

Jacek **SPAŁEK**
Zbigniew **RACZYŃSKI**
Stanisław **MASŁY**

ANALIZA WARIANTÓW SMAROWANIA UKŁADU OBROTU ANTENY RADAROWEJ

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

1. WPROWADZENIE

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

- wysoka niezawodność (o wskaźniku dążącym do jedności) w zakładanym okresie użytkowania o charakterze ciągłym,
- wysoka sprawność mechaniczna,
- niskie oraz stabilne opory ruchu obrotowego anteny w czasie użytkowania oraz przy 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 fizyko-chemicznych oraz zastosowanych substancji smarujących.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizę smarowania mechanizmu obrotu anteny radarowej typu JAT wg rozwiązania opracowanego w Dziale Rozwoju OBRUM w Gliwicach [19].

2. ZAŁOŻENIA DO ANALIZY SMAROWANIA UKŁADU OBROTOWEGO ANTENY

Do analizy zagadnienia smarowania przyjęto rozwiązanie OBRUM [19] oraz wynikające z dokumentacji założenia konstrukcyjne i eksploatacyjne, takie jak:

- stan obciążenia łożyska wynikający z ciężaru konstrukcji nośnej i roboczej anteny oraz siły naporu wiatru,
- stan obciążenia ząbienia wynikający z przenoszonych momentów napędowych dla dwu prędkości obrotowych anteny:
- $n_1 = 6$ obr/min $M_1 = 7,9$ kNm oraz $n_2 = 12$ obr/min $M_2 = 4,9$ kNm,
- zakresy zmian temperatury otoczenia od -40°C do $+55^\circ\text{C}$,
- warunki temperaturowe węzła tarcia: od -40°C do $+90^\circ\text{C}$ z ciągłą kontrolą temperatury przestrzeni roboczej łożyska,
- charakter pracy: praca ciągła,
- ciągła kontrola temperatury przestrzeni roboczej łożyska,

- wymagana (gwarantowana) trwałość:
 - łożyska wieńcowego $L_t = 100000h$.
 - wieńca zębatego $L_t = 60000h$

3. WYBÓR KONCEPCJI SMAROWANIA UKŁADU NAPEĐOWEGO W OPARCIU O ANALIZĘ WARUNKÓW TARCIA

Bazując na założeniach ujętych w dokumentacji technicznej można stwierdzić, że zarówno współpraca węzła tribologicznego: elementy toczne - bieżnie łożyska wieńcowego, jak też zazębienia przebiega w warunkach tarcia mieszanego z dużym udziałem tarcia granicznego. Małe prędkości względne w strefach styku tarciowego (rzędu 1 m/s) oraz względnie duże naciski kontaktowe warunkują wykluczenie powstania efektu elastohydrodynamicznego smarowania a więc tarcia płynnego [2], [12].

Ponadto z analizy tarcia w łożysku oraz w zazębieniu wynika przesłanka istnienia "odnawialnej" warstwy granicznej środka smarnego o grubościach:

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

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

- zminimalizowanie zasilania przestrzeni stykowej łożyska oraz zazębienia 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,
- zastosowanie środków smarnych o dużej energii powierzchniowej (dużej adhezji), ale o zminimalizowanym oporze ścinania (małych siłach stycznych przy przemieszczeniach warstw smaru). 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 (np. oleju przekładniowego), 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 przesłankach doświadczalnych a dotyczącej trwałości granicznych warstw smarnych, logicznym jest przyjęcie sposobu impulsowego dozowania małej ilości oleju do strefy styku z zastosowaniem automatycznego sterowania częstotliwości dozowania; częstotliwość dozowania automatycznego wynikać powinna z monitorowania oporu ruchu. Symptodem winien tu być sygnał z odpowiedniego czujnika wskazujący na zmianę tego oporu. Można do tego celu wykorzystać sygnał pomiarowy z przewidzianego w układzie czujnika temperatury zainstalowanego w przestrzeni roboczej łożyska wieńcowego.

4. ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA UKŁADU ZAMKNIĘTEGO SMAROWANIA ŁOŻYSKA WIĘNCOWEGO ORAZ ZAZĘBIENIA KÓŁ NAPĘDOWYCH

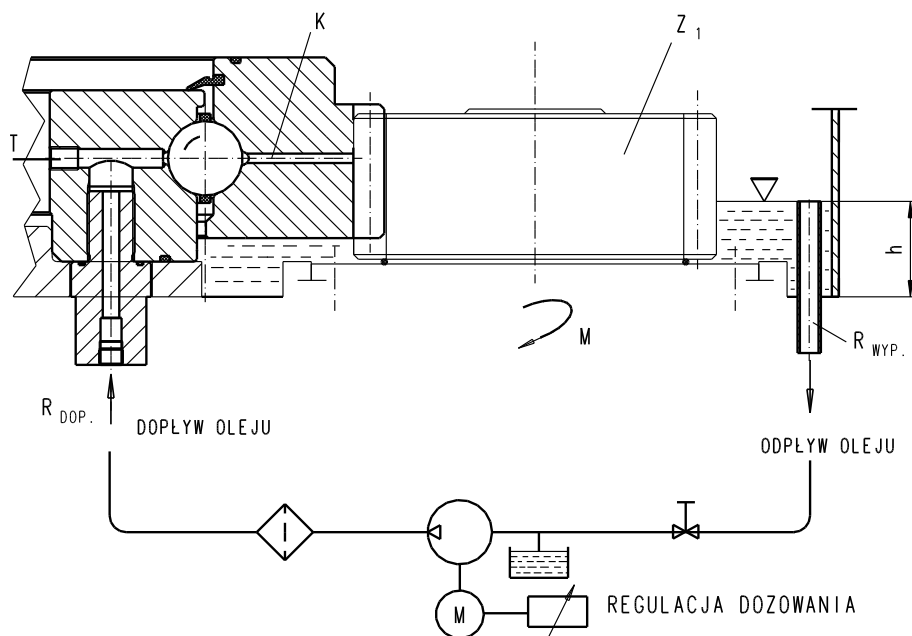
Koncepcję układu zamkniętego smarowania analizowanego układu można ująć w następujących wariantach:

- 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) proponuje się układ zamkniętego smarowania zarówno przestrzeni roboczej łożyska głównego, jak i zazębienia (zębnik - koło wieńcowe) olejem o odpowiednio dobranych właściwościach użytkowych (np. olej Hipol Semisynthetic GL-5 75W/90 - produkcji RN "JEDLICZE").



Rys. 1. Koncepcja układu zamkniętego smarowania zespołu napędowo - obrotowego anteny

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

Uzębienie smarowane jest zasadniczo poprzez rozbryzgowe działanie zębniaka napędowego Z_1 zanurzonego na odpowiednią głębokość h .

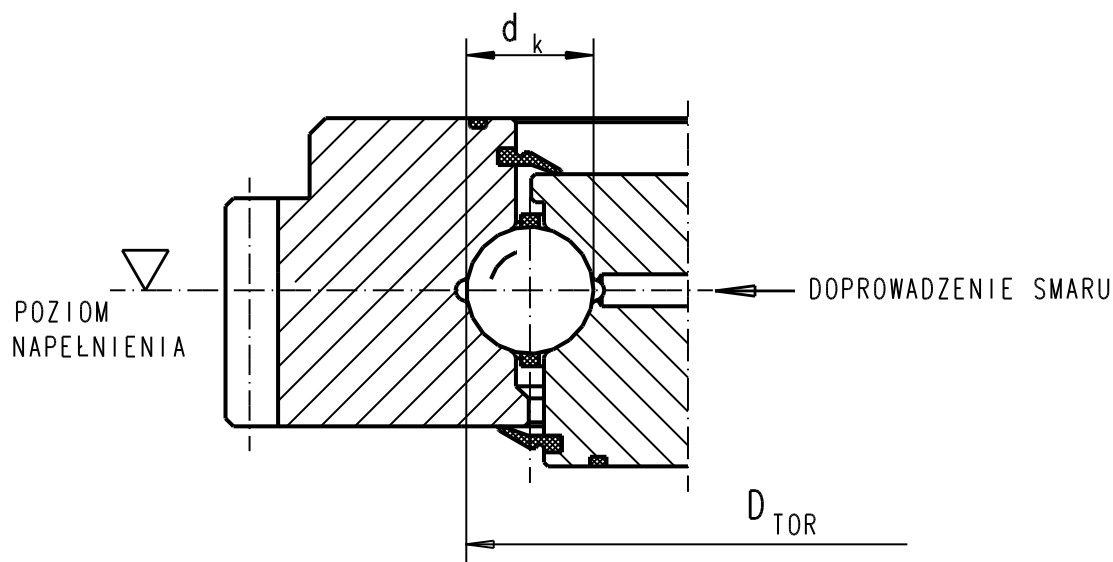
Poziom oleju (dla tej głębokości h) utrzymywany jest poprzez odpowiedni dobór średnicy rurki spływowej R_{WYP} oraz zsynchronizowanej wydajności pompy zasilającej.

