

**Juliusz B. GAJEWSKI^{*}, Marek J. GŁOGOWSKI^{*},
Maciej PASZKOWSKI^{**}**

QUASI-ELEKTROREOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI WYBRANYCH SILNIKOWYCH OLEJÓW BAZOWYCH

QUASI-ELECTORRHEOLOGICAL PROPERTIES OF SELECTED BASE ENGINE OILS

Słowa kluczowe:

właściwości elektroteologiczne, uszczelnienie wargowe, stałe pole elektryczne, olej bazowy

Key words:

electrorheological properties, lip seal, DC electric field, base oil

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zewnętrznego stałego pola elektrycznego na moment hamujący w układzie: wirujący wał–olej–

^{*} Politechnika Wroclawska, Katedra Inzynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej, Wybrzeze Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, Polska, e-mail: juliusz.b.gajewski@pwr.edu.pl, e-mail: marek.glogowski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 32 01.

^{**} Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, ul. Lukasiewicza 7/9, 50-371 Wroclaw, Polska, e-mail: maciej.paszkowski@pwr.edu.pl, tel. 71 320 31 12.

uszczelnienie wargowe. W badaniach używano bazowych olejów silnikowych syntetycznych: glikol polialkilenowy (polyalkylene glycol = PAG) i polialfaolefina (polyalphaolefin = PAO) oraz dodatków uszlachetniających: przeciwzużyciowy (AW) i modyfikator tarcia (FM). Doświadczenia te prowadzono dla różnych temperatur czystych olejów bazowych i ich mieszanin z dodatkami AW i FM.

Właściwości elektreologiczne bazowych olejów i ich mieszanin z ww. dodatkami AW i FM wyznaczono na stanowisku składającym się z reometru pracującego w układzie obracająca się tarcza–płyta i z przystawki umożliwiającej wytworzenie stałego pola elektrycznego między tarczą i płytą.

WPROWADZENIE

Nowoczesne oleje silnikowe składają się z bazy olejowej i wielu dodatków uszlachetniających, takich jak: antyutleniacze, detergenty, inhibitory korozji, modyfikatory lepkości, przeciwzużyciowe, przeciwzatarciowe itp. Liczba użytych dodatków zależy od rodzaju zastosowanej bazy olejowej. Oleje silnikowe formułowane przy zastosowaniu mineralnej bazy olejowej wymagają większej liczby dodatków, jak i większej ich objętości w porównaniu z olejami silnikowymi wyprodukowanymi np. z olejów syntetycznych, jakimi mogą być polialfaolefiny (PAO). Złożoność chemiczna wszystkich olejów silnikowych powoduje, że ich biodegradowalność może być mało skuteczna. Oleje produkowane na bazie PAO są w miarę dobrze biodegradowalne, ale pod warunkiem, że mają one małą lepkość (np. oleje PAO2 i PAO4).

Najlepszą biodegradowalnością wykazują się oleje produkowane na bazach wyprodukowanych z glikolu polialkilenowego (PAG). W dużej mierze ich biodegradowalność wynika z potrzeby stosowania mniejszej ilości dodatków uszlachetniających niż wymagają tego inne oleje bazowe. Oleje PAG są jednymi z najwcześniej stosowanych komercyjnych olejów syntetycznych. Charakteryzują się dobrą odpornością na „duże obciążenia – naciski” i mogą pracować w szerokim zakresie temperatur. Mają wysoki wskaźnik lepkości i duży poziom stabilności oksydacyjnej. Duża polarność olejów typu PAG powoduje, że tworzona przez nie warstwa na powierzchni metalu minimalizuje zużycie materiału podczas tarcia typu metal–metal. Również zdolność do czystego rozkładu oleju bez pozostawiania nagaru w wysokich temperaturach jest ważnym atrybutem tych olejów [L. 1].

