

# Specyfika środków smarowych do zespołów napędowych samochodów elektrycznych

## Specificity of lubricants for electric car powertrains

Zbigniew Stępień

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule opisano zasadnicze różnice pomiędzy klasycznymi samochodowymi zespołami napędowymi z tłokowymi silnikami spalinowymi a elektrycznymi zespołami napędowymi. Zwrócono uwagę na odmienne warunki pracy skrzyni biegów napędu elektrycznego w porównaniu z tymi, jakie występują w przypadku skrzyni biegów napędu klasycznego. W znacznej mierze jest to spowodowane różnymi charakterystykami pracy silników spalinowych i elektrycznych porównywanych napędów, co opisano i zilustrowano na rysunkach. Wynikiem tych różnic są specyficzne wymagania, jakie stawiane są środkom smarowym do skrzyń biegów napędów elektrycznych. Dodatkowe wymagania wynikają z możliwości jednoczesnego stosowania tego typu środków smarowych jako płynów chłodzących silniki elektryczne oraz falowniki elektrycznych zespołów sterujących. Wyjaśniono, dlaczego konieczne jest opracowanie nowych środków smarowych, przeznaczonych do elektrycznych zespołów napędowych. Zwrócono uwagę, że do tej pory nie ma jasnych wymagań technicznych dla płynów do pojazdów elektrycznych, jako że konstrukcja napędów elektrycznych wciąż się rozwija. Brak jest też wielu znormalizowanych metod badawczych i określenia zakresu niezbędnych badań przedmiotowych płynów. Podkreślono, że przyszłe środki smarowe do pojazdów elektrycznych powinny poprawiać sprawność mechaniczną i ograniczać straty hydrauliczne przekładni w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i emisji CO<sub>2</sub> pojazdu elektrycznego powstającej podczas produkcji energii elektrycznej. Poprawy sprawności energetycznej silnika elektrycznego można dokonać poprzez optymalizację właściwości cieplnych środka smarowego, tj. przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i natężenia przepływu. W dalszej części artykułu przedyskutowano problemy i wyzwania związane ze smarowaniem elektrycznych zespołów napędowych. Mając na uwadze poprawę efektywności chłodzenia elektrycznych zespołów napędowych, wyjaśniono, dlaczego bardzo istotne jest obniżanie lepkości oleju smarowego. Wskazano też na zagrożenia, jakie to powoduje. Opisano duże znaczenie właściwości elektrycznych (dielektrycznych, elektroizolacyjnych, odporności na przebicie) środka smarowego, które mogą zapobiec uszkodzeniom elektroerozyjnym łożysk i zespołów elektrycznych. Poruszono również problem kompatybilności środków smarowych z różnorodnymi materiałami stosowanymi przy budowie elementów zespołów elektrycznych. Szeroko opisano też i zestawiono wymagania dotyczące wybranych właściwości olejów smarowych do spalinowych i elektrycznych zespołów napędowych. Podobnego porównania dokonano w odniesieniu do dodatków uszlachetniających środki smarowe do obu typów zespołów napędowych. Wskazano szczególnie istotne różnice pomiędzy właściwościami środków smarowych stosowanych do przedmiotowych zespołów napędowych. W ostatniej części artykułu skoncentrowano się na składzie olejów smarowych do skrzyń biegów napędów elektrycznych. Opisano, jakie bazy olejowe są najbardziej właściwe do takich olejów smarowych. Scharakteryzowano ich właściwości na podstawie wyników dotychczas przeprowadzonych badań. Podobnie opisano też bazy olejowe stosowane w przypadku smarów plastycznych przeznaczonych do smarowania łożysk elektrycznych zespołów napędowych. Wyjaśniono rolę i znaczenie dodatków uszlachetniających w zakresie możliwości poprawy niektórych właściwości środków smarowych. W podsumowaniu zaznaczono, że wraz z postępem technologii e-mobilności środki smarowe muszą być odpowiednio dostosowywane w zakresie kompatybilności elektrycznej i materiałowej oraz zarządzania termicznego do eksploatacji w elektrycznych zespołach napędowych.

**Słowa kluczowe:** zespoły napędowe samochodów elektrycznych, warunki pracy zespołów napędowych, problemy związane ze smarowaniem, oleje smarowe, smary plastyczne.

**ABSTRACT:** The article describes the fundamental differences that exist between classic automotive powertrains with reciprocating internal combustion engines and electric powertrains. Attention is drawn to the different operating conditions of electric drive gearboxes compared to those of classic drive gearboxes. This is largely due to the different performance characteristics of the internal combustion engines and electric motors of the compared drives as described and illustrated in the figures. The result of these differences is the specific requirements that are placed on lubricants for the gearboxes of electric drives. Additional requirements arise from the possibility of simultaneously using such lubricants as coolants for electric motors and inverters of electric control units. The necessity to develop new lubricants dedicated to electric powertrains is explained. It is pointed out that to date there are no clear technical requirements for electric vehicle fluids as the design of electric drives is still developing. There is also a lack of many standardised test methods and

Autor do korespondencji: Z. Stępień, e-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 23.11.2022 r. Zatwierdzono do druku: 11.01.2023 r.

definition of the scope of the necessary tests for the fluids in question. It was emphasised that future lubricants for electric vehicles should improve the mechanical efficiency and reduce the hydraulic losses of the transmission in order to reduce the electric vehicle's electricity consumption and CO<sub>2</sub> emissions arising during the production of electricity. Improving the energy efficiency of an electric motor can be done by optimising the thermal properties of the lubricant – i.e., thermal conductivity, thermal capacity and flow rate. The article goes on to discuss the problems and challenges of lubricating electric power units. With a view to improving the cooling efficiency of electric drive trains, it was explained why it is important to reduce the viscosity of the lubricating oil. The dangers this poses were also pointed out. The great importance of the electrical properties (dielectric, electro-insulating, puncture resistance) of the lubricant, which can prevent electrical erosion damage to bearings and electrical assemblies, is described. The compatibility of lubricants with the various materials used in the construction of electrical assembly components was also addressed. Requirements for selected properties of lubricating oils for internal combustion and electric drive trains are also extensively described and collated. A similar comparison was made with regard to lubricant additives for both types of power unit. Particularly important differences between the properties of the lubricants used for the drive units in question are identified. The final section of the article focuses on the composition of lubricating oils for electric drive gearboxes. It describes which oil bases are the most suitable for such lubricating oils. Their properties are characterised on the basis of the results of the studies conducted to date. Similarly, the oil bases used for greases intended to lubricate the bearings of electric drive trains are also described. The role and importance of additives in terms of their ability to improve certain lubricant properties is explained. It concludes by pointing out that as e-mobility technology advances, lubricants need to be adapted accordingly in terms of electrical and material compatibility and thermal management for operation in electric powertrains.

Key words: electric car powertrains, operating conditions of powertrains, lubrication problems, lubricating oils, greases.

## Wstęp

Rosnące wymagania dotyczące ochrony klimatu wymuszają konieczność drastycznej redukcji gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gas*, GHG) w sektorze transportu. Biorąc pod uwagę konieczność dywersyfikacji przyszłych rodzajów zespołów napędowych, wskazuje się kilka opcji technologicznych. Obecnie największe środki finansowe przeznaczają się na rozwój pojazdów elektrycznych zasilanych wyłącznie akumulatorami (ang. *battery electric vehicle*, BEV). W okresie przejściowym przed osiągnięciem pełnej elektryfikacji pojazdów duże znaczenie będą odgrywały zaawansowane paliwa niskoemisyjne, takie jak paliwa syntetyczne i biopaliwa odnawialne (Pałuchowska i Stępień 2017; Stępień i Urzędowska 2021; Stępień et al., 2021, 2022).

