

## Właściwości cieplne oleju mineralnego modyfikowanego nanocząstkami $C_{60}$ , $TiO_2$ i $Al_2O_3$

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia wyniki badań nanociecz. Jako ciecz bazową zastosowano olej mineralny, który modyfikowano za pomocą nanocząstek  $C_{60}$ ,  $TiO_2$  i  $Al_2O_3$ . Sprawdzono możliwość uzyskania stabilnych nanociecz. Zbadano wybrane właściwości nanociecz wpływające na ich zdolność do transportu ciepła. Wykazano znaczący wpływ modyfikacji oleju mineralnego nanocząstkami tlenku tytanu  $TiO_2$  na przewodność cieplną.

**Abstract.** The paper presents results of investigations of nanoliquids. Mineral oil was used as base liquid, which was modified using nanoparticles  $C_{60}$ ,  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$ . Possibility of the obtaining of stable nanoliquids was tested. Chosen properties, which have influence on thermal ability of nanoliquids, were investigated. The influence of modification of mineral oil by nanoparticles  $TiO_2$  on thermal conductivity, was proved. (**Thermal properties of mineral oil modified by nanoparticles  $C_{60}$ ,  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$** ).

**Słowa kluczowe:** nanociecz, przewodność cieplna, lepkość, transformatory energetyczne.

**Keywords:** nanoliquids, thermal conductivity, viscosity, power transformers.

doi:10.12915/pe.2014.10.14

### Wstęp

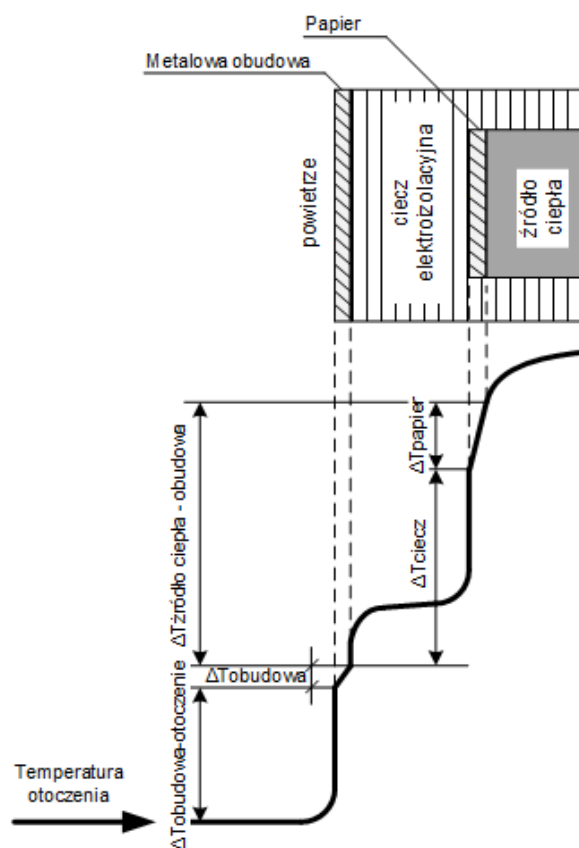
Olej mineralny jest jedną z najczęściej stosowanych cieczy elektroizolacyjnych. Ze względu na swoje właściwości wykorzystywany jest w różnych urządzeniach elektroenergetycznych. Podstawowymi funkcjami oleju mineralnego jest zapewnienie odpowiedniej izolacji elektrycznej oraz odprowadzanie ciepła do otoczenia.

Obecnie w kilku ośrodkach naukowych na świecie trwają prace związane z modyfikacją oleju mineralnego za pomocą nanocząstek. Powstałe w ten sposób nanociecz mogą mieć charakter roztworów właściwych lub koloidów. W roztworach właściwych nanocząstki są rozpuszczone w cieczy bazowej natomiast w koloidach są zdyspergowane i zawieszane w całej objętości.

Modyfikowanie cieczy elektroizolacyjnych za pomocą nanocząstek ma na celu poprawienie właściwości powstałych w ten sposób nanociecz w stosunku do cieczy bazowej. Naukowcy główny nacisk w badaniu nanociecz kładą na właściwości elektryczne [1-5]. Znacznie mniejszą uwagę zwraca się na równie istotne właściwości cieplne nanociecz. Jest to podejście niesłuszne, ponieważ ciecz o niezadawalających właściwościach cieplnych były w przeszłości przyczyną wielu awarii urządzeń elektroenergetycznych, skutkiem czego były przerwy w dostawie energii elektrycznej, straty materialne, niebezpieczeństwo dla personelu technicznego oraz skażenie środowiska naturalnego.