Oleje PAG są mało toksyczne i wysoko biodegradowalne, szczególnie te, które mają dużą zawartość tlenu etylenu [L. 2] i małą średnią masę cząsteczkową [L. 3]. W celu lepszego zabezpieczenia powierzchni poddanych tarcia i zmniejszeniu współczynnika tarcia między tymi powierzchniami dodaje się do bazowych olejów silnikowych dodatki przeciwzużyciowe, przeciwzatarciowe

i modyfikatory tarcia, które tworzą na powierzchni cienki film o grubości 100–150 nm [L. 4, 5].

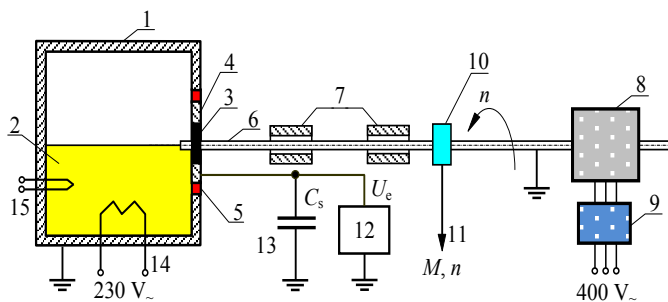
Bazowe oleje silnikowe typu PAG nadal są w fazie badań laboratoryjnych [L. 6], ponieważ ich bardzo duża zdolność do pochłaniania wilgoci z otoczenia i łatwość tworzenia kwaśnych związków chemicznych z produktów powstających podczas spalania mieszanki paliwowej powodują korozję wewnętrznych elementów silnika.

Ciecze, które składają się z ciekłej substancji o małej przewodności elektrycznej oraz znajdujących się w niej zawieszonych cząstek, które pod wpływem pola elektrycznego ustawiają się wzdłuż linii tego pola i zmieniają lepkość cieczy, nazywa się cieczami elektroteologicznymi. Podobnie zachowują się badane przez autorów czyste oleje bazowe bez i z dodatkami uszlachetniającymi z tą różnicą, że zmiany lepkości badanych cieczy są bardzo małe w porównaniu z typowymi cieczami elektroteologicznymi.

STANOWISKO BADAWCZE, MATERIAŁY I PROCEDURY POMIAROWE

Stanowisko badawcze

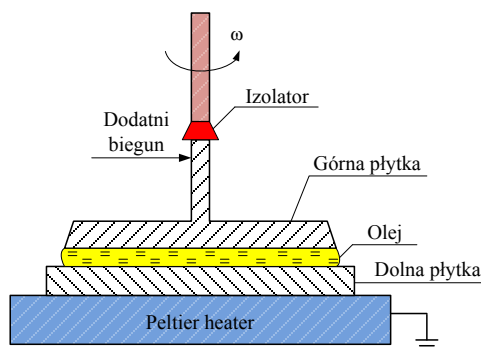
Pomiary momentu hamującego wykonano na stanowisku do badań uszczelnień współpracujących z elementami obrotowymi przedstawionym na **Rysunku 1**. Stanowisko składało się z: komory olejowej (1) wypełnionej do połowy badanym olejem (2); fluorowego uszczelnienia wargowego o wymiarach 85×105×12 mm (3); metalowego gniazda uszczelnienia (4); dielektrycznego pierścienia (5); wału o średnicy 85 mm i chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ (6); opraw łożyskowych (7); silnika trójfazowego (8); falownika (9); czujnika momentu obrotowego (10), za pomocą którego dokonywano pomiaru momentu hamującego i prędkości obrotowej wału (11); elektrometru (12); kondensatora wzorcowego (13); grzałki (14) i czujnika temperatury oleju (15) [L. 7, 8].



Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru momentu hamującego i napięcia [L. 7]
 Fig. 1. The experimental set-up for measuring the braking torque and voltage [L. 7]

W badaniach właściwości elektreoreologicznych wybranych kompozycji smarowych przeprowadzono reologiczne testy dynamiczno-oscylacyjne. Badania wykonano na reometrze rotacyjnym Physica Anton Paar MCR 101.

