

Badanie czynników wpływających na zdolność cieczy elektroizolacyjnych do transportu ciepła

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań czynników wpływających na zdolność cieczy elektroizolacyjnych do transportu ciepła. Rozpatrywanymi czynnikami były rodzaj cieczy elektroizolacyjnej, temperatura, zawilgocenie i zesterzenie. Analizowanymi właściwościami wpływającymi na zdolność cieczy do transportu ciepła były przewodność cieplna, lepkość oraz gęstość. Właściwości te mają istotny wpływ na rozkład temperatury w transformatorze.

Abstract. The paper presents results of investigations of parameters, which have the influence on ability to heat transport of electro-insulating liquids. Type of the liquid, its temperature, moisture content and aging level were investigated. Thermal conductivity, viscosity and density, which have the influence on the heat transport ability, were investigated. (Investigation of parameters which have the influence on the ability of heat transport of electro-insulating liquids).

Słowa kluczowe: ciecze elektroizolacyjne, przewodność cieplna, lepkość, gęstość.

Keywords: insulating liquids, thermal conductivity, viscosity, density.

doi:10.12915/pe.2014.10.38

Wstęp

Skuteczność oddawania ciepła generowanego z uzwojeń transformatora zależy od właściwości cieplnych i fizykochemicznych materiałów izolacyjnych oraz systemu chłodzenia. Jednym z najważniejszych materiałów izolacyjnych jest ciecz elektroizolacyjna.

Do właściwości cieczy elektroizolacyjnych, decydujących o ich zdolności do transportu ciepła, należą współczynnik przewodności cieplnej właściwej λ , lepkość ν , gęstość ρ , rozszerzalność cieplna β oraz ciepło właściwe c_{wt} . W celu zapewnienia skutecznego i efektywnego oddawania ciepła na zewnątrz urządzenia ciecz elektroizolacyjna powinna charakteryzować się jak największą wartością przewodności cieplnej i ciepła właściwego oraz możliwie jak najmniejszą lepkością, gęstością oraz rozszerzalnością cieplną.

Na właściwości decydujące o zdolności do transportu ciepła przez ciecz wpływ może mieć wiele czynników. Do najważniejszych z nich zaliczyć można rodzaj zastosowanej cieczy, temperaturę, zawilgocenie oraz zesterzenie. Wpływ wymienionych czynników może być różny w przypadku zastosowania różnych rodzajów cieczy elektroizolacyjnej.

Celem pracy było zbadanie wpływu takich czynników jak rodzaj cieczy, temperatura, zawilgocenie i zesterzenie na właściwości warunkujące transport ciepła. Poniżej przedstawiono układy pomiarowe wykorzystane do zbadania tych właściwości.

Układy pomiarowe

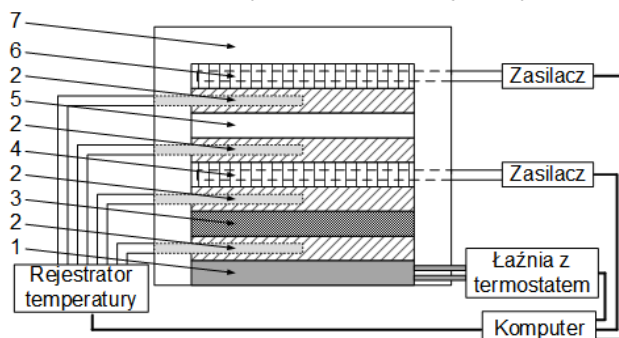
W celu przeprowadzenia pomiarów wymienionych wyżej właściwości cieczy warunkujących jej zdolność do transportu ciepła zaprojektowano, zbudowano i przetestowano układy pomiarowe do badania przewodności cieplnej λ , lepkości ν oraz gęstości ρ cieczy elektroizolacyjnych.

