



Tadeusz Łaś\*, Helena Słowikowska\*, Jerzy Słowikowski\*

## **EFEKT DZIAŁANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH NA POWIERZCHNIĘ KOMPOZYTU I ŻYWICY EPOKSYDOWEJ PRZY CZĘSTOTLIWOŚCIACH 50...1000 HZ W ATMOSFERZE POWIETRZA**

**Streszczenie:** Wyniki narażenia kompozytu i żywicy epoksydowej wyładowaniami niezpełnymi wskazały na możliwość określenia korelacji pomiędzy skumulowanym ładunkiem pozornym, a zmianą parametrów izometrycznych warstwy wierzchniej dielektryka. Podwyższona częstotliwość napięcia w zakresie do 500 Hz umożliwia skrócenie czasu narażenia.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezpełne, warstwa wierzchnia, przyspieszone starzenie, podwyższona częstotliwość

### **1. Wstęp**

Przedstawione w niniejszym referacie wyniki badań dotyczą oddziaływania wyładowań niezpełnych (WZN), generowanych w powietrzu, w niewielkiej odległości od dielektryka stałego, na powierzchnię tego dielektryka. Wyniki te, stanowiące wycinek większej pracy<sup>1</sup>, odnoszą się do oddziaływania na kompozyt i samą żywicę epoksydową. Efekt oddziaływania wyładowań w rozpatrywanym przypadku sprowadza się do dwóch objawów obserwowanych w skali makroskopowej:

- erozji dielektryka w następstwie bombardowania jego powierzchni przez cząstki naładowane, przyspieszane w polu elektrycznym (elektrony, jony),

---

\* Zakład Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki, Warszawa

<sup>1</sup> „Ocena wiarygodności prób przyspieszonego starzenia materiałów izolacyjnych pod wpływem wyładowań niezpełnych”; program realizowany w Zakładzie Wysokich Napięć IEL we współpracy z Electronics and Electrical Engineering NIST, USA w ramach Fundacji Marii Curie-Skłodowskiej.

- osadzania się na powierzchni dielektryka związków chemicznych powstałych w wyniku reakcji zachodzących w fazie gazowej, a także na pograniczu faz: gaz/dielektryk stały oraz gaz/elektroda generująca WNZ<sup>2</sup>.

Stwierdzono, że w przypadku generowania WNZ w niewielkiej odległości od powierzchni dielektryka stałego, charakterystyka wyładowań<sup>3</sup> ulega zmianom w czasie trwania narażenia. wywołanym obecnością ładunku przestrzennego (w tym przede wszystkim ładunku powierzchniowego) i wpływem tego ładunku na generowanie kolejnych wyładowań, a także zmianą warunków brzegowych których powodem jest tworzenie się składowej pola, stycznej do powierzchni dielektryka [2] oraz zmiana konduktancji tej powierzchni [1, 3].

W przypadku przegrody w układzie ostrze – płyta, którą stanowi próbka materiału izolacyjnego, wpływ ww. zjawisk jest szczególnie złożony na skutek różnorodności procesów pułapkowania<sup>4</sup> i rekombinacji zachodzących na powierzchni dielektryka.

Konsekwencją tego efektu są zmiany charakterystyki WNZ, które powodują, że czas ekspozycji nie jest wiarygodnym parametrem jeśli chodzi o określenie skumulowanej intensywności narażenia. Mając na względzie wprowadzenie możliwie prostej procedury określenia tej wielkości podjęto próbę posłużenia się w tym celu pomiarem sumarycznej wartości  $Q$  ładunku pozornego<sup>5</sup> odnoszącej się do określonego czasu narażenia te na podstawie charakterystyki czasowej:

$$Q(t) = \int_0^{t_e} i dt$$

gdzie  $i$  — prąd średni WNZ wg definicji IEC 270

W celu ustalenia korelacji z wielkością charakteryzującą efekt oddziaływania WNZ na próbkę materiału, podjęto próbę wykorzystania metody profilometrii skanin-gowej, która umożliwia śledzenie zmian parametrów izometrycznych warstwy wierzchniej dielektryka.