W dniu 8 czerwca 2022 r. w Parlamencie Europejskim odbyło się głosowanie w sprawie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) zmieniającego rozporządzenie (UE) 2019/631 w odniesieniu do zaostrożenia norm emisji CO<sub>2</sub> dla nowych samochodów osobowych i lekkich pojazdów użytkowych zgodnie z ambitniejszymi celami klimatycznymi Unii. Parlament Europejski opowiedział się za zmniejszeniem średniej emisji CO<sub>2</sub> o 20% do 2025 r., o 55% do 2030 r. oraz o 100% do 2035 r. w stosunku do 2021 r. Jest to równoznaczne z zakazem rejestracji w Unii Europejskiej samochodów z silnikiem spalinowym od 2035 r.

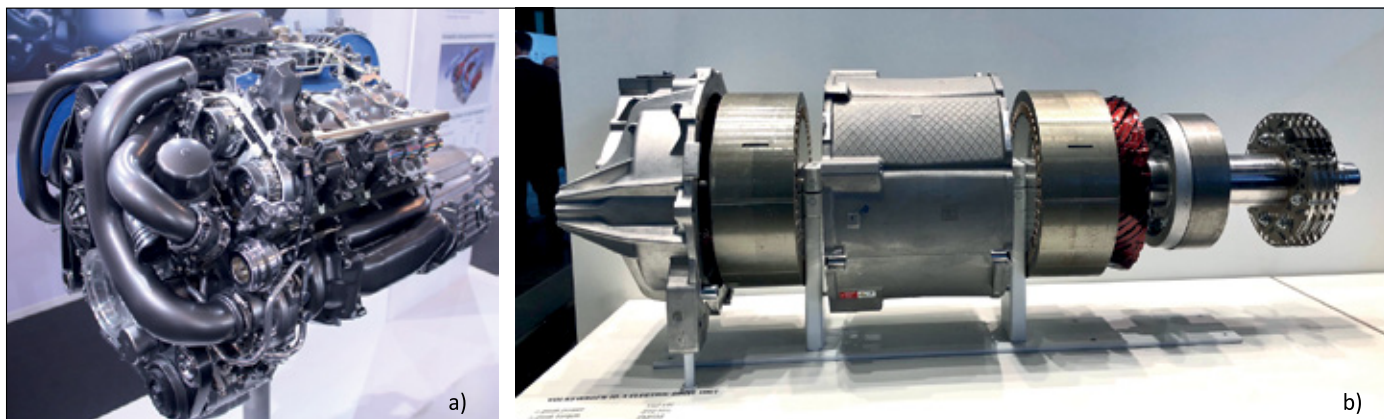
Elektryfikacja stanowi zasadniczą zmianę w budowie i eksploatacji zespołów napędowych pojazdów samochodowych i nieuchronnie wpłynie na zmianę wymagań, rozwój, wybór i udział w rynku wielu rodzajów środków smarowych. Różne środki smarowe, w tym przede wszystkim oleje smarowe i smary plastyczne, będą nadal stosowane do smarowania

zespołów napędowych samochodów elektrycznych, w tym skrzyń biegów, mechanizmów różnicowych, łożysk silników i kół pojazdów, jednak ich właściwości będą musiały ulegać znacznym zmianom.

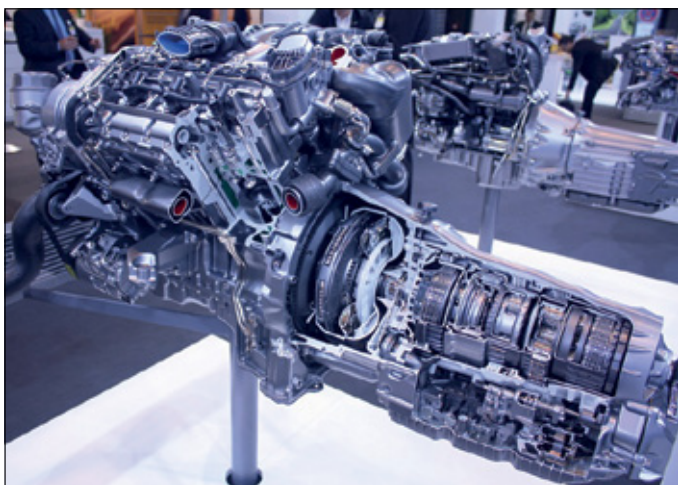
Spalinowe zespoły napędowe są o wiele bardziej złożone od elektrycznych zespołów napędowych. Tłokowy silnik spalinowy V8 wraz z osprzętem i układami współpracującymi składa się przeciętnie z około 1000 do 1200 elementów składowych, podczas gdy silnik elektryczny – z około 15 do 20 elementów (rysunek 1).

Silnik spalinowy współpracuje z mechaniczną lub automatyczną skrzynią biegów, mogącą mieć obecnie od 6 do 10 przełożeń (rysunek 2). W przypadku elektrycznego zespołu napędowego – niezależnie od tego, czy jest stosowany jako samodzielny w samochodzie elektrycznym (BEV), czy też stanowi oddzielny zespół napędowy w samochodzie hybrydowym typu plug-in (ang. *plug-in hybrid electric vehicle*, PHEV) – silnik współpracuje najczęściej ze skrzynią biegów o jednym, rzadziej dwóch przełożeniach (rysunek 3).

Warunki pracy skrzyni biegów napędu elektrycznego znacznie różnią się od tych, jakie występują w skrzyni biegów napędu z silnikiem spalinowym. W znacznej mierze jest to spowodowane charakterystyką pracy silnika elektrycznego (rysunek 4). Silnik spalinowy pracujący na biegu jałowym nie wytwarza użytecznego momentu obrotowego. W miarę wzrostu prędkości obrotowej zarówno moc, jak i moment obrotowy silnika wzrastają stopniowo, a o ich przebiegu decyduje to, czy silnik jest wolnossący, czy doładowany. Zarówno moc maksymalna, jak i maksymalny moment obrotowy rozwijane są w pewnym zakresie prędkości obrotowej, po czym zaczynają się zmniejszać (rysunek 4a). W przypadku silnika elektrycznego – zarówno synchronicznego, jak i asynchronicznego, inaczej indukcyjnego



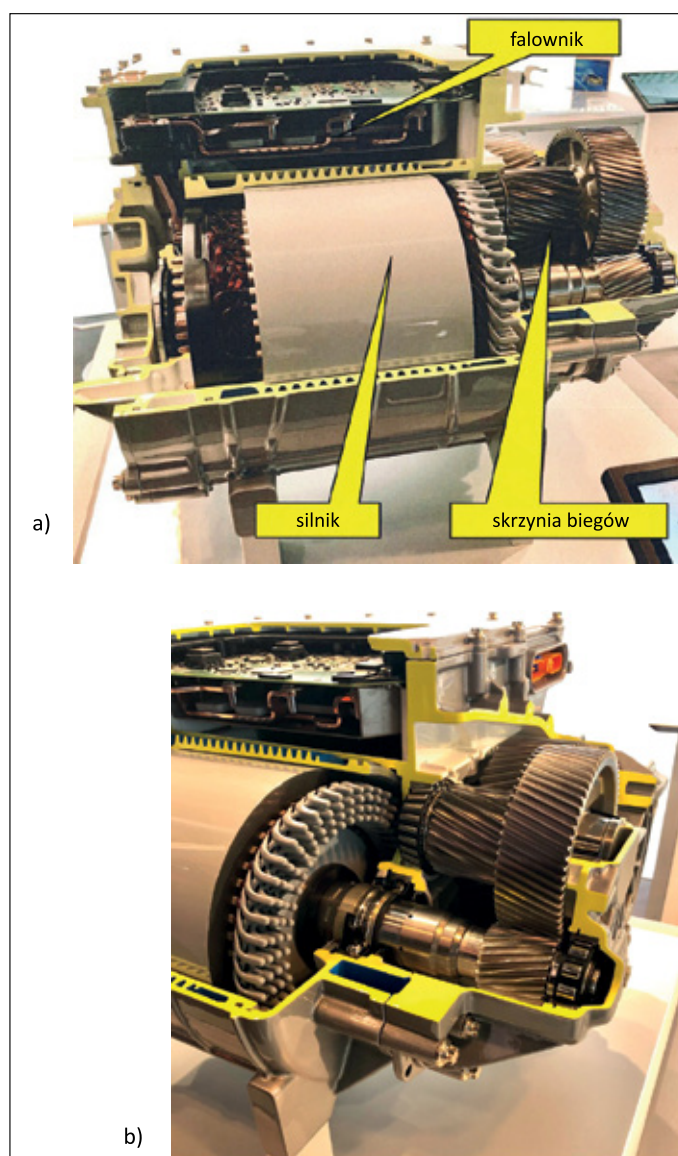
**Rysunek 1.** Widok silników: a) tłokowy silnik spalinowy V8, b) silnik elektryczny (prace własne)  
**Figure 1.** View of the engines; a) V8 internal combustion engine, b) electric motor (own work)



**Rysunek 2.** Spalinowy zespół napędowy z automatyczną skrzynią biegów o 9 przełożeniach (prace własne)  
**Figure 2.** ICE powertrain with 9-speed automatic transmission (own work)

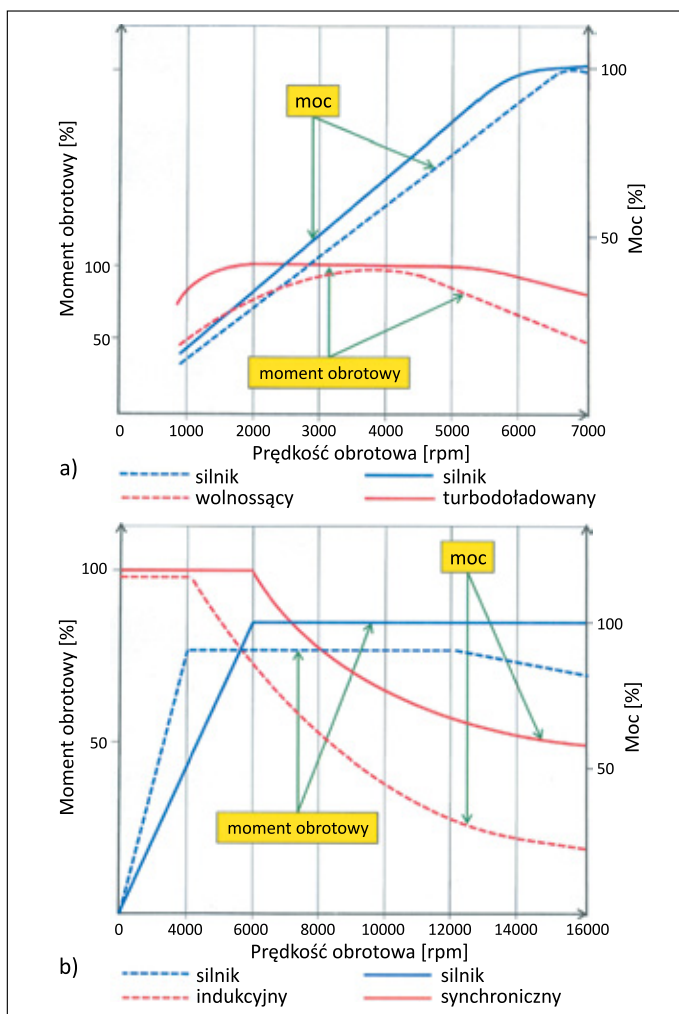
(to obecnie najczęściej stosowane w pojazdach samochodowych typu silników elektrycznych) – maksymalny moment obrotowy jest uzyskiwany już bezpośrednio po uruchomieniu silnika. Jego przebieg, w zakresie pewnej prędkości obrotowej, jest w przybliżeniu stały, po czym zaczyna się gwałtownie zmniejszać. Równocześnie podczas pracy silnika ze stałym momentem obrotowym zwiększa się jego moc, uzyskując maksimum w czasie, gdy moment obrotowy zaczyna się obniżać. Następnie ta maksymalna moc, w przybliżeniu stała w przypadku silnika synchronicznego i lekko zmniejszająca się w przypadku silnika indukcyjnego, rozwijana jest w pewnym, dość szerokim zakresie prędkości obrotowej silnika (rysunek 4b).

Zatem przekładnia zębata skrzyni biegów w przypadku napędu elektrycznego jest narażona na obciążenie bardzo wysokim momentem obrotowym już od początku pracy, gdy zęby kół zębatach nie zostały jeszcze (po postoju) pokryte środkiem smarowym.



**Rysunek 3.** Samochodowy elektryczny zespół napędowy: a) elementy zespołu napędowego, b) skrzynia biegów o jednym przełożeniu (prace własne)

**Figure 3.** Automotive electric power unit; a) power unit components, b) single-speed gearbox (own work)



**Rysunek 4.** Charakterystyki pracy silników: a) spalinowych, b) elektrycznych (prace własne)

**Figure 4.** Engine performance characteristics; a) internal combustion engines, b) electric motors (own work)

Ponadto silniki elektryczne rozwijają dużo wyższe prędkości obrotowe w porównaniu z tłokowymi silnikami spalinowymi (rzędu 12 tys. do >30 tys. obr/min). Sprawia to, że temperatura pracy łożysk wału silnika może osiągać temperaturę rzędu 150°C do 200°C. Wpływa to w istotny sposób na temperaturę pracy smarowego oleju silnikowego i jego skłonność do pienienia. Z uwagi na bliskie sąsiedztwo skrzyni biegów z silnikiem elektrycznym w elektrycznym zespole napędowym (czasem te podzespoły umieszczone są we wspólnej lub łącznej obudowie) na olej smarowy oddziałuje pole elektryczne, magnetyczne i elektromagnetyczne (Chen et al., 2020). Coraz częściej wykorzystuje się też olej smarowy skrzyni biegów jako płyn chłodzący silnik elektryczny i falownik. Chłodzenie silnika elektrycznego przy użyciu oleju smarowego ma miejsce w przypadku chłodzenia typu bezpośredniego, kiedy to olej smarowy jest też używany do smarowania łożysk silnika. Stawia to dodatkowe, istotne wymagania wobec oleju smarowego, który mając bezpośredni kontakt z uzwojeniem silnika oraz

różnymi elementami elektrycznymi, musi być kompatybilny z miedzią i różnymi tworzywami stosowanymi w elektronice. W przypadku pośredniego chłodzenia silnika elektrycznego do smarowania jego łożysk stosuje się smary plastyczne. Ponadto biorąc pod uwagę, że sprawność cieplna silników spalinowych zawiera się w granicach 25–40%, podczas gdy sprawność silnika elektrycznego to około 90%, natomiast sprawność mechaniczna elektrycznego zespołu napędowego wynosi od 59% do 77%, dąży się do jej poprawy także poprzez stosowanie zoptymalizowanego środka smarowego (Holmberg et al., 2012; Holmberg i Erdemir, 2019).