Optymalnie dobrane elementy tego układu smarowania gwarantować mogą stabilne smarowanie (wymagane natężenie przepływu oleju), jak również zakładaną niską temperaturę pracy (tj. odpowiednie chłodzenie).

5. ANALIZA SMAROWANIA ŁOŻYSKA WIEŃCOWEGO SMAREM PLASTYCZNYM

5.1. Określenie wymaganej ilość smaru dla jednorazowego napełnienia przestrzeni roboczej łożyska

Założenie: Przestrzeń robocza łożyska wypełniona jest smarem plastycznym w 1/2 tzw. objętości dyspozycyjnej (rys. 2).



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

określonej jako V_C :

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

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

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

ΣV_K - sumaryczna objętość n kulek o objętości V_{K1}

$$\Sigma V_K = V_{K1} \theta n \quad (2)$$

$$V_K = \frac{\pi d_K^3}{6} \quad (3)$$

Zatem:

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

$$\begin{aligned} V_{C(n=150)} &= \frac{\pi^2}{4} \cdot 0,03^2 (1,630 - 0,030) - \frac{\pi}{6} (0,03)^3 \cdot 150 = \\ &= 0,003553 - 0,002120 = 0,001432 m^3 = 1432 cm^3 \end{aligned}$$

Przy założeniu napełnienia łożyska do połowy, potrzebna ilość smaru wyniesie

$$V_{C,wym} = \frac{1}{2} V_C = \frac{1432}{2} = 716 cm^3$$

co odpowiada masie smaru $m_c \cong 650g$

5.2. Ilość smaru niezbędna z punktu widzenia uzyskania jednorodnej warstwy smarnej na elementach toczyń i bieżniach

Założenie: grubość warstwy smarnej $h_o = 1 \mu m$

$$V_W = (S_{TOR} + \Sigma S_K) \theta h_o \quad (5)$$

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

$$S_{TOR} = \pi^2 \cdot d_K (D - d) \quad (6)$$

$$\Sigma S_K - \text{pole powierzchni kulek}; \Sigma S_K = S_{K1} \theta n \quad (7)$$

$$S_{K1} = \pi d_K^2 \quad (8)$$

Zatem:

