

doi:10.15199/48.2022.06.11

Zastosowanie nanocząstek do modyfikacji cieczy elektroizolacyjnych stosowanych w transformatorach energetycznych

Streszczenie. Jedną z obecnie rozwijanych metod poprawy właściwości cieczy elektroizolacyjnych jest ich modyfikacja przy użyciu nanoprošków. Poprawa parametrów cieczy zależy od rodzaju zastosowanego nanoprošku, wielkości nanocząstek, jak również od sposobu preparacji nanocieczy. Aktualnie na świecie prowadzone są badania ukierunkowane głównie na poprawę wytrzymałości elektrycznej oraz przewodności cieplnej modyfikowanych cieczy bazowych. W artykule przedstawiono przegląd stosowanych nanomodifikatorów, metody preparacji nanokolojdów oraz omówiono zagadnienia związane z ich stabilnością.

Abstract. One possibility to improve the parameters of insulating liquids is their modification by means of nanopowders. The improvement of the dielectric fluid parameters depends on the type and size of the nanopowder as well as on the method of nanofluid preparation. Research conducted around the world are mainly focused on improvement the electrical strength and thermal conductivity of modified insulating liquids. The article presents an overview of nanomodifiers, methods of nanocolloids preparation and the issues related to their stability. (**Application of nanoparticles for modification of electro-insulating liquids used in power transformers**).

Słowa kluczowe: cieczy elektroizolacyjne, nanocząstki, nanociecze, stabilność zawieszenia.

Keywords: electro-insulating liquids, nanoparticles, nanofluids, suspension stability.

Wstęp

Olej mineralny stanowi obecnie najlepiej poznaną i najczęściej stosowaną ciecz elektroizolacyjną. Od ponad 100 lat jest używany jako izolacja ciekła we wszystkich rodzajach transformatorów olejowych. Obecnie alternatywę dla oleju mineralnego stanowią estry syntetyczne i naturalne, których udział w światowym rynku wzrasta sukcesywnie od około 20 lat. Estry syntetyczne stosowane są głównie w transformatorach dystrybucyjnych i trakcyjnych, natomiast pozyskiwane z nasion roślin oleistych estry naturalne pełnią funkcję elektroizolacyjną głównie w hermetycznych transformatorach dystrybucyjnych [1]. Zarówno olej mineralny jak i estry, oprócz szeregu zalet, posiadają też pewne wady, które ograniczają ich użytkowanie.

Pomimo, że olej mineralny stanowi dobrze poznaną ciecz o stosunkowo niskim koszcie zakupu, należy zwrócić uwagę na fakt, że jest on pozyskiwany z nieodnawialnych zasobów ropy naftowej oraz charakteryzuje się niską biodegradowalnością, a zatem nie powinien być stosowany w transformatorach usytuowanych na obszarach chronionych. Do innych istotnych wad oleju mineralnego należy zaliczyć niską temperaturę zapłonu (160-170°C) i palenia (170-180°C) par [1], a także dużą różnicę przenikalności elektrycznej pomiędzy tą cieczą ($\epsilon_w=2,2$) [1] a zaimpregnowanymi nią materiałami celulozowymi ($\epsilon_w\approx 4,2$) [2, 3], co negatywnie wpływa na rozkład pola elektrycznego w układzie izolacyjnym.

Estry naturalne i syntetyczne stanowią atrakcyjną alternatywę dla oleju mineralnego ze względu na wysoką biodegradowalność oraz bezpieczeństwo pożarowe (temperatura zapłonu >300°C i >250°C oraz palenia >350°C i >300°C odpowiednio dla estru naturalnego i syntetycznego) [1,4]. Jedną z ich wad jest 5-krotnie i 8-krotnie wyższa wartość współczynnika strat dielektrycznych odpowiednio dla estrów naturalnych i syntetycznych. Ponadto, uwzględniając ich większą gęstość i lepkość w porównaniu do oleju mineralnego, zastosowanie estrów w transformatorach sieciowych związane jest z koniecznością przeprowadzenia zmian konstrukcyjnych. Celem tego zabiegu jest poprawa warunków chłodzenia transformatora, zważywszy, że większa lepkość estrów utrudnia

