

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pplk mgr inż. Jarosława JUDY pt. "Eksperymentalne badania właściwości elektoreologicznych olejów smarujących zawierających ciecz jonową"

opracowana na podstawie pisma z dnia 13.07.2022r.
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”
Wojskowej Akademii Technicznej
prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanej tezy i celu rozprawy

Aktualnie w świecie jak i w Polsce brak jest wyników badań dotyczących ewentualnego zastosowania cieczy jonowych w układach elektoreologicznych. Same ciecz jonowe ze względu na swoje różnorodne i wyjątkowe właściwości są bardzo interesujące w zastosowaniu technicznym, między innymi w technice smarowniczej. Zastosowanie ich do układów elektoreologicznych olej smarowy – ciecz jonowa jest nowością w pełni zasługującą na podjęcie badań dotyczących ustalenia ich właściwości.

Teza pracy to stwierdzenie, że prawdopodobnie jest możliwe uzyskanie oleju smarowego o właściwościach elektoreologicznych, stosując jako dodatek do mineralnych lub syntetycznych olejów bazowych wybraną ciecz jonową. Wskazana przez Doktoranta wątpliwość dotycząca tezy pracy mająca swoje uzasadnienie to znaczna przewodność elektryczna wielu cieczy jonowych, wymagająca ustalenia optymalnej zawartości w oleju bazowym i przeprowadzenia badań elektoreologicznych i dielektrycznych. Celem rozprawy było zatem wytworzenie mieszanin na bazie olejów mineralnych i/lub syntetycznych zawierających jako dodatek wybraną ciecz jonową o właściwościach elektoreologicznych oraz ocena możliwości i zakresu funkcjonowania w zewnętrznym polu elektrycznym.

Z kolei celem utylitarnym było zaprojektowanie, zbudowanie i uruchomienie stanowiska do badań elektoreologicznych na bazie dostępnego standardowego lepkościomierza rotacyjnego Brookfilda DV-III Ultra.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Praca podzielona została na 14 podstawowych rozdziałów i napisana na 182 stronach, zawiera 101 rysunków w postaci wykresów, schematów i zdjęć oraz 27 tabel. Na początku rozprawy przedstawiono po spisie treści wykaz najważniejszych oznaczeń, a w końcowej części wykaz wykorzystanej literatury obejmujący 132 pozycje literaturowe głównie zagraniczne. Rozprawa jest zakończona streszczeniem w języku angielskim oraz pięcioma załącznikami dotyczącymi zgłoszenia patentowego z udziałem doktoranta i udzielonego prawa ochronnego na zestaw badawczy do badań cieczy elektoreologicznych.

Pierwszy rozdział rozprawy, po wstępie to podstawy elektoreologii cieczy o łącznej liczbie stron 42 obejmujący analizę aktualnego stanu wiedzy w temacie realizowanej rozprawy, opracowany na podstawie 75 pozycji literaturowych głównie zagranicznych. Ze względu na tematykę rozprawy

przedstawiono analizę cieczy nienewtonowskich, reostabilnych ze sterowaną granicą płynięcia oraz podziałem na ciecze magnetoreologiczne, ferromagnetyczne i elektoreologiczne zmieniające swoje właściwości fizyczne (optyczne, akustyczne, cieplne, czy reologiczne) pod wpływem pola elektrycznego lub magnetycznego, zwane też często cieczami inteligentnymi. Przedstawiono i scharakteryzowano modele układów elektoreologicznych opisujących podstawowe właściwości cieczy (sprężystość, plastyczność, lepkość) odpowiednio modelem Hooke'a, Saint-Venanta i Newtona. W modelach tych zachowanie cieczy podczas jej płynięcia opisuje się z reguły za pomocą zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi występującymi w cieczy a odkształceniami cieczy lub prędkością tych odkształceń mającymi przebieg liniowy. Praktycznie zależności te odbiegają od liniowych dlatego Doktorant przedstawia kolejne modele reologiczne cieczy zawierające funkcje liniowe i wykładnicze przyjmując że ciecz jest lepka lub lepkoplastyczna odpowiednio dla modelu Bingham'a, Ostwalda-de Waele, Herschela-Bulkleya i modelu dwuwiskotycznego. Doktorant wskazuje, że najczęściej wykorzystywanymi do opisu właściwości cieczy ER są modele: Newtona przy braku pola elektrycznego, Bingham'a w obecności pola elektrycznego dla heterogenicznej cieczy oraz model Ostwalda-de Waele w obecności pola elektrycznego dla homogenicznej cieczy ER. Kolejne opisywane przez Doktoranta modele układów elektoreologicznych to model przewodnościowy, elektrycznej warstwy podwójnej, mostków wodnych, polaryzacyjny, stratności dielektrycznej cząstek opisujące powstawanie efektu elektoreologicznego.