Na rysunku 1 przedstawiono autorski układ do pomiaru przewodności cieplnej cieczy. Układ ten był już szczegółowo opisywany przez autorów w pracach [1-4]. Zasadę działania układu pomiarowego oparto o metodę pomiaru przewodności cieplnej z wykorzystaniem jednopłytkowego aparatu Poensgen'a, według której pomiar przeprowadza się umieszczając próbkę badanej cieczy pomiędzy grzałką główną a chłodnicą. Grzałka główna ma za zadanie wytworzenie strumienia cieplnego przepływającego prostopadłe w dół przez próbkę badanej cieczy do chłodnicy. W wyniku przepływu ciepła w próbce cieczy generowany jest spadek temperatury. Grzałka

pomocnicza ma za zadanie wyeliminowanie przepływów ciepła prostopadłe w górę. Straty ciepła wyeliminowane są poprzez zastosowanie materiałów izolacyjnych o odpowiednio małej przewodności cieplnej. Pomiar spadku temperatury w próbce cieczy następuje przy ustalonym przepływie ciepła. Współczynnik przewodności cieplnej właściwej badanej cieczy wyznacza się z zależności:

$$(1) \quad \lambda = \frac{P \cdot d}{S \cdot \Delta T}$$

gdzie: P – moc grzałki głównej [W], S – powierzchnia próbek badanej cieczy [m²], d – grubość próbki badanej cieczy [m], ΔT – spadek temperatury w próbce badanej cieczy [K].



Rys.1. Schemat układu do pomiaru przewodności cieplnej właściwej λ cieczy wraz z przyłączonymi przyrządami pomiarowymi i zasilającymi; 1 – chłodnica, 2 – płytki pomocnicze z sondami pomiarowymi (termicznymi), 3 – próbka badanej cieczy, 4 – grzałka główna, 5 – izolacja pomocnicza, 6 – grzałka pomocnicza, 7 – izolacja [1]

Na rysunku 2 przedstawiono układ do pomiaru lepkości cieczy elektroizolacyjnych. Układ zaprojektowano na podstawie normy [5], według której do pomiaru lepkości cieczy wykorzystuje się wiskozymetr Ubbelohde'a. W celu wyznaczenia lepkości kinematycznej za pomocą tegoż wiskozymetru potrzebna jest znajomość czasu przepływu cieczy przez kapilarę o znanej stałej, w ściśle określonej temperaturze. W zależności od spodziewanych wartości lepkości badanych cieczy oraz czasu trwania pomiaru dobiera się wiskozymetr o odpowiedniej stałej kapilary.

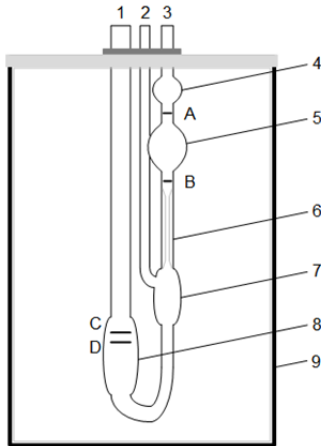
Na początku, zbiornik (8) wypełnia się cieczą w taki sposób, aby menisk cieczy znajdował się pomiędzy poziomami C i D (rys.2). Następnie należy odczekać odpowiedni czas, aby ciecz osiągnęła temperaturę, w której

należy wykonać pomiar. Po ustaleniu temperatury rurka (2) jest zamykana, a ciecz podciągana do połowy wysokości zbiornika (4). Następnie rurki (2) i (3) są otwierane. Badanie polega na pomiarze czasu przesunięcia menisku od poziomu A do B. Wartość lepkości kinematycznej oblicza się z zależności:

$$(2) \quad \nu = K \cdot t$$

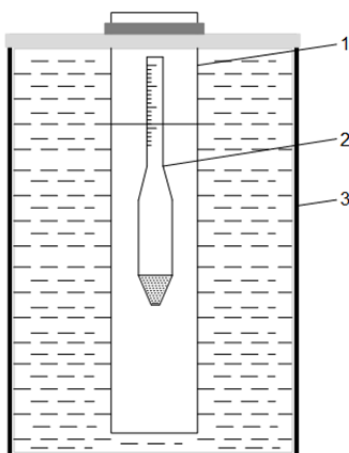
gdzie: K – stała kapilary [mm^2/s^2], t – średnia arytmetyczna czasów przepływu [s].