$$V_W = [\pi^2 \cdot d_K (D - d) + \pi d_K^2 \cdot n] h_o \quad (9)$$

Dla $n = 150$ oraz $h_o = 1 \cdot 10^{-6} m$

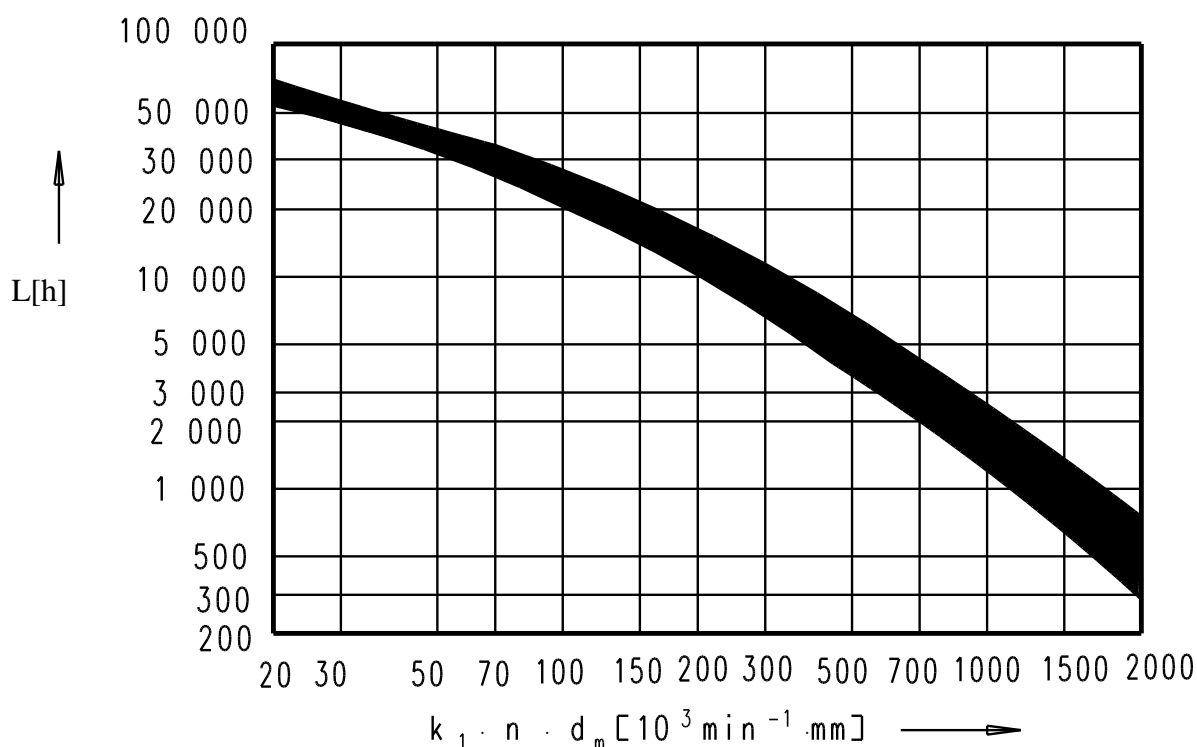
$$\begin{aligned} V_W &= [\pi^2 \cdot 0,03 (1,63 - 0,03) - \pi \cdot 0,03^2 \cdot 150] \cdot 10^{-6} = \\ &= (0,4737 - 0,4241) \cdot 10^{-6} = 0,8978 \cdot 10^{-6} m^3 = 0,8978 cm^3 \cong 900 mm^3 \end{aligned}$$

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

5.3. 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). W tym przypadku niezbędne są dane od producenta!
- zalecanego przez literaturę (p. FAG - Publ. 81115PIA [17,18] - DIN51825) okresu użytkowania smaru (rys. 2). Korzystając z tego rysunku dla parametru analizowanego łożyska $d_{ni} \cdot n = 20000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ odczytujemy nominalny czas użytkowania smaru, który jest rzędu 50000h!
-



Rys. 2. Przeciętny okres użytkowania (trwałość nominalna L_{10}) standardowego 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 $10 \div 20\%$

Tablica 1. Współczynnik korekcyjny k_f iloczynu $n \cdot d_m$ dla różnych łożysk

Lp.	Rodzaj łożyska	Współczynnik k_f
1.	Kulkowe 1-rzędowe zwykłe 2-rzędowe	0,9...1,1 1,5
2.	Kulkowe 1-rzędowe skośne 2-rzędowe	1,6 2,0
3.	Łożysko 4-punktowe	1,6
4.	Kulkowe wahliwe	1,3...1,6
5.	Wzdłużne kulkowe	5,0...6,0
6.	Wzdłużne kulkowe skośne dwurzędowe	1,4
7.	Walcowe jednorzędowe	3,0...3,5
8.	Wzdłużne walcowe	90
9.	Igielkowe	3,5
10.	Stożkowe	4,0
11.	Baryłkowe	10

Uwzględniając nawet niekorzystne warunki użytkowania poprzez współczynniki $f_1...f_6$, jak w tablicy 1 (wg FAG-Publ. WL81115/4 DA) skorygowana trwałość eksploatacyjna smaru wyniesie

$$F_e = F_{10} \cdot f_1 \dots f_6 = 50000 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,9 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,7$$

$$F_e = 50000 \cdot 0,3969 \cong 20000h$$

co oznacza liczbę lat:

$$\frac{20000h}{8760h/rok} = 2,25 \text{ lata ciągłej pracy (24 x 365 dni)}$$

Współczynniki warunków eksploatacji łożyska wpływające na okres użytkowania (trwałość eksploatacyjna) smaru:

- a. wpływ zanieczyszczeń (pyłu) oraz wilgotności
 - nieznaczny $f_1 = 0,9...0,7$
 - silny $= 0,7...0,4$
 - bardzo silny $= 0,4...0,1$
- b. wpływ obciążeń uderowych oraz drgań
 - nieznaczny $f_2 = 0,9...0,7$
 - silny $= 0,7...0,4$
 - bardzo silny $= 0,4...0,1$
- c. wpływ podwyższonej temperatury łożyska
 - nieznaczny ($T \leq 75^\circ C$) $f_3 = 0,9...0,6$
 - silny ($75^\circ C < T \leq 85^\circ C$) $= 0,6...0,3$
 - bardzo silny ($85^\circ C < T \leq 120^\circ C$) $= 0,3...0,1$
- d. wpływ stopnia obciążenia
 - $P/C = 0,1...0,15$ $f_4 = 0,9...0,6$
 - $P/C = 0,15...0,25$ $= 0,6...0,3$
 - $P/C = 0,25...0,35$ $= 0,3...0,1$

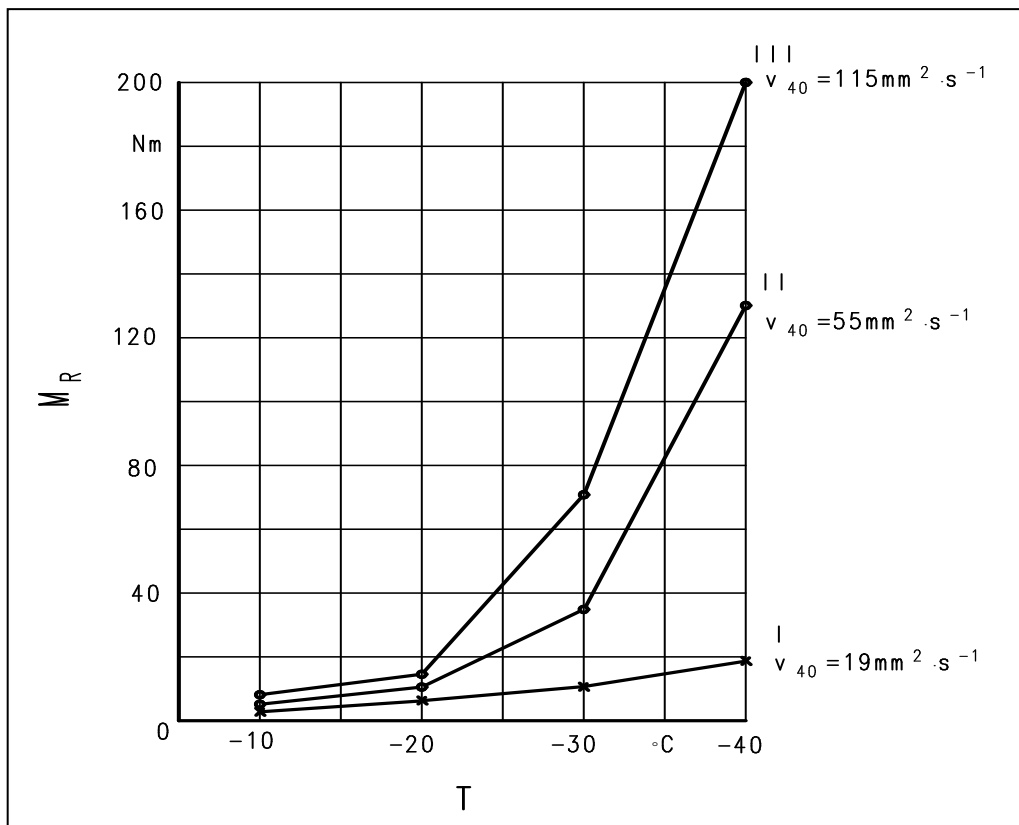
- e. wpływ przepływu powietrza przez łożysko
 mały $f_5 = 0,7...0,5$
 duży $= 0,5...0,1$
- f. wpływ działania sił odśrodkowych
 lub w przypadku wałów o osi pionowej
 zależnie od rodzaju uruchomienia $f_6 = 0,7...0,5$

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

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

5.4. Uwagi dotyczące doboru smaru oraz stopnia napełnienia łożyska smarem ze względu na opory ruchu w temperaturach ujemnych

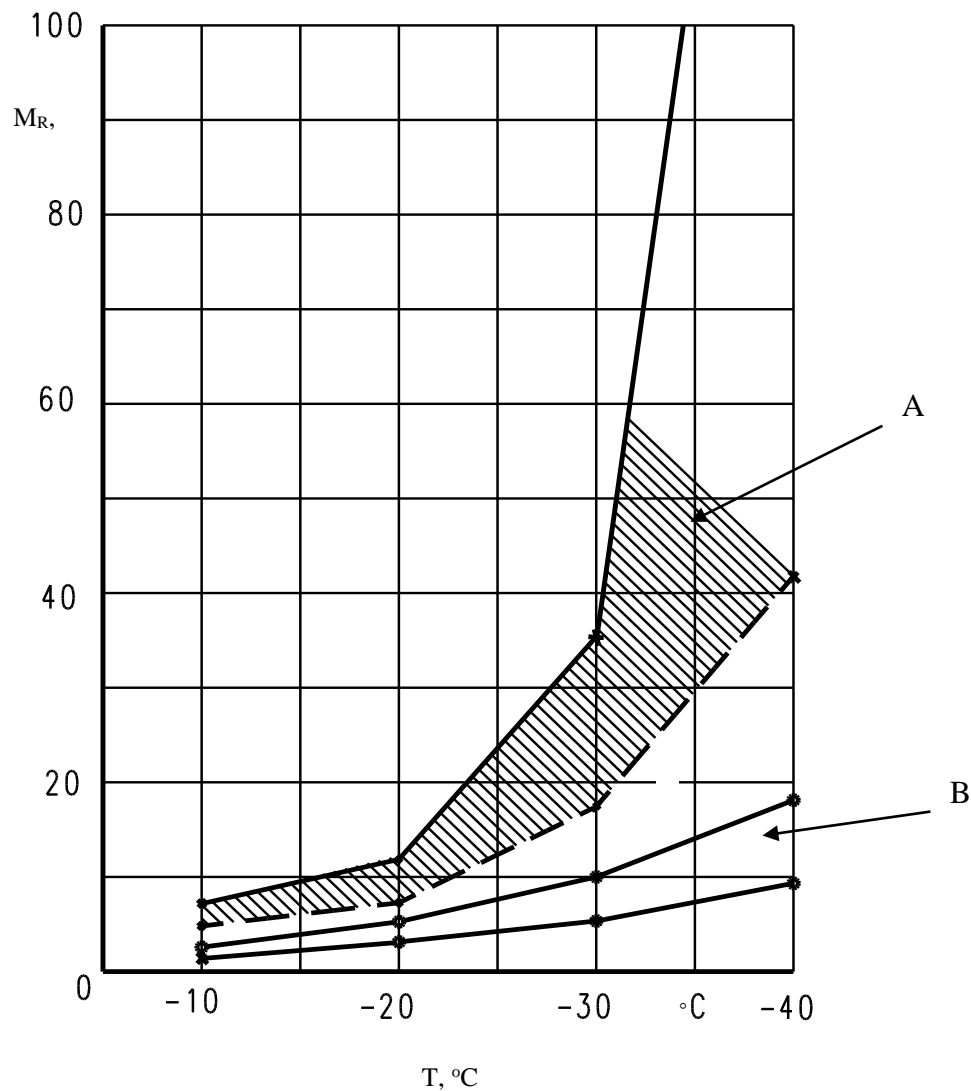
Wybór odpowiedniej jakości smaru plastycznego, poza innymi kryteriami użytkowymi, musi uwzględniać opory ruchu łożyska w temperaturach ujemnych. Z tego względu należy dobierać smar sporządzany z oleju o niskiej lepkości bazowej. Jak pokazano na rysunku 3 zastosowanie oleju bazowego o niskiej lepkości bazowej powoduje kilkudziesięciokrotny spadek momentu tarcia M_R .