W podrozdziale drugim Doktorant opisuje rodzaje i charakterystyki cieczy elektoreologicznych z podziałem na ciecze jednofazowe homogeniczne i dwufazowe heterogeniczne. W cieczach heterogenicznych wskazuje na problemy doboru składników jako cieczy nośnej (bazowej) o małej przewodności elektrycznej i zawieszonych spolaryzowanych (aktywnych elektrycznie) miniaturowych cząstkach w celu uzyskania optymalnego efektu elektoreologicznego. Głównym problemem w użytkowaniu i badaniu tych cieczy jest sedymentacja, czyli proces opadania zawieszin ciała stałego w cieczy w wyniku działania sił grawitacji lub sił bezwładności. Przedstawiono wpływ przewodnictwa elektrycznego, właściwości dielektrycznych, stężenia i rozmiarów cząstek fazy stałej, temperatury na efekt ER. Ciecze homogeniczne pozbawione są efektu sedymentacji, są to np. ciekłe kryształy o niskiej masie cząsteczkowej i polimery ciekłokrystaliczne. Doktorant wskazuje że w przeciwieństwie do cieczy heterogenicznych bardzo mało jest informacji i publikacji na ich temat. Krzywe płynięcia tych cieczy $\tau = f(\dot{\gamma})$ determinują różnicę w zastosowaniach praktycznych.

W cieczach dwufazowych występuje naprężenie styczne graniczne, a w cieczach jednofazowych naprężenie to nie występuje. Przedstawiane w literaturze charakterystyki lepkościowe cieczy homogenicznych były podobne do charakterystyk Ostwalda de Waele dla przyłożonych różnych pól elektrycznych, a ciecze heterogeniczne miały charakterystyki cieczy Bingham'a. Natomiast przy braku pola elektrycznego charakterystyki dla tych cieczy były newtonowskie.

W podrozdziale trzecim Doktorant opisuje metody i warunki realizacji badań właściwości cieczy elektoreologicznych wskazując na wykorzystanie w tych badaniach zróżnicowanych reometrów oraz warunków spełniających przepływ laminarny izotermiczny i w określonym czasie przebywania cieczy w polu elektrycznym.

Rozdział drugi rozprawy o objętości 12 stron poświęcony został opisowi charakterystyk cieczy jonowych oparty na wykorzystaniu 22 pozycji literaturowych głównie polskich. W informacjach ogólnych przedstawiono możliwości wytwarzania cieczy jonowych poprzez kombinacje organicznego kationu oraz nieorganicznego lub organicznego anionu z podaniem ich nazwy i właściwości. Opisano klasyfikację oraz właściwości cieczy jonowych takie jak lepkość, gęstość, temperatura topienia, właściwości elektrochemiczne wskazując na bardzo ważną właściwość cieczy jonowych tj. posiadanie „okna elektrochemicznego” (zakres stałego potencjału elektrochemicznego), konduktywność (przewodność właściwa) oraz polarność.

Rozdział trzeci rozprawy opracowany na dwóch stronach to podsumowanie i wnioski programowe z przeprowadzonej analizy stanu problemu. Stwierdzono, że czynnikami, które wpływają na efekt ER są: natężenie pola elektrycznego, częstotliwość pola elektrycznego,

przewodnictwo elektryczne, właściwości dielektryczne składników cieczy, stężenie objętościowe składnika aktywnego elektrycznie oraz temperatura. Poprzez łączenie różnych cieczy nośnikowych (cieczy izolujących) i dodatków o wysokiej stałej dielektrycznej, poszukiwana jest wysokowydajna, z silnym efektem ER, idealna ciecz homogeniczna, która zniweluje proces sedymentacji. Dotychczas brak jest wyników badań dotyczących ewentualnego zastosowania cieczy jonowych w układach elektoreologicznych. Przedstawiono siedem punktów programowych określające kolejne etapy badań do zrealizowania rozprawy doktorskiej.

Czwarty rozdział to teza i cel rozprawy, który scharakteryzowałem w pkt.1 recenzji. Planowany przez Doktoranta zakres badań układów elektoreologicznych z zastosowaniem cieczy jonowych ma charakter eksperymentalny i nigdy przez nikogo nie był realizowany.