W celu przeprowadzenia pomiarów w ściśle określonej temperaturze wykorzystuje się łaźnię wiskozymetryczną (9).



Rys.2. Układ do pomiaru lepkości ν cieczy elektroizolacyjnych; 1,2,3 – rurka, 4,5,7,8 – zbiornik, 6 – kapilara, 9 – łaźnia wiskozymetryczna

Na rysunku 3 przedstawiono układ do pomiaru gęstości cieczy elektroizolacyjnych. Układ zaprojektowany został w oparciu o normę [6]. Do pomiaru gęstości wykorzystano areometry szklane z podziałką [7] oraz odpowiednich rozmiarów cylinder do pomiarów areometrycznych. W celu wykonania pomiarów dla różnych wartości temperatury cylindry areometryczne umieszczone były w łaźni wodnej. Odpowiednio dobrany areometr zanurzono w próbce badanej cieczy pozwalając na swobodne ustalenie się jego położenia. Po wyrównaniu się temperatury odczytywano wskazanie areometru.



Rys.3. Układ do pomiaru gęstości ρ cieczy elektroizolacyjnych; 1 – cylinder areometryczny, 2 – aerometr, 3 – łaźnia wodna

Przygotowanie cieczy elektroizolacyjnych

Przeprowadzone badania obejmowały pomiar współczynnika przewodności cieplnej właściwej, lepkości oraz gęstości cieczy elektroizolacyjnych. Badano

następujące rodzaje cieczy elektroizolacyjnych: olej mineralny, ester syntetyczny i ester naturalny. Wszystkie cieczy zostały przebadane w stanie nowym (NS – Nowa, Sucha ciecz), zawilgoconym (NZ – Nowa, Zawilgocona ciecz) oraz zestarzone (ZES – ZESTarzona ciecz). Miernikiem zestarzenia cieczy była wartość jej liczby kwasowej.

W tabeli 1 przedstawiono zawilgoconie i liczbę kwasową przygotowanych próbek różnych rodzajów cieczy elektroizolacyjnej.

Tabela 1. Zawilgoconie i liczba kwasowa przygotowanych próbek cieczy elektroizolacyjnej; NS – nowa, sucha, NZ – nowa, zawilgocona, ZES – zestarzona

Rodzaj cieczy	Olej mineralny NS	Olej mineralny NZ	Olej mineralny ZES
Zawilgoconie [ppm]	8	46	11
Liczba kwasowa [mgKOH/g]	<0,01	<0,01	0,13
Rodzaj cieczy	Ester syntetyczny NS	Ester syntetyczny NZ	Ester syntetyczny ZES
Zawilgoconie [ppm]	47	1875	500
Liczba kwasowa [mgKOH/g]	<0,03	<0,03	0,05
Rodzaj cieczy	Ester naturalny NS	Ester naturalny NZ	Ester naturalny ZES
Zawilgoconie [ppm]	36	822	269
Liczba kwasowa [mgKOH/g]	0,02	0,02	0,22

Do badań przygotowano dwie skrajne wartości zawilgoconia próbek cieczy elektroizolacyjnej. Stan suchy (NS) cieczy osiągnięto poprzez osuszenie cieczy z wykorzystaniem suchego papieru transformatorowego przez czas około 340 godzin. Podczas procesu zawilgocenia wszystkie badane cieczy elektroizolacyjne były kondycjonowane w tych samych warunkach (temperatura 30°C, zawilgoconie względne powietrza 80%) przez czas około 170 godzin. Zawartość wody w badanych cieczach wyznaczono za pomocą kulometrycznej metody Karla Fischera.

Cieczy elektroizolacyjne poddano termicznemu procesowi starzenia w temperaturze 140°C przez czas 140 godzin. Starzenie badanych próbek odbywało się w szklanych naczyniach, z dostępem tlenu. Dodatkowo, w celu zachowania rzeczywistych warunków występujących w trakcie eksploatacji urządzenia elektroenergetycznego, do próbek cieczy dodano celulozę, żelazo i miedź.

Wyniki pomiarów

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej właściwej λ , lepkości ν oraz gęstości ρ w zależności od rodzaju cieczy (olej mineralny, ester syntetyczny, ester naturalny), temperatury, zawilgoconia i zestarzenia. Badania wszystkich wymienionych właściwości przeprowadzono dla czterech wartości temperatury: 25, 40, 60 i 80°C.

W poniższych akapitach opisano wpływ analizowanych czynników na przewodność cieplną właściwą λ badanych cieczy elektroizolacyjnych.

Porównując wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej λ można stwierdzić, że właściwość ta zależy od rodzaju cieczy i temperatury, a nie zależy od zawilgoconia i zestarzenia. Na rysunku 4 przedstawiono

zależność przewodności od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury.

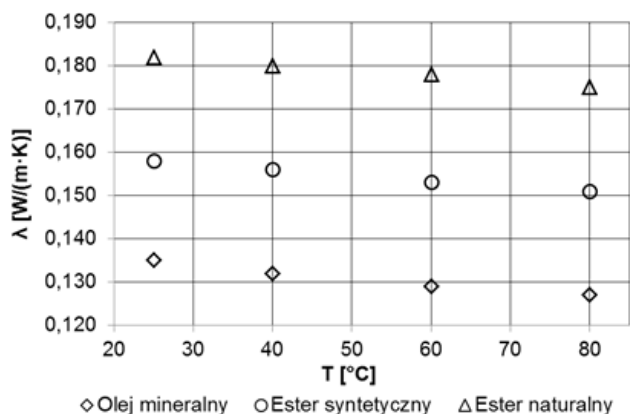
Jak wynika z rysunku 4, dla temperatury 25°C, najmniejszą przewodnością charakteryzuje się olej mineralny (0,135 W/(m·K)), a największą ester naturalny (0,182 W/(m·K)). Zatem, przewodność estru naturalnego jest o około 35% większa od przewodności oleju. Przewodność estru syntetycznego miała wartość pośrednią (0,158 W/(m·K)).

Wraz ze wzrostem temperatury przewodność cieplna wszystkich badanych rodzajów cieczy malała w podobny sposób. Wzrost temperatury od 25 do 80°C spowodował spadek przewodności oleju mineralnego od 0,135 do 0,127 W/(m·K) (o około 6%), estru syntetycznego od 0,158 do 0,151 W/(m·K) (o około 4%) oraz estru naturalnego od 0,182 do 0,175 W/(m·K) (o około 4%).

Jak zatem widać, największy wpływ na przewodność cieplną cieczy elektroizolacyjnej ma jej rodzaj i temperatura. W badanym zakresie nie stwierdzono znaczącego wpływu zawilgocenia i zesterzenia na przewodność cieplną cieczy.

Tabela 2. Wyniki badań przewodności cieplnej, lepkości oraz gęstości różnych cieczy elektroizolacyjnych wyznaczone dla różnych wartości temperatury

l.p.	Ciecz	Właściwość	25°C	40°C	60°C	80°C
1	Olej mineralny NS	λ [W/(m·K)]	0,135	0,132	0,129	0,127
		ν [mm ² /s]	17,08	9,39	5,37	3,43
		ρ [g/ml]	0,867	0,857	0,845	0,832
2	Olej mineralny NZ	λ [W/(m·K)]	0,135	0,133	0,129	0,127
		ν [mm ² /s]	17,08	9,60	5,36	3,43
		ρ [g/ml]	0,867	0,857	0,845	0,832
3	Olej mineralny ZES	λ [W/(m·K)]	0,136	0,134	0,130	0,128
		ν [mm ² /s]	19,09	10,66	5,86	3,73
		ρ [g/ml]	0,866	0,856	0,844	0,831
4	Ester syntetyczny NS	λ [W/(m·K)]	0,158	0,156	0,153	0,151
		ν [mm ² /s]	55,14	28,25	14,02	8,11
		ρ [g/ml]	0,964	0,953	0,940	0,926
5	Ester syntetyczny NZ	λ [W/(m·K)]	0,159	0,156	0,153	0,151
		ν [mm ² /s]	53,09	27,58	13,78	8,06
		ρ [g/ml]	0,964	0,953	0,939	0,926
6	Ester syntetyczny ZES	λ [W/(m·K)]	0,158	0,156	0,153	0,150
		ν [mm ² /s]	54,43	27,89	13,85	8,04
		ρ [g/ml]	0,964	0,953	0,940	0,926
7	Ester naturalny NS	λ [W/(m·K)]	0,182	0,180	0,178	0,175
		ν [mm ² /s]	56,29	32,66	18,29	11,50
		ρ [g/ml]	0,917	0,908	0,892	0,880
8	Ester naturalny NZ	λ [W/(m·K)]	0,182	0,179	0,178	0,175
		ν [mm ² /s]	54,96	32,11	17,99	11,44
		ρ [g/ml]	0,916	0,908	0,891	0,879
9	Ester naturalny ZES	λ [W/(m·K)]	0,182	0,179	0,177	0,175
		ν [mm ² /s]	60,36	34,64	19,22	12,08
		ρ [g/ml]	0,917	0,908	0,892	0,880



Rys.4. Zależność współczynnika przewodności cieplnej od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury

W kolejnych akapitach przedstawiono wpływ rodzaju cieczy elektroizolacyjnej, temperatury, zawilgocenia i zesterzenia na jej lepkość.

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 2 można zauważyć, że wpływ na lepkość cieczy elektroizolacyjnej miały wszystkie rozpatrywane czynniki.

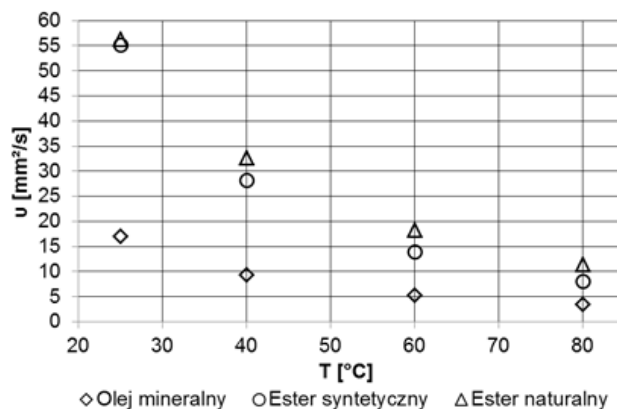
Na podstawie tabeli 2 można stwierdzić, że zawilgocenie miało wpływ na lepkość dwóch spośród trzech rodzajów cieczy elektroizolacyjnej. Wzrost zawilgocenia spowodował spadek lepkości estru syntetycznego od 55,14 do 53,09 mm²/s (o około 4%), oraz spadek lepkości estru naturalnego od 56,29 do 54,96 mm²/s (o około 2%), dla temperatury 25°C. Zmiana zawilgocenia nie miała z kolei wpływu na lepkość oleju mineralnego. Chcąc wyjaśnić otrzymane wyniki należy mieć świadomość jakimi wartościami zawilgocenia charakteryzowały się badane rodzaje cieczy. W przypadku estru syntetycznego była to wartość 1875 ppm, estru naturalnego 822 ppm, a oleju mineralnego tylko 46 ppm. Jak wiadomo, woda ma znacznie mniejszą lepkość w porównaniu z lepkością badanych rodzajów cieczy. Z tego powodu większa zawartość wody w cieczy elektroizolacyjnej powoduje zmniejszenie jej lepkości.

