

## **dr inż. Leszek Gomółka**

JAWO TECH S.R.O. Sp. z o.o. Oddział w Polsce  
Niepodległości 67, 44-370 Pszów  
E-mail: [leszek.gomolkaa@gmail.com](mailto:leszek.gomolkaa@gmail.com)

## **dr hab. inż. prof. PO Andrzej Augustynowicz**

Wydział Mechaniczny  
Politechnika Opolska  
Mikołajczyka 5, 45-271 Opole  
E-mail: [a.augustynowicz@po.opole.pl](mailto:a.augustynowicz@po.opole.pl)

# **Ocena przydatności stałej dielektrycznej do monitorowania procesu starzenia oleju silnikowego**

**Słowa kluczowe:** eksploatacyjne zużycie oleju, diagnostyka oleju silnikowego, stała dielektryczna

**Streszczenie:** Celem pracy było określenie związków pomiędzy wytypowanymi właściwościami fizykochemicznymi oleju silnikowego a zmianą jego stałej dielektrycznej, rozważanej jako parametr oceniający stan jego zestarzenia. W celu szczegółowego poznania wybranych zjawisk towarzyszących starzeniu się oleju zdecydowano się na przebadanie oleju w różnych stadiach jego użytkowania. Poza badaniem stałej dielektrycznej wykonano również badania całkowitej liczby zasadowej TBN oraz badania spektrometryczne w podczerwieni IR. Stopień współzależności badanych wielkości przedstawiono wykorzystując do tego współczynnik korelacji liniowej Pearsona. W efekcie oceniono zmienność całkowitej liczby zasadowej oraz absorpcji IR w kontekście zmiany stałej dielektrycznej. Po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, stwierdzono, że uzyskane wyniki wskazują na zadawalającą korelację pomiędzy wytypowanymi własnościami fizykochemicznymi oleju, co pozwoliło z dużą dozą pewności przyjąć, iż stała dielektryczna może być użyta w charakterze parametru diagnostycznego do monitorowania stanu oleju silnikowego.

## **1. Wprowadzenie**

W dobie wciąż intensywnie rozwijającej się techniki, stosowaną jednostką napędową pojazdów, maszyn i urządzeń jest nadal spalinowy silnik tłokowy. Należy sądzić, że pomimo wad, jeszcze przez kilka lat będzie w tej roli dominował [9,12]. Jednym z najważniejszych układów silnika jest system smarowania, którego integralnym czynnikiem jest olej smarujący. W celu prawidłowej weryfikacji własności użytkowych oleju w czasie eksploatacji, rodzi się potrzeba łatwego i precyzyjnego diagnozowania jego jakości. Fakt ten, zmusza nas do wytypowania najbardziej reprezentatywnego parametru, za pomocą którego możliwe jest monitorowanie zachodzących w nim zmian podczas użytkowania. Nowoczesne oleje składają się z różnych komponentów i dodatków co pozwala osiągać i spełniać szereg surowych wymagań eksploatacyjnych. Znaczące jest więc przyjęcie i dobór takich metod badawczych oraz wielkości, które spełniają wymagania parametru diagnostycznego, za pomocą którego jest możliwa analiza jakości oleju. Ocena zużycia eksploatacyjnego oleju silnikowego należy obecnie do najbardziej dynamicznie rozwijającego się nurtu badań i jest przedmiotem zainteresowania wielu instytucji naukowych [7]. Tematyka ta wzbudza również coraz to szersze zainteresowanie firm prywatnych eksploatujących pojazdy ze względu na istotne dla

nich efekty praktyczne i ekonomiczne [5,6]. Wszystkie mechanizmy czy podzespoły urządzeń ulegają w naturalny sposób procesom starzenia i zużycia, tak i olej silnikowy zmienia swoje właściwości smarne, niekorzystnie wpływając na stan techniczny całego układu smarowania. Niejednorodne warunki eksploatacji pojazdów i maszyn bezpośrednio wpływają na intensywność zmian zachodzących w substancjach smarnych a więc narzucają indywidualne podejścia do oceny jakości oleju, uwzględniając przyjęty okres użytkowania silnika. Z tego powodu prace badawcze poprowadzono w kierunku poszukiwania właściwości, które efektywnie i dokładnie odzwierciedlają charakter zmian eksploatacyjnych i które z kolei można w prosty sposób mierzyć i rejestrować.

Na bazie uzyskanych charakterystyk zmian wytypowanych właściwości fizykochemicznych oleju oraz silnych korelacji zmian stałej dielektrycznej z porównywanymi właściwościami zaproponowano nową metodykę diagnozowania jakości oleju. Zatem uznano za celowe wnikliwe podejście do badań nad stanem oleju smarującego, ponieważ szczególnie uzasadnione jest to w takich gałęziach gospodarki jak przemysł maszynowy – głównie samochodowy, rolniczy.

Niniejsza praca została ukierunkowana na wykazanie związku pomiędzy właściwościami fizykochemicznymi eksploatowanego oleju a stałą dielektryczną, która jest łatwo mierzalna. Przeanalizowano związki pomiędzy podstawowymi parametrami opisującymi proces starzenia oleju na podstawie wyników pomiarów zmian wartości stałej dielektrycznej oleju w czasie eksploatacji, w odniesieniu do olejów świeżych. Ze względu na ekspansywną elektronizację pojazdów szczegółowo scharakteryzowano procedury diagnozowania stanu oleju oraz metody prognozowania jego wymiany opierając się na wytycznych producentów pojazdów a także logice algorytmów z tym związanych. Na tej podstawie, jako drugorzędny cel zaproponowano zarys nowej metody umożliwiającej podjęcie właściwej decyzji o wymianie oleju silnikowego w trakcie eksploatacji.

## **2. Założenia wstępne**

Z dokonanego przeglądu wybranych instrukcji obsługi samochodów wynika, że dla producenta pojazdu wskazanie użytkownikowi harmonogramu wymiany oleju jest zaleceniem niejednoznacznym ze względu na brak warunków technicznych do przeprowadzenia w pojeździe oceny jego zdatowności. Zaawansowany poziom elektrotechniki i elektroniki umożliwia stosowanie różnych wielkości mierzonych oraz stosowanych form kontroli układów mechatronicznych [2,4]. Jednak z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy wynika, że jednym z podstawowych i trudnych do zdefiniowania procesów fizykochemicznych jest starzenie oleju smarującego w silnikach spalinowych. Proces ten można opóźnić poprzez dodawanie w czasie eksploatacji do oleju dodatków uszlachetniających które wpływają na wzrost jego własności przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych. Uzyskuje się również spowolnienie tendencji spadkowej wartości liczby zasadowej [10,11]. Pomiar całkowitej liczby zasadowej (TBN) należy do rutynowych badań i jest testem określającym poziom utraty rezerwy alkalicznej w czasie eksploatacji. Przeprowadza się go również w celu monitorowania stanu dodatków uszlachetniających olej.

Proponowane przez producenta wymiany oleju są często wykonywane na długo przed zanim oleje zaczyna znacząco tracić właściwości smarujące. Sprawdzenie właściwości oleju przy użyciu laboratoryjnych metod analitycznych jest kosztowny. Korzystanie z tych technik podczas eksploatacji może być niezwykle trudne. W związku z tym rzadko diagnozuje się olej przed wymianą, co powoduje jego marnowanie.

W czasie użytkowania oleju silnikowego zmienia się wiele jego parametrów, jak choćby lepkość kinematyczna, skład frakcyjny, zawartość dodatków, zawartość zanieczyszczeń.

