

**Jacek SPAŁEK**

Politechnika Śląska, Instytut Mechanizacji Górnictwa

## **OPTIMALIZACJA SMAROWANIA MECHANIZMU OBROTU ANTENY RADAROWEJ ZE WZGLĘDU NA KRYTERIUM MINIMALIZACJI STRAT TARCIA**

### **Słowa kluczowe**

Konstrukcje specjalne, mechanizm obrotu, smarowanie.

### **Key words**

Special construction, slewing drive unit, lubrication.

### **Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono zagadnienie smarowania mechanizmu obrotu anteny radarowej. Dla przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego mechanizmu obrotu przeanalizowano smarowanie ząbienia oraz łożyska wieńcowego olejem oraz smarowanie smarem plastycznym. Wykazano celowość przyjęcia koncepcji smarowania olejem w układzie zamkniętym.

### **WPROWADZENIE**

Układy obrotu anten radarowych należą do grupy mechanizmów, które muszą gwarantować spełnienie szczególnych wymagań użytkowych takich jak:

- wysoka niezawodność w zakładanym okresie użytkowania o charakterze ciągłym,
- wysoka sprawność mechaniczna,
- niskie oraz stabilne opory ruchu obrotowego anteny w czasie użytkowania w zmieniających się warunkach otoczenia,
- wysoka podatność obsługowa rozumiana jako zminimalizowany czas i liczba przerw dla dokonania okresowych kontroli stanu mechanizmu obrotu.

Spełnienie wymienionych, głównych wymagań zależy przede wszystkim od przyjęcia optymalnej struktury konstrukcji nośnej anteny oraz układu realizacji

ruchu obrotowego, a w tym od przyjętego systemu smarowania i cech fizykochemicznych zastosowanej substancji smarującej.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizę smarowania mechanizmu obrotu nowego typu anteny radarowej z uwagi na kryterium minimalizacji strat tarcia generowanych w czasie ruchu śledzącego anteny.

Do analizy przyjęto następujące założenia konstrukcyjne i eksploatacyjne:

- stan obciążenia łożyska wynika z ciężaru konstrukcji nośnej i roboczej anteny oraz siły naporu wiatru,
- stan obciążenia ząbienia wynika z przenoszonych momentów napędowych dla dwu przypadków:  $n_1 = 6 \text{ min}^{-1}$ ;  $M_1 = 7,9 \text{ kNm}$  oraz  $n_2 = 12 \text{ min}^{-1}$ ;  $M_2 = 4,9 \text{ kNm}$ ,
- zakresy zmian temperatury otoczenia: od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+55^\circ\text{C}$ ,
- warunki temperaturowe węzła tarcia: od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+90^\circ\text{C}$  z ciągłą kontrolą temperatury przestrzeni roboczej łożyska,
- charakter pracy: praca ciągła,
- wymagana (gwarantowana) trwałość łożyska oraz ząbienia - 60000h.

## WYBÓR KONCEPCJI SMAROWANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO W OPARCIU O ANALIZĘ WARUNKÓW TARCIA

Bazując na założeniach wynikających z dokumentacji technicznej można przyjąć, że zarówno współpraca węzła tribologicznego: elementy toczne - bieżnie łożyska wieńcowego jak też ząbienia kół napędowych przebiega w warunkach tarcia mieszanego z odpowiednim udziałem tarcia granicznego. Małe prędkości względne w strefach styku tarciowego (rzędu 1 m/s) oraz względnie duże naciski kontaktowe warunkują wykluczenie tarcia płynnego [4], [5].

Z analizy tarcia w łożysku oraz w ząbieniu wynika przesłanka istnienia "odnawialnej" warstwy o grubościach:

- w styku tarciowym łożyska:  $h_{\text{olt}} = (0,2 \div 0,5) \mu\text{m}$
- w styku zębów:  $h_{\text{o,z}} = (0,4 \div 1) \mu\text{m}$ .