Ogólne wymagania stawiane środkom smarowym do elektrycznych zespołów napędowych można sformułować w sposób następujący:

- poprawa sprawności mechanicznej i ograniczenie strat hydraulicznych w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i emisji CO<sub>2</sub> pojazdu elektrycznego (niska lepkość);
- staranny dobór i równowaga właściwości trybologicznych środków smarowych w dążeniu do optymalizacji smarowania przekładni, łożysk i mechanizmów różnicowych skrzyń biegów, jak również do termicznego zarządzania warunkami pracy silników elektrycznych;
- maksymalne wydłużenie okresu eksploatacji (żywności) smarowanych elementów;
- stabilność termiczna w szerokim zakresie temperatur;
- bardzo dobre i stabilne właściwości dielektryczne;
- kompatybilność z materiałami stosowanymi w zespołach elektrycznych, w tym z tworzywami sztucznymi, zabezpieczenie przed korozją, w tym korozją miedzi, i neutralność względem powłok ochronnych, jakimi powlekanie są przewody elektryczne;
- biodegradowalność.

Należy podkreślić, że do tej pory w pojazdach elektrycznych i zelektryfikowanych stosowane są konwencjonalne płyny i środki smarowe produkowane według istniejących technologii, jak np. płyny (ATF) do automatycznych skrzyń biegów. Obecnie konieczne jest opracowanie nowych produktów smarowych przeznaczonych do elektrycznych zespołów napędowych. Do tej pory nie ma jednak jasnych wymagań technicznych wobec żadnych płynów do pojazdów elektrycznych, ponieważ konstrukcja napędów elektrycznych wciąż się rozwija. Brak jest też wielu znormalizowanych metod badawczych i określenia zakresu niezbędnych badań przedmiotowych płynów.

### Problemy ze smarowaniem elektrycznych zespołów napędowych

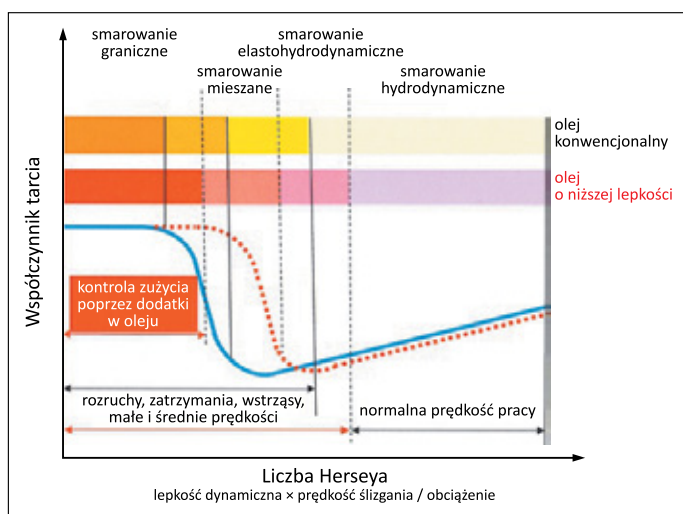
Jednym ze sposobów zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> przez pojazdy elektryczne jest ograniczenie strat energii (oporów pracy)

przeniesienia napędu w skrzyni biegów. Jak się ocenia, straty energii wynikające z oporów ruchu powodowanych lepkością oleju smarowego mogą stanowić nawet 50–70% całkowitych strat energii w skrzyni biegów (Yokomizo et al., 2015; Kwak et al., 2019; Narita i Takekawa, 2019; Iino et al., 2021). W tym przypadku skutecznym rozwiązaniem jest zmniejszenie lepkości oleju smarowego. Ponadto oleje smarowe o niskiej lepkości są bardziej efektywne w odbieraniu i przenoszeniu ciepła. Jest to bardzo istotne, ponieważ coraz więcej producentów elektrycznych zespołów napędowych decyduje się na bezpośrednie chłodzenie silnika elektrycznego, w którym wewnętrzne elementy silnika stykają się bezpośrednio z płynem chłodzącym, jakim jest olej stosowany do smarowania skrzyni biegów (Iino et al., 2021; Tada et al., 2022; Tokozakura et al., 2022). Taki sposób chłodzenia jest znacznie bardziej efektywny w porównaniu z chłodzeniem pośrednim, w którym płyn chłodzący przepływa w płaszczu okalającym silnik. Należy jednak wziąć pod uwagę, że oleje o niskiej lepkości charakteryzują się gorszymi właściwościami elektroizolacyjnymi. W przypadku stosowania oleju jako płynu chłodzącego wymagane są od niego bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne. Obniżenie lepkości oleju ma też inne wady. Prowadzi zazwyczaj do powstania cieńszych warstw oleju smarowego, co nasila procesy mechanicznego zużycia współpracujących ze sobą elementów na skutek pogorszenia warunków smarowania. Powoduje to problemy związane z przyspieszonym zużyciem współpracujących powierzchni i możliwością zatarcia. Dobrze obrazuje to krzywa Stribeck (rysunek 5).

Cienki film olejowy zwiększa możliwość kontaktu współpracujących powierzchni, co oznacza rozszerzenie reżimu smarowania granicznego oraz mieszanego (rysunek 5). W rezultacie na współpracujących częściach metalowych częściej występują naprężenia, powodujące ich przyspieszone zużycie

i uszkodzenia (Tada et al., 2022). W takim przypadku na elementach metalowych częściej występują naprężenia ścinające części metalowych, powodując zmęczenie metalu i wżery (Yamamori et al., 2003; Masuda et al., 2018; Beyer et al., 2019). W warunkach smarowania granicznego konieczne jest zastosowanie dodatków przeciwzatarciowych lub przeciwzużyciowych wchodzących w reakcję z powierzchniami metalowymi i tworzącymi warstwę ochronną w warunkach styku pod wysokim obciążeniem. Dla przykładu, w firmie Toyota opracowano formułację oleju smarowego przeznaczonego do skrzyń biegów napędów elektrycznych. Zastosowano w nim dodatek polimeru tworzącego ochronny film na metalowych powierzchniach współpracujących. Ponadto w celu zmniejszenia chropowatości powierzchni i naprężeń ścinających wykorzystano detergent wapniowy o zmienionej strukturze chemicznej względem detergentu stosowanego w płynach ATF. Zmiana struktury chemicznej detergentu Ca spowodowała jego większą skłonność do adsorbowania się i reagowania z powierzchniami metalowymi, co doprowadziło do uzyskania większej gładkości współpracujących powierzchni. Do poprawy właściwości przeciwzużyciowych zastosowano nowo opracowane dodatki zawierające siarkę i fosfor. Ze względu na to, że klasyczne dodatki przeciwpienne rozpuszczają się w olejach o niskiej lepkości w wysokiej temperaturze ( $>100^{\circ}\text{C}$ ), opracowano nowy dodatek tego typu przeznaczony do napędów elektrycznych. Równocześnie konieczność poprawy parametrów elektroizolacyjnych spowodowała znaczne zmniejszenie dawki dodatków, które są dodawane do płynów ATF w celu kontroli tarcia w mokrych sprzęgłach (Tada et al., 2022; Tokozakura et al., 2022).

