

doi:10.15199/48.2016.10.17

## Udarowe napięcie przebicia estrów izolacyjnych w relacji do oleju mineralnego

**Streszczenie.** W artykule przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych dotyczących udarowego napięcia przebicia estrów elektroizolacyjnych w relacji do oleju mineralnego. Badaniom poddano cztery ciecz elektroizolacyjne: ester syntetyczny Midel 7131, ester naturalny Envirotemp FR3, ester naturalny o obniżonej lepkości Nomex 970 FLD oraz naftenowy olej mineralny Shell Diala, jako ciecz odniesienia. Przedstawiono porównanie udarowej wytrzymałości elektrycznej i pomiaru intensywności światła emitowanego przez wyładowania elektryczne.

**Abstract.** Article presents results of experimental studies concerning measurement of lightning strength of insulating biodegradable esters in reference to mineral oil. Studies based on four insulating liquids: synthetic ester Midel 7131, low viscosity natural ester Nomex 970 FLD, natural ester Envirotemp FR3 and mineral oil Shell Diala as reference liquid. Comparative characteristics of lightning electrical strength and light emitted by electrical discharge are presented. (**Lightning breakdown voltage of insulating natural esters in relation to mineral oil**)

**Słowa kluczowe:** napięcie przebicia, estry naturalne, estry syntetyczne, izolacja olejowa

**Keywords:** breakdown voltage, natural esters, synthetic esters, oil insulation

### Wstęp

Wytrzymałość udarowa cieczy dielektrycznych opisująca zachowanie się tych cieczy przy oddziaływaniu na nie udarów napięciowych jest jednym z parametrów, które uwzględnia się przy ocenie możliwości stosowania ich jako płyny izolacyjne w transformatorach energetycznych. Do oceny tej wytrzymałości stosuje się normę PN-IEC 897, która definiuje procedurę pomiarową oraz układ elektrod, jaki powinien być zastosowany podczas pomiarów [1].

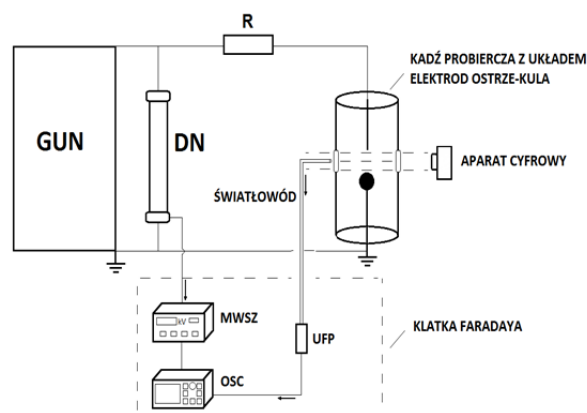
W ciągu ostatnich lat z uwagi na przepisy pożarowe i względy związane z ochroną środowiska naturalnego, rośnie zainteresowanie cieczami izolacyjnymi, które były by bezpieczniejsze niż typowo stosowany w transformatorach olej mineralny. W sytuacji, gdy urządzenie energetyczne takie jak transformator pracuje na obszarze parku narodowego lub w pobliżu ujęcia wody pitnej, bądź w miejscu gdzie zagrożenie pożarem jest znaczne, użycie oleju mineralnego, który nie jest przyjazny środowisku i posiada stosunkowo niską temperaturę zapłonu (ok. 160 °C), nie jest pożądane. Koniecznym staje się więc zastąpienie klasycznego rozwiązania izolacji ciekłej w postaci oleju mineralnego płynem, który byłby przyjazny środowisku (biodegradowalny i/lub niepalny), a jednocześnie posiadał odpowiednie właściwości związane z wytrzymałością elektryczną, pozwalające na pracę w układzie izolacyjnym transformatora. Cieczami umożliwiającymi spełnienie wymienionych warunków są oleje na bazie estrów syntetycznych i naturalnych. Od niedawna stały się one obiektem intensywnych badań naukowych związanych z ich właściwościami fizykochemicznymi oraz z ich zastosowaniem jako ciecz izolacyjno-chłodzących w transformatorach energetycznych [2-7].

