

**Juliusz B. GAJEWSKI\***, **Marek J. GŁOGOWSKI\***

**ZALEŻNOŚĆ MOMENTU HAMUJĄCEGO  
OBRACAJĄCEGO SIĘ WAŁU OD REZYSTYWNOŚCI  
OLEJÓW KOMERCYJNYCH, BAZOWYCH  
CZYSTYCH I ICH MIESZANINY Z ZDDP  
ORAZ OD ZEWNĘTRZNEGO STAŁEGO POLA  
ELEKTRYCZNEGO**

**DEPENDENCE OF THE BRAKING TORQUE  
OF A ROTATING SHAFT ON THE RESISTIVITY  
OF FORMULATED OILS, PURE BASE OILS AND THEIR  
BLENDS WITH ZDDP AND ON AN EXTERNAL  
DC ELECTRIC FIELD**

**Słowa kluczowe:**

uszczelnienie wargowe, olej bazowy, olej smarny, moment hamujący, dialkyloditiofosforan cynku (ZDDP), pole elektryczne

**Key-words:**

lip seal, base oil, formulated oil, braking torque, zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP), electric field

---

\* Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów rezystywności olejów bazowych – mineralnego i syntetycznego – i ich mieszanin z dialkilditiofosforanem cynku (ZDDP) oraz olejów komercyjnych – dwóch świeżych i jednego zużytego – w funkcji temperatury. Badano także wpływ zewnętrznego stałego pola elektrycznego otrzymanego wskutek przykładania stałego napięcia o różnych wartościach i polaryzacjach między uszczelnienie wargowe i obracający się uziemiony wał na jego moment hamujący w przypadku olejów bazowych bez i z dodatkiem ZDDP. Dodatkowo zaprezentowano w pracy wpływ rezystywności olejów komercyjnych na moment obrotowy wału dla różnych wartości i polaryzacji napięć stałych.

## WPROWADZENIE

W różnych urządzeniach mechanicznych z obracającymi się elementami, takimi jak wały, podczas ich pracy występują znaczne straty energii w węzłach tarcia, czyli układach międzyfazowych: wał–olej–uszczelnienie. Moment hamujący obracających się wałów zależy, m.in. od: prędkości obrotowej wału, jego średnicy i chropowatości powierzchni, temperatury i rodzaju oleju, materiału i geometrii wargi uszczelnienia wargowego itd.

Badania własne autorów [L. 1, 2] przeprowadzone na stanowisku do badań uszczelnień współpracujących z elementami wirującymi wykazały, że istnieje triboelektryzacja naturalna oleju podczas ruchu obrotowego wału. W zależności od rodzaju materiału i stanu powierzchni wału, materiału, z którego wykonano wargę uszczelnienia, rodzaju oleju i jego temperatury triboelektryzacja może osiągać różne wartości i znaki [L. 3]. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na triboelektryzację oleju jest jego rezystywność. Od niej bowiem liniowo zależy czas relaksacji naładowanych cząstek znajdującej się w objętości oleju. Na wartość rezystywności, oprócz temperatury, duży wpływ ma również skład chemiczny bazy olejowej. Wszelkie dodatki lub produkty zużycia, znajdujące się w oleju, mogą również powodować zmiany wartości rezystywności.

W wyniku triboelektryzacji w filmie olejowym powstaje nadmiarowy ładunek elektryczny, który indukuje w wale ładunek zwierciadlany. Pod wpływem działania siły Coulomba naelektryzowane cząstki oraz cząstki polarne są przyciągane do powierzchni wału. Można się spodziewać, że przy powierzchni wału następuje zwiększenie warstwy przyściennej i lokalnej gęstości oleju, a to może implikować wzrost momentu hamującego.

