

doi:10.15199/48.2024.12.34

Zastosowanie obrazów optycznych i rozszerzonych obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych dla obserwacji procesu drzewienia elektrycznego w izolacji silikonowej

Streszczenie. Drzewienie elektryczne występuje w dielektrykach stałych pod wpływem silnego pola elektrycznego, obecnego na przykład na ostrych wierzchołkach elektrod igłowych. Jego obecność obniża wytrzymałość elektryczną materiału, prowadząc często w efekcie końcowym do przebicia elektrycznego. W artykule przedstawiono wyniki badań nad inicjowaniem i rozwojem procesów drzewienia elektrycznego w optycznie przejrzystej izolacji silikonowej. Rozwój drzewek elektrycznych obserwowano metodą optyczną (mikroskop optyczny z kamerą cyfrową) oraz metodą elektryczną, stosując akwizycję wzorców fazowo rozdzielczych wyładowań niezupełnych (PRPDP). Rozwój drzewka elektrycznego był obserwowany przez rejestrację obrazów φ - q - n z interwałów 1-minutowych, aż do przebicia. Tak rejestrowane „chwilowe” PRPDP były przetwarzane do postaci akumulowanych PRPDP, a uzyskane wyniki były analizowane statystycznie, wraz z ich odniesieniem do wyników obserwacji optycznych.

Abstract. Electric treeing occurs in solid dielectrics under the influence of a strong electric field, present, for example, at the sharp tips of needle electrodes. Its presence reduces the electrical strength of the material, often leading to electrical breakdown. The article presents the results of research on the initiation and development of electrical treeing processes in optically transparent silicone insulation. The development of electrical trees was observed using the optical method (optical microscope with a digital camera) and the electrical method, using the acquisition of phase-resolved partial discharge patterns (PRPDP). The development of the electric tree was observed by recording φ - q - n images at 1-minute intervals until breakdown. The "instantaneous" PRPDPs recorded in this way were processed into the form of accumulated PRPDPs, and the obtained results were statistically analyzed and related to the results of optical observations (The use of optical images and extended phase-resolved PD patterns to observe the electrical treeing process in silicone insulation).

Słowa kluczowe: drzewienie elektryczne, wyładowania niezupełne (wnz), obrazy fazowo-rozdzielcze wnz, silikon, obrazy optyczne.

Keywords: electrical treeing, partial discharges (PD), phase-resolved PD patterns, silicone, optical images.

Wstęp

Występowanie wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia jest niekorzystnym, fizycznym procesem degradacyjnym, który ma istotny wpływ na niezawodność ich działania oraz długość czasu życia. W procesach wytwarzania układów izolacyjnych stosuje się materiały i technologie, które winny zapewnić ich wysoką jakość. Oznacza to konieczność zapewnienia wysokiej jednorodności struktury izolacji, bez defektów mających charakter:

- nieciągłości struktury wewnętrznej dielektryka;
- pęknięć lub rozwarstwień (delaminacji);
- ostrych występow przewodzących lub półprzewodzących wewnątrz układu izolacyjnego;
- wewnętrznych inkluzji gazowych;
- wewnętrznych wtrącin wypełnionych wodą;
- zanieczyszczeń mających postać cząstek stałych przewodzących lub dielektrycznych.

Obecnie, wysokonapięciowym układom izolacyjnym stawiane są wymagania dotyczące przede wszystkim: akceptowalnych kosztów wytwarzania, redukcji wymiarów geometrycznych (przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej i niezawodności działania) oraz aspektów ekologicznych [1-4]. Układy te są podczas swej pracy narażone na różnego rodzaju czynniki wywołujące lub stymulujące procesy starzeniowe, prowadzące do degradacji struktur i właściwości dielektryków [5, 6]. Jednym z istotnych problemów technicznych, który może pojawić się podczas eksploatacji izolacji elektrycznej jest formowanie się drzewek elektrycznych w dielektrykach stałych [5-10].