Rozdział piąty opracowany na 41 stronach dotyczy zakresu i metodyki badań własnych. Przedstawiono w nim algorytm realizacji rozprawy i badań własnych. Warto było dodać w algorytmie odniesienie o weryfikacji własnych badań wykonanych na zaprojektowanym stanowisku z przeprowadzonymi na reometrze Anton Paar oraz porównania uzyskiwanego efektu ER w stosunku do komercyjnej cieczy elektoreologicznej LID 3354s. Na podstawie wcześniej prowadzonych badań w Zakładzie Materiałów Pędnych i Smarów WIM WAT, dotyczących właściwości tribologicznych olejów i cieczy jonowych, Doktorant wybrał do swoich badań pięć olejów smarowych i siedem cieczy jonowych.

W kolejnym podrozdziale Doktorant przedstawił metodyki i metody badań własnych, a w tym:

- a) - metodykę oceny mieszalności wybranych olejów i cieczy jonowych, wybrano mieszanie ręczne i ultradźwiękowe przy użyciu płuczki ultradźwiękowej. Do wytworzenia mieszanin wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich analizy i badań elektoreologicznych przygotowano próbki o objętości 50ml z 5% udziałem cieczy jonowych,
- b) - metodyki badania podstawowych właściwości fizyko-chemicznych wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich mieszanin dotyczące wyznaczania gęstości, lepkości, polaryzacji. Badania wykonano na posiadanej specjalistycznej aparaturze (tensjometr KSV Sigma 701, viskozymetr AMVn Anton Paar, refraktometr Abbego) zgodnie z instrukcjami,
- c) - metodykę badań właściwości elektoreologicznych wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich mieszanin. Celem tych badań było wyznaczenie zależności zmiany naprężeń ścinających w funkcji szybkości ścinania $\tau = f(\dot{\gamma})$ zwanych krzywymi płynięcia dla przyjętych wartości natężenia pola elektrycznego 0,1, 0,2 i 0,3 kV/mm i prędkości obrotowej wrzeciona lepkościomierza 5, 25, 75, 150 i 250 obr/min. Aby osiągnąć wskazany cel Doktorant zaprojektował, zbudował i uruchomił własne stanowisko do badań elektoreologicznych na bazie standardowego lepkościomierza rotacyjnego Brookfield DV – III Ultra. Głównym elementem zaprojektowanym i wykonanym była przystawka PCE 11 o różnych średnicach cylindrów 13,5, 15, 17 i 20 mm z wbudowanymi elektrodami i przewodami doprowadzającymi wysokie napięcie. W ten sposób doktorant zrealizował użyteczny cel swojej pracy doktorskiej. Stanowisko to zostało zgłoszone 25.06.2015 r. do Urzędu Patentowego RP pod numerem zgłoszenia W124200, a 10.02.2017 r. Urząd Patentowy RP udzielił Prawa Ochronnego na rzecz Wojskowej Akademii Technicznej. Według tej metodyki Dyplomant zweryfikował poprawność działania zaprojektowanego układu wykonując badania wstępne (rozruchowe) przeprowadzone z wykorzystaniem komercyjnej dwufazowej (heterogenicznej) cieczy elektoreologicznej LID3354s składającej się z cząstek polimerowych o średnicy kilkudziesięciu mikrometrów i oleju silikonowego.
- d) - metodykę badań weryfikacyjnych reometrem firmy Anton Paar zastosowaną w celu sprawdzenia wyników badań elektoreologicznych wykonanych na zaprojektowanym stanowisku z wynikami uzyskanymi na uznanym i certyfikowanym przyrządzie specjalistycznym reometrze Physica MCR 101 zrealizowanymi w zakresie zmiany natężenia pola elektrycznego 0 – 0,8 kV/mm. Weryfikację wykonano dla jednej mieszaniny GP1+CJ001.
- e) - metodykę badań w spektroskopii dielektrycznej wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich mieszanin. Badania według tej metodyki zrealizowano na analizatorze impedancji firmy Hewlett Packard typ HP 4192A wyznaczając charakterystyki stałej dielektrycznej, rezystancji i konduktywności dla różnych napięć zasilających komórkę pomiarową 0-20V i częstotliwości 100 Hz do 10 MHz. Do pomiarów użyto komórek z elektrodami z tlenku cynowo-indowego o rezystancji 100Ω przy częstotliwości odcięcia 400 Hz mającej wpływ na analityczną przydatność wyników badań.

f) – metodykę badań mikroskopowych in situ efektu ER w wytworzonych mieszaninach według której wykonano badania w celu wyjaśnienia procesów elektoreologicznych zachodzących w badanej cieczy ER LID3354s i wytworzonych mieszaninach GP1+CJ001 oraz PA06+CJ008. Badania wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego NIKON ECLIPSE LV100 do którego dodatkowo Doktorant zaprojektował i wykonał naczynie z elektrodami oddalonymi na 2 mm do wlewania analizowanej cieczy oraz zasilania polem elektrycznym o natężeniu 0 - 0,4 kV/mm.