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład temperatury w transformatorze energetycznym. Transport ciepła w transformatorze odbywa się na drodze: źródło ciepła → papier zaimpregnowany cieczą elektroizolacyjną → ciecz elektroizolacyjna → obudowa → powietrze. Ciecz elektroizolacyjna ma zatem duże znaczenie w procesie transportu ciepła. Proces ten jest związany ze zjawiskami: przewodzenia ciepła przez papier zaimpregnowany cieczą oraz przejmowaniem ciepła przez ciecz. Pierwsze zjawisko zależy od przewodności cieplnej papieru zaimpregnowanego cieczą, drugie obejmuje zbiór właściwości cieplnych cieczy, takich jak przewodność cieplna, ciepło właściwe, lepkość, gęstość i rozszerzalność cieplna.

Celem pracy było zbadanie właściwości cieplnych przygotowanych nanociecz. Ciepłymi właściwościami autorzy nazywają te właściwości, które wpływają na zdolność cieczy do transportu ciepła. Badanymi właściwościami były przewodność cieplna właściwa  $\lambda$ , lepkość kinematyczna  $\nu$  oraz gęstość  $\rho$ .



Rys. 1. Rozkład temperatury w transformatorze energetycznym [6]

W poniższych rozdziałach opisano proces przygotowania nanociecz oraz przedstawiono wyniki pomiarów dotyczące ich właściwości.

### Przygotowanie nanociecz

Nanocząstki należą do związków trudno rozpuszczalnych lub nierozpuszczalnych w cieczach elektroizolacyjnych. W związku z tym przygotowanie nanociecz wymaga zastosowania różnych technik rozpuszczania oraz, w przypadku nanocząstek nierozpuszczalnych, odpowiednich środków pozwalających na formowanie stabilnych koloidów.

Dodanie do cieczy bazowej samych tylko nanocząstek może skutkować wystąpieniem sedymentacji, co wiąże się z osadzaniem nanocząstek na elementach układu izolacyjnego pogarszając tym samym jego właściwości. Zjawisko to zależne jest od stężenia nanocząstek w cieczy bazowej. W celu przeciwdziałania procesowi sedymentacji, stosuje się odpowiednie środki, tzw. dyspergatory. Dyspergatory są to substancje zwiększające skuteczność rozdrobnienia większych cząstek w cieczy bazowej w celu uzyskania stabilnych koloidów. Ponadto, zapobiegają one łączeniu się cząstek wytworzonej zawiesiny w zespoły cząstek o dużych rozmiarach.

Przygotowanie stabilnych koloidów, w zależności od wykorzystywanych nanocząstek i cieczy bazowej, w której mają one zostać zawieszane, może wymagać zastosowania różnych substancji powierzchniowo czynnych. Nie bez znaczenia jest też dobór odpowiedniego ich stężenia. Ponadto, substancje powierzchniowo czynne obniżają napięcie powierzchniowe cieczy bazowych. Napięcie powierzchniowe jest miarą zawartości składników hydrofilnych w cieczy elektroizolacyjnej, w których wysoka koncentracja może być źródłem właściwości dielektrycznych cieczy na niezadowalającym poziomie [10].

Bazą wykorzystaną do przygotowania nanocieczki był olej mineralny. Modyfikację oleju przeprowadzano przy wykorzystaniu fulerenu  $C_{60}$  oraz nanocząstek tlenku tytanu  $TiO_2$  (o średnim rozmiarze cząstki 21 nm) oraz tlenku glinu  $Al_2O_3$  (o średnim rozmiarze cząstki <50 nm).

W celu rozpuszczenia lub zawieszenia nanocząstek modyfikowaną ciecz poddano procesowi sonikacji (działania ultradźwięków). W przypadku fulerenu  $C_{60}$  pozwoliło to na uzyskanie roztworu właściwego. Próba uzyskania roztworu właściwego poprzez rozpuszczenie w cieczy bazowej nanocząstek  $TiO_2$  i  $Al_2O_3$  skutkowało wystąpieniem sedymentacji (opadanie zawiesiny ciała stałego pod wpływem sił grawitacji). Nanocząstki tlenku tytanu  $TiO_2$  oraz tlenku glinu  $Al_2O_3$  nie rozpuszczają się w oleju mineralnym. W związku z tym podjęto próbę przygotowania koloidów. Aby przygotować koloid do oleju mineralnego dodano środek powierzchniowo czynny. Zastosowanym środkiem powierzchniowo czynnym, pozwalającym na uzyskanie stabilnych zawiesin koloidalnych, był SPAN 20 ( $C_{18}H_{34}O_6$ ). Rozpuszczenie dyspergatora w oleju mineralnym uzyskano poprzez zastosowanie procesu sonikacji.

Po rozpuszczeniu substancji powierzchniowo czynnej dodano nanocząstki  $TiO_2$  i  $Al_2O_3$ . Powstałe nanociecze powtórnie poddano działaniu ultradźwięków. Należy zwrócić uwagę, iż w zależności od rodzaju zastosowanych nanocząstek oraz cieczy bazowej, równomierne ich rozproszenie i stabilne zawieszenie w cieczy bazowej wymaga zastosowania różnych czasów procesu sonikacji. Ponadto, w celu zapewnienia stałej temperatury nanocieczki, proces sonikacji należy przeprowadzać w łaźni wodnej.

W przypadku nanocieczki powstałej w wyniku modyfikowania oleju mineralnego tlenkiem tytanu  $TiO_2$  czas trwania procesu sonikacji wynosił 5 godzin. Po tym czasie uzyskano stabilny koloid.

W przypadku nanocieczki powstałej w wyniku modyfikowania oleju mineralnego tlenkiem glinu  $Al_2O_3$ , mimo działania ultradźwiękami przez czas 10 godzin, nie udało się uzyskać stabilnej nanocieczki, w związku z tym jej właściwości nie były badane. W celu uzyskania stabilnego koloidu z  $Al_2O_3$  konieczne jest zastosowanie innej substancji powierzchniowo czynnej.

Po przeprowadzeniu procesu sonikacji próbki cieczy odstawiono na kilka godzin, w celu wyeliminowania mikropęcherzyków powietrza powstałych w wyniku działania ultradźwięków.

W wyniku opisanych powyżej działań do badań przygotowano następujące cieczy elektroizolacyjne:

- olej mineralny,
- olej mineralny +  $C_{60}$  – o stężeniu fulerenu w oleju wynoszącym 100 mg/l,
- olej mineralny + substancja powierzchniowo czynna (SPAN 20) – o stężeniu SPANU w oleju wynoszącym 5 g/l,
- olej mineralny + SPAN +  $TiO_2$  – o stężeniu SPANU i  $TiO_2$  w oleju wynoszącym odpowiednio 5 g/l i 0,816 g/l.

## Wyniki pomiarów

Badanymi właściwościami, istotnymi z punktu widzenia transportu ciepła do otoczenia przez ciecz, były przewodność cieplna właściwa  $\lambda$ , lepkość  $\nu$  oraz gęstość  $\rho$ .

Do pomiarów przewodności cieplnej badanych cieczy elektroizolacyjnych wykorzystano autorski układ pomiarowy szczegółowo opisany w artykule [7]. Badania lepkości wykonano przy wykorzystaniu układu pomiarowego zbudowanego zgodnie z normą [8]. Z kolei pomiar gęstości przeprowadzono w oparciu o normę [9].

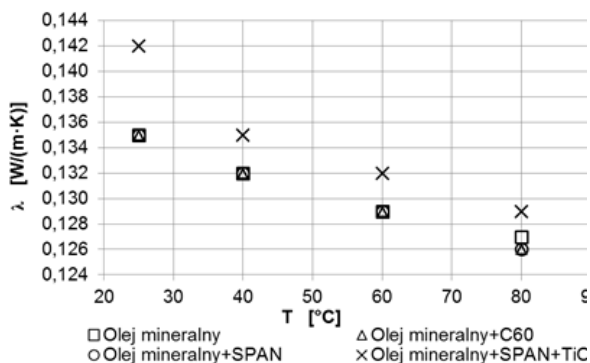
W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej właściwej  $\lambda$ , lepkości  $\nu$  oraz gęstości  $\rho$  oleju mineralnego oraz nanocieczki powstałych na bazie oleju mineralnego w zależności od temperatury. Badania wszystkich wymienionych właściwości przeprowadzono dla czterech wartości temperatury: 25, 40, 60 i 80°C.

Tabela 1. Wyniki badań przewodności cieplnej, lepkości oraz gęstości różnych cieczy elektroizolacyjnych wyznaczone dla różnych wartości temperatury

I.p.	Ciecz	Właściwość	25°C	40°C	60°C	80°C
1	Olej mineralny	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,135	0,132	0,129	0,127
		$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	17,08	9,39	5,37	3,43
		$\rho$ [g/ml]	0,867	0,857	0,845	0,832
2	Olej mineralny + $C_{60}$	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,136	0,133	0,129	0,127
		$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	17,38	9,86	5,46	3,56
		$\rho$ [g/ml]	0,867	0,856	0,845	0,832
3	Olej mineralny + SPAN	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,135	0,132	0,129	0,126
		$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	17,61	9,87	5,81	3,61
		$\rho$ [g/ml]	0,867	0,856	0,846	0,832
4	Olej mineralny + SPAN + $TiO_2$	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,142	0,135	0,132	0,129
		$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	17,99	10,18	6,10	3,69
		$\rho$ [g/ml]	0,868	0,858	0,846	0,832

Na rysunku 2 przedstawiono zależność współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  badanych cieczy elektroizolacyjnych od temperatury. Jak wynika z rysunku największą przewodnością cieplną charakteryzuje się olej mineralny modyfikowany nanocząstkami  $TiO_2$  oraz środkiem powierzchniowo czynnym (SPAN). W temperaturze 25°C przewodność cieplna analizowanej nanocieczki jest o ponad 5% większa od przewodności oleju mineralnego. Z kolei w temperaturze 80°C przewodność cieplna oleju mineralnego domieszkowanego nanocząstkami  $TiO_2$  i środkiem powierzchniowo czynnym jest o około 2% większa od przewodności oleju mineralnego. Wzrost przewodności cieplnej badanej nanocieczki zauważalny jest w całym zakresie badanej temperatury. Podobnie, jak w przypadku oleju mineralnego, przewodność cieplna powstałych nanocieczki maleje wraz ze wzrostem temperatury.

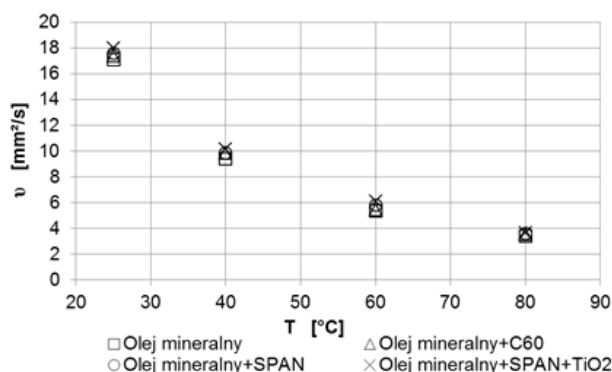
Nie stwierdzono wpływu modyfikowania oleju mineralnego fulerenem  $C_{60}$  oraz substancją powierzchniowo czynną (SPAN 20) na przewodność cieplną oleju mineralnego.



Rys.2. Zależność współczynnika przewodności cieplnej badanych cieczy elektroizolacyjnych od temperatury

W kolejnych akapitach opisano wyniki analizy wpływu domieszkowania oleju mineralnego fulerenem  $C_{60}$  oraz nanocząstkami  $TiO_2$  na lepkość badanych nanocieczy.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność lepkości  $\nu$  badanych cieczy elektroizolacyjnych od temperatury. Analizując przedstawiony wykres oraz wyniki badań zawarte w tabeli 1 można zauważyć, że modyfikowanie oleju mineralnego środkiem powierzchniowo czynnym oraz nanocząstkami  $C_{60}$  i  $TiO_2$  skutkuje wzrostem lepkości powstałych nanocieczy. Domieszkowanie oleju mineralnego fulerenem  $C_{60}$ , w zależności od temperatury, powoduje wzrost lepkości powstałej nanocieczy od około 2% do około 5% w stosunku do cieczy bazowej. Z kolei modyfikowanie oleju mineralnego środkiem powierzchniowo czynnym powoduje wzrost lepkości cieczy od około 3% do 8%. Największym wzrostem lepkości od około 5% do około 14% charakteryzuje się nanociecz powstała w wyniku modyfikowania oleju mineralnego środkiem powierzchniowo czynnym i nanocząstkami  $TiO_2$ . Lepkość badanych nanocieczy maleje wraz ze wzrostem temperatury.



Rys.3. Zależność lepkości badanych cieczy elektroizolacyjnych od temperatury

Nie stwierdzono wpływu domieszkowania oleju mineralnego środkiem powierzchniowo czynnym oraz nanocząstkami  $C_{60}$  i  $TiO_2$  na gęstość badanych nanocieczy. Na gęstość badanych nanocieczy wpływ ma tylko temperatura. Wraz ze wzrostem temperatury maleje gęstość wszystkich badanych nanocieczy.

Podsumowując można stwierdzić, że największy wpływ na zmianę analizowanych właściwości, miała modyfikacja oleju mineralnego nanocząstkami  $TiO_2$ . Domieszkowanie

oleju mineralnego nanocząstkami  $TiO_2$  poprawiło przewodność cieplną oleju mineralnego, co jest korzystne z punktu widzenia transportu ciepła przez ciecz do otoczenia. Niestety wzrosła również lepkość powstałej nanocieczy, co jest cechą niepożądaną.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że modyfikowanie oleju mineralnego nanocząstkami wpływa na jego właściwości cieplne. Modyfikowanie cieczy elektroizolacyjnej za pomocą nanocząstek może zatem wpływać na proces transportu ciepła w urządzeniach elektroenergetycznych oraz rozkład temperatury w ich wnętrzu.

Właściwościami mającymi znaczenie z punktu widzenia transportu ciepła do otoczenia, oprócz przewodności cieplnej, lepkości i gęstości są również ciepło właściwe i rozszerzalność cieplna. Definitywne stwierdzenie, czy badana nanociecz usprawni transport ciepła wymaga zbadania również tych właściwości. W najbliższej przyszłości planowane jest uzupełnienie wyników badań również tych właściwości.

Kompletne wyniki badań związane z właściwościami cieplnymi nanocieczy pozwolą na poprawne projektowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

*Publikacja powstała w ramach Stypendium otrzymanego z projektu "Inżynier Przyszłości. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Politechniki Poznańskiej", nr POKL.04.03.00-00-259/12, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

## LITERATURA

- [1] 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*, volume 19 issue 3 (2012), 770-776
- [2] Chiesa M., Das S. K., Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media, *Colloid and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 335 (2009), 88-97
- [3] Aksamit P., Zmarzły D., Dielectric properties of fullerene-doped insulation liquids, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2009), 212-215
- [4] Aksamit P., Zmarzły D., Boczar T., Electrostatic properties of aged fullerene-doped mineral oil, *IEEE Transactions and Dielectrics and Electrical Insulation*, volume 18 issue 5 (2011), 1459-1462
- [5] 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*, volume 28 issue 5 (2012), p. 43-50
- [6] Jezierski E., Transformatory, WNT Warszawa, 1983
- [7] Dombek G., Nadolny Z., Autorski układ do pomiaru przewodności cieplnej właściwej cieczy elektroizolacyjnych, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 74 (2013), 159-166
- [8] PN-EN 3104:2004. Przetwory naftowe: Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste. Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej
- [9] PN-EN ISO 3675. Ropa naftowa i ciecple przetwory naftowe. Laboratoryjne oznaczenie gęstości. Metoda z areometrem
- [10] Siciński Z., Badanie materiałów elektroizolacyjnych, WNT Warszawa, 1968

**Autorzy:** mgr inż. Grzegorz Dombek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [grzegorz.a.dombek@doctorate.put.poznan.pl](mailto:grzegorz.a.dombek@doctorate.put.poznan.pl); dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [zbigniew.nadolny@put.poznan.pl](mailto:zbigniew.nadolny@put.poznan.pl); dr inż. Piotr Przybyłek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [piotr.przybylek@put.poznan.pl](mailto:piotr.przybylek@put.poznan.pl).