Badanie lepkości kinematycznej w temperaturze 40 i 100 °C wykazuje wąski obszar zmian w procesie użytkowania. Parametr diagnostyczny oparty na parametrze lepkościowym obarczony jest małą nośnością informacyjną, szczególnie w zmiennych warunkach temperaturowych.

Olej smarujący silnik jest typowym materiałem dielektrycznym. W pracy [7] wykazano, że spektroskopia dielektryczna jest jedną z najpotężniejszych i najbardziej dominujących technik analizy strukturalnej dla materiałów dielektrycznych. W łatwy sposób identyfikuje olej według klasyfikacji lepkościowej. Przypuszcza się że spektroskopia dielektryczna może dostarczyć przydatnych informacji na temat składu i struktury oleju silnika. Podobnie w pracy [14] wykazano, że współczynnik temperaturowy stałej dielektrycznej olejów silnikowych zależy od tego, czy olej jest świeży, czy też był używany. Stąd uznano, że pomiar stałej dielektrycznej daje możliwości do określania stanu oleju silnikowego.

Do podobnego wniosku doszli badacze w publikacji [16] w której zaproponowano zasadę monitorowania zanieczyszczenia oleju przez Internet w oparciu o pomiar stałej dielektrycznej. Opracowano również system pomiarowy, który obejmuje czujnik pojemności, mały obwód wykrywania pojemności oraz oprogramowanie do monitorowania i analizy. Wyniki pokazują, że względna stała dielektryczna oleju może być skutecznie śledzona i odpowiednio sklasyfikowana za pomocą opracowanego systemu pomiarowego, który może być użyty do określenia właściwego okresu wymiany oleju.

Pomiar stałej dielektrycznej oleju może dostarczyć ważnych informacji na temat jakości oleju. Dedykowany do tego prosty test może w pewnych okolicznościach natychmiast określić, czy po wymianie oleju zastosowano właściwy olej. Zwiększenie się stałej dielektrycznej oleju wskazuje na obecność zanieczyszczeń lub zmianę jego składu chemicznego [3,15]. Ustalono, że szybkość zmiany stałej dielektrycznej zależy od fizycznych właściwości oleju, które wpływają na szybkość osadzania się w nim zanieczyszczeń, takich jak gęstość i lepkość, a także od użytych dodatków uszlachetniających.

Silnikowe oleje syntetyczne i mineralne nie są doskonałymi izolatorami, charakteryzują się minimalnym przewodnictwem elektrycznym. Dlatego znajomość właściwości dielektrycznych, takich jak właśnie względna przenikalność elektryczna jest istotna dla rozwoju i prawidłowego działania współczesnych silników spalinowych. Monitorowanie stanu oleju i jego degradacji w systemie online oraz prognozowanie jego wymiany jest celem współczesnych badaczy [18]. Monitorowanie stanu oleju i jego degradacji w systemie online, przy użyciu stałej dielektrycznej wiąże się z poznaniem jej zmian w funkcji temperatury. Wykonane badania [8,13] wykazały istotny wzrost stałej dielektrycznej w obszarach wyższych temperatur co ułatwia jej pomiar i klasyfikację. W pracy przedstawiono również możliwość wykorzystania czujnika pojemnościowego oraz jego korelację ze stałą dielektryczną. Stwierdzono, że w chwili zmiany stałej dielektrycznej oleju, pojemność również się zmienia.

Spektrometria w podczerwieni (IR) pozwala oceniać jakość oleju oraz zachodzące w nim zmiany poprzez analizę widma. Jest to analiza instrumentalna oparta na badaniach widm elektronowych związków chemicznych. Jest również metodą stosowaną do oznaczania zawartości niektórych związków chemicznych w mieszaninach, dla których pomiar jest dokonywany przy ustalonej długości fali. W efekcie badań na podstawie uzyskanych widm i widm wzorców wnioskuje się o zawartości związku w badanej substancji. Metody spektroskopii w podczerwieni są stosowane między innymi do oznaczania zawartości składników niepożądanych oraz zawartości niektórych dodatków [1].

Mając na uwadze powyższe zdecydowano się na zbadanie takich parametrów jak: stała dielektryczna, liczba zasadowa oraz poziom absorbancji.

### 3. Program badań

Na potrzeby badań określono pięć głównych jego etapów:

- wytypowanie obiektów do pobrania próbek oleju,
- opracowanie metodyki pobierania oleju,
- przebadanie wpływu temperatury na zmianę wartości stałej dielektrycznej oleju,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych próbek,
- dokonanie analizy otrzymanych wyników.

Ważną kwestią było ustalenie odpowiedniej reprezentatywnej ilości oleju potrzebnej do analiz laboratoryjnych. Dla celów porównawczych z góry określono badania mające na celu zbadanie degradacji oleju podczas użytkowania standardowego przebiegu pojazdu – 15 000 km. Po każdorazowym pobraniu próbki (od 100 do 150 ml), sprawdzano poziom oleju w silniku i uzupełniano go do poziomu zalecanego przez producenta. Wykonano również serię próbną bez dolewania oleju po pobraniu próbki w celu sprawdzenia takiego charakteru eksploatacji, spodziewając się szybszego starzenia oleju. Ze względu na długoterminowe badanie tego typu zdecydowano na przeprowadzenie tylko jednej, takiej serii na jednym obiekcie badań.

### 4. Obiekt badań

Jako obiekty badań wytypowano sześć samochodów osobowych klasy średniej, użytkowane w systemie poza miejskim i miejskim, głównie jako dojazd do miejsca pracy. Minimalny pokonywany dystans dzienny wynosił ok. 40 km. Samochody zasilane były benzyną, alternatywnie benzyną i LPG oraz ON. Każdy z pojazdów eksploatowany był przez jednego kierowcę. Pojazdy użytkowane były na olejach półsyntetycznych i syntetycznych.

Dobór obiektów badań uwarunkowano również, takimi czynnikami jak:

- popularność samochodów klasy średniej na krajowym rynku motoryzacyjnym,
- zróżnicowany wiek i przebieg pojazdów,
- zbliżony charakter eksploatacji (ruch miejski, dzienne przebiegi, itp.),
- dyspozycyjność pojazdów do cyklicznego pobierania próbek.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe dane pojazdów.

Tabela 1. Zestawienie badanych pojazdów

Lp	Marka	Rodzaj paliwa	Pojemność silnika [dm <sup>3</sup> ]	Rodzaj oleju	Przebieg [km]
1	Opel Astra 1,7D	Olej napędowy	1,7	Lotos synt. 5W/40; API SN/CF, ACEA A3/B4	brak danych
2	Daewoo Nexia 1,5	Benzyna + LPG	1,5	Lotos synt. 5W/40; API SN/CF, ACEA A3/B4	98 400
3	Fiat Punto 1,1	Benzyna	1,1	Elf Semi-Syntetic 10W/40; API SL/CF, ACEA A3/B4	81 700
4	Opel Astra 1,6 <i>dwie serie badań S1 i S2</i>	Benzyna + LPG	1,6	Genuine GM 10W/40; API SL/CF, ACEA A3/B3	125 000
5	Volkswagen Passat 1,8	Benzyna + LPG	1,8	Castrol Magnatec 10W/40; API SL /CF, ACEA A3/B3	242 038
6	Fiat Seicento 1,1 <i>dwie serie badań S1 i S2</i>	Benzyna	1,1	Mobil 1 Formula S 10W/40; API SL/SJ/CF, ACEA A3/B3	99 382

### 5. Badania laboratoryjne

Oprócz przyjętych założeń wytypowania obiektów badań określono warunki techniczne pozyskania i przechowywania próbek oleju do badań laboratoryjnych. Prawidłowy schemat czynności przedstawiał się następująco:

