

Stanisław ADAMCZAK*, **Ryszard DOMAGALSKI***,
Ewa SENDER**

MOMENT OPOROWY W ŁOŻYSKACH TOCZNYCH – METODY I URZĄDZENIA BADAWCZE

FRICITION TORQUE IN ROLLING BEARINGS – METHODS AND TEST FACILITIES

Słowa kluczowe:

łożyska toczne, moment statyczny, moment dynamiczny, badania łożysk

Key words:

rolling bearings, dynamic torque, static torque, bearings testing

Streszczenie

W pracy przedstawiono teoretyczne i empiryczne zależności, pozwalające na wyznaczenie momentu tarcia w łożysku tocznym oraz wyniki oszacowania wartości momentu uzyskane w oparciu o te zależności. Dokona-

* Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, 25-314 Kielce, Al. 1000-Lecia Państwa Polskiego 7, e-mail: adamczak@tu.kielce.pl, rdomagalski@tu.kielce.pl.

** Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, 25-314 Kielce, Al. 1000-Lecia Państwa Polskiego 7, e-mail: esender@tu.kielce.pl.

no oceny istniejących urządzeń do pomiaru momentu tarcia w łożysku i przedstawiono kierunki działań pozwalających zmniejszyć tarcie w łożysku i precyzyjnie go mierzyć.

WPROWADZENIE

Powszechność stosowania łożysk w motoryzacji, urządzeniach gospodarstwa domowego, w przemyśle maszynowym sprawia, że zmniejszenie tarcia w łożyskach tocznych, a tym samym zwykle zwiększenie ich żywotności, jest kluczowym działaniem w walce o podniesienie efektywności, zmniejszenie zużycia energii i ochronę środowiska naturalnego.

Prace w tym kierunku podejmowane są w wielu ośrodkach naukowych [L. 1, 2, 3], a także przez czołowych producentów łożysk i koncentrują się na wyodrębnianiu czynników powodujących wzrost oporów tarcia w łożysku i dążeniu do minimalizacji ich wpływu. Wymusza to jednocześnie budowę urządzeń, które pozwalają precyzyjnie mierzyć moment tarcia w łożysku i jego subtelne zmiany w zależności od zmian czynników wpływających na jego wzrost.

Często zachodzi konieczność zastosowania łożysk o małym lub kontrolowanym momencie tarcia w urządzeniach produkowanych na niewielką skalę. Wówczas angażowanie ogromnego potencjału badawczego do prac nad zmniejszeniem tego momentu jest nieuzasadnione i zbyt kosztowne. Bardziej celowy jest wtedy dobór odpowiedniego łożyska z istniejących na rynku w oparciu o pomiary momentu tarcia wykonane na dokładnym i wiarygodnym stanowisku pomiarowym. Złożoność procesów zachodzących podczas produkcji i pracy łożyska sprawia, że identyczne łożyska, ale pochodzące z różnych partii produkcyjnych lub od różnych producentów mogą wykazywać istotne różnice w wartości niektórych parametrów, w tym momentu tarcia, mimo że wszystkie spełniają wysokie wymagania jakościowe.

Niekiedy producenci bardzo wyrafinowanych urządzeń wytwarzanych na niewielką skalę chcą dokonać weryfikacji parametrów łożysk dostarczonych przez firmę łożyskową przez niezależne laboratorium, szczególnie, gdy pojawiają się wątpliwości odnośnie do jakości dostarczonych łożysk. Firm, które produkują takie urządzenia na niewielką skalę, nie stać na utrzymywanie własnych laboratoriów badawczych, któ-

rych potencjału nie są w stanie wykorzystać w pełnym zakresie. Dlatego celowe wydaje się powstanie niezależnych laboratoriów, wyposażonych w urządzenia zarówno specjalistyczne, jak i uniwersalne, które mogłyby wypełnić tę lukę i wspomóc małe i średnie firmy w ich działaniach dla podniesienia jakości wytwarzanych urządzeń.

