

doi:10.15199/48.2022.10.27

Napięcie przyspieszenia strimerów w wybranych cieczach dielektrycznych przy napięciu udarowym piorunowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania porównawcze elektroizolacyjnego oleju mineralnego typu Nytro 10XN i płynu izolacyjnego na bazie węglowodorów pochodzenia biologicznego typu Nytro BIO 300X. Porównano udarowe napięcie przebicia (w oparciu o normę PN-IEC 897) oraz parametr napięcia przyspieszenia badanych cieczy. Próby wykonano napięciem udarowym piorunowym normalnym (1,2/50 μ s) o biegunowości dodatniej i ujemnej, w układzie elektrod ostrze–kula.

Abstract. The article presents comparative tests of the naphthenic mineral oil type Nytro 10XN and the bio-based hydrocarbon such as Nytro BIO 300X. The lightning impulse breakdown voltage (based on the PN-IEC 897 standard) and the acceleration voltage of the tested liquids were compared. The tests were performed with standard lightning impulse voltage (1.2 / 50 μ s) of positive and negative polarity, in the point-to-sphere electrode system. (**Acceleration voltage of strimers in selected dielectric liquids at lightning impulse voltage**).

Słowa kluczowe: napięcie udarowe, napięcie przyspieszenia, olej mineralny, węglowódor pochodzenia biologicznego.

Keywords: lightning impulse, acceleration voltage, mineral oil, bio-based hydrocarbon.

Wstęp

Olejowe transformatory energetyczne są najczęściej stosowanym rozwiązaniem w światowym systemie energetycznym. Podstawowym medium izolacyjnym w tych urządzeniach jest olej mineralny. Stanowi on nie tylko składową układu izolacyjnego transformatora, ale także zapewnia jego chłodzenie. W związku z coraz większą świadomością ekologiczną i faktem, że wszelkie wycieki oleju mineralnego są bardzo groźne dla środowiska naturalnego, producenci transformatorów cały czas pracują nad alternatywnymi cieczami dielektrycznymi i wprowadzają na rynek nowe rozwiązania [1-3]. Jednym z nowych płynów w tym zakresie, który przedstawiono w niniejszym artykule, jest płyn izolacyjny na bazie węglowodorów pochodzenia biologicznego Nytro BIO 300X. Płyn ten porównano z powszechnie stosowanym w transformatorach energetycznych inhibitowanym olejem mineralnym typu naftenowego Nytro 10XN. Nytro BIO 300X jest wytwarzany przy użyciu głębokiej rafinacji połączonej z izomeryzacją. Większość surowca do jego produkcji stanowią pozostałości i produkty uboczne pochodzenia biologicznego głównie roślinnego. Rośliny uprawne i oleje roślinne również nadają się do wykorzystania jako materiał do jego produkcji [2, 4]. W tabeli 1 zestawiono niektóre właściwości fizykochemiczne obu badanych cieczy.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych cieczy

Parametr	Rodzaj cieczy	
	Naftenowy olej mineralny (Nytro 10XN)	Węglowódor pochodzenia biologicznego (Nytro Bio 300X)
Klasyfikacja chemiczna	Złożona mieszanina węglowodorów	Węglowodory (izo-alkany)
Gęstość w 20 °C [kg/dm ³]	0,87	0,78
Lepkość w 40 °C [mm ² /s]	9,1	3,7
Klasa temperatury zapłonu	O	O
Temperatura płynięcia [°C]	- 54	- 63
Biodegradowalność (OECD 301)	Nie spełniający wymagań biodegradowalności	Łatwo ulegające biodegradacji
Zawartość węgla organicznego [%]	0	99
Względna przenikalność w 90°C	2,2	1,99

W zawiązku z tym, że literatura mówi o różnym zachowaniu płynów estrowych przy napięciu udarowym [5-8], pojawia się wiele pytań od użytkowników końcowych o zachowaniu alternatywnych cieczy dielektrycznych przy tym rodzaju napięcia. Analizę porównawczą tych dwóch cieczy wykonano w oparciu o dwa parametry: udarowe napięcie przebicia (wyznaczone zgodnie z normą PN-IEC 897) i napięcie przyspieszenia.

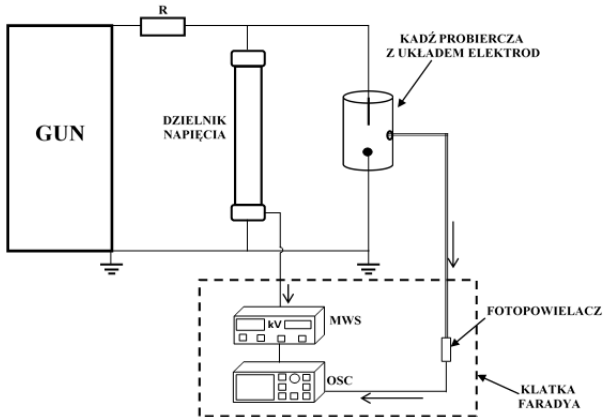
Napięcie przyspieszenia związane jest z metodologią klasyfikacji rozwoju wyładowań w cieczach, którą zapoczątkował Hebner [9]. Zakłada ona podział wyładowań na cztery rodzaje w zależności od ich szybkości propagacji. Wyładowania 1-ego rodzaju rozwijają się w formie „krzewiastej” z szybkością ok. 100 m/s, wyładowania 2-ego rodzaju są szybsze i charakteryzują się szybkością propagacji ok. 1 km/s przyjmując strukturę „drzewiastą”. Jeszcze szybsze są wyładowania 3-ego i 4-ego rodzaju, których prędkości propagacji są w granicach 10-100 km/s i przyjmują strukturę „nitkową”. Próby nazwania form przestrzennych wyładowań umożliwił rozwój ultraszybkiej fotografii pozwalającej na wykonanie zdjęć rozwijającego się tworzywa wyładowania. Wyładowania 1-ego rodzaju można zaobserwować, gdy źródłem wysokiego napięcia jest bardzo ostra elektroda ostrzowa, nie powodują przebicia, ale sam strimer wraz ze zwiększeniem przyłożonego napięcia może się rozwinąć do wyładowania 2-ego rzędu, które zazwyczaj powoduje przebicie. Wyładowanie 2-ego rzędu sporadycznie może emitować światło widzialne od jednej bądź kilku gałęzi kanału wyładowczego. Dalsze zwiększanie przyłożonego napięcia do wartości ok. dwukrotnie wyższej od napięcia przebicia prowadzi do rozwinięcia się wyładowań 3-ego i 4-ego rzędu. Oprócz znacznego przyspieszenia rozwoju wyładowania, wyładowania 3-ego rzędu nie różnią się w znaczący sposób pod względem emisji światła. Natomiast rozwój wyładowań 4-ego rzędu wiąże się z drastycznym zwiększeniem szybkości propagacji, a kanał wyładowczy przybiera formę jednego jasnego „nitkowego” włókna. Zmiana szybkości propagacji wyładowań oznacza zmianę sposobu rozwoju wyładowania, z jonizacji w fazie gazowej, na jonizację w fazie ciekłej. Prowadzi to do występowania bardziej energetycznego kanału wyładowczego, co z kolei przyczynia się do większego narażenia izolacji stałej układu izolacyjnego [10-16]. W tabeli 2, na podstawie danych literaturowych, zestawiono orientacyjne szybkości propagacji dla wyładowań opisywanych wyżej rodzajów.

Tabela 2. Podział faz rozwoju wyładowania ze względu na szybkość propagacji

Rodzaj wyładowania	1-ego rodzaju	2-ego rodzaju	3-ego rodzaju	4-ego rodzaju
Szybkość propagacji [km/s]	≈ 0,1	1 ÷ 5	10 ÷ 20	100

Układ pomiarowy

Badania wykonano w układzie schematycznie przedstawionym na rysunku 1.



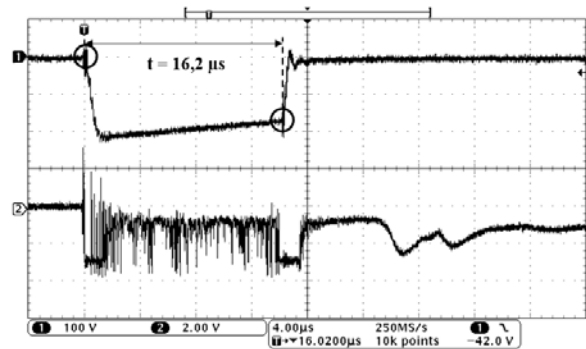
Rys. 1. Układ pomiarowy, gdzie: GUN – generator udarów napięciowych; R – rezystor ograniczający; MWS – miernik wartości szczytowej; OSC – oscyloskop

Źródłem napięcia udarowego piorunowego był 6-cio stopniowy generator udarów napięciowych Marxa. Wytwarzał on znormalizowane napięcie udarowe piorunowe 1,2/50 μ s. Miernik wartości szczytowej wraz z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia służył do pomiaru wartości szczytowej udaru napięciowego. Natomiast oscyloskop, wykorzystywany był do rejestracji przebiegów czasowych napięcia, a także przebiegów czasowych impulsów światła towarzyszących wyładowaniom. Światło emitowane w czasie wyładowań mierzono za pomocą fotopowielacza. Było to możliwe dzięki zastosowaniu na konstrukcję kadzi probierczej przezroczystego szkła organicznego. Do fotopowielacza o zakresie widmowym od 300 do 850 nm dołączony był światłowód. Miernik wartości szczytowej, oscyloskop oraz fotopowielacz z osprzętem były zamknięte w klatce Faradaya. Pomiaru wykonywano w kadzi probierczej z układem elektrod ostrze-kula. Elektroda ostrzowa wysokiego napięcia wykonana była z wolframu a jej promień krzywizny wynosił 50 μ m, natomiast średnica elektrody kulowej to 13 mm. Badania zostały przeprowadzone dla dwóch odstępów elektrod: 25 i 40 mm.

Metodyka badań

Pomiar udarowego napięcia przebiecia został przeprowadzony metodą schodkową, która sugerowana jest w normie [17] i jest typowo wykorzystywaną w pomiarach tego typu [1, 2, 5, 13-15]. Znormalizowany udar napięciowy piorunowy 1,2/50 μ s doprowadzono do układu elektrod zwiększając w każdym kroku napięcie o ΔU równe 5 kV. Wartość napięcia początkowego wyznaczano eksperymentalnie. Pomiedzy kolejno przykładanymi udarami napięciowymi zachowywano 1 minutową przerwę, podczas gdy po przebieciu olej mieszano, a następnie odczekiwano 30 minut zanim przystąpiono do kolejnej próby. Na serię składało się 10 pomiarów. By pomiar można było uznać za prawidłowy, przed wystąpieniem przebiecia, próbka powinna wytrzymać przynajmniej trzy poziomy napięcia.

Do wyznaczenia napięcia przyspieszenia również posłużono się udarem napięciowym normalnym. Napięcie początkowe wyładowań stanowiło wcześniej wyznaczone napięcie przebiecia. Następnie zwiększano napięcie z krokiem ΔU równym 5 kV, aż do osiągnięcia znacznego skrócenia czasu trwania wyładowań. Tak jak w poprzednich badaniach zachowano 1 minutową przerwę pomiędzy kolejnymi udarami. Wykonano dwie serie pomiarowe dla każdej z badanych cieczy. Przed rozpoczęciem drugiej serii odczekano 30 minut. Na rysunku 2 przedstawiono w jaki sposób wyznaczano czas trwania wyładowania.



