



Tadeusz Łaś*

POMIAR TEMPERATURY POWIERZCHNI DIELEKTRYKÓW STAŁYCH PODCZAS ODDZIAŁYWANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: Pomiary przyrostów temperatury powierzchni dielektryków pod wpływem wyładowań niepełnych przeprowadzono w sposób nieinwazyjny za pomocą systemu pomiarowego mierzącego wielkość promieniowania podczerwonego emitowanego przez tę powierzchnię. Pomiary prowadzono w układzie elektrod ostrze–dielektryk–płyta przy napięciach przemiennych o częstotliwości od 200 do 1200 Hz. Badaniom poddano żywicę epoksydową z wypełniaczem Al_2O_3 . Stwierdzono, iż przyrosty temperatur osiągają wartości, mogące powodować degradację cieplną dielektryków.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, dielektryki, degradacja materiału, wzrost temperatury, pomiary nieinwazyjne, podwyższona częstotliwość napięcia

1. Wstęp

Efekty wzrostu temperatury dielektryków pod wpływem wyładowań niepełnych (WNZ) są niejednokrotnie obserwowane w badaniach starzenia i odporności materiałów izolacyjnych na WNZ. Brak jednakże jednoznacznych opinii na temat wynikających stąd zagrożeń dla układów izolacyjnych, jak też wiarygodnych ocen wielkości przyrostów temperatury dla różnych dielektryków w zależności od parametrów WNZ i parametrów prób. Mason [1] w 1951 roku twierdził, iż wyładowania przekraczające 10 pC i o energii większej niż 10^{-7} J powodują natychmiastowy wzrost temperatury rzędu kilkuset K. Opinię tę powtarza w latach następnych [2, 3] stwierdzając przy tym, że przy większych naprężeniach i częstotliwościach działanie kolejnych wyładowań w tym samym miejscu może spowodować skumulowany wzrost temperatury,

* Instytut Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

prowadząc do degradacji termicznej lub do przebicia cieplnego; nie popiera jednak tej tezy wynikami badań. Kevin *et al.* [4], powołując się na obliczenia innych autorów utrzymują, że wzrost temperatury jest wystarczający do spowodowania zmian związanych z cieplnym utlenianiem, jednakże nie wystarczający do przebicia cieplnego. Goldman i Sigmond [5], również powołując się na prace obliczeniowe innych badaczy, mówią o możliwości wystąpienia zmian strukturalnych i lokalnym topieniu materiałów izolacyjnych w miejscu trafienia przez dodatni strimer. Starr [6] na podstawie przybliżonego rachunku oczekuje wzrostu temperatury powierzchni rzędu kilkuset stopni.

Pomiary przyrostów temperatury pod wpływem wyładowań powierzchniowych przeprowadzili Ahmed i Ahmed [7] w układzie płaskich elektrod, za pomocą termopary umieszczonej w otworze w elektrodzie uziemionej, stykającej się z powierzchnią próbki poliimidowej. Pomiary były wykonywane w funkcji napięcia do 12 kV i częstotliwości od 1 do 60 kHz. Intensywność WNZ nie była określana. Zmierzone przyrosty temperatury wynosiły ok. od 0°C dla 1 kHz do 60°C dla 30 i 60 kHz przy napięciach 5–6 kV. Można się spodziewać, iż ze względu na układ elektrod udział w zmierzonych przyrostach temperatury miały straty dielektryczne w materiale próbki. Jednocześnie punkt pomiaru temperatury nie odpowiadał obszarowi działania WNZ, tj. wyładowań krawędziowych wokół elektrody wysokonapięciowej, co musiało spowodować niedoszacowanie wyników pomiarów.

Ikeda i Tanaka [8] poddawali folie polimerowe działaniu WNZ we wtrącinie przy quasi-jednorodnym rozkładzie pola elektrycznego. Badania prowadzono przy napięciu do 6 kV i częstotliwościach 50 Hz do 5 kHz. Pomiar temperatury dokonywany był przy pomocy termopary, umieszczonej po przeciwnej stronie próbki w stosunku do powierzchni, poddawanej działaniu WNZ. Stwierdzono przyrosty temperatury rzędu kilkunastu stopni. I w tym przypadku można się spodziewać wyższych przyrostów po stronie bezpośrednio atakowanej przez WNZ.