Rys. 3. Zależność momentu tarcia (po 20 s od uruchomienia) od temperatury ujemnej otoczenia dla trzech różnych smarów z zagęszczaczem litowym o lepkościach (w 40°C) oleju bazowego: I- $19 \text{ mm}^2/\text{s}$, II- $55 \text{ mm}^2/\text{s}$ oraz III- $115 \text{ mm}^2/\text{s}$

Badane łożysko kulkowe skośne 7312B(FAG) przy obciążeniu wzdłużnym $F_a = 10\text{kN}$ i prędkości obrotowej $n = 7,5\text{ min}^{-1}$.

Również stopień napełnienia łożyska smarem ma istotny wpływ na opory tarcia w temperaturach ujemnych, co pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. 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 $V_{40^\circ\text{C}} = 55\text{ mm}^2/\text{s}$)

Na rysunku widać szczególnie silny wzrost oporu ruchu dla temperatur otoczenia niższych od -20°C , co wskazuje na konieczność smarowania z bardzo małą ilością dozowanego smaru.

6. PODSUMOWANIE

Dla przyjętej postaci konstrukcyjnej mechanizmu obrotu anteny radarowej typu JAT oraz założonych warunków i wymagań 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.

W opracowaniu wykazano, że bazując na kryteriach wysokiej niezawodności i sprawności mechanizmu obrotu 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.

7. LITERATURA

- [1] GIBCZYŃSKA T., PYTKO S.: Łożyska toczne wieńcowe. Uczelniane Wydawnictwo N.-T. AGH, Kraków 1999.
- [2] LAWROWSKI Z.: Technika smarowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [3] LAWROWSKI Z.: Tribologia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [4] CZARNY R.: Systemy centralnego smarowania maszyn i urządzeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [5] WYSOCKI M.: Systemy smarownicze w przemyśle ciężkim. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1971.
- [6] BRÄNDLEIN J. i in.: Die Wälzlagerpraxis Vereinigte Fachverlage, Mainz 1995.
- [7] MÖLLER U.J., BOOR U.: Schmierstoffe im Betrieb. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
- [8] BARTZ W. J.: Getriebeschmierung. Exspert - Verlag, Ehningen 1989.
- [9] Czichos H., Habig K. H.: Tribologie Handbuch. Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1992.
- [10] HEBDA M. WACHAL A.: Trybologia. WN-T, Warszawa 1980.
- [11] SPAŁEK J.: Smarowanie przemysłowych przekładni zębatych - zagadnienia teoretyczne. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
- [12] SPAŁEK J.: Smarowanie maszyn w górnictwie - zagadnienia smarowania przekładni zębatych. Mot. V. Konferencji N. - T "Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych". Gliwice - Ustroń, listopad 1995.
- [13] FAG - Łożyska toczne. Katalog WL41520/2PLA. Wydanie marzec 1997.
- [14] SKF - Katalog główny. Katalog 4000/IIPL, 1991.

- [15] HOESCH ROTHE ERDE - Rothe Erde Grosswälzlagen. Dortmund 1997.
- [16] Dokumentacja techniczna: rys.AT.06.0000-1, AT.06.0008, AT.06.0009; OBRUM 2001.
- [17] Smarowanie łożysk tocznych. FAG - Publ. nr 81115 PIA, Schweinfurt 1986.
- [18] Schnierung von Wälzlagern. FAG - Publ. nr WL 81115/4.DA, Schweinfurt 1996.
- [19] Dokumentacja techniczna układu napędowego anteny radarowej typu JAT. Opracowanie OBRUM, Gliwice, 2002.

STUDY OF LUBRICATION OPTIONS FOR RADAR ANTENNA SLEWING GEAR

Abstract: The paper discusses the problem of lubrication of slewing gear of a radar antenna. Lubrication of the meshing and the bearing of the adopted slewing gear with oil and with grease is analysed. Reasons are given for the preference of oil lubrication in a closed circuit.

Recenzent: dr inż. Andrzej SZAFRANIEC