Rys. 2. Przykładowy oscylogram zarejestrowany podczas wyznaczania napięcia przebiecia (210 kV) dla cieczy Nytro 10 XN, odstęp między elektrodami 25 mm, polaryzacja ujemna, 1 – przebieg napięcia udarowego, 2 – przebieg światła

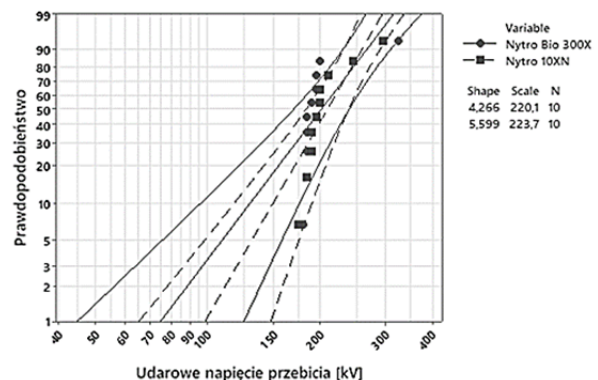
Następnie po wyznaczeniu czasu trwania wyładowania obliczano szybkość propagacji dzieląc odstęp między elektrodami przez czas trwania wyładowania.

Wyżej opisane badania wykonano dla biegunowości dodatniej i ujemnej. Po każdej serii pomiarowej elektrodę ostrzową wymieniano na nową. Przed przystąpieniem do testów właściwych dla badanych cieczy zostały określone napięcia przebiecia przy częstotliwości sieciowej, zgodnie z normą [18]. Ich parametry okazały się wystarczające, ponieważ przekroczyły wartość 70 kV.

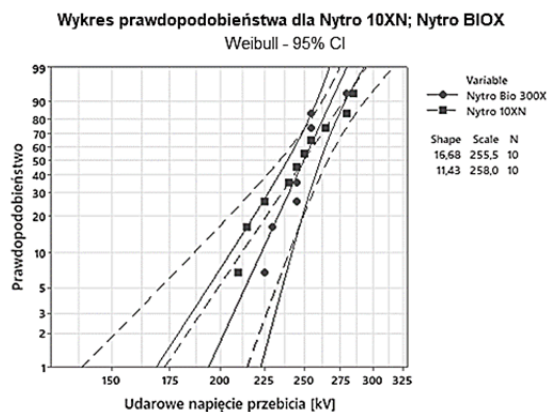
Wyniki pomiarów

Zgodnie z normą [17] wartość udarowego napięcia przebiecia jest wyznaczana jako średnia arytmetyczna z wszystkich pomiarów. Otrzymane wyniki zostały poddane jednak dodatkowo obróbce statycznej z wykorzystaniem dwuparametrycznego rozkładu Weibulla. Wykresy prawdopodobieństwa tego rozkładu przedstawiono na rysunkach 3-6, a wyniki dodatkowo zestawiono w tabeli 3.

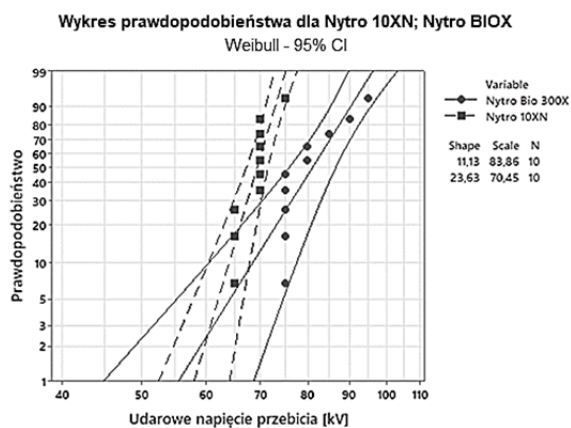
Wykres prawdopodobieństwa dla Nytro 10XN; Nytro BIOX Weibull - 95% CI



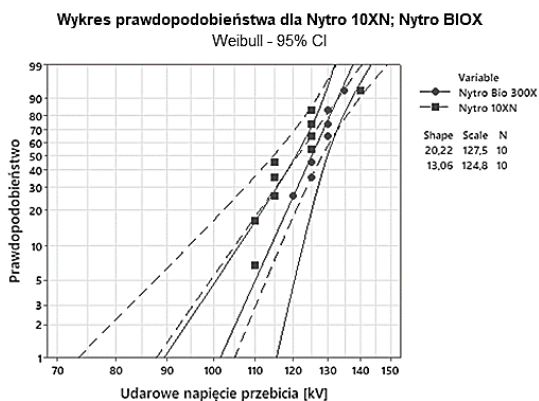
Rys. 3. Wykresy rozkładu Weibulla udarowego napięcia przebiecia dla odstępów 25 mm (biegunowość ujemna)



Rys. 4. Wykresy rozkładu Weibulla uderowego napięcia przebicia dla odstępów 40 mm (biegunowość ujemna)



Rys. 5. Wykresy rozkładu Weibulla uderowego napięcia przebicia dla odstępów 25 mm (biegunowość dodatnia)

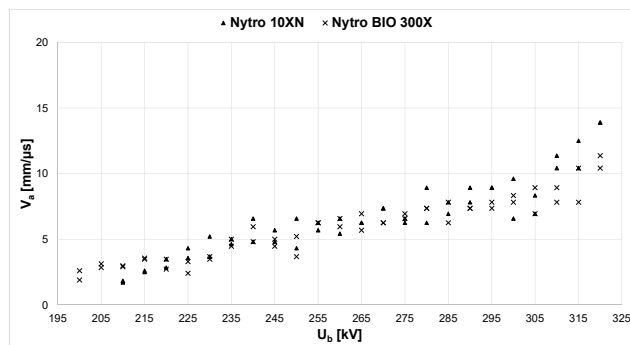


Rys. 6. Wykresy rozkładu Weibulla uderowego napięcia przebicia dla odstępów 40 mm (biegunowość dodatnia)

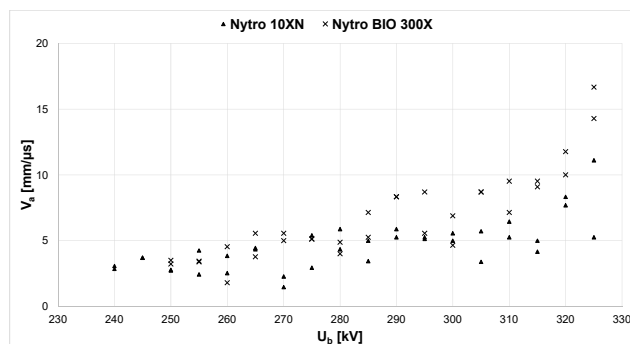
Tabela 3. Zestawienie wyników dla napięć przebicia

Prawdopodobieństwo przebicia	Udarowe napięcie przebicia (b. ujemna) [kV]		Udarowe napięcie przebicia (b. dodatnia) [kV]	
	Nytro 10XN	Nytro BIO 300X	Nytro 10XN	Nytro BIO 300X
25 mm				
$U_{b5\%}$	131,6	109,7	62,1	64,2
$U_{b50\%}$	209,5	202	69,4	81,1
U_b	208,5	202,5	69	80,5
40 mm				
$U_{b5\%}$	198,9	213,8	99,4	110,1
$U_{b50\%}$	249,9	249,9	121,3	125,2
U_b	247	248,5	120,5	124

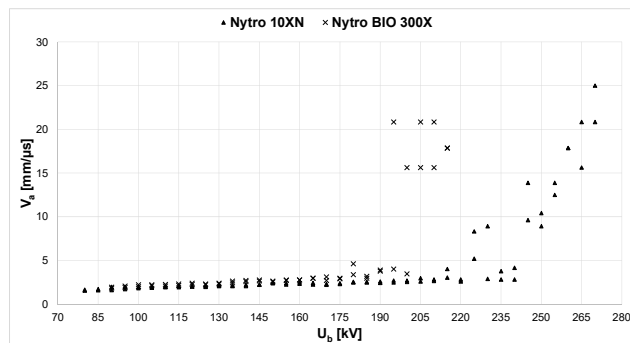
Wyniki drugiej części pracy związane z wyznaczeniem napięć przyspieszenia dla badanych cieczy pokazano na



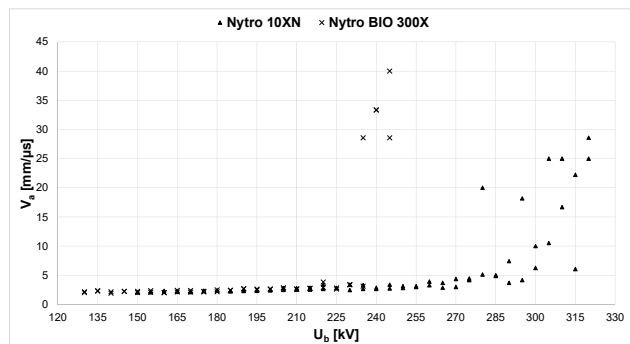
Rys. 7. Zależność szybkości propagacji strimera w badanych cieczech od uderowego napięcia przebicia – odstęp między elektrodami 25 mm, biegunowość ujemna



Rys. 8. Zależność szybkości propagacji strimera w badanych cieczech od uderowego napięcia przebicia – odstęp między elektrodami 40 mm, biegunowość ujemna



Rys. 9. Zależność szybkości propagacji strimera w badanych cieczech od uderowego napięcia przebicia – odstęp między elektrodami 25 mm, biegunowość dodatnia



Rys. 10. Zależność szybkości propagacji strimera w badanych cieczech od uderowego napięcia przebicia – odstęp między elektrodami 40 mm, biegunowość dodatnia

Tabela 4. Zestawienie napięć przyspieszenia dla badanych cieczy

Napięcie przyspieszenia [kV]			
Biegunowość ujemna		Biegunowość dodatnia	
Nytro 10XN	Nytro BIO 300X	Nytro 10XN	Nytro BIO 300X
25 mm			
310	315	245	195
40 mm			
325	320	280	235

Podsumowanie i wnioski

Porównując wyniki uzyskane dla udarowych napięć przebiecia można zauważyć, że rezultaty są zbliżone. Dla biegunowości ujemnej trochę wyższe parametry uzyskał Nytro 10X, natomiast dla biegunowości dodatniej Nytro BIO 300X.

Natomiast zestawiając ze sobą wyniki dla napięć przyspieszenia można łatwo zauważyć, że dla biegunowości dodatniej Nytro 10X uzyskuje znacznie wyższą wartość tego napięcia. Różnica wynosi ok. 40 kV dla obu badanych odstępów elektrod. Jest to spowodowane obecnością w składzie chemicznym oleju Nytro 10XN węglowodorów aromatycznych (których z kolei nie zawiera Nytro BIO 300X). Ten właśnie rodzaj węglowodorów, posiadający wysoki współczynnik jonizacji, wpływa pozytywnie na rozwój szybkich strimerów w polach nierównomiernych, ograniczając rozwój wyładowań szybkich [2, 12, 13]. Należy zaznaczyć dodatkowo, że wyładowania biegunowości dodatniej osiągają wyższe prędkości od wyładowań ujemnych. Związane jest to z kształtem strimerów. Stwierdzono, że wyładowania, których kanał wyładowczy przyjmuje „nitkowaty” kształt osiągają wyższe prędkości od tych o kształcie „drzewiastym” / „krzewiastym”, a kształt „nitkowaty” częściej osiągają wyładowania o biegunowości dodatniej [13]. Z kolei wyniki dla biegunowości ujemnej nie są już tak jednoznaczne. Jest to związane z charakterem tego rodzaju wyładowań, ponieważ w tym przypadku prędkość propagacji rośnie relatywnie liniowo [12, 13, 16].

W wyładowaniach „szybkich”, 3-ego i 4-ego rodzaju występuje bardziej energetyczny kanał wyładowczy, dlatego powodują one większe narażenia dla izolacji stałej układu izolacyjnego. Wyższe wartości napięć przyspieszenia są dużo bardziej korzystne, ponieważ dany płyn izolacyjny wykazuje większą odporność na rozwój wyładowań „szybkich”.

Zaproponowane badania wykorzystujące znormalizowane napięcie udarowe piorunowe, pozwalają w interesujący sposób porównać różne rodzaje cieczy dielektrycznych. Warto zaznaczyć, że w powszechnie wykonywanych próbach transformatorów energetycznych wykorzystuje się napięcie o biegunowości ujemnej. Wyniki zawarte w niniejszej pracy pokazują, że warto je rozszerzyć o próby przy biegunowości dodatniej. Porównanie prędkości propagacji strimera za pomocą opisanej metodologii może pomóc w dokonaniu klasyfikacji dostępnych cieczy dielektrycznych i ułatwić planowanie rzeczywistych testów izolacji.

Autor: mgr inż. Filip Stuchala, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 20, 90-537 Łódź, E-mail: filip.stuchala@p.lodz.pl;

LITERATURA

- [1] Rozga P., Stuchala F., Piotrowski T., Beroual A., Influence of Temperature on Lightning Performance of Mineral Oil, *Energies*, Vol. 15 (2022), 1063
- [2] Wolmarans C., Pahlavanpour B., Rozga P., Stuchala F., Impulse Breakdown Under Negative Polarity in a bio-based hydrocarbon and other Insulating liquids, *International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance CMDM 2021*, 9-11.09.2021, Bukareszt, Rumunia
- [3] Różga P., Szewczyk R., Ocena porównawcza efektywności impregnacji preszpanu izolacyjnego wybranymi estrami dielektrycznymi i olejem mineralnym z wykorzystaniem efektu podciągania kapilarnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10 (2018), s. 69-72
- [4] <https://www.nynas.com/>
- [5] 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*, Vol. 25, No. 5 (2018), pp. 1699-1705
- [6] Rozga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M., Strzelecki K., A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications, *Energies*, Vol. 13 (2020), 6429
- [7] Klarecki A., Rozga P., Stuchala F., Comparison of the methods applied for measuring the lightning impulse breakdown voltage of insulating pressboard impregnated with mineral oil and natural ester, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 28, no. 4 (2021), pp. 693-709
- [8] Rozga P., Using the light emission measurement in assessment of electrical discharge development in different liquid dielectrics under lightning impulse voltage, *Electric Power Systems Research*, Vol. 140 (2016), pp. 321-328
- [9] Hebner R. E., The Liquid State and its Electrical Properties, *NATO ASI Series*, vol B193 (1988), New York, Plenum
- [10] Madshaven I., Astrand P. O., Hestad O. L., Ingebrigtsen S., Unge M., Hjortstam O., Simulation model for the propagation of second mode streamers in dielectric liquids using the Townsend-Meek criterion, *Journal of Physics Communication*, Vol. 2, No. 10. (2018), 105007
- [11] Lesaint O., Jung M., On the relationship between streamer branching and propagation in liquids: influence of pyrene in cyclohexane, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 33 (2000), 1360
- [12] Lesaint O., Prebreakdown phenomena in liquids: propagation 'modes' and basic physical properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 49, (2016), 144001
- [13] Mohan Rao U., Fofana I., Beroual A., Różga 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*, Vol. 27, No. 5 (2020), pp. 1546-1560
- [14] 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*, Vol. 64, No. 1 (2016), pp. 171-179
- [15] Rozga P., Stuchala F., Hantsz D., Wang F., Shen Z., Li J., Behavior of positive streamers in ester liquids and mineral oil in the insulating system with pressboard barrier, *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Electrical materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 11-15.04.2021, Chongqing, China
- [16] Liu R., Törnkvist C., Chandramouli V., Giralda O., Pettersson L. A. A., Ester Fluids as Alternative for Mineral Oil: The Difference in Streamer Velocity and LI Breakdown Voltage, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, USA, 18-21.10.2009
- [17] PN-IEC 897:1998, Metody wyznaczania udarowego napięcia przebiecia cieczy izolacyjnych
- [18] PN-EN 60156:2008, Ciecze elektroizolacyjne -- Określanie napięcia przebiecia przy częstotliwości sieciowej -- Metoda badania