Rozważana sytuacja, w kontekście potrzeby zagwarantowania stabilności ruchu obrotowego zestawu antenowego przy minimalnych oporach tarcia w łożysku i ząbieniu, uzasadnia przyjęcie następujących, dalszych warunków realizacji smarowania:

- zminimalizowanie zasilania przestrzeni stykowej łożyska oraz ząbienia środkiem smarnym czyli zastosowanie, nazywanego w literaturze przedmiotowej, sposobu: "skąpego" lub inaczej "ograniczonego" bądź "zminimalizowanego" smarowania. Kierunek ten rozwija się obecnie bardzo silnie w technice smarowania wielu maszyn (zarówno roboczych

- jak i precyzyjnych) gdyż, zwłaszcza w warunkach pracy ciągłej, zapewnia nawet ponad dwukrotne obniżenie strat tarcia [5],
- zastosowanie środków smarnych o dużej energii powierzchniowej, ale o zminimalizowanym oporze ścinania. Przesłanka ta skłania do przyjęcia zarówno do smarowania łożyska, jak i zazębienia czynnika smarnego w postaci oleju o niskiej lepkości dynamicznej ale wysokim wskaźniku lepkości a nie "klasycznego" smaru plastycznego.
  - Jeżeli jednak przyjąć wariant zastosowania smaru plastycznego wówczas bazę olejową dla tego smaru winien stanowić olej o względnie niskiej lepkości,
  - analizując informacje literaturowe (bardzo nieliczne w swej formie utylitarnej) bazujące najczęściej na ograniczonych wynikach badań doświadczalnych dotyczących trwałości granicznych warstw smarnych, logicznym jest przyjęcie sposobu impulsowego dozowania małej ilości oleju do strefy styku z zastosowaniem automatycznego sterowania częstotliwości. Częstotliwość dozowania automatycznego wynikać powinna z monitorowania oporu ruchu, przy czym symptomem sterującym może być sygnał ciągły bądź impulsowy uzyskany z przewidzianego w układzie czujnika temperatury zainstalowanego w przestrzeni roboczej łożyska wieńcowego.

#### **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA UKŁADU ZAMKNIĘTEGO SMAROWANIA ŁOŻYSKA WIĘNCOWEGO ORAZ ZAZĘBIENIA KÓŁ NAPĘDOWYCH**

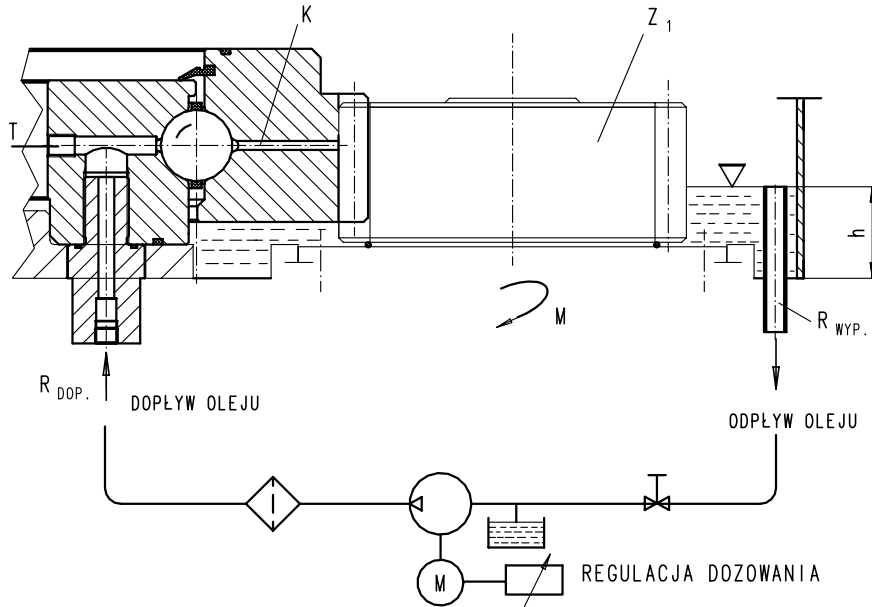
Koncepcję układu zamkniętego smarowania analizowanego układu można ująć w następujących wariantach:

- wariant I: łożysko smarowane smarem plastycznym a zazębienie smarowane olejem,
- wariant II: łożysko i zazębienie smarowane smarem plastycznym,
- wariant III: łożysko i zazębienie smarowane olejem.

Zarówno z punktu widzenia odprowadzenia ciepła z węzłów tarcia (warunek niskiej temperatury roboczej), jak również zminimalizowanych oporów ruchu (w tych zwłaszcza w temperaturach ujemnych) najkorzystniejszym jest wariant III.