Na podstawie analizy wyników zawartych w tabeli 2 można stwierdzić, że zesterzenie miało wpływ na lepkość oleju mineralnego oraz estru naturalnego. Nie stwierdzono takiego wpływu w przypadku estru syntetycznego, który w tych samych warunkach zesterzył się w mniejszym stopniu niż olej mineralny i ester naturalny. Wyjaśnieniem może być zmiana wymiarów cząsteczek na skutek zmiany ich wymiarów spowodowanych przyłączaniem produktów starzenia.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność lepkości od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury.

Można zauważyć, że najmniejszą lepkością w całym analizowanym przedziale temperatury charakteryzował się olej mineralny (17,08 mm²/s), natomiast największą ester naturalny (56,29 mm²/s), dla temperatury 25°C. Jak zatem widać, lepkość estru naturalnego była większa od lepkości oleju mineralnego o około 230%. Lepkość estru syntetycznego zbliżona była do lepkości estru naturalnego.

Wraz ze wzrostem temperatury, lepkość wszystkich rodzajów cieczy elektroizolacyjnej malała. Największy jej bezwzględny spadek zaobserwowano w przypadku cieczy o stosunkowo dużej wartości lepkości (estry), a najmniejszy w przypadku oleju mineralnego. Wzrost temperatury od 25 do 80°C spowodował spadek lepkości wszystkich rodzajów cieczy o około 80%.



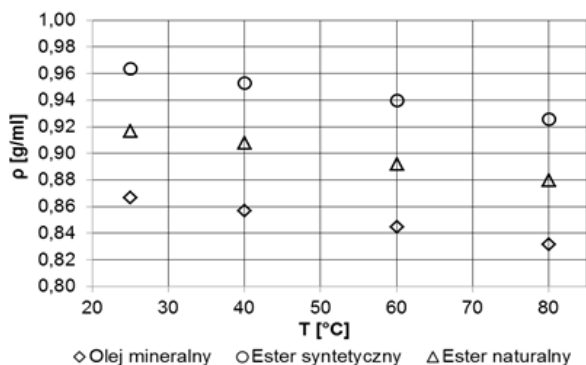
Rys.5. Zależność lepkości od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury

Poniżej opisano wpływ analizowanych czynników na gęstość oleju mineralnego, estru syntetycznego i estru

naturalnego. Na podstawie wyników pomiarów, zawartych w tabeli 2, można stwierdzić, że na gęstość cieczy wpływ miał tylko rodzaj cieczy i temperatura. Zawilgocenie i zesterzenie cieczy nie miało wpływu na jej gęstość.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność gęstości od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury. Największą gęstość miał ester syntetyczny, następnie naturalny, a najmniejszą olej mineralny. Gęstość estru syntetycznego równa była 0,964 g/ml, a oleju mineralnego 0,867 g/ml, dla temperatury 25°C. Oznacza to, że gęstość estru syntetycznego jest o około 10% większa od gęstości oleju.

Wraz ze wzrostem temperatury gęstość wszystkich rodzajów cieczy malała w podobny sposób. Wzrost temperatury od 25 do 80°C spowodował spadek gęstości estru syntetycznego od 0,964 do 0,926 mg/l (o około 4%), estru naturalnego od 0,917 do 0,880 mg/l (o około 4%) oraz oleju mineralnego od 0,867 do 0,832 mg/l (o około 4%).



Rys.6. Zależność gęstości od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej i temperatury

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że takie czynniki jak rodzaj cieczy, temperatura, zawilgocenie i zesterzenie mają wpływ na właściwości cieczy elektroizolacyjnej, które warunkują w urządzeniu transport ciepła do otoczenia. Tym samym mogą one wpływać na rozkład temperatury i efektywność oddawania ciepła w transformatorze do otoczenia przez cieć elektroizolacyjną.