odprowadzanie ciepła z uzwojeń. Projektując układ izolacyjny transformatora należy uwzględnić, że estry naturalne charakteryzują się niższą wartością napięcia przebicia udarem piorunowym w stosunku do oleju mineralnego, przez co konieczne jest zachowanie odpowiednio większych przerw międzyelektrodowych [5]. Warto również zwrócić uwagę, że temperatura płynięcia estrów nie jest tak niska jak dla oleju mineralnego, dlatego też estry nie powinny być stosowane na obszarach o klimacie polarnym. Literatura opisuje znaczny spadek wytrzymałości elektrycznej estrów w zakresie temperatury od 0 do -21°C [5]. Bardzo istotnym ograniczeniem estrów naturalnych jest ich podatność na proces utleniania, co wynika z ich struktury chemicznej, w której występują wiązania nienasycone między atomami węgla. Niemniej jednak należy podkreślić, że produktami starzenia estrów naturalnych są nasycone kwasy tłuszczowe nieszkodliwe dla środowiska. Natomiast zestarzony olej mineralny wykazuje trzykrotnie wyższą szkodliwość ekologiczną niż świeży olej z uwagi na zawartość policyklicznych związków aromatycznych (PAH) [6]. Najwyższą stabilnością oksydacyjną spośród omawianych cieczy charakteryzują się estry syntetyczne, których struktura ulega rozkładowi na alkohol i kwas dopiero w temperaturze znacznie przekraczającej temperaturę pracy estru w kadzi transformatora.

Główne kierunki badań związane z poprawą właściwości cieczy izolacyjnych

W celu poprawy właściwości wyżej opisanych cieczy elektroizolacyjnych dokonuje się ich modyfikacji poprzez:

- mieszanie różnych rodzajów cieczy izolacyjnych
- pozyskiwanie olejów naturalnych z genetycznie modyfikowanych ziaren oleistych
- nanomodyfikację cieczy izolacyjnych.

Pomysł tworzenia mieszanin różnych cieczy elektroizolacyjnych pojawił się po zabiegach wymiany zestarzonego oleju mineralnego na ester. Celem tych działań było wydłużenie czasu pracy transformatorów. Pierwsza taka wymiana oleju mineralnego na ester naturalny odbyła się w 2001 roku w trójfazowym transformatorze o mocy 50 MVA, który był eksploatowany od 1957 roku [7]. W wyniku wymiany oleju mineralnego na

ester naturalny pozostałości oleju znajdujące się w materiałach celulozowych migrują do nowej cieczy wpływając na jej właściwości. Zauważono, że obecność oleju mineralnego w estrze naturalnym poprawiła jego temperaturę płynięcia oraz lepkość [7].

Z kolei dodając estry do oleju mineralnego uzyskuje się mieszaninę o wyższej wartości temperatury zapłonu, co zwiększa bezpieczeństwo użytkowania takiej cieczy, jak również wzrasta przenikalność elektryczna w stosunku do czystego oleju mineralnego, dzięki czemu poprawie ulega rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym papier-olej [8]. Ponadto, mieszanina ta posiada wyższą rozpuszczalność wody [9]. W patencie [10] wskazano optymalne proporcje oleju mineralnego oraz estru naturalnego w mieszaninie, która zapewnia poprawę właściwości cieplnych w porównaniu do cieczy bazowych.

Kolejny kierunek badań związany jest z poprawą stabilności oksydacyjnej estrów naturalnych, co możliwe jest dzięki pozyskiwaniu tych cieczy z genetycznie modyfikowanych roślin oleistych. Obecnie, zastosowanie estrów naturalnych jako cieczy elektroizolacyjnych sprowadza się do hermetycznych transformatorów, co wynika z konieczności ograniczania dostępu tlenu do tych cieczy w celu zmniejszenia szybkości ich utleniania. Tempo utleniania estrów naturalnych zależy od ilości wiązań nienasyconych między węglami w łańcuchu węglowodorowym występującym w strukturze chemicznej estru. Wraz ze wzrostem zawartości wiązań nienasyconych rośnie szybkość utleniania. W celu zmniejszenia udziału frakcji nienasyconej w estrach naturalnych, ziarna roślin oleistych poddaje się modyfikacji genetycznej. Zabieg ten polega na traktowaniu ich czynnikami takimi jak promieniowanie gamma, azydek sodu czy siarczan dimetylu [11]. W rezultacie tego działania, olej naturalny otrzymany z tak modyfikowanych roślin zawiera znacznie więcej kwasów nasyconych oraz jednonienasyconych w porównaniu do oleju tłoczonych z roślin niemodyfikowanych. Niestety wysoka zawartość nasyconych kwasów tłuszczowych jest przyczyną wyższej lepkości tych cieczy, co z kolei wpływa na pogorszenie warunków odprowadzania ciepła z uzwojeń i rdzenia transformatora.

