

Wpływ geometrii elektrod ostrzowych na wytrzymałość powietrza w polu niejednostajnym

Streszczenie. W artykule podjęto próbę wskazania istotnego wpływu geometrii elektrod ostrzowych na wytrzymałość powietrza w układach pola niejednostajnego. Analizę poparto wynikami badań laboratoryjnych w ramach których przeanalizowano iskierniki typu ostrze-ostrze w powietrzu z elektrodami o różnej geometrii ostrza. Zwrócono uwagę na potencjalną potrzebę ujednoczenia typowych konstrukcji iskiernika ostrze-ostrze a w szczególności jego geometrii.

Abstract. The article attempts to indicate the influence of the geometry of blade electrodes on air strength in non-uniform field systems. The analysis was supported by the results of laboratory tests which the blade-blade spark gaps in the air. It was pointed out that the geometry of typical blade-blade spark gaps need to be standardized. (Influence of blade electrodes geometry on electric resistance of air in a non-uniform field).

Słowa kluczowe: wytrzymałość elektryczna powietrza, pola elektryczne z niejednostajnym rozkładem, geometria elektrod.

Keywords: electrical resistance of air, electric fields with non-uniform distribution, electrode geometry.

Zdefiniowanie problemu

Wytrzymałość powietrza w układach pola niejednostajnego jest klasycznym zagadnieniem inżynierii wysokonapięciowej. Można uznać, iż dla rozwiązań technicznych wykorzystywanych w elektroenergetyce (np. w budowie linii elektroenergetycznej (e-e) lub stacji (e-e) wszystkie rodzaje wytrzymałości elektrycznej powietrza w różnych warunkach atmosferycznych, są wyczerpująco zbadane i znormalizowane [1-4].

Inaczej wygląda ten problem, jeżeli chodzi o publikacje i badania naukowe. W wielu publikacjach naukowych w których są publikowane oryginalne wyniki badań (np. dotyczących wyładowań niepełnych WNZ) autorzy lakonicznie informują o tym, że w układzie korzystali z iskiernika ostrze-ostrze lub ostrze-płyta. Z reguły nie są przedstawiane szczegóły dotyczące wykorzystanych iskierników. W takich układach są generowane np. WNZ, których deskryptory mierzone są różnymi metodami (elektryczną, UHF, akustyczną) [5,6]. Na podstawie wyników uzyskiwanych z takich pomiarów budowane są bazy danych, służące w systemach ekspertowych do identyfikacji typu wyładowania. Pojawia się zatem pytanie, czy wyniki uzyskiwane w iskiernikach o różnej geometrii wykorzystywanych przez różne ośrodki badawcze i różnych autorów oraz tworzone na ich podstawie bazy danych mogą być ze sobą porównywalne? Kontynuując dalej tą wątpliwość, można sformułować drugie pytanie – czy nie należałoby zmierzać do ujednoczenia typowych konstrukcji iskiernika ostrze-ostrze, lub wręcz do znormalizowania jego geometrii.

Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule, mają na celu określenie, w jakim stopniu kąt elektrody ostrzowej wpływa na rejestrowane wyniki pomiarów napięć U_o , U_s i U_p w powietrznych układach izolacyjnych, generowanych w układzie ostrze-ostrze.

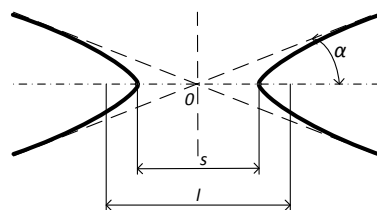
Teoretyczna zależność między kątem ostrza elektrody ostrzowej a maksymalnym natężeniem pola elektrycznego

Zależność pomiędzy kątem ostrza elektrod ostrzowych i maksymalnym natężeniem pola elektrycznego (lub napięciami charakterystycznymi U_o , U_s i U_p charakteryzującymi to natężenie) można określić trzema metodami, a mianowicie:

- teoretycznie, poprzez analityczne opisanie kształtu elektrody i uwzględnienie tego opisu we wzorach umożliwiających wyliczenie natężenia maksymalnego,
- przez modelowanie matematyczne,

- doświadczalnie, poprzez wykonanie odpowiednich elektrod i pomiary wytrzymałości elektrycznej między nimi [7,8].

Dla potrzeb wyliczenia maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego między elektrodami ostrze-ostrze, końcówki ostrzowe elektrod należy przedstawić jako hiperboloidy. Wyznaczają one bryłę obrotową, której oś oznaczono jako s , a odległość pomiędzy ogniskami jako l . Kąt α , charakteryzujący geometrię ostrza jest wyznaczony między osią l i asymptotą przecinającą punkt s (rys. 1).



Rys. 1. Odwzorowanie ostrza elektrody ostrzowej hiperboloidą odwrotną

Poniżej przedstawiono wzory (1-3) umożliwiające teoretyczne określenie związku między maksymalnym natężeniem pola elektrycznego w układzie ostrze-ostrze, a kątem α , charakteryzującym ostrze elektrody ostrzowej.

$$(1) \quad E_{\max} = E_{\text{mean}} \times \beta = \frac{U}{s} \times \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha \times \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}$$

$$(2) \quad \beta = \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha \times \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}$$

Dla małego kąta ($\alpha < 7^\circ$), wzór (2) można uprościć do:

$$(3) \quad E_{\max} = \frac{U}{s} \times \frac{\cos \alpha}{\alpha^2 \times \ln \frac{2}{\alpha}}$$

Pomiary wytrzymałości elektrycznej powietrza w układach ostrzowych o różnej geometrii

Pomiary wytrzymałości elektrycznej powietrza wykonywano w typowym układzie probierczym wysokiego napięcia, w laboratorium Techniki Wysokich Napięć Politechniki Opolskiej [9,10]. Na rysunku 2 przedstawiono ogólny widok celki pomiarowej, układu probierczego i

iskiernika w którym mocowano elektrody ostrzowe o różnej geometrii.



Rys. 2. Zdjęcie wysokonapięciowej celki pomiarowej, układu probierczego i iskiernika w którym mocowano elektrody ostrzowe o różnej geometrii

Dla oceny i porównania wytrzymałości elektrycznej pomiędzy elektrodami ostrzowymi o różnej geometrii rejestrowano trzy napięcia charakterystyczne związane z rozwojem wyładowań i przebiegiem w polach niejednostajnych, a mianowicie:

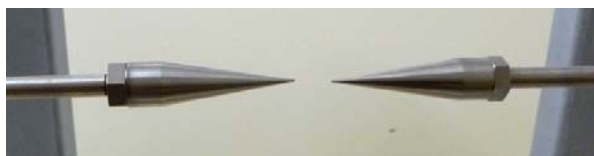
- napięcie ulotu U_o ,
- napięcie snopienia U_s ,
- napięcie przebicia U_p .

Pomiary napięć charakterystycznych dla każdej pary elektrod i każdej przyjętej odległości pomiarowej wykonywano trzykrotnie. Z wyników kolejnych pomiarów wyliczano wartość średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe [11]. Dla każdej pary elektrod pomiary wykonywano w zakresie odległości 2,0 do 16,0 cm, z gradacją co 2,0 cm. Wpływ warunków atmosferycznych na rejestrowane wyniki uwzględniano poprzez współczynnik δ . Do badań przygotowano siedem zestawów elektrod ostrzowych o różnej geometrii. Elektrody zostały wykonane ze stali nierdzewnej, ze szworni o średnicy 20,0 mm. Przygotowano elektrody ostrzowe o następujących kątach ostrzy: 45°, 40°, 35°, 30°, 25°, 20° i 15°. Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie przygotowanych do badań elektrod.



45° 40° 35° 30° 25° 20° 15°

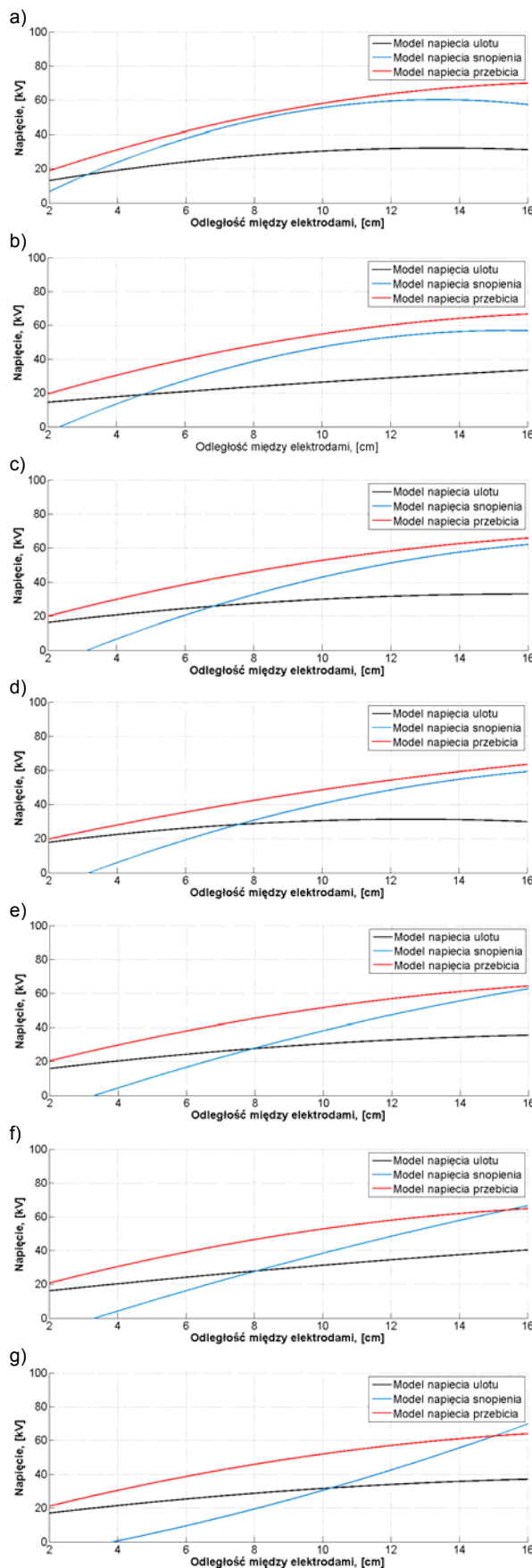
Rys. 3. Zdjęcie siedmiu par elektrod ostrzowych o kątach 45°, 40°, 35°, 30°, 25°, 20° i 15° wykonanych dla potrzeb badań



Rys. 4. Zdjęcie iskiernika z elektrodami o kącie 20°

Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej powietrza między elektrodami ostrzowymi o różnej geometrii

Na rysunku 5 przedstawiono w graficznej formie wyniki uzyskane w siedmiu iskiernikach o różnej geometrii ostrzy.



Rys. 5. Charakterystyki napięciowe dla układu typu ostrze-ostrze z elektrodami o kącie ostrza: (a) 15°, (b) 20°, (c) 25°, (d) 30°, (e) 35°, (f) 40°, (g) 45°

Rysunki przedstawiają zestawienie przebiegów trzech zarejestrowanych napięć (U_o , U_s , U_p) w funkcji odległości między elektrodami. Umożliwiają one ocenę charakteru przebiegu tych napięć z danymi publikowanymi w literaturze i zgodność z fizycznymi mechanizmami rozwoju wyładowań.

Wykonane pomiary napięć charakterystycznych mają charakter punktowy i jako takie winny być na wykresie przedstawione jako słupki. Jednak dla potrzeb analizy, zarejestrowane punkty pomiarowe zostały opisane krzywą regresji, która stanowi model przebiegu zmienności napięcia U_o , U_s i U_p . Tak należy traktować ciągłe przebiegi przedstawione na rysunkach 5 i 6, co również zaznaczono w podpisach pod tymi rysunkami.

Porównawcza analiza wyników

Grupę charakterystyk porównawczych przygotowano w oparciu o wyniki przedstawione na rysunku 5. Zaprezentowane na jednym układzie współrzędnych modele przebiegów napięć charakterystycznych U_o , U_s i U_p opracowane na podstawie zarejestrowanych wyników w przebadanych układach elektrod umożliwia określenie zmienności tych przebiegów i rozrzutu wyników. Można także określić zależności wartości napięć charakterystycznych od odległości między elektrodami, a więc także zależności od napięcia. Na rys. 6a przedstawiono krzywe regresji charakteryzujące zjawisko ulotu U_o . Przebiegi określają wartość napięcia U_o w funkcji odległości między elektrodami. Ponieważ wszystkie siedem przebiegów jest umieszczonych na jednym wykresie to ich porównanie i analiza są ułatwione. Na rysunkach 6b i 6c przedstawiono takie same przebiegi odnoszące się odpowiednio do napięcia snopienia U_s i napięcia przebicia U_p , zarejestrowanych w siedmiu przebadanych układach.

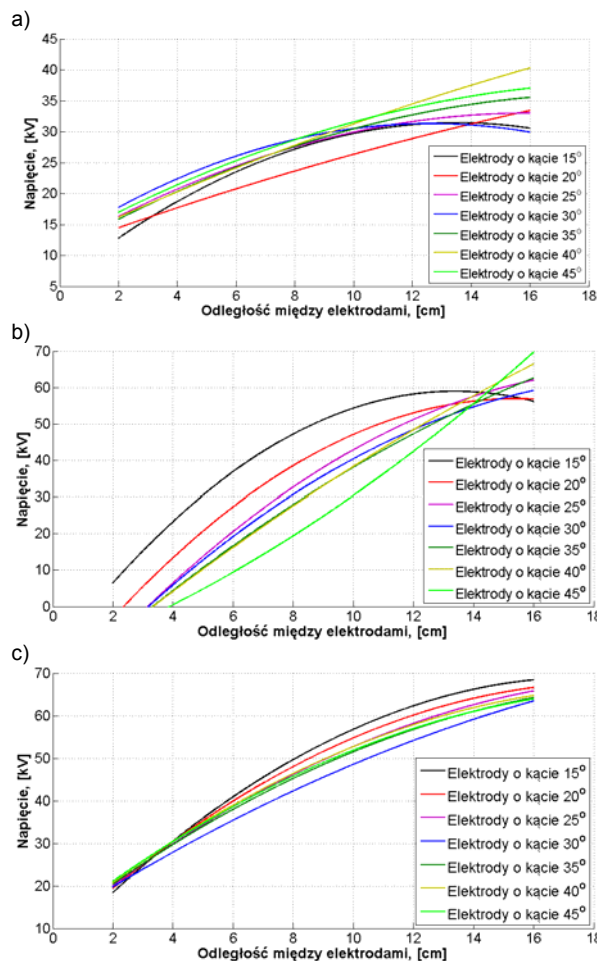
Analiza zbiorczych charakterystyk modeli napięcia ulotu w układach ostrzowych o różnych kątach, przedstawiona na rysunku 6a, prowadzi do dwóch wniosków, a mianowicie:

- zarejestrowane przebiegi są zgodne z danymi publikowanymi w literaturze dotyczącej problematyki ulotu,
- wartość napięcia ulotu zarejestrowana w układach elektrod o różnych kątach ostrzy, w zakresie odległości między elektrodami od 2,0 do 12,0 cm praktycznie nie różnią się. W zakresie odległości 12,0 do 16,0 cm zróżnicowanie wartości jest widoczne, ale nie ma korelacji tego zróżnicowania z kątem elektrod ostrzowych.

Porównanie modeli przebiegów napięcia snopienia (rys. 6a) występujących w układach elektrod ostrzowych o różnych kątach ostrzy, pokazuje wyraźne zróżnicowanie tych przebiegów w przedziale odległości od 2,0 cm do około 14,5 cm. Przy odległości pomiędzy elektrodami około 14,5 cm występuje zaskakujące przecięcie przebiegów wszystkich siedmiu modeli odnoszących się do napięcia snopienia. Przy większych odległościach niż 14,5 cm przebiegi modeli napięcia snopienia różnią się. Związek tych przebiegów dotyczących napięcia U_s z kątami elektrod ostrzowych jest odwrotny do tego, jaki występuje w przedziale odległości od 2,0 do 14,0 cm. Przykładem jest przebieg modelowej krzywej dla elektrody ostrzowej o kącie 15° . Wartość napięcia snopienia występującego pomiędzy elektrodami o kącie 45° po przekroczeniu odległości 14,5 cm rosną i są najwyższe ze wszystkich przebiegów. Natomiast w przedziale odległości 2,0 cm do 14,0 cm przebiegi te mają wartości najniższe. Trend odwrotny wyraźnie występuje dla elektrody o kącie ostrza 15° . W przedziale odległości od 2,0 cm do 14,5 cm przebiegi mają wartości najwyższe a po przekroczeniu punktu 14,5 cm krzywa ta przybiera wartości najniższe. Wszystkie inne

przebiegi dotyczące napięcia snopienia lokują się w przedziale pomiędzy przebiegami odnoszącymi się do elektrody o kącie 45° i kącie 15° .

Na rysunku 6c przedstawiono modelowe przebiegi wartości napięcia przebicia U_p dla wszystkich siedmiu kompletów przebadanych elektrod. Dla techniki izolacyjnej znajomość zależności przebicia U_p od odległości pomiędzy elektrodami jest najważniejsza. Z porównania przebiegów przedstawionych na rysunku 6c wynika, że mają one bardzo zbliżone przebiegi. W zakresie odległości od 2,0 cm do 6,0 cm wszystkie przebiegi wprost nakładają się na siebie. Przy wzroście odległości powyżej 6,0 cm dynamika przebiegów różnicuje się – różnice w wartościach U_p dochodzą do około 10%. Najwyższe wartości napięcia przebicia z przedstawionych przebiegów posiada przebieg odnoszący się do elektrod ostrzowych o kącie ostrza 15° .



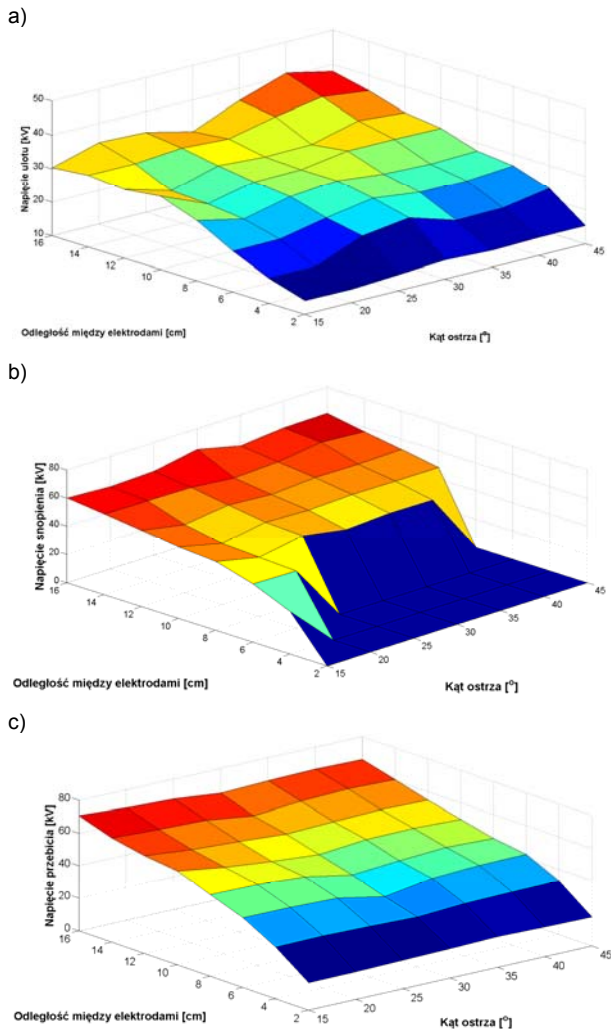
Rys. 6. Charakterystyki porównawcze modeli napięcia dla badanych układów typu ostrze-ostrze: (a) napięcia ulotu; (b) napięcia snopienia; (c) napięcia przebicia

Uzyskane podczas badań wyniki w kompletnej i syntetycznej a zarazem w efektywnej formie przedstawiono w postaci rozkładów trójwymiarowych na rysunku 7. Zaprezentowane rozkłady odnoszą się odpowiednio do napięcia ulotu (rys. 7a), do napięcia snopienia (rys. 7b) i do napięcia przebicia (rys. 7c). Zaletę przedstawionych rozkładów trójwymiarowych stanowi fakt, że umożliwiają one równoczesne określenie wpływu na wartości rejestrowanych wyników trzech parametrów:

- odległość między elektrodami,
- kątów elektrod ostrzowych,
- wartości rejestrowanych napięć U_o , U_s i U_p .

Na rysunku 7 maksymalne zarejestrowane wartości zaznaczono kolorem czerwonym, wartościom zerowym

odpowiada kolor niebieski. Przedstawione trójwymiarowe rozkłady bardzo dobrze wizualizują obszary w których zarejestrowano najwyższe i najniższe wartości mierzonych napięć charakterystycznych. Analiza wyników przedstawionych w formie trójwymiarowych rozkładów potwierdza wnioski przedstawione uprzednio, sformułowane na podstawie interpretacji zbiorczych przebiegów napięć charakterystycznych przedstawionych na rysunku 6.



Rys. 7. Wykres przestrzenny obrazujący, dla badanych układów ostrzowych, zmiany mierzonych napięć w odniesieniu do kąta ostrza elektrody oraz odległości między nimi: (a) napięcia ulotu, (b) napięcia snopienia, (c) napięcia przebicia

Podsumowanie

Problematyka badania wytrzymałości elektrycznej powietrza jest w technice izolacyjnej ważna i aktualna, gdyż dotyczy najpowszechniejszego z dielektryków [12-13]. Przedstawione w artykule wyniki odnoszą się tylko do jednego, szczegółowego zagadnienia związanego z elektrodami ostrzowymi i występującego między nimi niejednostajnego pola elektrycznego.

Uzyskane wyniki przedstawione w artykule, a zwłaszcza te przedstawione na rysunkach 6 i 7 umożliwiają określenie wpływu kąta elektrod ostrzowych na wartości napięcia U_o , U_s i U_p . Można zatem stwierdzić, iż taki wpływ istnieje i występuje w różnym stopniu dla każdego z rejestrowanych napięć charakterystycznych. Przy odległości między elektrodami równej 16,0 cm procentowo wyrażone maksymalne różnice między wartościami napięć

charakterystycznych odniesionych do wartości najwyższych, wynoszą odpowiednio dla napięcia ulotu U_o – 25,78 %, dla napięcia snopienia U_s – 11,36 %, dla napięcia przebicia U_p 8,31 %. Na tej podstawie można przyjąć iż iskierniki ostrzowe wykorzystywane są w badaniach zjawisk wysokonapięciowych (np. dla generacji wzorcowych wyładowań niezupełnych) winny mieć ujednolicony lub co najmniej zbliżony kąt ostrza. Obowiązkowo przy korzystaniu z iskierników ostrzowych winna być podana informacja o kącie ostrzy elektrod ostrzowych. Odpowiedzi na drugie pytanie postawione we wprowadzeniu do artykułu, dotyczące normalizacji kształtu iskiernika pomiarowego nie można jeszcze udzielić. Dla jej uzyskania należy badania kontynuować, zwłaszcza z wykorzystaniem igłowych elektrod ostrzowych o bardzo małych kątach i średnicach.

Dalsze badania nad problemem przedstawionym w artykule winny się koncentrować na dwóch zagadnieniach. Pierwszym są badania wytrzymałości elektrycznej powietrza, między igłowymi elektrodami ostrzowymi o znacznie mniejszych kątach ostrzy i średnicach. Drugim mogłoby być porównanie, który ze sposobów określenia napięcia początkowego ulotu U_o i snopienia U_s (w oparciu o detekcję światła lub dźwięku) jest bardziej czuły. Zobiektywizowanie detekcji i pomiarów tych wielkości (np. poprzez pomiar dźwięku mikrofonem i detekcji światła fotodiodą) zwiększyłoby czułość pomiarów i zmniejszyło rozrzut rejestrowanych wyników.

Autorzy: Justyna Czerwonka, E-mail: justynaczerwonka6@gmail.com; dr inż. Michał Koziół, E-mail: m.koziol@po.opole.pl; prof. dr. hab. inż. Jerzy Skubis, E-mail: j.skubis@po.opole.pl, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 46-758 Opole

LITERATURA

- [1] Florkowska B.: „Technika wysokich napięć: materiały do wykładów i laboratorium”. Wydanie 2. Wyd. AGH, Kraków (1992)
- [2] Gacek Z.: „Wysokonapięciowe Techniki Izolacyjne”. Gliwice, (2006)
- [3] Gluchowski S., Juchniewicz J.: „A New approach to trening inception tests”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-22, No. 1 (1987), pp. 81-86
- [4] Dunbar, W.G., Schweickart, D.L., Horwath, J.C., Walko, L.C.: „High frequency breakdown characteristics of various electrode geometries in air”, Conference Record of the Twenty-Third International Power Modulator Symposium, IEEE, (1998), pp. 221–224
- [5] Kunicki, M.: „Zastosowanie metody UHF do detekcji i analizy zjawiska wyładowań niezupełnych”, Przegląd Elektrotechniczny, (2016), 92, (10), pp. 58–62
- [6] Nagi, Ł., Zmarzły, D.: „Analiza promieniowania rentgenowskiego generowanego przez wyładowania niezupełne w układzie ostrze-ostrze”, Przegląd Elektrotechniczny, (2014), 90, (10), pp. 82–84
- [7] Gacek Z.: „Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce”. Wyd. Pol. Śl., Gliwice, (2002)
- [8] Flisowski Z.: „Technika Wysokich Napięć”. WNT, Warszawa, (1988)
- [9] Boryń H., Olesz M., Rynkowski A., Wojtas S.: „Laboratorium techniki wysokich napięć”. Pol. Gd. (2007)
- [10] Wodziński J.: „Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów”. PWN Warszawa (1997)
- [11] Skubis T.: „Opracowanie wyników pomiarów. Przykłady”. Wyd. Pol. Śl., Gliwice, (2003)
- [12] Mościcka-Grzesiak H. (red.): „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce”. Tom 1, Wyd. Pol. Poz. (1996)
- [13] Mościcka-Grzesiak H. (red.): „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce”. Tom 2, Wyd. Pol. Poz. (1999)