

Dr inż. Grzegorz Dombek

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: grzegorz.dombek@put.poznan.pl

Dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: zbigniew.nadolny@put.poznan.pl

Rodzaj cieczy, temperatura, zawilgocenie oraz zesterzenie jako parametry eksploatacyjne warunkujące niezawodność układu chłodzenia transformatora

Słowa kluczowe: transformatory energetyczne, ciecze elektroizolacyjne, współczynnik przejmowania ciepła, zawilgocenie, zesterzenie

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych, wykorzystywanych w układzie chłodzenia transformatora wysokiego napięcia. Dokonano analizy wpływu takich czynników jak rodzaj cieczy, temperatura, stopień jej zawilgocenia oraz zesterzenia na właściwości cieplne cieczy. Analizowanymi właściwościami cieczy były przewodność cieplna właściwa λ , lepkość kinematyczna ν , gęstość ρ , ciepło właściwe c_p oraz rozszerzalność cieplna β . Właściwości te określają zdolność cieczy do transportu ciepła – współczynnik przejmowania ciepła α , a tym samym warunkują niezawodność układu chłodzenia transformatora. Na podstawie zmierzonych przez autorów wartości właściwości cieplnych określony został współczynnik przejmowania ciepła badanych cieczy elektroizolacyjnych.

1. Wprowadzenie

Rozkład temperatury odgrywa istotną rolę dla zapewnienia poprawnej pracy transformatora wysokiego napięcia [8, 15-17]. Zbyt wysoka temperatura pociąga za sobą wiele negatywnych skutków, które mogą przyczyniać się do powstawania zagrożenia, zarówno dla samego urządzenia, jak i personelu obsługującego oraz środowiska naturalnego [4, 5]. Podwyższona temperatura w transformatorze przyczynia się do przyspieszenia procesu starzeniowego jego układu izolacyjnego. Skutkiem tego jest pogorszenie wielu właściwości tego układu, jak spadek rezystancji, wzrost współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}(\delta)$, wzrost zawilgocenia [6, 13, 14, 22, 26]. Wymienione skutki były w przeszłości niejednokrotnie przyczyną awarii lub zniszczenia transformatora [9].

Wymiana ciepła w transformatorze odbywa się na drodze: źródło ciepła → papier zaimpregnowany cieczą elektroizolacyjną → ciecz elektroizolacyjna → obudowa → powietrze [18]. Ciecz elektroizolacyjna ma zatem duże znaczenie w procesie tej wymiany. Proces ten związany jest ze zjawiskiem przejmowania ciepła przez ciecz i zależy od szeregu właściwości cieplnych cieczy, takich jak przewodność cieplna, lepkość, ciepło właściwe, gęstość i rozszerzalność cieplna.

Ciecze w trakcie eksploatacji ulegają procesowi starzenia i zawilgacania się oraz pracują w szerokim zakresie temperatury. Badania cieczy zestarzonych, zawilgoconych i w różnej temperaturze prowadzone są głównie w odniesieniu do właściwości elektrycznych, a nie cieplnych. W pozycji [3] można znaleźć informacje na temat wpływu stopnia starzenia cieczy na takie wielkości elektryczne jak przenikalność elektryczna, współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}(\delta)$ oraz wytrzymałość elektryczna. Natomiast wpływ zawilgocenia cieczy na współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}(\delta)$ oraz przenikalność elektryczną opisano w publikacji [25]. Z kolei w artykule [23] autorzy przedstawili wpływ temperatury na takie właściwości elektryczne jak wytrzymałość elektryczna oraz współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}(\delta)$.

W literaturze brak jest kompletnych informacji na temat właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych. Podawane są jedynie dane w odniesieniu do cieczy nowych (niezestarzonych, niezawilgoconych) i dla wybranej wartości temperatury. Producenci cieczy elektroizolacyjnych podają głównie informacje dotyczące właściwości cieplnych cieczy w temperaturze nie przekraczającej 40°C [1, 7, 19]. W pozycjach [6, 21, 24] można znaleźć niepełne informacje na temat właściwości cieplnych nowych cieczy elektroizolacyjnych. Z kolei w artykule [20] przedstawiono wpływ temperatury tylko na jedną spośród wielu właściwości cieplnych, jaką jest lepkość kinematyczna i tylko w odniesieniu do nowych cieczy elektroizolacyjnych. Dostrzegalny jest brak badań w zakresie wpływu zawilgocenia i zesterzenia na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych.

Takie podejście może być źródłem błędów popełnianych na etapie projektowania transformatora. Przykładem tego mogą być wyniki symulacji komputerowej obrazu pola temperaturowego, które powstały na bazie wartości właściwości cieplnych wyznaczonych tylko dla jednej wartości temperatury.

Kompletna wiedza na temat właściwości cieplnych cieczy o różnym stopniu ich zesterzenia, zawilgocenia i w różnej temperaturze jest pożądana i wypełni brakującą w literaturze lukę, czemu poświęcony jest niniejszy artykuł.

2. Cel i zakres badań

Celem podjętych badań było określenie wpływu takich czynników jak rodzaj cieczy, temperatura, zawilgocenie oraz zesterzenie na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych: przewodność cieplną właściwą λ , lepkość kinematyczną ν , gęstość ρ , ciepło właściwe c_p oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej β . Właściwości te określają zdolność cieczy do transportu ciepła – współczynnik przejmowania ciepła α . Na podstawie zmierzonych przez autorów wartości właściwości cieplnych określony został współczynnik przejmowania ciepła α przez badane ciecze elektroizolacyjne zgodnie z poniższym wzorem:

$$\alpha = \sqrt[n+1]{c \cdot \lambda^{1-n} \cdot g^n \cdot \delta^{3n-1} \cdot \beta^n \cdot \rho^n \cdot c_p^n \cdot \nu^{-n} \cdot q^n} \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła cieczy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], c , n – stałe zależne od charakteru przepływu, temperatury i geometrii, λ – przewodność cieplna właściwa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}$], g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], δ – wymiar charakterystyczny związany z przepływem płynu [m], β – rozszerzalność cieplna [K^{-1}], ρ – gęstość [$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$], c_p – ciepło właściwe [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], ν – lepkość kinematyczna [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], q – powierzchniowe obciążenie cieplne [W/m^2].

Pomiary wyżej wymienionych właściwości cieplnych zostały przeprowadzone zgodnie ze stosownymi normami [2, 10-12]. Pomiary zostały przeprowadzone na układach pomiarowych, które w większości przypadków zostały zaprojektowane, zbudowane i przetestowane przez autorów.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Wpływ rodzaju cieczy na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej. Analizę porównawczą dokonano zakładając, że cieczą odniesienia będzie olej mineralny. Za takim wyborem przemawiał fakt, iż jest to w chwili obecnej najczęściej stosowana ciecz elektroizolacyjna w transformatorach.

Tabela 1. Wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych cieczy oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej; temperatura 25°C, ciecz nowa i sucha

Właściwość	Olej mineralny	Ester syntetyczny	Ester naturalny
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,133	0,158	0,182
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	17,08	55,14	56,29
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1902	1905	2028
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	867	964	917
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00075	0,00076	0,00074
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	82,35	69,04	73,46

Przewodność cieplna λ obu estrów była dużo większa od przewodności cieplnej oleju mineralnego. W przypadku estru syntetycznego, jego przewodność była większa o 18,8%, a w przypadku estru naturalnego o 36,8%.

Lepkość kinematyczna ν estrów była dużo większa od lepkości oleju mineralnego. Lepkość estru syntetycznego była większa o 223%, natomiast lepkość estru naturalnego o 230%.