Ogólnie wiadomo, że naelektryzowana cząstka umieszczona w stałym polu elektrycznym porusza się z pewną prędkością zależną od wartości natężenia tego pola, a kierunek jej ruchu zależy od kierunku działania sił pola elektrycznego. Badania własne wykazały, że istnieje zależność między zewnętrznym polem elektrycznym wytworzonym w filmie olejowym i momentem hamującym wału, a wartość tego momentu zależy od zastosowanego oleju [L. 4] i rodzaju uszczelnienia wargowego [L. 5].

## STANOWISKO BADAWCZE, MATERIAŁY I PROCEDURY POMIAROWE

### Stanowiska badawcze

Do wyznaczenia rezystywności  $\rho$  olejów wykorzystano wzorcowy kondensator pomiarowy typu KP-4 zbudowany zgodnie z normą [L. 6]. Pomiarów wykonywano za pomocą mostka RLC typu 7600 Plus oraz miernika izolacji MIC-2500. Pomiarów momentu hamującego wykonywano na stanowisku do badań uszczelnień czołowych i wargowych [L. 4], wyposażonym w momentomierz typu T34ST oraz w system akwizycji danych.

### Materiały użyte w badaniach

W badaniach wykorzystano oleje bazowe: mineralny LOTOS SAE 10/95 (A) i syntetyczny PAO 6 (B) oraz oleje komercyjne: świeże LOTOS 15W40 (C) i ESSO SAE 30 (D) oraz zużyty – po przebiegu 15 000 km – LOTOS 10W40 (E), a ich specyfikacje przedstawiono w Tabeli 1. Jako dodatek do olejów bazowych zastosowano dialkilditiofosforan cynku (ZDDP) produkcji Lubrizol odpowiednio z dodatkiem 10% cynku i 9,5% fosforu.

**Tabela 1. Specyfikacja badanych olejów**

Table 1. Specification of the oils tested

	A	B	C	D	E
Lepkość kinematyczna ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )					
przy 40°C	30,4–38,0	30,2	112,6	103,0	99,6
przy 100°C	5,2–5,9	5,8	14,8	12,0	14,6
Indeks lepkości (-)	95	138	132	105	153
Gęstość przy 15°C ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	874	825	885	892	876
Rezystywność ( $\Omega \cdot \text{m}$ )					
przy 40°C	$1,6 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^7$	$6,9 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^7$
przy 100°C	$8,7 \cdot 10^9$	$6,4 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$

W układzie międzyfazowym uszczelnienie wargowe–olej–obracający się wał zastosowano uszczelnienie fluorowe o średnicy 88 mm, którego rezystywność powierzchniowa w temperaturze pokojowej wynosi  $10^8 \Omega$ . Wał stalowy o średnicy 88 mm ma chropowatość  $0,32 \mu\text{m}$ .

### Procedury pomiarowe

Pomiary rezystywności  $\rho$  olejów wykonywano dla temperatury  $T$  w zakresie od 30 do 100°C skokowo co 10°C. Podczas tych pomiarów układ zasilano napięciem stałym o wartości 100 V. Wartości rezystywności otrzymano po przeliczeniu wyników z uwzględnieniem stałej kondensatora pomiarowego.

Pomiary momentu hamującego  $M_b$  wykonywano dla stałej prędkości obrotowej wału  $n$  równej 500 obr/min i stałych temperatur  $T$  olejów 70 i 90°C. Aby wytworzyć stałe pole elektryczne między obracającym się wałem i wargą uszczelnienia, zastosowano wysokonapięciowy zasilacz prądu stałego z możliwością zmiany polaryzacji zacisków wyjściowych, które podłączono między uziemiony wał i pierścień usztywniający uszczelnienia. Ze względu na występujące zjawisko przebicia między wałem a uszczelnieniem ograniczono napięcie zasilania układu do wartości  $\pm 1500$  V. Przy ustalonej prędkości obrotowej wału i stałej temperaturze oleju dokonywano pomiaru momentu hamującego  $M_{DC}$  dla następujących wartości napięć  $U_{DC}$ : 0,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  i  $\pm 1500$  V. Po odczekaniu około pięciu minut zmieniano polaryzację napięcia i ponownie mierzono moment hamujący dla powyższych napięć.