Drzewienie elektryczne to złożony proces fizykochemicznej, wewnętrznej degradacji materiału izolacyjnego (dielektryka) spowodowany lokalną, energetyczną aktywnością wyładowań niezupełnych (wnz) [5, 6, 10]. Szczególnym, charakterystycznym efektem ich działania jest powstawanie, zwykle dość skomplikowanej geometrycznie, wielogałęziowej struktury wyerodowanych kanałów przewodzących lub nieprzewodzących [5], wewnątrz materiału izola-

cyjnego. Często finalnym skutkiem rozwoju drzewienia elektrycznego jest przebicie, co sprawia, że jest ono wciąż ważnym problemem technicznym, ze względu na jego wkład w skrócenie czasu życia układów izolacyjnych i powodowane tym skutki ekonomiczne.

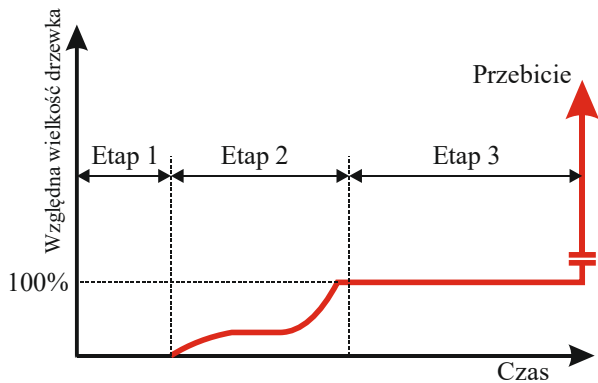
Prace rozwojowe w obszarze produkcji urządzeń elektroenergetycznych dotyczą przede wszystkim opracowania nowych materiałów i doskonalenia technologii wytwarzania, które mają zapobiegać powstawaniu drzewienia lub zwiększać odporność izolacji na czynniki je inicjujące. W obszarze eksploatacji, problematyka prac dotyczy przede wszystkim opracowania metod diagnostycznych pozwalających na wykrycie obecności drzewienia z odpowiednim wyprzedzeniem. Pomimo tego, że zjawisko to jest od dawna znane i rozpoznawane, to jednak pozostaje ono aktualnym tematem badawczym, również w obszarze badań podstawowych. W ich ramach prowadzone są prace eksperymentalne a także rozważania teoretyczne i symulacje numeryczne, służące lepszemu poznaniu i opisowi tego zjawiska [5, 10].

W procesie rozwoju drzewka elektrycznego w materiale izolacyjnym stałym wyróżnia się trzy główne (podstawowe) jego etapy (rys. 1). Znajdują one swoje uzasadnienie oraz odpowiedni opis w opracowanych modelach mechanizmów fizykalnych drzewienia [6, 7].

Etap 1: Inkubacja - Etap inkubacji to początek procesu drzewienia elektrycznego. Zachodzi w czasie od podania napięcia na elektrody do zauważalnej inicjacji drzewienia. Jest on niemożliwy do wykrycia za pomocą klasycznych metod pomiaru wnz [6, 7].

Etap 2: Propagacja - Za początek drugiego etapu uważa się wzrost pierwszych małych gałęzi, do momentu kiedy pierwsza gałązka osiągnie przeciwną elektrodę [7].

Etap 3: Stan przedprzebienny i przebiecie – Stan ten charakteryzuje się dojściem pierwszej gałęzi do przeciwnej elektrody oraz poszerzaniem innych, już istniejących gałęzi, do postaci kanałów „rurowych” [7]. Efektem końcowym jest trwałe, fizyczne uszkodzenie materiału izolacyjnego.



Rys.1. Etapy rozwoju drzewka elektrycznego [7]

W artykule przedstawiono metodę oraz rezultaty obserwacji rozwoju drzewienia elektrycznego w optycznie przejrzystym silikonie elektroizolacyjnym. W tym celu zastosowano równoczesną rejestrację obrazów optycznych oraz obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niepełnych PRPDP (ang. *Phase-Resolved Partial Discharge Patterns*). Podczas wzrostu drzewek elektrycznych, od etapu inkubacji, aż do wystąpienia przebicia, rejestrowano co 60 sekund mikroskopowe zdjęcie drzewka oraz:

- obraz chwilowy S.PRPDP, tj. zarejestrowany w ciągu 60 sekund obraz fazowo-rozdzielczy φ - q - n ;
- obraz akumulowany A.PRPDP, tj. wyznaczony obliczeniowo obraz fazowo-rozdzielczy φ - q - n , który jest sumą wszystkich zarejestrowanych aż do danej chwili obrazów S.PRPDP.