- pobieranie próbek z silnika realizowano zawsze po jego nagraniu; w przypadkach długotrwałego postoju pojazdu pobranie próbki poprzedzał przejazd dystansu

- zapewniającego osiągnięcie przez silnik równowagi cieplnej. Gwarantowało to dobre wymieszanie oleju w magistrali oraz sprawiało, że z oleju została odprowadzona woda,
- ze względu na relatywnie wysoką temperaturę oleju w chwili wykonywania pobrania, zachowywano szczególną ostrożność w zakresie BHP,
  - jako przyrządy do pobierania próbek wykorzystano strzykawkę wraz z giętkim wężykiem olejoodpornym,
  - miejscem, z którego pobierano stałą, określoną ilość oleju była rurka osłonowa wskaźnika poziomu oleju,
  - pobierano określoną ilość oleju – od 100 do 150 ml,

Zachowując powyższe wytyczne podjęto wszelkie starania wyeliminowania jakiegokolwiek błędów już w trakcie pobierania próbek, co zapewniało takie same warunki dla wszystkich badanych pojazdów. W celu przechowywania olejów w różnych stadiach eksploatacji zakupiono specjalne dedykowane pojemniki ze szkła laboratoryjnego. Stanowi to bardzo przydatne rozwiązanie do magazynowania oleju do czasu przeprowadzenia badań. Zastosowane szkło laboratoryjne chroni olej od dodatkowych zanieczyszczeń i niekontrolowanego starzenia podczas magazynowania.

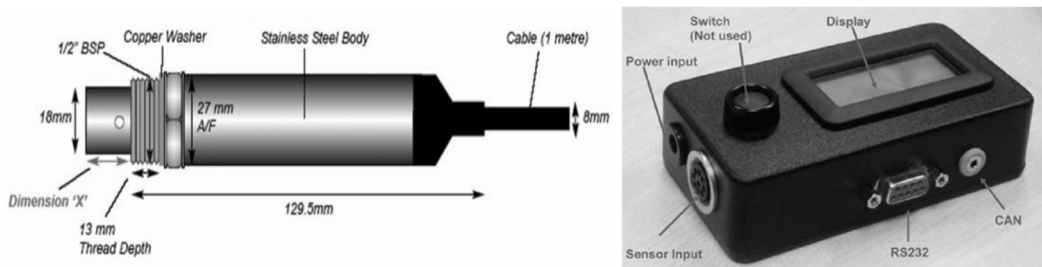
Ze względu na dobór obiektów oraz metodyki badań, analiza dotyczyła zmian właściwości oleju w silniku o zapłonie ZI i ZS. Takie ujęcie tematu potrzebne było ze względu na faktyczną utratę właściwości fizykochemicznych, zależących od charakteru użytkowania i stanu technicznego pojazdu oraz dokonywanych aktualnie wymian oleju po przebyciu danego przebiegu. Poprzez przeprowadzenie badań laboratoryjnych zweryfikowano sensowność przebiegowych wymian oleju oraz możliwość szybkiej i skutecznej oceny jego stanu na podstawie przyjętego parametru diagnostycznego.

Stanowisko badawcze wyposażone było w niezbędne urządzenia. Przed każdorazowym pomiarem czujnik był myty z resztek oleju za pomocą benzyny ekstrakcyjnej oraz wyczyszczony za pomocą ręcznika papierowego a na koniec suszony powietrzem pod ciśnieniem. Zapewniało to rzetelny pomiar oraz dołożono wszelkich starań aby na elektrodach pomiarowych czujnika Analexrs nie znajdował się olej z poprzedniego badania. Kolejnym bardzo ważnym momentem w procesie badawczym było zapewnienie jednorodności oleju w próbkach. Ze względu na czasowe magazynowanie pozyskanych próbek, olej poddawany był niepożądanego sedymentacji, co prowadziło do wytrącenia osadów oraz rozwarstwień. Niektóre nawet procesy są niedostrzegalne „okiem nieuzbrojonym”, dlatego dla zapewnienia jednorodności zawiesiny, przed pomiarem z każdej badanej serii, próbki oleju delikatnie wstrząsnięto w celu wymieszania się osiadłych produktów starzeniowych.

Do wykonanych podstawowych badań zaliczyć można:

- pomiar stałej dielektrycznej przyrządem Lubri Sensor,
- pomiar stałej dielektrycznej przyrządem Analexrs,
- zmienność całkowitej liczby zasadowej TBN,
- badania spektrometryczne w podczerwieni, zmian poziomu absorpcji – IR.

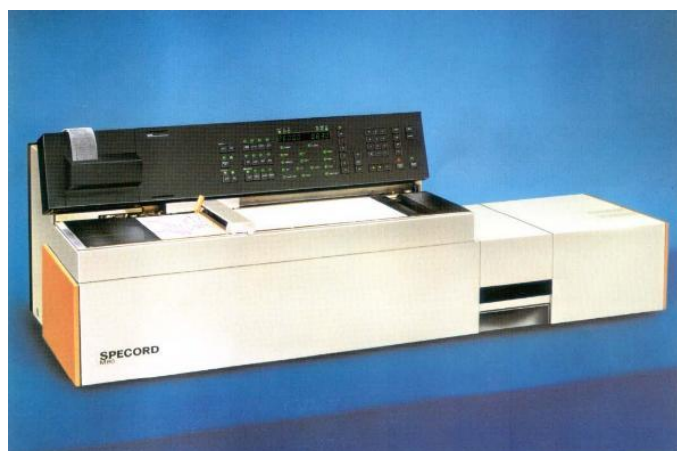
Wykorzystanymi przyrządami mierzącymi jakość oleju poprzez określenie cechy oleju, zwanej również stałą dielektryczną to: mechatroniczny czujnik Analexrs oraz przenośny miernik Lubri-Sensor przedstawione na rys. 1 i 2. Zmiany absorpcji promieniowania IR w funkcji przebiegu przebadano za pomocą spektrofotometru siatkowego Specord M80 (rys. 3).



Rys.1. Zestaw do pomiaru stałej dielektrycznej Analexrs [19]



Rys.2. Zestaw do pomiaru stałej dielektrycznej Lubri Sensor [20]



Rys.3. Ogólny widok spektrofotometru Specord M80 [21]

## 6. Analiza wieloaspektowa

Istotą koncepcji będącej przedmiotem publikacji jest analiza degradacji oleju na podstawie zmian stałej dielektrycznej w wybranych stanach pracy. Założenie takie wiązało się z koniecznością szczegółowego poznania wpływu pozostałych własności fizykochemicznych procesu starzenia oleju i określenia na podstawie przeprowadzonej identyfikacji zmian funkcji korelacji pomiędzy nimi. Mimo wielu opracowań, wiedza w tym zakresie nie jest pełna i wymaga uzupełnienia zwłaszcza z uwagi na coraz to nowe komponenty olejowe, które

w założeniu powinny zapewnić jak największe spełnienie parametrów technicznych i ekologicznych przy uzyskaniu minimalnych kosztów produkcji.

