

Grzegorz DOMBEK\*  
Zbigniew NADOLNY\*  
Piotr PRZYBYŁEK\*

## ROLA RODZAJU CIECZY ELEKTROIZOLACYJNEJ W ROZKŁADZIE TEMPERATURY TRANSFORMATORA

Olej mineralny jest najczęściej stosowaną cieczą w układzie izolacyjnym transformatora. Jednakże od kilkunastu lat obserwowalny jest wzrost zainteresowania alternatywnymi dla niego cieczami elektroizolacyjnymi, do których zaliczamy ester syntetyczny oraz ester naturalny. Spowodowane jest to coraz bardziej restrykcyjnymi przepisami dotyczącymi środowiska naturalnego oraz bezpieczeństwa pożarowego. Olej mineralny, w porównaniu z estrami, odznacza się bardzo dobrymi właściwościami elektroizolacyjnymi i mniejszą lepkością. Z kolei estry, w porównaniu z olejem, wykazują dużo większą biodegradowalność oraz charakteryzują się znacznie większą temperaturą zapłonu, co przemawia na ich korzyść.

W artykule przedstawiono wpływ rodzaju cieczy elektroizolacyjnej na efektywność układu chłodzenia transformatora. Efektywność ta określona została poprzez wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy. Współczynnik ten zależy od właściwości cieplnych cieczy, do których zaliczamy przewodność cieplną  $\lambda$ , lepkość kinematyczną  $\nu$ , ciepło właściwe  $c_p$ , gęstość  $\rho$  oraz rozszerzalność cieplną  $\beta$ . Do badań wykorzystano olej mineralny, ester syntetyczny oraz ester naturalny. Pomiaru właściwości cieplnych przeprowadzono w zakresie temperatury od 25°C do 80°C.

SŁOWA KLUCZOWE: olej mineralny, estry syntetyczne, estry naturalne, chłodzenie, transformator

### 1. WPROWADZENIE

Temperatura w transformatorze zależy przede wszystkim od jego obciążenia, strat w uzwojeniach i rdzeniu, warunków atmosferycznych oraz czynników eksploatacyjnych [1]. Do czynników eksploatacyjnych zalicza się m.in. rodzaj zastosowanej cieczy elektroizolacyjnej oraz temperaturę. Czynniki te mogą wpływać na przejmowanie ciepła przez ciecz, które zależy od jej właściwości cieplnych. Do właściwości tych zaliczamy przewodność cieplną, lepkość kinematyczną, ciepło właściwe, gęstość oraz rozszerzalność cieplną.

---

\* Politechnika Poznańska.

W literaturze podawane są niepełne informacje dotyczące wpływu wyżej wymienionych czynników na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych. Informacje te dotyczą przede wszystkim oleju mineralnego [2]. Niedostępne są również informacje dotyczące właściwości cieplnych alternatywnych dla oleju mineralnego cieczy elektroizolacyjnych, do których zaliczamy między innymi ester syntetyczny i ester naturalny [3, 4].

Na podstawie powyższych informacji można stwierdzić, że w trakcie eksploatacji transformatora zmianie może podlegać wiele czynników, mogących mieć wpływ na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych, a tym samym na jej zdolność do odprowadzania ciepła. W związku z tym w artykule dokonano analizy wpływu rodzaju cieczy elektroizolacyjnej oraz temperatury na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych.

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań była analiza i porównanie właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych wykorzystywanych w układzie chłodzenia transformatora oraz określenie w jakim stopniu wpływają one na współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_{pap-ciecz}$ . Współczynnik  $\alpha_{pap-ciecz}$  określa skuteczność odbierania ciepła przez ciecz elektroizolacyjną z powierzchni izolacji papierowej uzwojeń transformatora. Współczynnik ten określony jest poniższą zależnością:

$$\alpha_{pap-ciecz} = c \cdot \delta^{3n-1} \cdot \Delta T^n \cdot g^n \cdot \beta^n \cdot c_p^n \cdot \rho^n \cdot \lambda^{1-n} \cdot \nu^{-n} \quad (1)$$

gdzie:  $c$ ,  $n$  – stałe zależne od charakteru przepływu,  $\delta$  – wymiar charakterystyczny [m],  $\Delta T$  – spadek temperatury [°C],  $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $\beta$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej [ $\text{K}^{-1}$ ],  $c_p$  – ciepło właściwe [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  – gęstość [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $\nu$  – lepkość kinematyczna [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Jak zatem widać współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_{pap-ciecz}$  zależy od parametrów geometrycznych transformatora ( $c$ ,  $n$ ,  $\delta$ ), od przyciągania ziemskiego  $g$  oraz od właściwości cieplnych zastosowanej cieczy elektroizolacyjnej ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $c_p$ ).