Wariant I jest możliwym do realizacji ale wymaga dwu oddzielnych układów, co zmniejsza niezawodność zespołu napędowego oraz zwiększa koszty wykonania i eksploatacji.

Przyjmując wariant III (rys.1) zaproponowano układ zamkniętego smarowania [1] zarówno przestrzeni roboczej łożyska głównego, jak i zazębienia olejem o odpowiednio dobranych właściwościach użytkowych.



**Rys. 1. Koncepcja układu zamkniętego smarowania zespołu napędowo - obrotowego anteny**  
**Fig. 1. Idea of the closed lubrication circuit of antenna drive unit**

Istota koncepcji przedstawionej na rys.1 polega na tym, że odpowiednio dobrany układ zasilania (o małym natężeniu ciągłego przepływu lub też dozowania impulsowego - okresowego) zapewnia podawanie oleju do łożyska i dalej kanałem K do uzębienia koła wieńcowego (na średnicy koła stóp zębów).

Ponadto uzębienie smarowane jest poprzez rozbryzgowe działanie zębniaka napędowego  $Z_1$  zanurzonego na odpowiednią głębokość  $h$ .

Poziom oleju (dla tej głębokości  $h$ ) utrzymywany jest poprzez odpowiednio dobraną średnicę rurki spływowej  $R_{WYP}$  oraz zsynchronizowaną wydajność pompy zasilającej.

Optymalnie dobrane elementy tego układu gwarantować mogą stabilne smarowanie o wymaganym natężeniu przepływu oleju, jak również zakładaną temperaturę pracy analizowanego układu napędowego.

## **ANALIZA SMAROWANIA ŁOŻYSKA WIEŃCOWEGO SMAREM PLASTYCZNYM**

Do rozważań przyjęto założenie, że przestrzeń robocza łożyska wypełniona jest smarem plastycznym w 1/2 tzw. objętości dyspozycyjnej (rys.2).

Objętość tę określa zależność:

$$V_C = V_{TOR} \cdot \Sigma V_K \quad (1)$$

gdzie:  $V_{TOR}$  - objętość komory pierścienia kołowego (torusa)

$$V_{TOR} = \frac{\pi d_K^2}{4} (D_{TOR} - d_K)$$

$\Sigma V_K$  - sumaryczna objętość n kulek o objętości  $V_{K1}$

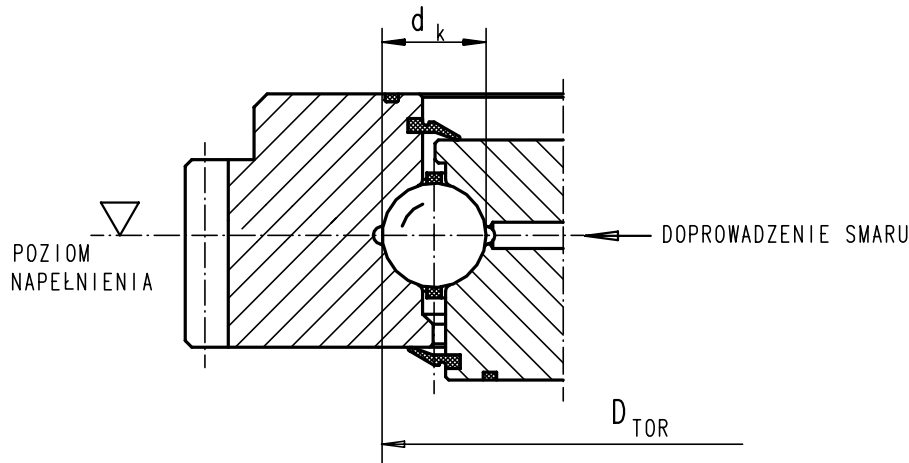
$$\Sigma V_K = V_{K1} \cdot n; \quad V_K = \frac{\pi d_K^3}{6} \quad (2)$$

Zatem:

$$V_C = \frac{\pi^2 d_K^2}{4} (D_{TOR} - d_K) - \frac{\pi d_K^3}{6} \cdot n \quad (3)$$

Dla przyjętych założeń konstrukcyjnych

$$V_{C,wym} = \frac{1}{2} V_C = \frac{1432}{2} = 716 \text{ cm}^3 \text{ co odpowiada masie smaru } m_c \cong 650 \text{ g}$$