Moment hamujący bez zewnętrznego pola elektrycznego jest oznaczany jako  $M_b$ , natomiast z przyłączonym napięciem zewnętrznym  $U_{DC}$  wytwarzającym stałe zewnętrzne pole elektryczne – jako  $M_{DC}$ . Używany w dalszej części pracy moment względny  $M_r$  jest równy stosunkowi momentu hamującego  $M_{DC}$  mierzonego w chwili oddziaływania zewnętrznego stałego pola elektrycznego w filmie olejowym do momentu hamującego  $M_b$ , gdy napięcie  $U_{DC}$  równe jest zero.

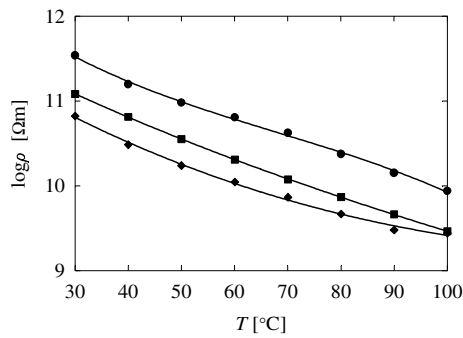
## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

### Rezystywność elektryczna oleju

Na **Rys. 1–3** przedstawiono wyniki pomiarów rezystywności  $\rho$  w funkcji temperatury dla olejów bazowych i ich mieszaniny z 0,1 i 0,2% zawartością wagową ZDDP i dla olejów komercyjnych. We wszystkich przed-

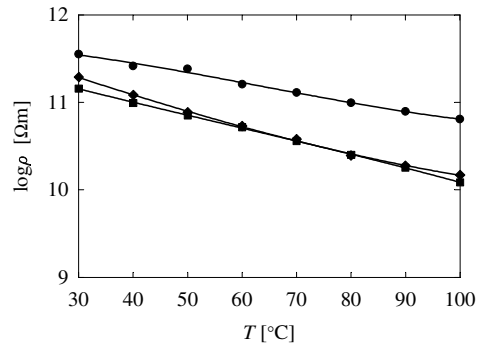
stawionych przypadkach wzrost temperatury powodował zmniejszenie wartości rezystywności badanych olejów. Fakt ten jest związany ze wzrostem ruchliwości cząstek w objętości oleju, która zależy od lepkości dynamicznej oleju [L. 7].

ZDDP w temperaturze 80°C ma rezystywność około cztery rzędy mniejszą od rezystywności badanych olejów bazowych. Dodanie ZDDP do oleju bazowego spowodowało zmniejszenie rezystywności całej mieszaniny.



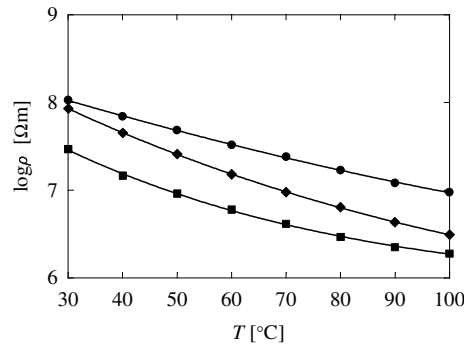
Rys. 1. Rezystywność oleju mineralnego A w funkcji temperatury dla różnej zawartości ZDDP: ● – 0%, ■ – 0,1%, ◆ – 0,2%

Fig. 1. Resistivity vs. temperature for mineral oil A for different ZDDP contents: ● – 0%, ■ – 0.1%, ◆ – 0.2%



Rys. 2. Rezystywność oleju syntetycznego B w funkcji temperatury dla różnej zawartości ZDDP: ● – 0%, ■ – 0,1%, ◆ – 0,2%

Fig. 2. Resistivity vs. temperature for synthetic oil B for different ZDDP contents: ● – 0%, ■ – 0.1%, ◆ – 0.2%