Zakres badań obejmował pomiar współczynnika przewodności cieplnej właściwej  $\lambda$ , lepkości kinematycznej  $\nu$ , ciepła właściwego  $c_p$ , gęstości  $\rho$  oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\beta$ . Do pomiaru współczynnika  $\lambda$  wykorzystano współautorski układ pomiarowy opisany w pozycjach [5-7]. Z kolei do pomiaru lepkości kinematycznej  $\nu$  i gęstości  $\rho$  wykorzystano układy opisane w artykule [8]. Ciepło właściwe  $c_p$  oraz rozszerzalność cieplną  $\beta$  określono przy wykorzystaniu układów pomiarowych opisanych w artykule [9].

Do badań wykorzystano próbki oleju mineralnego o nazwie handlowej Nytro Taurus produkowanego przez firmę Nynas, próbki estru syntetycznego o nazwie

handlowej Midel 7131 wytwarzanego przez firmę M&I Materials oraz próbki estru naturalnego o nazwie handlowej Envirotemp FR3 produkowanego przez firmę Cargil. Zawilgocenie oraz liczba kwasowa próbek cieczy przygotowanych do badań odpowiadały cieczom nowym, wykorzystywanym do napełniania nowych lub restaurowanych jednostek transformatorowych. Olej mineralny charakteryzował się zawilgoceniem o wartości 2 ppm oraz liczbą kwasową mniejszą niż  $0,01 \text{ mg}_{\text{KOH}} \cdot \text{g}^{-1}$  cieczy. Zawilgocenie estru syntetycznego było równe 45 ppm, a jego liczba kwasowa była mniejsza od  $0,03 \text{ mg}_{\text{KOH}} \cdot \text{g}^{-1}$  cieczy. Z kolei zawilgocenie estru naturalnego wynosiło 34 ppm, a liczba kwasowa równa była  $0,02 \text{ mg}_{\text{KOH}} \cdot \text{g}^{-1}$  cieczy. Różne wartości zawilgocenia wynikały z różnego poziomu chłonności wody poszczególnych rodzajów cieczy oraz z dopuszczalnej wartości ich zawilgocenia według normy [10]. Podobnie było w przypadku różnej wartości liczby kwasowej.

### 3. WYNIKI POMIARÓW

W tabeli 1 oraz na wykresach 1 – 6 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości cieplnych takich, jak przewodność cieplna właściwa  $\lambda$ , lepkość kinematyczna, ciepło właściwe  $c_p$ , gęstość  $\rho$  oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej  $\beta$ , a także wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  przez ciecz w zależności od rodzaju cieczy i temperatury  $T$ .

Porównując wyniki pomiarów współczynnika  $\lambda$  analizowanych cieczy elektroizolacyjnych można stwierdzić, że estry, niezależnie od temperatury charakteryzują się znacznie większym współczynnikiem  $\lambda$  w odniesieniu do oleju mineralnego. W temperaturze  $25^\circ\text{C}$  przewodność cieplna estru syntetycznego była większa o 18,8%, a estru naturalnego o 36,8% od przewodności oleju mineralnego. Z kolei w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  przewodność cieplna estru syntetycznego była większa o 19,8%, a estru naturalnego o 38,9% od przewodności oleju mineralnego.

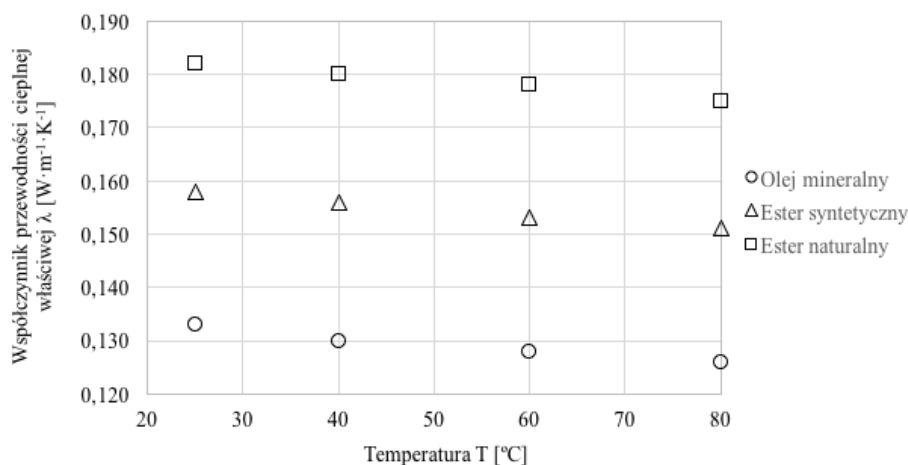
Przewodnictwo cieplne wywołane jest bezładnym ruchem atomów i cząstek oraz związanym z tym przekazywaniem energii w czasie ich zderzeń. W estrze syntetycznym i w estrze naturalnym, ze względu na silniejsze oddziaływanie ze sobą cząsteczek estru, odległości między cząsteczkami są mniejsze niż w przypadku oleju mineralnego, zatem przekazywanie energii kinetycznej jest ułatwione.

Wraz ze wzrostem temperatury od  $25^\circ\text{C}$  do  $80^\circ\text{C}$  zauważalny był spadek przewodności cieplnej wszystkich analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego przewodność cieplna zmalała o 5,3%, w przypadku estru syntetycznego o 4,4%, a w przypadku estru naturalnego o 3,8%.

Przewodność cieplna analizowanych cieczy elektroizolacyjnych maleje wraz ze wzrostem temperatury, gdyż wzrastają odległości pomiędzy cząsteczkami cieczy. Wzrost odległości utrudnia przekazywanie energii kinetycznej w związku z czym maleje przewodność cieplna cieczy.

Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnej w zależności od jej rodzaju, dla różnych wartości temperatury  $T$ ; ciecz nowa

| Rodzaj cieczy elektroizolacyjnej  | Olej mineralny | Estry syntetyczne | Estry naturalne |
|---|----------------|-------------------|-----------------|
| Właściwości   |                |                   |                 |
| Temperatura 25°C  |                |                   |                 |
| Współczynnik przewodności cieplnej właściwej $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 0,133          | 0,158             | 0,182           |
| Lepkość kinematyczna $\nu$ [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]  | 17,08          | 55,14             | 56,29           |
| Ciepło właściwe $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]                                 | 1902           | 1905              | 2028            |
| Gęstość $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  | 867            | 964               | 917             |
| Rozszerzalność cieplna $\beta$ [ $\text{K}^{-1}$ ]  | 0,00075        | 0,00076           | 0,00074         |
| Współczynnik przejmowania ciepła $\alpha_{pap.-ciecz}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 93,56          | 78,43             | 83,46           |
| Właściwości   |                |                   |                 |
| Temperatura 40°C  |                |                   |                 |
| Współczynnik przewodności cieplnej właściwej $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 0,130          | 0,156             | 0,180           |
| Lepkość kinematyczna $\nu$ [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]  | 9,59           | 28,25             | 32,66           |
| Ciepło właściwe $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]                                 | 1974           | 1964              | 2082            |
| Gęstość $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  | 857            | 953               | 908             |
| Rozszerzalność cieplna $\beta$ [ $\text{K}^{-1}$ ]  | 0,00076        | 0,00077           | 0,00076         |
| Współczynnik przejmowania ciepła $\alpha_{pap.-ciecz}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 107,89         | 92,85             | 96,12           |
| Właściwości   |                |                   |                 |
| Temperatura 60°C  |                |                   |                 |
| Współczynnik przewodności cieplnej właściwej $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 0,128          | 0,153             | 0,178           |
| Lepkość kinematyczna $\nu$ [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]  | 5,37           | 14,02             | 18,29           |
| Ciepło właściwe $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]                                 | 2077           | 2052              | 2166            |
| Gęstość $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  | 845            | 940               | 892             |
| Rozszerzalność cieplna $\beta$ [ $\text{K}^{-1}$ ]  | 0,00078        | 0,00078           | 0,00078         |
| Współczynnik przejmowania ciepła $\alpha_{pap.-ciecz}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 125,70         | 110,72            | 111,80          |
| Właściwości   |                |                   |                 |
| Temperatura 80°C  |                |                   |                 |
| Współczynnik przewodności cieplnej właściwej $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 0,126          | 0,151             | 0,175           |
| Lepkość kinematyczna $\nu$ [ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]  | 3,43           | 8,11              | 11,50           |
| Ciepło właściwe $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]                                 | 2187           | 2149              | 2259            |
| Gęstość $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  | 832            | 926               | 880             |
| Rozszerzalność cieplna $\beta$ [ $\text{K}^{-1}$ ]  | 0,00080        | 0,00079           | 0,00080         |
| Współczynnik przejmowania ciepła $\alpha_{pap.-ciecz}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 141,65         | 127,51            | 126,17          |



Rys. 1. Zależność współczynnika przewodności cieplnej właściwej  $\lambda$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$

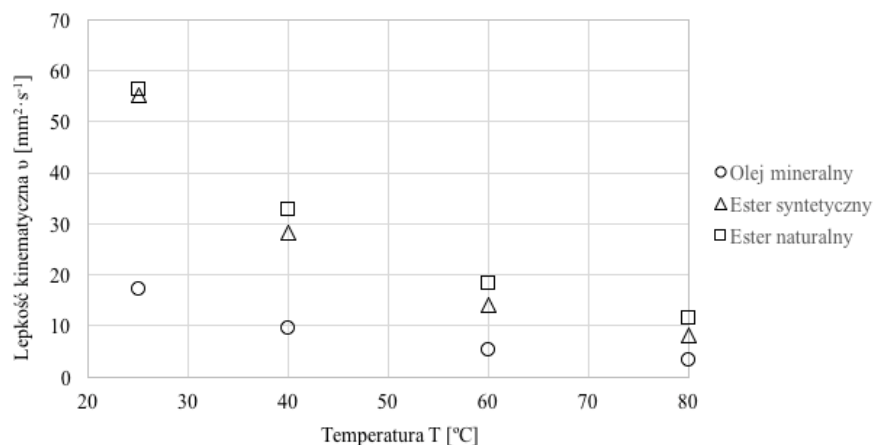
Na podstawie wyników pomiarów można zauważyć, że najmniejszą lepkością, niezależnie od temperatury, charakteryzował się olej mineralny. W temperaturze 25°C lepkość kinematyczna estru syntetycznego była o 223%, a estru naturalnego o 230% większa od lepkości oleju mineralnego. Natomiast w temperaturze 80°C lepkość estru syntetycznego była o 136%, a estru naturalnego o 235% większa od lepkości oleju mineralnego.

Lepkość kinematyczna cieczy elektroizolacyjnych wynika z ich budowy chemicznej. Większa lepkość estru syntetycznego i estru naturalnego związana była prawdopodobnie z silniejszymi oddziaływaniami międzycząsteczkowymi. Silniejsze oddziaływania międzycząsteczkowe powodują, że siły tarcia wewnętrznego w estrach są znacznie większe od sił tarcia w oleju mineralnym.

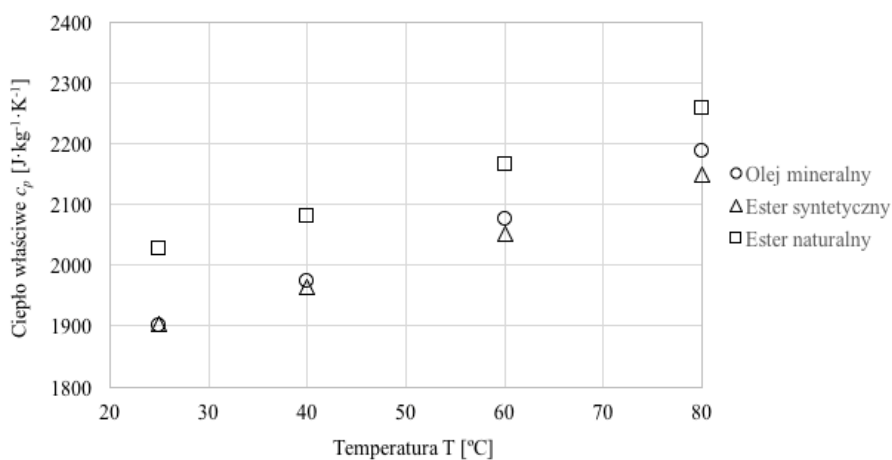
Wzrost temperatury z 25°C do 80°C skutkował znaczącym spadkiem lepkości kinematycznej  $\nu$  analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego lepkość zmalała o 80%, w przypadku estru syntetycznego o 85%, a w przypadku estru naturalnego o 80%. Spadek lepkości cieczy, wywołany wyższą temperaturą, należy wiązać ze zmniejszaniem sił przyciągania działającego pomiędzy cząsteczkami cieczy na skutek wzrostu ich energii kinetycznej. Energia cząsteczek wzrasta wskutek wzrostu temperatury. W wyższej temperaturze cząsteczki poruszają się z większymi prędkościami, co osłabia siły międzycząsteczkowe. W efekcie powoduje to zmniejszenie sił tarcia wewnętrznego i obniżenie lepkości.

Jak wynika z tabeli 1 i z rysunku 3 największym ciepłem właściwym  $c_p$  charakteryzuje się ester naturalny. W temperaturze 25°C ciepło właściwe estru syntetycznego było o 0,2%, a estru naturalnego o 6,6% większe od ciepła właściwe-

go oleju mineralnego. Natomiast w temperaturze 80°C ciepło właściwe estru syntetycznego było o 1,7% mniejsze, a estru naturalnego o 3,3% większe od ciepła właściwego oleju mineralnego.



Rys. 2. Zależność lepkości kinematycznej  $\nu$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$



Rys. 3. Zależność ciepła właściwego  $c_p$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$

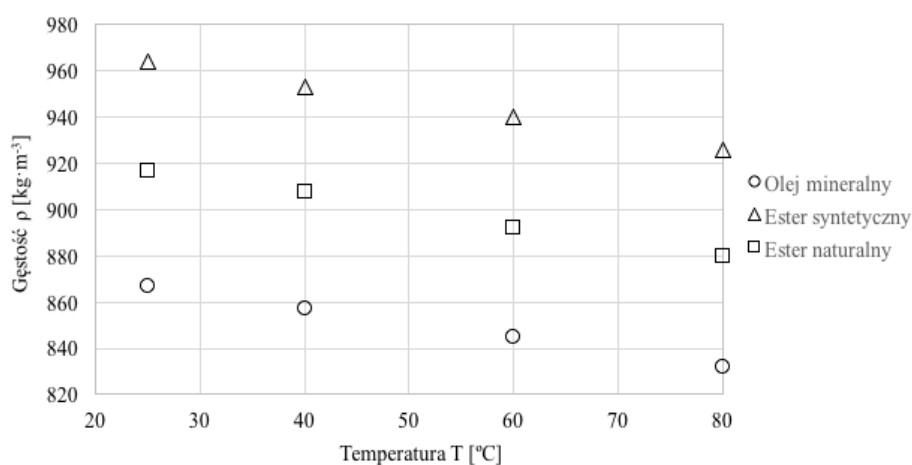
Ciepło właściwe związane jest bezpośrednio z pojemnością cieplną substancji, która określa ilość energii, jaką są w stanie przyjąć jej cząsteczki. Pojemność cieplna jest funkcją stopni swobody cząsteczki. Oznacza to, że im większe są cząsteczki, tym większą liczbą stopni swobody się charakteryzują. Cząsteczki estru naturalnego i oleju mineralnego są większe od cząsteczek estru syntetycznego, przez co mogą przechowywać więcej energii. Im więcej energii cząsteczka

może przyjąć (im więcej ma stopni swobody), tym większą pojemnością cieplną się charakteryzuje. Z kolei im większa jest pojemność cieplna substancji, tym większe jest jej ciepło właściwe.

Wzrost temperatury od 25°C do 80°C spowodował wzrost ciepła właściwego  $c_p$  analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego ciepło właściwe wzrosło o 15%, w przypadku estru syntetycznego o 13%, a w przypadku estru naturalnego o 11%.

Ciepło właściwe cieczy elektroizolacyjnych rośnie wraz z temperaturą dlatego, że wzrasta energia kinetyczna i potencjalna oscylacji atomów cząsteczek cieczy elektroizolacyjnych (możliwa jest większa liczba stopni swobody). Energia kinetyczna jest tym większa, im większa jest szybkość poruszających się cząsteczek.

Analizując dane dotyczące gęstości (tab. 1 i rys. 4) badanych cieczy elektroizolacyjnych można stwierdzić, że najmniejszą gęstością, niezależnie od temperatury, charakteryzował się olej mineralny. W temperaturze 25°C gęstość estru syntetycznego była o 11,2%, a estru naturalnego o 5,8% większa od gęstości oleju mineralnego. Z kolei w temperaturze 80°C gęstość estru syntetycznego była o 11,3%, a estru naturalnego o 5,8% większą od gęstości oleju mineralnego.



Rys. 4. Zależność gęstości  $\rho$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$

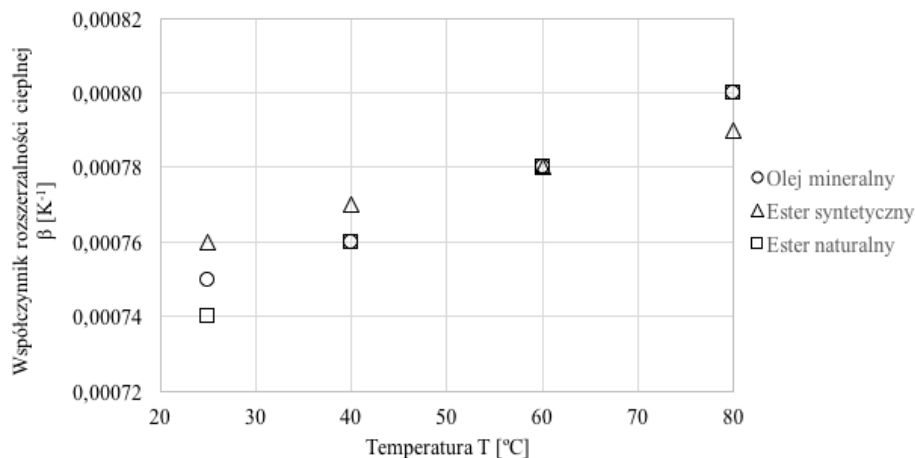
Gęstość substancji związana jest z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi i wynika z ich budowy. Większa gęstość estrów wynikała z tego, że siły oddziaływań międzycząsteczkowych w estrach są prawdopodobnie większe od sił oddziaływań międzycząsteczkowych w oleju mineralnym. Większe siły międzycząsteczkowe w estrach powodują, że cząsteczki estrów nie są oddalone od siebie tak jak cząsteczki oleju mineralnego. W związku z tym, że cząsteczki w oleju mineralnym są od siebie bardziej oddalone, jego objętość jest większa, a gę-

stość mniejsza.

Wzrost temperatury z 25°C do 80°C skutkował spadkiem gęstości  $\rho$  analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego gęstość spadła o 4,0%, w przypadku estru syntetycznego o 3,9%, a w przypadku estru naturalnego o 4,0%.

Gęstość cieczy elektroizolacyjnych maleje wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ cząsteczki cieczy poruszają się z większą prędkością. Większa prędkość cząsteczek cieczy powoduje zmniejszenie sił międzycząsteczkowych. W konsekwencji cząsteczki oddalają się od siebie powodując tym samym wzrost objętości cieczy. Wzrost objętości cieczy powoduje spadek jej gęstości.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 i na rysunku 5 można stwierdzić, że rozszerzalność cieplna analizowanych cieczy była porównywalna. W temperaturze 25°C rozszerzalność estru syntetycznego była o 1,3% większa, a estru naturalnego o 1,3% mniejsza od rozszerzalności oleju mineralnego. Natomiast w temperaturze 80°C rozszerzalność cieplna estru syntetycznego była o 1,3% mniejsza od rozszerzalności oleju mineralnego. Z kolei rozszerzalność cieplna estru naturalnego była równa rozszerzalności cieplnej oleju mineralnego. Różnice w rozszerzalności cieplnej poszczególnych cieczy, podobnie jak w przypadku gęstości, wynikały z różnicy sił oddziaływań międzycząsteczkowych.



Rys. 5. Zależność współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\beta$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$

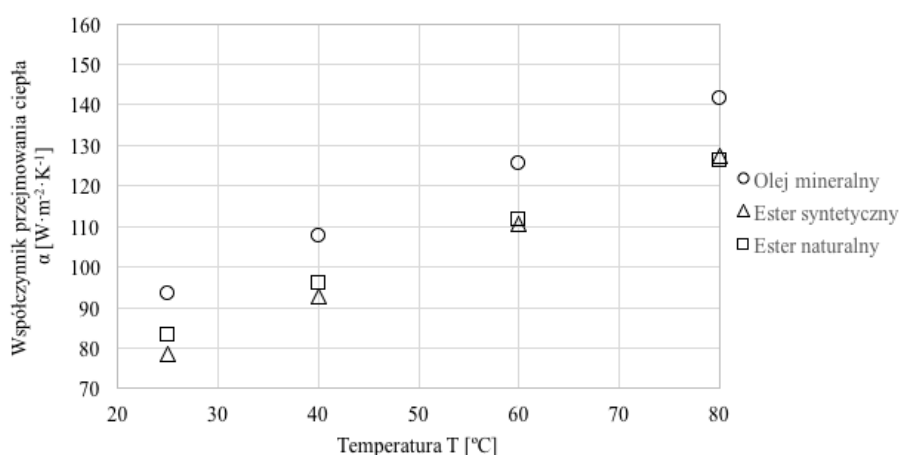
Wzrost temperatury od 25°C do 80°C skutkował wzrostem współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\beta$  wszystkich analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego rozszerzalność cieplna wzrosła o 6,7%, w przypadku estru syntetycznego o 4,0%, a w przypadku estru naturalnego o 8,1%.

Wzrost współczynnika rozszerzalności cieplnej cieczy wraz z temperaturą



wynikał z tego, że cząsteczki cieczy drgają z coraz większą częstotliwością, przez co wzrasta ich średnia prędkość. W wyniku wzrostu prędkości cząsteczki oddalają się od siebie. W związku z czym wraz ze wzrostem odległości między cząsteczkami cieczy zwiększeniu ulegają jej wymiary przestrzenne.

Na podstawie wyżej opisanych właściwości cieplnych, korzystając z zależności (1), wyznaczono współczynnik przejmowania ciepła przez ciecz  $\alpha_{pap-ciecz}$  przy powierzchni izolacji papierowej uzwojeń. Jak wynika z tabeli 1 i z rysunku 6 dla temperatury 25°C współczynnik  $\alpha_{pap-ciecz}$  estrów syntetycznych był o 16,2% mniejszy, a estrów naturalnych o 11,8% mniejszy od współczynnika  $\alpha_{pap-ciecz}$  oleju mineralnego. Z kolei w temperaturze 80°C współczynnik  $\alpha_{pap-ciecz}$  estrów był o 10,0%, a estrów naturalnych o 10,9% mniejszy od współczynnika  $\alpha_{pap-ciecz}$  oleju mineralnego. Jak zatem widać, przy powierzchni izolacji papierowej uzwojeń, niezależnie od temperatury, olej mineralny charakteryzował się największym współczynnikiem przejmowania ciepła.



Rys. 6. Zależność współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  od rodzaju cieczy i temperatury  $T$

Wzrost temperatury od 25°C do 80°C skutkował wzrostem współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha_{pap-ciecz}$  wszystkich analizowanych cieczy elektroizolacyjnych. W przypadku oleju mineralnego współczynnik przejmowania ciepła wzrósł o około 51%, w przypadku estru syntetycznego o około 63%, a w przypadku estru naturalnego o około 51%. Jak zatem widać, przy powierzchni izolacji papierowej uzwojeń, niezależnie od temperatury, olej mineralny charakteryzował się największym współczynnikiem przejmowania ciepła.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów i obliczeń można stwierdzić, że największym współczynnikiem przejmowania ciepła  $\alpha_{pap-ciecz}$  charakteryzował się olej mineralny. Współczynnik przejmowania ciepła pozostałych analizowanych cieczy elektroizolacyjnych był mniejszy. W przypadku estru syntetycznego, w zależności od temperatury, współczynnik przejmowania ciepła był o kilkanaście procentów (10-16%) mniejszy od współczynnika przejmowania ciepła oleju mineralnego. Z kolei w przypadku estru naturalnego współczynnik przejmowania ciepła był o nieco ponad 10% mniejszy od współczynnika przejmowania ciepła oleju mineralnego, niezależnie od temperatury.

Większa wartość współczynnika przejmowania ciepła przez olej mineralny wynikała z jego właściwości cieplnych. Ciepło właściwe, gęstość oraz rozszerzalność cieplna wszystkich analizowanych cieczy elektroizolacyjnych były do siebie zbliżone. Nie miały więc znaczącego wpływu na różnice współczynnika przejmowania ciepła. Natomiast przewodność cieplna obu rodzajów estrów była o kilkadziesiąt procentów większa od przewodności oleju mineralnego. Tym samym korzystnie wpływała na współczynnik przejmowania ciepła estrów. Z kolei lepkość kinematyczna estrów była o setki procentów większa od lepkości oleju. Fakt ten spowodował, że współczynnik przejmowania ciepła miał największą wartość w przypadku oleju mineralnego.

#### LITERATURA

- [1] Jeziński E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1965.
- [2] <http://www.nynas.com>.
- [3] <http://www.cargil.com>.
- [4] <http://www.clearcoproducts.com>.
- [5] Dombek G., Nadolny Z., Autorski układ do pomiaru przewodności cieplnej właściwej cieczy elektroizolacyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, nr 74, s. 159-166, Poznań, 2013.
- [6] Dombek G., Nadolny Z., Measurement of thermal conductivity coefficient of insulating liquids using authoring measurement system, Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, nr 1, s. 66-68, 2014.
- [7] Dombek G., Nadolny Z., Measurements of the selected thermal properties of insulating liquids used in the high voltage power transformers, Computer Applications in Electrical Engineering, vol. 11, p. 189-198, Poznań, 2013.
- [8] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P., Badanie czynników wpływających na zdolność cieczy elektroizolacyjnych do transportu ciepła, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, s. 148-151, 2014.

- [9] Dombek G., Właściwości cieplne estru naturalnego modyfikowanego nanocząstkami  $\text{TiO}_2$  i  $\text{C}_{60}$ , Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, nr 82, s. 235-242, Poznań, 2015.
- [10] PN-EN 60422:2006. Mineralne oleje izolacyjne w urządzeniach elektrycznych – Zalecenia dotyczące nadzoru i konserwacji.

### THE ROLE OF THE TYPE OF INSULATING LIQUID IN THE TRANSFORMER TEMPERATURE DISTRIBUTION

The mineral oil is most frequently used liquid in insulation transformer system. However, increased interest in alternative insulating liquid for it, which include synthetic ester and natural ester is observable for several years. However, for several years, the increased interest in insulating liquids as alternatives to mineral oil is observable, which include synthetic ester and natural ester. This is due to increasingly restrictive environmental legislation and fire safety. Mineral oil, in comparison with esters has a very good electric insulation properties and a lower viscosity. In turn the esters in comparison with oil, have a much greater biodegradability and have a much higher flash point, which suggests their favor.

The influence of the type of insulating liquid on the efficiency of the cooling system of the transformer was presented in the paper. This efficiency was determined by designating the heat transfer coefficient  $\alpha$  by liquids. This factor depends on the thermal properties of liquids, which include the thermal conductivity  $\lambda$ , kinematic viscosity  $\nu$ , specific heat  $c_p$ , density  $\rho$ , and thermal expansion  $\beta$ . To the study mineral oil, synthetic ester and natural ester were used. The measurements of thermal properties were carried out in the temperature range from 25°C to 80°C

*(Received: 4. 02. 2016, revised: 2. 03. 2016)*