Najpopularniejszym kierunkiem badań zorientowanym na poprawę właściwości cieczy elektroizolacyjnych jest ich nanomodyfikacja przy użyciu różnych nanocząstek. Początek nanomodyfikacji materiałów datuje się na rok 1873, kiedy to James Clerk Maxwell przedstawił podstawy teoretyczne służące do określania efektywnej przewodności cieplnej zawiesiny ciała stałego w cieczy [12]. W latach 90. ubiegłego wieku Lewis [13] zaprezentował opis matematyczny zjawisk międzyfazowych zachodzących w nanocieczach, dzięki czemu stały się one popularnym przedmiotem badań.

Proces nanomodyfikacji rozpoczyna się od wyboru odpowiedniego nanomodyfikatora, wielkości jego cząstek i stężenia oraz ustalenia parametrów procesu preparacji, które zapewnią najlepszą stabilność zawieszenia nanocząstek. Problemem towarzyszącym zastosowaniu nanociecz jest utrata stabilności zawieszenia nanocząstek, która doprowadza do pogorszenia ich właściwości [14-16]. Należy również zwrócić uwagę, że poprawa jednego parametru za pomocą nanoproszków często skutkuje pogorszeniem innych właściwości cieczy elektroizolacyjnych [17-20].

Głównym celem artykułu jest omówienie zagadnień związanych z nanomodyfikacją cieczy elektroizolacyjnych. Autorzy przedstawili rodzaje stosowanych nanomodyfikatorów, ich wpływ na parametry cieczy elektroizolacyjnych, metody preparacji nanociecz oraz aspekty dotyczące ich stabilności.

Rodzaje nanocząstek i ich wpływ na właściwości cieczy elektroizolacyjnych

Ze względu na rezystywność materiałów, nanocząstki można podzielić na materiały przewodzące, półprzewodzące oraz dielektryki.

W tabeli 1 zestawiono nanocząstki najczęściej wykorzystywane do modyfikacji cieczy elektroizolacyjnych.

Tabela 1. Nanocząstki stosowane do modyfikacji cieczy elektroizolacyjnych [14, 21]

Charakter materiału	Rezystywność [Ωm]	Nanocząstka
Przewodzący	$10^{-8} - 10^{-3}$	Fe ₃ O ₄ , Cu, SiC, BN, MgO
Półprzewodzący	$10^{-3} - 10^6$	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuO, CuO ₂ , ZnO
Dielektryk	$10^5 - 10^{20}$	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , SiO, C ₆₀ , GO

Wybrane nanocząstki dodawane są do cieczy elektroizolacyjnych głównie w celu poprawy ich wytrzymałości elektrycznej, właściwości cieplnych jak również spowolnienia procesów utleniania w przypadku estrów naturalnych oraz olejów mineralnych. Poprawa tych parametrów uzależniona jest zasadniczo od jakości dyspersji nanocząstek w cieczy, wielkości nanocząstek, ich właściwości i morfologii [22]. Im mniejsza jest wielkość nanocząstek, tym większa ich całkowita powierzchnia, co może wpływać na zmianę właściwości cieczy bazowych. Doniesienia literaturowe wskazują, że nanocząstki przewodzące oraz półprzewodzące są stosowane zasadniczo w celu poprawy wytrzymałości elektrycznej [15,23-26]. Zgodnie z [15] przewodzące nanocząstki posiadają zdolność do spowalniania ruchu elektronów w cieczy jak również mogą "wyłapywać" elektrony i gromadzić je na swojej powierzchni. Zgromadzony na tych nanocząstkach ładunek ujemny powoduje zmianę rozkładu pola elektrycznego w cieczy izolacyjnej, co wpływa na warunki propagacji streamera. Literatura opisuje również przypadki poprawy wytrzymałości elektrycznej cieczy izolacyjnych w wyniku dodatku nanocząstek o właściwościach elektroizolacyjnych. W tabeli 2 przedstawiono wpływ nanocząstek na wybrane parametry cieczy.

Metody preparacji nanociecz

W przypadku niektórych nanomateriałów istnieje możliwość uzyskania roztworu. Przykładem takiego nanomateriału jest fuleren, który rozpuszcza się w oleju mineralnym i estrze naturalnym [18,19]. Natomiast w przypadku większości stosowanych nanomodyfikatorów uzyskiwany jest układ heterogeniczny, w którym nie dochodzi do trwałego związania obu materiałów. W takim przypadku mamy do czynienia z koloidem.

Wyróżnia się metodę jedno i dwustopniową preparacji nanokoloidów. Metoda jednostopniowa polega na syntezie nanocząstek w cieczy bazowej za pomocą technik takich jak napylenie magnetronowe, bezpośrednie odparowanie, chemiczne wytrącanie, chemiczna kondensacja pary. Użycie tych metod zdecydowanie ułatwia zawieszanie nanocząstek i skutkuje większą stabilnością koloidu. Niestety, po syntezie nanocząstek w cieczy bazowej pozostają uboczne produkty reakcji syntezy, co zmienia właściwości cieczy i utrudnia analizy porównawcze [27].

Najpowszechniej stosowana jest jednak metoda dwustopniowa, polegająca na osobnym przygotowaniu cieczy bazowej oraz nanocząstek. Ciecz bazową zwykle należy poddać procesowi suszenia i odgazowania. Natomiast nanocząstki poddaje się obróbce chemicznej i termicznej. W celu zdyspergowania nanocząstek w cieczy bazowej przydatna jest aparatura taka jak mieszadło magnetyczne, sonikator i homogenizator. Dwa ostatnie urządzenia umożliwiają rozbicie aglomeratów nanocząstek

w krótkim czasie, jednak podczas ich użytkowania dochodzi do wzrostu temperatury cieczy ze względu na wydzielanie się dużych ilości energii w głowicach ultradźwiękowych i końcówkach dyspergujących. Należy zatem kontrolować temperaturę cieczy bazowej w trakcie sonikacji i homogenizacji, aby nie dopuścić do jej przegrzania.

Tabela 2. Wpływ wybranych nanocząstek na właściwości oleju mineralnego (OM), estru syntetycznego (ES) i estru naturalnego (EN)

Charakter materiału	Rodzaj nanocząstki	Ciecz bazowa	Poprawiony parametr	Literatura
Przewodzący	Fe ₃ O ₄	OM	napięcie przebicia, przenikalność elektryczna	[17,23, 25,28]
		ES	napięcie udarowe	[23]
	Cu	EN, OM	przenikalność elektryczna	[29]
	BN	OM	przewodność cieplna, współczynnik strat dielektrycznych	[17]
	MgO	ES	napięcie przebicia	[30]
Półprzewodzący	TiO ₂	OM	napięcie przebicia	[26,31]
	CuO, ZnO	OM	napięcie przebicia	[22]
Dielektryk	SiO ₂	OM	napięcie przebicia	[28,32,33]
	Al ₂ O ₃	OM	rezystywność, napięcie przebicia	[20,22]
	C ₆₀	OM, EN	stabilność oksydacyjna	[18,19]
	GO	EN	napięcie przebicia, rezystywność, współczynnik, strat dielektrycznych	[34]

Stabilność nanocieczy

Zastosowanie nanocieczy nie jest możliwe bez wcześniejszego zbadania ich pod kątem stabilności. Utrata stabilności wskutek aglomeracji i sedymentacji nanocząstek jest najczęściej przyczyną utraty poprawy właściwości. Stabilność nanocieczy zależy przede wszystkim od powinowactwa nanocząstek do cieczy bazowych i możliwości ich trwałego połączenia ze strukturą cieczy za pomocą wiązania chemicznego. Najczęściej stosowaną metodą umożliwiającą połączenie nanocząstki z cieczą bazową jest stosowanie środków powierzchniowo czynnych (z ang. *surface active agents*), tzw. surfaktantów [35]. Wyróżnia się środki powierzchniowo czynne niejonowe i jonowe (kationowe i anionowe).

Niejonowy środek powierzchniowo czynny pokrywa nanocząstki, zapobiegając ich agregacji poprzez oddziaływanie steryczne [16]. Jest to tzw. stabilizacja steryczna. Do najczęściej stosowanych surfaktantów niejonowych należy zaliczyć SPAN 20 (C₁₈H₃₄O₆), SPAN 60 (C₂₄H₄₆O₆), SPAN 80 (C₂₄H₄₄O₆), TWEEN 80 (C₆₄H₁₂₄O₂₆), kwas oleinowy (C₁₈H₃₄O₂). Większość naukowców wyraża aprobatę dla stosowania środków stabilizujących, lecz niektóre prace donoszą, że dodanie zbyt dużej ilości surfaktantu może zdestabilizować nanociecz [14]. Szczególną uwagę zwraca się również na to, że w temperaturze powyżej 60°C wiązanie pomiędzy surfaktantem a nanocząstką może ulec rozerwaniu, co z

kolei zagraża stabilności nanocieczy [14]. Ponadto, wyższa temperatura sprzyja większej intensywności ruchów Browna, przez co dochodzi do częstszych zderzeń nanocząstek ze sobą i w rezultacie do ich agregacji.

Innym sposobem poprawy trwałości zawieszenia nanocząstek w cieczy jest stabilizacja elektrostatyczna polegająca na dodaniu surfaktantów jonowych, do których można zaliczyć SDS (C₁₂H₂₅OSO₃Na), SDBS (C₁₈H₂₉NaO₃S), CTAB (C₁₉H₄₂BrN). Zgodnie z teorią DLVO, opracowaną przez Derjaguina, Landau'a, Verveya i Overbeeka [15,35], stabilna nanocząstka powinna charakteryzować się zerową wartością siły wypadkowej będącej składową siły przyciągania van der Waalsa i elektrostatycznego odpychania. Możliwa jest poprawa stabilności nanomodyfikowanego oleju transformatorowego poprzez zwiększenie odpychania pomiędzy nanocząstkami lub zmniejszenie przyciągania między cząstkami, co można uzyskać poprzez zmianę kwasowości nanocieczy (zmiana wartość pH cieczy) [35].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na stabilność nanocieczy jest rozmiar nanocząstek. Wraz ze zmniejszaniem się wielkości cząstek, całkowita siła, w tym grawitacja, działająca na pojedynczą nanocząstkę ma coraz mniejsze znaczenie w zachowaniu jej ruchu, co skutkuje wzrostem stabilności [15,16].

Sposób przygotowania nanocieczy jest następnym czynnikiem determinującym jej stabilność. Zastosowanie metody jednostopniowej pozwala na uzyskanie długoterminowej stabilności nanokolooidów, co wynika z idei formowania nanocząstek w cieczy bazowej. Natomiast w wypadku preparacji nanocieczy metodą dwustopniową istotnym czynnikiem wpływającym na stabilność nanocieczy jest czas homogenizacji, sonikacji i mieszania magnetycznego [35]. Każda z tych technik mieszania umożliwia wprowadzenie do nanocieczy zróżnicowanej energii. Homogenizacja oraz sonikacja pozwalają na rozbić cząstek na mniejsze w znacznie krótszym czasie niż mieszanie magnetyczne. Zatem te dwie metody charakteryzują się wyższą efektywnością.

Metody oceny stabilności

Zachowanie jednorodnej dyspersji nanocząstek stanowi jeden z głównych czynników warunkujących poprawę wybranych parametrów cieczy izolacyjnych. Pod wpływem różnych czynników, np. temperatury, może dochodzić do agregacji nanocząstek i ich sedymentacji wynikającej z większego ciężaru powstałych agregatów. Ponieważ stabilność dyspersji jest zasadniczym aspektem warunkującym aplikacyjność nanocieczy, stosuje się różne metody jej oceny, takie jak spektrofotometrię UV-VIS [15,16], TEM (mikroskop transmisyjny) i SEM (mikroskop skaningowy) [28], DLS (dynamiczne rozpraszanie światła) [16,36], pomiaru potencjału zeta [16].