Skuteczność oddawania ciepła do otoczenia przez cieć elektroizolacyjną zależy od współczynnika przejmowania ciepła przez cieć α . Współczynnik ten zależy m.in. od przewodności cieplnej, lepkości, gęstości, rozszerzalności cieplnej i ciepła właściwego cieczy. Im większa przewodność cieplna i ciepło właściwe, tym skuteczniejszy jest transport ciepła do otoczenia przez cieć. Z kolei im większa lepkość, gęstość i rozszerzalność, tym bardziej efektywność oddawania ciepła do otoczenia jest mniejsza.

Rodzaj zastosowanej cieczy elektroizolacyjnej determinuje właściwości decydujące o efektywności oddawania ciepła do otoczenia. Zastosowanie estru naturalnego, w miejsce stosowanego dotąd oleju mineralnego powoduje ponad 35% wzrost przewodności cieplnej. Niestety ester naturalny charakteryzuje się znacznie większą lepkością i podwyższoną gęstością w stosunku do oleju mineralnego. Z kolei przewodność cieplna estru syntetycznego jest o ponad kilkanaście procent większa od przewodności oleju mineralnego. Ponadto, ester syntetyczny charakteryzuje się dużo większą lepkością w stosunku do oleju mineralnego. Gęstość estru syntetycznego jest największa spośród wszystkich badanych cieczy elektroizolacyjnych. Alternatywą dla takich rozwiązań mogłoby być zastosowanie specjalnie zaprojektowanych kadzi i

radiatorów transformatorowych, ułatwiających przepływ cieczy wewnątrz transformatora.

Kolejnym czynnikiem, mającym istotny wpływ na przedstawione w artykule właściwości cieczy elektroizolacyjnych, jest temperatura. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury maleją wartości przewodności cieplnej, lepkości oraz gęstości badanych cieczy elektroizolacyjnych. Wzrost temperatury w przypadku oleju mineralnego powoduje spadek przewodności o około 6%, z kolei dla obu badanych estrów obniżenie przewodności w wyniku wzrostu temperatury wynosi około 4%. W wyniku wzrostu temperatury lepkość wszystkich badanych cieczy maleje o około 80%, gęstość o około 4%.

Spośród badanych właściwości zawilgocenie cieczy elektroizolacyjnej wpływało wyłącznie na lepkość estru syntetycznego i naturalnego. Wraz ze wzrostem zawilgocenia lepkość estrów ulegała zmniejszeniu. Różnica lepkości między suchym estrem syntetycznym a zawilgoconym wynosiła 4%. Z kolei dla estru naturalnego różnica ta równa była 2%.

Stwierdzono wpływ starzenia na lepkość oleju mineralnego i estru naturalnego. Lepkość zesterzonego oleju mineralnego, w zależności od temperatury, wzrosła o około 12% w stosunku do nowej cieczy. Z kolei lepkość estru naturalnego wzrosła o około 10%. Nie stwierdzono znaczącego wpływu procesu starzenia na lepkość estru syntetycznego.

Grzegorz Dombek jest stypendystą w ramach projektu pt.: „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski”, Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

LITERATURA

- [1] 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
- [2] 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*, 11 (2013), 189-198
- [3] Dombek G., Nadolny Z., Badanie wybranych właściwości cieplnych estrów naturalnych wykorzystywanych jako izolacja w transformatorach, *Międzynarodowa konferencja transformatorowa Transformator '13*, (2013), 20/1-20/12
- [4] Dombek G., Nadolny Z., Measurement of thermal conductivity coefficient of insulating liquids using authoring measurement system, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 1 (2014), 66-68
- [5] PN-EN 3104:2004. Przetwory naftowe: Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste. Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej
- [6] PN-EN ISO 3675. Ropa naftowa i ciekłe przetwory naftowe. Laboratoryjne oznaczenie gęstości. Metoda z areometrem
- [7] ISO 649-1. Laboratory glassware – Density hydrometers for general purposes – Part 1: Specification

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Dombek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: 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; dr inż. Piotr Przybyłek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl.