

Grzegorz DOMBEK*
Zbigniew NADOLNY*
Piotr PRZYBYŁEK*

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE NANOCIECZY ELEKTROIZOLACYJNYCH W ASPEKCIE ICH WYKORZYSTANIA W UKŁADZIE IZOLACYJNYM TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

W artykule przedstawiono informacje dotyczące właściwości elektrycznych i cieplnych nanocieczy elektroizolacyjnych w aspekcie ich wykorzystania w układzie izolacyjnym transformatorów energetycznych. Artykuł składa się z pięciu rozdziałów. Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie. W drugim rozdziale przedstawiono metody przygotowania nanocieczy. W rozdziale trzecim przedstawione zostały właściwości nowoczesnych cieczy elektroizolacyjnych zbudowanych na bazie oleju mineralnego i nanocząsteczek. W rozdziale czwartym porównano lepkość i przewodność cieplną oleju mineralnego z lepkością i przewodnością nanocieczy. Artykuł zakończony jest podsumowaniem.

SŁOWA KLUCZOWE: nanociecze, transformator, właściwości cieplne

1. WPROWADZENIE

Transformator energetyczny jest jednym z najbardziej newralgicznych i kosztownych urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. Od ponad stu lat do jego chłodzenia stosuje się głównie oleje mineralne. W przeszłości niska temperatura zapłonu oraz niezadowalające właściwości cieplne olejów mineralnych były niejednokrotnie przyczyną awarii i pożaru transformatora. Skutkiem tego były przede wszystkim duże straty materialne oraz powstanie zagrożenia dla ludzi i środowiska naturalnego. Skuteczna i bezawaryjna praca transformatora warunkowana jest m.in. właściwościami cieczy elektroizolacyjnej, którą jest on wypełniony. Wraz ze wzrostem obciążenia transformatora rośnie jego temperatura wewnętrzna, a co za tym idzie skraca się jego żywotność. Długość życia transformatora zależy przede wszystkim od czasu życia izolacji uzwojeń transformatora, który z kolei zależy od czasu eksploatacji i temperatury [1]. Dotychczas stosowane mineralne oleje

* Politechnika Poznańska.

transformatorowe mają dość dobre właściwości elektryczne, ale niestety charakteryzują się słabymi właściwościami cieplnymi, przez co ich właściwości chłodzące nie są w wielu przypadkach wystarczające.

Obecnie w kilku ośrodkach naukowych na świecie trwają prace związane z modyfikacją cieczy elektroizolacyjnych w celu poprawienia ich właściwości zarówno elektrycznych, jak i cieplnych [2, 3, 5-7].

Poprawa właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych może zostać uzyskana poprzez dodanie do nich nanomateriałów. Powstałe w ten sposób nanociecze mogą mieć charakter roztworów właściwych lub koloidów. W roztworach właściwych nanomateriały są rozpuszczone w cieczy bazowej natomiast w koloidach są zdyspergowane i zawieszony w całej objętości.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wpływu obecności dwóch wybranych nanomateriałów w oleju mineralnym na jego przewodność cieplną i lepkość. Obie te wielkości determinują w głównej mierze przekazywanie ciepła, które decyduje o skuteczności chłodzenia. Wykorzystanymi do badań nanomateriałami były C_{60} oraz TiO_2 .

2. PRZYGOTOWANIE NANOCIECZY

W rozdziale omówione zostały metody przygotowania nanocieczy elektroizolacyjnych zbudowanych na bazie oleju mineralnego i nanocząsteczek.

Nanocząsteczki należą do związków trudno rozpuszczalnych lub nierozpuszczalnych w cieczach elektroizolacyjnych. Przykładem nanomateriału, który rozpuszcza się w cieczach elektroizolacyjnych jest fuleren C_{60} . W zależności od stężenia fulerenu w cieczy bazowej czas jego rozpuszczania wynosi od dwóch do kilku tygodni. W przypadku innych nanomateriałów, takich jak Al_2O_3 , SiO_2 , SiC , Fe_2O_3 i TiO_2 , dodanych do cieczy izolacyjnej niemożliwe jest uzyskanie roztworu właściwego. W celu równomiernego rozproszenia tych materiałów w cieczy bazowej niezbędne jest dodanie do niej środka powierzchniowo czynnego.

W zależności od stężenia nanocząsteczek w cieczy bazowej, dodanie do niej samych tylko nanocząsteczek może skutkować zaistnieniem procesu sedymentacji (opadanie zawiesiny ciała stałego pod wpływem sił grawitacji). W rezultacie spora ich część może osadzać się na elementach układu izolacyjnego pogarszając jego właściwości. Jak wcześniej wspomniano jednym z rozwiązań pozwalających na przeciwdziałanie procesowi sedymentacji jest zastosowanie środków powierzchniowo czynnych, tzw. dyspergatorów. Dyspergatory są to substancje powierzchniowo czynne pozwalające na tworzenie stabilnych zawiesin oraz rozdrabnianie większych cząstek. W zależności od zastosowanych nanocząsteczek i cieczy bazowej do przygotowywania stabilnych zawiesin koloidalnych konieczne jest zastosowanie różnych substancji powierzchniowo czynnych. Istotny jest też dobór odpowiedniego stężenia dyspergatora w cieczy bazowej. Substancje

powierzchniowo czynne należy dodawać bezpośrednio do cieczy bazowej, przy czym w celu uzyskania efektu równomiernego rozproszenia w cieczy, poddaje się je często procesowi sonikacji (działaniu ultradźwięków). Do tak przygotowanej cieczy bazowej, dodaje się nanocząsteczki, które również poddaje się działaniu ultradźwięków. W zależności od rodzaju zastosowanych nanocząsteczek oraz cieczy bazowej, w celu równomiernego rozproszenia nanocząstek i stabilnego zawieszenia ich w cieczy bazowej, należy stosować różne czasy procesu sonikacji. Ponadto sonikację należy przeprowadzać w łaźni zapewniającej utrzymanie stałej temperatury w nanocieczy. Przed przeprowadzeniem badań próbki nanocieczy należy odstawić na kilka godzin w celu wyeliminowania mikropęcherzyków powietrza powstających w trakcie procesu sonikacji.

3. WŁAŚCIWOŚCI NONOCIECZY

W niniejszym rozdziale, w oparciu o dane literaturowe, przedstawione zostały właściwości elektryczne nanocieczy elektroizolacyjnych powstałych na bazie takich nanomateriałów jak TiO_2 oraz C_{60} .

Pomysł zastosowania nanocieczy elektroizolacyjnych, w miejsce dotychczas stosowanych mineralnych olejów transformatorowych, pojawił się stosunkowo niedawno. Jak wcześniej wspomniano w kilku ośrodkach naukowych na świecie prowadzone są badania dotyczące modyfikacji cieczy elektroizolacyjnych. Mają one na celu poprawę ich właściwości elektrycznych oraz skuteczności chłodzenia. W pracy [2] przedstawiono wyniki badań nad wpływem półprzewodnikowych nanocząsteczek TiO_2 na właściwości elektroizolacyjne oleju mineralnego. Cząsteczki TiO_2 dodawane były do oleju transformatorowego w celu utworzenia półprzewodnikowej nanocieczy (SNF – ang. *Semiconductive NanoFluid*) charakteryzującej się ulepszonymi, w stosunku do czystego oleju, właściwościami elektrycznymi. W tabeli 3.1 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników dla SNF z danymi dla czystego oleju mineralnego. W wyniku przeprowadzonych testów stwierdzono, że SNF charakteryzuje się o 20% większą wytrzymałością elektryczną przy napięciu stałym, przemiennym i udarowym, w porównaniu z czystym olejem mineralnym [5]. Taka nanociecz charakteryzuje się również dużo większą odpornością na wyładowania niezupełne. Wartość rezystywności SNF odniesiona do wartości rezystywności oleju mineralnego (tab. 3.2) jest mniejsza, jednakże nadal spełnia wymagania dotyczące rezystywności stawiane cieczom elektroizolacyjnym w eksploatacji. Natomiast względna przenikalność elektryczna SNF przewyższa przenikalność elektryczną oleju mineralnego, co jest korzystne dla rozkładu pola elektrycznego w izolacji papierowo-olejowej [4].

Wyniki badań zaprezentowane w pracach [6, 8], dotyczące właściwości mineralnych olejów transformatorowych domieszkowanych fulerenami C_{60} wskazują, że mogą one mieć pozytywny wpływ na niektóre parametry

elektryczne, zarówno świeżych jak i zestarzonych olejów. Przedstawione w tych pracach wyniki pokazują, że poprawa parametrów elektrycznych cieczy elektroizolacyjnej możliwa jest przy różnych stężeniach fulerenu C₆₀. Jednakże ze względu na uzyskanie poprawy zarówno współczynnika strat dielektrycznych, rezystywności, jak i przenikalności elektrycznej zaleca się stosowanie stężeń 8 mg/l i 16 mg/l [8]. W zależności od stężenia fulerenu C₆₀ możliwa jest również zmiana prądu elektryzacji. Ze względu na ten parametr optymalne stężenie C₆₀ w oleju mineralnym wynosi 100 mg/l [6].

Tabela 3.1. Porównanie wytrzymałości elektrycznej oleju mineralnego z SNF dla napięcia przemiennego (AC), stałego (DC+ i DC-) oraz udarowego [5]

Material	Napięcie przebicia (AC)	Napięcie przebicia (DC+)	Napięcie przebicia (DC-)	Udarowe napięcie przebicia	Czas do przebicia przy napięciu udarowym	Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych
	kV	kV	kV	kV	μs	kV
Olej mineralny	67,9	49,1	66,3	77,6	15,2	30,6
SNF	80,9	45,1	84,6	95,9	23,3	33,1

Tabela 3.2. Porównanie przenikalności elektrycznej i rezystywności oleju mineralnego i SNF [5]

Material	Przenikalność elektryczna	Rezystywność
	-	Ω·m
Olej mineralny	2,26	$1,82 \cdot 10^{12}$
SNF	3,92	$8,30 \cdot 10^{10}$

Analizując przedstawione w tym rozdziale właściwości nanocieczy można stwierdzić, że charakteryzują się one wieloma pozytywnymi właściwościami istotnymi z punktu widzenia wymagań stawianych cieczom elektroizolacyjnym. Niewątpliwie konieczne jest przeprowadzenie licznych badań ich właściwości, w tym także cieplnych, pozwalających w pełni stwierdzić, czy korzystne jest ich zastosowanie w transformatorach energetycznych.

4. WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE NANOCIECZY – WYNIKI BADAŃ

W rozdziale przedstawione zostały wyniki pomiarów lepkości i przewodności cieplnej właściwej cieczy elektroizolacyjnych.

Do badań wykorzystano następujące ciecz elektroizolacyjne:

- olej mineralny,
- olej mineralny + C₆₀ – stężenie fulerenu w oleju 100 mg/l,

- olej mineralny + SPAN – stężenie SPANU w oleju 5 g/l (SPAN – substancja powierzchniowo czynna, $C_{18}H_{34}O_6$),
- olej mineralny + SPAN + TiO_2 – stężenie SPANU i TiO_2 kolejno 5 g/l i 0,204 g/l.

Wszystkie domieszkowane cieczy poddano procesowi sonikacji w celu rozpuszczenia lub zawieszenia dodawanego modyfikatora w cieczy bazowej. W przypadku fulerenu uzyskano roztwór właściwy. W przypadku nanocząsteczek TiO_2 niemożliwe było ich rozpuszczenie w oleju mineralnym. Z tego względu podjęto próbę uzyskania koloidu poprzez zastosowanie substancji powierzchniowo czynnej.

Pomiary lepkości przeprowadzone zostały przy pomocy układu zbudowanego zgodnie z normą [9]. Natomiast pomiary przewodności cieplnej wykonano za pomocą autorskiego układu pomiarowego opisanego w artykule [10].

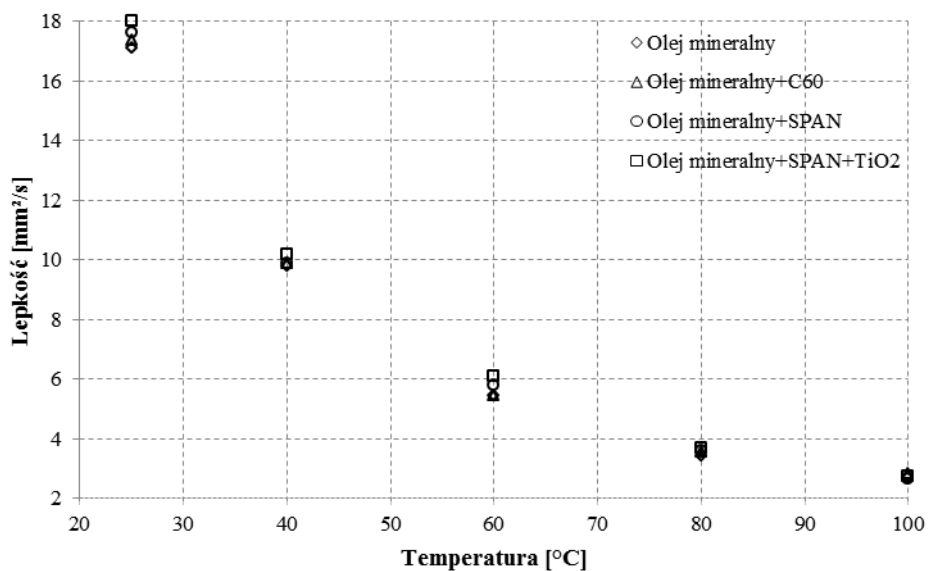
W tabeli 4.1 i na rysunkach 4.1 i 4.2 przedstawiono wyniki badań lepkości i przewodności cieplnej oleju mineralnego, oleju mineralnego z środkiem powierzchniowo czynnym oraz nanocieczy powstałych w wyniku dodania do oleju mineralnego fulerenu C_{60} oraz nanocząsteczek TiO_2 .

Uzyskane wyniki potwierdziły wpływ temperatury na badane właściwości oleju mineralnego. Wzrost temperatury powodował spadek lepkości i wzrost przewodności cieplnej oleju. Uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi. Przeprowadzone badania wykazały wpływ nanomateriałów i substancji powierzchniowo czynnej na właściwości cieczy elektroizolacyjnych. Najmniejszy wpływ na lepkość wywierał fuleren C_{60} . W przypadku TiO_2 konieczne było dodanie do oleju środka powierzchniowo czynnego w celu uzyskania koloidu. Dodanie środka powierzchniowo czynnego spowodowało również wzrost wartości lepkości względem cieczy bazowej. Największy wzrost lepkości zaobserwowano w przypadku oleju mineralnego modyfikowanego zarówno cieczą powierzchniowo czynną, jak i TiO_2 .

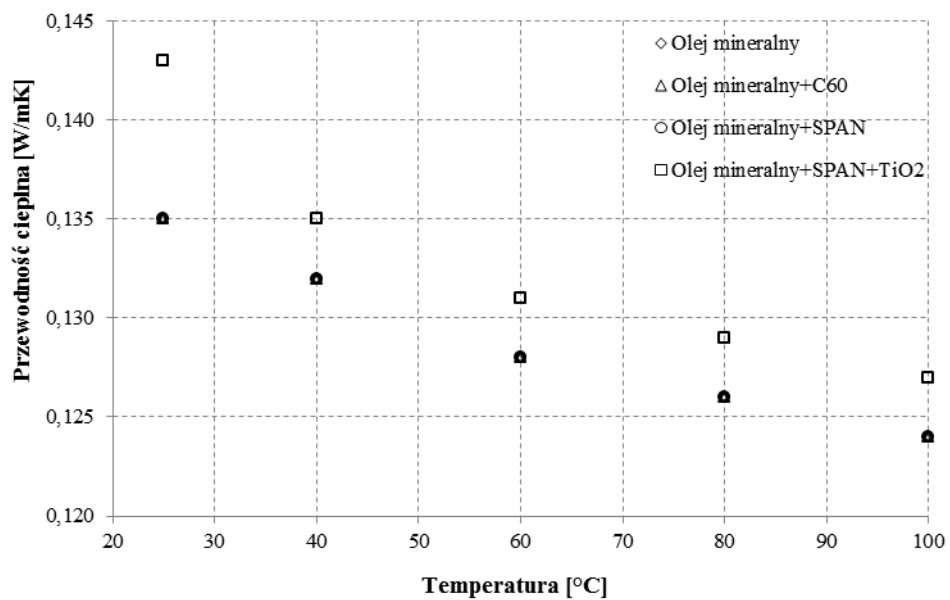
Przewodność cieplna oleju mineralnego domieszkowanego nanomateriałem C_{60} oraz oleju modyfikowanego substancją powierzchniowo czynną nie zmieniła się w stosunku do przewodności oleju mineralnego. Wzrost przewodności cieplej zauważalny był tylko w przypadku koloidu powstałego przez dodanie TiO_2 .

Tabela 4.1. Wyniki badań lepkości i przewodności cieplnej oleju mineralnego, oleju mineralnego z substancją powierzchniowo czynną oraz nanocieczy w zależności od temperatury; λ - przewodność cieplna, ν - lepkość

Temperatura	Olej mineralny		Olej mineralny + C_{60}		Olej mineralny +SPAN		Olej mineralny +SPAN + TiO_2	
	λ	ν	λ	ν	λ	ν	λ	ν
	W/m·K	mm ² /s	W/m·K	mm ² /s	W/m·K	mm ² /s	W/m·K	mm ² /s
25°C	0,135	17,11	0,135	17,38	0,135	17,61	0,143	17,99
40°C	0,132	9,79	0,132	9,86	0,132	9,87	0,135	10,18
60°C	0,128	5,43	0,128	5,46	0,128	5,81	0,130	6,10
80°C	0,126	3,44	0,126	3,56	0,126	3,61	0,129	3,69
100°C	0,124	2,71	0,124	2,74	0,124	2,78	0,127	2,81



Rys. 4.1. Porównanie lepkości badanych cieczy elektroizolacyjnych



Rys. 4.2. Porównanie przewodności cieplnej badanych cieczy elektroizolacyjnych

5. PODSUMOWANIE

W kilku ośrodkach naukowych na świecie prowadzone są badania mające na celu poprawę właściwości cieczy elektroizolacyjnych. Poprawa właściwości możliwa jest poprzez domieszkowanie cieczy bazowych za pomocą nanomateriałów. Powstałe w ten sposób nanociecze należy zbadać w aspekcie kluczowych ze względu na eksploatację transformatora właściwości. Niewątpliwie, z punktu widzenia skuteczności chłodzenia urządzeń elektroenergetycznych, konieczne jest zbadanie właściwości cieplnych nanocieczy elektroizolacyjnych.

Wyniki przedstawionych w artykule badań świadczą o wpływie nanocząsteczek TiO_2 na właściwości cieplne nanocieczy. Przeprowadzone badania wykazały wzrost lepkości i przewodności cieplnej nanocieczy w stosunku do czystego oleju mineralnego. Wzrost przewodności cieplnej jest pożądany ze względu na skuteczność chłodzenia, natomiast wzrost lepkości utrudnia transport ciepła. Oprócz badanych w artykule lepkości i przewodności cieplnej o skuteczności chłodzenia decydują również ciepło właściwe, gęstość i współczynnik rozszerzalności cieplnej. Definitywne stwierdzenie, czy badana nanociecz usprawni transport ciepła wymaga zbadania wszystkich tych właściwości.

Badania przeprowadzone na oleju mineralnym domieszkowanym fulerenem nie wykazały poprawy przewodności cieplnej nanocieczy.

LITERATURA

- [1] ANSI/IEEE, IEEE Guide for Loading Mineral Oil-Immersed Transformers C57.91, 1995.
- [2] Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J., Li X., Zhou Y., Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, no. 3, June, 2012.
- [3] Chiesa M., Sarit K. Das, Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media, Colloid and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, p. 88-97, 2009.
- [4] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P., Porównanie estrów naturalnych i olejów mineralnych w aspekcie wykorzystania w transformatorach energetycznych wysokich napięć, Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering, vol. 74, s. 151-158, Poznań, 2013.
- [5] Aksamit P., Zmarzły D., Dielectric properties of fullerene-doped insulation liquids, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p.212-215, 18-21 October, 2009.
- [6] Aksamit P. Zmarzły D., Boczar T., Electrostatic properties of aged fullerene-doped mineral oil, IEEE Transactions and Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no.5, p. 1459-1462, October, 2011.

- [7] Li J., Zhang Z., Zou P., Grzybowski S., Zahn M., Preparation of a vegetable oil-based nanofluids and investigation of its breakdown and dielectric properties, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, no. 5, p. 43-50, September-October, 2012.
- [8] Aksamit. P., Zmarzły D., Boczar T., Szmechta M., Aging properties of fullerene doped transformer oils, Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), p. 1-4, 6-9 June, 2010.
- [9] PN-EN 3104:2004, Przetwory naftowe Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste. Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej.
- [10] Dombek G., Nadolny Z., Autorski układ do pomiaru przewodności cieplnej właściwej cieczy elektroizolacyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering, vol. 74, pp. 159-166, Poznań, 2013.

**THERMAL PROPERTIES OF INSULATING NANOFUIDS
IN THE ASPECT OF THEIR USAGE IN THE INSULATING SYSTEM
OF POWER TRANSFORMERS**

This paper presents an information regarding the thermal properties of insulating nanofluids in the aspect of their usage in the insulating system of power transformers. It consists of five chapters. The first chapter is an introduction. The second chapter presents the method of preparation of nanofluids. The third chapter describes the electrical properties of modern insulating liquids based on nanoparticles and mineral oil. The fourth chapter is devoted to the comparison of viscosity and thermal conductivity of mineral oil with viscosity and thermal conductivity of nanofluids. Article ends with a summary.