Wykonanie spektrofotometrii daje sposobność oceny stężenia nanocząstek w dyspersji. Wykonując pomiary spektrofotometryczne w pewnych odstępach czasu można stwierdzić czy dochodzi do zjawiska sedymentacji i oszacować jego tempo. Metody mikroskopowe (TEM i SEM) oraz metoda DLS pozwalają na ocenę wielkości cząstek i oraz ich dystrybucji w koloizmie. Pomiar wielkości cząstek daje informację czy w danym czasie wystąpiło zjawisko agregacji. Z kolei pomiar potencjału zeta dostarcza informacji o formowaniu się elektrycznej podwójnej warstwy wokół nanocząstki, która warunkuje stabilizację elektrostatyczną. Im większa jest wartość bezwzględna potencjału zeta, tym lepsza stabilność dyspersji.

Podsumowanie

Modyfikacja cieczy elektroizolacyjnych przy użyciu nanoproszków stwarza możliwości poprawy wybranych ich

właściwości. Poprawa tych właściwości zależy od bardzo wielu czynników, w tym od rodzaju nanocząstek, ich kształtu, rozmiaru i sposobu preparacji nanocieczy. Utrzymanie poprawy właściwości cieczy elektroizolacyjnej w głównej mierze zależy od zachowania długoterminowej stabilności zawieszenia nanocząstek. Uzyskanie długookresowej stabilności nanocieczy jest jednym z kluczowych wyzwań, warunkujących możliwość wprowadzenia jej do eksploatacji.

Kolejny kierunek badań powinien dotyczyć oceny właściwości materiałów celulozowych zaimpregnowanych nanocieczami. Zasadne jest przeprowadzenie oceny dynamiki starzenia tych materiałów oraz analizy powstających produktów starzenia. Ponadto, priorytetowym aspektem badań powinna być ocena zarówno nanocieczy jak i zaimpregnowanych nią materiałów celulozowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych panujących w transformatorze.

Praca sfinansowana ze środków MEiN w ramach subwencji badawczej nr 0711/SBAD/4561, nazwa zadania: „Zwiększenie efektywności wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej”.

Autorzy: mgr inż. Dominika Szcześniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: dominika.a.szczeniak@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Piotr Przybyłek, prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure nr 436, Experiences in Service with New Insulating Liquid, 2010
- [2] Różga P., Zastosowanie symulacji rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni 3D do oceny procesu inicjacji wyładowań elektrycznych w oleju, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6 (2014), 216-221
- [3] Yuan Y., Ruijin L., A Novel Nanomodified Cellulose Insulation Paper for Power Transformer, *J. Nanomater.*, (2014), 1-6
- [4] Różga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M., Strzelecki K., A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications, *Energies*, 13 (2020), 6429
- [5] Ab Ghani S., et al., Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review., *Electric Power Systems Research.*, 163 (2017), 655-667
- [6] Mosiński F., Ekologiczne aspekty eksploatacji transformatorów energetycznych, *VII Konferencja Naukowo-Techniczna Transformatory Energetyczne i Specjalne*, (2008), 227-236
- [7] McShane C.P., Luksich J., Rapp K.J., Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension, *Cement Industry Technical Conference*, (2003), 141-147
- [8] Dombek G., Gielniak J., Fire Safety and Electrical Properties of Mixtures of Synthetic Ester/Mineral Oil and Synthetic Ester/Natural Ester, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 25 (2018), 1846-1852
- [9] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaninie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2016), 92-95
- [10] Nadolny Z., Dombek G., Mixture for cooling electroenergetic devices, Pat.227635
- [11] Skorić D., Jocić S., Sakac Z., Lecić N., Genetic possibilities for altering sunflower oil quality to obtain novel oils, *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 86 (2008), 215-221
- [12] Maxwell J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press 1st Edition, Oxford, U.K., (1873)
- [13] Lewis T.J., Nanometric dielectrics, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1 (1994), No. 5, 812-825
- [14] Primo V. A., Pérez-Rosa D., García B., Cabanelas J. C., Evaluation of the Stability of Dielectric Nanofluids for Use in Transformers under Real Operating Conditions, *Nanomaterials*, 9 (2019), 143
- [15] Jacob J., Preetha P., Sindhu T. K., Stability Analysis and Characterization of Natural Ester Nanofluids for Transformers, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2 (2020), No. 5, 1715-1723
- [16] Ma X., Dong M., Yang L., Suspension Stability of Transformer Oil based Nanofluid, *IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Roma, (2019)
- [17] Du B.X., Li X.L., Li J., Thermal conductivity and dielectric characteristics of transformer oil filled with BN and Fe₃O₄ nanoparticles, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22 (2015), No. 5, 2530-2536
- [18] Szcześniak D., Przybyłek P., Oxidation Stability of Natural Ester Modified by Means of Fullerene Nanoparticles, *Energies*, 14 (2021), 490
- [19] Zmarzły D., Dobry D., Analysis of properties of aged mineral oil doped with C₆₀ fullerenes, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21 (2014), No. 3, 1119-1126
- [20] Usama K., Abderrahmane B., AC Dielectric Strength of Mineral Oil-Based Fe₃O₄ and Al₂O₃ Nanofluids, *Energies*, 11 (2018), 3505
- [21] Katz E. A., Fullerene Thin Films as Photovoltaic Material, *In Sōga, Tetsuo (ed.) Nanostructured materials for solar energy conversion*, Elsevier, (2006), 372-381
- [22] Ayar K., Purbarun D., Tandra N., Sarit K. Das, Effects of nanostructure permittivity and dimensions on the increased dielectric strength of nano insulating oil, *Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp.*, 509 (2016), 235-243
- [23] Given M. J., et al., The influence of magnetite nanoparticles on the behaviour of insulating oils for pulse power applications, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2011), 40-43
- [24] Karthik R., Cavallini A., Azcarraga C.G., Investigations on the effect of nanoparticles in mineral oil, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2014), 695-698
- [25] Irwanto, Azcarraga C.G., Suwarno, Cavallini A., Negri F., Ferrofluid effect in mineral oil: PDIV, streamer, and breakdown voltage, *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, (2014), 1-4
- [26] Zhou Y., Sui S.Y., Li J., Wang Z.Y., Cui W., Lv Y.Z., Li C.R., Statistical analysis of moisture's effect on AC breakdown strength of TiO₂ nanofluids, *J. Mol. Liq.*, 249 (2018), 420-428
- [27] Suhaimi Nur S., Rahman A.R.A., et al, A Review on Oil-Based Nanofluid as Next-Generation Insulation for Transformer Application, *Journal of Nanomaterials*, 3 (2020), 1-17
- [28] Cavallini A., Karthik R., Negri F., The effect of magnetite, graphene oxide and silicone oxide nanoparticles on dielectric withstand characteristics of mineral oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22 (2015), No. 5, 2592-2600
- [29] Zhang J., Wang F., Li J., Ran H., Huang D., Influence of copper particles on breakdown voltage and frequency dependent dielectric property of vegetable insulating oil, *Energies*, 10 (2017), No. 7, 938
- [30] P. Thomas, Breakdown Voltage and Gassing Tendency of Synthetic Esters Based MgO Nanofluids, *IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, (2019)
- [31] Du Y., Lv Y., Wang F., Li X., Li C., Effect of TiO₂ nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, (2010), 1-3
- [32] Taro M., et al., Experimental investigation of transformer oil based nanofluids for applications in distribution transformers, *3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, 2017
- [33] Rafiq M., Khan D., M. Ali, Insulating properties of transformer oil-based silica nanofluids, *Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies*, (2015), 1-3
- [34] Farade R. A., Abdul N. I., Mansour D. A., Azis N. B., Bt Jasni J., Soudagar M., Siddappa V., Development of Graphene Oxide-Based Nonedible Cottonseed Nanofluids for Power Transformers, *Materials*, 13 (2020), 2569
- [35] Sujith S.V., Kim H., Lee J. A., Review on Thermophysical Property Assessment of Metal Oxide-Based Nanofluids: Industrial Perspectives, *Metals*, 12 (2022), 165
- [36] Mukherjee S., Paria S., Preparation and Stability of Nanofluids-A Review, *IOSR j. mech. civ. eng.*, 9 (2013), 63