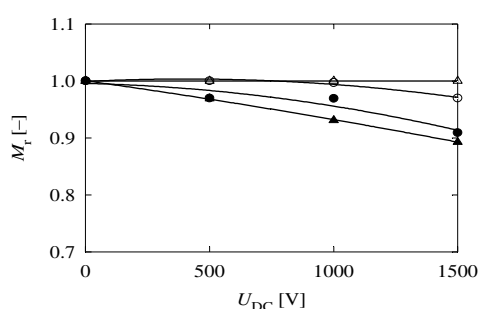
Rys. 3. Rezystywność olejów komercyjnych w funkcji temperatury: ■ – C, ● – D, ◆ – E

Fig. 3. Resistivity vs. temperature for commercial oils: ■ – C, ● – D, ◆ – E

Przebadane oleje komercyjne wykazały mniejszą rezystywność od olejów bazowych. Olej D, który jest używany w silnikach o małych wymaganiach smarowych, ma największą rezystywność, gdyż do jego wytworzenia używa się mniejszej liczby dodatków uszlachetniających niż w przypadku pozostałych olejów komercyjnych. Najmniejszą rezystywność wykazał mineralny olej C, w którego składzie jest objętościowo najwięcej dodatków. W zależności od objętości i rodzaju użytych dodatków uszlachetniających oraz produktów powstałych w oleju szczególnie pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia podczas eksploatacji w silniku samochodowym (olej E), rezystywność oleju może ulec zmianie nawet o kilka rzędów wielkości.

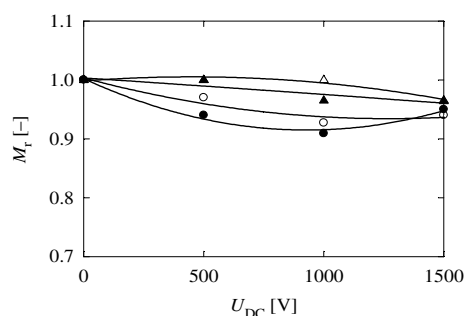
### Moment hamujący

Na **Rys. 4–7** przedstawiono zależność momentu względnego  $M_r$  w funkcji napięcia  $U_{DC}$  dla stałej prędkości obrotowej wału  $n$  i olejów bazowych bez i z 0,1% zawartością wagową ZDDP. Aby można było porównać moment hamujący między badanymi olejami, wprowadzono wartość względną momentu  $M_r$ . Na wykresach temperaturę oleju oznaczono następującymi symbolami graficznymi: ● – 70°C i ▲ – 90°C. Kolor czarny symboli oznacza ujemną polaryzację (– na uszczelnieniu), a kolor biały – dodatnią polaryzację napięcia.



**Rys. 4. Moment względny w funkcji napięcia dla oleju A**

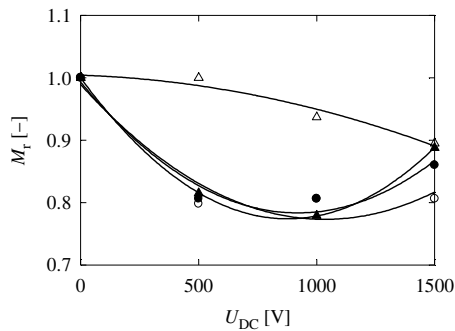
Fig. 4. Relative braking torque vs. the absolute DC voltage value for the oil A



**Rys. 5. Moment względny w funkcji napięcia dla oleju A z 0,1% wagową zawartością ZDDP**

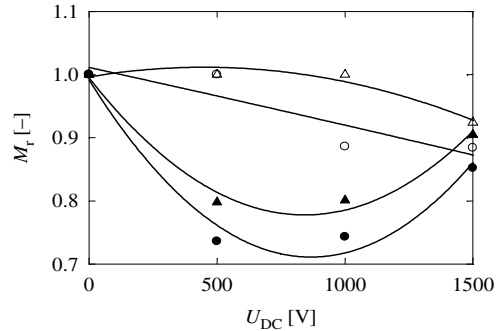
Fig. 5. Relative braking torque vs. the absolute DC voltage value for the oil A and 0.1% ZDDP content

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że oddziaływanie zewnętrznego stałego pola elektrycznego w filmie olejowym daje największe zmiany momentu hamującego dla syntetycznego oleju bazowego zarówno bez, jak i z ZDDP, a najlepsze efekty zmniejszenia momentu hamującego obserwowano dla polaryzacji ujemnej napięcia  $U_{DC}$ .



**Rys. 6. Moment względny w funkcji napięcia dla oleju B**

Fig. 6. Relative braking torque vs. the absolute DC voltage value for the oil B



**Rys. 7. Moment względny w funkcji napięcia dla oleju B z 0,1% wagową zawartością ZDDP**

Fig. 7. Relative braking torque vs. the absolute DC voltage value for the oil B and 0.1% ZDDP content

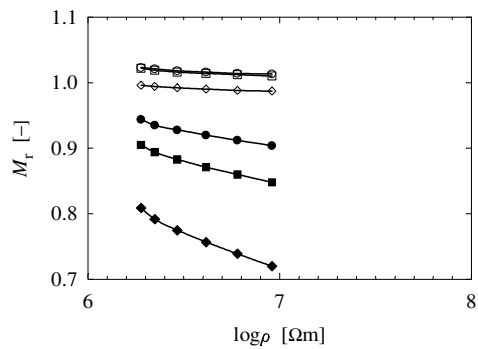
Obserwowane zmiany momentu hamującego wywołane zewnętrznym stałym polem elektrycznym mogą być skutkiem przemieszczania się naładowanych i polarnych cząstek między elektrodami w obu kierunkach oraz zmianami położenia dipoli przy powierzchniach wału i wargi uszczelnienia, przez co następuje zmiana koncentracji cząstek i lokalny wzrost lub spadek lepkości oleju.

Na **Rys. 8–10** przedstawiono zależność momentu względnego w funkcji rezystywności olejów komercyjnych. Na wykresach symbole graficzne oznaczają napięcie  $U_{DC}$ : ● — 500 V, ■ — 1000 V i ◆ — 1500 V. Kolorem czarnym przedstawiono ujemną polaryzację napięcia, a kolorem białym — polaryzację dodatnią.

Otrzymane wyniki wskazują, że zmiany rezystywności poszczególnych olejów mają wpływ na moment hamujący  $M_r$  podczas działania stałego zewnętrznego pola elektrycznego w filmie olejowym. Charakter zmian momentu hamującego może być, jak się przypuszcza, związany z gęstością i grubością warstwy olejowej (elektryczna warstwa podwójna)

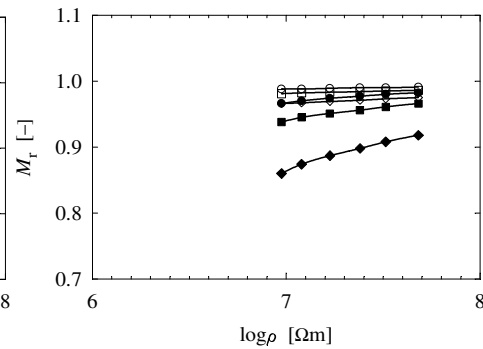
przy powierzchni wału, a budowa tej warstwy zależy od właściwości fizycznych i chemicznych olejów.

Dla olejów C i D największe zmiany momentu hamującego występują dla ujemnej polaryzacji napięcia. Wzrost rezystywności oleju C wpływa na zmniejszenie momentu hamującego  $M_r$ , a dla oleju D obserwuje się zjawisko odwrotne. Bardzo małe zmiany momentu względnego dla zużytego oleju E w całym zakresie jego rezystywności mogą wynikać z dużej zawartości w nim metalicznych produktów zużycia powierzchni trących silnika.



