

Andrzej Sierota

## ROZWÓJ WYŁADOWAŃ I PRZEBICIA NA GRANICY STYKU DWÓCH POWIERZCHNI IZOLACYJNYCH

### 1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania badaniami modelowymi starzenia jonizacyjnego. Ma on na celu zarówno lepsze poznanie zjawisk fizycznych związanych z długotrwałym oddziaływaniem pola elektrycznego na dielektryki stałe, jak i zadanie praktyczne, zmierzające do względnej oceny odporności dielektryków stałych na wyładowania niezupełne /wnz./ W opracowaniu przedstawiono, stosunkowo mało do tej pory zbadany, przypadek występowania wnz w mikroszczelinach gazowych powstałych na granicy zetknięcia dwóch płaskich i gładkich powierzchni izolacyjnych z dielektryka stałego.

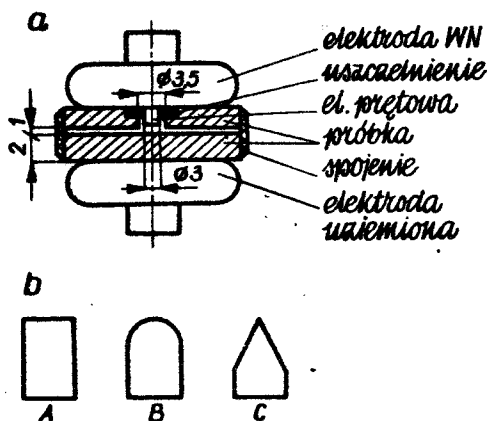
Dotychczasowe badania przeprowadzane w układzie ze szczeliną [2,7, 11] wykazały, że o ile szczelinie towarzyszy wtrącina gazowa, w której ma miejsce lokalizacja wyładowań, następuje przeniesienie wnz do szczeliny, które powoduje rozwój drzewiastych kanałów typu treeing i stosunkowo szybkie przebicie. Mechanizm rozwoju tego rodzaju przebicia nie był przedmiotem dokładniejszych studiów, choć można znaleźć pewne analogie w badaniach tzw. "nebendurchschlag" lub "side-path-breakdown" w oleju, wykonywanych przez Dronscheka [1], Narayana-Rao [3] lub Nawatę [4].

---

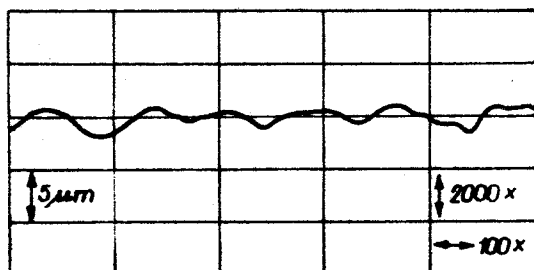
Dr inż. Andrzej Sierota - Instytut Wysokich Napięć Politechniki  
Warszawskiej

## 2. Układ modelowy zastosowany do badań

Układ modelowy ze szczeliną przedstawiono na rysunku 1a. Wyładowania niezupełne są zainicjowane w sztucznej wtrącinie na wymiennych elektrodach o kształcie jak na rysunku 1b. Elementy próbki z żywicy epoksydowej EP-2 z utwardzaczem dwubutyloftalenowym, odlewane w specjalnie przygotowanych formach, posiadały powtarzalną jakość powierzchni czołowych. Próbkę składano z dwóch części, sklejało na krawędziach i montowano z elektrodami za pomocą samocentrujących uchwytów i izolacyjnych śrub. Mikroskopijne nierówności powierzchni obu części próbek powodowały powstanie gazowych mikroszczelin o wymiarach wynikających z tych nierówności /rys.2./



Rys.1. Układ modelowy zastosowany do badań:  
a/ próbka i elektrody, b/ kształt elektrod inicjujących wnz



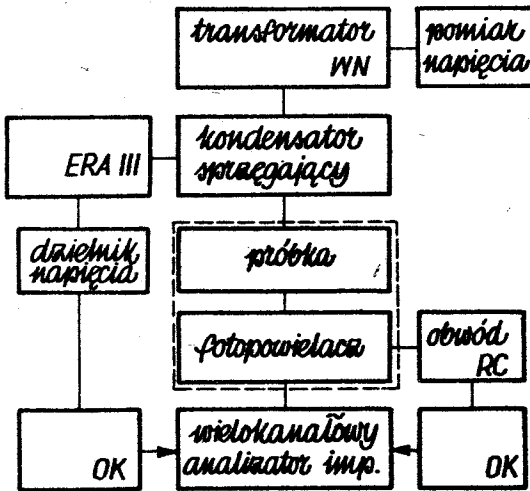
Rys.2. Profilogram nierówności powierzchni próbki

Czynnikiem otaczającym próbkę był płyn silikonowy o małym ciśnieniu par, utrudniający pojawienie się wyładowań powierzchniowych przy stosowanym zakresie napięć probierczych /do 20 kV/. Niektóre badania wykonano w powietrzu bez sklejanie próbek, co umożliwiło wnikanie powietrza do szczeliny oraz wyrównywanie ciśnień.

### 3. Metodyka badań

Zastosowana metodyka łączyła badania zmian charakterystyk intensywności wnz w funkcji napięcia i czasu oddziaływania wnz z pomiarami czasów życia próbek oraz badaniami destrukcji dielektryka pod wpływem wyładowań.

Schemat blokowy układu pomiarowego pokazano na rysunku 3. Zastosowano elektrooptyczną i elektryczną metodę detekcji wnz, których schemat ideowy i opis przedstawiono w poprzednich opracowaniach [7,8].



Rys.3. Schemat blokowy układu detekcyjnego

Na anodzie fotopowielacza określono amplitudy impulsów świetlnych jako ładunek  $q_p = V_p \cdot C_p$ , gdzie  $V_p$  jest napięciem impulsu na anodzie a  $C_p$  pojemnością obwodu wyjściowego względem ziemi. Impulsy elektryczne mierzono za pomocą układu ERAIII ze zmodyfikowanym układem wyjściowym dla uzyskania jednobiegunowych impulsów ładunku pozornego:  $q_A = V_A \cdot C_A$ .

gdzie  $V_A$  jest napięciem impulsu elektrycznego wyładowania, a  $C_A$  pojemnością układu wyjściowego względem ziemi. Obie metody pomiarowe zweryfikowano stosując skalowanie impulsami o znanym ładunku [7,8]. Impulsy  $q_p$  i  $q_A$  doprowadzono do dwustrumieniowego oscyloskopu oraz na wejście wielokanałowego analizatora impulsów /TMC-256CN/, o maksymalnej czułości pomiarowej ok. 0,5 pC.

Próbki dziewicze i poddawane oddziaływaniu starzeniowemu wnz sprawdzano mikroskopem optycznym i scanningowym /SEM/ w celu określenia typowych form destrukcji dielektryka.

#### 4. Zakres i wyniki badań

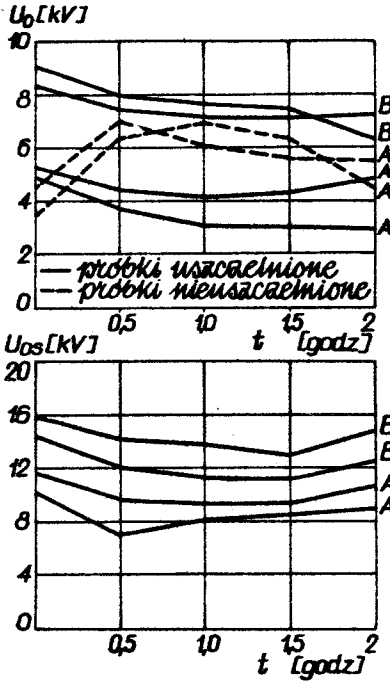
Określono następujące wielkości związane z wyładowaniami niezupełnymi i ich oddziaływaniem:

1/ Napięcie początkowe wnz we wtrącinie  $/U_o/$  oraz w szczelinie  $/U_{os}/$  oraz odpowiednio napięcia gaśnięcia  $/U_g$  i  $U_{gs}/$ . Typowe przebiegi charakterystyk  $U_o = f(t)$  oraz  $U_{os} = f(t)$  przedstawiono na rysunkach 4a i 4b. Ze względu na ograniczoną wyładowaniami powierzchniowymi możliwość zwiększania napięcia zasilającego, charakterystyki  $U_{os}$  dla próbek nie uszczelnianych w powietrzu nie były określane.

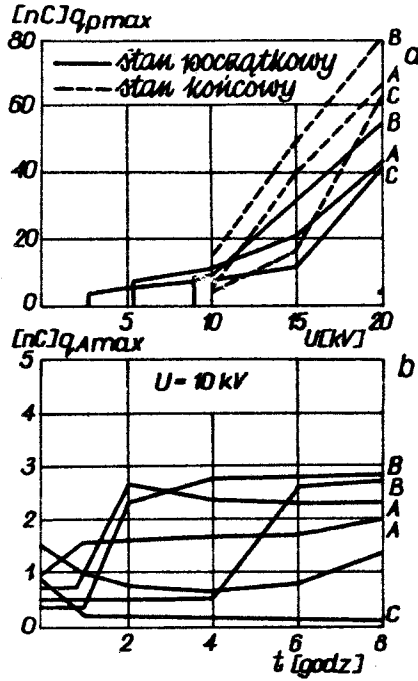
2/ Maksymalne wartości impulsów światła  $q_{pmax}$  oraz impulsów elektrycznych  $q_{Amax}$  w funkcji przyłożonego napięcia, skokowo co 5 kV aż do wartości 20 kV. Na każdym poziomie napięcia było utrzymywane przez ok. 15 min. Określano początkowe i końcowe /ustalone/ wartości zmian amplitud impulsów, przedstawione jako  $q_{pmax} = f(U)$  na rysunku 5a.

3/ Zmiany maksymalnych wartości impulsów światła  $q_{pmax}$  oraz impulsów elektrycznych  $q_{Amax}$  w funkcji czasu przyłożenia napięcia. Pomiary wykonano dla dwóch poziomów napięcia 10 kV i 20 kV i czasów trwania próby do 8 godzin. Rysunek 5b przedstawia przebiegi  $q_{Amax} = f(t)$  charakteryzujące zachowanie się próbek przy napięciu 10 kV.

4/ Rozkłady gęstości impulsów  $q_p$  i  $q_A$  w funkcji ich amplitud  $N_p = f(q_p)$  i  $N_A = f(q_A)$  dla dwóch poziomów napięcia: 10 kV i 20 kV



Rys. 4. Typowe przebiegi zależności  $U_0=f(t)$  i  $U_{0s}=f(t)$

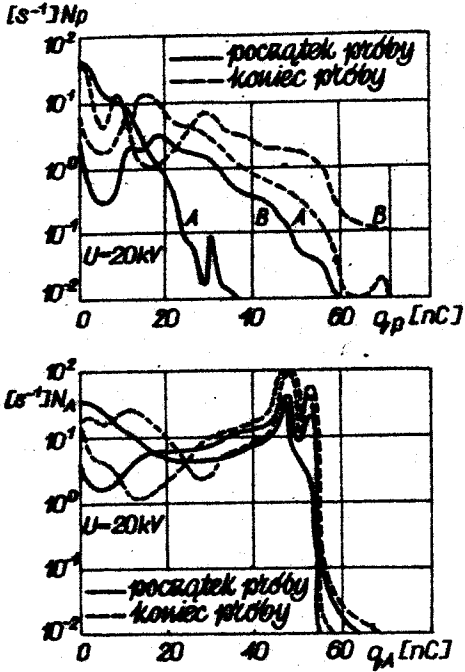


Rys. 5. Typowe przebiegi  $q_{pmax}$  i  $q_{Amax}$  w funkcji napięcia i czasu

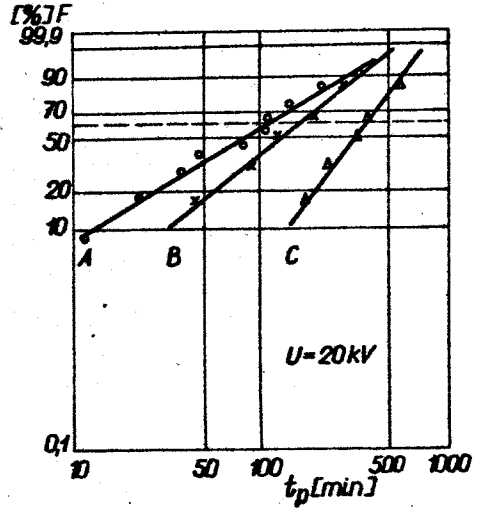
i różnego czasu trwania próby. Określono je na podstawie pomiarów wykonanych przy długim /3 min/ czasie ekspozycji, dla zarejestrowania największych i stosunkowo rzadkich impulsów  $q_p$  i  $q_A$ . Odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi pomiarami /początkowy i końcowy/ wynosił ok. 4 godzin. Typowe rozkłady gęstości ładunków  $q_p$  i  $q_A$  przedstawiono na rysunku 6.

5/ Czasy do przebicia próbek przy napięciu 20 kV. Przedstawiono je na rysunku 7 w układzie współrzędnych Weibulla. W wyniku oględzin próbek po wykonaniu pomiarów czasów życia stwierdzono występowanie rozgałęzionych, drzewiastych kanałów na obu częściach próbek oraz punktów przebicia w znacznej /12-15 mm/ odległości od środka geometrycznego układu modelowego, niezależnych od geometrii elektrody we wtrącinie. Rysunki 8a i 8b przedstawiają fotografie charakterystycznych fragmen-

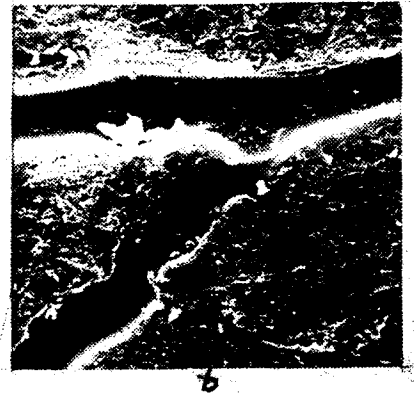
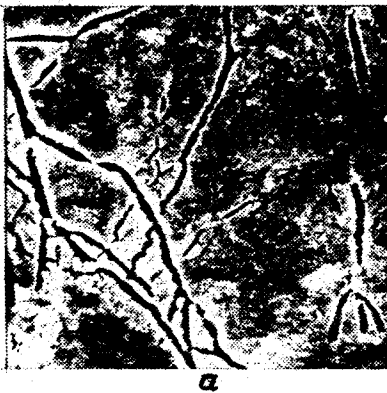
tów kanałów przedprzebieciowych wylądowań wykonane za pomocą mikroskopu scannującego.



Rys.6. Typowe rozkłady gęstości impulsów  $N_p = f(q_p)$  i  $N_a = f(q_a)$



Rys.7. Charakterystyki prawdopodobieństwa przebiecia w układzie współrzędnych Weibulla



Rys.8. Fotografie SEM kanałów przedprzebieciowych a/rozgałęzienia kanałów; b/ fragment kanału w powiększeniu

## 5. Dyskusja wyników i wnioski

Analiza rozwoju wyładowań w układzie ze szczeliną wyodrębnią w nim dwie fazy:

1/ Fazę wyładowań we wtrącinie, upodabniającą układ badany do układów ze zmienną geometrią wtrąciny, których własności przedstawiono w pracach [7-9]. Przebieg charakterystyk napięcia początkowego  $U_0$  w funkcji czasu dla próbek uszczelnianych i bez uszczelniania ujawnia rolę wyrównywania ciśnień bądź też zmian przewodności powierzchni dielektryka w czasie, co stwierdzono w poprzednich opracowaniach autora [7-8].

2/ Fazę wyładowań w szczelinie, związana z koncentracją wnz na nierównomiernościach krawędzi wtrąciny. Wyładowania wyszukują wolne miejsca w dość zwartej strukturze stykających się powierzchni. Istotną rolę w propagacji wnz do szczeliny ma rozmiar tych miejsc, oszacowany na podstawie obserwacji na SEM na ok. 100  $\mu\text{m}$  średnicy. Z nich rozwijają się kanały w głąb szczeliny. W rzeczywistości szczelinę stanowią puste i nieregularne przestrzenie uwarunkowane lokalnymi nierównomiernościami zetkniętych płaszczyzn dielektryka o wysokościach od kilku do kilkunastu  $\mu\text{m}$ . Wydaje się, że mechanizm rozwoju kanału przedprzebiciowego w szczelinie może być uwarunkowany bądź przez przeniesienia wysokiego potencjału na jego koniec na skutek przewodności ścianek kanału, bądź też przez wyładowania w zainicjowanym kanale. Oznacza to, że dielektryk może albo przebijać na skutek lokalnego obniżenia wytrzymałości istotnej przy końcu kanału albo wydłużenie i rozwój kanału powoduje degradacja pod wpływem wnz. Badania mikroskopowe ujawniły liczne przypadki karbonizacji odgałęzień kanałów lub ich części, a z drugiej strony pomiary wykazały wzrost intensywności wnz w miarę wzrostu zasięgu kanałów.

Te i inne obserwacje wskazują, że procesy zachodzące w szczelinie mogą mieć dość złożony charakter. Możliwy jest zarówno szybki rozwój wnz do szczeliny, jak i długi czas jego opóźnienia lub wręcz samowy-

gaszenia wnz. Efektywność procesów zależy od stosunku napięcia  $U/U_0$ , a od za tym idzie, od geometrii elektrody inicjującej wnz i związanej z nią sprawności ich koncentracji. Porównanie rozkładów gęstości impulsów światła i elektrycznych wskazuje na ich odmienną naturę. Zintensyfikowanie emisji światła pod wpływem wnz może nie być związane ze wzrostem ładunku pozornego. Może to być spowodowane intensywną fotojonizacją pod wpływem wnz w drążącym materiał kanale, wskazując również na istnienie obszaru ładunku przestrzennego. Jest również możliwe, że nośniki ładunku pojawiające się w obszarze o największych natężeniach pola koło główki rozwijającego się kanału nie przebywają całej długości kanału na skutek niewystarczającego natężenia pola w obszarach dalej położonych od wtrąciny. Powyższy wniosek sformułowane dla układu ostrzowego i rozwijającego się z ostrza kanału plazmowego w pracy Shibuyi i współautorów [6].

Według Narayana-Rao [5] średnica kanału plazmowego wyładowań ślizgowych w oleju może dochodzić do  $200 \mu\text{m}$ , a promień główki kanału jest rzędu  $75 \mu\text{m}$ . Tego samego rzędu są wymiary końców kanałów wyładowań treeingowych w żywicy epoksydowej, określone w pracy [6]. Zakładając podobne wartości dla rozwijających się kanałów wyładowań w układzie ze szczeliną okazuje się, że znacznie przekraczają one rozmiary wolnych przestrzeni gazowych. Z obserwacji jednakowo silnie narażonych obu powierzchni próbki po próbach bez przebicia wynika, że warunki do zapoczątkowania kanału plazmowego mogą istnieć tuż po opuszczeniu przez wyładowanie wtrąciny. Z rozmiarów kanałów o średnicach rzędu  $100\text{--}200 \mu\text{m}$  wynika, że mogą one nieść ze sobą bardzo duże natężenie pola, rzędu  $\text{kV/cm}$ . Rozpoczynający swoje oddziaływanie na dielektryk kanał plazmowy może niszczyć materiał w sposób analogiczny, jak to ma miejsce przy treeingu z ostrzy lub innego miejsca o lokalnej koncentracji pola [5,6]. Zasięg obszaru objętego wyładowaniem w szczelinach wydaje się być zależny od napięcia i ustalony jest na poziomie  $20 \text{ kV}$ . Zależna od napięcia jest również szybkość propagacji wnz. Punkty przebicia



występują w podobnej odległości od wtrąciny na końcach najdłuższych kanałów. Charakterystyczne czasy do przebicia są zależne od geometrii elektrody we wtrącinie, co może być związane ze wspomnianą już różną sprawnością koncentracji wzn, bądź też określonym wpływem deformacji pola elektrycznego w szczelinie na skutek obecności metalowej elektrody we wtrącinie; może to powodować różne szybkości rozwoju kanałów przedprzebiciowych, nie zmieniając ich zasięgu [10] .

#### LITERATURA

1. Dronscek G., Kind D.: Nebendurchschläge in festen Isolierstoffen. ETZ-A, Bd 86, H19, s.636-637.
2. Kopka A.: Badania starzenia jonizacyjnego w układzie modelowym ze szczeliną. Praca dyplomowa, IWN Pw, Warszawa 1979.
3. Narayana-Rao Y.: Durchschlagvorgänge in Folieisolierungen unter Einwirkung von Koronaentladungen. Proc.IH Symposium, Munich, 1970. s. 443-449.
4. Nawata M., Kawamura H., Ieda M.: Side-Path Puncture Breakdown in Oil Along Surface of Solid Insulators. JIEE of Japan, Nr 7, 1971. s. 1358-1366.
5. Noto F., Yoshimura N.: Growth of Tree Caused by Discharges in Needle-Shaped Voids. JIEE of Japan, Vol.90, 1969, s.724-731.
6. Shibuya Y., Żołędziowski S., Calderwood JH.: Light Emission and Deterioration in Epoxy Resin Subjected to Power Frequency Electric Field, Proc. IEE, Vol 125, Nr 4, 1978, s. 352-354.
7. Sierota A.: The Effect of Geometry of an Artificial Void on Prebreakdown Processes in Epoxy Resins. Techn.Rep. 2802/1977, University of Salford, 1977, s. 59-60.
8. Sierota A.: Modelowe badania starzenia jonizacyjnego żywic epoksydowych. Mat.II Kraj.Symp.Podst.Teorii Wył.El. w Gazach. IWN Pw, Wilya 1978, s.45-57.
9. Sierota A., Żołędziowski S., Goliński J., Calderwood JH.: Electrooptical Studies of Discharges in Artificial Voids. Proc.IEE Conf. on Gas Disch., Liverpool, 1978.

10. Sierota A.: A Slit Model for the Study of Treeing Breakdown. Proc. IEE Conf. on Diel Mat.Measur. and Applic., Birmingham, 1979 /zglaszenie/.
11. Skowyrski J.: Badania modelowe układów z żywic epoksydowych w warunkach oddziaływania intensywnych wnz. Praca dyplmowa, IWN PW, Warszawa 1977.

#### Summary

#### PARTIAL DISCHARGES AND BREAKDOWN DEVELOPMENT ON THE BOUNDARY SURFACE OF TWO DIELECTRICS

The study of ageing of solid dielectrics due to PD carried out by means of various model arrangements are justified by different mechanisms of PD interaction with insulating materials. Partial discharges and breakdown development in micro-slits between two smooth flat parts of EP sample is reported. The investigations of PD characteristics changes as well as time to breakdown measurements and studies of deterioration are combined and described. Some typical results are given explaining the behaviour of the model tested. Some conclusions about PD and breakdown development are drawn. A significant analogy to the processes typical for needle systems, when high electrical stress region is present, has been found.