**Rys. 2.** Szkic fragmentu łożyska wieńcowego ilustrujący podstawowe cechy geometryczne niezbędne do określenia ilości smaru

**Fig. 2.** Sketch of fragment of the bearing illustrating basic geometric features indispensable to specified amount of grease

## OKREŚLENIE ILOŚCI SMARU NIEZBĘDNEJ DO UZYSKANIA JEDNORODNEJ WARSTWY SMARNEJ NA ELEMENTACH TOCZNYCH I BIEŻNIACH

Przy założeniu grubości warstwy smarnej  $h_0$  wymagana ilość smaru wynosi

$$V_W = (S_{TOR} + \Sigma S_K) \cdot h_0 \quad (4)$$

gdzie:  $S_{TOR}$  - pole powierzchni bieźni (torusa)

$\Sigma S_K$  - pole powierzchni kulek

Po rozwinięciu zależności (4) uzyskujemy:

$$V_W = \left[ \pi^2 \cdot d_K (D - d_K) + \pi d_K^2 \cdot n \right] h_0 \quad (5)$$

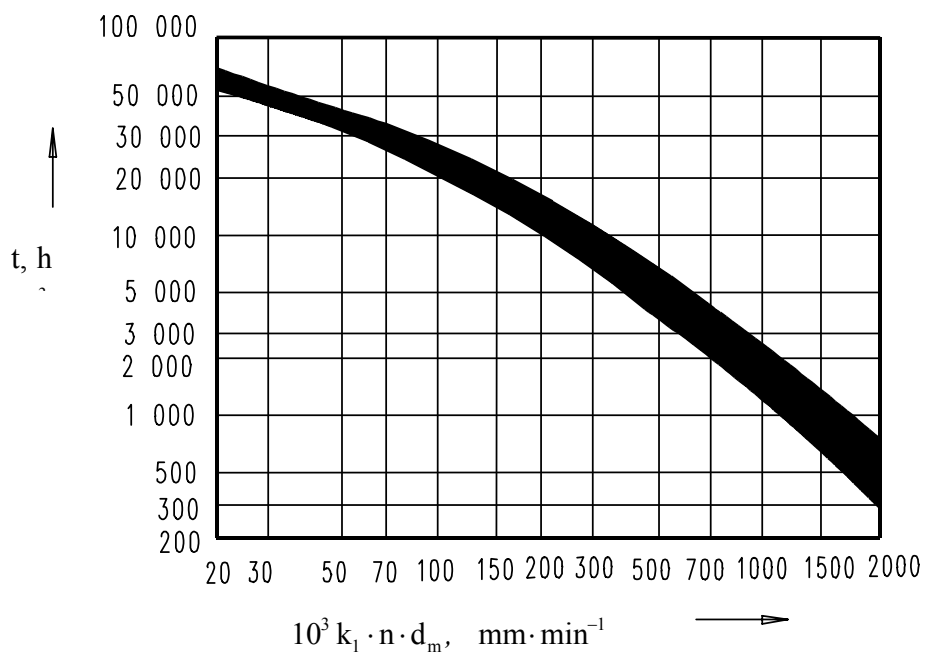
Dla konkretnego łożyska o liczbie kulek  $n=150$  i zakładanej grubości warstwy smaru  $h_0=1\mu m$  uzyskujemy  $V_w \approx 900 mm^3$ .

Jak wskazuje powyższy przykładowy wynik, ilość smaru istotna z punktu widzenia zapewnienia smarowania (elastohydrodynamicznego styku kulek z bieźnią) jest bardzo mała i stanowi rzędu 1/1000 "zapasu" smaru zgromadzonego w przestrzeni roboczej łożyska po jego napełnieniu.

## OKREŚLENIE WYMAGANEGO OKRESU WYMIANY SMARU W ŁOŻYSKU

Wymiana smaru w łożysku o przestrzeni roboczej szczelnie odizolowanej od otoczenia może wynikać z następujących względów:

- zakładanego przez producenta smaru okresu chemicznego starzenia (utleniania się, wzrostu kwasowości i innych niekorzystnych zmian właściwości smaru),
- zalecanego przez literaturę (np. FAG - Publ. 81115PIA [17,18] - DIN51825) okresu użytkowania smaru. Korzystając z rysunku 3 dla analizowanego łożyska o parametrze  $d_{ni} \cdot n = 20000 mm \cdot min^{-1}$  nominalny czas użytkowania smaru wynosi około 50000h. Tak długi okres użytkowania, po uwzględnieniu rzeczywistych warunków pracy, ulega zmniejszeniu do wartości około 2000h co odpowiada okresowi ciągłej pracy około 27 miesięcy.



