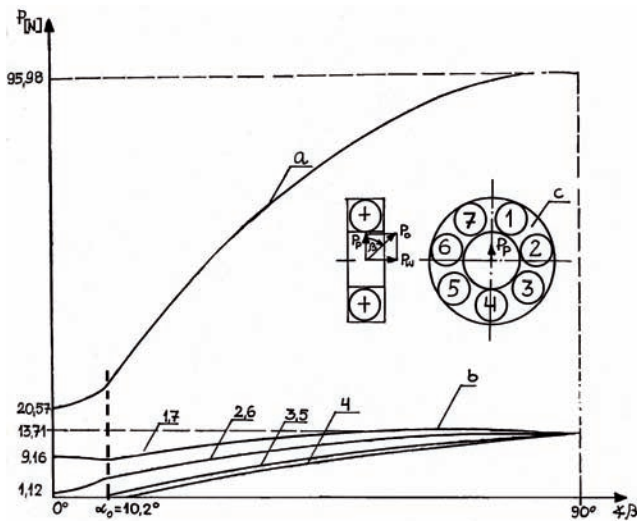


Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Konstrukcja łożyska tocznego kulkowego zwykłego: α_0 – maksymalny kąt działania łożyska przy obciążeniu siłą wzdłużną; R_{bz} , R_{bw} – promienie zarysu bieżni odpowiednio pierścienia zewnętrznego (z) i wewnętrznego (w) mierzone w płaszczyźnie osiowej łożyska

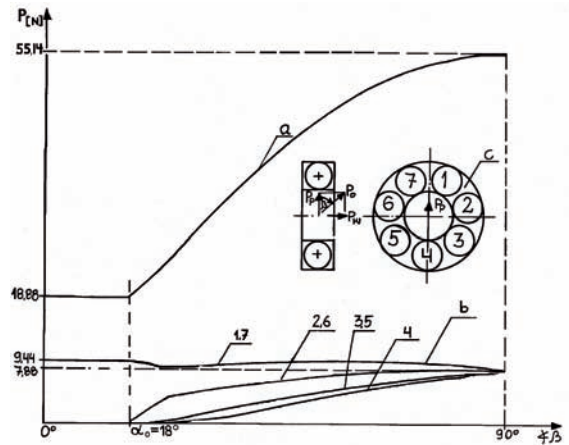
Fig. 1. Design of a standard ball bearing: α_0 – maximal contact angle of the bearing while loaded with axial force; R_{bz} , R_{bw} – outline radiuses of the raceway of the external (z) and internal (w) ring, respectively, measured in the axial plane of the bearing



Rys. 2. Wykresy sił oddziaływania kulek na bieżnie łożyska typu 607 w funkcji kąta kierunku obciążenia zewnętrznego β . Wartość obciążenia ulegającego zmianie od poprzecznego do wzdłużnego $P_0 = 17$ N, luz poprzeczny w łożysku $g_p = 0$ μ m, a – suma wszystkich sił oddziaływania kulek na bieżnie, b – siły występujące na poszczególnych kulkach, c – ustawienie kulek w łożysku, α_0 – maksymalny kąt działania łożyska przy obciążeniu siłą wzdłużną $P_w = 17$ N

Fig. 2. Graphs of interaction forces between the balls and the raceways in bearing type 607 vs. external load direction angle β ; value of the load changes its direction from radial to axial $P_0 = 17$ N, radial clearance in the bearing $g_p = 0$ μ m, a – sum of all the interaction forces between the balls and the raceways, b – forces occurring at particular balls, c – arrangement of the balls in the bearing, α_0 – maximal contact angle of the bearing under a load with axial force $P_w = 17$ N

kami a bieżniami. Istotnym problemem w łożyskach kulkowych zwykłych obciążonych siłą wzdłużną jest znaczne zmniejszenie trwałości w porównaniu z obciążeniem poprzecznym, wpływ w tym przypadku ma luz poprzeczny w łożysku oraz stosunek promieni bieżni przylegających do kulki do promienia kulki. Siły oddziaływania kulek na bieżnie w poprawnie obciążonym oraz zamontowanym łożysku zależą od kąta działania łożyska α_0 , który z kolei zależy od luzu wewnętrznego w łożysku oraz promieni obu bieżni przylegających do kulki (rys. 1).

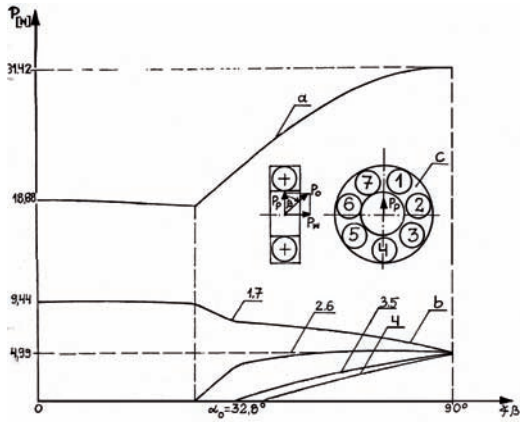


Rys. 3. Wykresy sił oddziaływania kulek na bieżnie łożyska typu 607 w funkcji kąta kierunku obciążenia zewnętrznego β . Wartość obciążenia ulegającego zmianie od poprzecznego do wzdłużnego $P_0 = 17$ N, luz poprzeczny w łożysku $g_p = 8$ μ m, a, b, c, α_0 , P_w – identyczne jak na rys. 2 Fig. 3. Graphs of interaction forces between the balls and the raceways in bearing type 607 vs. external load direction angle β ; value of the load changes its direction from radial to axial $P_0 = 17$ N, radial clearance in the bearing $g_p = 8$ μ m, a, b, c, α_0 , P_w – same as in Fig. 2

Masowo produkowane łożyska toczne kulkowe zwykłe (około 80% światowej produkcji łożysk tocznych) są znormalizowane. Zgodnie z normą mamy do dyspozycji łożyska o następujących luzach poprzecznych: dla średnicy wewnętrznej łożyska od 2,5 mm do 10 mm dla luzu C2 mamy od 0 μ m do 7 μ m, dla luzu normalnego od 2 μ m do 13 μ m, a dla C3 – od 8 μ m do 23 μ m. Dla łożysk o średnicy wewnętrznej od 6 mm do 10 mm mamy jeszcze luzy powiększone C4 od 14 μ m do 20 μ m oraz C5 od 20 μ m do 37 μ m. Luzy te mogą ulegać zmianie ze względu na zastosowane pasowania mocujące łożyska na wale jak i w obudowie. Tak mało dokładnie określone wartości luzu w łożysku stwarzają istotny problem dla konstruktorów dobierających napięcie wstępne łożyskowania.

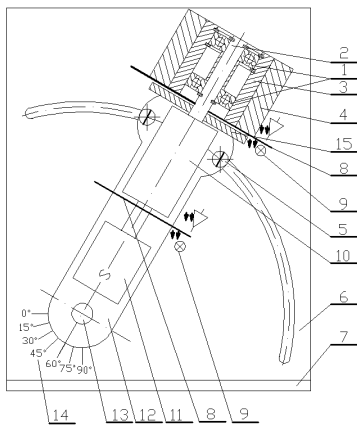
2. Analiza teoretyczna wpływu luzu poprzecznego w łożyskach kulkowych zwykłych na wielkość sił oddziaływania kulek na bieżnie przy zmianie kierunku obciążenia od poprzecznego do wzdłużnego

Analiza dotyczy wpływu luzu poprzecznego w łożysku na wartości sił oddziaływania kulek na bieżnie łożyska przy kierunku obciążenia od czysto poprzecznego do czysto wzdłużnego. Program komputerowy opracowany na podstawie pracy [3] umożliwił wyznaczenie obciążeń przenoszonych przez poszczególne kulki na bieżnie przy obracającym się jednym z pierścieni. Na rys. 2, 3, 4, przedstawiono wartości sił przenoszonych przez kulki dla łożyska typu 607 wykonanego ze stali 100Cr6 obciążonego siłą 17 N z uwzględnieniem odkształceń sprężystych. Jest to jeden z wielu rozkładów sił przy obracającym się jednym z pierścieni łożyska, wykresy dotyczą przypadku ustawienia kulek względem siły pokazanego na schemacie oznaczonym literą c. Krzywe oznaczone literą b mają na osi rzędnych odpowiadające określonemu kątowi kierunku obciążenia β wartości sił przypadające na jedną kulkę zaś krzywa oznaczona literą a sumuje siły działające na wszystkie kulki. Trwałość łożyska zależy głównie od wartości siły oddziaływania kulki na bieżnie (krzywe b) zaś moment oporów ruchu od sumy wszystkich sił oddziaływania kulek na bieżnie (krzywa a). Porównanie krzywych na trzech wykresach daje możliwość konstruktorowi tak dobrać luzy poprzeczne w łożyskach oraz napięcie wstępne łożyskowania przy danym obciążeniu zewnętrznym, aby trwałość i opory ruchu były korzystne.



Rys. 4. Wykresy sił oddziaływania kulek na bieżnię łożyska typu 607 w funkcji kąta kierunku obciążenia zewnętrznego β . Wartość obciążenia ulegającego zmianie od poprzecznego do wzdłużnego $P_0 = 17$ N, luz poprzeczny w łożysku $g_p = 32$ μ m, a, b, c, α_0 , P_w – identyczne jak na rys. 2

Fig. 4. Graphs of interaction forces between the balls and the raceways in bearing type 607 vs. external load direction angle β ; value of the load changes its direction from radial to axial $P_0 = 17$ N, radial clearance in the bearing $g_p = 32$ μ m, a, b, c, α_0 , P_w – same as in Fig. 2



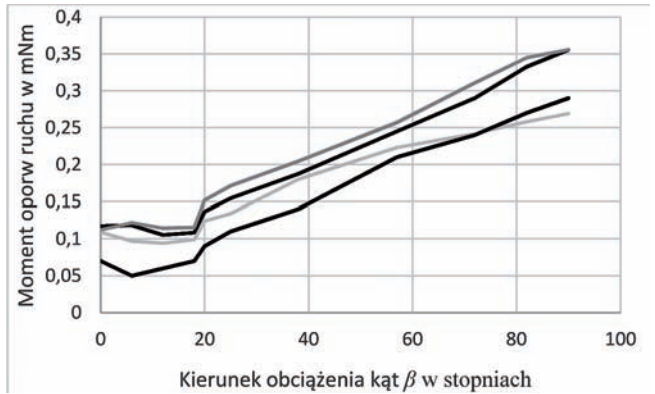
Rys. 5. Schemat stanowiska do badań momentu tarcia łożyskowania na dwóch łożyskach metodą wybiegu; 1 – badane łożyska, 2 – wałek, 3 – tuleja pośrednia, 4 – pierścień obciążający, 5 – wkręty ustalające położenie kątowe wałka, 6 – płyta czołowa, 7 – podstawa, 8 – tarcza układu impulsującego, 9 – układ fotodiody-oświetlacz, 10 – korpus, w którym łożyskowany jest wałek, 11 – silnik o regulowanej prędkości obrotowej, 12 – płyta obrotowa, 13 – oś obrotu, 14 – podziałka kątowa kąta, 15 – koło zamachowe

Fig. 5. Test rig for investigation of frictional torque of set of two bearings by use of inertia loading ring (4) and estimation of angular acceleration; 1 – tested bearing, 2 – shaft, 3 – bush, 4 – ring for loading, 5 – screws for fixing of angular position of shaft, 6 – main frame, 7 – base, 8 – disk of counting impulses, 9 – photodiode riding system, 10 – main structure for mounting of tested bearing, 11 – motor with variable rotational speed, 12 – rotating plate, 13 – axis of rotation, 14 – protractor, 15 – inertial wheel