Rozdział szósty rozprawy najobszerniejszy i najważniejszy opracowany na 55 stronach to wyniki badań własnych oraz ich analiza.

Podrozdział pierwszy to wyniki badań mieszalności wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich analiza i wytworzenie mieszanin do badań właściwości elektoreologicznych. Dla przyjętych pięciu rodzajów olejów bazowych i siedmiu cieczy jonowych możliwe było wytworzenie 35 kombinacji ich mieszanin. Doktorant przedstawił w rozprawie tylko dziewięć takich kombinacji z których wytypowano dwie GP1+CJ001 oraz PA06+CJ008 z 5% udziałem cieczy jonowej uznane za dobrze się mieszające bez sedymentacji po 2 i 48 godzinach. W rozprawie nie ma uzasadnienia przyjęcia 5 % udziału cieczy jonowych w mieszaninach, prawdopodobnie wynika to z wcześniejszych badań olejów i smarów prowadzonych w Zakładzie Materiałów Pędnych i Smarów. Udział ten został zmniejszony do 2% w badaniach elektoreologicznych wytypowanych mieszanin ponieważ wcześniej przyjęta 5% zawartość była zbyt duża i prowadziła do elektrycznego przebicia, co uniemożliwiało pomiary zmian naprężeń ścinających i lepkości w funkcji natężenia pola elektrycznego i szybkości ścinania. Jak się później okazało w badaniach mechanizmu ER w wytworzonych mieszaninach, mieszanie ręczne i ultradźwiękowe nie spowodowało ujednorodnienia dyspersji cząstek cieczy jonowych, występowały cząstki o wielkości nano i mikro nawet do kilkudziesięciu mikrometrów.

Podrozdział drugi to wyniki badań podstawowych właściwości fizyko-chemicznych wybranych olejów, cieczy jonowych i wytworzonych mieszanin oraz ich analiza. Największą gęstość w temperaturze 25°C posiadały ciecze jonowe (1,116 g/cm³ dla CJ001 i 1.061 g/cm³ dla CJ008), gęstość olejów bazowych w tej temperaturze wynosiła 0,823 g/cm³ dla GP-1 oraz 0,816 g/cm³ dla PAO-6. Gęstość analizowanych mieszanin nieznacznie wzrastała ze zmianami występującymi na trzecim miejscu po przecinku. Dla wszystkich badanych cieczy i mieszanin wraz ze wzrostem temperatury od 25 do 100 °C gęstość ta zmniejszała się opisaną w rozprawie funkcją liniową. Z kolei największą lepkość kinematyczną i dynamiczną w temperaturze 25 °C posiadały ciecze jonowe ($\nu=495$ mm²/s i $\eta=552,42$ mm²/s dla cieczy CJ001 oraz $\nu=308,43$ mm²/s i $\eta=327,24$ mm²/s dla cieczy CJ008). Natomiast lepkość olejów bazowych była znacząco mniejsza dla GP-1 ($\nu=15,33$ mm²/s i $\eta=12,61$ mm²/s) dla PAO-6 ($\nu=58,05$ mm²/s i $\eta=47,36$ mm²/s). Lepkość analizowanych mieszanin zwiększyła się w stosunku do olejów bazowych i to z większą wartością dla mieszaniny PAO-6+CJ008. Dla wszystkich badanych cieczy i mieszanin wraz ze wzrostem temperatury od 25 do 100 °C lepkość ta zmniejszała się opisaną w rozprawie funkcją wykładniczą. W celu określenia podatności analizowanych cieczy i mieszanin na zmiany lepkości w funkcji temperatury Doktorant wyznaczył wskaźnik lepkości którego wartość przekraczała 100, co oznaczało dużą odporność na zmiany temperatury, ale w zakresie od 40 do 100 °C. Zdolności polaryzacyjne cieczy jonowych, olejów bazowych i ich mieszanin Doktorant określił wyznaczając współczynnik załamania światła i refrakcję właściwą. Uzyskano mieszaniny o większej refrakcji właściwej niż ich oleje bazowe.