Reometr pracował w układzie płytka–płytką, przy stałej wysokości szczeliny pomiarowej wynoszącej $0,1 \mu\text{m}$ ($\pm 0,001 \text{ mm}$). W badaniach użyto stalowej płytki z izolatorem ceramicznym (PP50/E) o średnicy 50 mm. W skład reometru wchodziła głowica do badań elektreoreologicznych (P-PTD200/E) wyposażona w układ grzewczo-chłodzący Peltiera i zasilacz prądowo-napięciowy (HCP 14–12500, 1 mA, 12,5 kV). Napięcie elektryczne z zasilacza prądowo-napięciowego przyłożone było do górnej elektrody. Między elektrodami znajdowała się próbka badanego oleju smarowego. Schemat ideowy głowicy pomiarowej P-PTD 200/E przedstawiono na **Rysunku 2**.



Rys. 2. Schemat układu płytka–płytką do pomiaru lepkości zespolonej

Fig. 2. Schematic of the plate–plate system for measuring the complex viscosity

Odczyt mierzonych wielkości odbywał się za pomocą programu do akwizycji danych pomiarowych RHEOPLUS/32 stanowiącego wyposażenie reometru rotacyjnego. Podczas badań próbkę oleju smarowego termostatowano w stałej temperaturze 20°C z dokładnością $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Przed każdorazowym pomiarem próbkę utrzymywano w stałej temperaturze w głowicy reometru przez okres 5 minut dla ustabilizowania się zadanej temperatury. Badaną próbkę oleju smarowego o objętości $240 \mu\text{l}$ наносzono na dolną nieruchomą płytkę pomiarową za pomocą automatycznej jednokanałowej pipety. Pomiary lepkości zespolonej kompozycji smarowych powtarzano 6-krotnie.

Badania polegały na ocenie wpływu skokowej zmiany napięcia elektrycznego (0–100–0 V) na wartości modułu lepkości zespolonej $|\eta^*|$ kompozycji smarowych. Moduł lepkości zespolonej opisuje następujące równanie (1) [L. 9]:

$$|\eta^*| = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (1)$$

gdzie:

$$\eta' = \frac{G_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta \quad (2)$$

$$\eta'' = \frac{G_0}{\gamma_0 \omega} \cos \delta \quad (3)$$

Kompozycje smarowe ścinano w szczelinie pomiarowej głowicy reometru przy stałej amplitudzie odkształcenia $\gamma = 1\%$ oraz częstotliwości oscylacji $\omega = 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ w czasie 300 s. W pierwszym i trzecim etapie testu ścinano próbki olejów smarowych przy zerowym napięciu elektrycznym, a w drugim etapie przy stałym napięciu wynoszącym 100 V. Podczas badań rejestrowano wpływ stałego napięcia elektrycznego na zmiany wartości modułu lepkości zespolonej $|\eta^*|$.

Materiały użyte w badaniach

Do badań nad działaniem zewnętrznego stałego pola elektrycznego i jego wpływem na moment hamujący wału stosowano syntetyczne oleje bazowe: PAO typu **PAO6** oraz PAG typu **ROKOLUBE 68**, a ich specyfikacje przedstawiono w **Tabeli 1**. Ponadto stosowano dodatki uszlachetniające ZDDP (AW) i IRGALUBE F10A (FM).