## 2. Metodyka pomiarów

### 2.1. Układ do generowania i pomiaru WNZ

Układ do generowania i pomiaru WNZ, sposób sporządzania charakterystyk zależności prądu średniego WNZ  $i(t)$ , pozornego ładunku maksymalnego  $q(\pm)(t)$  oraz sumarycznej wartości ładunku pozornego  $Q(t)$  podano w publikacji [4].

<sup>2</sup> Wyniki badań nad wpływem „osadów” na zmianę rezystancji powierzchniowej dielektryka zostały przedstawione przez autorów na Konferencji pn. „Postępy w Elektrotechnologii” [1] (Szkłarska Poręba 1994 r).

<sup>3</sup> Przez charakterystykę WNZ należy rozumieć zbiór wartości parametrów za pomocą których jest opisywana intensywność wyładowań.

<sup>4</sup> W tym przypadku, przez pułapkowanie rozumie się wszystkie procesy wiążące elektrony i jony z warstwą wierzchnią dielektryka.

<sup>5</sup> Odnoszącego się zarówno do dodatniej jak i ujemnej połówki sinusoidy napięcia.

Próbki materiałów poddawane były narażeniu w układzie ostrze – płyta przy odległości elektrody ostrzowej od powierzchni dielektryka wynoszącej 0,5 mm przy napięciu 4 kV o częstotliwości 50...1000 Hz w temp. 20°C i przy wilgotności RH=55–60%; wartość maksymalnego ładunku pozornego  $q(\pm)$  nie przekraczała 10 000 pC.

## 2.2. Profilometria skaningowa

Profilometria skaningowa jest metodą przestrzennego odwzorowania mikronierówności powierzchni, wykorzystującą znany od dawna i rozpowszechniony sposób odwzorowania profilu powierzchni poprzez przesuwanie po niej igły o bardzo małym promieniu zaokrąglenia wierzchołka (1,2 do 12,5  $\mu\text{m}$ ). Wykonany szereg podobnych pomiarów wzdłuż równoległych, jednakowo odległych linii daje obraz topografii powierzchni w postaci przestrzennego układu równoległych profili, który przetworzony komputerowo daje obraz trójwymiarowy. Profilometr skaningowy, na którym wykonano badania zbudowany został w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN na bazie profilometru Talysurf 5M.

Został on wyposażony w stół skaningujący i sprzężony z nim mikrokomputer klasy IBM PC z programem przystosowanym do badań narażeń punktowych podstawowe parametry pomiarów: max. wymiary odwzorowywanej powierzchni —  $X \times Y = 56 \times 25$  mm, max. rozdzielczość: pozioma  $dx = 2 \mu\text{m}$ , pionowa  $dy = 2,5 \mu\text{m}$ , zakres pomiarowy (max. odstęp nierówności) = 500  $\mu\text{m}$ . Charakterystyka mierzonych wielkości:  $V$  – ubytek objętości warstwy wierzchniej materiału wyznaczony dla całego obszaru narażenia,  $V_1$  – ubytek objętości największego krateru, odpowiadający naruszeniu warstwy wierzchniej w centrum narażenia,  $a$  – rzut powierzchni narażanej na płaszczyznę średnią powierzchni odniesienia,  $a_1$  – rzut najgłębszego krateru (w centrum narażenia) na płaszczyznę średnią powierzchni odniesienia,  $h$  – maksymalna głębokość ubytku (w centrum narażenia) wyznaczona względem płaszczyzny średniej powierzchni odniesienia.

## 3. Badane materiały i ich właściwości w stanie wyjściowym

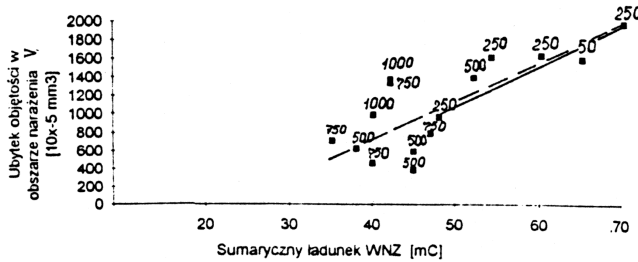
Próbki materiałów: żywica epoksydowa Epidian 2, oznaczana dalej jako EP2N oraz kompozyt tejże żywicy z napełniaczem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oznaczany jako EP2KN. Próbki w formie płytek o wymiarach 150×150×2 mm utwardzane w temp. 120/140°C w ciągu 24 i 16 godzin. Gładkość powierzchni próbek Ra: EP2N = 0,053  $\mu\text{m}$ , EP2KN = 0,067  $\mu\text{m}$ . Rezystancja powierzchniowa Rs: EP2N =  $2 \times 10^{14} \Omega$ , EP2KN =  $1 \times 10^{14} \Omega$ .

## 4. Wyniki badań

Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiarów objętości ubytku  $V$  warstwy wierzchniej EP2KN w zależności od sumarycznego ładunku pozornego  $Q$ . WNZ generowane były napięciem o częstotliwości  $f = 50, 250, 500, 750$  i 1000 Hz.

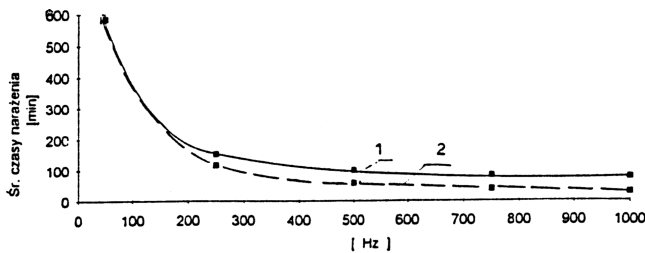
Na rysunek naniesiono wyniki pomiarów z zaznaczeniem przy jakiej częstotliwości dany wynik uzyskano. Jak łatwo zauważyć punkty odnoszące się do częstotliwości  $f \geq 500$  Hz, w większości zgromadziły się w przedziale wartości  $Q \leq 45$  mC. Przyczyną

tego był sposób doboru czasów narażenia. Założono mianowicie, że równoważny czas narażenia  $t_e$  jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości. Reguła ta nie sprawdziła się, co w świetle danych literaturowych nie jest zaskoczeniem [m.in. 6, 7].



**Rys. 1.** Wyniki pomiarów ubytków objętości  $V$  warstwy wierzchniej EP2KN w zależności od sumarycznego ładunku pozornego  $Q$  przy częstotliwościach napięcia  $f = 50 \dots 1000$  Hz (przy poszczególnych punktach podano częstotliwość napięcia). Proste regresji liniowej: 1 – na podstawie wszystkich wyników pomiarów (wsp. korelacji  $r = 0,81$ ), 2 – na podstawie wartości  $V$  zmierzonych w przedziale  $Q = 47 \dots 70$  mC (wsp. korelacji  $r = 0,90$ )

Na rys. 2. naniesiono punkty odpowiadające średnim czasom  $t_e$ , po upływie których, w zależności od częstotliwości, uzyskano narażenie odpowiadające sumarycznemu ładunkowi pozornemu  $Q = 40$  mC. Dla porównania, linią przerywaną oznaczono przebieg charakterystyki  $t_e = \varphi(f)$  dla przypadku odwrotnej proporcjonalności  $t_e$  od częstotliwości  $f$



**Rys. 2.** Zależność czasów narażenia  $t_e$  kompozytu EP2KN, po upływie których  $Q = 40$  mC, w funkcji częstotliwości  $f$ . Krzywa 1 – charakterystyka wykreślona na podstawie pomiarów (dot. średnich wartości  $t_e$ ), krzywa 2 – charakterystyka odpowiadająca zależności  $t_{e1}/t_{e2} = f_2/f_1$

Porównanie przedstawionych na rys. 2 charakterystyk wyjaśnia dlaczego w miarę podwyższania częstotliwości uzyskiwano coraz niższe wartości  $Q$  po czasie określonym wg zasady odwrotnej proporcjonalności. Nie wyjaśnia ono jednak dużego rozrzutu wartości  $V$  (por. rys. 1) odpowiadającego małym wartościom ładunku  $Q$  tj. nie przekraczającym 45 mC. Nie można wykluczyć, że przyczyną tego rozrzutu są różnice charakterystyk WNZ (por. rys. 3), w tym zwłaszcza fluktuacji maksymalnego ładunku pozornego  $q$ . Zwraca jednak uwagę, że ani fluktuacje prądu  $i$ , ani ładunku  $q$  nie

wpłynęły praktycznie na charakterystyki  $Q(t)$  (rys. 3C); charakterystyki te wykazały ponadto dobrą powtarzalność.

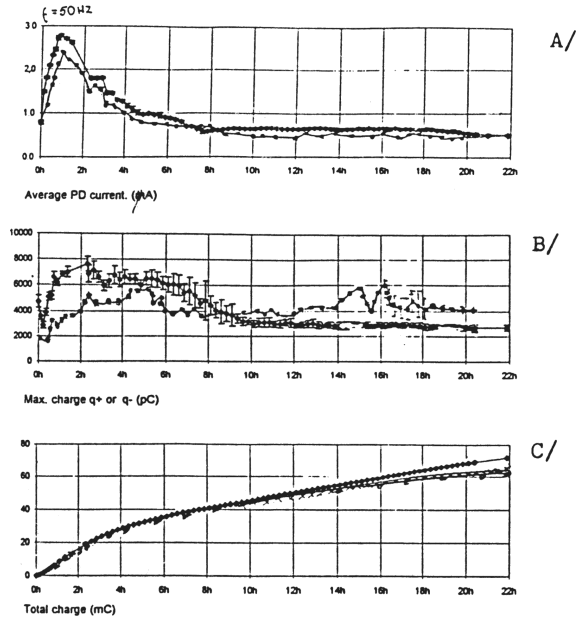
Analiza zmian wszystkich wymienionych w pkt. 2.2. parametrów izometrycznych doprowadziła do wniosku, że występujący w całym obszarze narażenia rozwój destrukcji warstwy wierzchniej EP2KN, po okresie inkubacji, wyprzedza rozszerzanie się destrukcji w centrum narażenia przy czym maksymalna głębokość ubytku  $h$  ulega niewielkiemu wzrostowi. Proces ten rozwija się w warstwie o grubości nie przekraczającej  $10\mu\text{m}$ . Dotyczy to zarówno kompozytu EP2KN jak i żywicy EP2N (patrz. rys. 4B).

Zauważono ponadto, że rozrzut  $V$  znacznie maleje powyżej wartości  $Q = 45 \text{ mC}$ . Co więcej, mimo oczywistej różnicy współczynników korelacji, przebiegi prostych regresji, z których cyfrą 1 oznaczono prostą, wyznaczoną na podstawie wszystkich punktów pomiarowych, zaś cyfrą 2 – wyznaczoną tylko dla odcinka  $Q > 45 \text{ mC}$ , praktycznie się pokrywają (patrz rys. 1). Te obserwacje skłaniają do postawienia hipotezy, że początkowy okres narażenia, który można nazwać okresem inkubacji, cechuje duża przypadkowość tworzenia lokalnych defektów warstwy wierzchniej. Zjawisko to powtarza się również w przypadku żywicy EP2N na co wskazuje porównanie „chmur” punktów w obszarze inkubacji, odnoszących się do obydwóch badanych materiałów (rys. 4) jakkolwiek, jak wynika z rys. 4A, wyznaczenie „okresu inkubacji” w przypadku żywicy EP2N wymaga wykonania badań przy większych wartościach sumarycznego ładunku pozornego „ $Q$ ”.

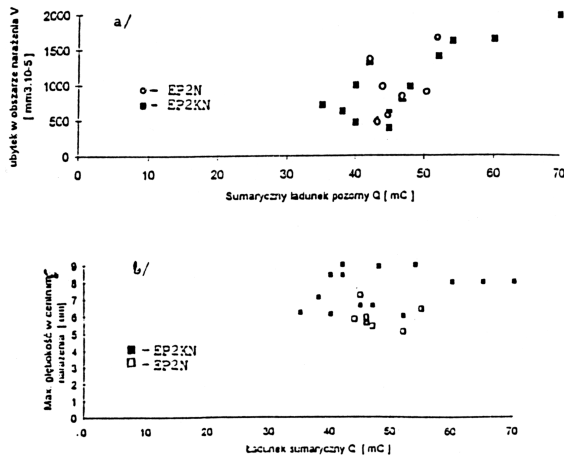
Tym niemniej analiza przedstawionych wyników wskazuje, że w rozpatrywanym zakresie narażeń, odporność obu badanych materiałów na działanie WNZ jest porównywalna.

## 5. Wnioski

- Opisane badania wskazują na przydatność zastosowanej procedury do oceny porównawczej rozwoju destrukcji warstwy wierzchniej żywic i kompozytów epoksydowych w następstwie występowania wyładowań niezupełnych.
- Zależność zmian niektórych parametrów izometrycznych od narażenia, wyrażonego wartością sumarycznego ładunku pozornego WNZ okazała się możliwa do opisaną funkcją liniową. W szczególności dotyczyło to objętości ubytku  $V$ , co jest zgodne z obserwacjami Bui Ai [5] i Kelena [6], którzy wykazali wprost proporcjonalną zależność między miarą ubytku materiału (określoną metodą wagową) a energią WNZ.
- W rozpatrywanych warunkach narażenia, w miarę przedłużania czasu ekspozycji, destrukcja wywołana WNZ polega przede wszystkim na powiększeniu obszaru zdefektowania warstwy wierzchniej.
- Wyniki badań wskazują ponadto na możliwość zastosowania podwyższonej częstotliwości jako czynnika przyspieszającego proces narażenia WNZ.
- Nie stwierdzono istotnej różnicy w odporności żywicy EP2N i kompozytu EP2KN na działanie WNZ.



Rys. 3. Przykładowe 3 charakterystyki WNZ przy częstotliwości 50 Hz: A) – średni prąd wyładowań, B) – maksymalny ładunek pozorny  $q(t)$  (występujący niezależnie od biegunowości napięcia), C) – skumulowany ładunek pozorny  $Q(t)$



Rys. 4. Wyniki pomiarów parametrów izometrycznych warstwy wierzchniej żywicy EP2N (○, □) i kompozytu EP2KN (◆) w zależności od sumarycznego ładunku pozornego Q: A) ubytku objętości V w całym obszarze narażenia, B) maksymalnej głębokości ubytku h

## Literatura

- [1] **Łaś T., Słowikowska H., Słowikowski J.:** *Przyczynek do studiów nad współzależnością rozwoju wyładowań niezupełnych i zmianami właściwości powierzchniowych żywic i kompozytów epoksydowych.* Konf. „Postępy Elektrotechnologii’94”
- [2] **Florkowska B.:** *Analiza mechanizmów wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych wysokiego napięcia,* Rozprawy, Monografie nr. 25; Wydawnictwa AGH, Kraków 1995
- [3] **Van Brunt R. H., Von Glahn P., Łaś T.:** *Partial discharge-induced aging of cast epoxies and related nonstationary behavior of the discharge statistics,* IEEE Conf. on Electr. Insul. a. Dielectr. Phenomena, 1993
- [4] **Łaś T., Słowikowska H., Słowikowski J.:** *Wpływ częstotliwości napięcia na zjawiska towarzyszące wyładowaniom niezupełnym w próbach starzeniowych żywic epoksydowych,* VI Symposium: Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EU1’97
- [5] **Bui Ai:** *Contribution a l’etude de la degradation des isolation en feuille sous l’action des decharges partielles.* These, Univ. de Toulouse 1966
- [6] **Kelen A.:** *The Effect of Partial Discharges on Insulating Materials,* ASEA Journal 1967, vol. 40, No. 6–7, pp. 97–98

### EFFECT OF THE ACTION OF PARTIAL DISCHARGES ON THE SURFACE OF COMPOSITE AND EPOXY RESIN AT 50...100 HZ IN ATMOSPHERE AIR

Results of exposing of composite and epoxy resin to partial discharges indicated the possibility of determining the correlation between the cumulated apparent charge and changes in isometric parameters of the dielectrics surface layer. The voltage frequency elevated up to 500 Hz permits the exposure time to be reduced.

### PODZIĘKOWANIE

Autorzy składają podziękowanie pp.: Zofii Handzel-Powierża i Annie Bartoszewicz z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN za dostosowanie metody profilometrii skaningowej do badania warstwy wierzchniej dielektryka stałego po działaniu WNZ.