

doi:10.15199/48.2018.10.10

Rozwój wyładowań elektrycznych w estrach biodegradowalnych przy napięciu udarowym w układzie z przegrodą izolacyjną

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących rozwoju wyładowań elektrycznych w estrach biodegradowalnych, w układzie elektrod ostrze kula z przegrodą izolacyjną. Badaniom poddano pięć cieczy izolacyjnych: dwa estry syntetyczne, ester naturalny, ester mieszany o obniżonej lepkości i olej mineralny, jako ciecz odniesienia. Wyniki zawierają porównanie przebiegów światła rejestrowanych za pomocą fotopowielacza i pomiarów wartości progowej napięcia, do rozpoczęcia rozwoju streamera poniżej bariery izolacyjnej.

Abstract. Article presents the results of experimental studies of streamer propagation in biodegradable dielectric esters liquids in a point-to-sphere electrode system with insulating barrier placed between them. The studies based on five insulating liquids: two synthetic esters, natural ester, low viscosity blended ester and mineral oil as a reference liquid. The measurements results consider comparison of light waveforms registered using photomultiplier technique, as well as the threshold value of voltage for streamer inception below the insulating barrier used. **(Development of electrical discharges in biodegradable esters liquids under lightning impulse voltage in system with insulating barrier)**

Słowa kluczowe: propagacja strimerów, estry biodegradowalne, udarowe napięcie przebicia, przegroda izolacyjna.

Keywords: streamer propagation, biodegradable ester liquids, lightning impulse breakdown voltage, insulating barrier.

Wstęp

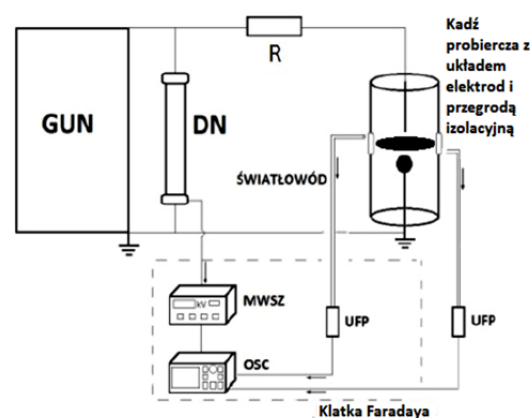
Biodegradowalne płyny izolacyjne oparte na estrach są nadal rozwijane, a ich różnorodność, z racji poszerzania o nowe produkty, z roku na rok staje się coraz większa. Ekologiczne ciecze elektroizolacyjne stanowią interesującą alternatywę dla olejów mineralnych na rynku transformatorów. Zarówno w przypadku estrów naturalnych, jak i syntetycznych przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych dających wiedzę o różnych właściwościach estrów. Nie ulega wątpliwości, że estry syntetyczne i naturalne charakteryzują się bardzo pożądanymi właściwościami pod kątem ochrony środowiska, takimi jak biodegradowalność i wysoka temperatura zapłonu. Predystynuje to estry do wykorzystania w miejscach szczególnie wrażliwych, gdy urządzenie energetyczne takie jak transformator, pracuje na obszarze parku narodowego, w pobliżu ujęcia wody pitnej, bądź w miejscu, gdzie zagrożenie pożarem jest znaczne. Jednocześnie charakteryzują się one dobrymi właściwościami dielektrycznymi, wśród których szczególną uwagę zwraca się na większą przenikalność elektryczną estrów niż oleju mineralnego, co stanowi zaletę, gdyż poprawia rozkład natężenia pola elektrycznego w systemach izolacji papierowo-olejowych używanych w transformatorach energetycznych. Płyny izolacyjne oparte na estrach posiadają również zbliżoną do oleju mineralnego wytrzymałość na przebicie przy napięciu przemiennym. Szczególnie pozytywnym aspektem z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej estrów jest mniejsza ich wrażliwość na zawartość wody (ppm wagowo) w stosunku do oleju mineralnego. Wysoka rozpuszczalność wody w estrach przyczynić się może do przedłużenia żywotności izolacji, a tym samym całego urządzenia [1-4].

