

doi:10.15199/48.2022.10.26

## Porównanie napięcia inicjacji i przebicia w estrach i olejach mineralnych w układzie izolowanych elektrod przy napięciu udarowym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań nad inicjacją i przebiciem w biodegradowalnych cieczach dielektrycznych przy napięciu udarowym piorunowym. Do badań wykorzystano układ elektrod, w którym zarówno elektroda wysokonapięciowa jak i elektroda uziemiona wyposażone są w izolację stałą. Wyniki dotyczące estrów zestawiono z analogicznie uzyskanymi wynikami dla olejów mineralnych. W ramach analizy porównano napięcie inicjacji wyładowań i napięcie przebicia, a także czasy do przebicia oraz intensywność wyładowań.

**Abstract.** The article presents the results of studies concerning initiation and breakdown in biodegradable dielectric liquids at lightning impulse voltage. The electrode system, in which a high voltage electrode as well as a grounded one were insulated with solid insulation, are used in the studies. The results on ester liquids are set with analogically obtained results on mineral oils. Within the analysis made the initiation voltage, and breakdown voltage as well as time to breakdown and intensity of discharges are compared. (**Comparison of initiation and breakdown voltage in esters and mineral oils in the system of insulated electrodes under lightning impulse voltage**)

**Słowa kluczowe:** napięcie inicjacji, napięcie przebicia, estry, izolowane elektrody.

**Keywords:** initiation voltage, breakdown voltage, esters, insulated electrodes.

### Wstęp

Zagadnienia wytrzymałości elektrycznej oraz zjawisk wyładowczych w olejach mineralnych od dawna stanowią przedmiot badań dla naukowców zajmujących układami izolacyjnymi transformatorów. Wraz z rosnącym od pewnego czasu zainteresowaniem biodegradowalnymi cieczami dielektrycznymi (w tym m.in. estrami naturalnymi i syntetycznymi) i powstawaniem coraz to nowych rozwiązań w tym zakresie pojawiła się potrzeba dokładniejszego poznania tych cieczy. Powstało wiele publikacji opisujących właściwości fizyczne, chemiczne i elektryczne estrów a także zachodzące w nich zjawiska wyładowcze [1-6]. Jednak stosunkowo niewielka liczba prac dotyczy badań zarówno olejów mineralnych jak i estrów w układach izolowanych elektrod, które są bardziej zbliżone do rzeczywistych systemów stosowanych w transformatorach [7-9].

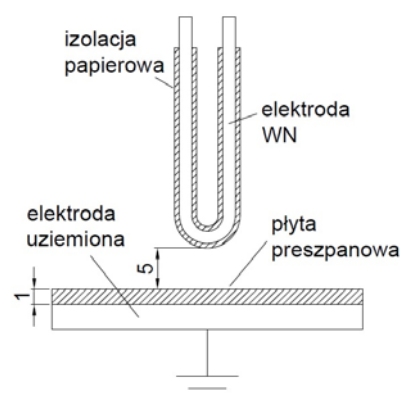
Estry posiadają odmienne właściwości fizykochemiczne niż oleje mineralne. Warto tu wymienić wyższą lepkość kinematyczną, która wpływa na chłodzenie transformatorów, wyższe temperatury zapłonu i palenia, a także wysoką biodegradowalność, co jest istotne z punktu widzenia ekologii [2, 3, 5, 6]. Pod względem właściwości elektrycznych charakteryzują się wyższymi wartościami przenikalności elektrycznej. Ten parametr sprawia, że estry lepiej współpracują z izolacją stałą – występują mniejsze naprężenia elektryczne na granicy ciecz-izolacja [3, 5]. Badania wskazują na porównywalną wytrzymałość elektryczną estrów do olejów mineralnych przy napięciu przemiennym, natomiast przy napięciu udarowym zauważa się odmienne zachowanie estrów; estry charakteryzują się niższym udarowym napięciem przebicia, szczególnie przy większych przerwach elektrodowych (> 25 mm) [4, 10, 11]. Nie pozwala to więc na jednoznaczną ocenę dielektrycznych właściwości estrów.

Wziąwszy pod uwagę powyższe kwestie postanowiono zbadać właściwości estrów w zakresie napięcia inicjacji i przebicia w układzie izolowanych elektrod przy napięciu udarowym piorunowym.

### Układ pomiarowy

W badaniach został wykorzystany układ elektrod przedstawiony schematycznie na rysunku 1. Elektrode

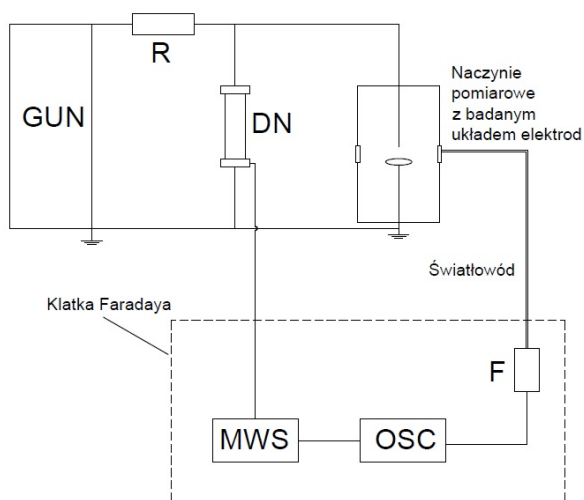
wysokonapięciową (elektrodę WN) stanowił mosiężny przewód wygięty w kształt litery „U”. Na zgięciu została ona wyfrezowana z obu stron, przez co w widoku bocznym wygląda jak elektroda ostrzowa. W czasie badań wykorzystywano łącznie 40 takich elektrod. Były one dodatkowo owinięte izolacją papierową o grubości 0,1 mm. Kolejne pasma papieru zachodziły na siebie, co w efekcie dawało podwójną warstwę izolacji, a więc izolacja elektrody WN wynosiła 0,2 mm. Na uziemionej elektrodzie płytowej umieszczono preszpanową płytę o grubości 1 mm. Odległość między elektrodą WN a preszpanem wynosiła 5 mm. Wartości te ustalono eksperymentalnie na podstawie testów wykonanych przed właściwymi badaniami.



Rys.1. Schemat układu izolowanych elektrod

Schemat na rysunku 2 przedstawia z kolei układ pomiarowy, w którym prowadzono badania. Składał się z generatora udarów napięciowych, który wytwarzał udary o znormalizowanym kształcie 1,2/50  $\mu$ s. Układ elektrod był umieszczony w kadzi zalanej badaną cieczą. Pomiar napięcia odbywał się przy użyciu rezystancyjnego dzielnika napięcia połączonego z miernikiem wartości szczytowej i oscyloskopem. W celu rejestracji światła emitowanego przez wyładowania rozwijające się w cieczy dielektrycznej w czasie trwania udaru (a tym samym oceny ich intensywności) wykorzystano światłowód przymocowany do

zewewnętrznej ściany kadzi i połączony przez układ fotopowielacza z oscyloskopem.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego: GUN – generator udarów napięciowych, R – rezystor ograniczający, DN – dzielnik napięcia, F – układ fotopowielacza, MWS – miernik wartości szczytowej, OSC – oscyloskop cyfrowy

Zbadano cztery cieczy dielektryczne o zróżnicowanych właściwościach – olej mineralny nieinhibitoryny Nytro Taurus, olej mineralny inhibitoryny Nytro 10XN, ester naturalny Midel eN1215 i ester syntetyczny Midel 7131. W tabeli 1 zestawiono wybrane właściwości wymienionych cieczy.

Tabela 1. Wybrane właściwości badanych cieczy dielektrycznych

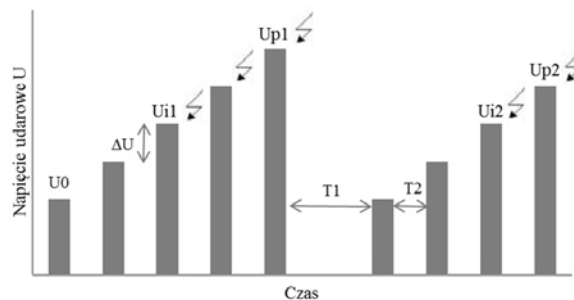
Parametr	Jednostka	Nytro Taurus	Nytro 10XN	Midel eN1215	Midel 7131
Lepkość (40°C)	mm <sup>2</sup> /kg	10	7,75	32	29
Wilgotność	mg/kg	<20	<20	50	50
Napięcie przebicia AC	kV	>70	>70	>75	>75
Temp. zapłonu	°C	152	150	>315	260
Temp. palenia	°C	-	-	>350	316
Biodegradacja	-	nie	nie	tak	tak

### Metodologia badań

Badania poszczególnych cieczy dielektrycznych poprzedzały odpowiednie przygotowania. Polegały one na przygotowaniu 20 elektrod izolowanych tj. owinięciu ich papierem nawojowym, następnie suszeniu ich wraz z preszanowymi płytami przy ciśnieniu poniżej 1 hPa i temperaturze 105 °C przez 24 godziny. Bezpośrednio po suszeniu elektrody i płyty impregnowano w badanej cieczy w takich samych warunkach, ale przy temperaturze 80 °C.

Pomiary wykonano stosując eksperymentalną metodę pomiarową bazującą na znanej z normy IEC 60897 procedurze schodkowej. Ta metoda była już wielokrotnie wykorzystywana w badaniach z pozytywnym skutkiem [1, 10, 11]. Do badanego układu przykładano kolejne udary napięciowe o biegunowości ujemnej o coraz wyższej wartości szczytowej, rozpoczynając od wartości początkowej  $U_0$  a kończąc na wartości udarowego napięcia przebicia  $U_p$ . Wartość  $U_0$  dla każdej cieczy przyjęto na podstawie wcześniejszych testów – 100 kV w przypadku

olejów mineralnych i 80 kV dla estrów. Krok napięciowy  $\Delta U$  wynosił 5 kV. W przypadku wystąpienia wyładowań elektrycznych zapisywano zarejestrowany oscylogram i wartość szczytową napięcia udarowego. Wartość napięcia, przy którym zauważono pierwsze wyładowania uznawano za napięcie inicjacji  $U_i$ . Po każdej serii pomiarowej, czyli po przebiciu układu izolacyjnego wymieniano elektrodę WN i preszanową płytę na nowe. W celu regeneracji cieczy dielektrycznej zachowano 2 minuty przerwy między kolejnymi udarami napięciowymi ( $T_2$ ) i 15 minut po każdej serii ( $T_1$ ).



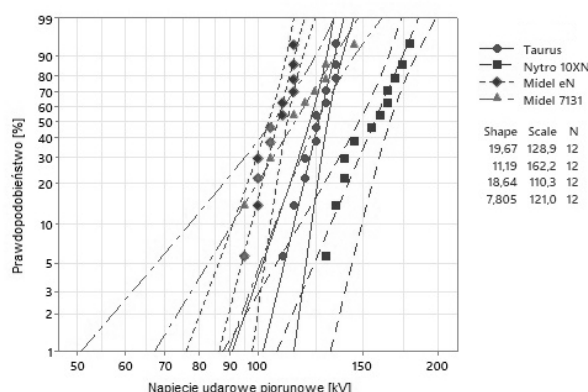
Rys.3. Schemat schodkowej metody pomiarowej

### Wyniki

Wyniki pomiarów napięć inicjacji zostały przedstawione w tabeli 2. Ze wszystkich wykonanych serii pomiarowych wybrano 12 (odrzucono serie z błędami grubymi) i na ich podstawie obliczono średnią, odchylenie standardowe oraz wyznaczono rozkład Weibulla (rys.4), z którego odczytano 5%-owe i 50%-owe wartości prawdopodobieństwa napięć inicjacji.

Tabela 2. Wyniki pomiarów napięć inicjacji

Badana ciecz	Średnia	Odchylenie standardowe	$U_{5\%}$	$U_{50\%}$
	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
Nytro Taurus	125,4	8,1	110,9	126,6
Nytro 10XN	155,0	16,7	124,4	157,0
Midel eN1215	107,1	7,2	94,00	108,1
Midel 7131	114,2	15,9	82,70	115,5

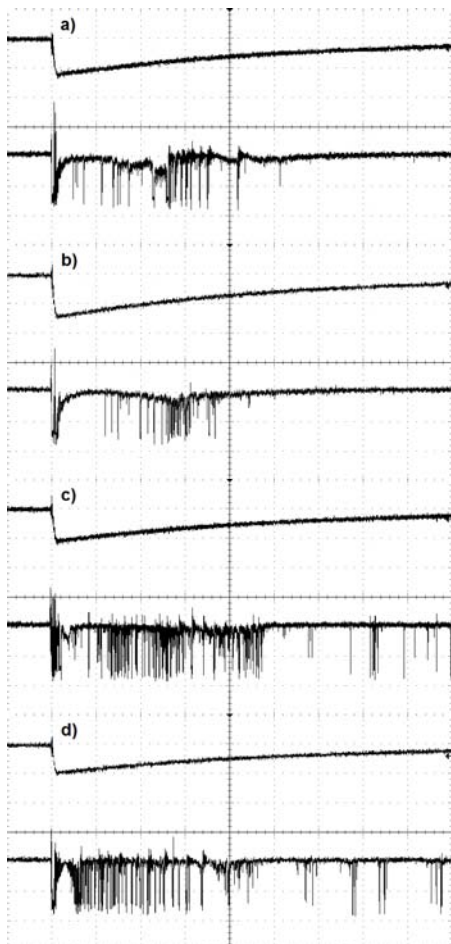


Rys.4. Rozkład Weibulla napięć inicjacji: N – liczba próbek, Shape – parametr kształtu, Scale – parametr skali

Przy porównaniu wyników można zauważyć wyraźną przewagę olejów mineralnych nad estrami. Najwyższą

wartość napięcia inicjacji otrzymano dla oleju inhibitowanego Nytro 10XN, mniejsze kolejno dla oleju nieinhibitowanego Nytro Taurus, estru syntetycznego Midel 7131 i estru naturalnego Midel eN1215. Warto zwrócić uwagę na wyższe wartości odchylenia standardowego oraz stosunkowo niskie wartości  $U_{5\%}$  dla oleju inhibitowanego i estru syntetycznego, co może świadczyć o mniejszej stabilności tych cieczy dielektrycznych w przypadku narażeń udarowych.

Na rysunku 5 zebrano przykładowe oscylogramy zarejestrowane przy napięciach inicjacji wyładowań dla poszczególnych cieczy. Pierwszy przebieg na każdym oscylogramie przedstawia falę napięcia udarowego, natomiast drugi pokazuje impulsy światła emitowane przez rozwijające się wyładowania. Na ich podstawie można ocenić intensywność wyładowań oraz wytrzymałość badanych cieczy.



Rys.5. Przykładowe oscylogramy otrzymane dla: a) Nytro Taurus (120 kV), b) Nytro 10XN (140 kV), c) Midel eN1215 (105 kV), d) Midel 7131 (105 kV); skala napięcia – 100 kV/dz., skala czasu – 10  $\mu$ s/dz.

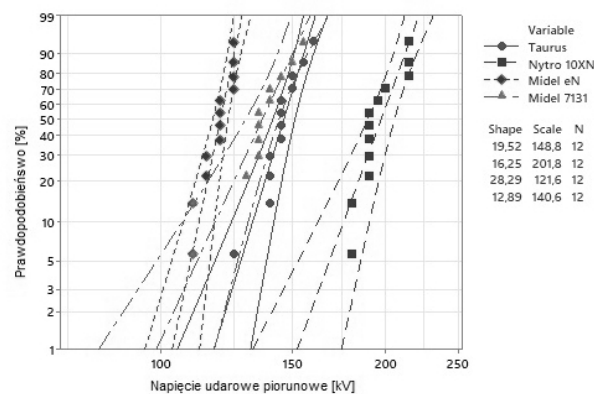
W przypadku estrów wyładowania cechują się większą intensywnością – impulsów światła jest więcej, są gęściej rozmieszczone oraz występują przez dłuższy czas. W olejach mineralnych wyładowań jest mniej i występują wyraźniejsze przerwy między kolejnymi wyładowaniami. Wraz ze zwiększaniem wartości szczytowej napięcia udarowego, wyładowania we wszystkich cieczach stawały się coraz bardziej intensywne, co było spowodowane coraz silniejszą jonizacją przerwy międzyelektrodowej, co jest zgodne z dotychczasowymi badaniami w układach elektrod gołych [1, 4, 5, 10, 11]. Takie zjawisko można było częściej zaobserwować w przypadku olejów mineralnych – przed

przebiegiem układu izolacyjnego występowały co najmniej dwa kroki, przy których obserwowano wyładowania. Natomiast w estrach w wielu przypadkach w następnym kroku po inicjacji następowało przebiecie. Było to spowodowane silniejszą jonizacją i intensywnymi zjawiskami wyładowczymi, ale też zastosowaniem małej przerwy międzyelektrodowej. Przy większej przerwie wyładowania byłyby zapewne obserwowane przy większej liczbie kroków napięcia.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki napięć przebiecia badanych cieczy oraz wyznaczone na podstawie oscylogramów czasy do przebiecia  $T_p$ . Rozkład Weibulla napięć przebiecia pokazano na rysunku 6.

Tabela 3. Wyniki pomiarów napięć przebiecia

Badana ciecz	Średnia	Odchylenie standardowe	$U_{5\%}$	$U_{50\%}$	$T_p$
	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[ $\mu$ s]
Nytro Taurus	145,0	8,8	127,8	146,0	8,8
Nytro 10XN	195,8	12,8	168,1	197,3	16,7
Midel eN1215	119,2	5,6	109,5	120,0	2,5
Midel 7131	135,0	13,6	111,7	136,7	2,9

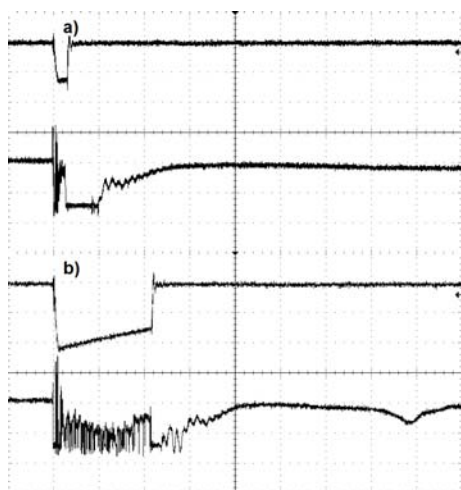


Rys.6. Rozkład Weibulla napięć przebiecia: N – liczba próbek, Shape – parametr kształtu, Scale – parametr skali

Pomiary udarowego napięcia przebiecia ponownie pokazały wyższą wytrzymałość olejów mineralnych. Największe wartości otrzymano dla oleju inhibitowanego Nytro 10XN, a najmniejsze dla estru naturalnego Midel eN1215. Tak jak w przypadku napięć inicjacji olej inhibitowany Nytro 10XN i ester syntetyczny cechują się wysokimi wartościami odchyżeń standardowych.

Porównując wartości mediany z tabeli 2 i tabeli 3 można zauważyć kolejną cechę, która może świadczyć o wyższej wytrzymałości olejów mineralnych w porównaniu do estrów. Największa różnica między napięciem inicjacji a napięciem przebiecia występuje w przypadku oleju inhibitowanego i wynosi 40 kV, najmniejsza zaś dla estru naturalnego – 12 kV. Ester syntetyczny i olej nieinhibitowany są pod tym względem porównywalne.

Z oscylogramów, których dwa przykłady pokazano na rysunku 7, odczytano czasy do przebiecia, które są widoczne jako załamanie fali napięcia udarowego. Najkrótszymi czasami charakteryzują się estry. Zjawiska przedprzebieciami są w nich także intensywniejsze – najczęściej obserwowano jedno silne wyładowanie, prowadzące bezpośrednio do przebiecia (widoczne na przebiegu światła jako jeden długi impuls).



Rys.7. Przykładowe oscylogramy otrzymane przy napięciu przebicia dla: a) Midel eN1215 (125 kV), b) Nytro 10XN (215 kV); skala napięcia – 100 kV/dz., skala czasu – 10  $\mu$ s/dz.

### Podsumowanie

Analiza otrzymanych wyników wskazuje na gorsze właściwości estrów przy napięciu udarowym piorunowym. Zarówno napięcie inicjacji jak i napięcie przebicia są w przypadku estrów niższe niż w olejach mineralnych. Estry charakteryzują się także występowaniem intensywniejszych wyładowań elektrycznych, co niekorzystnie może wpływać na rzeczywisty układ izolacyjny w transformatorze; wyładowanie silniej jonizuje przerwę międzyelektrodową, a wskutek intensywniej zachodzącego przebicia może uszkadzać izolację stałą skutkując obniżeniem wytrzymałości układu.

Zastosowanie izolacji na elektrodzie wysokonapięciowej oraz preszpanowej płyty na elektrodzie uziemionej ma niewątpliwie pozytywny wpływ na wartości napięć inicjacji i przebicia, co potwierdzają wcześniej wspomniane, nieliczne artykuły oraz nieopublikowane jeszcze pomiary w układzie gołych elektrod. Jednak obecność izolacji stałej nie spowodowała polepszenia omawianych parametrów w kontekście estrów do poziomu uzyskanego w olejach mineralnych. Można na tej podstawie wnioskować, że decydującą rolę w występowaniu zjawisk wyładowczych przy napięciach udarowych odgrywa jednak w dalszym ciągu zastosowana ciecz dielektryczna i to ona stanowi tzw. słaby punkt w układzie izolowanych elektrod. Wyciągnięcie finalnych wniosków wymaga jednak dalszych badań, m.in. przy zastosowaniu innych przerw międzyelektrodowych czy układów elektrod oraz różnych stałych materiałach izolacyjnych.

Artykuł został napisany w czasie, gdy autor był doktorantem w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej.

**Autor:** mgr inż. Konrad Strzelecki, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [konrad.strzelecki@dokt.p.lodz.pl](mailto:konrad.strzelecki@dokt.p.lodz.pl).

### LITERATURA

- [1] Rozga P., Rapp K., Stanek M., Lightning Properties of Selected Insulating Synthetic Esters and Mineral Oil in Point-to-Sphere Electrode System, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25 (2018), No. 5, 1699-1705
- [2] Różga P., Szewczyk R., Ocena porównawcza efektywności impregnacji preszpanu izolacyjnego wybranymi estrami dielektrycznymi i olejem mineralnym z wykorzystaniem efektu podciągania kapilarnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 10, 69-72
- [3] Mohan Rao U., Fofana I., Jaya T., Rodriguez-Celis E.M., Jalbert J., Picher P., Alternative Dielectric Fluids for Transformer Insulation System: Progress, Challenges, and Future Prospects, *IEEE Access*, 7 (2019), 184552–184571
- [4] Mohan Rao U., Fofana I., Beroual A., Rozga P., Pompili M., Calcara L., Rapp K.J., A review on pre-breakdown phenomena in ester fluids: Prepared by the international study group of IEEE DEIS liquid dielectrics technical committee, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27 (2020), No. 5, 1546-1560
- [5] Rozga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M., Strzelecki K., A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications, *Energies*, 13 (2020), No. 23, 6429
- [6] Shen Z., Wang F., Wang Z., Li J., A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141 (2021), 110783
- [7] Rozga P., The Influence of Paper Insulation on the Prebreakdown Phenomena in Mineral Oil under Lightning Impulse, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11 (2011), No. 3, 720-727
- [8] Rozga P., Hantsz D., Influence of volume effect on electrical discharge initiation in mineral oil in the setup of insulated electrodes, *Electrical Engineering*, 99 (2017), No. 1, 179-186
- [9] Vuković D., Milone M., Hjortstam O., Faleke H., Experimental Discharge Initiation Study for Paper and Pressboard Insulated Electrodes in Mineral Oil and Synthetic Ester Fluid, *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, (2019), 1-5
- [10] Rozga P., Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 64 (2016), No. 1, 171-179
- [11] CIGRE Technical Brochure 856, Dielectric performance of insulating liquids for transformers, 2021