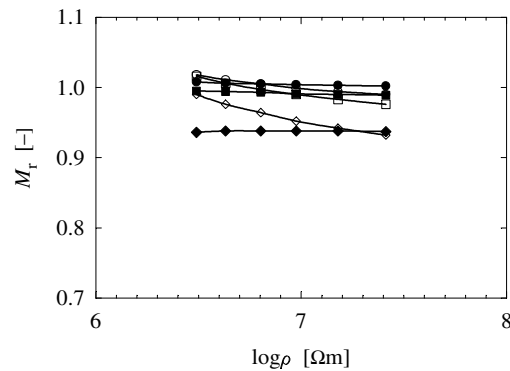
**Rys. 8. Moment względny w funkcji rezystywności oleju C**

Fig. 8. Relative braking torque vs. resistivity for the oil C



**Rys. 9. Moment względny w funkcji rezystywności oleju D**

Fig. 9. Relative braking torque vs. resistivity for the oil D



**Rys. 10. Moment względny w funkcji rezystywności oleju E**

Fig. 10. Relative braking torque vs. resistivity for the oil E



## PODSUMOWANIE

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartość rezystywności oleju zależy od rodzaju bazy olejowej oraz objętości i, jak się przypuszcza, liczby i rodzajów użytych dodatków uszlachetniających w blendowaniu z olejami bazowymi.

Wytworzenie stałego pola elektrycznego w filmie olejowym powoduje spadek lub wzrost momentu hamującego wału albo może nie mieć na niego żadnego wpływu. Moment ten zależy od rodzaju oleju oraz dodatku ZDDP, a także od zwrotu wytworzonego pola elektrycznego.

Efekt zastosowania stałego napięcia  $U_{DC}$  w postaci zmian momentu hamującego  $M_{DC}$  obracającego się wału można skorelować ze zmianami rezystywności badanych olejów.

Lepsze zrozumienie mechanizmów zachodzących na lub przy powierzchni wału i wargi uszczelnienia oraz w samym filmie olejowym może umożliwić poprawę warunków pracy uszczelnienia wargowego.

## LITERATURA

1. Gajewski J.B., Głogowski M.J.: Influence of tribocharging on the work of lip seals in a model engine. *Journal of Electrostatics*, 51–52 (2001), s. 366–373.
2. Gajewski J.B., Głogowski M.J., Gatner K., Gawliński M.: ZDDP content in mineral and synthetic motor base oils and its effect on electrostatic and tribological phenomena in a rotating shaft–oil–lip seal system. 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Tribology *iCAT 2008*, 3–5 December 2008, Singapore, s. 152–154.
3. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
4. Gajewski J.B., Głogowski M.J.: Influence of an applied electric field on the torque of rotary lip seals on metal shafts. Part I: Effect of lip seal. *Tribology International*, 40 (2007), s. 49–55.
5. Gajewski J.B., Głogowski M.J.: Influence of an applied electric field on the torque of rotary lip seals on metal shafts. Part II: Effect of oil type. *Tribology International*, 40 (2007), s. 56–63.
6. PN-EN 60247. Ciecze elektroizolacyjne. Pomiar przenikalności względnej, współczynnika strat dielektrycznych ( $\text{tg}\delta$ ) i rezystywności przy prądzie stałym. PKN, Warszawa 2008.
7. Adamczewski I.: *Ionization, conductivity and breakdown in dielectric liquids*, Taylor and Francis, London, 1969.

**Recenzent:**  
**Krzysztof KRAWCZYK**

### Summary

**In the paper, the results of measurements of resistance of mineral and synthetic base oils and their blends with zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP), and of commercial (formulated) oils — two fresh oils and one used oil — as a function of temperature are presented. In addition, the effect of an external DC electric field on the braking torque of a rotating shaft for the base oils with and without ZDDP was examined. The DC electric field was obtained when DC voltage of different values and polarities was applied between the grounded shaft and the stiffening ring of a rotating lip seal. Additionally, the influence of the resistance of commercial oils on the braking torque for different DC voltages of both polarities is presented.**