W podrozdziale trzecim Doktorant przedstawia wyniki badań właściwości elektoreologicznych wytworzonych mieszanin oraz ich analizę. Przystępując do tych badań w pierwszej kolejności wykonał badania ER nazwane jako rozruchowe dla heterogenicznej cieczy elektoreologicznej LID3354s składającej się z cząstek polimerowych i oleju silikonowego w celu potwierdzenia poprawności i prawidłowości działania zaprojektowanego stanowiska z reometrem Brookfielda. Badania prowadzono w zestawie przystawki PCE11 oznaczoną JJ1 (D=20 mm, d=3,2 mm) z największą różnicą średnic cylindra i wrzeczona ze względu na dużą lepkość (271,03 mPa s w temperaturze 22 C bez pola elektrycznego). Wyznaczono charakterystyki zmiany naprężeń stycznych w funkcji szybkości ścinania i natężenia pola elektrycznego (0 – 0,3 kV/mm) oraz zmian lepkości dynamicznej od szybkości ścinania. Analizowana ciecz w obecności pola elektrycznego zachowuje się jak ciecz opisywana modelem Bingham, a w przypadku braku tego pola jako ciecz Newtonowska. W całym zakresie prowadzonych badań zachowywała się jako ciecz

elektroreologiczna (wzrost lepkości i naprężeń ścinających dla rozpatrywanego zakresu natężenia pola elektrycznego), co pozwoliło Doktorantowi stwierdzić, że urządzenie działa poprawnie i może być wykorzystane do badań cieczy ER. W pierwszej kolejności badaniom elektroreologicznym poddano mieszaninę GP1+CJ001 przy tych samych wartościach natężenia pola elektrycznego i prędkości obrotowej wrzeciona, ale w zestawie przystawki PCE11 oznaczoną JJ8 ($D=13,5$ mm, $d=11,7$ mm) o najmniejszej różnicy średnicy wrzeciona i średnicy cylindra. Uzyskane charakterystyki zmiany naprężeń ścinających w funkcji szybkości ścinania i natężenia pola elektrycznego oraz lepkości posiadały odmienny przebieg niż ciecz LID3354s. W początkowej fazie przy braku pola elektrycznego badana ciecz wykazywała charakter wcześniej opisywanej cieczy Bingham, chociaż jej naprężenie graniczne miało wartość 0,44 Pa. W obecności pola elektrycznego do wartości 0,2 kV/mm charakterystyka reologiczna mogła być opisywana modelem Herschela-Bulkey'a typowym dla lepkoplastycznej cieczy. Zwiększając natężenie pola elektrycznego do wartości 0,3 kV/mm badana ciecz zachowywała się ponownie jak ciecz Bingham przyjmując ujemny efekt elektroreologiczny objawiający się spadkiem lepkości dynamicznej do wartości lepkości przy $E=0$. Kolejną badaną cieczą była PAO6+CJ008 w zestawie oznaczonym JJ6 ($D=15$ mm, $d=11,7$ mm) ze względu na inną lepkość niż poprzednio badana mieszanina. Uzyskane dla tej cieczy charakterystyki zmiany naprężeń ścinających w funkcji szybkości ścinania i natężenia pola elektrycznego oraz lepkości posiadały odmienny przebieg. W początkowej fazie przy braku pola elektrycznego badana ciecz wykazywała charakter cieczy newtonowskiej, a w obecności pola elektrycznego do wartości 0,2 kV/mm charakterystyka reologiczna mogła być opisywana równaniem Ostwalda de Waele typowym dla lepkiej cieczy pseudoplastycznej. Zwiększając natężenie pola elektrycznego do wartości 0,3 kV/mm badana ciecz PAO6+CJ008 zachowywała się ponownie jak ciecz newtonowska przyjmując ujemny efekt elektroreologiczny objawiający się spadkiem lepkości dynamicznej do wartości lepkości przy $E=0$. Wspólną cechą badanych mieszanin była utrata efektu elektroreologicznego ze wzrostem natężenia pola elektrycznego powyżej 0,2 kV/mm. Aby potwierdzić ten efekt i uzyskać całkowitą pewność co do właściwej interpretacji uzyskanych wyników na zaprojektowanym stanowisku Doktorant przeprowadził dodatkowe badania elektroreologiczne dla cieczy GP1+CJ001, ale na specjalistycznym urządzeniu reometrze Anton Paar. Przeprowadzone badania pozwoliły uzyskać zależność zmiany lepkości dynamicznej w funkcji czasu pomiaru dla zakresu natężenia pola elektrycznego 0 – 0,8 kV/mm. Wykazano istnienie pozytywnego efektu ER, a także negatywnego efektu występującego przy wyższym natężeniu pola elektrycznego, około 0,6 kV/mm. Ciekawym efektem poznawczym było wykonanie ponownej próby poddania tej samej cieczy działaniu pola elektrycznego w wyniku której stwierdzono całkowity zanik efektu ER. Ciecz straciła właściwości elektroreologiczne, a wyjaśnienie mechanizmu tych zmian Doktorant przedstawił w kolejnych rozdziałach dotyczących badań w spektroskopii dielektrycznej i obserwacji mikroskopowych.

Podrozdział czwarty to wyniki badań spektroskopii dielektrycznej wybranych olejów, cieczy jonowych i wytworzonych mieszanin oraz ich analiza. Spektroskopia dielektryczna oraz jej odmiana zwana spektroskopią impedancyjną to metoda spektroskopowa pozwalająca badać właściwości dielektryczne materiału w funkcji częstotliwości oraz amplitudy przyłożonego pola elektrycznego. Przeprowadzone badania pozwoliły Doktorantowi wyznaczyć szczegółowe charakterystyki względnej przenikalności elektrycznej ϵ , rezystancji R , konduktywności σ w funkcji zmiennej częstotliwości od 0,1 do 10 000 kHz i zmiennych wartości napięcia zasilającego 0, 5, 10, 16, i 20V dla wszystkich badanych cieczy oraz cieczy elektroreologicznej LID3354s. Przedstawiono również charakterystyki względnej przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości dla pierwszego i drugiego pomiaru dla cieczy CJ008 przy napięciu 0 – 10V. Doktorant w tabeli 27 w kolumnie stała dielektryczną ϵ podaje tę wartość bez miana co oznacza, że jest to względna przenikalność elektryczna zwana też stałą dielektryczną, oznaczaną przez ϵ_r a nazwana w pracy rzeczywistą przenikalnością elektryczną. Przenikalność dielektryczna posiada swoje miano Farad/m.

Ciecze jonowe CJ008 i CJ001 wobec braku pola elektrycznego posiadały porównywalną wysoką wartość stałej dielektrycznej (dla CJ001 $\epsilon=1035$, dla CJ008 $\epsilon=1027$). W przypadku występowania

pola elektrycznego wystąpił silny i zróżnicowany wpływ na spadek wartości rzeczywistej przenikalności dielektrycznej. W badanym przypadku znacząco większy na ciecz jonową CJ001, aniżeli na ciecz CJ008 co z kolei miało wpływ na uzyskanie słabszego efektu ER dla mieszaniny zawierającej ciecz jonową CJ001. Ponowny pomiar względnej przenikalności elektrycznej dla cieczy CJ008 wykazał, że wartości przenikalności osiągnęły zakres typowy dla cieczy dielektrycznych i izolujących. Ponowne przyłożenie napięcia do tej samej próbki cieczy CJ008 przyspieszyło proces destrukcji i doprowadziło do takiego stanu jak w cieczy CJ001, która już po jednorazowym działaniu pola elektrycznego uległa takiej destrukcji (względna przenikalność elektryczna $\epsilon < 10$). W przypadku olejów bazowych PAO-6 i GP-1 stale dielektryczne były stabilne zarówno w funkcji napięcia pola elektrycznego jak i w funkcji jego częstotliwości nawet do 1000 kHz (dla GP-1 $\epsilon = 2,3$ a dla PAO-6 $\epsilon = 2,02$). Oznacza to, że właściwości dielektryczne obu olejów bazowych nie zależą od przyłożonego pola elektrycznego jak również to, że są nieprzewodzące i przydatne jako ciecze izolujące w mieszaninach ER. W przypadku badań mieszanin GP-1+CJ001 oraz PAO-6+CJ008 z 2% udziałem cieczy jonowych nie przyniosło to istotnych zmian stałej dielektrycznej w stosunku do olejów bazowych. Najwyższą rezystancję bez obecności pola elektrycznego posiadał olej bazowy GP-1 ($R = 3,2 \cdot 10^9 \Omega$) i jego mieszanina z cieczą jonową CJ001 ($R = 1,71 \cdot 10^9 \Omega$). Wraz ze wzrostem pola elektrycznego charakterystyki opornościowe w zakresie częstotliwości do 5 kHz dla oleju GP-1 oraz 10 kHz dla mieszaniny GP-1+CJ001 wykazywały rozproszenie po czym stabilizowały się i stopniowo malały. Olej bazowy PAO-6 bez obecności pola elektrycznego posiadał rezystancję $R = 9,8 \cdot 10^8 \Omega$, a jego mieszanina z cieczą jonową CJ008 ($R = 1,14 \cdot 10^8 \Omega$). W tej mieszaninie niewielka zawartość cieczy jonowej spowodowała większy spadek oporności obrazując dużą przewodność cieczy jonowej CJ008. Wraz ze wzrostem pola elektrycznego charakterystyki opornościowe w zakresie częstotliwości do 10 kHz dla oleju PAO-6 oraz 100 kHz dla mieszaniny PAO-6+CJ008 wykazywały podobne rozproszenie po czym stabilizowały się i stopniowo malały.

