

doi:10.15199/48.2022.10.31

# Inicjacja wyładowań elektrycznych w układzie z klinem olejowym przy napięciu udarowym

**Streszczenie.** W artykule opisane zostały wyniki badań laboratoryjnych oraz symulacji nad układem elektrod z tzw. klinem olejowym. Układ ten został przebadany w zakresie napięć inicjacji wynikających z przyłożonego do układu ujemnego napięcia udarowego piorunowego. W pracy rozważono trzy cieczki dielektryczne wykorzystywane w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych: olej mineralny, ester syntetyczny i ester naturalny. Statystyczna analiza wyników wykazała, że także w układach z klinem olejowym lepsze właściwości posiada olej mineralny.

**Abstract.** The article describes the results of laboratory tests and simulations of the electrode system with the so-called oil wedge. This system has been tested in terms of initiation voltages resulting from the negative lightning impulse voltage applied to the system. The paper considers three dielectric liquids used in the insulation systems of power transformers: mineral oil, synthetic ester and natural ester. The statistical analysis of the results showed that mineral oil has better properties in the systems with an oil wedge. (*Initiation of electrical discharges in the oil wedge system at lightning impulse voltage*).

**Słowa kluczowe:** napięcie udarowe, wyładowania elektryczne, klin olejowy, cieczki dielektryczne.

**Keywords:** lightning impulse, electrical discharges, oil wedge, dielectric liquids.

## Wstęp

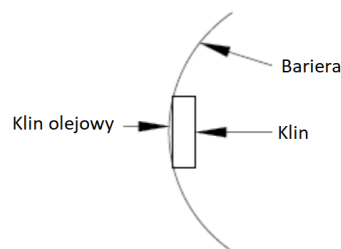
Wyładowania elektryczne w układach izolacyjnych z tzw. wolną przerwą olejową przy napięciu udarowym piorunowym są tematem badań od wielu lat. Mają one głównie charakter poznawczy, a ich celem jest zdefiniowanie fizycznych uwarunkowań inicjacji i rozwoju wyładowań, a także mechanizmów przebicia cieczy [1-5]. Ponieważ mechanizm inicjacji, propagacji i przebicia związany jest nierozdzielnie z budową cząsteczkową cieczy dielektrycznej, w ostatnich latach badania zostały zintensyfikowane w kontekście cieczy dielektrycznych innych, niż typowo stosowane w transformatorach oleje mineralne. Podejmowano ocenę mechanizmów inicjacji i rozwoju wyładowań w estrach syntetycznych i naturalnych [6-8], cieczach typu Gas-to-Liquid (GTL) [9] oraz, w ostatnim czasie, cieczach biodegradowalnych bazujących na węglowodorach [10, 11]. We wszystkich przypadkach, badania prowadzone były w układach o skrajnie nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego (ostrze-płyta, ostrze-kula), co wynika z właściwości takich układów. Inicjacja wyładowania możliwa jest już przy niewielkim napięciu, a sam proces inicjacji i rozwoju wyładowań jest czysto elektronowy tzn. zależy minimalnie od jakości cieczy.

Wspomniane układy o polu nierównomiernym nie odzwierciedlają jednak w żadnym stopniu rzeczywistego układu izolacyjnego transformatora, w którym elektrody gołe nie występują, a niewrażliwymi obszarami układu mogą stać się tzw. kliny olejowe, czyli niewielkie obszary o zwiększonym naprężeniu elektrycznym wynikającym z różnicy przenikalności dielektrycznej pomiędzy cieczą a dielektrykiem stałym. Na rysunku 1 pokazany został przykład rozwiązania izolacji głównej transformatora z umiejscowieniem wspomnianego klinu olejowego.

Niestety testowanie układów z izolacją stałą wymaga starannego przygotowania modelu w aspekcie odpowiedniego wysuszenia i zaimpregnowania izolacji stałej (papieru lub preszpanu). Dodatkowo, aby móc ocenić prawidłowo wykonany eksperyment należy przygotować odpowiednią liczbę modeli, by następnie wyniki eksperymentu opracować statystycznie. Problemem jest także zamodelowanie układu tak, aby odzwierciedlał w jak największym zakresie (głównie w zakresie wartości natężenia pola elektrycznego) układ rzeczywisty.

Pośrednim rozwiązaniem, który w niniejszej pracy zastosowali autorzy, jest stworzenie modelu, który imitował

będzie klin olejowy, ale bez stosowania tylko elektrod izolowanych. W takim układzie przetestowano trzy cieczki dielektryczne różnego typu, by zweryfikować czy rodzaj układu wpłynie na otrzymane wyniki napięć inicjacji wyładowań elektrycznych przy napięciu udarowym piorunowym biegunowości ujemnej. Otrzymane wyniki skorelowano następnie z wynikami prac wcześniejszych w układzie elektrod gołych [4, 7, 8, 10-12].



Rys.1. Przykład obszaru izolacji głównej transformatora, w którym występuje klin olejowy

## Materiał badawczy i metodologia pomiarów

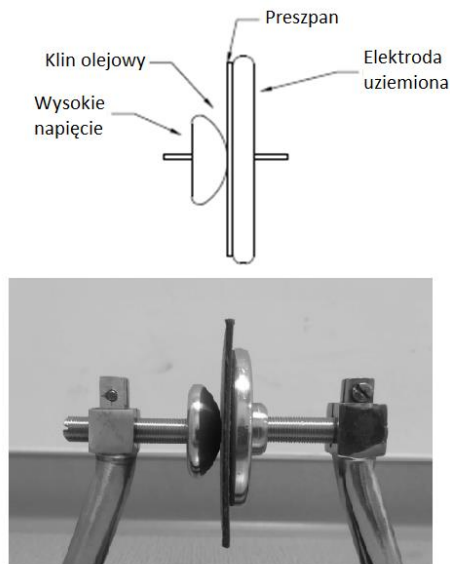
Badania wykonano w układzie elektrod jak na rysunku 2. Elektrode wysokiego napięcia (WN) stanowiła mosiężna elektroda grzybkowa, której wymiary były zgodne z rekomendacjami normy IEC 60156. Elektrode uziemioną tworzyła natomiast mosiężna płyta o średnicy 72 mm. Między elektrodami usytuowano płytę preszpanową o grubości 2 mm i wymiarach 100x100 mm. Klin olejowy występował więc pomiędzy elektrodą grzybkową WN a płytą preszpanową. Właściwości preszpanu zestawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wykorzystanego w badaniach preszpanu

| Parametr                         | Jednostka         | Wielkość |
|----------------------------------|-------------------|----------|
| Grubość                          | mm                | 2        |
| Gęstość                          | g/cm <sup>3</sup> | 1,25     |
| Zawartość wilgoci                | %                 | 5,8      |
| Wytrzymałość elektryczna w oleju | kV/mm             | 39       |

Przed wykonaniem pomiarów preszpan był suszony, a następnie impregnowany w cieczy, w której wykonywano pomiary. Procedura suszenia polegała na wygrzaniu próbek w kadzi probierczej w temperaturze 105 °C pod próżnią przez okres 48 h. Impregnacja natomiast składała się z

dwóch etapów. W pierwszym wysuszone próbki zalewane były pod próżnią cieczą dielektryczną podgrzaną do 80 °C, a następnie pozostały w niej przez okres 24 h przy zachowaniu próżni. Po tym czasie próbki były naturalnie chłodzone do temperatury otoczenia, również przez 24 h. Ciecz dielektryczna, którą wykorzystano w procesie impregnacji była również cieczą, w której wykonywano pomiary.



Rys.2. Szcik układu modelowego wykorzystanego w badaniach wraz z wyglądem rzeczywistym

Jak wspomniano we wstępie w badaniach uwzględniono trzy komercyjne ciecze dielektryczne, które wcześniej badano także w laboratorium wysokich napięć Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej w układzie elektrod gołych i polu skrajnie nierównomiernym: olej mineralny, ester syntetyczny i ester naturalny. Podstawowe właściwości cieczy wykorzystanych w badaniach zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości badanych cieczy dielektrycznych