Tabela 1. Specyfikacja badanych olejów

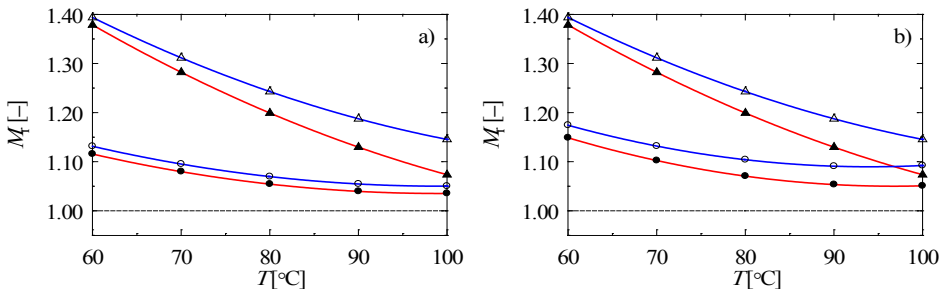
Table 1. Specification of the oils tested

	PAO6	ROKOLUBE 68
Lepkość kinematyczna ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		
przy 40°C	30,2	56,4
przy 100°C	5,8	10,5
Indeks lepkości (-)	138	176
Gęstość przy 15°C ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	825	990 przy 20°C
Rezystywność ($\Omega \cdot \text{m}$)		
przy 40°C	$2,6 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^7$
przy 100°C	$6,4 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^6$
Przenikalność elektryczna (-)		
przy 40°C	1,9	5,8
przy 100°C	1,9	5,1

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

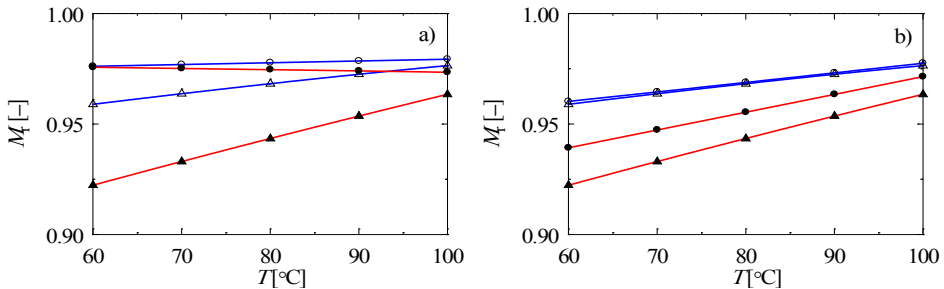
Wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku z **Rys. 1** przedstawiono na **Rys. 3** i **4** w postaci wykresów względnego momentu hamującego M_r w funkcji temperatury oleju T dla zadanej i ustalonej prędkości obrotowych wału n ,

ujemnego napięcia U_{DC} na pierścieniu usztywniającym uszczelnienia i koncentracji dodatków AW i FM w mieszaninach, jako parametrów. Zastosowane na rysunkach symbole oznaczają: \blacktriangle – olej bazowy i $U_{DC} = 1500$ V; \bullet – olej bazowy z 0,5% wagową zawartością dodatku uszlachetniającego i $U_{DC} = 1500$ V; \triangle – olej bazowy i $U_{DC} = 900$ V, \circ – olej bazowy z 0,5% wagową zawartością dodatku uszlachetniającego i $U_{DC} = 900$ V.



Rys. 3. Moment względny w funkcji temperatury dla prędkości obrotowej wału $n = 2000$ obr./min i dla oleju PAO i jego mieszanin z dodatkami a) AW i b) FM

Fig. 3. The relative braking torque as a function of temperature T for $n = 2000$ rpm and for PAO and its blend with the a) AW and b) FM agent



Rys. 4. Moment względny w funkcji temperatury dla prędkości obrotowej wału $n = 2000$ obr./min i dla oleju PAG i jego mieszanin z dodatkami a) AW i b) FM

Fig. 4. The relative braking torque as a function of temperature T for $n = 2000$ rpm and for PAG and its blend with the a) AW and b) FM agent

Na wykresach przedstawiono moment hamujący względny M_r w funkcji wymienionego napięcia U_{DC} , który jest zdefiniowany jako stosunek wartości momentu hamującego M_{DC} występującego pod działaniem zewnętrznego stałego pola elektrycznego do wartości momentu hamującego M_b otrzymanego bez

działania kompensującego stałego pola elektrycznego, czyli przy jego braku. W związku z tym definicyjny wzór (4) na względny moment hamujący M_r ma następującą postać [L. 7]:

$$M_r = \frac{M_{DC}}{M_b} \quad (4)$$

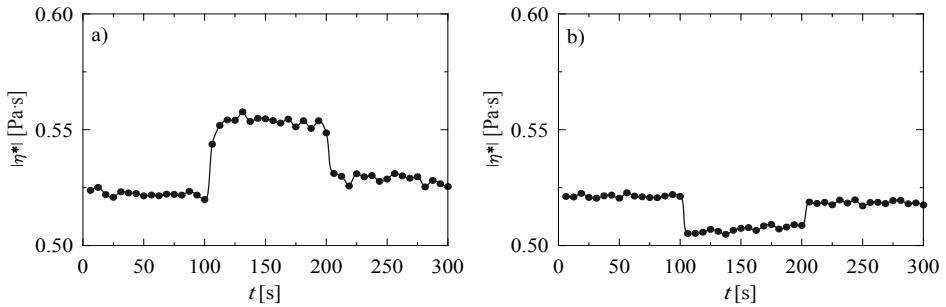
Wyniki doświadczeń nad wpływem kompensującego stałego pola elektrycznego na moment hamujący obracającego się wału wyraźnie pokazują, że występuje pewna tendencja zmiany momentu hamującego wraz ze wzrostem stałego napięcia dla różnych temperatur czystych olejów bazowych oraz ich mieszanin z dodatkami AW i FM.

Na wykresach widać, że względny moment hamujący jest większy dla olejów bazowych niż dla ich mieszanin z dodatkami AW i FM. Oddziaływanie zewnętrznego stałego pola elektrycznego powoduje, że moment hamujący dla oleju PAO rośnie, a dla oleju PAG maleje.

Budowa chemiczna badanych olejów ma wpływ na kształt i wielkość zmian przebiegu momentu hamującego. Dla oleju PAG zmiany momentu hamującego są liniowe i maksymalna zmiana jego wartości jest równa 7%, podczas gdy dla oleju PAO przebieg momentu hamującego jest quasi-liniowy i maksymalna zmiana jego wartości wynosi około 40%.

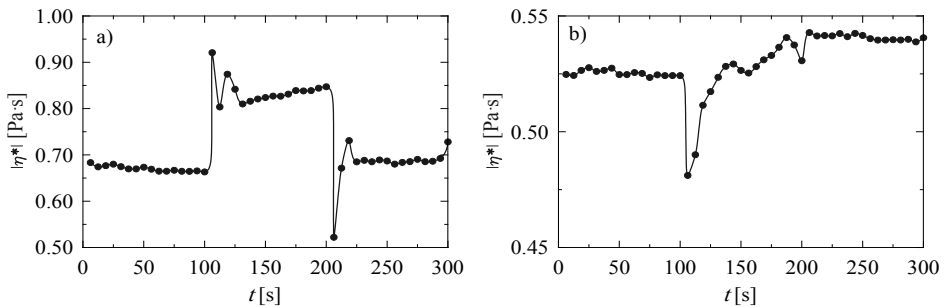
Badane oleje bazowe i mieszaniny oleju z dodatkiem uszlachetniającym mają cechy roztworu koloidalnego. To może być czynnik, który wspomaga napięcie stałe w przesuwaniu odwróconych miceli (naelektryzowane cząstki koloidalne – zgrupowane cząsteczki w roztworze oleju bazowego), które mają „polarne grupy w środku i węglowodorowe ogony na zewnątrz” [L. 10] i przenoszą je w kierunku wnętrza filmu olejowego. Film olejowy definiuje się tutaj jako obszar między zewnętrzną warstwą podwarstwy pomiędzy dwoma stałymi podwarstwami dodatku AW lub FM na powierzchni metalu i podobną strukturą powstałą na powierzchni wargi uszczelnienia wargowego wykonanego z elastomeru fluorowego. Obie podwarstwy są jakby ciałami stałymi (ściśle upakowanymi strukturami) i są przewodzące. Warstwy te „przesuwają” potencjał zerowy metalu w kierunku filmu olejowego. Następne podwarstwy mogą składać się z cząsteczek o długich łańcuchach, które mogą zachowywać się jak ciecz i mieć raczej nieprzewodzące właściwości. Cząsteczki te są przyklejone powyżej podwarstwy o charakterze ciała stałego. Ciekła podwarstwa „zapewnia zwilżanie i nieduże tarcie”, podczas gdy stałe podwarstwy – wzrost wytrzymałości obciążenia [L. 10]. W tej warstwie i ponad nią mogą występować micelle. Stałe pole elektryczne może spowodować, że ciekła podwarstwa blisko wału ma mniejszą lepkość niż bez tego pola elektrycznego, ponieważ zmienia się elektryczna struktura miceli i ich łatwość poruszania się w kierunku biegunów stałego pola elektrycznego.

Na Rys. 5–7 przedstawiono zależność modułu lepkości zespolonej $|\eta^*|$ oraz czasu ścinania przy skokowej zmianie napięcia elektrycznego dla olejów PAO i PAG bez i z 0,5% wagowym udziałem dodatków uszlachetniających AW i FM.



Rys. 5. Zależność lepkości zespolonej od czasu dla: a) PAO i b) PAG bez dodatków uszlachetniających

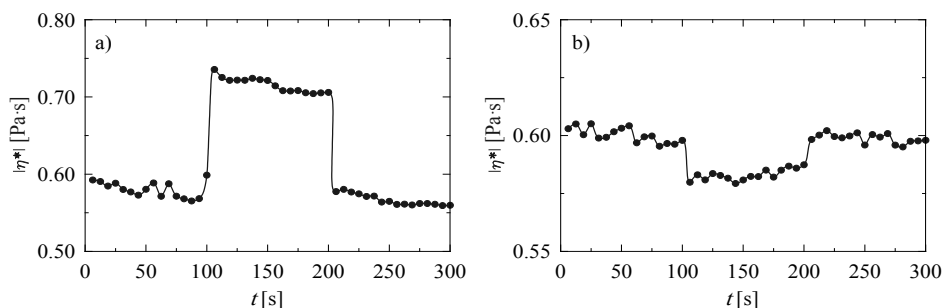
Fig. 5. The dependence of the complex viscosity magnitude as a function of time for: a) PAO and b) PAG pure base oils



Rys. 6. Zależność lepkości zespolonej od czasu dla: a) PAO i b) PAG z 0,5% zawartością dodatku AW

Fig. 6. The dependence of the complex viscosity magnitude as a function of time for: a) PAO and b) PAG base oil with 0.5% wt the AW additives

Z badań elektreologicznych wynika, że zarówno olej PAG bez dodatków uszlachetniających, jak i z dodatkami uszlachetniającymi AW i FM wykazywał zmianę modułu lepkości zespolonej przy skokowej zmianie napięcia elektrycznego. Wraz z pojawieniem się napięcia elektrycznego U_{DC} w 100 sekundzie w przypadku każdej z próbek moduł lepkości zespolonej $|\eta^*|$ gwałtownie malał, po czym rósł po wyłączeniu napięcia elektrycznego w 200 sekundzie.



Rys. 7. Zależność lepkości zespolonej od czasu dla: a) PAO i b) PAG z 0,5% zawartością dodatku FM

Fig. 7. The dependence of the complex viscosity as a function of time for: a) PAO and b) PAG base oil with 0.5% wt the FM additives

Dla tych samych warunków eksperymentalnych lepkość zespolona oleju PAO rosła po pojawieniu się napięcia w 100 sekundzie, a po wyłączeniu napięcia (200 s) lepkość zespolona malała do wartości początkowych.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że badane syntetyczne bazowe oleje bez i z dodatkami AW i FM mogą być traktowane jako quasi-elektroreologiczne ciecze, gdyż zmiany wartości modułu lepkości zespolonej są niewielkie w porównaniu ze zmianami występującymi dla typowych cieczy elektroreologicznych w odpowiedzi na zewnętrzne stałe pole elektryczne.

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że chemiczna struktura badanych olejów bazowych ma decydujące znaczenie w zmianie momentu hamującego i lepkości zespolonej pod wpływem oddziaływania stałego pola elektrycznego.

Wyniki badań elektroreologicznych pokazują, że dwa różne syntetyczne oleje bazowe bez i z dodatkami uszlachetniającymi zachowują się różnie pod wpływem zewnętrznego stałego pola elektrycznego. W przypadku oleju PAO i jego mieszanin z dodatkami AW i FM lepkość zespolona rośnie po wytworzeniu pola elektrycznego, a dla takich samych warunków lepkość zespolona oleju PAG i jego mieszanin z dodatkami AW i FM maleje.

Zachęcające wyniki, szczególnie dla oleju typu PAG, dla którego moment hamujący malał, gdy wartość pola elektrycznego rosła, pozwalają przypuszczać, że dalsze eksperymenty i ich wyniki mogą prowadzić w przyszłości do praktycznego ich zastosowania w węzłach tarcia występujących np. w silnikach spalinowych. To z kolei będzie powodować zmniejszenie strat, a zatem zmniejszenie wpływu zanieczyszczeń na środowisko i zmniejszenie zużycia paliwa.

LITERATURA

1. Galvin P.A., Blain D.A., Galiano-Roth A.S., Murphy W.R.: Benefits for synthetic lubricants in industrial applications. 13th Int. Colloq. Tribol., Esslingen, vol. II, (2002), 1091.
2. Rizvi S.Q.A.: A comprehensive review of lubricant chemistry, technology, selection, and design. ASTM Int., West Conshohocken (2009).
3. Beran E., Hull S., Steininger M.: The relationship between the chemical structure of poly(alkylene glycol)s and their aerobic biodegradability in an aqueous environment. *J. Polym. Environ.* 21, (2013), 172.
4. Topolovec-Miklozic K., Forbus T.R., Spikes H.A.: Film thickness and roughness of ZDDP antiwear films. *Tribology Letters*, 26, (2007), 161.
5. Harvey T.J., Wood R.J.K., et al.: Effect of oil quality on electrostatic charge generation and transport. *Journal of Electrostatics*, 55, (2002), 1.
6. Voydt M.: No/low SAP and alternative engine oil development and testing. *Journal of ASTM International*, 4, (2007), 1.
7. Gajewski J.B., Głogowski M.J.: Influence of additives blended with motor base oils on the braking torque under an auxiliary external DC electric field. *Journal of Electrostatics*, 71, (2013), 1100.
8. Gajewski J.B., Głogowski M.J.: Base oil and its blends with ZDDP and their effect on tribocharging, braking torque and electrical double layers in a friction junction. *Tribology Letters*, 38, (2010), 179.
9. Ferguson J., Kębłowski Z.: *Reologia stosowania płynów*. Wydawnictwo Marcus, Łódź 1995.
10. Hsu S.M.: Molecular basis of lubrication. *Tribology International*, 37, (2004), 553.

Summary

The paper presents the experimental results of research on the effect of an external DC electric field on the braking torque in a rotating shaft–oil–rotary lip seal system. In the research, polyalkylene glycol (PAG) and polyalphaolefin (PAO) base oils and two additives antiwear (AW) and friction modifier (FM) were used. These experiments were performed for different temperatures of pure base oils and their blends with the AW and FM agents. Electrorheological properties of base oils and blends with AW and FM additives were performed using a rotating rheometer, which worked in the plate-plate system. A DC voltage across the upper and lower plates was generated by a current/voltage power pack. In both experiments, it was found that the DC electric field in both interfacial systems caused the braking torque and the complex viscosity modulus to be changed.