Otrzymane charakterystyki konduktywności będące odwrotnością do rezystancji, a świadczące o zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego wykazały największą jej wartość dla cieczy jonowych dla CJ008 $\sigma = 2,73 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$, a dla CJ001 $\sigma = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$ co oznacza ich dobrą przewodność, ale zmieniającą się w zależności od pola elektrycznego i częstotliwości. Oleje bazowe wykazały odmienne charakterystyki do cieczy jonowych. Przebieg tych charakterystyk był typowy jak dla cieczy dielektrycznych. Dla oleju bazowego GP-1 przewodność elektryczna była najmniejsza $\sigma = 9,33 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$, a domieszka silnie przewodzącej cieczy jonowej CJ001 spowodowała duży wzrost przewodnictwa elektrycznego do wartości $\sigma = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ S/m}$.

Charakterystyki wzorcowej cieczy elektoreologicznej LID3354s wyznaczone w zakresie napięcia stałego pola elektrycznego od 0 do nawet 35 V posiadały podobny charakter zmian, ale o stabilnych wartościach niezależnie od wartości przyłożonego napięcia. Doktorant zaznacza, że dokonane pomiary rzeczywistej przenikalności dielektrycznej powyżej częstotliwości odcięcia 400 kHz są zniekształcone przez właściwości komórki pomiarowej i mają wątpliwą wartość.

Podrozdział piąty dotyczył mikroskopowych badań mechanizmu ER w wytworzonych mieszaninach oraz ich analizy. Doktorant dokonał szczegółowej analizy przyczyny zaniku efektu elektoreologicznego w wytworzonych mieszaninach GP-1+CJ001 oraz PAO-6+CJ008 udokumentowanej zdjęciami wykonanymi przy pomocy mikroskopu optycznego polaryzacyjnego. Podstawowym mechanizmem odpowiedzialnym za efekt ER obu mieszanin, poddanych działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, było powstawanie „łańcuchów lub/i strumieni fibrylowych” złożonych z mikro/nanocząstek cieczy jonowej, „rozpostartych” pomiędzy elektrodami wzdłuż linii działania pola elektrycznego. Działające pole elektryczne po osiągnięciu pewnej wartości progowej doprowadzało do trwałej destrukcji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych” i zaniku efektu ER oraz gromadzenia się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach (przy $E = 0,3 \text{ kV/m}$). W cieczy wzorcowej LID3354s również tworzyły się łańcuchy fibrylowe złożone z polimerowych cząstek, a ich struktura była stabilna i nie ulegała zmianom nawet przy natężeniu pola elektrycznego $0,6 \text{ kV/mm}$.

W rozdziale siódmym opracowanym na trzech stronach przedstawiono podsumowanie badań własnych pozwalające Doktorantowi stwierdzić, że uzyskane wyniki pozwoliły w pełni zweryfikować tezę i osiągnąć cel rozpraw doktorskiej.

Wnioski końcowe i prognozy stanowią ósmy rozdział rozprawy opracowany na trzech stronach. Doktorant wskazuje, że uzyskane wyniki dały szczegółową informację o tym, że jest możliwość uzyskania quasihomogenicznego oleju smarowego o właściwościach elektoreologicznych stosując jako dodatek do mineralnych lub syntetycznych olejów bazowych ciecz jonową. Jednak uzyskana ciecz nie zasługuje na nazwę „inteligentnej” cieczy elektoreologicznej. Działające pole elektryczne po osiągnięciu pewnej wartości progowej doprowadza do trwałej destrukcji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych” i zaniku efektu ER oraz gromadzenia się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach (przy $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$). Charakterystyki elektoreologiczne badanych mieszanin zależały także od właściwości fizykochemicznych (gęstości, lepkości, zdolności polaryzacyjnej) ich składników oraz od zróżnicowania ich wartości, m.in. różnicy lepkości oleju bazowego izolującego i dodanej cieczy jonowej. W prognozie na dalsze badania Doktorant wskazuje, że istnieje potrzeba wytworzenia i zbadania w pełni homogenicznych cieczy ER, tzn. takich, w których składnik aktywny elektrycznie i bazowy olej izolujący stanowią roztwór. Wymieszanie obu składników dotyczy już skali molekularnej, a skutki oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego na taką homogeniczną mieszaninę, tj. na molekuly i jony ich składników są praktycznie nieznane.