Obrazy zarejestrowane S.PRPDP i obliczone A.PRPDP są podstawą dla określenia zestawu parametrów, które charakteryzują zbiory impulsów wnz [6]:

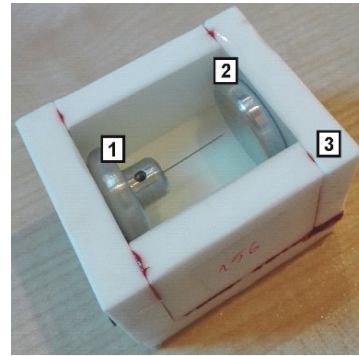
- całkowita liczba N impulsów wnz, zgromadzonych w obrazie fazowo-rozdzielczym φ - q - n ;
- całkowity ładunek pozorny Q_c , przeniesiony przez impulsy wnz, odwzorowany w obrazie fazowo-rozdzielczym φ - q - n ;
- całkowita energia E_c impulsów wnz, zgromadzonych w obrazie fazowo-rozdzielczym φ - q - n .

Przedstawienie zastosowanej metody badawczej jest zilustrowane wynikami uzyskanymi podczas badań rozwoju drzewek elektrycznych w układzie modelowym.

Opis metody oraz stanowiska badawczego

W dielektrykach transparentnych, czyli przejrzystych optycznie, możliwa jest wizualna obserwacja procesów rozwoju drzewienia elektrycznego. W pozostałych materiałach izolacyjnych możliwa jest jedynie obserwacja pośrednia, np. poprzez detekcję, rejestrację i analizę parametrów wyładowań niepełnych. Jest to możliwe wyłącznie wtedy, gdy proces rozwoju drzewka jest związany z powstawaniem impulsów prądu elektrycznego. Ma to miejsce, gdy w dielektryku stałym inicjowane są impulsowe formy wyładowań, powodujących degradację jego struktury wewnętrznej. W każdym przypadku obraz wzrostu drzewka elektrycznego jest kumulatywny (czyli jego aktualny stan jest „zapamiętaną” historią działania wnz na strukturę materiału), ale równocześnie charakteryzuje się zmienną w czasie dynamiką [5, 9, 11]. Z tego powodu, dla poprawnego scharakteryzowania procesu należy stosować takie parametry opisowe, który będą mogły to odpowiednio odzwierciedlać.

W opisanych badaniach drzewienia elektrycznego w silikonie, zastosowano układ modelowy elektrod *ostrze-płaszczyzna* (rys. 2), który cechuje bardzo silne pole elektryczne na końcu elektrody igłowej [5].



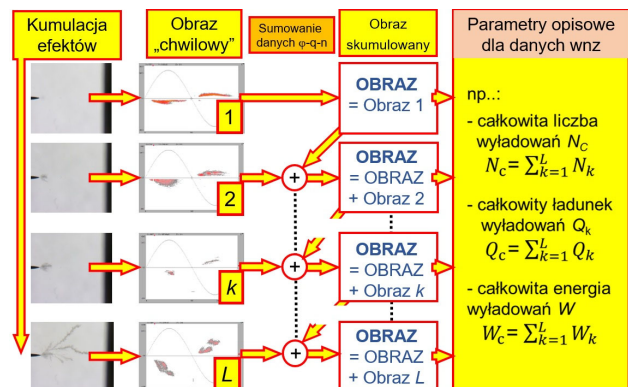
Rys.2. Próbkę silikonową z układem elektrod ostrze-płaszczyzna: 1. Elektroda WN – stalowa elektroda igłowa w profilowanym uchwycie aluminiowym. 2. Elektroda uziemiona - płaska elektroda aluminiowa o średnicy 30 mm i profilowanych krawędziach. 3. Obudowa z płyt teflonowych, ustalająca pozycję układu elektrod i jednocześnie będąca pojemnikiem dla badanego silikonu