W przypadku równoległego stosowania oleju jako środka do smarowania skrzyń biegów napędów elektrycznych i płynu do chłodzenia silników elektrycznych z chłodzeniem bezpośrednim ma on kontakt z zespołami elektrycznymi. W takiej sytuacji bardzo ważne są właściwości elektryczne oleju smarowego, takie jak: przewodność elektryczna, stała dielektryczna i wytrzymałość dielektryczna (Narita i Takekawa, 2019). Olej smarowy w kontakcie z miedzianymi uzwojeniami silnika elektrycznego musi też przeciwdziałać korozji miedzi (Beyer et al., 2019). Duża ilość ciepła wytwarzanego w uzwojeniach silnika wymaga odprowadzenia przez olej smarowy przy zachowaniu jego stabilności termicznej (nawet do temperatury sięgającej  $180^{\circ}\text{C}$ ). Silnik elektryczny, jak i elementy oraz podzespoły elektryczne, w tym falownik elektryczny, muszą pracować w określonym zakresie temperatur roboczych, w których są najbardziej wydajne i trwałe. Falownik elektryczny służy do zamiany prądu stałego na prąd przemienny, o regulowanej częstotliwości napięcia wyjściowego w urządzeniach elektrycznych. Wymaga to stosowania do budowy podzespołów napędów elektrycznych nowych stopów i polimerów. Może to



Rysunek 5. Krzywa Stribeck (prace własne)

Figure 5. The standard Stribeck curve (own work)

powodować problemy z kompatybilnością oleju smarowego z tymi materiałami.

Wysoka prędkość obrotowa silników elektrycznych stawia nowe wymagania wobec materiałów i elementów konstrukcyjnych, w tym łożysk. Ponadto występowanie zmiennego strumienia magnetycznego i zastosowanie do zasilania silnika elektrycznego falownika z regulacją częstotliwości prądu prowadzi do wytworzenia się potencjału elektrycznego pomiędzy wałem wirnika a stojanem silnika podczas pracy. Jest to wynikiem powstawania prądów łożyskowych. Ponieważ wał jest izolowany elektrycznie przez smar znajdujący się w łożysku i uszczelnieniu, rozładowanie tego potencjału prowadzi do przeskoków napięcia (wyładowań elektrycznych) i może powodować zjawisko znane jako erozja elektryczna. Zatem bardzo ważne są właściwości dielektryczne oleju smarowego, a te gwałtownie maleją pod wpływem zawartej w oleju wody lub nadmiernej ilości niektórych standardowych dodatków uszlachetniających (Wang i Wang, 2008; Gunderson et al., 2011). Ponadto prąd wyładowania elektrycznego może rozłożyć i utlenić środek smarowy w łożyskach, dodatkowo obniżając jego wytrzymałość dielektryczną (Romanenko et al., 2015). Skutkiem erozji elektrycznej jest powstawanie falistości na powierzchni roboczej (bieżni) łożyska. Wywołuje to mechaniczne oscylacje i drgania, które powodują hałaśliwą pracę i skracają żywotność łożyska. Szacuje się, że obecnie uszkodzenia łożysk odpowiadają za około 40% awarii silników w BEV/PHEV (Gunderson et al., 2011; Narita i Takekawa, 2019; Chen et al., 2020). Zmienne w wyniku zmian pola elektromagnetycznego środowisko pracy wymaga specjalnych środków smarowych, aby uniknąć przedczesnych awarii spowodowanych niewłaściwym smarowaniem. Niektóre dotychczas zbadane mechanizmy degradacji smarów plastycznych to tworzenie mikropęcherzyków na skutek miejscowego przegrzania smaru i chemiczne utlenianie bazy olejowej oraz zagęszczaczy prowadzące do tworzenia związków karboksylowych (Yu i Yang, 2011). Z kolei smarność jest tracona na skutek tworzenia się wysoce lepkich i kwaśnych produktów degradacji oraz aglomeracji dodatków (Romanenko et al., 2016). Zrozumienie wpływu pola elektrycznego i magnetycznego na układy smarowania i środki smarowe stosowane w napędach elektrycznych ma ogromne znaczenie naukowe i przemysłowe. Badania powinny skupić się na rozwiązaniu problemów w zakresie minimalizacji pola elektrycznego i uziemienia, zmniejszenia awarii elektrycznych oraz zwiększenia skuteczności izolacji łożysk (He et al., 2020). Optymalny dobór i kontrola przewodności elektrycznej smaru są niezbędne. Wysoka przewodność elektryczna może bowiem prowadzić do upływów prądu, podczas gdy niska przewodność może powodować gromadzenie się ładunków statycznych i powstawanie łuków elektrycznych, które degradują smar (Gahagan, 2017; Whitby, 2018).

W budowie elektrycznych zespołów napędowych stosuje się wiele różnych materiałów, które nie występują w konwencjonalnych napędach spalinowych. Niekompatybilność środka smarowego z powłokami izolacyjnymi pokrywającymi przewody elektryczne lub dopuszczanie do występowania korozji miedzi może prowadzić do upływów prądu elektrycznego lub do zwarcia. Dlatego kompatybilność środków smarowych z przewodami i połączeniami miedzianymi, elastomerami, polimerami i innymi tworzywami stosowanymi w układach elektrycznych jest postrzegana przez wielu producentów napędów elektrycznych jako jeden z najważniejszych parametrów środków smarowych (Chen et al., 2020).

### Właściwości olejów smarowych do elektrycznych zespołów napędowych

Olej smarowy stosowany w skrzyniach biegów elektrycznych zespołów napędowych funkcjonuje w odmiennym środowisku i w innych warunkach smarowania w porównaniu z olejem (płynem) smarowym używanym w klasycznych skrzyniach biegów.

Właściwości termiczne i elektryczne środka smarowego, przeciwdziałanie korozji miedzi oraz kompatybilność z elastomerami/polimerami w elektrycznych zespołach napędowych stanowią o przydatności środka smarowego do takiego zastosowania (Van Rensselar, 2019). Właściwe smarowanie przy prędkościach często przekraczających 30 000 obr/min jest bardzo ważne dla ograniczenia tarcia i zużycia elementów współpracujących ciernie oraz ochrony przed zużyciem uszczelki, łożysk i przekładni. Zastosowanie zaawansowanych materiałów w bateriach i silnikach elektrycznych powoduje konieczność opracowania nowych środków smarowych, które muszą być kompatybilne z tymi materiałami. Wynika to z tego, że środki smarowe mogą mieć bezpośredni kontakt z elementami elektroniki, obwodami elektrycznymi i akumulatorami. Niekompatybilność środków smarowych z wybuchowymi elektrolitami akumulatorów i częściami silników elektrycznych mogłaby być niebezpieczna i szkodliwa. Stosowanie olejów smarowych o niskiej lepkości jest wymuszone przez dążenie do osiągnięcia lepszego odbierania ciepła od szybko nagrzewających się zespołów elektrycznych zespołów napędowych (Narita i Takekawa, 2019). Sprawia to, że właściwości fizykochemiczne oraz użytkowo-eksploatacyjne takich środków smarowych różnią od właściwości olejów smarowych skrzyń biegów współpracujących z silnikami spalinowymi. Różnice te zestawiono w tabeli 1 (Chen et al., 2020; Tada et al., 2022; Tokozakura et al., 2022).

Podobnie jak w przypadku olejów smarowych do skrzyń biegów napędów elektrycznych – odmienne wymagania

**Tabela 1.** Porównanie wymagań dotyczących wybranych właściwości olejów smarowych do spalinowych i elektrycznych zespołów napędowych (Chen et al., 2020)

**Table 1.** Comparison of requirements for selected properties of lubricating oils for ICE and electric powertrain (Chen et al., 2020)

Właściwość oleju smarowego	Spalinowe zespoły napędowe	Elektryczne zespoły napędowe
Liczba kwasowa	W zakresie określonym w przedmiotowych normach	Ekstremalnie niska dla uniknięcia korozji elementów silników elektrycznych (miedź) i elementów z polimerów
Pienienie	Olej powinien mieć właściwości przeciwpienne	Bardzo dobre właściwości przeciwpienne oleju, zwłaszcza w zakresie wysokich i bardzo wysokich prędkości obrotowych
Odporność na korozję	Olej nie powinien powodować korozji elementów metalowych	Olej o wysokiej kompatybilności z polimerami i innymi metalami konstrukcyjnymi równocześnie zapobiegający ich korozji
Podatność na degradację	Odporność na termiczną degradację	Odporność na termiczną i elektryczną degradację
Lepkość	Preferowane oleje o średniej lepkości	Wyłącznie oleje o bardzo małej lepkości dla poprawy właściwości chłodzących
Właściwości dielektryczne	Małe lub średnie	Bardzo dobre
Przewodność elektryczna	Dobre właściwości izolacyjne	Olej powinien usuwać ładunki statyczne, ale nie może być wysoce przewodzący, aby nie powodować zwarć
Temperatura zapłonu	Wysoka temperatura zapłonu	Dużo wyższa temperatura zapłonu w porównaniu z wymaganiami dla olejów smarujących do napędów spalinowych
Transfer ciepła	Średni lub wysoki współczynnik przenikania ciepła oleju	Wysoki współczynnik przenikania ciepła i bardzo dobre właściwości chłodzące oleju
Stabilność temperaturowa	Olej stabilny w zakresie temperatur roboczych silnika	Olej stabilny w szerokim zakresie temperatur, odporny na nagłe i wielokrotne szoki termiczne oraz gwałtowne zmiany gradientów temperatury

stawiane są też dodatkom uszlachetniającym te oleje w porównaniu z dodatkami stosowanymi do olejów (płynu ATF w przypadku automatycznych skrzyń biegów) do smarowania skrzyń biegów samochodów spalinowych. Różnice najważniejszych wymagań przedstawiono w tabeli 2 (Chen et al., 2020; Tada et al., 2022; Tokozakura et al., 2022).

Chłodzenie silników elektrycznych, w których następuje konwersja energii elektrycznej na mechaniczną, jest uznawane za najważniejszą funkcję olejów smarowych pełniących równocześnie funkcję płynów chłodzących napędów elektrycznych. Zdolność płynu do odprowadzania ciepła zależy od

jego lepkości, przewodności cieplnej, gęstości i pojemności cieplnej. W szczególności liczba Mouromtseffa, powszechnie stosowana w badaniach wymiany ciepła, określa zdolność do wymiany ciepła płynu. Liczbę Mouromtseffa oblicza się z następującej zależności (Simons, 2006):

$$M = (\rho^a \cdot \lambda^b \cdot C_p^c) / V^d \quad (1)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\lambda$  – przewodność cieplna [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ],

$C_p$  – pojemność cieplna [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ],

$V^d$  – lepkość dynamiczna [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ].

**Tabela 2.** Porównanie wybranych wymagań stawianych dodatkom do olejów smarowych napędów spalinowych i elektrycznych (Chen et al., 2020)

**Table 2.** Comparison of selected additive requirements for lubricating oils for ICE and electric powertrain (Chen et al., 2020)

Rodzaj dodatku	Spalinowe zespoły napędowe	Elektryczne zespoły napędowe
Przeciwzużyciowe	Wysokie wymagania	Bardzo wysokie wymagania. Ograniczenie zużycia przy bardzo dużych, gwałtownych obciążeniach
Inhibitory korozji	Ograniczenie korozji metali	Maksymalne ograniczenie korozji Cu i innych materiałów podatnych na korozję
Detergenty	Zapobieganie tworzeniu kwasów i szlamów	Zrównoważone, detergentowo-dyspergujące do utrzymania niskiego przepływu prądu
Dyspergatory	Do rozpraszania osadów nierozpuszczalnych	Dyspergatory o niskiej masie cząsteczkowej do utrzymania niskiej lepkości oleju
Przeciwutleniające	Do ograniczania utleniania	Do opóźniania rozkładu oksydacyjnego
Modyfikatory lepkości	Do utrzymywania niskiej lepkości	Do utrzymania stabilności oleju w wysokich temperaturach

Lepkość jako wielkość fizyczna może przyjmować zmienne wartości, co stanowi o zróżnicowaniu współczynników przenikania ciepła. Pozostałe czynniki, takie jak gęstość, przewodność cieplna i pojemność cieplna, są znacznie bardziej ograniczone w swoich zakresach wartości. Zgodnie z liczbą Mouromtseffa lepkość wydaje się najbardziej znaczącym czynnikiem maksymalizującym wymianę ciepła. Jednak w konkretnym przypadku płynów do przekładni napędów elektrycznych lepkość będzie musiała być dostosowana tak, aby spełnić wymagania dotyczące smarowania określonego rozwiązania technicznego. Przewodność cieplna okaże się wtedy parametrem pierwszego rzędu, ponieważ lepkość będzie miała ograniczony zakres możliwych wielkości (Simons, 2006).

### Skład olejów smarowych do skrzyń biegów napędów elektrycznych

Głównym składnikiem każdego środka smarowego jest olej bazowy. Dodatki uszlachetniające spełniają w każdym środku smarowym trzy role: wzmacniają pożądane właściwości oleju bazowego, zmniejszają właściwości niepożądane oraz dodają nowe właściwości do środka smarowego, co poprawia jego jakość użytkową (Sniderman, 2017). Uważa się, że oleje bazowe i ich lepkości są ważnymi czynnikami dla wydajności chłodzenia, natomiast dodatki uszlachetniające odgrywają kluczową rolę w optymalizacji właściwości elektrycznych. Jednakże dodatki mogą mieć też wpływ na wydajność chłodzenia (Kwak et al., 2019). Stwierdzono, że oleje bazowe o wyższej przewodności cieplnej, pojemności cieplnej właściwej i gęstości zapewniają lepsze chłodzenie. Wydajność chłodzenia zależy również od struktury molekularnej oleju bazowego. Dłuższe łańcuchy cząsteczek zapewniają lepsze chłodzenie (Kwak et al., 2019). Z kolei przewodność elektryczna środka smarowego może być modyfikowana poprzez dodanie odpowiednich dodatków do bazy olejowej. Typowe dodatki, które wpływają na zwiększenie przewodności środka smarowego, to: ZDDP (*zinc dialkyldithiophosphate*), MoDTC (*molybdenum dithiocarbamate*) – ditiokarbaminiany molibdenu, *Mg alkylsulfonate* – Mg sulfonian alkilu i *PIB Succinimide* – poliizobutylenowy imid kwasu bursztynowego (Gao i Salvi, 2018). Dodatki, które wpływają na zmniejszenie przewodności środka smarowego, to: fosfolipidy, salicylan wapnia, wapniowy sulfonian alkilu, ciecze jonowe i kwas stearynowy (Flores-Torres i Holt, 2018; Gao i Salvi, 2018). Niektóre substancje o polarnych cząsteczkach, takie jak fosfolipidy i salicylany wapnia, mogą zmniejszać przewodność środka smarowego. Z kolei ciecze jonowe jako dodatek smarowy mogą skutecznie zwiększyć odporność na zużycie i obniżyć przewodność środka smarowego (Flores-Torres i Holt, 2018).

Do poprawy sprawności mechanicznej i ograniczenia strat hydraulicznych w skrzyni biegów napędów elektrycznych, jak również do termicznego zarządzania warunkami pracy silników elektrycznych i innych zespołów elektrycznych niezbędne są zoptymalizowane właściwości trybologiczne olejów smarowych.

Oleje bazowe o niskiej lepkości wykazują najlepsze właściwości do osiągnięcia tych celów. Ponadto mają większą wydajność w zakresie wymiany ciepła (lepsze właściwości chłodzące). Oleje estrowe są zalecane ze względu na stabilność oksydacyjną, właściwości elektryczne, przewodność cieplną i biodegradowalność.

Porównanie oleju estrowego z olejami bazowymi grupy III i PAO wykazało wyższe napięcie przebicia olejów estrowych, czyli lepsze właściwości dielektryczne. Jednak niektóre z przeprowadzonych badań nie potwierdziły dostatecznie dobrych właściwości wysokotemperaturowych i biodegradowalności aromatów, a także wykazały, że estry krzemianowe nie są stabilne hydraulicznie. Z kolei badania przeprowadzone przez ExxonMobil Chemical wykazały, że nowo opracowane oleje bazowe PAO charakteryzują się niską lepkością, niską lotnością i doskonałymi właściwościami trybologicznymi, a zatem spełniają wymagania stawiane olejom smarowym do skrzyń biegów napędów elektrycznych. W projektowaniu olejów smarowych zastosowanie cząsteczek organicznych o dłuższym łańcuchu i mniejszym rozgałęzieniu poprawi wymianę ciepła – z powodu zwiększenia częstotliwości zderzeń międzycząsteczkowych (Narita i Takekawa, 2019). Równocześnie stwierdzono, że nawet niewielkie ilości fosforu lub siarki mogą być bardzo szkodliwe. W związku z tym dodatki przeciwzużyciowe i przeciwutleniające takie jak dialkyloditiofosforany nie mogą być stosowane w przyszłych formułacjach olejów smarowych stosowanych w napędach elektrycznych (Korcek et al., 2000).

W przypadku smarów plastycznych najczęściej stosowanymi olejami bazowymi są polialfaolefiny (PAO) i glikole polialkilenowe (PAG) oraz poliestry (POE). Oleje PAO i PAG o niskiej lepkości są łatwo biodegradowalne, co stanowi zaletę opracowanych smarów. Ponadto odnawialne oleje bazowe klasy premium, takie jak dostosowane do potrzeb estry oleochemiczne, również znajdują zastosowanie w formułacjach smarów do elektrycznych zespołów napędowych. Smar plastyczny na bazie PAO i POE wykazuje wysoką stabilność termiczną i dobre właściwości elektryczne, natomiast formułacja smaru na bazie PAG cechuje się dobrą stabilnością – z wyjątkiem utleniania – i zapewnia najcichszą pracę łożysk (Kwak et al., 2019).

Do smarowania łożysk silników elektrycznych zespołów napędowych preferowane są obecnie smary polimocznikowe. Ich zalety to: wysoka stabilność oksydacyjna, odporność na ścinanie, niski poziom hałasu smarowanych łożysk, odporność na wodę, dobre działanie w niskich temperaturach. Wady to:



złożona technologia produkcji, ograniczona liczba dodatków kompatybilnych z zagęszczaczami.

### Podsumowanie i wnioski

Wraz z postępowaniem technologii e-mobilności środki smarowe muszą być odpowiednio dostosowywane w zakresie kompatybilności elektrycznej i materiałowej oraz zarządzania termicznego do stosowania w elektrycznych zespołach napędowych. Warunki pracy zespołów napędowych samochodów elektrycznych są inne od tych, jakie są typowe dla napędów spalinowych. W konsekwencji na olej smarowy oddziałują wyższe temperatury, co sprawia, że podlega on szybszemu utlenieniu i szybciej zwiększa się w nim ilość pierwiastków (produktów) zużyciowych. Wynika to z tego, że w przypadku przekładni napędowych elektrycznych maksymalny moment obrotowy występuje już bezpośrednio po rozruchu, co może spowodować problemy ze zużyciem współpracujących elementów. Większość z komponentów elektrycznych jest wykonana z miedzi ze względu na jej wysoką przewodność elektryczną. Dlatego bardzo ważne jest, aby środek smarowy miał doskonałą kompatybilność z miedzią. Ponadto istnieje zakres temperatur pracy silnika elektrycznego i innych elementów elektronicznych, w których są one najbardziej wydajne i trwałe. Zadaniem środków smarowych jest zapewnienie pierwszorzędowego odprowadzania ciepła w temperaturach sięgających nawet 180°C.

Przedstawione w artykule zagadnienia pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- olej smarowy może pełnić rolę płynu chłodzącego silnik elektryczny i falownik;
- przysze środki smarowe do pojazdów elektrycznych powinny poprawiać sprawność mechaniczną i ograniczać straty hydrauliczne przekładni w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i emisji CO<sub>2</sub> pojazdu elektrycznego;
- poprawy sprawności energetycznej silnika elektrycznego można dokonać poprzez optymalizację właściwości cieplnych środka smarnego, tj. przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i natężenia przepływu;
- obniżanie lepkości olejów smarowych przeznaczonych do zespołów napędowych samochodów elektrycznych prowadzi do powstania cienkich filmów olejowych i pogarsza warunki smarowania, ograniczając ochronę przeciwwzmętnieniową, przeciwwzatarciową i przeciwzużyciową;
- zoptymalizowane właściwości elektryczne (dielektryczne, elektroizolacyjne, odporność na przebicie) środka smarowego mogą zapobiec uszkodzeniom elektroerozyjnym łożysk;
- przysze środki smarowe do pojazdów elektrycznych muszą zapewniać doskonałą kompatybilność z komponentami

elektrycznymi i wyższą ochronę przeciwwzyciową przekładni w porównaniu ze środkami obecnie stosowanymi w klasycznych samochodowych skrzyniach biegów;

- istnieje potrzeba opracowania środków smarowych przeznaczonych do samochodowych elektrycznych zespołów napędowych;
- prognozuje się wykorzystanie odnawialnych baz olejowych, biobaz, cieczy jonowych i nanotechnologii do produkcji przyszłych środków smarowych;
- pełna ocena właściwości użytkowych i efektywności działania środków smarowych przeznaczonych do samochodowych elektrycznych zespołów napędowych wymaga opracowania lub dostosowania istniejących metod badań tych właściwości;
- niezbędne jest opracowanie nowej klasy olejów smarowych do układów napędowych samochodów elektrycznych.