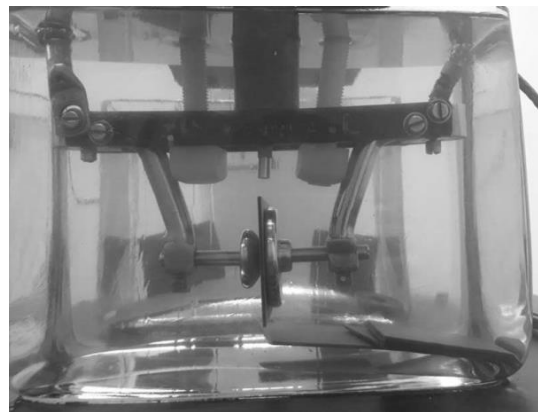
| Parametr           | Jednostka           | Olej mineralny | Ester naturalny | Ester syntetyczny |
|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| Lepkość (40°C)     | mm <sup>2</sup> /kg | 10             | 32              | 29                |
| Wilgotność         | mg/kg               | <20            | 50              | 50                |
| Napięcie przebicia | kV                  | >70            | >75             | >75               |
| Temp. zapłonu      | °C                  | 152            | >315            | 260               |
| Temp. palenie      | °C                  | -              | >350            | 316               |
| Biodegradowalność  | -                   | nie            | tak             | tak               |

Układ elektrod poddawano narażeniu udarem napięciowym piorunowym 1,2/50 μs biegunowości ujemnej. Procedura pomiarowa uwzględniała zastosowanie metody schodkowej z jednym udarem na stopień równym ΔU = 1kV. Dla każdego przypadku zrealizowano 10 procedur pomiarowych, przy czym po 5 procedurach próbka cieczy dielektrycznej została wymieniona na nową. Z kolei płytka przespanowa wymieniana była po każdej procedurze.

Napięcie inicjacji wyładowań było weryfikowane na podstawie sygnału światła rejestrowanego z użyciem fotopowielacza. Metoda ta od lat stosowana jest w badaniach przy napięciu udarowym piorunowym charakteryzując się wysoką skutecznością [1-12]. Niestety

metody stosowane typowo do detekcji wyładowań niepełnych przy napięciu przemiennym [13, 14], nie mogą zostać zaaplikowane przy napięciu udarowym.

Aby skutecznie wychwycić światło emitowane przez wyładowanie rozwijające się w badanym układzie końcówka światłowodu przenoszącego światło do fotopowielacza umieszczona została nad badanym modelem jak pokazano to na rysunku 3. Uwzględniając, że wyładowania w analizowanym modelu powinny rozwijać się względnie symetrycznie przypominając w swej formie figury Lichtenberga, takie podejście wydaje się być poprawnym przy ocenie inicjacji wyładowań w rozpatrywanym układzie elektrod.



Rys.3. Badany układ zanurzony w kadzi probierczej z pokazanym umiejscowieniem końcówki światłowodu zbierającego światło od wyładowania

### Wyniki

Tabela 3 przedstawia zbiorczo wyniki pomiarów w postaci wartości napięć inicjacji uzyskanych w 10-ciu seriach pomiarowych. Wyniki zostały podsumowane w każdym przypadku wartością średnią napięć inicjacji i odpowiadającym im odchyleniem standardowym.

Tabela 3. Napięcia inicjacji wyładowań elektrycznych w poszczególnych cieczach i dopowiadające im wartości średnie i odchylenia standardowe

| Nr           | Olej mineralny | Ester naturalny | Ester syntetyczny |
|--------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 1            | 92 kV          | 94 kV           | 83 kV             |
| 2            | 94 kV          | 95 kV           | 84 kV             |
| 3            | 92 kV          | 94 kV           | 84 kV             |
| 4            | 95 kV          | 95 kV           | 83 kV             |
| 5            | 92 kV          | 94 kV           | 85 kV             |
| 6            | 92 kV          | 91 kV           | 83 kV             |
| 7            | 94 kV          | 91 kV           | 84 kV             |
| 8            | 93 kV          | 94 kV           | 84 kV             |
| 9            | 93 kV          | 93 kV           | 84 kV             |
| 10           | 91 kV          | 94 kV           | 82 kV             |
| Średnia      | 92,8 kV        | 93,5 kV         | 83,6 kV           |
| Odch. Stand. | 1,2 kV         | 1,4 kV          | 0,8 kV            |

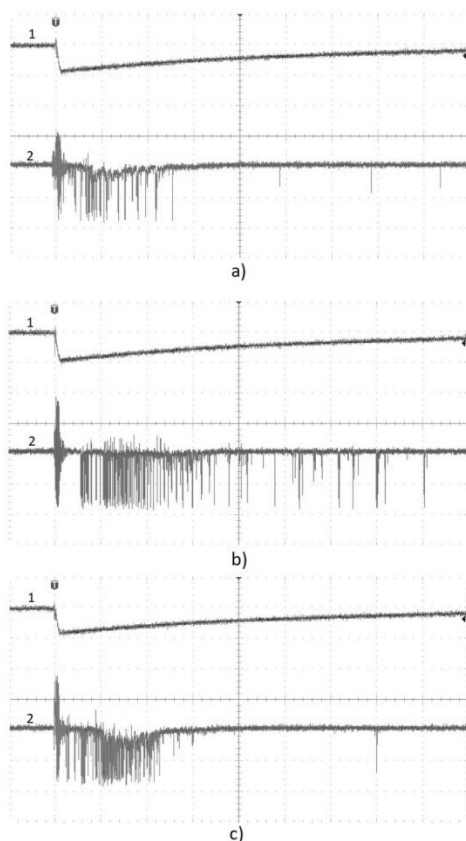
Otrzymane wyniki przeanalizowano także statystycznie z wykorzystaniem dwuparametrycznego rozkładu Weibulla. Z wykresów dystrybuanty, obok parametru skali wyznaczającego 63,2%-owe napięcie inicjacji, odczytano także odpowiednio 5%-owe i 50%-owe napięcie inicjacji. Wyniki zestawione zostały w tabeli 4.

Na rysunku 4 pokazane zostały natomiast przykładowe oscylogramy światła zarejestrowane podczas inicjacji wyładowań dla poszczególnych typów cieczy. Oscylogramy zawierają przebieg napięcia oraz wspomniany wyżej przebieg światła emitowanego przez rozwijające się wyładowanie.

Tabela 4. Parametry napięć inicjacji wyznaczonych z dystrybuant dwuparametrycznego rozkładu Weibulla

| Parametr   | Olej mineralny | Ester naturalny | Ester syntetyczny |
|--|----------------|-----------------|-------------------|
| 5%-owe napięcie inicjacji [kV]                     | 89,9           | 91,1            | 82,1              |
| 50%-owe napięcie inicjacji [kV]                    | 92,9           | 93,7            | 83,8              |
| Parametr skali (63,2%-owe napięcie inicjacji) [kV] | 93,3           | 94,0            | 84,2              |

Przebadany eksperymentalnie modelowy układ elektrod został także oceniony z punktu widzenia rozkładu pola elektrycznego. Symulacje wykonane zostały z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W tabeli 5 umieszczone zostały parametry materiałowe dielektryków, jakie zaaplikowano w symulacji. Należy pamiętać, że zmiana cieczy dielektrycznej pociągała za sobą zmianę względnej przenikalności dielektrycznej preszpanu nią impregnowanego. Jeśli zaś chodzi o wartości napięcia przypisanego grzybkowej elektrodzie WN, to wartości te były równe 50%-owemu napięciu inicjacji z badań eksperymentalnych.



Rys.4. Przykład oscylogramów zarejestrowanych podczas inicjacji wyładowań w danego typu cieczy dielektrycznej: a) olej mineralny, b) ester naturalny, c) ester syntetyczny, 1 – przebieg napięcia [50 kV/dz.], 2 – przebieg światła [jednostki względne],  $t = 10 \mu\text{s}/\text{dz.}$

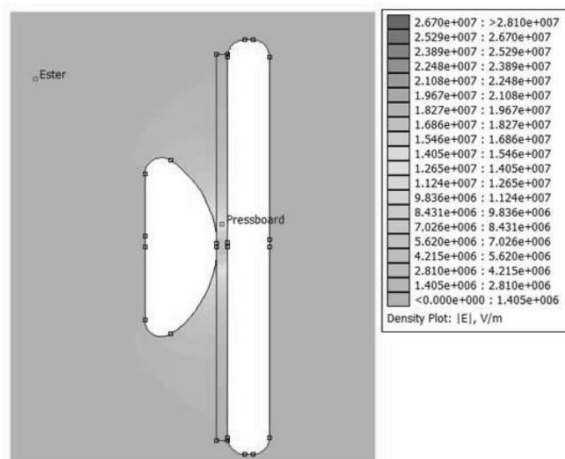
Na rysunku 5 pokazany został przykład wyniku symulacji uzyskany dla estru naturalnego jako rozpatrywanej cieczy dielektrycznej. W tabeli 6 zamieszczone zostały natomiast wyniki wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego, odpowiednio w klinie olejowym i preszpanie, odczytane z wykresów natężenia pola elektrycznego.

Tabela 5. Przenikalność dielektryczna materiałów zaaplikowana w obliczeniach symulacyjnych

| Materiał zastosowany w symulacji      | Ciecz dielektryczna |                 |                   |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
|                                       | Olej mineralny      | Ester naturalny | Ester syntetyczny |
| Przenikalność dielektryczna cieczy    | 2,2                 | 3,1             | 3,2               |
| Przenikalność dielektryczna preszpanu | 4,2                 | 4,5             | 4,7               |

Tabela 5. Maksymalne natężenie pola elektrycznego  $E_{\text{max}}$  odczytane z wykresów natężenia pola elektrycznego

|  | Ciecz dielektryczna |                 |                   |
|--|---------------------|-----------------|-------------------|
|  | Olej mineralny      | Ester naturalny | Ester syntetyczny |
| $E_{\text{max}}$ [kV/mm] w klinie olejowym | 41,2                | 30,7            | 26,6              |
| $E_{\text{max}}$ [kV/mm] w preszpanie      | 21,2                | 20,7            | 17,7              |



Rys.5. Przykład rozkładu pola elektrycznego w rozpatrywanym modelowym układzie elektrod w sytuacji, gdy cieczą dielektryczną jest ester naturalny

## Dyskusja

Przeprowadzone badania eksperymentalne w układzie z tzw. klinem olejowym potwierdziły w pewnym zakresie obserwacje z badań przeprowadzonych w układzie z ostrzową elektrodą WN. W kontekście inicjacji wyładowań elektrycznych w cieczach estrowych i oleju mineralnym nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy olejem mineralnym a estrem naturalnym, co jest zgodne z wynikami dla niewielkich przerw elektrodowych układów ostrze- płyta czy ostrze- kula [2, 4-7, 12]. Niemniej ester syntetyczny odbiega nieco od pozostałych dwóch cieczy co jest pewną niespodzianką; 50% napięcie inicjacji w tej cieczy dielektrycznej jest niższe od pozostałych cieczy o około 10 kV. Takie różnice są oczywiście notowane, ale dotyczą raczej układów o polu nierównomiernym i większych przerw elektrodowych typu 50-80 mm [4, 5]. Patrząc jednak na wyniki z tabeli 5 pozytywna ocena estrów, a szczególnie estru naturalnego w kontekście napięcia inicjacji nie jest już tak jednoznaczna. Mimo porównywalnych napięć inicjacji pomiędzy estrem naturalnym a olejem mineralnym z analizy rozkładu pola elektrycznego widać, że inicjacji w estrze zachodzi przy niższej wartości natężenia pola elektrycznego niż ma to miejsce w oleju mineralnym, różnica wynosi ponad 20% a

wynika głównie ze znaczącej różnicy w przenikalnościach elektrycznych pomiędzy estrami a olejem mineralnym. Badania w rozpatrywanym układzie przyniosły również potwierdzenie faktu większej intensywności wyładowań rozwijających się w estrach. Patrząc na przytoczone reprezentatywne oscylogramy związane z inicjacją wyładowań w danych cieczach widać większą gęstość impulsów, gdy wyładowanie dotyczy estrów. Taka prawidłowość została wielokrotnie potwierdzona w badaniach dotyczących tzw. wolnej przerwy olejowej [4, 7, 12]. Oceniając otrzymane oscylogramy można również stwierdzić, że wyładowanie inicjowane w każdym przypadku ma, zgodnie z teorią wyładowań w cieczach, charakter wyładowania powolnego, co jest pozytywnym faktem z punktu widzenia porównawczej oceny rozpatrywanych cieczy [3-5, 7, 9, 12].

### Wnioski

Mimo starannego przygotowania eksperymentu i przeprowadzeniu go w sposób powtarzalny wyniki w pewnej części różnią się z oczekiwaniami bazującymi na dostępnej wiedzy i teorii związanej z analizowanym problemem. Dotyczy to szczególnie przypadku badanego estru syntetycznego. Niemniej, na podstawie badań można pokusić się o sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Eksperyment potwierdził wyjątkowo mocną statystyczną naturę zjawisk wyładowczych wynikających z narażenia układu modelowego napięciem udarowym piorunowym.
- 2) Dodatkowo potwierdzone zostały następujące zależności występujące pomiędzy estrami i olejem mineralnym:
  - Estrы naturalne zachowują się lepiej niż estrы syntetyczne w kontekście narażeń udarem napięciowym piorunowym, co jest zgodne z wynikami otrzymanymi w układzie o polu skrajnie nierównomiernym.
  - Natężenia pola elektrycznego inicjacji są najwyższe w przypadku oleju mineralnego.
  - Intensywność wyładowań związana z procesami jonizacyjnymi w cieczy jest większa w przypadku estrów.
- 3) Badania wyładowań elektrycznych w układach typu ciecz dielektryczna / preszpan, w tym układy z tzw. klinem olejowym, powinny być kontynuowane, szczególnie w odniesieniu do nowych cieczy izolacyjnych występujących na rynku cieczy transformatorowych.

Prace zaprezentowane w artykule są częścią badań prowadzonych w ramach doktoratu mgr inż. Bartłomieja Pasternaka realizowanego w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej.

**Autorzy:** mgr inż. Bartłomiej Pasternak, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 20, 90-537 Łódź, E-mail: [bartlomiej.pasternak@dokt.p.lodz.pl](mailto:bartlomiej.pasternak@dokt.p.lodz.pl); dr hab. inż. Paweł Różga, prof. uczelni, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 20, 90-537 Łódź, E-mail: [pawel.rozga@p.lodz.pl](mailto:pawel.rozga@p.lodz.pl)

### LITERATURA

- [1] Beroual A., Tobazeon R., Pre-breakdown phenomena in liquid dielectrics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21 (1986), No. 4, pp. 613-627
- [2] Dang V-H., Beroual A., Investigations on streamers phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2012), No. 5, pp. 6-13
- [3] Lesaint O., Prebreakdown phenomena in liquids: propagation modes and basic physical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49 (2016), No. 49, pp. 14401-14422.
- [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, pp. 1546-1560
- [5] CIGRE Technical Brochure 856, "Dielectric performance of insulating liquids for transformers", 2021.
- [6] Liu Q., Wang Z., Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18 (2011), No. 6, pp. 1908-1917
- [7] Rozga P., Streamer Propagation in Small Gaps of Synthetic Ester and Mineral Oil under Lightning Impulse, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22 (2015), No. 5, pp. 2754-2762
- [8] Wang, K., Wang, F., Shen, Z., Lou, Z., Han, Q., Li, J., Trnka, P., Rozga, P., Breakdown and streamer behavior in homogeneous synthetic trimethylolpropane triesters insulation oil, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27 (2020), No. 5, pp. 1501-1507.
- [9] Lu W., Liu Q., Wang Z., Pre-breakdown and breakdown mechanisms of an inhibited gas to liquid hydrocarbon transformer oil under negative lightning impulse voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24 (2017), No. 5, pp. 2809-2818.
- [10] Wolmarans C., Pahlavanpour B., Rozga P., Stuchala F., Impulse Breakdown Under Negative Polarity in a Bio-based Hydrocarbon and Other Insulating Liquids, CIGRE Romania Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (CMDM), Bucharest, Romania, 2021.
- [11] Rozga P., Stuchala F., Wolmarans C., Pahlavanpour B., Lightning Impulse Breakdown Characteristics of a Bio-Based Hydrocarbon and Other Insulating Liquids under Positive Polarity, 21<sup>st</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Seville, Spain, 2022.
- [12] Rozga P., Stanek M., Pasternak B., Characteristics of Negative Streamer Development in Ester Liquids and Mineral Oil in a Point-To-Sphere Electrode System with a Pressboard Barrier, *Energies*, 11 (2018), 1088
- [13] Florkowski M., Florkowska B., Kuniewski M., Zydrón P., Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25 (2018), pp. 2220 - 2228
- [14] Florkowski M., Florkowska B., Rozwój badań wyładowań niepełnych w kablach elektroenergetycznych wysokiego napięcia w ramach prób poprodukcyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), No. 4, s. 154-162