Moment tarcia w łożysku zależy między innymi od: rodzaju łożyska, jego wielkości i konstrukcji wewnętrznej, obciążenia, prędkości obrotowej, rodzaju, właściwości, ilości środka smarnego i jego rozmieszczenia. Całkowite tarcie jest sumą tarcia tocznego i ślizgowego w strefie kontaktu elementów tocznych z bieżnią, na powierzchniach styku elementów tocznych i koszyka, a także na powierzchniach prowadzących elementów tocznych i koszyka, tarcia występującego w samym ośrodku smarowym oraz tarcia ślizgowego uszczelnienia stykowego w łożyskach uszczelnionych.

Aby wprowadzić w ruch obrotowy łożysko pozostające w spoczynku, należy pokonać rozruchowy moment tarcia (moment tarcia statycznego). Zależy on przede wszystkim od budowy łożyska i może przyjmować znaczną wartość w przypadku łożysk o dużym kącie działania, łożysk baryłkowych wzdłużnych.

MOMENT TARCIA DYNAMICZNEGO (MOMENT OBROTOWY)

Przy założeniu, że obciążenie łożyska wynosi około 0,1 jego nośności dynamicznej, czyli $P = \sim 0,1 C$, stosowane jest dobre smarowanie, a eksploatacja przebiega w warunkach normalnych, moment tarcia w łożysku można obliczyć z wystarczającą dokładnością z zależności [L. 4]:

$$M = P \mu d/2 \quad (1)$$

gdzie:

- μ – stały współczynnik tarcia łożyska zależny od rodzaju łożyska,
- P – równoważne obciążenie dynamiczne łożyska,
- d – średnica otworu.

Jednak, gdy wymagane jest dokładniejsze wyznaczenie momentu tarcia, np. gdy warunki pracy odbiegają od założonych, zwykle stosuje się

podejście polegające na rozdzieleniu momentu tarcia na moment niezależny od obciążenia M_0 i moment zależny od obciążenia M_1 [L. 5, 6, 7, 8]:

$$M = M_0 + M_1 \quad (2)$$

Moment M_0 zależy od prędkości toczenia oraz od strat hydrodynamicznych w ośrodku smarującym, na które wpływają ilość i lepkość oleju, ale także w pewnym stopniu obciążenie. Jego rola jest szczególnie istotna w przypadku małych obciążeń i wysokich obrotów.

Ogólne zależności podawane przez poszczególne firmy łożyskowe do wyznaczenia wartości tych członów są zasadniczo zbliżone, nieznacznie różnią się wartości przyjmowanych współczynników. Najczęściej mają one postać:

$$M_0 = f_0 (v n)^{2/3} d_m^3 10^{-7} \quad \text{dla } v \cdot n \geq 2000 \quad (3)$$

$$M_0 = f_0 160 d_m^3 10^{-7} \quad \text{dla } v \cdot n < 2000 \quad (4)$$

Moment tarcia jako funkcja obciążenia:

$$M_1 = f_1 P d_m \quad (5)$$

gdzie:

- v – lepkość kinematyczna oleju [mm^2s^{-1}]
- n – prędkość obrotowa [min^{-1}],
- d_m – średnica podziałowa łożyska $(d+D)/2$ [mm],
- P – obciążenie zastępcze (równoważne) [N],
- f_0 – współczynnik zależny od rodzaju i wielkości łożyska oraz rodzaju smarowania,
- f_1 – współczynnik zależny od rodzaju i wielkości łożyska oraz współczynnika dopuszczalnego obciążenia statycznego.

Dla określonych typów łożysk niektóre firmy sformułowały inne zależności do wyznaczenia momentu tarcia, uwzględniające budowę i szczególne warunki pracy tych łożysk lub opracowały wzory empiryczne

odnoszące się do wybranych typów łożysk. Na przykład NSK opracowała empiryczne zależności dla łożysk kulkowych wysokoobrotowych pracujących pod obciążeniem osiowym i smarowanych strumieniowo [L. 5].

Jeszcze inne podejście do problemu wyznaczenia momentu tarcia dynamicznego zastosował SKF [L. 9], koncentrując się na wyodrębnieniu źródeł tarcia w łożysku. Ten nowy model zakłada, że całkowity moment tarcia M [Nmm] jest sumą tarcia pochodzącego z czterech źródeł:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (6)$$

gdzie:

M_{rr} – moment tarcia tocznego,

M_{sl} – moment tarcia ślizgowego,

M_{seal} – moment tarcia uszczelnień,

M_{drag} – moment tarcia wynikającego z systemu smarowania, oporów ruchu w środowisku olejowym, ugniatania smaru, rozbryzgów itp.

Model ten został opracowany przy założeniach, że obciążenie jest większe niż zalecane minimalne, luz roboczy jest normalny, zastosowano smarowanie smarem plastycznym lub olejowe.

Zależności pozwalające oszacować poszczególne składowe całkowitego momentu tarcia uwzględniają wiele zmiennych, których wyznaczenie wymaga zastosowania wzorów właściwych dla danego typu łożysk i określenia z odpowiednich tablic lub wykresów stałych zależnych m.in. od numeru serii, rodzaju uszczelnienia, rodzaju smarowania itp.

Wyznaczenie momentu tarcia w oparciu o powyższy model wymaga przeprowadzenia wielu skomplikowanych obliczeń, istnieje jednak możliwość skorzystania z modułów obliczeniowych opracowanych przez SKF i dostępnych w „Katalogu Interaktywnym SKF” [L. 9].

MOMENT TARCIA STATYCZNEGO (MOMENT ROZRUCHOWY)

Moment tarcia statycznego (rozruchowy moment tarcia) łożyska zależy bardzo istotnie od budowy łożyska i obciążenia wstępnego. Dlatego wzory umożliwiające wyznaczenie jego wartości zostały przez niektóre firmy

opracowane dla pewnych konkretnych typów łożysk. NSK opracowała zależności pozwalające wyznaczyć moment tarcia statycznego dla łożysk stożkowych i kulkowych skośnych [L. 5], a SKF dla wszystkich typów łożysk, z zastrzeżeniem, że dla pewnych typów łożysk rzeczywista wartość może znacznie przekraczać obliczoną [L. 9]. Wyniki oszacowania zależą istotnie od przyjętych do obliczeń wartości parametrów, a ich określenie w danych warunkach jest niezwykle trudne.

Zazwyczaj katalogi firmowe podają, że moment rozruchowy może przekraczać czterokrotnie wartość M_1 w przypadku łożysk stożkowych o dużym kącie działania i nawet ośmiokrotnie w przypadku łożysk baryłkowych wzdłużnych.

PORÓWNANIE WYNIKÓW OSZACOWANIA MOMENTU TARCIA DLA WYBRANYCH ŁOŻYSK

Niektóre urządzenia wymagają zastosowania łożysk o szczególnie niskim momencie tarcia. W tym przypadku działania konstruktorów zmierzają w kierunku wyodrębnienia źródeł tarcia w takim łożysku i analizy możliwości ich zmniejszenia. Jednak największe korzyści polegające na podniesieniu efektywności energetycznej daje nawet nieznaczne zmniejszenie tarcia w łożyskach powszechnie, masowo stosowanych, co pozwala wykorzystać efekt skali. Do obliczeń porównawczych wybrano więc łożyska szeroko stosowane w motoryzacji, urządzeniach AGD, w przemyśle maszynowym, których produkcja ma skalę masową lub bardzo dużą.

Łożysko 6202 ZZ jest jednym z najczęściej stosowanych szczególnie w sprzęcie gospodarstwa domowego, łożysko 6000 ZZ jest stosowane szczególnie często w aplikacjach, w których wymagana jest większa prędkość obrotowa, łożysko 6205 ZZ reprezentuje grupę łożysk, które mogą przenosić większe obciążenia.

Obliczenia przeprowadzono, przyjmując następujące założenia:

- współczynnik tarcia: $\mu = 0,0015$,
- łożyska smarowane są smarem plastycznym o lepkości: $\nu = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$,
- obciążenie promieniowe jest równe $0,1 C$,
- obciążenie osiowe jest równe $0,4$ obciążenia promieniowego,
- prędkość obrotowa jest równa połowie prędkości granicznej dla danego łożyska.

Wyniki obliczeń momentu dynamicznego M_d i statycznego M_s pokazuje **Tabela 1**.

Tabela 1. Porównanie wyników oszacowania momentu tarcia

Table 1. Comparison of results of friction torque estimation

		łożysko kulko- we 6000 ZZ	łożysko kulko- we 6202 ZZ	łożysko kulkowe 6205 ZZ
$M = \mu P d/2$	M_d [Nmm]	3,4	8,6	26,3
FAG	M_d [Nmm]	5,6	14,7	39,5
XC Bearing	M_d [Nmm]	5,1	12,1	33,8
Timken	M_d [Nmm]	5,7	14,5	44,5
SKF	M_d [Nmm]	13,0	26,5	68,5
SKF	M_s [Nmm]	10,7	23,0	59,7

Analiza wyników oszacowania momentu tarcia pokazuje, że wartości momentu uzyskane w oparciu o zależności (1), (2) i (6) różnią się w sposób istotny. Wartości momentu obliczone w oparciu o zależność (1), są najniższe dla wszystkich analizowanych łożysk, model przyjęty przez SKF daje oszacowanie trzykrotnie większe. Wyniki jakościowe są zbieżne: niezależnie od sposobu wyznaczania momentu najmniejsze wartości uzyskano dla łożyska 6000, a największe dla łożyska 6205. Wartość momentu statycznego uzyskana w oparciu o model SKF jest mniejsza niż wartość momentu dynamicznego, czego nie potwierdzają badania eksperymentalne.

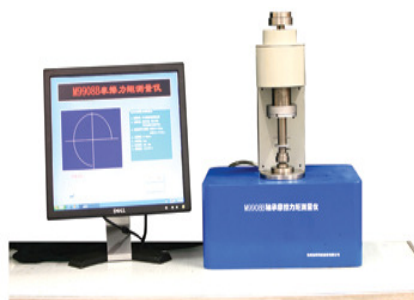
URZĄDZENIA DO POMIARU MOMENTU TARCIA ŁOŻYSK TOCZNYCH

Prace badawcze prowadzone nad zjawiskiem tarcia w łożyskach, konieczność weryfikacji opracowywanych zależności analitycznych i empirycznych, a także potrzeba pomiaru momentu tarcia w łożyskach przeznaczonych do specjalnych aplikacji sprawiają, że niezbędne jest budowanie coraz dokładniejszych urządzeń służących do pomiaru momentu tarcia. Istotne jest, aby warunki badań możliwie najpełniej symulowały rzeczywiste warunki pracy łożyska.

Urządzenia do pomiaru momentu tarcia łożysk są wytwarzane i stosowane w laboratoriach badawczych firm produkujących łożyska, ale ich konstrukcja, zasada działania, sposoby realizacji obciążenia nie są upowszechniane, są tajemnicą firm.

Urządzenia takie są również oferowane przez firmy zajmujące się produkcją sprzętu badawczego dla różnych zastosowań.

Na **Rys. 1** pokazano przykładowo takie urządzenie do pomiaru momentu tarcia łożysk kulkowych poprzecznych i skośnych i podstawowe parametry techniczne.



Model	QM9910	M9908B	M992
	M_s	M_d	M_d
Średnica łożysk [mm]	10–50	8–50	2–8
Moment [Nmm]	20	20–50	0,1
Obciążenie osiowe [N]	10–200	15	1–4

Rys. 1. Urządzenie M9908B do pomiaru momentu obrotowego i podstawowe parametry techniczne wybranych modeli (Prod. Luoyang Bearing Science & Technology Co., Ltd, Chiny)

Fig. 1. M9908B bearing friction torque measuring instrument and technical specification for selected models (Prod. Luoyang Bearing Science & Technology Co., Ltd, Chiny)

Zasada działania większości z nich polega na bardzo precyzyjnym pomiarze kąta obrotu dokonywanym przez głowicę, wyposażoną w specjalistyczny przetwornik optyczny. Mają one możliwość realizacji pomiarów przy niewielkich obciążeniach osiowych, realizowanych metodami bezstykowymi (np. grawitacja, poduszka powietrzna).

Urządzenia te są skomputeryzowane, umożliwiają śledzenie zmian momentu bezpośrednio na monitorze, analizę wyników pomiarów oraz ich przechowywanie. Mogą być także wykorzystywane do wyznaczania optymalnego obciążenia wstępnego łożysk stożkowych.

Urządzenia, których dane techniczne są dostępne, umożliwiają pomiar momentu tarcia w warunkach istnienia tylko obciążenia osiowego. W rzeczywistości łożyska najpowszechniej stosowane pracują głównie przy obciążeniu promieniowym. Prowadzone są badania przy obciążeniu poprzecznym łożysk parowanych lub zmontowanych w zespołach, np. w skrzyni biegów lub jej podzespołe, natomiast badania pojedynczych łożysk przy obciążeniu poprzecznym nie są dostępne. Symulacja takiego obciążenia w trakcie pomiaru momentu tarcia stanowi podstawowy problem techniczny i wyzwanie dla konstruktorów urządzeń do badania łożysk.

WNIOSKI

Wyniki obliczeń momentu tarcia, uzyskane w oparciu o proponowane przez badaczy i firmy łożyskowe zależności pokazują, że pozwalają one

jedynie na ocenę przybliżoną lub na dokonanie porównawczej oceny jakościowej. Konieczne są dalsze badania złożonych zjawisk zachodzących podczas pracy łożyska tocznego, w tym momentu tarcia, których wynikiem może być opracowanie nowych teoretycznych i empirycznych zależności, pozwalających na dokładniejsze wyznaczenie momentu tarcia. Niezbędne jest również doskonalenie konstrukcji urządzeń do pomiaru momentu dynamicznego i statycznego, tak aby warunki badań jak najpełniej odzwierciedlały rzeczywiste warunki pracy.

Dalsze obniżanie strat wynikających z tarcia w łożyskach tocznych, jest bardzo trudne, może skutkować obniżeniem innych istotnych parametrów łożyska, a uzyskane efekty mogą być niewspółmierne do poniesionych kosztów. Działania takie są jednak uzasadnione i podejmowane [L. 9, 10] szczególnie w odniesieniu do łożysk, których stosowanie jest powszechne, masowe. Zastosowanie łożysk tocznych nowej generacji o momencie tarcia mniejszym niż w standardowych łożyskach obok oszczędności energetycznych powoduje obniżenie temperatury pracy łożysk, mniejsze zużycie środka smarnego i wpływa na wydłużenie żywotności komponentów i całego urządzenia.

LITERATURA

1. Raczyński A.: Wpływ mikrogeometrii na parametry pracy łożysk stożkowych, *Tribologia*, 2000, nr 1.
2. Styp-Rekowski M.: Opory ruchu w łożyskach tocznych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, z. 1, 2002.
3. Kowal A.: Wpływ kształtu bieżni na opory ruchu tocznego kuli. Materiały V międzynarodowej konferencji: *Zastosowania Mechaniki w Górnictwie*, s. 95–102. *Dzierżno*, 21–22 kwietnia 2005.
4. Krzemiński-Freda H.: *Łożyska toczne*, PWN, Warszawa 1985.
5. *Motion & Control*, NSK, Technical Report, 2005.
6. *Product Catalog INA, FAG*, 2011.
7. *Timken Products Catalog*, 2011.
8. *Poradnik CX Bearing*, 2011.
9. *Katalog produktów SKF*, 20011.
10. "Low-Torque Bearing for Fan Motors and Vacuum Cleaner Motors", *Motion & Control No 10 April 2001*, NSK Technical Journal.

Recenzent:
Stanisław PYTKO

Summary

The paper presents theoretical and empirical equations to calculate friction torque of a rolling bearing and the results of an estimate of torque coming from these equations. It describes the evaluation of torque testers used in measuring the friction torque of a rolling bearing and indicates directions for further research aimed at decreasing friction and making more precise measurements.