3. Ogólna ocena merytoryczna

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Judy cechuje wysoki poziom naukowy i profesjonalizm dotyczący prezentacji zarówno rezultatów badań jak i przeprowadzonej analizy. Cechuje ją również kompleksowość przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz trafność doboru literatury. W rozprawie zarówno naukowy jak i użyteczny cel pracy został sformułowany w sposób dość szeroki, dzięki temu było możliwe uogólnienie wszystkich celów cząstkowych jakie zostały sformułowane w każdym z rozdziałów pracy. Zakres pracy jest imponujący, a jej układ edytorski poprawny. Przedstawione wyniki całości badań zaprezentowano w możliwie zwartej formie zwłaszcza te dotyczące procesów elektoreologicznych. Przedstawiają one nowatorskie podejście w doborze olejów bazowych i cieczy jonowych do wytworzenia mieszaniny o właściwościach elektoreologicznych. Uzyskane charakterystyki elektoreologiczne na zaprojektowanym stanowisku zostały przez Doktoranta zweryfikowane na certyfikowanym reometrze Anton Paar i porównane z komercyjną cieczą elektoreologiczną LID3354s, co zdaniem recenzenta potwierdza wysoki poziom znajomości realizowanych zagadnień i dążność do uzyskania poprawnego wyniku badań własnych. Istotnym elementem rozprawy było też wyjaśnienie mechanizmu zaniku efektu ER w badanych mieszaninach.

Oprócz dorobku naukowego i badawczego jaki został zaprezentowany w rozprawie pozostały dorobek Doktoranta obejmuje siedem publikacji w recenzowanych artykułach i konferencjach naukowych, zgłoszenie patentowe na zestaw badawczy nr W.124.200 z 2015 r. oraz kierowanie i wykonanie projektu GD/721/2012r, pt.: „Badanie i ocena właściwości elektoreologicznych olejów smarowych”.

4. Uwagi szczegółowe

1. Wybór tworzenia mieszaniny olejów bazowych i cieczy jonowych poprzez ręczne mieszanie i użycie płuczki ultradźwiękowej wydaje się być nieoptymalny pod względem osiągnięcia jednorodnej dyspersji cząstek cieczy jonowej. Dodatkowo przyjęcie w mieszaninie 5% udziału objętościowego cieczy jonowej, a potem zmiana na 2% nie ma w pracy przedstawionego uzasadnienia i też jest nie wiadome czy ta zawartość jest optymalna dla uzyskania efektu elektoreologicznego.

2. W tabeli 18, str.82 powinno być podana nazwa współczynnika lepkości SMC, a nie szybkości ścinania.
3. Na stronie 113 analizując uzyskaną charakterystykę naprężenia ścinającego w funkcji natężenia pola elektrycznego dla cieczy ER LID3354s podano odmienne wartości tego naprężenia przy natężeniu pola elektrycznego 0,3kV/mm, prędkości obrotowej wrzeciona 5 i 250 obr/min niż zostały przedstawione w tabeli 23. Podobnie błąd taki występuje dla cieczy GP1+CJ001 na stronie 118, w stosunku do tabeli 24 dla natężenia pola elektrycznego 0,2 kV/mm i prędkości obrotowej wrzeciona 5 obr/min oraz dla cieczy PA06+CJ008 na stronie 123 w stosunku do tabeli 25 (prędkość wrzeciona 250 obr/min).

5. Końcowa ocena rozprawy

Oceniając całość recenzowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą i badawczą analizowanych w pracy zagadnień, które obejmowały problemy z zakresu inżynierii mechanicznej w tym budowy i eksploatacji maszyn. Na każdym etapie pracy, począwszy od sformułowania celu, poprzez przegląd literatury, uzasadnienie wyboru obiektu badań, sposób ich realizacji i interpretacji wyników, Doktorant wykazał się wysokim opanowaniem warsztatu naukowego i badawczego.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