**Rys. 3.** Przeciętny okres użytkowania (trwałość nominalna  $L_{10}$ ) standartowego smaru łożyskowego na bazie zagęszczacza litowego wg DIN 51825. Temperatura robocza smaru  $T_u = 70^\circ\text{C}$ , ryzyko niezachowania trwałości nominalnej  $r = 10\%$ , ubytek smaru  $10 \div 20\%$

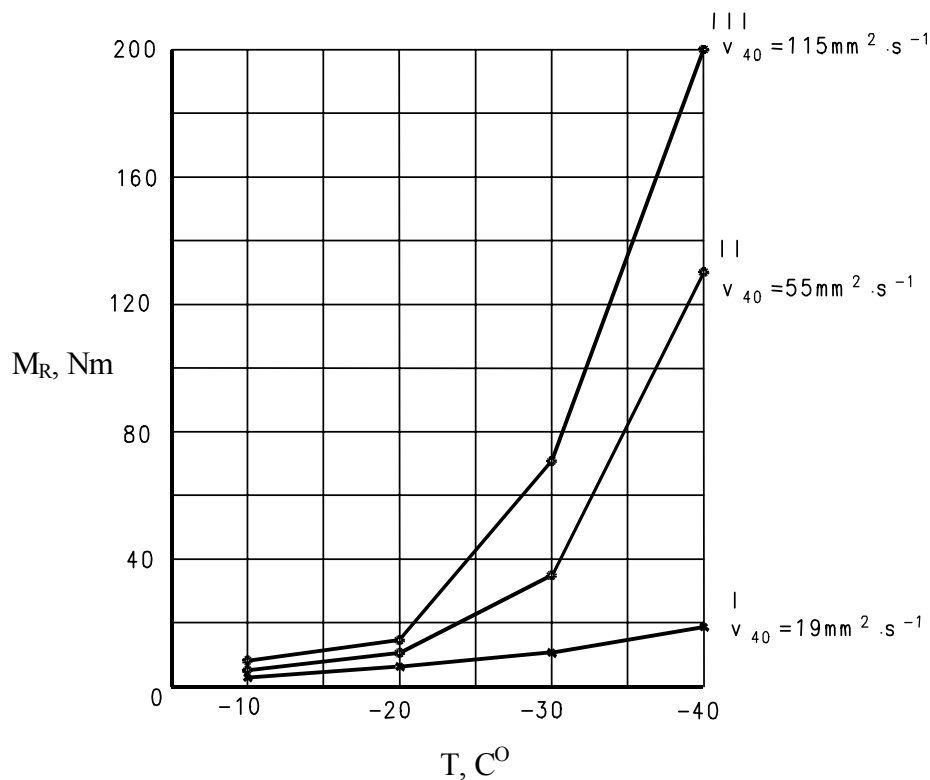
**Fig. 3.** Averaged period of employment (nominal durability  $L_{10}$ ) of standard bearing grease prepared on the basis of lithium thickener according to DIN 51825. Operating temperature of grease  $T_u=70^\circ\text{C}$ , risk of loss nominal durability  $r=10\%$ , loss of grease 10-20%

Zatem dobierając smar którego okres zezarzenia chemicznego nie jest krótszy niż obliczone 27 miesięcy można traktować łożysko jednokrotnie napełnione smarem w ilości  $716\text{cm}^3$  ( $\sim 650\text{g}$ ) jako nie wymagające dosmarowywania przez cały ten okres.

Po okresie 1 roku użytkowania łożyska lub po stwierdzeniu wzrostu temperatury łożyska powyżej stanu ustalonego przeciętnego w tym okresie eksploatacji należy zastosować dosmarowanie w ilości około  $65\text{g}$  ( $\sim 70\text{cm}^3$ ) tj. 10% masy smaru napełniającego łożysko.

## UWAGI DOTYCZĄCE DOBORU SMARU ORAZ STOPNIA NAPEŁNIENIA ŁOŻYSKA SMAREM ZE WZGLĘDU NA OPORY RUCHU W TEMPERATURACH UJEMNYCH

W przypadku analizowanego układu napędowego anteny radarowej wybór odpowiedniej jakości smaru plastycznego, poza innymi kryteriami użytkowymi, musi uwzględniać opory ruchu łożyska w temperaturach ujemnych. Z tego względu należy dobrać smar sporządzany z oleju o niskiej lepkości bazowej. Jak pokazano na rysunku 4 [18] zastosowanie oleju bazowego o niskiej lepkości bazowej powoduje znaczny spadek momentu tarcia  $M_R$  łożyska kulkowego skośnego 7312B(FAG) przy obciążeniu wzdłużnym  $F_a = 10\text{kN}$  i prędkości obrotowej  $n = 7,5\text{ min}^{-1}$ .



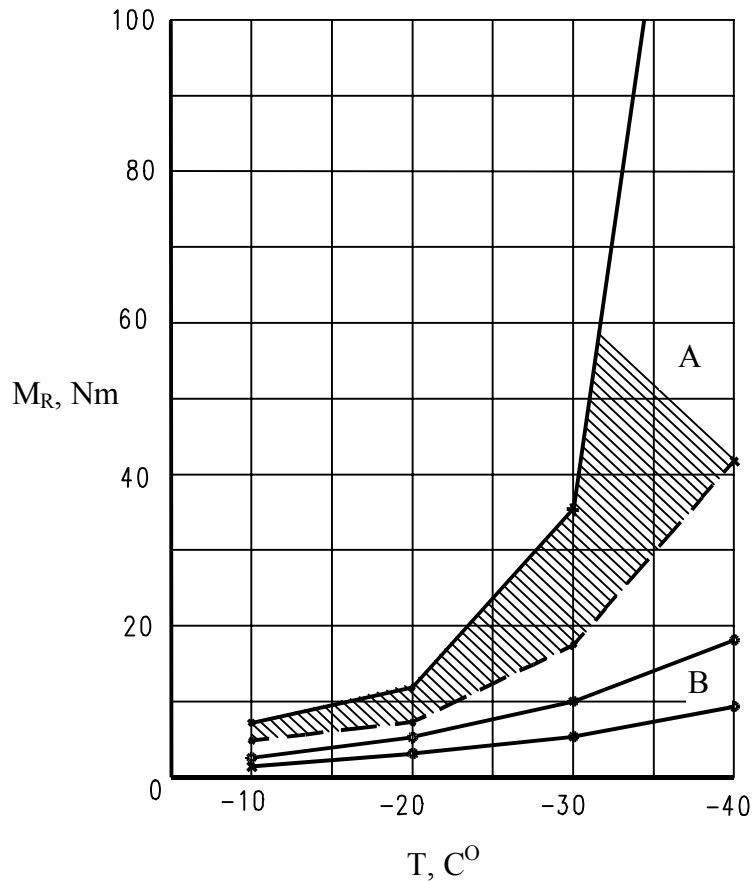
Rys. 4. Zależność momentu tarcia (po 20 s od uruchomienia) od temperatury ujemnej otoczenia dla trzech różnych smarów z zagęszczaczem litowym o lepkościach (w  $40^\circ\text{C}$ ) oleju bazowego: I- $19\text{ mm}^2/\text{s}$ , II- $55\text{ mm}^2/\text{s}$  oraz III- $155\text{ mm}^2/\text{s}$

Fig. 4. Dependence of below-zero temperature on moment of friction (measurement after 20 s) for three types of grease with lithium thickener and base oil viscosity (in  $40^\circ\text{C}$ )



Również stopień napełnienia łożyska smarem ma istotny wpływ na opory tarcia w temperaturach ujemnych, co pokazano na rysunku 5.

Na rysunku 5 widać szczególnie silny wzrost oporu ruchu dla temperatur otoczenia niższych od  $-20^{\circ}\text{C}$ , co wskazuje na konieczność smarowania z bardzo małą ilością dozowanego smaru.



Rys. 5. Zależność momentu tarcia w łożysku kulkowym skośnym 7312B dla pełnego wypełnienia łożyska smarem (pole A) oraz z naniesioną tylko minimalną warstwą smaru na elementy toczne i bieżnie (pole B). (obciążenie wzdłużne  $F_a = 10\text{kN}$ , prędkość obrotowa  $n = 7,5 \text{ min}^{-1}$ , smarowanie: smar litowy o lepkości kinematycznej  $V_{40}^{\circ}\text{C} = 55 \text{ mm}^2/\text{s}$ )

Fig. 5. Dependence of moment of friction in the skew ball bearing 7312B for the bearing fully filled of grease (A area) and minimal layer of grease on rolling elements and pads (B area)

## PODSUMOWANIE

W opracowaniu dla przyjętej postaci konstrukcyjnej mechanizmu obrotu anteny radarowej oraz założonych warunków eksploatacyjnych poddano analizie dwa warianty układu smarowania zazębienia oraz łożyska wieńcowego:

- smarowanie olejem w obiegu zamkniętym,
- smarowanie smarem plastycznym.

Dokonując szczegółowej analizy smarowania smarem plastycznym określono:

- wymaganą ilość smaru dla początkowego napełnienia przestrzeni łożyskowej,
- ilość wynikającą z utrzymania jednorodnej warstwy smaru na elementach tocznych i bieżniach łożyska,
- okres stosowania smaru do jego wymiany,
- wpływ ujemnej temperatury smaru na opory tarcia w łożysku.

Wykazano, że dla smarowania smarem plastycznym koniecznym jest przyjęcie minimalnej lepkości oleju bazowego oraz zoptymalizowanego, automatycznego dozowania smaru dla uzyskania warunków tzw. skąpego smarowania gwarantujących minimum oporów ruchu.

Z opracowania wynika, że bazując na kryteriach wysokiej niezawodności i sprawności mechanizmu obrotu anteny bardziej optymalnym jest przyjęcie zarówno dla zazębienia, jak i łożyska wieńcowego układu zamkniętego smarowania.

Zaproponowano koncepcję układu, który gwarantuje zapewnienie stabilności i minimalizację oporów ruchu anteny w bardzo małym stopniu uzależnionych od warunków otoczenia

## LITERATURA

- [1] SPAŁEK J., RACZYŃSKI Z., MASŁY S.: Analiza wariantów smarowania układu obrotu anteny radarowej. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (16) nr 2, 2002 s.43-53.
- [2] GIBCZYŃSKA T., PYTKO S.: Łożyska toczne wieńcowe. Uczelniane Wydawnictwo N.-T. AGH, Kraków 1999.
- [3] LAWROWSKI Z.: Technika smarowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [4] LAWROWSKI Z.: Tribologia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [5] CZARNY R.: Systemy centralnego smarowania maszyn i urządzeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.

- [6] WYSOCKI M.: Systemy smarownicze w przemyśle ciężkim. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1971.
- [7] BRÄNDLEIN J. i in.: Die Wälzlagerpraxis. Vereinigte Fachverlage, Mainz 1995.
- [8] MÖLLER U.J., BOOR U.: Schmierstoffe im Betrieb. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
- [9] BARTZ W. J.: Getriebeschmierung. Exspert - Verlag, Ehningen 1989.
- [10] CZICHOS H., HABIG K. H.: Tribologie Handbuch. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 1992.
- [11] HEBDA M. WACHAL A.: Trybologia. WN-T, Warszawa 1980.
- [12] SPAŁEK J.: Smarowanie przemysłowych przekładni zębatych - zagadnienia teoretyczne. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
- [13] SPAŁEK J.: Smarowanie maszyn w górnictwie - zagadnienia smarowania przekładni zębatych. Mat. V Konferencji N. - T Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych – TEMAG'95. Gliwice - Ustroń, listopad 1995.
- [14] FAG - Łożyska toczne. Katalog WL41520/2PLA. Wyd. marzec 1997.
- [15] SKF - Katalog główny. Katalog 4000/IIPL, 1991.
- [16] Grosswälzlager, Hoesch Rothe Erde - Dortmund 1997.
- [17] Smarowanie łożysk tocznych. FAG - Publ. nr 81115 PIA, Schweinfurt 1986.
- [18] Schmierung von Wälzlagern. FAG - Publ. nr WL 81115/4.DA, Schweinfurt 1996.

### **Optimization of lubrication of slewing drive unit of a radar antenna in criteria of friction loss minimum**

#### **Abstract**

In the article is presented the matter of lubrication of slewing drive unit of a radar antenna. There is analyzed lubrication of the meshing and the central bearing by means of oil and grease for accepted structural solution. Additionally in the paper is proven purposefulness of the idea of a closed lubrication circuit.