

Analiza porównawcza metod diagnostycznych na podstawie pomiaru wyładowań niezupełnych na modelu porcelanowego izolatora przepustowego SN

Streszczenie. Artykuł prezentuje wyniki analizy porównawczej pomiarów wyładowań niezupełnych prowadzonych trzema metodami: metodą emisji akustycznej, metodą elektryczną oraz metodą bazująca na pomiarach światła emitowanego w paśmie UV. W artykule wykazano istnienie korelacji między wynikami uzyskiwanymi różnymi metodami pomiarowymi. W dalszej perspektywie celem jest opracowanie kryteriów, na podstawie których możliwe będzie zakwalifikowanie badanego elementu elektroizolacyjnego jako sprawnego, zagrożonego uszkodzeniem lub też uszkodzonego.

Abstract. The article presents the results of a comparative analysis of partial discharge measurements using electric, acoustic emission and UV emission methods for the development of comparison and decision criteria, on the basis of which it will be possible to quickly qualify the tested insulating element as efficient, endangered by damage or damaged (**Comparative analysis of diagnostic methods based on partial discharges measurement of the MV porcelain bushing**).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, metody diagnostyczne, izolator porcelanowy.

Keywords: partial discharge, diagnostic methods, porcelain bushing.

Wstęp

Problem wyładowań niezupełnych (wnz) pojawił się już w końcu XVIII wieku [1]. Od czasu odkrycia tego zjawiska rozwijane są metody detekcji i analizy wyładowań pojawiających się na zewnątrz i we wnętrzu elementów elektroizolacyjnych. Oprócz pomiarów wyładowań niezupełnych wykonywanych metodą elektryczną w połowie lat 70-tych XX wieku nastąpił rozwój metod bazujących na emisji akustycznej pochodzącej od źródeł wyładowań niezupełnych [2], pozwalającej na oraz detektory wyładowań niezupełnych wraz z postępowaniem techniki, aparatura do wykonywania pomiarów wyładowań niezupełnych również ewaluowała. Dzięki czemu w obecnych czasach, poza złożonymi systemami detekcji wnz, wspomaganymi specjalistycznym oprogramowaniem komputerowym (umożliwiającym dokładniejszą analizę zjawiska), zarówno metodą elektryczną [1], jak i akustyczną (pracującą w bezpośrednim kontakcie z badanym obiektem [3], [4], [5] oraz zdalnie – wykorzystując mikrofony kierunkowe [6]) do dyspozycji jest również możliwość detekcji i zliczania rozbłysków promieniowania w zakresie UV, wykorzystując nowoczesne kamery działające w paśmie UV [7], lub nawet widma emisyjne wyładowań [8], [9]. Wyładowaniom niezupełnym w gazie towarzyszy bowiem promieniowanie świetlne powstające przy powrocie pobudzonych atomów do stanu podstawowego. Ponieważ powrót ten związany jest z wypromieniowaniem energii w postaci kwantu, więc promieniowanie ma charakter widma o różnych intensywnościach dla różnych długości fali. Ilość wytworzonych fotonów i długość fali wyemitowanego światła jest zależna m.in. od intensywności wnz [10]. Za pomocą kamery działającej w paśmie UV, na obrazie widzialnym, można precyzyjnie określić miejsce skupiska wnz na powierzchni elementu elektroizolacyjnego a zatem wskazać źródło (źródła) wyładowań, co nie zawsze jest możliwe do określenia za pomocą pozostałych metod pomiarowych. Należy podkreślić, że pomiar kamerą działającą w paśmie UV jest możliwy do wykonania z bezpiecznej odległości, bez konieczności wyłączenia napięcia i instalowania dodatkowej aparatury pomiarowej. Niestety możliwość wykorzystania kamery UV jest ograniczona jedynie do pomiarów wyładowań występujących na powierzchni układów izolacyjnych. Badania dotyczące wyładowań na powierzchni izolatora kompozytowego, w których przeprowadzono pomiar

zarówno ładunku pozornego, jak i liczby rozbłysków promieniowania w zakresie UV oraz pola powierzchni objętej rejestrowanymi rozbłyskami, są opisane m.in. w [11]. W artykule tym nie wykazano jednak wyraźnej korelacji między parametrami mierzonymi metodą elektryczną i przy wykorzystaniu kamery UV.

Wczesne wykrycie potencjalnych miejsc, w których z biegiem czasu może dojść do osłabienia izolacji, daje możliwość podjęcia odpowiednich działań prewencyjnych.

Na podstawie wykonanych zdjęć, czy filmów kamerą UV, można ocenić również jakość samej aparatury rozdzielczej w wykonaniu napowietrznym, wykonanych prac konserwacyjnych, jak np. czyszczenie izolatorów, czy eliminować brak profesjonalizmu wykonawców.

Cel analizy

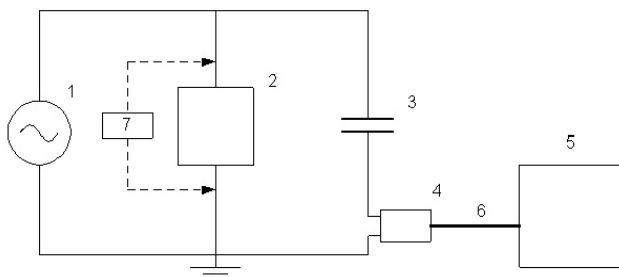
Analiza porównawcza metod diagnostycznych opartych na podstawie pomiaru wyładowań niezupełnych ma na celu zbadanie relacji pomiędzy wynikami uzyskiwanymi różnymi metodami pomiarowymi. W dalszej perspektywie celem jest wypracowanie kryteriów porównawczych oraz decyzyjnych, na podstawie których możliwe będzie szybsze zakwalifikowanie badanego elementu elektroizolacyjnego jako sprawnego, zagrożonego uszkodzeniem lub też uszkodzonego. Podejście takie stosowane jest w ocenie stanu technicznego niektórych układów izolacyjnych, których diagnostyka bazuje m.in. na pomiarach wyładowań niezupełnych (np. kable SN). Zdaniem autorów to podejście może być zastosowane w ocenie stanu technicznego innych obiektów, dla których obecnie nie podaje się takich kryteriów. Podejście to może być jednak zastosowane wyłącznie do układów izolacji zewnętrznej lub układów, w których możliwy jest zdalny pomiar sygnałów akustycznych emitowanych przez wyładowania niezupełne.

Pomiary wnz metodą elektryczną

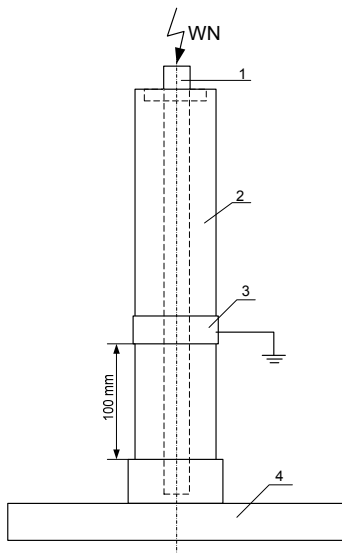
Pomiary wykonano na modelu izolatora przepustowego przedstawionym na rysunku 2. W modelu tym przestrzeń między sworzniem a rurą porcelanową wypełnia olej transformatorowy, dzięki czemu wyładowania niezupełne powstają na zewnętrznej stronie rury porcelanowej. Wyładowania powstające w takim modelu mają charakter wyładowań powierzchniowych, powstających głównie wokół uziemionej opaski (oznaczonej jako 3 na rysunku 2). W rozkładzie natężenia pola elektrycznego w takim modelu

występuje zarówno składowa styczna, jak i normalna wektora natężenia pola elektrycznego, zapoczątkowujące jonizację gazu wokół izolatora (składowa normalna) i ukierunkowanie przepływu ładunków elektrycznych wzdłuż powierzchni dielektryka (składowa styczna). Wokół elektrody WN (w obszarach o dostatecznie dużej wartości natężenia pola elektrycznego) występują również wyładowania typu ulotowego.