Dotychczasowe badania pokazały, że estry posiadają cechy zbliżone do oleju mineralnego w zakresie właściwości dielektrycznych. Szczególnie pozytywnym aspektem z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej jest brak wrażliwości na zawilgocenie aż do ok. 600 ppm zawartości wody dla estrów syntetycznych i do ok. 300 ppm w przypadku estrów naturalnych a także związana z tym zdolność do absorpcji wilgoci z izolacji stałej transformatora. Ponadto wyższa przenikalność elektryczna estrów, w stosunku do oleju mineralnego, pozwala na uzyskiwanie bardziej równomiernego rozkładu pola elektrycznego w układach izolacyjnych papier-ciecz dielektryczna, co jest szczególnie pożądane w transformatorach [3, 4, 6].

Nieliczne badania wykonane w zakresie oceny właściwości elektrycznych przy narażeniach udarowych donoszą, że estry jako ciecz elektroizolacyjna, obok pozytywnych cech mają również te negatywne, do których należy niższa względem oleju mineralnego wytrzymałość na przepięcia udarowe [8-10]. Aby dokonać dokładniejszej oceny i szerszego porównania wytrzymałości udarowej izolacyjnych estrów biodegradowalnych, wykonane zostały autorskie badania, których wyniki przedstawione zostały w niniejszym artykule. Bardzo istotnym aspektem prowadzonych badań jest wykorzystanie pomiaru światła emitowanego w czasie wyładowania. Może to stanowić cenny materiał do oceny wytrzymałości badanych cieczy, ponieważ pomiar taki wskazuje na intensywność procesów jonizacyjnych zachodzących przed przebiciem, co jest także niezwykle istotne z punktu widzenia oceny energii wyładowania [8, 9, 12, 13].

### Procedura pomiarowa

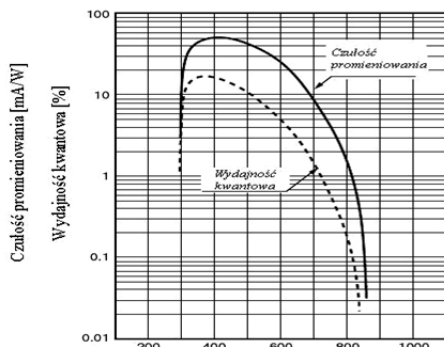
Układ pomiarowy użyty podczas badań eksperymentalnych był modyfikacją podstawowego układu probierczego do wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy izolacyjnych [1, 14]. Zaprezentowany został on schematycznie na rysunku 1.



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

Jako źródło napięcia probierczego użyty został generator udarów napięciowych w układzie Marxa, wytwarzający znormalizowany udar napięciowy piorunowy 1,2/50  $\mu$ 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. Kadź pomiarowa została wykonana z transparentnego materiału i wyposażona w odpowiednią konstrukcję pozwalającą na montaż układu optycznego wraz ze światłowodem. Umożliwiło to użycie metody fotonielazowej, za pomocą której dokonywano rejestracji światła emitowanego przez wyładowanie. W czasie wyładowania powstają impulsy światła, które padają na znajdującą się w oknie specjalnie zbudowanej kadzi pomiarowej końcówkę światłowodu. Wychwycone światło dociera dalej torem światłowodowym do komory Faradaya, w której znajduje się fotonielaz. Jego zadaniem jest detekcja światła, a sygnał wyjściowy otrzymany z urządzenia poddany jest wzmocnieniu i przedstawiony na ekranie oscyloskopu z jednoczesną możliwością zapisania na nośniku danych. Uzyskuje się w ten sposób przebieg czasowy odpowiadający impulsom światła [8, 9, 12-14].

Widmo emisyjne wyładowań dodatnich i ujemnych, jakie rozwijają się w oleju transformatorowym zawiera się w granicach 400-700 nm, stąd fotonielaz użyty w laboratorium został tak dobrany, aby zawierał powyższy zakres widma. W związku z tym dobrano instrument o zakresie widmowym od 300 do 850 nm. Jego charakterystyka widmowa przedstawiona została poniżej na rysunku 2 [15].



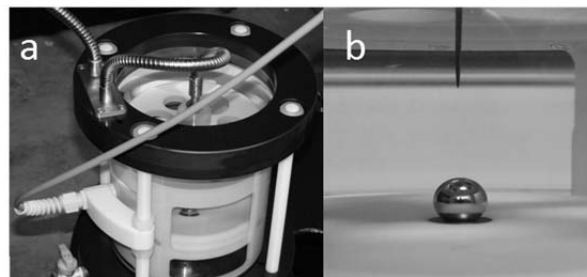
Rys.2. Charakterystyki widmowe fotonielaza użytego w układzie pomiarowym [15]

Pozwala on na rejestrację impulsu o czasie narastania 1,5 ns, jego wzmocnienie jest na poziomie do  $5 \times 10^5$ , natomiast wartość prądu ciemnego wynosi 3 nA. Dopelnieniem układu pomiarowego był cyfrowy aparat fotograficzny służący do wykonywania zdjęć statycznych w chwili przebiecia.

Badania zostały wykonane w kadzi probierczej wykonanej zgodnie z normą PN-IEC 897. Kadź posiada układ elektrod ostrze – kula. Wygląd kadzi i układ elektrod przedstawiono na rysunku 3.

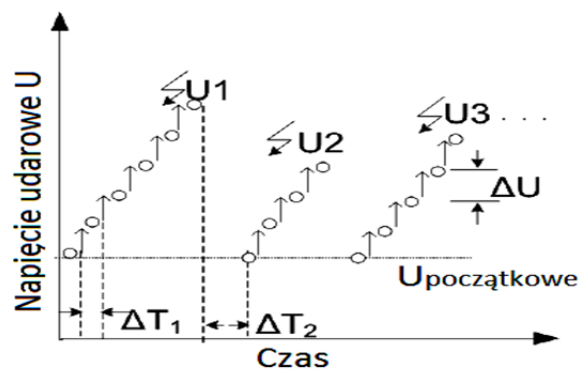
Metoda badań, jaką wykorzystano to metoda napięcia stopniowanego. Jej zasada polega na przykładaniu znormalizowanego napięcia udarowego 1,2/50, o coraz większej wartości szczytowej, aż do wystąpienia przebiecia. Pomiarów dokonywano przy odstępach elektrod wynoszącym 25 mm. Przyjęty zgodnie z wytycznymi normy stopień napięciowy ( $\Delta U$ ) wynosił 5 kV. Przykładano jeden udar przy wybranym napięciu początkowym, a następnie zwiększano

jego wartość z założonym skokiem. Wartość startową napięcia przyjęto eksperymentalnie na 100 kV. Między udarami dla danego stopnia napięciowego zachowywano co najmniej jednoniutową przerwę ( $\Delta T_1$ ).



Rys.3. Kadź probiercza (a), układ elektrod ostrze – kula (b)

Ilustrację procedury badania wartości udarowego napięcia przebiecia badanych cieczy elektroizolacyjnych przedstawiono graficznie na rysunku 4.



Rys.4. Graficzne przedstawienie metody pomiaru udarowego napięcia przebiecia:  $\Delta T_1$  – czas pomiędzy kolejnymi udarami w danej próbie,  $\Delta T_2$  – czas do rozpoczęcia kolejnej procedury pomiarowej,  $\Delta U$  – przyjęty stopień napięciowy,  $U_1, U_2, U_3$  – napięcia przebiecia dla kolejno wykonanych pomiarów

Próbę uznawano za wiarygodną, jeśli próbka wytrzymała co najmniej trzy poziomy napięcia zanim nastąpiło przebiecie. Następnie odczekiwano 30 minut ( $\Delta T_2$ ) do rozpoczęcia kolejnej próby. Przedstawiona powyżej norma zaleca wykonanie 5 pomiarów, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie wartości średniej i odchylenia standardowego. Na potrzeby eksperymentu przyjęto procedurę szerszych badań i wykonano 20 pomiarów przy polaryzacji ujemnej, dla każdej z badanych cieczy. Za udarowe napięcie przebiecia uznano wartość średnią z otrzymanych 20-tu napięć przebiecia. Należy zaznaczyć, że po doprowadzeniu do 10 przebieć, próbka badanego oleju była wymieniana na świeżą.

Ciecze elektroizolacyjne, które poddane zostały ocenie wytrzymałości udarowej to biodegradowalny ester naturalny Envirotemp FR3, ester naturalny o obniżonej lepkości Nomex 970 FLD, biodegradowalny ester syntetyczny Midel 7131 oraz naftenowy olej mineralny Shell Diala, który został przebadany jako ciecz odniesienia.

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie wybranych właściwości badanych cieczy elektroizolacyjnych. Na szczególną uwagę zasługuje ester naturalny o obniżonej lepkości Nomex 970 FLD, 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 gęstością

zbliżoną do oleju mineralnego. Obie te cechy zostały spełnione, 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	Midel 7131	Envirotemp FR3	Nomex 970FLD
Gęstość w temp. 20 °C	kg / dm <sup>3</sup>	0,88	0,98	0,92	0,89
Lepkość kinetyczna w temp. 100 °C	mm <sup>2</sup> / s	2,6	5,25	8,4	4,6
Ciepło właściwe w temp. 20 °C	J / kg K	1848	1880	1848	1950
Temperatura zapłonu	°C	150	316	360	190
Biodegradowalność	%	10	89	97	75
Napięcie przebicia	kV	> 75	> 75	> 75	75
Tg δ w temp. 90 °C	-	0,003	0,008	< 0,005	0,04
Przenikalność elektryczna	-	2,2	3,2	3,1	2,82

### Wyniki pomiarów

W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów w postaci wartości średnich napięć przebicia i odpowiadających im odchyłeń standardowych. W tabeli 3 zamieszczono natomiast wyniki wszystkich prób w kolejności wykonywanych pomiarów metodą stopniową. Ważnym zaznaczenia jest, że wyniki oddają losowość zdarzeń przebiciowych tzn. nie widać tendencji spadku kolejnych wartości napięcia przebicia co mogło by świadczyć o pogorszeniu się właściwości danej cieczy z czasem wykonywania pomiarów czy też liczbą doprowadzonych udarów.

Tabela 2. Wyniki pomiarów z kolejnych prób czterech cieczy elektroizolacyjnych dla polaryzacji ujemnej

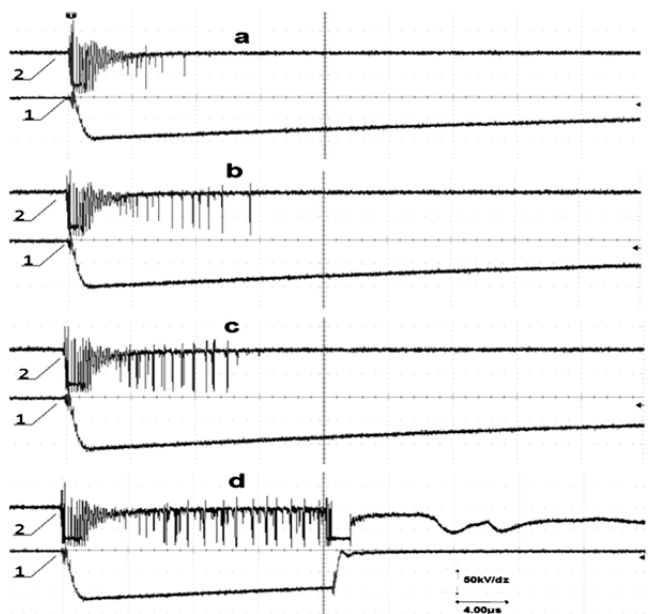
Rodzaj cieczy	Parametry	
	Napięcie przebicia [kV]	Odchylenie standardowe [kV]
Shell Diala	127,50	6,98
Midel 7131	123,00	5,23
Envirotemp FR3	123,25	4,94
Nomex 970 FLD	120,75	5,91

W czasie badań oprócz wartości napięcia przebicia, rejestrowano również przebiegi czasowe przykładowego udaru piorunowego i impulsy światła powstającego podczas narażania badanej próbki. Na rysunku 5 przedstawiono kolejne fazy próby napięcia stopniowego zarejestrowane za pomocą oscyloskopu, dla estru naturalnego o obniżonej lepkości Nomex 970FLD. Na rysunku 6 zamieszczono z kolei wybrane charakterystyczne oscylogramy

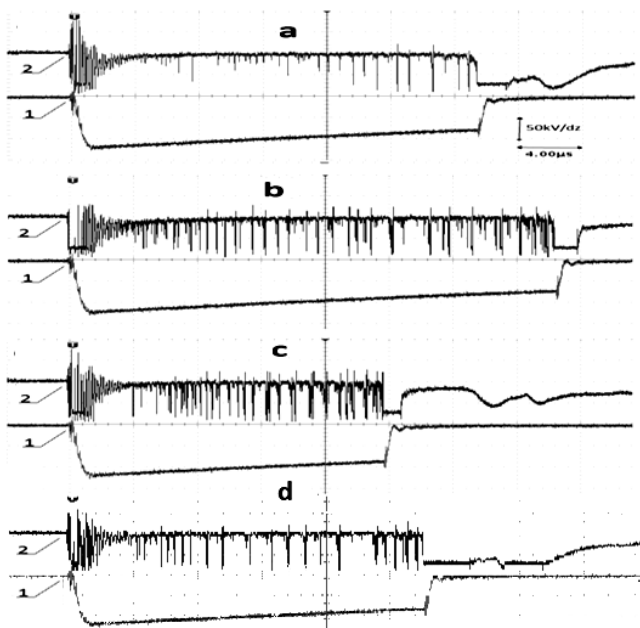
zarejestrowane podczas momentu przebicia dla wszystkich badanych cieczy elektroizolacyjnych.

Tabela 3. Zbiórce wyniki pomiarów czterech cieczy elektroizolacyjnych dla polaryzacji ujemnej.

Rodzaj cieczy	Olej mineralny Shell Diala	Ester syntetyczny Midel 7131	Ester naturalny Envirotemp FR3	Ester naturalny o obniżonej lepkości Nomex 970FLD
Wartość napięcia przebicia pojedynczego pomiaru	130	120	125	120
	140	130	130	130
	125	120	120	135
	125	125	120	120
	135	120	125	115
	145	115	115	120
	120	120	120	115
	135	125	115	125
	125	125	125	120
	125	125	130	115
	135	115	120	115
	125	130	125	120
	125	130	125	115
	120	125	125	125
	120	125	125	125
	120	115	120	120
	125	125	125	120
125	115	135	130	
125	125	120	115	
125	130	120	115	



Rys.5. Przykłady oscylogramów dla kolejnych stopni napięcia polaryzacji ujemnej udaru zarejestrowanych dla estru naturalnego o obniżonej lepkości Nomex 970FLD; 1 – przebieg napięcia udarowego (50 kV/dz), 2 – przebieg światła (jednostki względne)



Rys.6. Przykłady oscylogramów dla polaryzacji ujemnej udaru zarejestrowanych dla badanych cieczy izolacyjnych w chwili przebiecia; 1 – przebieg napięcia udarowego (50 kV/dz), 2 – przebieg światła (jednostki względne): a – olej mineralny Shell Diala, b – ester syntetyczny Midel 7131, c – ester naturalny o obniżonej lepkości Nomex 970FLD, d – ester naturalny Envirotemp FR3.

### Dyskusja i wnioski

Aby wyciągnąć wnioski na podstawie przeprowadzonych badań należy wziąć pod uwagę otrzymane wartości napięć przebiecia dla poszczególnych płynów elektroizolacyjnych, jak również zarejestrowane przebiegi czasowe światła. Przedstawione wyniki z wykonanych prób udarowych metodą stopniową, wskazują na nieznacznie gorsze właściwości estrów przy narażeniach udarowych. W odniesieniu do oleju mineralnego Shell Diala, napięcie przebiecia jest niższe o 3,33% dla estru naturalnego Envirotemp, o 3,53% dla estru syntetycznego Midel 7131, o 5,29% dla estru naturalnego o obniżonej lepkości Nomex 970FLD. Ma to duże znaczenie przy zastosowaniu ich jako izolacji ciekłej w transformatorach i jest niekorzystne z powodu większego zagrożenia wystąpieniem wyładowań. Jednocześnie mniejsza niż dla oleju mineralnego wartość odchylenia standardowego, wskazuje, że przy tego typu narażeniach estry zachowują się w sposób bardziej przewidywalny - łatwiej określić można wartość napięcia przebiecia.

Analizując przebiegi światła emitowanego podczas rozwoju wyładowania przedstawione na rysunku 4, widać jednoznacznie, że wraz ze zwiększaniem wartości szczytowej przykładowego napięcia udarowego, rośnie intensywność emitowanego światła - impulsy światła osiągają coraz wyższe amplitudy. Ponadto to ich częstotliwość także wzrasta wraz ze wzrostem wartości szczytowej doprowadzonego udaru. Na tej podstawie można stwierdzić, że zachodzące pod wpływem doprowadzonego udaru zjawiska są potęgowane w wyższym polu elektrycznym wynikającym z geometrii elektrod i przyłożonego napięcia.

Analizując z kolei rysunek 5 należy wskazać, że dla badanych estrów intensywność i częstość występowania impulsów w stosunku do oleju mineralnego jest większa. Pozwala to wnioskować, że kanały wyładowcze rozwijające się w estrach mogą być bardziej energetyczne i nieść tym samym większe zagrożenie dla izolacji stałej transformatora.

Podsumowując, wnioski uzyskane z przeprowadzonych pomiarów z użyciem metody napięcia stopniowanego do wyznaczania udarowego napięcia przebiecia cieczy dielektrycznych wspomaganym pomiarem intensywności światła emitowanego przez wyładowanie dają wiedzę o zachowaniu się badanych cieczy przy narażeniu udarowym. Estry wypadają nieco gorzej w globalnej ocenie otrzymanych wyników.

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

### LITERATURA

- [1] PN-IEC 897 - Metody wyznaczania udarowego napięcia przebiecia cieczy izolacyjnych
- [2] Oommen T.V., Clairborne C.C., Mullen J.T., Biodegradable electrical insulation fluids, *Proced. of Electr. Insul. Conf.*, (1997) 465-468
- [3] 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
- [4] Cigre brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, 2011
- [5] Lashbrook, M., Kuhn, M., The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs, Cigre Session (2012), Paper A2-210
- [6] Rózga P., Piotrowski T., Wybrane aspekty współpracy izolacji stałej z cieczami dielektrycznymi będącymi alternatywą dla oleju mineralnego, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Transformatorowej "Transformator", Gdańsk (2015), 91-102.
- [7] Rozga P., Studies on behavior of dielectric synthetic ester under the influence of concentrated heat flux, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23 (2016), nr.2, 908-914
- [8] 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. , 171-179
- [9] 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
- [10] Liu Q., Wang Z.D., Breakdown and withstand strengths of ester transformer liquids in a quasi-uniform field under impulse voltages, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 20 (2013), n.2, 571-579
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Rozga P., Cieslinski D., Stanek M., Kaczmarek M., Measurement techniques used for study the electrical discharge mechanisms in insulating ester fluids under lightning impulse, *Adv. Electr. Comp. Eng.*, 14 (2014), n.3, 95-100
- [15] Photomultiplier Tubes - Hamamatsu Photonics (2006)