3. Badania wpływu kierunku obciążenia na moment tarcia łożyskowania

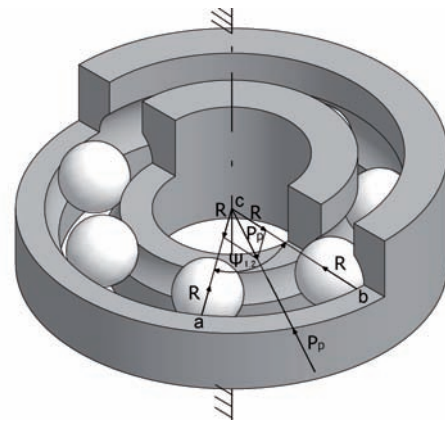
Wykonano badania wpływu luzu poprzecznego na moment tarcia w łożyskach przy obciążeniu od czysto poprzecznego do czysto wzdłużnego. Metoda pomiaru została opisana w artykule [3]. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 5.

Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 6. Wykresy dotyczą oporów ruchu łożyskowania na dwóch łożyskach. Moment oporów ruchu ze zmianą kierunku obciążenia działającego na łożysko ustalające od poprzecznego do kąta działania łożyska $\alpha_0 = 21^\circ$ nie wzrasta a nawet osiąga minimum, po przekroczeniu tego kąta następuje wzrost. W przeprowadzonej analizie teoretycznej również zwrócono uwagę na zmniejszanie się siły oddziaływania kulek na bieżnię dochodząc z kierunkiem



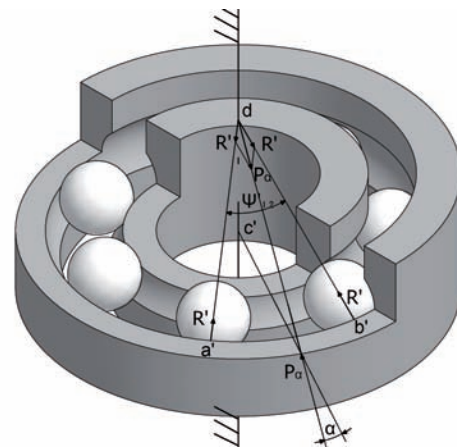
Rys. 6. Moment oporów ruchu w funkcji kąta β kierunku obciążenia działającego na łożysko ustalające dla kilku łożyskowań na dwóch łożyskach 607, wybrano do badań parami 8 łożysk o jednakowych luzach poprzecznych $g_p = 14$ μ m i odpowiadającym im kącie działania $\alpha_0 = 21^\circ$. Obciążenie $Q = 11,5$ N, $n = 400$ obr/min. łożyska smarowane dwoma kroplami oleju o lepkości 10 mm²/s (50 °C). Badania wykonano metodą wybiegu

Fig. 6. Frictional torque vs. angle β defining direction of load for few sets of two 607 bearings; 8 pairs were selected, each having the same radial clearances $g_p = 14$ μ m and respective angles $\alpha_0 = 21^\circ$; load $Q = 11,5$ N, rotational speed $n = 400$ rpm; bearings were lubricated with 2 droplets of oil having kinematic viscosity of 10 mm²/s (50 °C). Measurements were performed at a defined inertia by estimating angular acceleration of the load ring



Rys. 7. Rozkład sił w łożysku z luzem poprzecznym powiększonym obciążonym siłą poprzeczną

Fig. 7. Distribution of forces in a bearing with increased radial clearance loaded with a radial force



Rys. 8. Rozkład sił w łożysku z luzem poprzecznym powiększonym dla kąta kierunku obciążenia zewnętrznego β równego maksymalnemu kątowi działania łożyska α_0

Fig. 8. Distribution of forces in a bearing with increased radial clearance at the external load direction angle β being equal to the maximal contact angle of the bearing α_0 .

obciążenia do kąta działania łożyska α_0 . Istniejące minimum momentu oporów ruchu przy kierunku obciążenia zbliżonym do kąta działania łożyska α_0 wynika z konstrukcji wewnętrznej łożyska. Wszystkie siły oddziaływania kulek na bieżnię łożyska przechodzą przez oś obrotu łożyska (rys. 7, 8). Punkt przecięcia kierunku działania sił przemieszcza się po osi w zakresie od obciążenia poprzecznego kąt $\beta = 0$ do kąta działania łożyska α_0 , czym większy luz poprzeczny w łożysku tym większy kąt działania łożyska tym większe przemieszczenie punktu przecięcia. Zmiana odległości punktów styku kulki z bieżnią a punktem przecięcia na osi odcinki ac i bc na rys. 7. oraz $a'd$ i $b'd$ na rys. 8 powodują zmniejszenie kąta $\Psi_{1,2}$ do kąta $\Psi'_{1,2}$. Zmniejszenie kąta przy stałym obciążeniu zewnętrznym $P_p = P_0$ powoduje zmniejszenie reakcji oddziaływanie kulek na bieżnię z $R = P_p/2\cos \Psi_{1,2}/2$ na $R' = P_0/2\cos \Psi'_{1,2}/2$. i zmniejszenie momentu oporów ruchu.

4. Wnioski

W wyniku analizy potwierdzonej badaniami okazało się, że można dobrać obciążenie wstępne oraz dobrać odpowiedni luz poprzeczny w łożysku kulkowym zwykłym tak, że trwałość łożyska ulegnie zwiększeniu jak i zmniejszeniu ulegną opory ruchu

ułożyskowania. Opracowana metoda pomiaru momentu oporów ruchu w łożyskach tocznych nazwana „metodą wybiegu” wykazała przydatność dając konkretne wyniki w postaci nieznanych dotąd informacji na temat zmniejszania się momentu oporów ruchu dla łożysk z powiększonym luzem poprzecznym w zakresie pracy pod kątem obciążenia mniejszym od kąta działania łożyska. Pokazano jak poszczególne kulki w łożysku są obciążone w zakresie od obciążenia poprzecznego do wzdłużnego oraz co się dzieje z sumą sił oddziaływania kulek na bieżnię przy określonej sile zewnętrznej obciążającej łożysko.

Bibliografia

1. Katalog SKF PUB BU/P1 10000 PL, Wrzesień 2014.
2. Katalog Maxon Motor, April 2015 edition
3. Szucki T.: *Podstawy konstruowania i obliczania łożysk kulkowych zwykłych*. Prace Instytutu Transportu Politechniki Warszawskiej, Nr 10, Warszawa 1975.
4. Kusznierewicz Z.: *Sposób określania momentu tarcia w łożyskach tocznych*. Patent nr 79012 opublikowany 14.07.1975.
5. Kusznierewicz Z.: *Metoda obliczania momentu tarcia w łożyskach tocznych kulkowych zwykłych niedociążonych*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 57, Nr 9, 2011, 1063–1066.

Preload of Standard Ball Bearings

Abstract: In order to extend life of roller bearings, a preload has been recently introduced to typical designs of roller bearings. The paper presents influence of the bearing preload as well as the existing radial and axial load on the life and resistance to motion of supports by standard ball bearings. As results from the proposed analysis, proved by a respective experimental study, it turned out that it was possible to select a preload and an appropriate radial clearance of a standard ball bearing in such a way that its life would be increased, and at the same time the resistance to motion of such support would be decreased. One developed so-called “coasting method” of measuring the torques of resistance to motion in roller bearings; it was proved to be useful and yielded specific results in a form of information, unknown so far, which concerns decreasing the torque of resistance to motion for bearings with increased radial clearance while operating under load angle smaller than the contact angle of the bearing. It is presented how particular balls in the bearing are loaded as the load direction changes from radial to axial and what happens to the sum of interaction forces between the balls and raceways at a specific external force loading the bearing.

Keywords: standard ball bearing, preload, contact angle of bearing, radial clearance of bearing, friction torque

dr inż. Zbigniew Kusznierewicz

z.kusznierewicz@mchtr.pw.edu.pl

Adiunkt w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się trybologią, mikrotrybologią, konstrukcją wnętrza łożysk tocznych.