### Literatura

- Beyer M., Brown G., Gahagan M., Higuchi T., Hunt G., Huston M., Jayne D., McFadden Ch., Newcomb T., Patterson S., Prengaman Ch., Shamszad M., 2019. Lubricant Concepts for Electrified Vehicle Transmissions and Axles. *Tribology Online*, 14(5): 428–437. DOI: 10.2474/trol.14.428.
- Chen Y., Swarn J., Raut A., Zhang W., Liang H., 2020. Performance Characteristics of Lubricants in Electric and Hybrid Vehicles: A Review of Current and Future Needs. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 571464. DOI: 10.3389/fmech.2020.571464.
- Flores-Torres S., Holt D.G.L., 2018. Method for Controlling Electrical Conductivity of Lubricating Oils in Electric Vehicle Powertrains. U.S. Patent 0,100,118A1. Annandale, NJ: ExxonMobil Research and Engineering Co.
- Gahagan M.P., 2017. Lubricant Technology for Hybrid Electric Automatic Transmissions. 2017. *SAE Technical Paper*, 2017-01-2358. DOI: 10.4271/2017-01-2358.
- Gao Z., Salvi L., 2018. High Conductivity Lubricating Oils for Electric and Hybrid Vehicles. U.S. Patent No. 0,100,115A1. ExxonMobil Research and Engineering Co.
- Gunderson S., Fultz G., Snyder C., Wright J., Gschwender L., Heidger S., 2011. The effect of water content on the dielectric strength of polyalphaolefin (PAO) coolants. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18: 295–302. DOI: 10.1109/TDEI.2011.5704521.
- He F., Xie G., Luo J., 2020. Electrical bearing failures in electric vehicles. *Friction*, 8: 4–28. DOI: 10.1007/s40544-019-0356-5.
- Holmberg K., Andersson P., Erdemir A., 2012. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, 47: 221–234. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.11.022.
- Holmberg K., Erdemir A., 2019. The impact of tribology on energy use and CO<sub>2</sub> emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology International*, 135: 389–396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.
- Iino M., Tada A., Masuda K., Matsuki S., Onumata Y., 2021. Drivetrain Lubricants with High Cooling and Efficiency-Boosting Properties for Electric Vehicles. *SAE Technical Paper*, 2021-01-1215. DOI: 10.4271/2021-01-1215.
- Korek S., Sorab J., Johnson M.D., Jensen R.K., 2000. Automotive lubricants for the next millennium. *Industrial Lubrication and Tribology*, 52(5): 209–220. DOI: 10.1108/00368790010373175.

- Kwak Y., Cleveland C., Adhvaryu A., Fang X., Hurley S., Adachi T., 2019. Understanding Base Oils and Lubricants for Electric Drivetrain Applications. *SAE Technical Paper*, 2019-01-2337. DOI: 10.4271/2019-01-2337.
- Masuda K., Nakao H., Komatsubara H., Kurosawa O., Yamada K., Ishikawa K., Mori A., 2018. Super Low Viscosity ATF; AW-2. *SAE Technical Paper*, 2018-01-17565. DOI: 10.4271/2018-01-1756.
- Narita K., Takekawa D., 2019. Lubricants Technology Applied to Transmissions in Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles. *SAE Technical Paper*, 2019-01-2338. DOI: 10.4271/2019-01-2338.
- Pałuchowska M., Stępień Z., 2017. Oceny paliw etanolowych w testach silnikowych i eksploatacyjnych. *Nafta-Gaz*, 73(2): 97–104. DOI: 10.18668/NG.2017.02.04.
- Romanenko A., Muetze A., Ahola J., 2016. Effects of electrostatic discharges on bearing grease dielectric strength and composition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6): 4835–4842. DOI: 10.1109/TIA.2016.2596239.
- Romanenko A., Mütze A., Ahola J., 2015. Effects of electrostatic discharges on bearing grease electric properties. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference, United States*: 254–259. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409068.
- Simons R., 2006. Comparing Heat Transfer Rates of Liquid Coolants Using the Mouriomtseff Number. *Electronics Cooling Magazine*. <[https://www.electronics-cooling.com/author/robert\\_e\\_simons/page/3/](https://www.electronics-cooling.com/author/robert_e_simons/page/3/)> (dostęp: 19.11.2022).
- Sniderman D., 2017. The chemistry and function of lubricant additives. 2017. *Tribol. Lubric. Technol.*, 73(11): 18–29.
- Stępień Z., Pielecha I., Cieslik W., Szwajca F., 2022. The impact of alcohol admixture with gasoline on carbon buildup and fuel injectors performance. *Maintenance and Reliability*, 24(2): 226–236. DOI: 10.17531/ein.2022.2.4.
- Stępień Z., Urzędowska W., 2021. Tłokowe silniki spalinowe zasilane wodorem – wyzwania. *Nafta-Gaz*, 77(12): 830–840. DOI: 10.18668/NG.2021.12.06.
- Stępień Z., Żak G., Markowski J., Wojtasik M., 2021. Investigation into the impact of the composition of ethanol fuel deposit control additives on their effectiveness. *Energies*, 14(3), 604. DOI: 10.3390/en14030604.
- Tada A., Aizawa K., Suskida Y., Tokozakura D., Nakamura T., Sano T., Shinyoshi T., 2022. Development of Transaxle Fluid for Electrification Vehicles: Design of Novel Additive Formulation. *SAE Technical Paper*, 2022-01-1102. DOI: 10.4271/2022-01-1102.
- Tokozakura D., Sano T., Nakamura T., Tada A., Susukida Y., Moritani H., Shinyoshi T., 2022. Development of Transaxle Fluid for Electrified Vehicles: Validating Optimized Viscosity through Targeted Hardware Testing. *SAE Technical Paper*, 2022-01-1103. DOI: 10.4271/2022-01-1103.
- Van Rensselar J., 2019. The tribology of electric vehicles. *Tribology & Lubrication Technology*, 75(1): 34–43.
- Wang X., Wang Z., 2008. Particle effect on breakdown voltage of mineral and ester based transformer oils. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Quebec, Canada*. DOI: 10.1109/CEIDP.2008.4772859.
- Whitby R.D., 2018. Oils for hybrid electric vehicles. *Tribology & Lubrication Technology*, 74(9): 88.
- Yamamori K., Saitou K., Kobiki Y., Ogawa A., 2003. Development of New Automatic Transmission Fluid for Fuel Economy. *SAE Technical Paper*, 2003-01-3258. DOI: 10.4271/2003-01-3258.
- Yokomizo M., Iwai T., Narta K., Kudo M., 2015. Lubricants Formulation Technology for Fuel Saving Performance in Automatic Transmissions. *SAE Technical Paper*, 2015-01-2037. DOI: 10.4271/2015-01-2037.
- Yu Z.-Q., Yang Z.-G., 2011. Fatigue failure analysis of a grease-lubricated roller bearing from an electric motor. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 11: 158–166. DOI: 10.1007/s11668-010-9422-z.



Dr hab. inż. Zbigniew STĘPIEŃ, prof. INIG – PIB  
Kierownik Zakładu Oceny Właściwości  
Eksploatacyjnych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)