Ciepło właściwe c_p estrów było większe od ciepła właściwego oleju mineralnego. Ciepło estru syntetycznego było większe o 0,2%, a ciepło estru naturalnego o 6,6%.

Gęstość ρ estrów była dużo większa od gęstości oleju mineralnego. W przypadku estru syntetycznego, gęstość była większa o 11,2%, a w przypadku estru naturalnego o 5,8%.

Rozszerzalność cieplna β estrów była porównywalna do rozszerzalności oleju mineralnego. Rozszerzalność cieplna estru syntetycznego była większa od rozszerzalności oleju mineralnego o 1,1%. Rozszerzalność cieplna estru naturalnego była mniejsza od rozszerzalności oleju mineralnego o 1,1%.

Obliczony na podstawie powyższych wyników pomiarów współczynnik przejmowania ciepła α obu estrów był mniejszy od współczynnika oleju mineralnego. Współczynnik przejmowania ciepła estru syntetycznego był mniejszy o 16,2%, natomiast estru naturalnego o 10,1%. Oznacza to, że olej mineralny ma najlepsze właściwości oddawania ciepła na zewnątrz spośród wszystkich analizowanych cieczy.

Mniejszy współczynnik przejmowania ciepła estru syntetycznego i naturalnego, w porównaniu z olejem mineralnym, spowodowany był znacznie większą lepkością (o ponad 200%) estrów. Większa lepkość estrów, w porównaniu z lepkością oleju mineralnego, wynika z ich budowy chemicznej i związana jest ze znacznie większymi siłami tarcia wewnętrznego estrów. Gdy ciecz jest w ruchu sąsiadujące ze sobą warstwy cieczy poruszają się z różną prędkością oddziałując na siebie siłami tarcia wewnętrznego. Zjawisko lepkości cieczy tłumaczy się wymianą pędu między przyległymi warstwami płynącej cieczy. Wymiana ta zachodzi na skutek przedostawania się cząsteczek cieczy z jednej warstwy do drugiej. Cząsteczki przechodzące z warstwy poruszającej się wolniej do warstwy poruszającej się szybciej powodują zmniejszenie pędu warstwy szybszej.

3.2. Wpływ temperatury na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od temperatury cieczy elektroizolacyjnej. Analizę porównawczą dokonano zakładając, że temperaturą odniesienia będzie 25°C.

Tabela 2. Wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych cieczy oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od temperatury cieczy elektroizolacyjnej; ciecz nowa i sucha

Właściwość	Olej mineralny	
	25°C	80°C
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,133	0,126
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	17,08	3,43
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1902	2187
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	867	832
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00075	0,00080
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	82,35	124,67
Właściwość	Ester syntetyczny	
	25°C	80°C
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,158	0,151
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	55,14	8,11
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1905	2149
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	964	926
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00076	0,00079
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	69,04	112,24
Właściwość	Ester naturalny	
	25°C	80°C
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,182	0,175
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	56,29	11,50
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	2028	2259
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	917	880
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00074	0,00080
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	73,46	111,06

Wraz ze wzrostem temperatury od 25°C do 80°C przewodność cieplna λ wszystkich rodzajów cieczy nieznacznie zmalała. W przypadku oleju mineralnego przewodność cieplna zmalała o 5,3%, w przypadku estru syntetycznego o 4,4%, a w przypadku estru naturalnego o 3,9%.

Wzrost temperatury spowodował również znaczący spadek lepkości kinematycznej ν niezależnie od rodzaju cieczy. W przypadku oleju mineralnego lepkość spadła o 80%, w przypadku estru syntetycznego o 85%, a w przypadku estru naturalnego o 80%.

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

Wraz ze wzrostem temperatury zmalała nieco gęstość ρ wszystkich cieczy. W przypadku oleju mineralnego gęstość spadła o 4,0%, w przypadku estru syntetycznego o 3,9%, a w przypadku estru naturalnego o 4,0%.

Wzrost temperatury od 25°C do 80°C spowodował również nieznaczny wzrost rozszerzalności cieplnej β . W przypadku oleju mineralnego wzrost ten wyniósł 6,7%, w przypadku estru syntetycznego 4,0%, a w przypadku estru naturalnego 8,1%.

Wzrost temperatury wywołał wzrost współczynnika przejmowania ciepła α , niezależnie od rodzaju cieczy. Wzrost ten wyniósł 51% w przypadku oleju mineralnego, 63% w przypadku estru syntetycznego oraz 51% w przypadku estru naturalnego. Oznacza to, że im wyższa temperatura tym ciecz elektroizolacyjna lepiej oddaje ciepło na zewnątrz.

Największy wpływ na współczynnik przejmowania ciepła cieczy, wywołany wyższą temperaturą, miała lepkość. Spadek lepkości cieczy, wywołany wyższą temperaturą, należy wiązać ze zmniejszaniem się sił przyciągania działającego pomiędzy cząsteczkami cieczy na skutek wzrostu ich energii kinetycznej. W efekcie powoduje to zmniejszenie sił tarcia wewnętrznego i obniżenie lepkości.

3.3. Wpływ zawilgocenia na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych

W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od zawilgocenia cieczy elektroizolacyjnej. Analizę dokonano porównując właściwości cieplne cieczy zawilgoconej i suchej.

Tabela 3. Wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych cieczy oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od zawilgocenia cieczy elektroizolacyjnej; temperatura $T=25^{\circ}\text{C}$, ciecz nowa

Właściwość	Olej mineralny	
	suchy	zawilgocony
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,133	0,132
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	17,08	17,08
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1902	2017
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	867	867
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00075	0,00075
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	82,35	83,26
Właściwość	Ester syntetyczny	
	Suchy	zawilgocony
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,158	0,158
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	55,14	53,09
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1905	1975
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	964	964
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00076	0,00076
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	69,04	70,32
Właściwość	Ester naturalny	
	suchy	zawilgocony
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,182	0,182
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	56,29	54,96
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	2028	2044
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	917	916
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00074	0,00073
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	73,46	73,77

Przygotowanie cieczy suchej i zawilgoconej polegało na suszeniu i zawilgacaniu próbek oleju mineralnego, estru syntetycznego i estru naturalnego w tych samych warunkach. Na skutek różnej rozpuszczalności wody suche i zawilgocone próbki poszczególnych cieczy miały nieco inną zawartość wody. W przypadku próbek suchych zawilgocenie równe było 2 ppm dla oleju mineralnego, 45 ppm dla estru syntetycznego i 34 ppm dla estru naturalnego.

Z kolei w przypadku próbek zawilgoconych zawilgocenie równe było 46 ppm dla oleju mineralnego, 1875 ppm dla estru syntetycznego oraz 822 ppm dla estru naturalnego.

Wraz ze wzrostem zawilgocenia przewodność cieplna λ wszystkich cieczy elektroizolacyjnych praktycznie pozostała bez zmian. W przypadku oleju mineralnego przewodność minimalnie zmalała o 0,8%, a w przypadku estrów pozostała na tym samym poziomie.

Wzrost zawilgocenia spowodował minimalny spadek lepkości kinematycznej ν cieczy. Lepkość oleju mineralnego pozostała na tym samym poziomie. Lepkość estru syntetycznego zmniejszyła się o 3,7%, natomiast estru naturalnego o 2,4%.

Wzrost zawilgocenia cieczy spowodował pewien wzrost ich ciepła właściwego c_p . Ciepło właściwe oleju mineralnego wzrosło o 6,0%, estru syntetycznego o 3,7%, a estru naturalnego o 0,8%.

Zawilgocenie cieczy elektroizolacyjnych nie miało żadnego wpływu na ich gęstość ρ , niezależnie od rodzaju cieczy.

Zawilgocenie cieczy nie spowodowało większych zmian jej rozszerzalności kinematycznej β . Rozszerzalność oleju mineralnego i estru syntetycznego pozostała na tym samym poziomie, natomiast estru naturalnego zmniejszyła się o 1,4%.

Wzrost zawilgocenia wywołał minimalny wzrost współczynnika przejmowania ciepła α , niezależnie od rodzaju cieczy. Wzrost ten wyniósł 1,1% w przypadku oleju mineralnego, 1,9% w przypadku estru syntetycznego oraz 0,4% w przypadku estru naturalnego. Oznacza to, że im wyższe zawilgocenie tym ciecz elektroizolacyjna minimalnie skuteczniej oddaje ciepło na zewnątrz.

Minimalny wzrost współczynnika przejmowania ciepła cieczy, wywołany jej zawilgoceniem, wiązać należy ze wzrostem ciepła właściwego. Ciepło właściwe suchej cieczy elektroizolacyjnej równe jest około $2000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, natomiast czystej wody $4190 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Oznacza to, że zawilgocenie cieczy elektroizolacyjnej skutkowało wzrostem jej ciepła właściwego c_p , efektem czego był wzrost współczynnika przejmowania ciepła α .

3.4. Wpływ zesterzenia na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych

W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od stopnia zesterzenia cieczy elektroizolacyjnej. Analizę porównawczą dokonano porównując właściwości cieplne cieczy nowej do zesterzonej.

Ciecz nowa oznaczała, że w badaniach wykorzystano próbki cieczy dostarczone bezpośrednio od producenta. Liczba kwasowa była mniejsza od $0,010 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ oleju dla oleju mineralnego, mniejsza niż $0,030 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ estru dla estru syntetycznego i równa $0,020 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ estru w przypadku estru naturalnego.

Ciecz zesterzona wszystkich trzech rodzajów cieczy oznaczała, że proces starzenia odbywał się w tych samych warunkach. Skutkiem tego były nieco różne wartości liczby kwasowej dla poszczególnych rodzajów cieczy. Liczba kwasowa równa była $0,135 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ oleju dla oleju mineralnego, $0,175 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ estru dla estru syntetycznego i $0,173 \text{ mg}_{\text{KOH}}\cdot\text{g}^{-1}$ estru dla estru naturalnego.

Wraz ze wzrostem stopnia zesterzenia cieczy przewodność cieplna λ wszystkich cieczy elektroizolacyjnych praktycznie pozostała bez zmian. W przypadku estru syntetycznego przewodność minimalnie zmalała o 0,6%, natomiast w przypadku oleju mineralnego i estru naturalnego pozostała na tym samym poziomie.

Wzrost stopnia zesterzenia cieczy spowodował w większości przypadków wzrost jej lepkości kinematycznej ν . Lepkość oleju mineralnego wzrosło o 11,8%, a estru naturalnego o 7,3%. Natomiast lepkość estru syntetycznego nieco zmalała o 1,3%.

Tabela 4. Wyniki pomiarów pięciu właściwości cieplnych cieczy oraz wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α w zależności od stopnia zesterzenia cieczy elektroizolacyjnej; temperatura $T=25^{\circ}\text{C}$

Właściwość	Olej mineralny	
	nowy	stary
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,133	0,133
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	17,08	19,09
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1902	1972
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	867	866
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00075	0,00075
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	82,35	80,79
Właściwość	Ester syntetyczny	
	nowy	stary
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,158	0,157
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	55,14	54,43
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1905	2046
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	964	964
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00076	0,00076
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	69,04	70,28
Właściwość	Ester naturalny	
	nowy	stary
Przewodność cieplna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,182	0,182
Lepkość kinematyczna ν [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	56,29	60,36
Ciepło właściwe c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	2028	2012
Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	917	917
Rozszerzalność cieplna β [K^{-1}]	0,00074	0,00075
Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	73,46	72,29

Wraz ze wzrostem stopnia zesterzenia cieczy wzrosło ciepło właściwe c_p w większości cieczy elektroizolacyjnych. Ciepło właściwe oleju mineralnego wzrosło o 3,7%, a estru syntetycznego o 7,4%. Natomiast ciepło właściwe estru naturalnego zmalało o 0,8%.

Stopień zesterzenia cieczy nie miał praktycznie żadnego wpływu na jej gęstość ρ . Niezależnie od rodzaju cieczy, gęstość pozostała na niezmiennym poziomie.

Stopień zesterzenia nie spowodował większych zmian jej rozszerzalności cieplnej β . Rozszerzalność oleju mineralnego i estru syntetycznego pozostała na tym samym poziomie, natomiast estru naturalnego zwiększyła się o 1,3%.

Stopień zesterzenia cieczy elektroizolacyjnej nie miał znaczącego i jednoznacznego wpływu na jej współczynnik przejmowania ciepła α . Zesterzenie spowodowało minimalny spadek współczynnika α o 1,9% w przypadku oleju mineralnego i o 1,6% w przypadku estru naturalnego. Natomiast w przypadku estru syntetycznego zesterzenie spowodowało minimalny wzrost współczynnika α o 1,8%.

Brak wyraźnych zmian współczynnika α spowodowany był tym, że wraz ze wzrostem stopnia zesterzenia cieczy wzrastała jej lepkość kinematyczna ν (powodująca spadek współczynnika α) i jednocześnie wzrastała jej ciepło właściwe c_p (powodujące wzrost współczynnika α). Oznacza to, że zesterzenie cieczy nie ma praktycznie wpływu na jej zdolność do oddawania ciepła do otoczenia.

Wzrost lepkości spowodowany był zapewne tym, że wraz ze wzrostem stopnia zesterzenia powstają stałe produkty tego procesu. Natomiast wzrost ciepła właściwego, towarzyszący starzeniu się cieczy, wywołany był tym, że stałe produkty tego procesu mają większe ciepło właściwe niż czysta ciecz elektroizolacyjna.

4. Wnioski

Rodzaj cieczy elektroizolacyjnej ma istotny wpływ na jej współczynnik przejmowania ciepła α . Na podstawie przeprowadzonych badań okazało się, że spośród badanych cieczy największy współczynnik α ma olej mineralny. Estry miały współczynnik α mniejszy o kilkanaście procent. Odpowiedzialna za to jest lepkość analizowanych cieczy. Lepkość oleju mineralnego była trzykrotnie mniejsza od lepkości obu rodzajów estrów. Oznacza to, że z punktu widzenia chłodzenia transformatora, olej mineralny jest efektywniejszą cieczą w porównaniu z estrem syntetycznym, czy naturalnym.

Temperatura ma duży wpływ na współczynnik przejmowania ciepła analizowanych cieczy α . Wzrost temperatury od 25°C do 80°C spowodował wzrost współczynnika α o ponad 50%, niezależnie od rodzaju cieczy. Wpływ na to miała lepkość, która wraz ze wzrostem temperatury zmalała 5÷6 krotnie, niezależnie od rodzaju cieczy. Oznacza to, że im wyższa temperatura w transformatorze, tym ciecz elektroizolacyjna skuteczniej będzie oddawać ciepło do otoczenia.

Zawilgocenie nie ma zasadniczego znaczenia na współczynnik przejmowania ciepła α badanych cieczy elektroizolacyjnych. Zawilgocenie spowodowało wzrost współczynnika α o niespełna 2%, niezależnie od rodzaju cieczy. Wzrost ten należy wiązać z kilkuprocentowym wzrostem ciepła właściwego cieczy. Oznacza to, że zawilgocenie nie wpływa na warunki chłodzenia transformatora.

Zestarzenie cieczy nie ma jednoznacznego wpływu na współczynnik przejmowania ciepła α analizowanych cieczy. Zmiany współczynnika α wynosiły niespełna 2%. Odpowiedzialnym za to był wzrost lepkości z jednej strony i wzrost ciepła właściwego z drugiej. Oznacza to, że zesterzenie cieczy nie ma istotnego wpływu na warunki chłodzenia transformatora.

Literatura

1. ABB Inc. Biotemp. Biodegradable dielectric insulating fluid. Product brochure 2009.
2. ASTM D 1903-96. Standard test method for coefficient of thermal expansion of electrical insulating liquids of petroleum origin, and askarels.
3. Borsi H, Gockenbach E. Performance and new application of ester liquids. IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids 2002; 203-206.
4. Borsi H, Gockenbach E, Wasserberg V, Werle P. New devices for a dry type transformer protection and monitoring system. 6th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials 2000: 567-570.
5. Borucki S, Boczar T, Cichoń A. Investigation of the acoustic pressure distribution occurring around an aerial substation adjacent to apartment buildings. Archives of Acoustics 2007; 32: 291-297.
6. CIGRE Brochure 436. Experiences in service with new insulating liquids. 2010.
7. Cooper Power Industries. Envirotemp FR3 Bulletin 2001; 00092.

8. Feser K, Radakovic Z. A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling. IEEE Transaction on Power Delivery 2003; 18: 1284-1292.
9. Gielniak J, Graczkowski A, Morańda H, Przybyłek P, Walczak K, Nadolny Z, Mościcka-Grzesiak H, Feser K, Gubański S M. Moisture in cellulose insulation of power transformers – statistics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2013; 20: 982-987.
10. ISO 3104:1994. Petroleum products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.
11. ISO 3675. Crude petroleum and liquid petroleum products -Laboratory determination of density - Hydrometer method.
12. ISO 649-1:1981. Laboratory glassware – Density hydrometers for general purposes – Part 1: Specification.
13. Koch M, Krueger M, Tenbohlen S. On-site methods for reliable moisture determination in power transformers. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2010: 1-6.
14. Koch M, Tenbohlen S, Rosner M. Moisture ingress in free breathing transformers. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2008: 646-650.
15. Łopatkiewicz R, Nadolny Z. Temperature field on high voltage power transformer. Przegląd Elektrotechniczny 2008; 84: 50-52.
16. Łopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P. Influence of water content in paper on its thermal conductivity. Przegląd Elektrotechniczny 2010; 86: 55-58.
17. Łopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P. The influence of water content on thermal conductivity of paper used as transformer windings insulation. IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials 2012: 1-4.
18. Łopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P, Sikorski W. The influence of chosen parameters on thermal conductivity of windings insulation describing temperature in transformer. Przegląd Elektrotechniczny 2012; 88: 126-129.
19. M&I Materials Ltd. Midel 7131 Synthetic ester transformer fluid. Product guide 2014.
20. Perrier C, Beroual A, Bessede J L. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2006; 13: 556-564.
21. Perrier C, Ryadi M, Bertrand Y, Tran Duy C. Comparison between mineral and ester oil. Cigre Session 2010; D1-102: 1-10.

22. Przybyłek P, Nadolny Z, Mościcka-Grzesiak H. Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation. *IEEE Dielectric and Electrical Insulation* 2010; 13: 919-925.
23. Suwarno, Darma I S. Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester. *International Symposium on Electrical Insulating Materials* 2008; 514-517.
24. Tenbohlen S, Koch M, Vukovic D, Weinlader A, Baum J, Harthun J, Schafer M, Barker S, Frotscher R, Dohnal D, Dyer P. Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers. *Cigre Session* 2008; A2-102: 1-8.
25. Trnka P, Mentlik V, Svoboda M. The effect of moisture content on electrical insulating liquids. *IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids* 2014; 1-4.
26. Wolny S, Adamowicz A, Lepich M. Influence of temperature and moisture level in paper-oil insulation on the parameters of the Cole-Cole model. *IEEE Transaction on Power Delivery* 2014; 29: 246-250.