Pomiar wartości występującego w badanym obiekcie ładunku pozornego dokonywany był metodą elektryczną. Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystany został transformator probierczy TP110 wraz z układem regulacji napięcia oraz detektor do pomiaru i analizy wnz (TE - 571 firmy Haefely Trench), wyposażony w dodatkowe elementy osprzętu: czwórnik sprzęgający AKV 573, kalibrator KAL 451 oraz kondensator sprzęgający o pojemności 1 nF [12]. Pomiary wnz wykonywane były w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 1.



Rys.1. Ogólny schemat układu pomiarowego [12] 1 - źródło wysokiego napięcia, 2 - obiekt badań, 3 - kondensator sprzęgający, 4 - czwórnik sprzęgający AKV 573, 5 - detektor TE 571, 6 - przewód łączący (ekranowany), 7 - kalibrator KAL 451 (jedynie w stanie beznapięciowym)

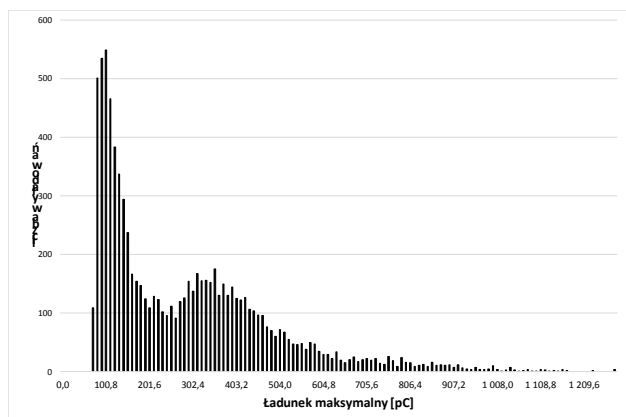


Rys.2. Model izolatora przepustowego; 1 - sworzeń (tor prądowy) przepustu o średnicy 19 mm, 2 - rura porcelanowa o średnicy zewnętrznej 70 mm i grubości ścianki 10 mm, 3 - uziemiona opaska (kołnierz przepustu), 4 - podstawa izolacyjna

Za pomocą detektora TE-571 można dokonywać pomiarów w zakresie częstotliwości napięcia probierczego od 40 Hz do 420 Hz. Zakres pomiarowy ładunku pozornego mieści się w granicach od zera do 999 nC, natomiast szerokość pasma pomiarowego 40 - 400 kHz [13]. Oprócz ładunku pozornego, jako podstawowego parametru wyładowań niepełnych, odpowiednie mierniki oferują zwykle dodatkowo pomiar napięcia zapłonu i gaśnięcia

wyładowań, ilości wyładowań w jednostce czasu, a także wielkości pochodnych takich jak prąd wyładowań, wskaźnik D (kwadrat zmierzonych ładunków w jednostce czasu) oraz moc wyładowań. Zaawansowane mierniki wyładowań niepełnych (do których należy TE 571) umożliwiają rejestrowanie zarówno wartości szczytowych następujących po sobie impulsów wyładowań niepełnych, jak również momentów ich wystąpienia w kolejnych okresach napięcia probierczego. Taki rodzaj rejestracji wyładowań niepełnych umożliwia jednoczesną analizę amplitudową i czasową, co pozwala na tworzenie skumulowanych rozkładów amplitudowych i fazowych [14].

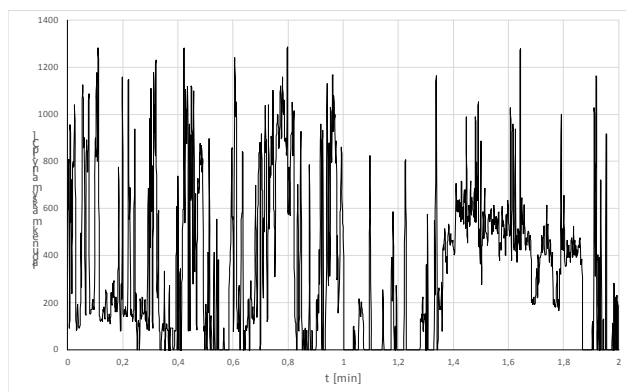
Na rysunku 3 przedstawiono jeden z rozkładów otrzymanych podczas pomiarów.



Rys.3. Rozkład liczby wyładowań w zależności od ładunku maksymalnego (napięcie próby 13 kV)

Widoczne na tym rysunku 3 dwa maksima w rozkładzie liczby wyładowań wskazują na dwa dominujące źródła wyładowań. Prezentowany na tym rysunku rozkład może być superpozycją niesymetrycznego rozkładu (duża liczba zarejestrowanych wyładowań o małym ładunku i niewielka liczba wyładowań o dużych ładunkach) charakterystycznego m.in. dla wyładowań powierzchniowych i rozkładu symetrycznego (drugie od lewej maksimum) charakterystycznego dla wyładowań ulotowych.

Pomiary wykonano dla napięć przemiennych w zakresie od 0 do 20 kV, przy czym zapłon wyładowań niepełnych nastąpił przy napięciu o wartości skutecznej 12,3 kV. Dla każdego napięcia probierczego wykonywano dwukrotną rejestrację wyładowań w czasie 2 minut. Wyładowania niepełne są zjawiskiem dynamicznie zmieniającym się w czasie. Przykład zmian ładunku maksymalnego w czasie pomiaru przedstawia rysunek 4.



Rys.4. Zmienność w czasie maksymalnych wartości ładunku pozornego (napięcie próby 13 kV)

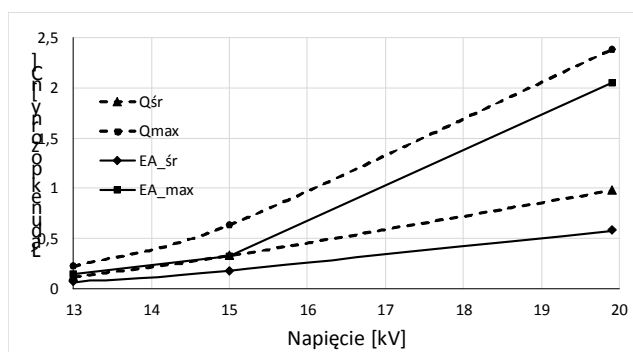
Dynamika zmian ładunku pozornego wpływa m.in. na zmieniające również w czasie wyniki pomiarów liczby źródeł emitujących światło w zakresie UV (tab. 2) oraz sygnału dźwiękowego docierającego do sondy akustycznej.

Pomiary wnz metodą emisji akustycznej

Do przeprowadzenia pomiarów wyładowań niepełnych metodą akustyczną wykorzystano urządzenia firmy EA Technology model UltraTEV z detektorem parabolicznym. Producent urządzenia dostarcza tabele pozwalające na przeliczenie uzyskanego wyniku pomiaru w decybelach na odpowiadającą mu wartość ładunku pozornego będącego źródłem fal dźwiękowych [6]. Równoległe do pomiarów metodą emisji akustycznej wykonywane były pomiary metodą elektryczną stąd możliwe było porównanie wyników uzyskanych wartości ładunku pozornego z obu metod. Wyniki porównania obu metod zestawiono w tabeli 1 oraz zaprezentowano w sposób graficzny na rys. 5. Przedstawione wyniki z metody elektrycznej są wynikami uśrednionymi za okres pomiaru.

Tabela 1. Porównanie wyników uzyskanych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną

Napięcie	Metoda elektryczna		Metoda emisji akustycznej		
	Q _{śr}	Q _{max}	głośność	Q _{śr}	Q _{max}
kV	nC		dB	nC	
13	0,12	0,23	20	0,065	0,148
15	0,33	0,64	28	0,178	0,325
19,9	0,98	2,38	30	0,580	2,056



Rys. 5. Uśrednione wartości wyników pomiarów metodą elektryczną i metodą emisji akustycznej

Jak widać z przedstawionych rezultatów pomiarów wartości nie pokrywają się. Wskutek różnego tłumienia, odkształcania i odbijania się fal dźwiękowych w odmiennych obiektach, rejestrowany sygnał akustyczny od wyładowań niepełnych o jednakowej wartości ładunku pozornego, może być inny dla każdego z badanych obiektów. Jednak tendencja zmian zarówno ładunku średniego jak i maksymalnego w funkcji napięcia jest jednakowa dla wyników uzyskiwanych z obu metod. Dla konkretnego obiektu konieczne byłoby zatem przeprowadzenie odpowiedniej kalibracji wyników z metody emisji akustycznej korelując je z wartościami ładunku pozornego zmierzonego metodą elektryczną, a kolejne badania diagnostyczne można by przeprowadzać wykorzystując jedynie metodę emisji akustycznej, śledząc tendencję zmian poziomu głośności. Byłoby to o tyle korzystne, że nie wymagałoby demontażu obiektu z obwodu, w którym pracuje, nie wymagałoby też wyłączenia spod napięcia, a samą ocenę można by przeprowadzać z bezpiecznej odległości (takiej samej podczas kalibracji i w trakcie kolejnych badań). Badania emisji akustycznej pochodzącej od wyładowań niepełnych, wykorzystujące detektor paraboliczny mają również swoje ograniczenia i wady.

Jeżeli np. w sąsiedztwie badanego obiektu znajduje się inne (silne) źródło wyładowań, rejestrowany sygnał może zostać zakłócony i błędnie zinterpretowany jako sygnał pochodzący z badanego obiektu. Dlatego też w celu zobiektywizowania oceny, badania wnz metodą emisji akustycznej powinny być uzupełnione innymi badaniami. Metodą pozwalającą na wykonywanie badań wyładowań niepełnych (również w bezpiecznej odległości) jest metoda UV.

Pomiary wnz metodą UV

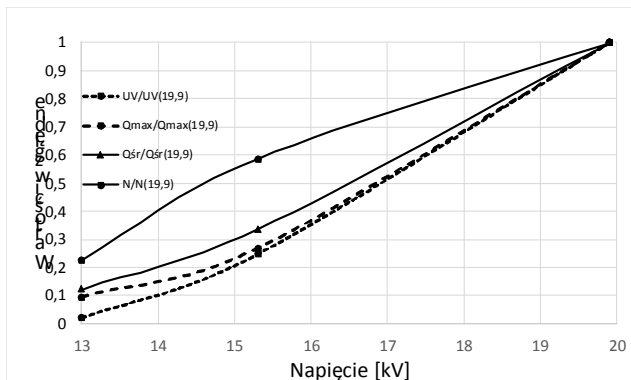
Do przeprowadzenia pomiarów wyładowań niepełnych metodą UV wykorzystano specjalistyczną kamerę firmy Ulirvison model TD100 umożliwiającą rejestrację obrazu wraz ze zliczaniem liczby wyładowań. Kamera posiada bardzo czułą matrycę ($2,2 \cdot 10^{-18} \text{ W/cm}^2$), która pracuje w paśmie 240-280 nm. Według deklaracji producenta detektor umieszczony w kamerze ma możliwość wykrywania wyładowań na poziomie 1 pC z odległości 10 metrów. Układu detektora posiada płynną regulację wzmacnienia. Wynikiem pomiaru jest rejestrowana liczba wyładowań generujących promieniowanie świetlne w pasmie UV w określonym przedziale czasu. W czasie pomiarów dla każdego z napięć probierczych rejestrowana była 60 s sekwencja pomiarowa. Przykład uzyskanych wyników podczas takiej sekwencji pomiarowej przedstawia tabela 2. W tabeli tej przedstawiono liczbę rejestrowanych rozbłysków promieniowania w zakresie UV, w oknie pomiarowym kamery (UV count) w kolejnych 1-sekundowych przedziałach czasu.

Tabela 2. Wyniki pomiarów kamerą UV podczas 60 s sesji pomiarowej (napięcie próby 13 kV)

Czas	UV count	Czas	UV count	Czas	UV count
s	–	s	–	s	–
1	151	21	219	41	165
2	148	22	161	42	411
3	198	23	259	43	182
4	338	24	54	44	92
5	244	25	65	45	99
6	273	26	317	46	114
7	121	27	142	47	128
8	313	28	347	48	160
9	230	29	150	49	224
10	260	30	177	50	225
11	69	31	220	51	235
12	64	32	459	52	178
13	87	33	186	53	199
14	51	34	522	54	139
15	175	35	351	55	174
16	179	36	171	56	193
17	97	37	115	57	135
18	177	38	136	58	308
19	143	39	239	59	54
20	230	40	96	60	206

Do dalszych analiz wykorzystano uśrednione wyniki liczby wyładowań rejestrowanych co 1 s, z ww. sekwencji.

W celu określenia korelacji między wynikami rejestrowanymi za pomocą kamery UV oraz wynikami rejestrowanymi metodą elektryczną wyznaczono wartości względne: liczby wyładowań generujących promieniowanie świetlne w pasmie UV, ładunku pozornego średniego, ładunku pozornego maksymalnego i liczby wyładowań rejestrowanych za pomocą metody elektrycznej, odnoszone do odpowiednich wartości zarejestrowanych przy napięciu 19,9 kV. Zestawienie wyników względnych przedstawia rysunek 6



Rys.6. Porównanie względnych wartości wyników pomiarów metodą elektryczną i UV

Jak można zauważyć tendencje zmian ładunku pozornego średniego i maksymalnego w funkcji wartości napięcia probierczego są podobne do tendencji zmian liczby wyładowań generujących promieniowanie świetlne w pasmie UV (spółczynnik korelacji równy 0,999). Gorzej wygląda korelacja między liczbą wyładowań rejestrowanych metodą elektryczną i liczbą wyładowań generujących promieniowanie świetlne w pasmie UV (współczynnik korelacji równy 0,966). Rozbieżności te wynikają z tego, że metoda elektryczna rejestruje wszystkie rodzaje wyładowań. Część wyładowań na pewno występowała na styku kołnierza izolatora przepustowego i rury porcelanowej, a zatem były to wyładowania „niewidoczne” dla kamery UV. Wyładowania powierzchniowe to zwykle wyładowania charakteryzujące się dużymi wartościami ładunku pozornego, stąd znacznie lepsza korelacja między ładunkiem maksymalnym, a wynikami z kamery UV.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyładowań niepełnych z wykorzystaniem różnych metod pomiarowych, można stwierdzić, że w warunkach wykonywanej próby, wyniki uzyskane przy wykorzystaniu wszystkich metod były zbliżone.

Metoda elektryczna jest bardzo dokładna i pozwala na wykrywanie bardzo niewielkich uszkodzeń izolacji, nie zawsze jest jednak możliwe wskazanie lokalizacji uszkodzenia (źródła wyładowań niepełnych). Wykorzystanie innych metod detekcji wyładowań niepełnych może wskazać lokalizację źródeł wyładowań i ułatwić interpretację uzyskanych wyników.

Metoda akustyczna, jest metodą mniej dokładną, raczej stosowaną w celu określenia miejsca występowania wyładowań niepełnych, a wartości ładunku pozornego można określać jedynie z dużym przybliżeniem. Jednak jak wykazano, kalibracja pomiarów akustycznych (indywidualnie dla konkretnego obiektu) ładunkiem pozornym, może pozwalać na śledzenie zmian stanu układu izolacyjnego tego obiektu, za pomocą zdalnych pomiarów akustycznych.

Metoda UV jest bardzo dobrą metodą w określaniu wyładowań niepełnych na powierzchniach elementów izolacyjnych i precyzyjnie można przy jej pomocy zlokalizować skupisko wyładowań lub powierzchnię, na której występują wyładowania powierzchniowe oraz zmierzyć ich ilość za dany okres pomiarowy.

Podczas przeprowadzonych pomiarów wykazano bardzo dobrą korelację między ładunkiem pozornym (maksymalnym i średnim), a liczbą wyładowań generujących promieniowanie świetlne w pasmie UV. Wzrost liczby takich wyładowań świadczy zatem o wzroście

wartości ładunku pozornego i może również stanowić uzupełnienie pomiarów wykonywanych metodą elektryczną oraz ułatwić interpretację wyników.

Dla badanego obiektu wykazano bardzo dobre korelacje między wynikami osiąganymi różnymi metodami pomiarowymi. Należy podkreślić, że wyniki te dotyczą konkretnego obiektu, a uzyskane korelacje nie muszą mieć charakteru uniwersalnego. Pozytywny wynik stanowi jednak zachętę do dalszych badań na innych obiektach, dla których planowane jest opracowanie kryteriów kwalifikacyjnych.

Autorzy: mgr inż. Wojciech Wróblewski, Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10; 44-100 Gliwice, E-mail: wojciech.wroblewski@polsl.pl; dr hab. inż. Marcin Maciążek, Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10; 44-100 Gliwice, E-mail: marcin.maciazek@polsl.pl; dr inż. Dominik Duda, Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: dominik.duda@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy pomiaru i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *Wydawnictwo PAN*, Warszawa 2001.
- [2] Harrold R.T., The relationship between ultrasonic and electrical measurements of under-oil corona sources, *IEEE Trans. Elect. Insul.*, Vol. EI-11, No. 1, March 1976, 8-11.
- [3] Witos F., Opilski A., Urbańczyk M., Zaawansowane metody emisji akustycznej w pomiarach wyładowań niepełnych, *XLIII Otwarte Seminarium z Akustyki*: Gliwice 1996, 739-742.
- [4] Witos F., Badania wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2008.
- [5] Witos F., Szerszeń G., Opilski Z., Setkiewicz M., Olszewska A., Duda D., Maźniewski K., Szadkowski M., Calibration and laboratory testing of computer measuring system 8AE-PD dedicated for analysis of acoustic emission signals generated by partial discharges within oil power transformers, *Archives of Acoustics* 2017 vol. 42 no. 2, 297-311.
- [6] UltraTEV Plus2 Operating Manual, EA Technology, version: 5, October 2016.
- [7] Maistry N., Schutz R., Cox E., The quantification of corona discharges on high voltage electrical equipment in the UV spectrum using a corona camera, *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering*, IEEE 2018.
- [8] Urbaniec I., Widma emisyjne wyładowań elektrycznych występujących na powierzchniach dielektryków ceramicznych, Autoreferat pracy doktorskiej, Opole 2016.
- [9] Boczar T., Zmarzły D., Frącz P.: Comparative Studies of Partial Discharge Using Acoustic Emission Method and Optical Spectroscopy, *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2015, 740-743.
- [10] Kołtunowicz W., Badania diagnostyczne izolacji gazowych rozdzielni wysokiego napięcia, *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka z. 124*, Warszawa 2003.
- [11] K.-M. Shong, Y.-S. Kim, The characteristics of UV strength according to corona discharge from polymer insulators using a UV sensor and optic lens, *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 26, no. 3, July 2011 1579-1584
- [12] Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Maźniewski K., Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji WNZ w wysokonapięciowych układach izolacyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 80 (2004), nr 9, 821-824.
- [13] Partial Discharge Detector Type TE – 571. Operating Manual, Version 4.0, 2000.
- [14] Duda, D., Gacek, Z., Maźniewski, K., Szadkowski, M., Pomiar wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka*, z.4, Gliwice 2015, 95-108.