Jednym z istotnych parametrów uwzględnianych w ocenie właściwości izolacyjnych cieczy dielektrycznych jest udarowe napięcie przebicia. Parametr ten opisuje zachowanie danego płynnego dielektryka przy oddziaływaniu udarów napięciowych. Jest on uwzględniany przy ocenie możliwości stosowania danych płynów izolacyjnych w transformatorach energetycznych. Do wyznaczenia wartości udarowego napięcia przebicia stosuje się normę PN-IEC 897 [5], która definiuje procedurę pomiarową oraz układ elektrod, jaki powinien być zastosowany podczas pomiarów. Wyniki uzyskane w badaniach opartych o wyżej wymienioną normę, ograniczają się jednak tylko do wartości napięcia przebicia,

nie pozwalając na ocenę zjawisk zachodzących w fazie poprzedzającej przebicie. Tę fazę rozwoju wyładowania można ocenić z użyciem odpowiednio dobranych technik eksperymentalnych, wśród których powszechne uznanie uzyskała technika optyczna wykorzystująca fotopowielacz jako detektor światła [6-12]. Intensywność światła emitowanego podczas procesów zachodzących w fazie przedprzebiecовой jest ściśle związana z intensywnością procesów jonizacyjnych i tworzeniem się kanału wyładowczego. Możliwość obserwacji i rejestracji tego zjawiska jest niezwykle istotna z punktu widzenia oceny energii wyładowania. Rozwijające się wyładowanie, generuje impulsy światła, które można zarejestrować przy użyciu wspomnianego fotopowielacza i zarejestrować żądany przebieg. Wyższa częstotliwość zarejestrowanych impulsów świetlnych, wskazuje jednoznacznie na częstsze wydłużanie się kanałów wyładowczych. Wyższe wartości szczytowe impulsów świetlnych odzwierciedlają wyższą energię samego wyładowania.

Procedura pomiarowa

Układ pomiarowy użyty podczas badań eksperymentalnych zaprezentowany został schematycznie na rysunku 1.

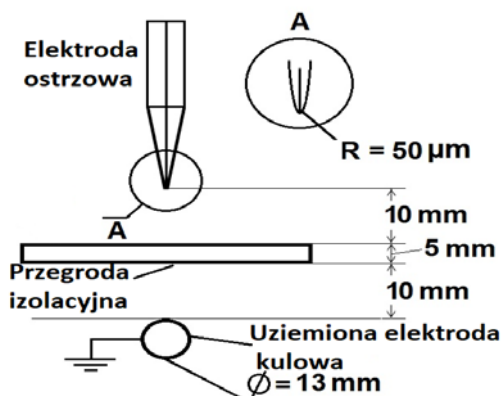


Rys.1. Układ pomiarowy. GUN - generator udarów napięciowych, DN - dzielnik napięcia, R - rezystor ograniczający, MWSZ - miernik wartości szczytowej, OSC - oscyloskop, UFP - układ fotopowielacza

Jest on modyfikacją podstawowego układu probierczego do wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy izolacyjnych [5, 11, 12].

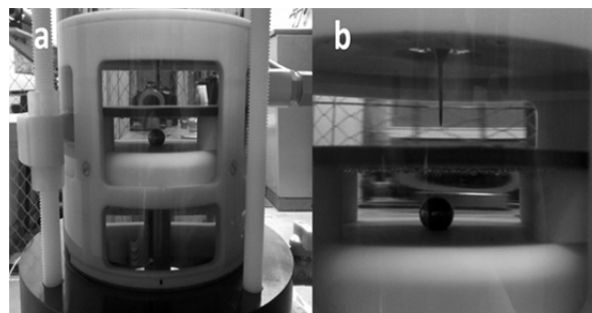
Jako źródło napięcia probierczego użyty został generator udarów napięciowych w układzie Marxa, wytwarzający znormalizowany udar napięciowy piorunowy 1,2/50 μ s. Wartość szczytowa udaru napięciowego była mierzona za pomocą miernika wartości szczytowej współpracującego z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia. Przebieg czasowy udaru napięciowego rejestrowany był także za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Każdą pomiarową została wykonana z transparentnego materiału i wyposażona w odpowiednią konstrukcję pozwalającą na montaż układu optycznego. Umożliwiało to użycie metody fotopowielacza, za pomocą, którego dokonywano rejestracji światła emitowanego przez wyładowanie. Użyto dwóch kabli światłowodowych, których końcówki umieszczono bezpośrednio przy ścianie kadzi pomiarowej. Pierwsza z dwóch końcówek światłowodu obserwowała przestrzeń pomiędzy elektrodą ostrzową, a przegrodą izolacyjną. Zadaniem drugiej końcówki była obserwacja przestrzeni pod przegrodą izolacyjną. W czasie wyładowania powstawały impulsy światła, które padały na znajdujące się w oknie specjalnie zbudowanej kadzi pomiarowej końcówki kabli światłowodowych. Składały się one z 37 pojedynczych włókien, a ich łączna powierzchnia miała średnicę 5 mm. Wychwycone światło dociera dalej torem światłowodowym do komory Faradaya, w której znajdowały się fotopowielacze. Ich zadaniem była detekcja światła, a sygnał wyjściowy otrzymany z urządzenia poddawany był wzmocnieniu i przedstawiony na ekranie oscyloskopu z jednoczesną możliwością zapisana na nośniku danych. Uzyskiwano w ten sposób przebiegi czasowe odpowiadające impulsom światła. Zastosowany fotopowielacz pozwala na rejestrację impulsu o czasie narastania 1,5 ns, jego wzmocnienie wynosi 5×10^5 , natomiast wartość prądu ciemnego wynosi 3 nA.

Badania zostały wykonane w kadzi probierczej, w której umieszczono układ elektrod ostrze – kula. Kadź i układ elektrod zostały wykonane w oparciu o zalecenia normy PN-IEC 897, definiującej metody wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy izolacyjnych. Pomiedzy elektrodami umieszczona została przegroda izolacyjna. Schemat układu elektrod przedstawiony został na rysunku 2. Wykonana z wolframu elektroda ostrzowa, posiadała końcówkę o promieniu krzywizny wynoszącym 50 μ m. Odległość między elektrodami wynosiła 25 mm. Pomiedzy elektrodami umieszczona została przespanowa przegroda izolacyjna o grubości 5 mm, oddalona od obu elektrod o jednakową odległość 10 mm, którą wypełniała badana ciecz elektroizolacyjna. Średnica przegrody wynosiła 15 cm.



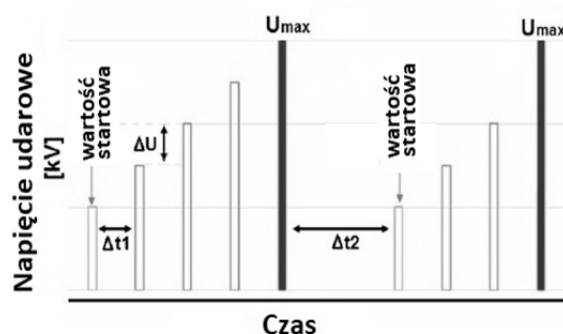
Rys.2. Schemat układu elektrod z przegrodą izolacyjną

Rzeczywisty wygląd kadzi probierczej i układ elektrod przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Kadź probiercza (a), układ elektrod ostrze – kula, z przegrodą izolacyjną umieszczoną między elektrodami (b)

Metoda badań, jaką wykorzystano to metoda napięcia stopniowanego. Ilustrację procedury badania cieczy elektroizolacyjnych przedstawiono graficznie na rysunku 4.



Rys.4. Graficzne przedstawienie metody pomiaru: ΔT_1 - czas pomiędzy kolejnymi udarami w danej próbie, ΔT_2 - czas do rozpoczęcia kolejnej procedury pomiarowej, ΔU - przyjęty stopień napięciowy, U_{max} - ustalone napięcie maksymalne próby

Jej zasada polega na przykładaniu znormalizowanego napięcia udarowego 1,2/50, o coraz większej wartości szczytowej. Przyjęty zgodnie z wytycznymi normy stopień napięciowy (ΔU) wynosił 5 kV. Przykładano jeden udar przy wybranym napięciu początkowym, a następnie zwiększano jego wartość z założonym skokiem. We wcześniejszych badaniach wyznaczono wartość udarowego napięcia przebicia oscylującą dla poszczególnych cieczy wokół wartości 125 kV [11, 12]. Stąd wartość startową napięcia przyjęto na niższym poziomie równym -100 kV. Między udarami zachowywano jednonominutową przerwę (ΔT_1). Maksymalna wartość udaru napięciowego wynosiła -180 kV. Pomiaru zostały wykonane dla polaryzacji ujemnej udaru. Po wykonaniu pomiaru, dla wartości maksymalnej udaru napięciowego mieszano ciecz, po czym czekali 5 minut (ΔT_2), aby rozpocząć kolejną próbę. Dla każdej badanej cieczy elektroizolacyjnej opisaną procedurę wykonywano pięciokrotnie.

Badaniom poddano pięć cieczy elektroizolacyjnych: dwa estry syntetyczne Midel@7131 i Envirotemp™200™, ester naturalny Envirotemp™FR3™, ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex@970FLD oraz naftenowy olej mineralny Shell Diala Oil B użyty, jako ciecz referencyjna. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie wybranych właściwości badanych cieczy elektroizolacyjnych.

Na szczególną uwagę zasługuje ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex@970FLD, który jest stosunkowo nowym produktem na rynku światowym i zupełną nowością, jeśli chodzi o wykorzystanie w Polsce. Stanowi on pewien kompromis pomiędzy pożądaną jak największą

biodegradowalnością, jaką charakteryzują się estry naturalnego pochodzenia, a możliwie niską lepkością zbliżoną do oleju mineralnego. Obie te cechy zostały uzyskane, jednak, jak można odczytać z tabeli, zrealizowano to kosztem niższej w stosunku do „standardowych” estrów naturalnych temperatury zapłonu, która dla Nomex-u jest jedynie nieznacznie wyższa niż dla oleju mineralnego Shell Diala.

Tabela 1. Zestawienie wybranych właściwości badanych cieczy elektroizolacyjnych

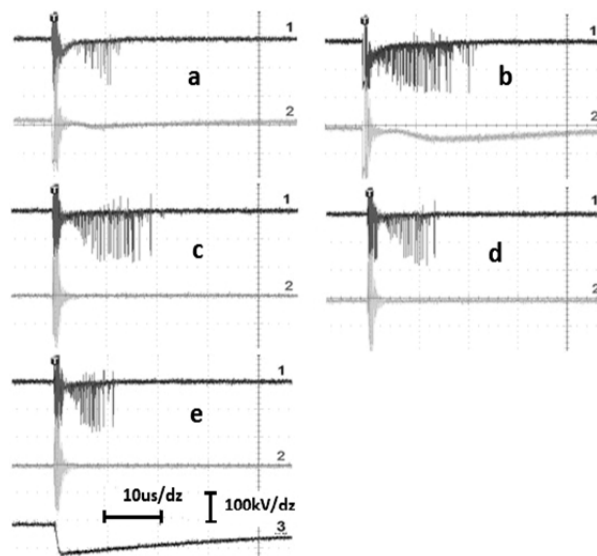
Parametr	Jednostka	Badana ciecz elektroizolacyjna				
		Shell Diala Oil B	Midel® 7131	Envirotemp™ 200™	Envirotemp™ FR3™	Nomex® 970 FLD
Gęstość w temp 20 °C	kg / dm ³	0,88	0,98	0,97	0,92	0,89
Ciepło właściwe w temp 20 °C	J / kg K	1848	1880	-	1848	1950
Przewodność cieplna w temp 20 °C	W/mK	0,126	0,144	-	0,177	0,147
Lepkość kinetyczna w temp 100 °C	mm ² / s	2,6	5,25	5,6	8	4,6
Temperatura krzepnięcia	°C	-50	-60	-54	-21	-28
Temperatura zapłonu	°C	170	316	310	316	270
Temperatura palenia	°C	150	260	265	260	190
Biodegradowalność	%	10	89	89	97	75
Napięcie przebicia AC	kV	> 75	> 75	78	> 75	75
Tg δ dla 90 °C	-	0,003	0,008	<0,02	< 0,005	0,04
Przenikalność elektryczna w temp. 20 °C	-	2,2	3,2	3,2	3,1	2,82

Wyniki pomiarów

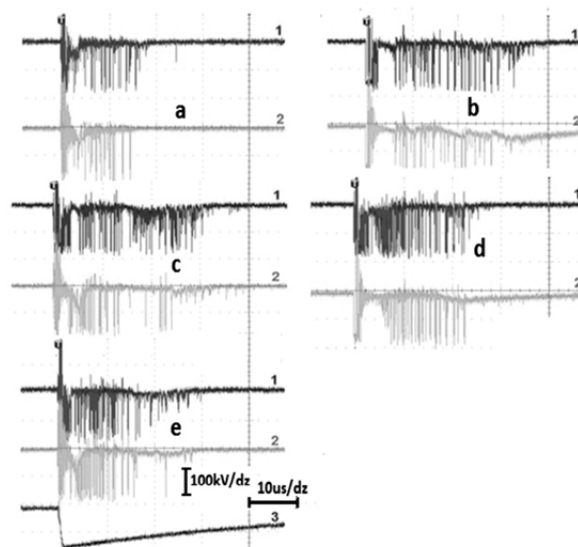
Głównym obszarem badań, była obserwacja rozwoju wyładowania na podstawie rejestracji emisji światła za pomocą techniki fotopowielaczowej. Wraz z podawaniem udaru napięciowego, dokonywano rejestracji światła od procesów zachodzących między ostrzową elektrodą wysokiego napięcia i barierą izolacyjną, oraz między barierą izolacyjną a uziemioną kulą. Na rysunku 5 przedstawiono reprezentatywne zestawienie oscylogramów rejestrowanych dla przypadku pojawienia się wyładowań tylko nad przegrodą izolacyjną, dla udaru piorunowego o wartości -120 kV. Na rysunku 6 przedstawiono natomiast przykład oscylogramów rejestrowanych dla przypadku pojawienia się wyładowań po obu stronach przegrody izolacyjnej dla udaru piorunowego o wartości -150 kV.

Dla niższych napięć probierczych, bliskich napięciu o wartości startowej, mimo rozwoju wyładowań nad przegrodą izolacyjną, pod nią nie obserwowano żadnych

zjawisk wyładowczych. Dopiero wraz ze wzrostem napięcia pojawiły się impulsy wyładowcze pod przegrodą. Zjawisko pojawiania się wyładowań po dolnej stronie przegrody izolacyjnej miało miejsce dla wszystkich badanych cieczy.



Rys.5. Przykład oscylogramów rejestrowanych dla przypadku pojawienia się wyładowań tylko nad przegrodą izolacyjną przy napięciu V = -120 kV, a) olej mineralny Shell Diala Oil B, b) ester syntetyczny Midel® 7131, c) ester syntetyczny Envirotemp™ 200™, d) ester naturalny Envirotemp™ FR3, e) ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970FLD; 1 - przebieg światła (j.w.) UFP 1, 2 - przebieg światła (j.w.) UFP 2, 3 - przebieg napięcia udarowego (100 kV/dz), t = 10 μs/działkę



Rys.6. Przykład oscylogramów rejestrowanych dla przypadku pojawienia się wyładowań po obu stronach przegrody izolacyjnej przy napięciu V = -150 kV, a) olej mineralny Shell Diala Oil B, b) ester syntetyczny Midel® 7131, c) ester syntetyczny Envirotemp™ 200™, d) ester naturalny Envirotemp™ FR3, e) ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970FLD; 1 - przebieg światła (j.w.) UFP 1, 2 - przebieg światła (j.w.) UFP 2, 3 - przebieg napięcia udarowego (100 kV/dz), t = 10 μs/działkę

Należy to powiązać, z warunkami, jakie pojawiły się w tej przestrzeni, po przekroczeniu określonej wartości napięcia probierczego. W przestrzeni pomiędzy płytą izolacyjną a uziemioną elektrodą pojawiło się pole elektryczne o dostatecznym natężeniu dla inicjacji

strimerów. Przy niższym napięciu pole w części układu izolacyjnego poniżej płyty preszpanowej nie jest wysokie, co wynika głównie z odległości od elektrody WN, wokół której natężenie jest największe. Rozwijające się wyładowanie powoduje pojawienie się ładunku przestrzennego, który wpływa na geometryczny rozkład pola pod przegrodą, odkształcając je na tyle, aby osiągnęło ono wartość dostateczną do inicjacji strimerów.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów średniej wartości progowej napięcia, przy której zaobserwowano rozwój wyładowań poniżej przegrody izolacyjnej, wraz z odchyleniem standardowym, na podstawie przeprowadzonych pięciu serii pomiarowych. Wyniki zestawiono z wartościami udarowego napięcia przebicia, które zostały uzyskane we wcześniej przeprowadzonych badaniach dla układu ostrze-kula, o takiej samej odległości między elektrodami równej 25 mm, ale bez przegrody izolacyjnej [11, 12].

Tabela 2. Wyniki pomiarów pięciu cieczy elektroizolacyjnych dla polaryzacji ujemnej

Rodzaj cieczy	Udarowe napięcie przebicia		Napięcie inicjacji	
	[kV]		[kV]	
	układ ostrze – kula		układ ostrze – kula	
	bez przegrody izolacyjnej		z przegrodą izolacyjną	
	Średnia	Odchylenie standardowe	Średnia	Odchylenie standardowe
olej mineralny Shell Diala oil B	127,5	6,98	130	9,49
ester syntetyczny Midel® 7131	123	5,23	135,8	5,84
ester syntetyczny Envirotemp™ 200™	120	5,19	140,8	9,17
ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970FLD	120,8	5,91	127,5	8,21
ester naturalny Envirotemp™ FR3™	123,3	4,94	132,5	10,37

Dyskusja i wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że niezależnie od rodzaju badanej cieczy bariera izolacyjna poprawia wytrzymałość elektryczną badanego układu elektrod. Dla żadnej z badanych cieczy elektroizolacyjnych nie doszło do przebicia nawet przy maksymalnym przykładanym napięciu udarowym równym 180 kV. Stanowi to wartość o prawie 50% wyższą niż wartości napięć przebicia, uzyskane we wcześniej przeprowadzonych badaniach dla układu ostrze-kula, o takiej samej odległości między elektrodami równej 25 mm, ale bez przegrody izolacyjnej. Daje to podstawy sądzić, że

w rzeczywistych systemach izolacyjnych transformatorów energetycznych, gdzie szczelina olejowa jest dzielona na części przy użyciu barier wykonanych z preszpanu, stosowanie cieczy estrowych nie musi generować problemów przy narażeniu układu izolacyjnego napięciem udarowym piorunowym. Zastosowany układ dwóch fotopowielaczy pozwolił ocenić i porównać rozwój wyładowań jednocześnie po obu stronach przegrody izolacyjnej. Ocenic można, że charakter wyładowań i zależności dla poszczególnych badanych cieczy są podobne jak w przypadku systemu bez bariery izolacyjnej. Wyładowania dla wszystkich testowanych poziomów napięć można sklasyfikować jako wolne wyładowania 2-ego rzędu. Porównując te same poziomy napięcia, należy stwierdzić, że intensywność procesów wyładowczych, była zawsze wyższa, dla wyładowań rozwijających się w cieczach estrowych.

Autor: mgr inż. Marcin Tomasz Stanek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: marcin.tomasz.stanek@gmail.com;

LITERATURA

- [1] Oommen T.V., Clairborne C.C., Mullen J.T., Biodegradable electrical insulation fluids, *Proced. of Electr. Insul. Conf.*, (1997) 465-468
- [2] Perrier C., Beroual A., Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 25 (2009), n.6, 6-13
- [3] Cigre brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, 2011
- [4] Lashbrook, M., Kuhn, M., The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs, Cigre Session (2012), Paper A2-210
- [5] PN-IEC 897 - Metody wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy izolacyjnych
- [6] Duy C.T., Lesaint O., Denat A., Bonifaci N., Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 16 (2009), n.6, 1582-1594
- [7] Liu Q., Wang Z.D., Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18 (2011), n.1, 285-294
- [8] Rozga P., Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22 (2015), nr.5, 2754-2762
- [9] Rozga P., Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, 64 (2016), n.1, 171-179
- [10] Rozga P., Stanek M., Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps on natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, *IET Sci., Measur. Technol.*, 10 (2016), n.1, 50-57
- [11] Rozga P., Stanek M.: Comparative analysis of lightning breakdown voltage of natural ester liquids of different viscosities supported by light emission measurement, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 24 (2017), n.2, 991-999
- [12] Stanek M., Rozga P., Rapp K., Comparison of lightning characteristics of selected insulating synthetic esters with mineral oil, *IEEE Intern. Conf. Dielectr. Liquids (ICLD)*, Manchester, UK, 2017, 1-4