Dla detekcji i rejestracji impulsów wnz zastosowano układ pomiarowy o właściwościach i parametrach zgodnych z wymaganiami normy IEC 60270 [12]. Dane pomiarowe były gromadzone w macierzy $N(\varphi, q)$ o rozmiarze 256x256 elementów, umożliwiającą przedstawienie wyników w postaci obrazów fazowo-rozdzielczych S.PRPDP i A.PRPDP. W skład stanowiska pomiarowego wchodziły:

- źródło wysokiego napięcia AC (transformator probierczy 60 kV), wolne od wyładowań niepełnych (poziom szum $< 0,6$ pC);
- kondensator sprzęgający C_k z impedancją pomiarową Z_m oraz dzielnikiem wysokiego napięcia;
- system rejestracji impulsów wnz (*ICMsystem*, *Power Diagnostix*) wraz z komputerem do akwizycji danych;
- mikroskop optyczny wyposażony w kamerę cyfrową o wysokiej rozdzielczości.

Podstawowy interwał czasu, zastosowany dla rejestracji stanu i analizy dynamiki rozwoju drzewka elektrycznego, wynosił 60 sekund. Kamera cyfrowa oraz system do pomiaru i akwizycji obrazów fazowo-rozdzielczych były nadzorowane przez wspólny, synchronizowany system rejestracji danych. Algorytm rejestrowania kolejnych obrazów chwilowych S.PRPDP oraz tworzenia na ich podstawie obrazów akumulowanych A.PRPDP przedstawia schemat blokowy, zaprezentowany na rysunku 3.

Obraz chwilowy oraz obliczone na jego podstawie parametry statystyczne reprezentują aktualny stan drzewka elektrycznego, jako źródła wnz. Z kolei obraz akumulowany oraz obliczone na jego podstawie parametry statystyczne odzwierciedlają sumaryczne oddziaływanie wszystkich impulsów wnz, które do tego stanu doprowadziły.

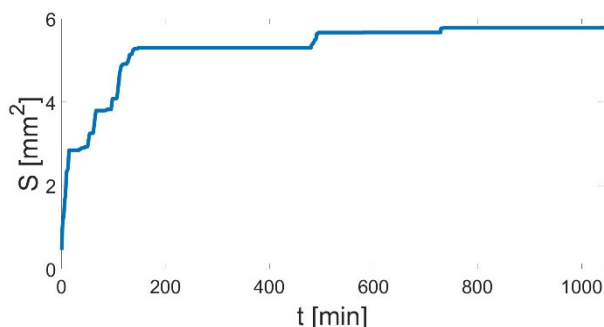


Rys.3. Algorytm wyznaczania obrazów akumulowanych A.PRPDP na podstawie obrazów chwilowych S.PRPDP

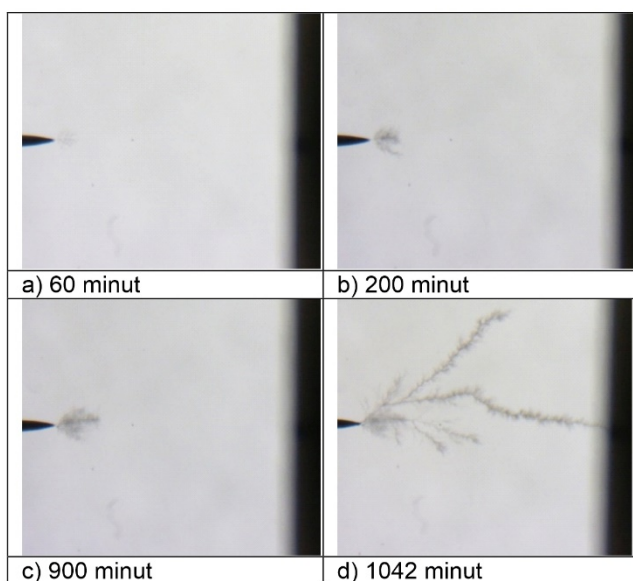
Wyniki pomiarów i ich analiza

Podczas realizacji badań obserwowano rozwój drzewek elektrycznych w silikonie, inicjowanych na końcu elektrody igłowej o promieniu $25\ \mu\text{m}$. Do elektrody igłowej ze stali nierdzewnej, umieszczonej w próbce silikonu, podawano napięcie przemiennie o wartości $U_{\text{rms}} = 11,5\ \text{kV}$.

Eksperyment, którego rezultaty (przetworzone numerycznie w programie Matlab) przedstawiono na rysunkach od 4 do 7, trwał 1042 minuty. Uzyskane wyniki wskazują wyraźnie na silnie nieliniowe tempo przyrostu drzewka elektrycznego w czasie (rys. 4 i 5). Po początkowym okresie aktywnej inkubacji drzewka, trwającym około 60 minut, nastąpił długi okres niskiej aktywności procesu z widocznymi zastojami, trwający około 800 minut. Po około 1000 minutach proces drzewienia w sposób istotny nasilił się, co skutkowało przyspieszeniem wzrostu drzewka, aż do przebicia. Na rysunku 5d przedstawiono ostatni obraz uzyskany podczas eksperymentu, bowiem w kolejnej minucie nastąpiło przebicie elektryczne próbki.



Rys.4. Pole powierzchni przekroju drzewka elektrycznego widzianego od góry zgodnie z kierunkiem rejestracji mikroskopowej

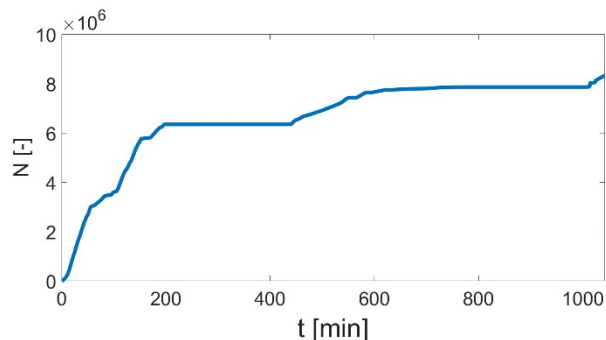


Rys.5. Zarejestrowane obrazy optyczne drzewka elektrycznego w kolejnych etapach jego rozwoju

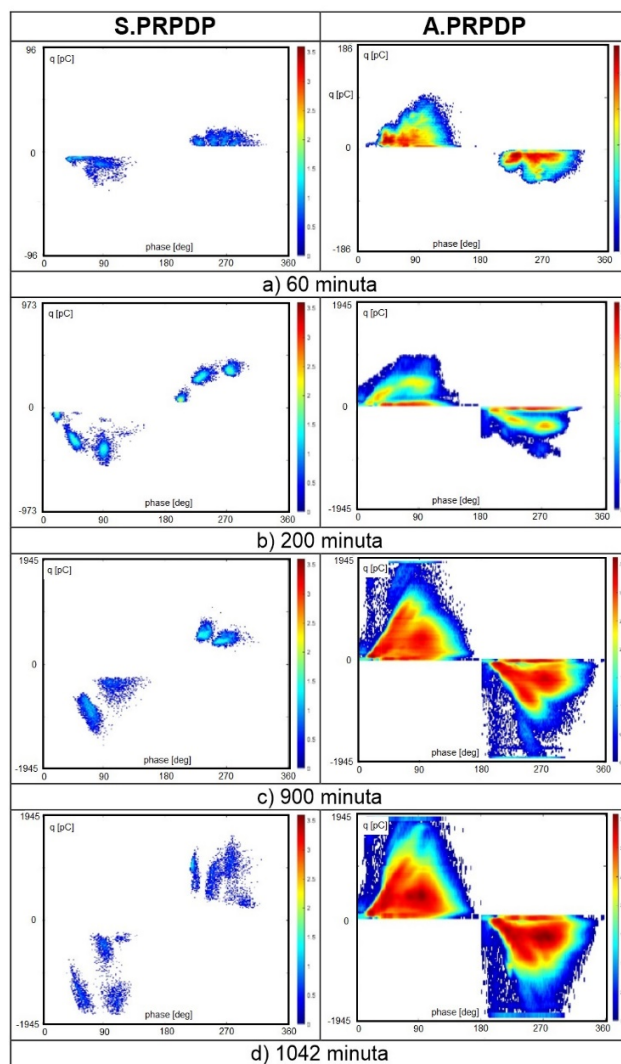
Zarejestrowane obrazy chwilowe S.PRPDP oraz uzyskane na ich podstawie akumulowane obrazy A.PRPDP wyraźnie korelują z obrazami drzewka elektrycznego obserwowanego optycznie. Na rysunku 6 przedstawiono zmianę całkowitej liczby N rejestrowanych impulsów wnz podczas całego eksperymentu, to jest od momentu załączenia napięcia aż do przebicia elektrycznego. Szybszy wzrost drzewka związany jest z impulsami wnz powstającymi po 900. minucie eksperymentu. Silnie destrukcyjne oddziaływanie wyładowań niepełnych w tym czasie jest związane

