

Maciej LALIK*, Marcin MALESKA**, Maciej ZDANOWSKI**

BADANIA PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I ELEKTRYCZNYCH ESTRU MIDEL 7131®

Ciecze dielektryczne na bazie estrów syntetycznych stosowane są w układach izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych. W artykule zaprezentowano wyniki badań wybranych właściwości fizycznych i elektrycznych estru syntetycznego Midel 7131®. Przedstawiono wyniki lepkości kinematycznej, gęstości, a także współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$, przenikalności elektrycznej względnej oraz konduktywności w szerokim przedziale temperatur. Do badania lepkości wykorzystano lepkościomierz Ubbelohdego z automatycznym systemem pomiaru czasu wypływu iVisc firmy Lauda. Do pomiaru gęstości wykorzystano zestaw areometrów. W celu zapewnienia stabilnych warunków temperatury użyto łaźni wodnej z termostatem firmy Lauda. Dla uzyskania temperatur niższych od temperatury otoczenia wykorzystano chłodziarkę sprężarkową. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$, przenikalności elektrycznej względnej oraz rezystywności wykonano za pomocą urządzenia BAUR DTL C z termostatowaną celą pomiarową. W pracy zamieszczono ponadto wyniki pomiarów prądu elektryzacji strumieniowej cieczy Midel 7131®, które uzyskano w układzie przepływowym z rurką pomiarową.

SŁOWA KLUCZOWE: ciecze elektroizolacyjne, estry syntetyczne, właściwości fizyczne i elektryczne, elektryzacja strumieniowa, układ przepływowy z rurką.

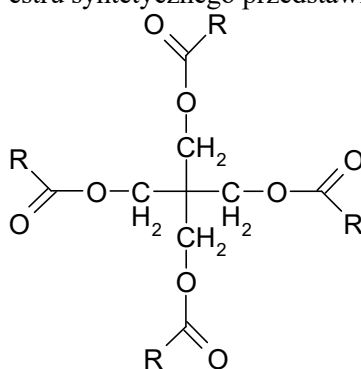
1. WPROWADZENIE

Podstawowym zadaniem cieczy elektroizolacyjnych jest zapewnienie izolacji elektrycznej urządzeń pracujących pod wysokim napięciem. Ciecze te, obok izolacji elektrycznej, muszą także zapewnić odpowiednie chłodzenie części aktywnej transformatora. Typowymi cieczami izolacyjnymi stosowanymi w transformatorach mocy są oleje mineralne [1, 6]. Z powodu niskiej biodegradowalności, jak i względnie niskiej temperaturze zapłonu olejów mineralnych, obserwuje się coraz większe zainteresowanie cieczami izolacyjnymi na bazie biodegradowalnych estrów syntetycznych [2]. Oleje mineralne stosowane jako ciecze izolacyjne to kompozycja trzech podstawowych grup węglowodorów: naftenowych (C_nH_{2n}), parafinowych ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) i aromatycznych (C_nH_n). W zależności od skła-

* ABB Sp. z o.o.

** Politechnika Opolska

du ropy poddanej rafinacji, a także typu produkowanego oleju mineralnego, jego skład frakcyjny może być różny [3]. Estry to grupa związków o budowie odmienniej od olejów mineralnych. W cząsteczce estru alkohol wielowodorotlenowy połączony jest z kwasem karboksylowym za pomocą wiązania estrowego. Przykładowy wzór strukturalny estru syntetycznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wzór strukturalny estru syntetycznego; R – reszta kwasowa

W budowie cząsteczki estru syntetycznego można wyróżnić alkohol wielowodorotlenowy (pentaerytrytol), do którego dołączone są grupy węglowodorowe o zróżnicowanym składzie [1, 3]. Znaczne różnice można zaobserwować także w niektórych właściwościach fizykochemicznych i elektrycznych między olejami mineralnymi a estrami syntetycznymi. W tabeli 1 porównano podstawowe właściwości oleju mineralnego Nynas Nytro Taurus i płynu Midel 7131[®] wyznaczone odpowiedni według normy IEC 60296 oraz IEC 61099 [4-5].

Tabela 1. Podstawowe właściwości oleju mineralnego Nynas Nytro Taurus oraz estru syntetycznego Midel 7131[®]

Właściwości	Jednostka	Midel 7131 [®]	Nytro Taurus
Gęstość (20 °C)	kg/m ³	970	872
Lepkość kinematyczna (40 °C)	m ² /s	29,5·10 ⁻⁶	9,6·10 ⁻⁶
Temperatura płynięcia	°C	-60	-48
Temperatura zapłonu	°C	260	150
Klasyfikacja pożarowa zgodnie z IEC 61100/IEC 61039	–	K3	0
Biodegradowalność	%	89	10
Napięcie przebicia	kV	> 75	> 70
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ (90 °C)	–	< 0,008	< 0,001

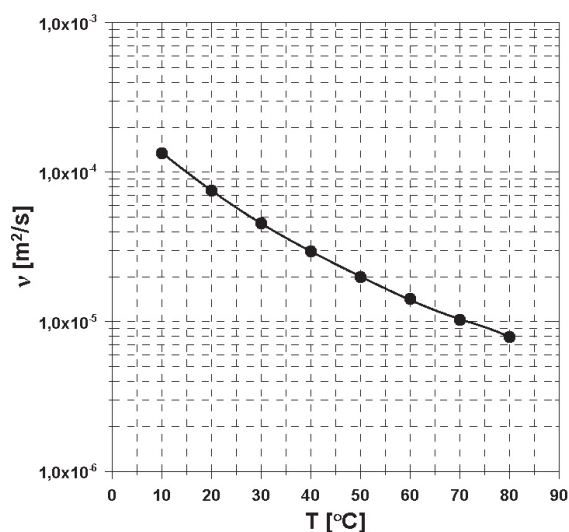
2. CHARAKTERYSTYKA METOD POMIAROWYCH

Badania lepkości kinematycznej estru syntetycznego Midel 7131[®] wykonano za pomocą wiskozymetru Ubbelohdego, natomiast gęstość wyznaczono przy użyciu zestawu areometrów. Regulacja i stabilizacja temperatury pomiaru odbywała się przy zastosowaniu łaźni wodnej wyposażonej w termostat Lauda Eco Silver. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$, rezystywności oraz przenikalności elektrycznej względnej wykonano za pomocą automatycznego miernika BAUR DTL C z wbudowanym systemem termostatowania celi pomiarowej. Pomiary prądu elektryzacji strumieniowej przeprowadzono w układzie przepływowym z rurką pomiarową, którego budowę oraz zasadę działania zamieszczono w pracach [7, 8]. Do badań zastosowano rurki o długości 400 mm oraz średnicy 4 mm, wykonane z papieru aramidowego i celulozowego, a także aluminium, miedzi, mosiądzu, laminatu epoksydowo-szklanego oraz włókna węglowego. Pomiary wykonywano w temperaturze 25°C, a prędkość przepływu cieczy wynosiła 0,34 m/s. Punkty pomiarowe na poszczególnych wykresach stanowią wynik pojedynczego pomiaru.

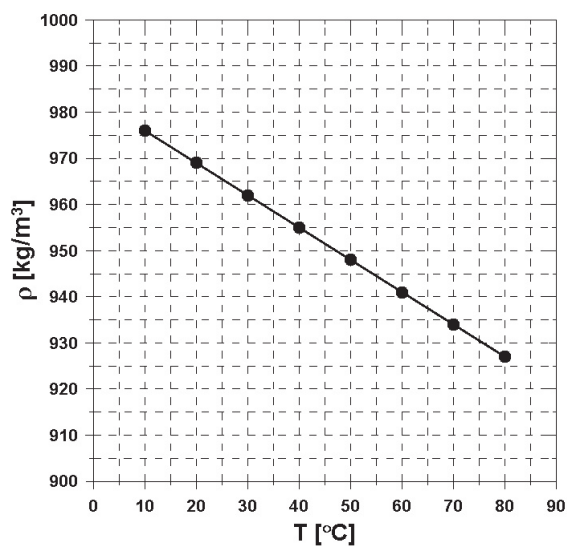
3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Lepkość cieczy izolacyjnych stosowanych w transformatorach elektroenergetycznych decyduje w istotny sposób o niezawodności pracy tych urządzeń. Związane jest to szczególnie ze zdolnością skutecznego odprowadzania strat ciepła z ich wnętrza. Z tego względu ciecze elektroizolacyjne powinny cechować się względnie niską lepkością. Zmiana lepkości pod wpływem temperatury determinują silnie parametry charakteryzujące warunki hydrodynamiczne. Zalicza się do nich liczbę Reynoldsa, grubość podwarstwy laminarnej, długość stabilizacji warunków przepływu oraz naprężenia ścinające. Ponadto zmianie ulega parametr charakteryzujący głębokość penetracji ładunku dyfuzyjnego w głąb cieczy, czyli długość Debye'a. Lepkość kinematyczną estru syntetycznego Midel 7131[®] wyznaczono w zakresie temperatur od 10 do 80 °C. Dane przedstawione na rysunku 2 wskazują, że lepkość cieczy maleje nieliniowo w całym analizowanym zakresie temperatury od wartości $134,5 \cdot 10^{-6}$ do $7,87 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Analizując dane zawarte w tabeli 1 można zauważyć, że ciecz izolacyjna Midel 7131[®] odznacza się blisko trzykrotnie większą wartością lepkości niż olej mineralny Nytro Taurus. Znajomość gęstości cieczy elektroizolacyjnej umożliwia obliczenie całkowitego ciężaru transformatora. W przypadku mineralnych olejów izolacyjnych znacznie większą gęstością odznaczają się oleje aromatyczne, natomiast wartość tego parametru jest mniejsza w cieczach, w których składzie przeważają węglowodory naftenowe i parafinowe. Gęstość cieczy izolacyjnych obniża się wraz ze wzrostem temperatury. Na rysunku 3 przedstawiono charak-

terystykę zmian gęstości cieczy Midel 7131[®] w funkcji temperatury w zakresie od 10 do 80°C. Zaprezentowana funkcja $\rho = f(T)$ jest liniowa i maleje wraz ze wzrostem temperatury. Analizując dane zawarte w tabeli 1 oraz na wykresie można zauważyć, że ester syntetyczny odznacza się w temperaturze 20°C gęstością o 98 kg/m³ większą niż olej mineralny.

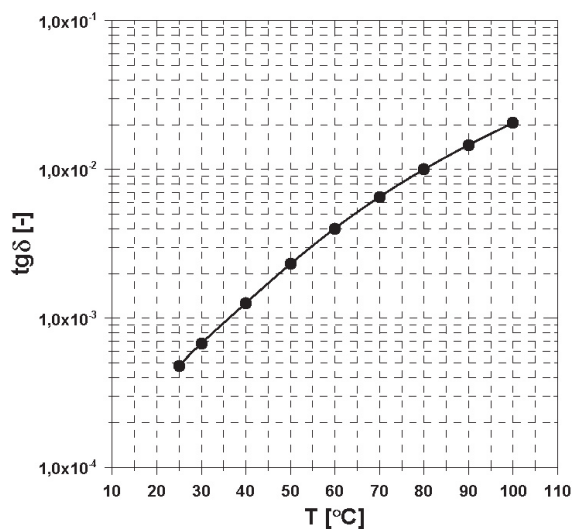


Rys. 2. Zależność lepkości kinematycznej estru Midel 7131[®] od temperatury



Rys. 3. Zależność gęstości estru Midel 7131[®] od temperatury

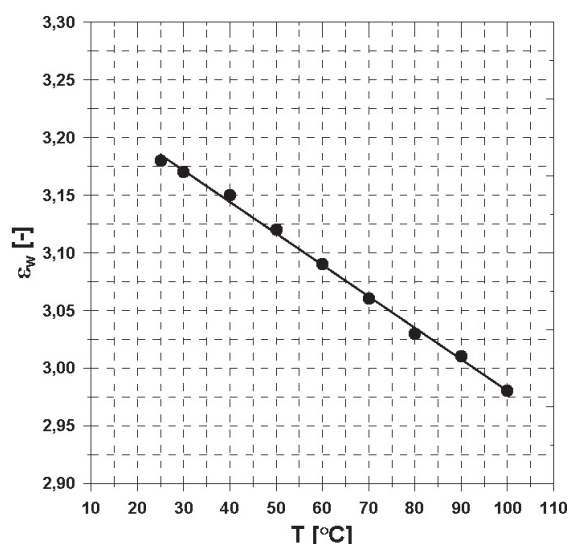
Straty dielektryczne w dielektryku powstają na skutek zamiany części energii pola elektrycznego w energię cieplną, co wywołuje jego nagrzewanie. Powstające wówczas straty mocy, określa się najczęściej $\text{tg}\delta$ (tangensem kąta strat dielektrycznych). Współczynnik stratności $\text{tg}\delta$ zależy przede wszystkim od budowy fizykochemicznej dielektryka. Za generację strat w dielektrykach odpowiadają zjawiska polaryzacji relaksacyjnej, prądów przewodnościowych, a także wyładowań niezupełnych generowanych wysokim napięciem. Parametr ten zależy m.in. od zawartości polarnych i podatnych na jonizację cząsteczek w cieczy izolacyjnej, przy czym ich obecność w niewielkim stopniu wpływa na wzrost temperatury cieczy podczas pracy transformatora. Parametr ten może ulec gwałtownemu pogorszeniu na skutek wzrostu zanieczyszczeń w przypadku transportu cieczy izolacyjnej lub jej przechowywania, np. razem z olejami silikonowymi. Wzrost $\text{tg}\delta$ może wystąpić również w przypadku, kiedy czysta chemicznie woda silnie reaguje z produktami utleniania lub z innymi zanieczyszczeniami tworząc trwałe związki. Procesy starzeniowe przyczyniają się również do pogarszania właściwości dielektrycznych cieczy izolacyjnych. Na rysunku 4 przedstawiono wykres zależności współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ w funkcji temperatury, w zakresie od 25 do 100 °C. Analizując charakterystykę można zauważyć, że parametr ten wzrasta o dwa rzędy wielkości nieliniowo od wartości $4,8 \cdot 10^{-4}$ do $2,1 \cdot 10^{-2}$.



Rys. 4. Zależność współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ estru Midel 7131[®] od temperatury

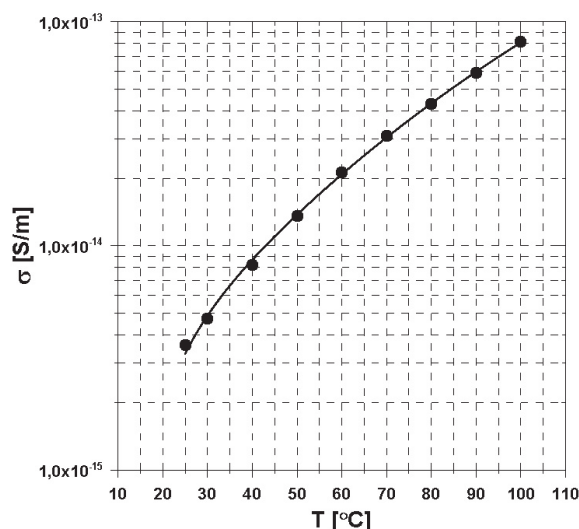
Przenikalność elektryczna względna (ϵ_w) jest parametrem odgrywającym istotną rolę przy charakterystyce cieczy izolacyjnych. Wartość ϵ_w zależy od me-

chanizmów polaryzacji występujących w rozpatrywanym dielektryku, od jego budowy cząsteczkowej, a także stanu skupienia. Temperatura jest również istotnym czynnikiem wpływającym na zmianę tego parametru. Przenikalność elektryczna względna cieczy niepolarnych, do których zalicza się mineralne oleje izolacyjne, jest zbliżona do kwadratu współczynnika załamania światła, nie zależy natomiast od częstotliwości pola elektrycznego. Rysunek 5 przedstawia zależność przenikalności elektrycznej względnej estru Midel 7131[®] w funkcji temperatury, w przedziale od 25 do 100 °C. Parametr ten maleje liniowo od wartości 3,18 do 2,98.

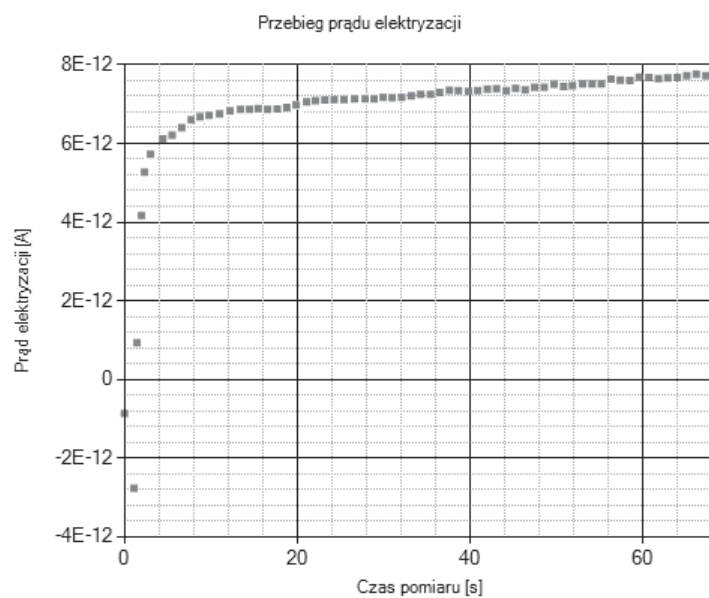


Rys. 5. Zależność przenikalności elektrycznej względnej estru Midel 7131[®] od temperatury

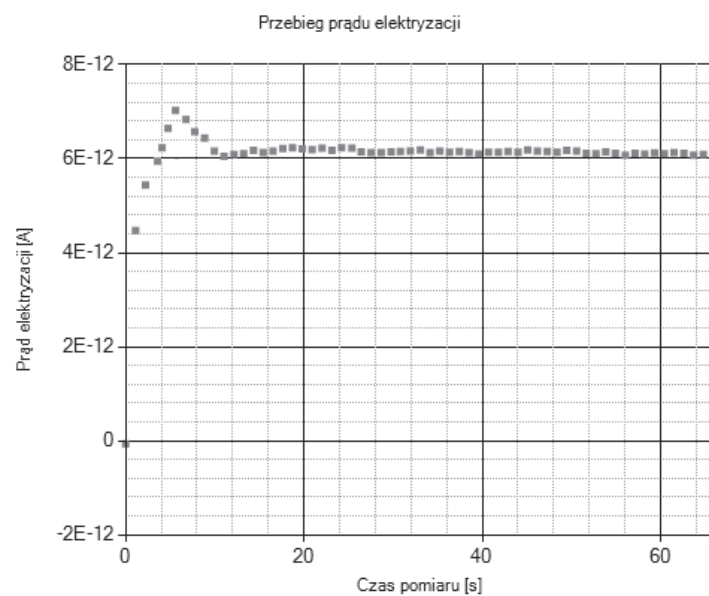
Konduktywność ciekłych dielektryków określa zjawisko przepływu w nich ładunków elektrycznych pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Przewodnictwo cieczy izolacyjnych może być uwarunkowane zarówno ruchem elektronów, jak również jonów. Procesy te zależą istotnie od budowy molekularnej cieczy. W cieczach niepolarnych, do których zalicza się mineralne oleje izolacyjne ($\epsilon_w \approx 2$), spotyka się przewodnictwo elektronowe oraz słabe przewodnictwo jonowe. W syntetycznych estrach organicznych (ciecze polarne, $\epsilon_w > 3$), w przeważającej mierze występuje przewodnictwo jonowe. Konduktywność cieczy zależy zarówno od koncentracji nośników ładunku, ładunku nośnika, jak również jego ruchliwości. Rysunek 6 przedstawia charakterystykę konduktywności estru Midel 7131[®] w funkcji temperatury w zakresie od 25 do 100°C, wyznaczoną w oparciu o pomiary rezystywności. Parametr ten wzrasta nieliniowo od wartości $3,6 \cdot 10^{-15}$ do $8,1 \cdot 10^{-14}$ S/m.

Rys. 6. Zależność konduktywności estru Midel 7131[®] od temperatury

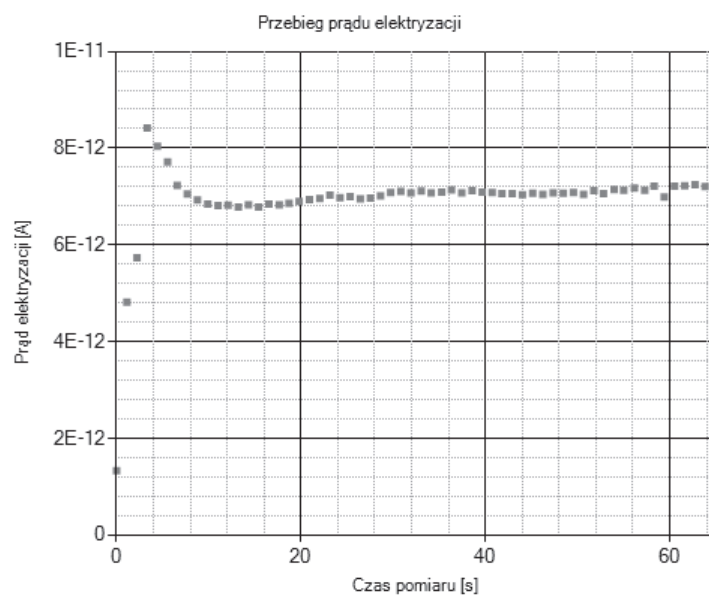
Zjawisko elektryzacji strumieniowej w transformatorach z wymuszonym obiegiem cieczy elektroizolacyjnej, zachodzi na skutek kontaktu przepływającej cieczy z materiałami o różnych właściwościach fizycznych oraz strukturze powierzchni. W tego typu urządzeniach występują zarówno elementy metalowe (kadź, pompy, radiatory chłodnicy), jak również dielektryki stałe, przeznaczone do izolowania uzwojeń (papier, preszpan). Właściwości tych materiałów wpływają na podatność do elektryzacji (ECT – Electrostatic Charging Tendency) cieczy izolacyjnych. W celu określenia stopnia elektryzacji strumieniowej estru syntetycznego Midel 7131[®] zastosowano laboratoryjny układ pomiarowy, w którym ciecz izolacyjna elektryzuje się przepływając przez rurkę pomiarową wykonaną z różnych materiałów. Na rysunkach od 7-13 przedstawiono wyniki pomiarów prądu elektryzacji strumieniowej, zarejestrowane podczas przepływu estru syntetycznego przez rurki wykonane z klasycznego papieru celulozowego oraz papieru wytworzonego na bazie włókien aramidowych. W celach porównawczych przeprowadzono również badania elektryzacji estru Midel 7131[®] przy przepływie przez rurkę aluminiową, miedzianą, mosiężną oraz wykonaną z laminatu epoksydowo-szklanego oraz włókna węglowego. Badania eksperymentalne prądu elektryzacji estru syntetycznego Midel 7131[®] wykazały, że wartości ECT są silnie uzależnione od rodzaju materiału, z którego wykonana jest rurka pomiarowa. Generacja ładunków elektrostatycznych w przepływającej cieczy izolacyjnej zachodzi w największym stopniu w rurce aramidowej. Najslabiej ciecz ta elektryzuje się przepływając przez rurkę wykonaną z miedzi.



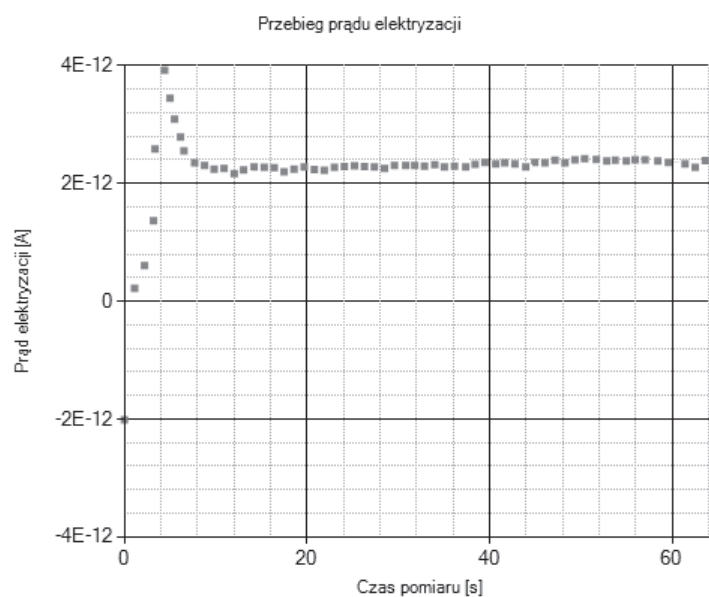
Rys. 7. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę aramidową; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



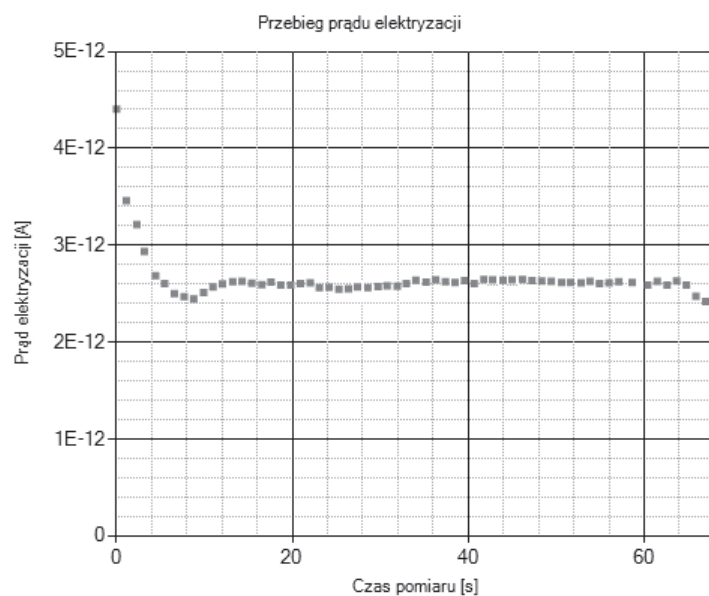
Rys. 8. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę celulozową; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



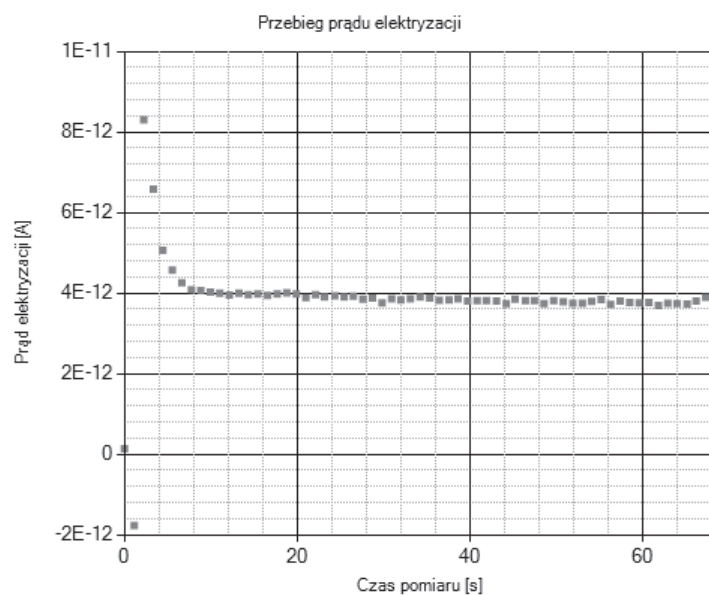
Rys. 9. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę aluminiową; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



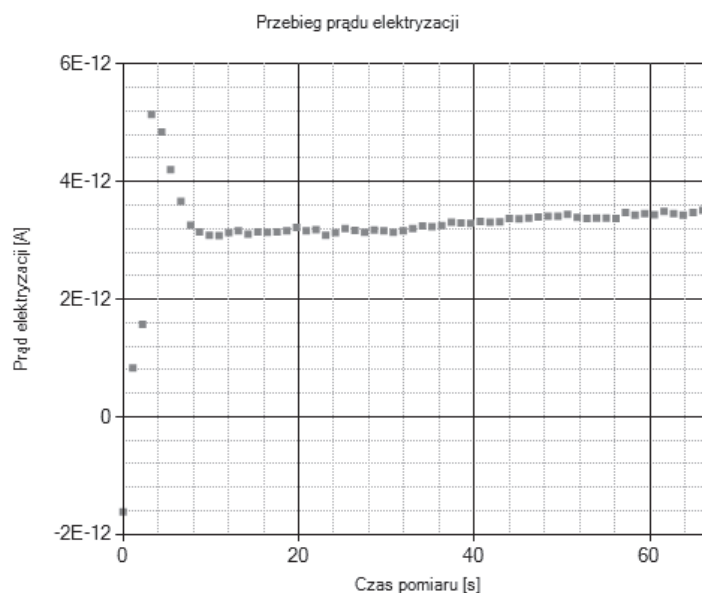
Rys. 10. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę miedzianą; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



Rys. 11. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę mosiężną; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



Rys. 12. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę epoksydowo-szklaną; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm



Rys. 13. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej estru Midel 7131[®] od czasu przepływu przez rurkę węglową; $v = 0,34$ m/s, $l = 400$ mm, $d = 4$ mm

4. PODSUMOWANIE

Coraz szersze stosowanie estrów syntetycznych, jako cieczy izolacyjnych w transformatorach, wymaga znajomości podstawowych ich właściwości. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych właściwości fizycznych i elektrycznych cieczy izolacyjnej Midel 7131[®] w funkcji temperatury. Badano lepkość, gęstość, współczynnik stratności $\text{tg}\delta$, przenikalność elektryczną względną oraz konduktywność. Określono ponadto podatność estru Midel 7131[®] na elektryzację strumieniową (ECT) w układzie przepływowym z rurką pomiarową. Wykazano dużą zależność generowanych prądów elektryzacji od rodzaju zastosowanego materiału rurki. Prezentowane wyniki mogą być pomocne w projektowaniu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych, a także w badaniach właściwości cieczy izolacyjnych, szczególnie estrów syntetycznych.

LITERATURA

- [1] Antosz A., Oleje transformatorowe – stan aktualny i perspektywy rozwoju, Nafta Gaz, Nr 3, s. 222-227, 2010.

- [2] Jung Y., Timoshkin I. V., Wilson M. P., Given M. J., MacGregor S. J., Wang T., Lehr J. M., Dielectric Properties of Natural Ester, Synthetic Ester Midel 7131 and Mineral Oil Diala D, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, pp. 644-652, 2014.
- [3] Różga P., Properties of new environmentally friendly insulating fluids for power transformers, 1st Annual International Interdisciplinary Conference, AIIC 2013, pp. 358-364, 24-26 April, Azores, Portugal.
- [4] Nynas Nytro Taurus, Product Data Sheet, Issuing date: 30/09/2014
- [5] Midel 7131, Product Data Sheet - Dielectric Insulating Fluid Overview, September 2014.
- [6] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P., Porównanie estrów naturalnych i olejów mineralnych w aspekcie wykorzystania w transformatorach energetycznych wysokich napięć, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, No 74, pp. 151-158, 2013.
- [7] Zdanowski M., Ozon T., System pomiarowy do badania elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, No. 86, pp. 393-403, 2016.
- [8] Zdanowski M., Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEL 7131[®], IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 3, pp. 1127-1132, 2014.

DETERMINATION OF BASIC PHYSICAL AND ELECTRIC PROPERTIES OF ESTER MIDEL 7131[®]

Dielectric fluids based on synthetic esters are used in transformer insulating systems. The article presents selected physical and electrical properties of Midel 7131[®]. In this paper kinematic viscosity, density, dielectric dissipation factor $\text{tg}\delta$, relative permittivity and conductivity in wide temperatures are shown. Kinematic viscosity measurements were performed using Ubbelohde viscometer with automatic time of outflow measuring iVisc Lauda. Density measurements were performed using set of areometers. To ensure constant temperature conditions of measurement water bath with thermostat Lauda were used. For the temperature lower than ambient temperature compressor cooler were used. Dielectric dissipation factor $\text{tg}\delta$, relative permittivity and resistivity measurements were performed using measuring device BAUR DLT C with thermostatic test cell. The article is additionally included the results of streaming charging electrification current of Midel 7131[®] fluid, which were collected using flowing system with measuring pipe.

(Received: 29.01.2018, revised: 09.03.2018)