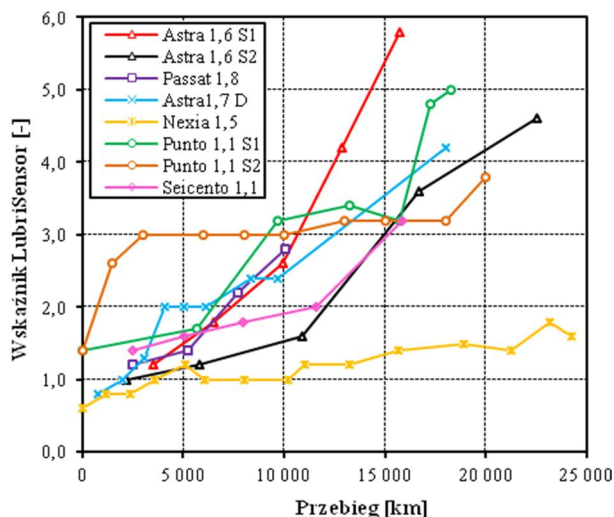
### 6.1. Stała dielektryczna

Pomiar stałej dielektrycznej wykonano w oparciu o dwa urządzenia: Lubri Sensor i Analexrs. Charakterystyki badanego parametru przedstawiono i opisano poniżej.

Na wykresach zbiorczych – rys.4, przedstawiono charakterystyki zmian stałej dielektrycznej dla poszczególnych obiektów badań. Dla przedmiotowych analiz odniesieniem był przebieg pojazdu, po przebyciu którego dokonywano w poszczególnych obiektach badania oleju.

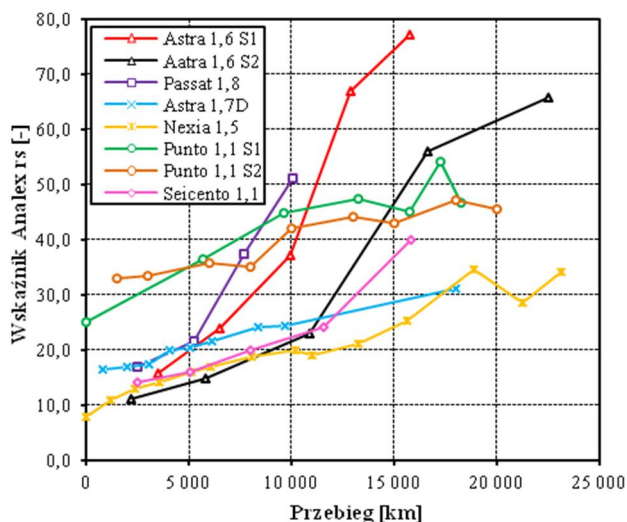
Analizując przedstawiane wykresy zmian stałej dielektrycznej mierzonej dwoma niezależnymi przyrządami stwierdzono, iż widoczny jest znaczący wzrost wartości stałej dielektrycznej podczas użytkowania. Niewielkie różnice wynikają z sposobu pomiaru oraz nominalnej skali zastosowanych przyrządów, jak również z odstępu czasowego wykonanych badań. Stwierdzono zbliżony trend zmian charakterystyki w odniesieniu obu serii wykonanych badań na tej samej jednostce napędowej Fiata Punto, zmierzone Analex'em i Lubri Sensorem. Podobnie jest w przypadku przebiegu funkcji (podobieństwo jakościowe) w seriach Opla Astry 1,6. Dla serii S1 uzyskano szybszą degradację oleju w trakcie eksploatacji bez stosowania dolewek co skutkowało wcześniejszym osiągnięciem wartości granicznych wymagających wymiany oleju. Jest to równoznaczny dowód na to, iż konieczne jest sprawdzanie poziomu oleju w silniku podczas użytkowania, w celu utrzymywania wymaganej jakości oleju smarującego. Zapewnia to bezawaryjną pracę układu smarowania, a stosowane dolewki „odświeżają” olej i tym samym spowalniają proces jego stężenia – po osiągnięciu przebiegu na poziomie 25 000 km wskaźnik stałej dielektrycznej osiągnął poziom 65 jednostek (Analexrs) dla serii w Oplu Astrze 1,6 z uzupełnianym olejem. Charakterystyki zmian przyjętego parametru diagnostycznego wyróżniają się wysokimi współczynnikami korelacji, mieszczącymi się w zakresie od  $R^2=0,87$  do 0,98.

a)





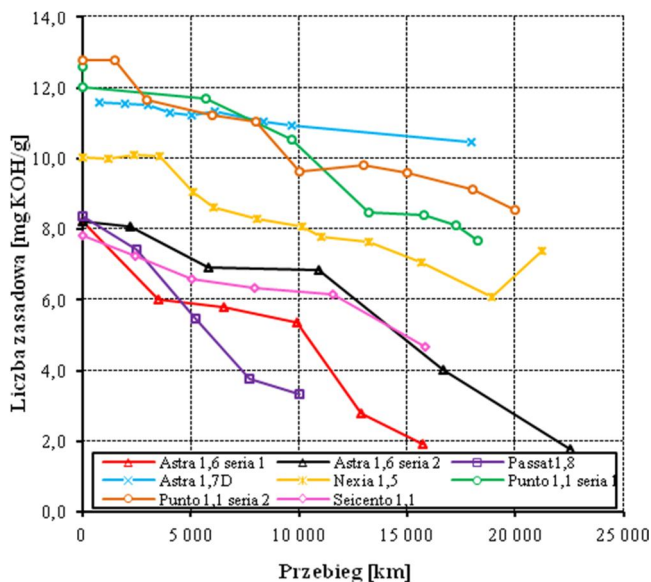
b)



Rys.4. Zmiana stałej dielektrycznej mierzonej za pomocą: a) Lubri Sensor, b) Analxrs

## 6.2. Całkowita liczba zasadowa TBN

Pomiar liczby zasadowej wykonano metodą miareczkowania potencjometrycznego wg PN – 88/C-04049. Jednoznacznie wynika, że stosowanie dodatków do olejów decyduje o odpowiednim poziomie liczby zasadowej w procesie użytkowania. Z tego też względu oleje różnych gatunków nie mogą być ze sobą mieszane. Takie działanie prowadzi do tego, że oleje w silniku mogą reagować ze sobą, powodując zmniejszenie liczby zasadowej i powstawanie związków chemicznych obojętnych, a nawet szkodliwych dla silnika. Poniżej na rysunku 5 zobrazowano charakterystyki zmian tej właściwości w badanych pojazdach.



Rys.5. Zmiana liczby zasadowej

Z przeprowadzonej analizy TBN w oleju podczas użytkowania stwierdzono, że bardzo ważna jest początkowa wartość liczby zasadowej stanowiąca rezerwę alkaliczną na dalszy okres eksploatacji. W prezentowanych wynikach startowa wartość TBN mieści się w zakresie od 8 do 13 [mgKOH/g] i głównie zależy od rodzaju oleju silnikowego danego producenta – im wyższa tym dłuższy okres użytkowania. Dla Fiata Punto, po porównaniu obu serii danych,



zauważono bardzo zbliżoną utratę rezerwy alkalicznej (zmniejszającą się liczbę zasadową) co świadczy najprawdopodobniej o podobnym sposobie użytkowania pojazdu. Z kolei dla samochodu Opel Astra 1,6 (seria pierwsza) stwierdzono efekt przyspieszonego starzenia się oleju ponieważ nie dokonywano dolewek kompensujących po każdorazowym pobieraniu oleju do badania. Bazą odniesienia była seria druga samochodu Opel Astra 1,6, w trakcie której po pobraniu oleju do badań niedobór uzupełniano olejem świeżym.

Ciekawym przypadkiem jest przebieg zmian liczby zasadowej dla samochodu Opel Astra 1,7D zasilanego olejem napędowym. Dla tego pojazdu odnotowano najmniejszy spadek rezerwy alkalicznej. Z uwagi na to, iż do badań wykorzystano tylko jeden pojazd z silnikiem o ZS nie jest możliwe jednoznaczne wyjaśnienie tego faktu.

Kolejnym interesującym zestawieniem jest para pojazdów, VW Passat 1,8 zasilany benzyną i LPG oraz Fiat Seicento 1,1 zasilany benzyną. Porównując na rys.5 przebiegi dla tych dwóch pojazdów zauważono gwałtowniejszy spadek liczby zasadowej dla pojazdu VW w stosunku do Fiata, którego olej posiadał na początku badań niższą, o 0,52 mgKOH/g, liczbę zasadową. Zjawisko można tłumaczyć tym, że pojazdy różniły się pojemnością jednostki napędowej a nadto VW Passat posiadał na początku badań znacząco wyższy przebieg od Fiata Seicento (Tabela 1).

Zmiana wartości liczby zasadowej w eksploatacji, czyli zmniejszanie się rezerwy alkalicznej jest procesem znanym a progres ten zależy głównie od użytkowania, stanu jednostki napędowej, czyli podstawowych czynników wpływających na degradację oleju. Wstępną analizę obiektów można dokonać pod kątem zastosowanego oleju silnikowego, który charakteryzuje się różnymi wartościami początkowej liczby zasadowej. Mając na uwadze powyższe zaproponowano parametr za pomocą którego można porównać stopień zmian pomiędzy konkretnymi pojazdami. Dla przykładu wzięto pod uwagę tylko parametry brzegowe zmian liczby zasadowej, czyli  $TBN_{max}$  i  $TBN_{min}$ , po czym odniesiono to do przebiegu oleju. Dla szerszej analizy możemy rozpatrywać zmianę w poszczególnych okresach użytkowania.

Dla obliczenia  $\Delta TBN$  użyto wzoru:

$$\Delta TBN = TBN_{max} - TBN_{min} \quad (1)$$

Zmianę procentową wyznaczono ze wzoru:

$$zTBN = 100\% - \frac{TBN_{min} \cdot 100\%}{TBN_{max}} \quad (2)$$

Porównując zmianę procentową liczby zasadowej (utratę procentową rezerwy alkalicznej) w stosunku do przebiegu pojazdu możemy porównać pomiędzy sobą wszystkie badane pojazdy (Tabela 2). Znając wytyczne producenta konkretnego oleju silnikowego co do momentu wymiany oleju w kontekście spadku rezerwy alkalicznej jesteśmy w stanie wyznaczyć ten moment poprzez korelację z przebiegiem pojazdu lub czasookresem (motogodziny). W tym momencie można również określić czy podawany przez producenta czasookres wynikający z przebiegu lub godzin pracy jest prawidłowym wyznacznikiem czynności serwisowych.

Tabela 2. Zmiana liczby zasadowej

Rodzaj pojazdu	Liczba zasadowa $TBN_{max}$ [mgKOH/g]	Liczba zasadowa $TBN_{min}$ [mgKOH/g]	$\Delta TBN$ [mgKOH/g]	Zmiana procentowa $zTBN$ [%]	Przebieg [km]
Punto 1,1 seria 1	12,59	7,69	4,90	38,92	18250
Punto 1,1 seria 2	12,78	8,54	4,24	33,18	20000
OpelAstra 1,7D	11,58	10,45	1,13	9,76	17983
Daewoo Nexia 1,5	10,2	7,04	3,16	30,99	24259
Astra 1,6 seria 1	8,22	1,94	6,28	76,40	15730
Astra 1,6 seria 2	8,22	1,79	6,43	78,22	22529
VW Passat 1,8	8,36	3,34	5,02	60,05	10038
Fiat Seicento 1,1	7,84	4,70	3,14	40,05	15828

Z analiz wynika, że w niektórych przypadkach przyjęty przebieg z jednej strony jest zbyt krótki a z drugiej za długi, patrząc pod kątem samochodu VW Passat, gdzie liczba zasadowa po przebiegu 10 000 km osiągała wartość 3,34 [mgKOH/r], co stanowi 60% utraty rezerwy alkalicznej. Ewentualnym jest wynik dla Opla Astry 1,6 seria druga, gdzie mimo niskiej wartości początkowej liczby zasadowej, stwierdzono znaczący spadek rezerwy alkalicznej do około 78%, dla serii w której olej był podczas pobierania próbek uzupełniany olejem świeżym.

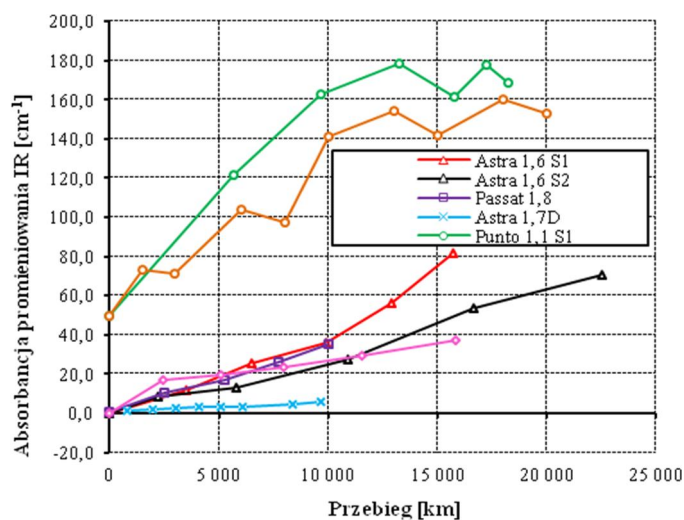
Z porównań również wynika, że ważnym parametrem oleju jest jego startowa liczba zasadowa co oznacza, że należy stosować oleje lepszej jakości o właściwie dobranej początkowej TBN. Dopuszczalne limity TBN w oleju są regulowane przez ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) i zależą od stosowanego paliwa. Pojazdy napędzane benzyną, gazem LPG i CNG oraz olejem napędowym o ultra niskiej zawartości siarki nie wymagają wysokiego TBN. Natomiast zasilanie silnika biopaliwem wiąże się z doбором oleju o wyższej wartości TBN [17].

Po dokonaniu szczegółowej analizy zmiany całkowitej liczby zasadowej celowe zatem jest zestawienie wyników pomiarowych z rozważanym parametrem diagnostycznym wyznaczanym za pomocą wskaźnika Lubri Sensor i Analexrs.

### **6.3. Rozkładu widma promieniowania podczerwonego w paśmie tlenowym IR**

Rozkład widma (absorbancja) promieniowania podczerwonego dla olejów silnikowych jest najbardziej efektywny w paśmie tlenowym, tzn. w zakresie liczby falowej około 1824-1520 [cm<sup>-1</sup>]. W tym obszarze następują znaczące zmiany eksploatacyjne, które możemy stosunkowo w prosty sposób badać oraz poddawać dalszej analizie. Podstawowe warunki rejestracji widma IR to: spektrofotometr typu SPECORD M80, zakres pomiarowy: 1860 - 1480 cm<sup>-1</sup>, grubość warstwy: 0,105 mm, rozdzielczość: 4 cm<sup>-1</sup>, jako odnośnik zastosowany olej świeży, właściwy dla każdej serii badanych pojazdów. Zarejestrowane widma IR przeliczono wg linii bazowej opartej na punktach 1764 cm<sup>-1</sup> i 1516 cm<sup>-1</sup>, a następnie scałkowano numerycznie w granicach wyznaczonych przez punkty bazowe. Na rys. 6 przedstawiono zmianę absorbancji dla poszczególnych obiektów badawczych. Pomiar i analiza widm absorbcyjnych promieniowania w podczerwieni (IR) pozwala przedstawić dynamikę zmian termooksydacyjnych oleju w eksploatacji, lecz nie spełnia kryteriów parametru diagnostycznego. Określenie wartości granicznych kwalifikujących olej do wymiany jest bardzo trudne lub niemożliwe (szczególnie dla Opla Astry 1,7D), ponieważ otrzymane funkcje zmian wartości absorbancji nie posiadają charakterystycznych punktów przegięcia, odzwierciedlających zmianę stanu.

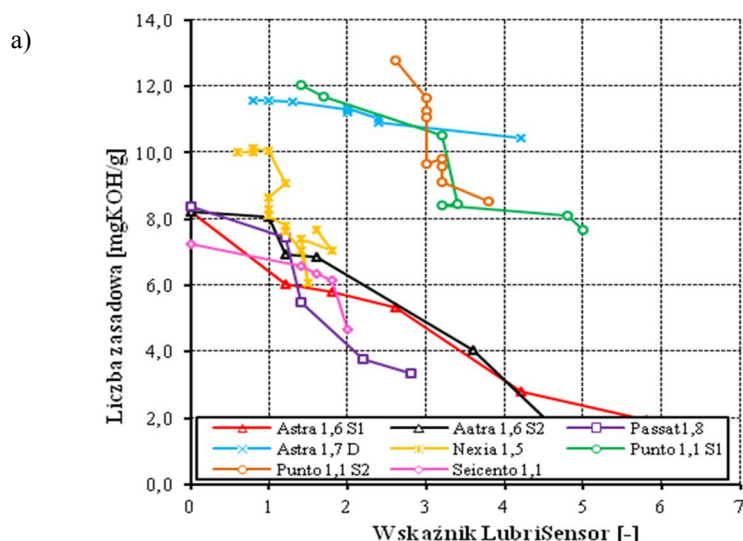
Na rys. 6 zauważono również, że zmiany wartości absorbancji dla Fiata Punto (w dwóch seriach) znacząco odbiegają od zmian pozostałych przebiegów. Zaistniały fakt można tłumaczyć tym, iż obliczenia wykonane dla Fiata Punto były realizowane w szerszym paśmie tlenowym niż dla pozostałych obiektów badań.

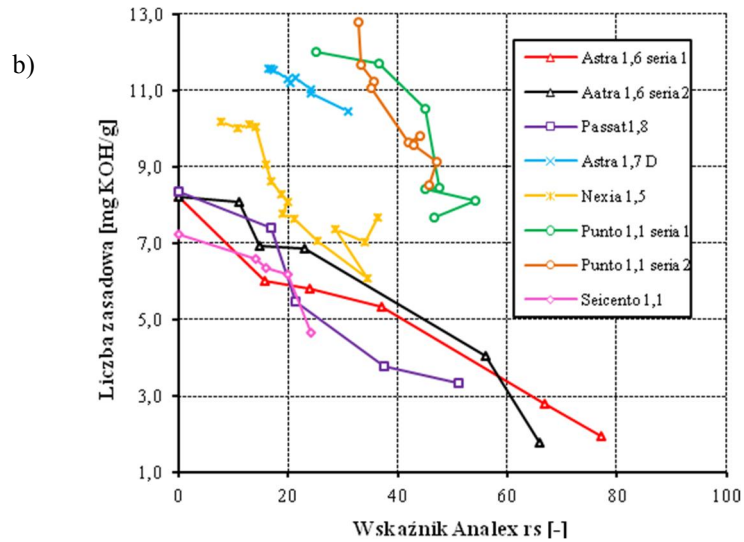


Rys.6. Rozkład widma promieniowania podczerwonego

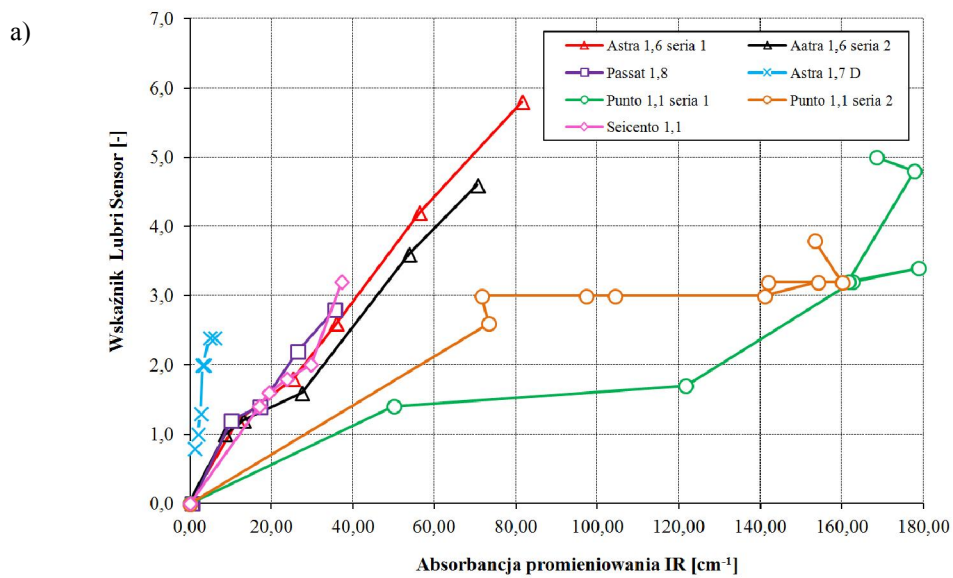
#### 6.4. Analizy porównawcze

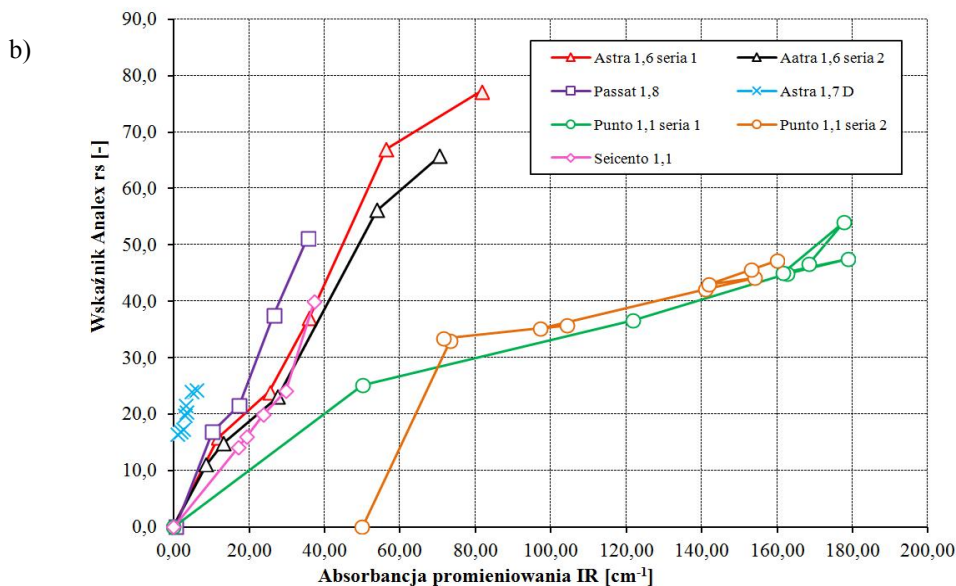
Wszystkie pomiary przedstawionych własności oleju silnikowego zostały wykonane z pewnym błędem wynikającym z niedoskonałości zastosowanych przyrządów pomiarowych. Z tych powodów niemożliwe jest absolutnie dokładne wyznaczenie wartości mierzonej wielkości i dlatego ważna jest ocena wiarygodności otrzymanych wyników pomiarowych. W związku z tym, dla lepszego zobrazowania zmienności oraz określenia współzależności pomiędzy badanymi własnościami eksploatacyjnymi oleju silnikowego, wykonano analizy porównawcze. Stopień współzależności przedstawiono wykorzystując współczynnik korelacji liniowej Pearsona. W tym celu porównano zmienność całkowitej liczby zasadowej (rys. 7) oraz absorbancji IR (rys. 8) w kontekście stałej dielektrycznej, z zamiarem zastosowania jej w charakterze parametru diagnostycznego.





Rys.7. Zmiana stałej dielektrycznej w zestawieniu z liczbą zasadową, mierzonej za pomocą:  
a) Lubri Sensor b) Analexrs





Rys.8. Zmiana absorbancji promieniowania IR w zestawieniu z liczbą zasadową, mierzonej za pomocą: a) Lubri Sensor b) Analexrs

Współczynnik korelacji liniowej Pearsona to współczynnik określający poziom zależności liniowej między zmiennymi losowymi. Wykorzystano korelację do zbadania czy zachodzi związek pomiędzy dwiema zmiennymi (właściwościami, cechami). Współczynnik korelacji mówi nam o sile związku. Jest ona określana jako wartość w przedziale od 0 do 1. Im wartość współczynnika dąży do wartości 1 tym siła związku jest większa. Siła związków korelacyjnych:

- poniżej 0,2 – korelacja słaba (praktycznie brak związku),
- 0,2 ÷ 0,4 – korelacja niska (zależność wyraźna),
- 0,4 ÷ 0,6 – korelacja umiarkowana (zależność istotna),
- 0,6 ÷ 0,8 – korelacja wysoka (zależność znaczna),
- 0,8 ÷ 0,9 – korelacja bardzo wysoka (zależność bardzo duża),
- 0,9 ÷ 1,0 – zależność praktycznie pełna.

Współczynnik korelacji Pearsona  $r_{xy}$ , zastosowano do badania związków prostoliniowych badanych zmiennych, w których zwiększenie wartości jednej z cech powoduje proporcjonalne zmiany średnich wartości drugiej cechy (wzrost lub spadek).

Współczynnik ten obliczono na podstawie wzoru:

$$r_{xy} = \frac{cov(x,y)}{s_{d_x} \cdot s_{d_y}} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

W tabelach 3÷8 przedstawiono zestawienie współczynników korelacji liniowej Pearsona dla poszczególnych pojazdów.

Tabela 3. Zestawienie współczynników korelacji dla Fiata Punto 1,1 - seria 1

Fiat Punto 1,1 (seria 1)	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,814	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,823	0,715
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,804	0,949

Tabela 4. Zestawienie współczynników korelacji dla Fiata Punto 1,1 - seria 2

Fiat Punto 1,1 (seria 2)	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,888	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,72	0,897
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,731	0,692

Tabela 5. Zestawienie współczynników korelacji dla Opla Astry 1,6 - seria 1

Opel Astra 1,6 (seria 1)	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,982	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,966	0,974
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,995	0,971

Tabela 6. Zestawienie współczynników korelacji dla Opla Astry 1,6 - seria 2

Opel Astra 1,6 (seria 2)	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,992	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,960	0,953
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,984	0,988

Tabela 7. Zestawienie współczynników korelacji dla Volkswagena Passat'a 1,8

Volkswagen Passat 1,8	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,926	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,903	0,916
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,974	0,990

Tabela 8. Zestawienie współczynników korelacji dla Opla Fiat Seicento 1,1

Fiat Seicento 1,1	Wskaźnik Lubri-Sensor [-]	Wskaźnik Analex rs [-]
Wskaźnik Analex rs [-]	0,982	1,000
Liczba zasadowa [mgKOH/g]	0,927	0,963
Absorbancja promieniowania IR [cm <sup>-1</sup> ]	0,962	0,946

Z przedstawionych w tabelach liczb wynika, że dominuje głównie korelacja wysoka i bardzo wysoka. Analiza szczegółowa uzyskanych wyników upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

- pomiar stałej dielektrycznej był dokonywany przez dwa różniące się konstrukcją urządzenia, znanym od lat Lubri Sensorem który można traktować jak przenośny miernik oraz Analexrs, nowoczesnym czujnikiem mogącym w połączeniu z systemem akwizycji danych monitorować w czasie rzeczywistym względną przenikalność elektryczną. Pomimo różnej konstrukcji urządzeń i ich wskazań uzyskano bardzo wysoki współczynnik korelacji w przedziale 0,81÷0,99,
- spektroskopia w podczerwieni jako metodyka badań oleju pozwala na analizę jego składu i obserwację zmian jakie zachodzą w trakcie starzenia. Jednakże ustalenie jednoznacznego parametru charakteryzującego jakość oleju w wybranym czasie eksploatacji jest bardzo trudne. Mając na uwadze powyższe oraz to, że badanie wymaga użycia kosztownej aparatury eliminują tę metodę do zastosowania w pojeździe. Obliczona korelacja pomiędzy wartościami absorbancji promieniowania a stałej dielektrycznej zawiera się w przedziale 0,73÷0,99 dla Lubri Sensora i odpowiednio 0,69÷0,99 dla Analexrs.
- jak wspomniano wcześniej zmniejszanie się rezerwy alkalicznej w trakcie użytkowania oleju silnikowego jest procesem znanym z tego, że wpływa na degradację oleju.

W momencie określanym mianem punktu zrównoważenia dochodzi do stanu wyczerpania rezerwy zasadowej zapewniającej bieżącą neutralizację kwaśnych produktów spalania i wymiana oleju na świeży jest jak najbardziej wskazana. Ustalenie momentu wymiany oleju metodami diagnostyki pokładowej jest bardzo trudne. Obliczona korelacja pomiędzy wartościami liczby zasadowej a stałej dielektrycznej zawiera się w przedziale  $0,72 \div 0,97$  dla Lubri Sensora i odpowiednio  $0,71 \div 0,97$  dla Analexrs.

- pomiar stałej dielektrycznej czujnikiem Analexrs lub pochodnym, zamontowanym w strefie magistrali olejowej silnika spalinowego mógłby być źródłem informacji diagnostycznej – parametrem stanu oleju silnikowego.

## 7. Koncepcja autorskiej metody predykcji wymiany oleju

Etapem finalnym publikacji jest próba opracowania metodyki prognozowania wymiany oleju w ujęciu systemowym. Uznano, że w celu określenia optymalnego momentu wymiany oleju potrzebne są niezbędne informacje, takie jak:

- parametry oleju świeżego, zastosowanego lub dobranego (klasa jakości, klasa lepkości, wartość liczby zasadowej, itp.) - określające punkt bazowy,
- warunki użytkowania pojazdu i profil kierowcy (zakres prędkości obrotowej silnika, obciążenie silnika, temperatura płynu chłodzącego, temperatura i poziom oleju, temperatura otoczenia, ciśnienie oleju w różnych miejscach układu smarowania, liczba zimnych rozruchów, pokonywane dystanse, itp.),
- pomiary z dedykowanych czujników stanu oleju (stałej dielektrycznej, poziomu liczby zasadowej TBN, lepkości lub inne, które wchodzi na rynek).

Za typowanie momentu wymiany odpowiedzialny byłby algorytm sterowania, do którego na bieżąco podawane byłyby wszystkie dostępne informacje z magistrali danych (sieci komunikacyjnej) pojazdów i maszyn. Byłyby to dane określające degradację oleju (tworzenie charakterystyki degradacji oleju), takie jak np.:

- wartość procentowa utraty rezerwy alkalicznej,
- wartość lub poziom liczby zasadowej,
- stała dielektryczna jako wartość lub zmiana procentowa,
- czasookres pracy (kilometry, motogodziny, itp.).

Układ uwzględniałby korekty pochodzące z pomiarów typu on-line, jak również podawane jako zewnętrzne parametry odniesienia (potocznie nazywanymi trudnymi warunkami użytkowania), za pomocą których byłyby wyznaczany indywidualny czas wymiany, np.:

- rodzaj użytkowania,
- typ kierowcy lub operatora,
- tendencja zmian wartości mierzonych,
- warunki otoczenia, itp..

Całość prognozowania oparta byłaby na działającym w czasie rzeczywistym systemie, który bardzo łatwo można wprowadzić w obliczenia sieci neuronowych tworząc sztuczną inteligencję. Należy jednak podkreślić iż decydującą rolę odgrywa pomiar stałej dielektrycznej, która jako wielkość uniwersalna uwzględnia większość czynników wpływających na degradację oleju (paliwo, sadza, szlamy, laki, żele, ścier ferromagnetyczny, woda, itp.) oraz mocno koreluje z wielkościami, które wykorzystuje się do precyzyjnych pomiarów laboratoryjnych (spektrometria, liczba zasadowa, ilość zanieczyszczeń, itp.). W logikę układu można wprowadzać dowolną charakterystykę zmian poszczególnych własności fizykochemicznych oleju wyznaczaną poprzez korelację z wybranym, mierzonym parametrem.



W dobie nowoczesnych trendów i technologii w zakresie budowy układów smarowania pojazdów i maszyn, takich jak:

- nanotechnologia olejowa - nowoczesne dodatki do oleju poprawiające własności nie tylko smarne lecz utrzymujące na oczekiwanym poziomie poszczególne parametry pracy oraz odbudowujące strukturę par trących,
- downsizing - mała ilość oleju w misce olejowej, wysokie temperatury pracy, duże wysilenie silników,
- modułowa budowa układu olejowego, gdzie wymienia się zużyty olej wraz z filtrem na cały nowy moduł,
- układy pokładowego oczyszczania oleju,

precyzyjna diagnostyka zyskuje na znaczeniu i odgrywa ważną rolę. Degradacja oleju zależy od wielu czynników a zaproponowana koncepcyjna metoda opiera się na analizie wielu zmiennych, dlatego jest ujęta w "inteligentny" system. Do pracy algorytmu potrzebna jest jak największa liczba danych. Niewystarczające jest monitorowanie tylko jednej własności oleju i typowanie według niej momentu wymiany oleju.

Jest to nowa kategoria użytkowania, którą można wykorzystać w nowoczesnych pojazdach hybrydowych i autonomicznych. Zapewni to łatwość operacji eksploatacyjnych, efektywny recykling i minimalizację odpadów oraz spełnienie norm ekologicznych.

## 8. Wnioski

Przebieg jak i czasookres pracy pojazdu nie są właściwymi parametrami decydującymi o wymianie oleju na nowy. Konieczne jest wprowadzenie łatwej i taniej metody diagnostycznej oleju silnikowego, która pozwalałaby na pełne wykorzystanie potencjału jego właściwości fizykochemicznych przy jednoczesnym wyeliminowaniu oleju, który utracił swe właściwości i nie zapewnia już odpowiedniej ochrony silnika. W celu szczegółowego poznania wybranych zjawisk towarzyszących starzeniu się oleju przebadano olej w różnych stadiach jego użytkowania. Szczegółowe wnioski sformułowano następująco:

- Badanie widma IR potwierdziły charakter zmian termooksydacyjnych, które wpływają na degradację oleju w czasie eksploatacji.
- Badanie rezerwy alkalicznej wykazało tendencję malejącą wskazując na intensyfikację kwaśnego środowiska.
- Starzeniu się oleju towarzyszy zmiana względnej przenikalności elektrycznej. Stała dielektryczna jest łatwo mierzalnym parametrem. Pomiar stałej dielektrycznej czujnikiem zamontowanym w strefie magistrali olejowej silnika spalinowego mógłby być źródłem informacji diagnostycznej.
- Badanie korelacji zmian stałej dielektrycznej w odniesieniu do zmiennych jakimi są liczba zasadowa i absorbancja promieniowania IR wykazało wysoki poziom zależności co upoważnia wykorzystać stałą dielektryczną w charakterze parametru diagnostycznego do monitorowania stanu oleju silnikowego.
- Określenie optymalnego momentu wymiany oleju wymaga opracowania metodyki prognozowania wymiany oleju w ujęciu systemowym.

## Literatura

1. Al-Ghouti M A, Al-Toum L. Virgin and recycled engine oil differentiation: A spectroscopic study, *Journal of Environmental Management* 2009; 90.
2. Bolognesi P, Bruno O, Landi A, Sani L, Taponecco L. Electric Machines and Drives for X-by-Wire System in Ground Vehicles 2003; 10th European Conference on Power Electronics and Application: 1-16.
3. Carey A A, Hayzen A J. The dielectric constant and oil analysis, *Practicing Oil Analysis Magazine* 2001; 9: .
4. Cheng H. *Autonomous Intelligent Vehicles: Theory, Algorithms and Implementation*. London Limited: Springer-Verlag, 2011.
5. Gomółka L. Ocena oleju silnikowego w eksploatacji. Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, 2017.
6. Gomółka L, Augustynowicz A, Maciąg A. Analysis of the rank spreading the decline of oil in internal combustion engines, *Comustion Engines* 2011; 1 (144): 1-4.
7. Guan L, Feng X L, Xiong G. Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data, *Analytica Chimica Acta* 2008; 628: 117-120.
8. Han Z, Wang YQing X. Characteristics Study of In-Situ Capacitive Sensor for Monitoring Lubrication Oil Debris, *Sensors* 2017; 17 (12) 2851:1-13.
9. Idzior M. The development of combustion engines in the aspect of their manufacturing, *Comustion Engines* 2006; 1 (124): 60-70.
10. Laber A, Adamczuk K. Improving the working conditions of friction by using operation additives to lubricating oil, *Tribologia* 2014; 1: 27-39.
11. Laber S, Laber A. Property assessment lubricants and tribological lotos dynamic engine oil, *Tribologia* 2015; 3: 89-97.
12. Serrano J R. Imagining the Future of the Internal Combustion Engine for Ground Transport in the Current Context, *Applied Sciences* 2017; 7 (10) 1001: 1-5.
13. Stevan Junior S L, Paiter L, Galvao J R, Roque D V, Chaves E S. Sensor and Methodology for Dielectric Analysis of Vegetal Oils Submitted to Thermal Stress, *Sensors* 2015; 15 (10): 26457-26477.
14. Torrents J M, Pallas-Areny R. Sensing oil condition through temperature coefficient of dielectric constant 2003, XVII IMEKO World Congress - Metrology in the 3rd millennium, Dubrovnik, Croatia: 917-919.
15. Patch R, Kamenka D, Menzel J. Return voltage measurements Diagnostic interpretations based on the dielectric time constants, *Materials Science-Poland* 2009; 27 (4): 1157-1169.
16. Yang Y, Yang D, Hu Z, Zhang X. Oil Contamination Monitoring Based on Dielectric Constant Measurement 2009, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation(ICMTMA), Zhangjiajie, Hunan, China: 245-252.
17. Zhmud B. TBN, What's in It for me?, *Lube Magazine online* 2018; 4.
18. Zhu J, Yoon J M, He D W, Qu Y, Bechhoefer E. Lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction with particle filtering, *International Journal of Prognostics and Health Management* 2013; 4 Special issue 2: 1-15.
19. [kittiwake.com/online-sensors](http://kittiwake.com/online-sensors)
20. [pmlubricants.com.au](http://pmlubricants.com.au).
21. [specord-service.de](http://specord-service.de)