ze wzrostem wartości ich ładunków pozornych i zmianie położenia fazowego. Obrazy chwilowe S.PRPDP i akumulowane A.PRPDP dla wybranych chwil czasowych (rys. 7) pokazują, że zmiany te mają taki kierunek, że efektem powinien być wzrost energii impulsów wnz. Parametry obliczone dla zbiorów impulsów wnz potwierdzają, że tak właśnie jest.

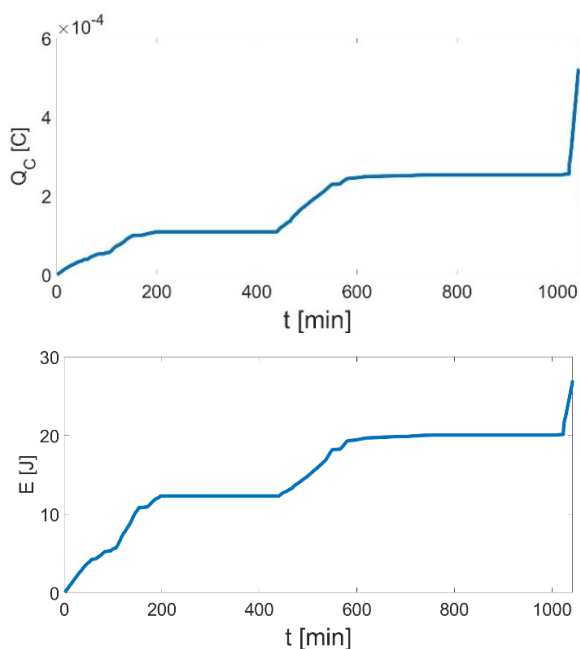
W okresie tuż przed przebiciem (od około 1000. minuty) następuje wyraźny, bardzo szybki wzrost całkowitego ładunku pozornego Q_c oraz całkowitej energii impulsów wnz E_c (rys. 8). Jest zauważalne, że całkowity ładunek oraz energia wyładowań silnie korelują ze sobą w całym czasie trwania eksperymentu.



Rys.6. Całkowita liczba wyładowań wnz w trakcie trwania całego eksperymentu



Rys.7. Obrazy fazowo-rozdzielcze chwilowe S.PRPDP oraz akumulowanie A.PRPDP, dla wybranych chwil czasu



Rys.8. Zmiany całkowitego ładunku Q_c oraz całkowitej energii E_c impulsów wnz rejestrowanych w czasie eksperymentu

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że zmiany zachodzące w obrazach fazowo-rozdzielczych wyładowań niepełnych, zarówno chwilowych S.PRPDP, jak i akumulowanych A.PRPDP umożliwiają obserwację i rozpoznawanie kolejnych etapów procesu rozwoju drzewienia elektrycznego w próbce silikonowej.

Obrazy fazowo-rozdzielcze, chwilowe i akumulowane pozwalają na dokonanie analizy porównawczej i oceny zmian wartości ładunku pozornego i energii impulsów wnz, powstających w rozbudowującej się wraz z upływem czasu strukturze drzewka elektrycznego. Zaobserwowano, że wraz z rozwojem drzewka:

- wzrasta względny udział impulsów wnz o większym ładunku pozornym;
- impulsy wnz grupują się bliżej kątów fazowych odpowiadających wartości szczytowej napięcia AC.

Zmiany te powodują zwiększenie udziału impulsów wnz o wyższej energii w całym zbiorze impulsów.

Należy zauważyć, że przetworzone, rozszerzone obrazy fazowo-rozdzielcze wnz, umożliwiają analizę indywidualnych cech zbiorów impulsów wyładowań ukrytych w rozkładach energii $W(\varphi, q)$ lub rozkładach ładunku $Q_c(\varphi, q)$ [11]. Otrzymane obrazy S.PRPDP i obrazy akumulowane A.PRPDP są użytecznym narzędziem dla analizy zarejestrowanych impulsów wnz, pozwalającym na obserwację faz rozwoju drzewek elektrycznych w dielektryku stałym, od ich inkubacji aż do przebicia.

Odniesienie wyników rejestracji impulsów wnz do wyników rejestracji obrazów optycznych rozwoju drzewek elektrycznych pozwala na obiektywizację rozpoznawania etapów rozwoju drzewienia.

Autorzy: mg inż. Michał Bonk, E-mail: bonkm@agh.edu.pl, dr hab. inż. Paweł Zydróż, prof. AGH, E-mail: pzydron@agh.edu.pl, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

LITERATURA

- [1] Tanmaneeprasert T., Lewin P.; The use of partial discharge analysis for the diagnosis of electrical ageing in polymeric insulation containing cavities, *Proc. 2016 IEEE Electr. Insul. Conf. (EIC)*, Montréal, Canada, 19-22 June 2016, pp. 383-387
- [2] Morette N., Ditchi T., Oussar Y.; Partial discharges measurements and analysis as an evaluation tool for the reliability of polymeric-insulated cables used under HVDC conditions; *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*; Budapest, Hungary; 01-05 July 2018
- [3] Ilias H., Othman M., Tunio M., Bakar A., Mokhlis H., Chen G., Lewin P.L., Ariffin A.; Measurement and simulation of partial discharge activity within a void cavity in a polymeric power cable model; *IEEE Int. Conf. Solid Dielectrics*; Bologna, Italy; June 30 – July 4, 2013
- [4] Lim Y., Koo J.; Comparative analysis of partial discharge patterns from different artificial defects by means of conventional phase-resolved partial discharge analysis and a novel chaotic analysis of partial discharge; *Journal of the Korean Physical Society*; 42 (2003), No. 6, pp. 755-764
- [5] Dissado L. A., Fothergill J. C.; *Electrical degradation in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, United Kingdom, London; 1992
- [6] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydróż P.; Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia; Polska Akademia Nauk - Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2001
- [7] Vogeslang R., Fruth B., Farr T., Fröhlich K.; Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements; *15th Int. Conf. Electrical Machines, ICEM 2002*; Brugge – Belgium, August 2002
- [8] Zhang Y., Zhou, Zhang L., Teng C., Hu D., Liu R, Electrical tree growth and its partial discharge pattern in silicone rubber under AC voltages, *2020 IEEE Int. Conf. High Voltage Eng. and Application (ICHVE)*, Beijing, China, pp. 1-4
- [9] Morita M., Wu K., Komori F., Suzuoki Y., Investigation of electrical tree propagation from water tree by utilizing partial discharge and optical observation, *Proc. 7th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, Japan, 2003, vol. 3, pp. 891-894
- [10] Danikas M.G., Vardakise G. E., A review on electrical treeing in solid dielectrics, *The Journal of CPRI*, 5 (2009), no.1, pp. 75–88
- [11] Zydróż P., Bonk M., Roehrich J., Mikrut P., Szafraniak B, Application of the extended phase-resolved PD patterns for analysis of PD activity in epoxy resin insulation, *2018 IEEE Conference Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Kościelisko, Poland, 2018, pp. 1-4
- [12] IEC 60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements ed. 3 (2000-12-21)