Rodehed *et al.* [9] zastosowali kamerę termowizyjną, wykorzystując emisję promieniowania podczerwonego z powierzchni płaskiej elektrody o średnicy 30 mm, pod którą umieszczona była folia polipropylenowa, poddawana działaniu WNZ występujących w szczelinie pomiędzy folią i elektrodą. Pomiary wykonywane były przy napięciach do 6 kV i częstotliwości 1 kHz. Zmierzone wartości temperatury elektrody nie przekraczały ok. 60°C, natomiast temperatura folii PP nie została w pomiarach określona. Również i tu można się spodziewać wpływu strat dielektrycznych.

Obecny stan wiedzy na temat związków pomiędzy WNZ a przyrostem temperatury dielektryka nie pozwala wykluczyć, iż jednym z mechanizmów starzenia izolacji stałej w układach izolacyjnych wysokiego napięcia związanych z występowaniem WNZ może być termiczna degradacja dielektryka. Określenie charakteru, wielkości i szybkości degradacji, jej zależności od parametrów WNZ wymaga wiarygodnej oceny na drodze eksperymentalnej wartości przyrostów temperatury powierzchni dielektryka w czasie działania na nią WNZ. Pomiar temperatury powinien być dokonany bezpośrednio w miejscu, poddanym działaniu wyładowań w sposób nieinwazyjny, tj. bez odkształcenia pola elektrycznego i temperaturowego przez aparaturę pomiarową. Tych warunków nie spełnia np. zastosowanie termopary, natomiast może spełnić zdalny pomiar energii promieniowania podczerwonego (IR), emitowanego bezpośrednio przez

powierzchnię atakowaną przez WNZ. Taką metodę i wyniki pomiarów przedstawiono w dalszej części referatu.

2. Pomiary

Pomiary wykonywano w układzie elektrod: ostrze – dielektryk – płyta. Elektrody ostrzowe wykonane były ze stali nierdzewnej o średnicy 1,5 mm, z ostrzem stożkowym o kącie wierzchołkowym 60° i promieniem krzywizny $50\mu\text{m}$. Źródłem napięcia był przekładnik napięciowy 22000/100 V, zasilany z wzmacniaczy o mocy 200 W i paśmie częstotliwości 20 Hz–20 kHz, sterowanych generatorem RC napięcia sinusoidalnego. Pomiar wyładowań niezupełnych wykonywany był detektorem Tettex 9126. Napięcie probiercze mierzono za pomocą pojemnościowego dzielnika napięcia, z którego sygnał podawany był na kilowoltomierz detektora WNZ. Kształt sinusoidy wysokiego napięcia i impulsy WNZ kontrolowane były na ekranie oscyloskopu cyfrowego. Intensywność WNZ określano pomiarem średniego prądu WNZ I oraz ładunku maksymalnego q_m . Badania wykonywano w zakresie częstotliwości od 200 do 1200 Hz i wartości napięcia do 22 kV. Temperatura otoczenia w czasie pomiarów wynosiła $20\pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza $35\pm 5\%$.

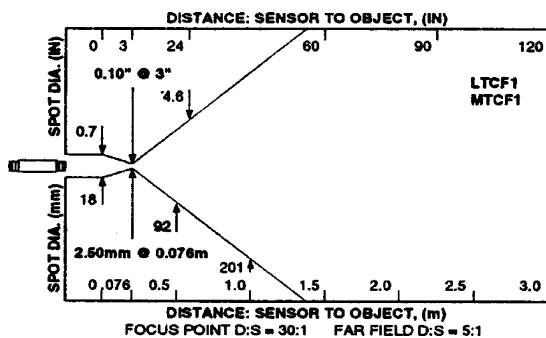
Badania prowadzono na próbkach o wymiarach 150×150 mm i grubości 2 mm, wykonanych z żywicy epoksydowej Epidian 2 (EP) z wypełniaczem Al_2O_3 . Rezystancja powierzchniowa próbek wynosiła $10^{14}\Omega$. Pomiary wykonywano dla elektrody ostrzowej stykającej się z próbką ($a = 0$) oraz przy odstępach elektrody od powierzchni $a = 0,5; 5; 10$ mm.

Do pomiaru temperatury zastosowano system pomiarowy mierzący zdalnie wielkość energii promieniowania podczerwonego, emitowanego przez obserwowaną powierzchnię. System składa się z głowicy pomiarowej (sensora) połączonej kablem z monitorem — panelem odczytowym z wyświetlaczem i elementami sterującymi. Za pomocą celownika optycznego ustawiano optykę głowicy pomiarowej na punkt powierzchni próbki, znajdujący się w osi elektrody ostrzowej. Układ elektrod umożliwiał bezpośrednią obserwację miejsca, atakowanego przez WNZ. Charakterystyka przestrzenna optyki sensora (rys. 1) pozwoliła na pomiar temperatury powierzchni plamki o średnicy 2,5 mm, odpowiadającej w przybliżeniu wielkości najgorętszego miejsca pod elektrodą ostrzową. Geometria przestrzenna układu elektrod z badaną próbką i głowicą pomiarową pozwalała na wykonywanie pomiarów temperatury podczas występowania WNZ przy włączonym wysokim napięciu. Odległość sensora od powierzchni próbki i elektrod była wystarczająca, by zapewnić spełnienie warunku braku wpływu systemu pomiarowego na rozkład pola elektrycznego i temperaturowego.

Miernik emisji promieniowania podczerwonego charakteryzuje się następującymi parametrami:

- zakres mierzonych temperatur: $0\text{--}800^\circ\text{C}$,
- zakres spektralny: $8\text{--}14\mu\text{m}$,
- dokładność pomiaru: $\pm 1\%$ odczytu lub $\pm 1^\circ\text{C}$, wartość większa,
- powtarzalność: $\pm 0,5\%$ odczytu, ± 1 cyfra,
- wyświetlacz (w panelu odczytowym): 4 cyfry LED,

- czas odpowiedzi (95% odpowiedzi): 370 ms,
- emisyjność: 0,1 do 1,0 — regulowana.



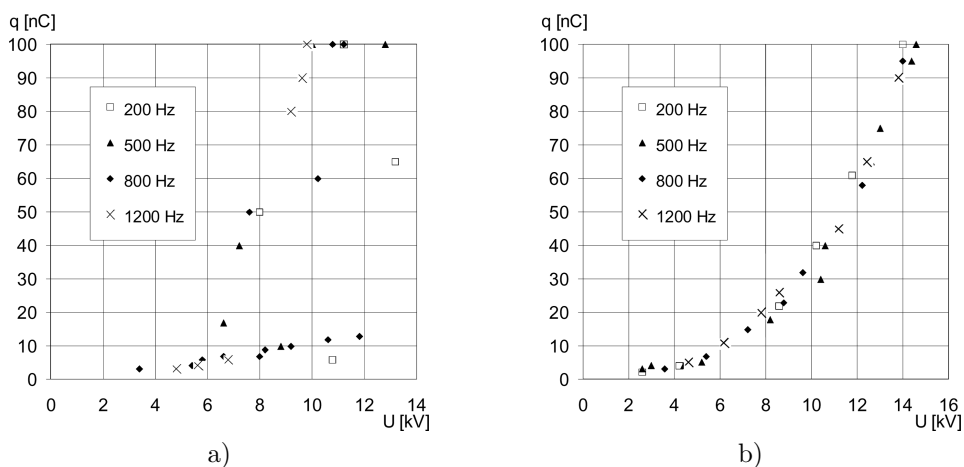
Rys. 1. Charakterystyka przestrzenna optyki sensora termometru — miernika emisji promieniowania podczerwonego [10]

Orientacyjna wartość emisyjności dla polimerów wynosi $\varepsilon = 0,95$ [10]. Wartość tę sprawdzono dla EP, porównując temperaturę powierzchni badanej próbki wskazywaną przez system pomiarowy IR ze wskazaniem wzorcowego miernika temperatury.

3. Wyniki pomiarów

Na rysunku 2, w celu bliższego określenia warunków narażeń powodujących wzrost temperatury dielektryka, przedstawiono charakterystyki maksymalnego ładunku q_m w funkcji napięcia dla odległości $a = 0$ i 0,5 mm i dla częstotliwości $f = 200, 500, 800$ i 1200 Hz.

Wartość q_m nie zależy od częstotliwości. Stromy wzrost ładunku i duży rozrzut dla $a = 0$ tj. dla styku elektrody z powierzchnią próbki (rys. 2a) wyraźnie wskazuje na inny niż dla $a > 0$ mechanizm wyładowań. Mają one charakter iskier ślizgowych. Z wykresu na rys. 2a można określić ich napięcie początkowe U_0 , równe ok. 7 kV. Powyżej U_0 rozwój wyładowań ślizgowych powoduje wystąpienie dużej i rosnącej z napięciem niestabilności mierzonych wielkości; pojawiają się znaczne wahania prądu i temperatury przy tej samej wartości napięcia. Dla odstępów > 0 aż do ok. 10 mm występują wyładowania strimerowe. Powyżej tej odległości charakter wyładowania stopniowo się zmienia, przechodząc w ulot, jak dla ostrza samotnego [11]. Oznacza to malejący wpływ obecności dielektryka na mechanizm WNZ oraz malejący wpływ WNZ na temperaturę powierzchni. Dla $a < 0$ pojawiają się też iskry ślizgowe lecz o mniejszej niż dla $a = 0$ intensywności i przy wyższych napięciach, zależnych od odległości elektrody od próbki i częstotliwości. Rozwój wyładowań ślizgowych przy wzroście napięcia i w tym przypadku powoduje wystąpienie niestabilności temperatury, wskazujące na możliwość zachwiania równowagi cieplnej w miejscu wydzielenia energii wyładowań na powierzchni materiału.



Rys. 2. Ładunek maksymalny WNZ q_m w funkcji napięcia dla odstępów a) $a = 0$ mm i b) $0,5$ mm

W tabeli 1 podano przyrosty temperatury powierzchni ΔT w funkcji odległości elektrody ostrzowej od powierzchni próbki, przy różnych wartościach średniego prądu WNZ, zmierzone przy częstotliwości 800 Hz. Temperatura osiąga wartość ustaloną warunkami próby praktycznie natychmiast. Szybki wzrost temperatury powierzchni dielektryka dzięki wzrostowi termicznej aktywacji elektronów z pułapek może odpowiadać za obserwowany w pomiarach, np. [11, 12] wzrost średniego prądu WNZ w początkowym okresie narażania. Zachodząca w tym czasie modyfikacja powierzchni i zmniejszenie rezystancji powierzchniowej może być przyczyną następującego potem malenia i stabilizacji wartości I .

Tabela 1. Przyrosty temperatury ΔT w funkcji odległości elektrody ostrzowej od powierzchni próbki przy różnych wartościach prądu WNZ; częstotliwość 800 Hz

a [mm]	ΔT [°C]					
	$20\mu\text{A}$	$50\mu\text{A}$	$100\mu\text{A}$	$200\mu\text{A}$	$300\mu\text{A}$	$400\mu\text{A}$
0	6	16	18*	24*	27*	32*
0,5	7	20	34	58	74	88
5	6	15	28	37	45	
10	6	14	23	37		

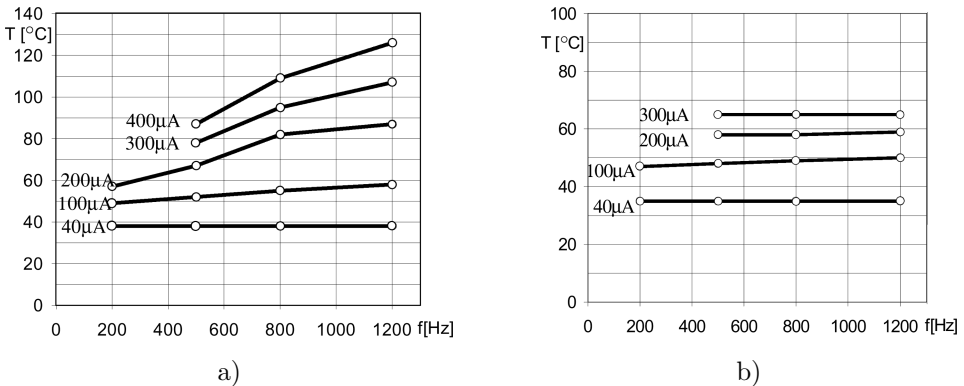
* Wartości średnie, duże rozrzuty spowodowane niestabilnością wyładowań ślizgowych

Największe przyrosty temperatury zmierzono przy $a = 0,5$ mm. Temperatura powierzchni próbki przy częstotliwości 1200 Hz i średnim prądzie WNZ $I = 500\mu\text{A}$ osiągnęła 136°C (rys. 3a), co stanowi dla żywicy epoksydowej zagrożenie degradacją termiczną. Oględziny powierzchni próbek pod mikroskopem optycznym wykazują wyraźne ślady cieplnego działania WNZ w postaci erozji i wytopionych nieregularnych

kraterów. Dla odstępów $a = 0$ mm, mimo niższych osiąganych temperatur, po kolejnych cyklach badań i związaną z tym stopniową degradacją powierzchni próbki nastąpiło przebicie, poprzedzone dużą niestabilnością a następnie wzrostem prądu WNZ i temperatury.

Różnice przyrostów temperatur dla $a = 0$ i $a > 0$ przy podobnych intensywnościach WNZ należy tłumaczyć innymi mechanizmami wyładowań. Temperatura wzrasta wskutek zamiany energii nośników ładunków w kanale wyładowania na energię cieplną na powierzchni dielektryka. Gęstość energii wyładowań ślizgowych przy styku elektrody ostrzowej z powierzchnią jest znacznie mniejsza od gęstości energii, jaka zostaje wydzielona w miejscu uderzenia strimera w powierzchnię dielektryka w przypadku mechanizmu strimerowego przy $a > 0$.

Na rys. 3 przedstawiono wartości temperatury powierzchni T w funkcji częstotliwości dla odstępów $a = 0,5$ i 5 mm i dla r zwraca uwagę dużą zależność T od f dla $a = 0,5$ mm. Można to wytłumaczyć zgodnie z hipotezą Masona skumulowanym działaniem kolejnych strimerów przy malejącym, ze wzrostem częstotliwości, odstępem czasowym pomiędzy nimi. Dla rosnącego odstępów a (rys. 3b) wraz ze wzrostem częstotliwości maleje liczba impulsów WNZ przypadających na jeden okres napięcia, co powoduje zanik efektu kumulacyjnego i zależność ΔT od f zanika.



Rys. 3. Temperatura powierzchni T w funkcji częstotliwości dla odstępów a) $a = 0,5$ mm i b) 5 mm, dla różnych wartości prądu WNZ I . Temperatura otoczenia 22°C

4. Podsumowanie

Badania potwierdziły celowość zastosowanej metody pomiaru przyrostów temperatury. Uzyskano dobrą powtarzalność wyników. Badania potwierdzają, iż wzrost temperatury w przypadku zlokalizowanych wyładowań o dużej intensywności może powodować degradację termiczną powierzchni. W próbach starzeniowych przyspieszanych wzrostem częstotliwości i napięcia należy brać pod uwagę, iż towarzyszący wzrost temperatury może spowodować zmianę mechanizmu starzenia w stosunku do zjawisk występujących przy 50 Hz. Może to ograniczyć zakres stosowanych częstotliwości i napięć.

Literatura

- [1] **Mason J. H.:** *The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges.* Proc. IEE Pt. 1, 98, 1951, pp. 44–59
- [2] **Mason J. H.:** *Discharges.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13 No 4, 1978, pp. 211–238
- [3] **Mason J. H.:** *Enhancing the Significance of PD Measurements.* IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., Vol. 2 No 5, 1995, pp. 876–888
- [4] **Kevin D. W., Julian F. J., Tanaka J.:** *Degradation Product Analysis For Polymeric Dielectric Materials Exposed To Partial Discharges.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13 No 5, 1978, pp. 327–336
- [5] **Goldman M., Sigmoid R. S.:** *Corona and Insulation.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-17 No 2, 1982, pp. 90–104
- [6] **Starr W. T.:** rozdział w książce: **Bartnikas R., McMahan E. J.:** *Engineering Dielectrics.* Vol. 1. Corona measurements and interpretation. Baltimore, Md. 1997, pp. 128–129
- [7] **Ahmed F. S., Ahmed S. A.:** *Breakdown of Solid Insulating Films by Partial Discharge Using Sinusoidal and Pulse Voltages.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13 No 5, 1978, pp. 337–342
- [8] **Ikeda Y., Tanaka T.:** *Frequency Acceleration Characteristics In Internal Discharge Endurance Tests By A Glass-Covered Electrode System.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-17 No 1, 1982, pp. 64–69
- [9] **Rodehed C., Gustafsson A., Gedde U. W.:** *Electrical Strength and Chemical Surface Analysis of Polypropylene after Exposure to External Partial Discharges.* IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-25 No 6, 1990, pp. 1066–1076
- [10] Thermalert T30 series. *Noncontact Temperature Measurement.* Operators manual.
- [11] **Łaś T., Słowikowska H., Słowikowski S. J.:** *Wpływ częstotliwości napięcia na zjawiska towarzyszące wyladowaniom niepełnym w próbach starzeniowych żywic epoksydowych.* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki. EU1'97. VI Sympozjum — Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia. Zakopane, 23–25.10.1997
- [12] **Dejean H., Dejean P. P. F., Foluon-Belkacemi N., Goldman M., Goldman A.:** *New Electrical Method of Identification of Polymer Ageing Kinetics.* Intern. Conf. on Partial Discharge. 28–30 Sept. 1993. Univers. of Kent in Canterbury, UK

MEASUREMENT OF SOLID DIELECTRICS SURFACE TEMPERATURE DURING PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY

Measurement of the temperature increment of the dielectric surface caused by partial discharge activity was carried out by means of non-invasive measuring system which takes an amount of infrared radiation energy emitted by the surface. Experiment was running in a point–dielectric–plane electrode arrangement with AC voltage up to 22 kV and frequency range from 200 to 1200 Hz. Samples of epoxy resin with an alumina filler was investigated. It was found that temperature increment may be so high that thermal degradation of the dielectric is possible.

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej
Zakładu Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki,
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych