

ENERGIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM

1. Wstęp

Jednym z problemów wyładowań niezupełnych są poszukiwania korelacji pomiędzy mechanizmem starzenia materiału a opisem ilościowym zjawiska wyładowań [1,5,10]. Jej cel ma zarówno znaczenie poznawcze w zakresie mechanizmu fizykalnego destrukcji materiału, jak i użytkowe, którym jest określenie odporności materiału na działanie wyładowań i stworzenie odpowiednich norm liczbowych miary tej odporności. Dla ilościowego opisu zjawiska wyładowań stosuje się już kilka wielkości, lecz nie ma jak dotąd zgodności co do wyboru najodpowiedniejszej z nich do wymienionych celów. Można stwierdzić, iż do rozwiązania problemu destrukcji materiału potrzebne jest badanie hipotez o wpływie przemian energetycznych, odbywających się w obszarze wyładowań, na strukturę materiału. Niezależnie przy tym od roli jaką w poszczególnych hipotezach spełniają formy energii w oddziaływaniu z środowiskiem, jak energia cieplna, ruchu elektronów i jonów, promieniowania UV, mechaniczna - oczywistym jest, iż znajomość jej wartości posiada podstawowe znaczenie dla badań korelacyjnych.

Dotychczasowe badania analityczne i doświadczalne doprowadziły do poznania wpływu takich czynników, jak: geometria miejsca wyładowań, właściwości powierzchni materiału, wartości napięcia początkowego i napięcia gaśnięcia, rodzaju napięcia - na wartość energii wyładowań [2,13]. Podano formalne związki energii wyładowań z energią dostarczoną ze źródła zasilającego układ izolacyjny [14]. Zbadano również wpływ pojemności dynamicznej źródła wyładowań oraz wpływ tzw. "napięcia

zwrotnego" [2,6,7]. Należy jednak stwierdzić, że gdy mówi się o energii wyładowań niesupełnych, to rozpatruje się energię całkowitą, będącą wynikiem zachodzących wyładowań w ciągu pewnego czasu, którym jest zwykle okres prądu przemianowego. Różniąc różne metody pomiaru tzw. mocy wyładowań [3,8,11] opierają się na sumowaniu energii podczas okresu prądu. Takie ujęcie energii wyładowań nie daje właściwego obrazu zachodzących w izolacji procesów. Wynikiem bowiem ostateczny skutek działania wyładowań jest wynikiem kumulowania się efektów pojedynczych wyładowań [5,9,4] lecz obliczenia na tej podstawie energii do celów korelacyjnych można jeszcze uważać za wystarczające tylko dla prostych modeli pojedynczych źródeł wyładowań. Nie jest właściwe takie ujęcie w układach izolacyjnych, w których impulsy jako objawy zewnętrzne wyładowań tworzą zbiory statystyczne, będące wynikiem działania szeregu przyczyn o charakterze przypadkowym. Jeśli zatem traktuje się pojedyncze wyładowanie jako zjawisko stochastyczne, to również jego energię trzeba ujmować tak samo. Ujęcie probabilistyczne energii wyładowań umożliwiłoby poznanie jej rozkładu a przez to otrzymanie większej ilości informacji. Biorąc zaś pod uwagę częstościową interpretację prawdopodobieństwa zdarzenia, jakim jest wyładowanie, probabilistyczne ujęcie jego energii nadaje się również do obliczenia kumulowania się efektów wyładowań.

2. Funkcja gęstości łącznej rozkładu ładunków i napięć początkowych

Wychodzimy z założenia, że w układzie izolacyjnym istnieje pewna liczba źródeł wyładowań, których działanie ujawnia się na zewnątrz w postaci dostępnych do pomiaru impulsów. Impulsy wyładowań od pojedynczego źródła mają charakter stochastyczny, różniąc się między sobą wartością chwilową napięcia na obiekcie w momencie zainicjowania kolejnego wyładowania, oraz wartością ładunku. Ładunek impulsu jest proporcjonalny do jego amplitudy. Poszczególne źródła różnią się między sobą pod względem wartości przeciętnych napięć początkowych i ładunków impulsów oraz liczby wyładowań w jednej połowie okresu napięcia przemian-

nego. Impulsy, pochodzące od wszystkich w układzie źródeł wyładowań, rozpatrywane w pewnym okresie zliczania, tworzą zatem zbiór, którego elementy różnią się dwiema cechami: napięciem początkowym chwilowym i ładunkiem pozornym. Obie powyższe cechy wyładowań, wybrane z pewnego okresu czasu, na przykład połowy okresu napięcia, tworzą rozkład dwuwymiarowy zmiennych losowych ładunku Q , napięcia U i posiadający funkcję gęstości łącznej $f(Q,U)$. Funkcja gęstości łącznej określa granicę stosunku prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania o cechach, mieszczących się w obszarze $(Q, Q+dQ, U, U+dU)$, do wielkości tego obszaru w pewnym okresie czasu przy założeniu, że w tym czasie nie zachodzą trwałe zmiany form wyładowań. W znaczeniu empirycznym prawdopodobieństwo, określone funkcją gęstości łącznej $f(Q,U)$ oznacza granicę częstości względnej pojawiania się impulsów o danych cechach Q i U w całkowitym zbiorze impulsów, przy wielokrotnym powtarzaniu badania.

Znajomość funkcji gęstości łącznej $f(Q,U)$ może dać zatem pełną informację o częstości działania wyładowań, różniących się zewnętrznym napięciem początkowym i ładunkiem. Za pomocą metody analizy impulsów można otrzymać dane, które po opracowaniu służą do pośredniego wyznaczenia empirycznej funkcji gęstości $f(Q,U)$ [12]. Empiryczna funkcja gęstości jest podstawą do przyjęcia odpowiedniej funkcji teoretycznej, aproksymującej optymalnie przebieg doświadczalny.

3. Funkcja gęstości rozkładu energii

Energia wydzielająca się w źródle wyładowań, nie jest możliwa do zmierzenia, nie możemy zatem znać jej wartości w sposób dokładny. Dostępna jest natomiast energia, jaka przepływa w obwodzie zewnętrznym w czasie wyładowania. Wartość jej wynosi:

$$W = k \cdot U \cdot Q$$

(1)

gdzie: U - napięcie na zaciskach układu w chwili wyładowania,

Q - ładunek pozorny wyładowania,

k - współczynnik wymiarowy.

We wzorze (1) na energię zewnętrzną wyładowania występują dwie wielkości losowo zmienne: napięcie początkowe U i ładunek Q , tworzące rozkład dwuwymiarowy o funkcji gęstości łącznej $f(Q,U)$ [12]. Energia zewnętrzną pojedynczego wyładowania jest funkcją tych zmiennych losowych a więc jest również zmienną losową, która tworzy rozkład gęstości $f(W)$. Funkcja gęstości rozkładu energii $f(W)$ określa prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowania o energii, zawartej w przedziale $(W+dW)$, zaś dystrybuanta tego rozkładu $F(W)$ określa prawdopodobieństwo wystąpienia impulsu o energii nie większej od określonej wartości W . Aby obliczyć obydwie funkcje, wprowadźmy najpierw pomocniczą zmienną $W_1 = \frac{W}{K}$.

Dystrybuanta zmiennej W_1 wynosi:

$$F_{W_1} = \iint_D f(Q,U) dQdU \quad (2)$$

gdzie: D - obszar zmian U i Q .

Dystrybuanta i funkcja gęstości rozkładu energii W wynoszą [14]:

$$F(W) = \frac{1}{K} \cdot f_{W_1} \left(\frac{W}{K} \right) \cdot dW \quad (3)$$

$$f(W) = \frac{1}{K} \cdot f_{W_1} \left(\frac{W}{K} \right) \quad (4)$$

gdzie: $f_{W_1} = \frac{dF_{W_1}}{dW_1} = \frac{1}{Q} \cdot \int_0^{\frac{W_1}{Q}} \frac{1}{Q} \cdot f \left(Q, \frac{W_1}{Q} \right) dQ$

$$f \left(Q, \frac{W_1}{Q} \right) = f(Q,U) \Big|_{u = \frac{W_1}{Q}}$$

Postać funkcji gęstości rozkładu energii $f(W)$ zależy od funkcji gęstości łącznej $f(Q,U)$. W przypadku, gdy zmienne Q i U są niezależne, funkcja $f(Q,U)$ jest iloczynem rozkładów brzegowych $f(Q)$ i $f(U)$. W praktyce badań wyładowań niezupełnych spotyka się typowe funkcje

gęstości rozkładów brzegowych ładunków Q o postaci funkcji gamma i dystrybuanty rozkładów brzegowych napięcia U o postaci odcinka wielomianu trzeciego stopnia w zakresie napięć od 0 do najwyższego napięcia probierczego U_m , do którego przeprowadza się analizę impulsów wyładowań. Odpowiednia funkcja gęstości rozkładu U jest wówczas odcinkiem wielomianu stopnia drugiego (rys. 1). Funkcje gęstości rozkładów ładunku i napięcia po unormowaniu wielkości Q i U aby wyrażać je w jednostkach względnych [12] mają przy takim założeniu postaci:

$$f(q) = A \cdot q \cdot \exp(-a \cdot q) \quad (5)$$

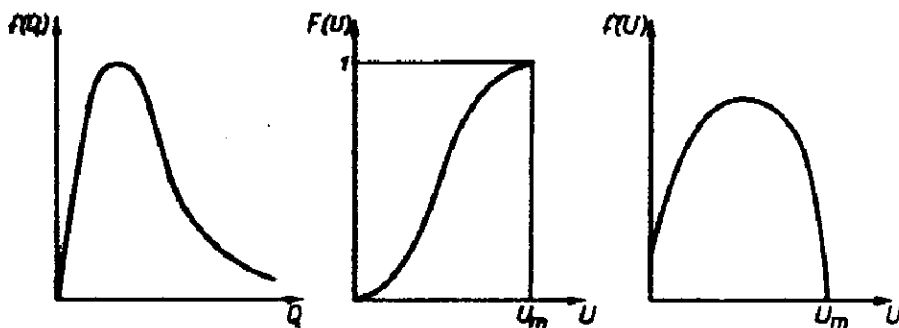
$$f(u) = \alpha \cdot u^2 + \beta \cdot u + \gamma \quad (6)$$

Wielkości $A, a, \alpha, \beta, \gamma$ we wzorach (5) i (6) są stałymi współczynnikami.

Dystrybuanta rozkładu zmiennej W_1 wynosi na podstawie wzoru (2):

$$F(w_1) = \iint_D f(q) \cdot f(u) \, dq \cdot du = \int_0^{U_m} du \int_0^{\frac{w_1}{u}} A \cdot q \cdot (\alpha u^2 + \beta u^2 + \gamma \cdot u) \cdot \exp(-a \cdot q) \quad (7)$$

Wynik obliczenia całki we wzorze (7) jest sumą trzech następujących składników:



Rys. 1. Typowe postacie rozkładów Q i U

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_0^{u_m} du \int_0^{\frac{w_1}{u}} Aq \cdot \alpha \cdot u^2 \cdot \exp(-a \cdot q) dq = \\
 &= \frac{1}{3} A \cdot \alpha \left\{ \exp\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \left[u_m \cdot w_1^2 - \frac{u_m^2}{a} \cdot w_1 - \frac{u_m^3}{a^2} \right] + \right. \\
 &\quad \left. - E_1\left(\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \cdot a \cdot w_1^3 + \frac{u_m^3}{a^2} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_0^{u_m} du \int_0^{\frac{w_1}{u}} A \cdot q \cdot \beta \cdot u \cdot \exp(-a \cdot q) dq = \\
 &= \frac{1}{2} A \cdot \frac{\beta}{a^2} \left\{ \exp\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \left[-a \cdot u_m \cdot w_1 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - u_m^2 \right] + E_1\left(\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \cdot a \cdot w_1^2 + u_m^2 \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_3 &= \int_0^{u_m} du \int_0^{\frac{w_1}{u}} A \cdot q \cdot f \cdot \exp(-a \cdot q) dq = \\
 &= A \cdot \frac{f}{a^2} \cdot u_m \left[1 - \exp\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \right]
 \end{aligned}$$

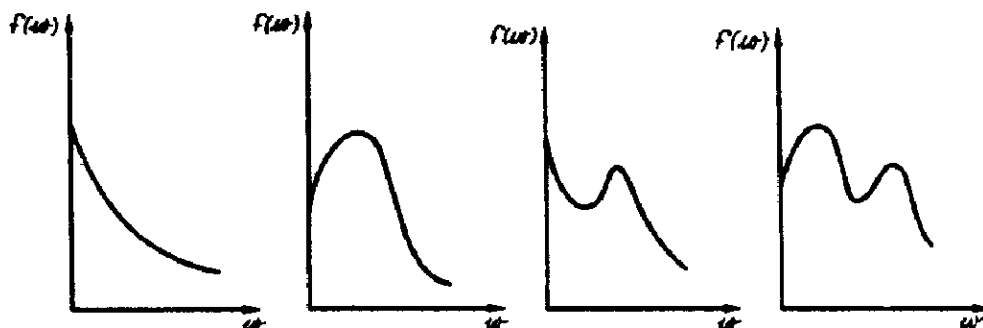
gdzie:

$$E_1\left(\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) = \int_1^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m} x\right)}{x} dx = -Ei\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right)$$

$Ei\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right)$ - całkowa funkcja wykładnicza

Funkcja gęstości zmiennej w_1 wynosi:

$$\begin{aligned}
 f(w_1) &= \frac{dF(w_1)}{dw_1} = \frac{dI_1}{dw_1} + \frac{dI_2}{dw_1} + \frac{dI_3}{dw_1} = \\
 &= A \cdot \alpha \cdot \left\{ u_m \cdot w_1 \cdot \exp\left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) - a \cdot w_1^2 \cdot E_1\left(\frac{a \cdot w_1}{u_m}\right) \right\} +
 \end{aligned}$$



Rys. 2. Typowe postacie rozkładów w odpowiadające rozkładom Q i U według rys. 1

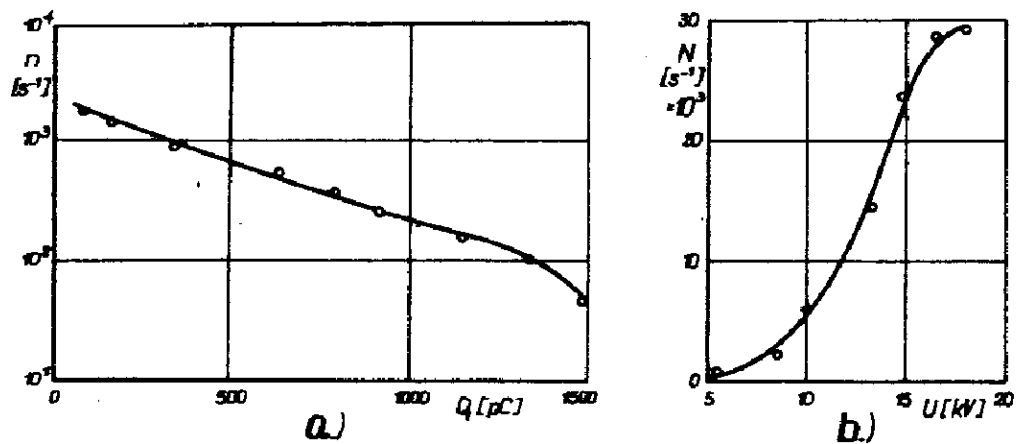
$$\begin{aligned}
 & + A \cdot \frac{\beta}{a} \left\{ \exp \left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m} \right) \left[a w_1 + \frac{1}{2} u_m - \frac{1}{2} a \right] + a \cdot w_1 \cdot E_1 \left(\frac{a \cdot w_1}{u_m} \right) \right\} + \\
 & + A \cdot \frac{f}{a} \cdot \exp \left(-\frac{a \cdot w_1}{u_m} \right)
 \end{aligned}$$

Funkcja gęstości rozkładu energii w wynika zaś z wzoru (4).

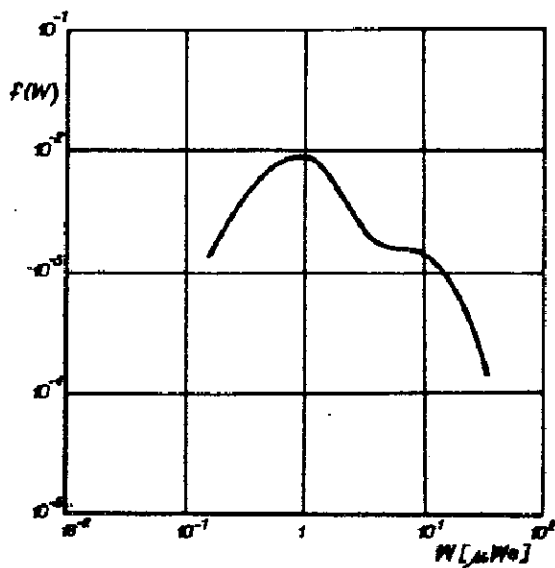
Analiza funkcji $f(w)$ wykazuje, że zależnie od konkretnych wartości współczynników A, a, α, β, f , określających rozkłady ładunku i napięcia początkowego według wzorów (5) i (6) możliwe są następujące postacie funkcji gęstości rozkładu energii zewnętrznej wyładowań (rys. 2).

W badania obiektów mogą oczywiście występować bardziej skomplikowane postacie rozkładów ładunków, wpływające odpowiednio na rozkład energii.

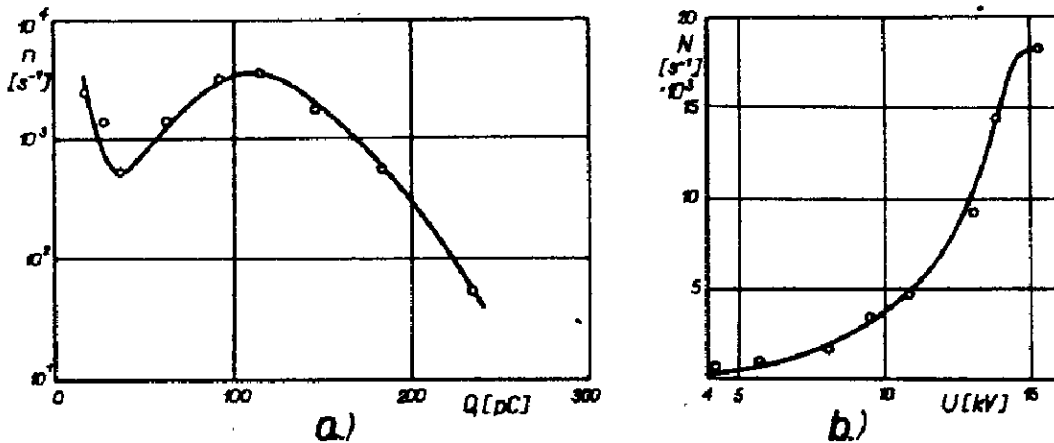
Na rysunku 3 i 5 przedstawiono rozkłady empiryczne ładunków i napięć w dwu przykładach działania wyładowań niezupełnych. Przykładem pierwszym jest źródło wyładowań niezupełnych w izolacji papierowej nasyconej kabla elektroenergetycznego 30 kV, uszkodzonej przez nakłucie i poprzez powłokę i pozostawienie w niej ostrza stalowego. Wyładowania rozwijające się w izolacji od ostrza ku żyłce, doprowadziły po kilkudziesięciu godzinach działania napięcia 17,3 kV do przebicia izolacji.



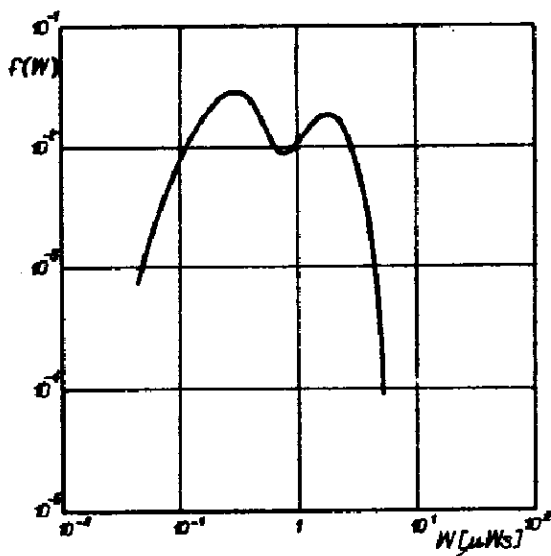
Rys. 3. Rozkład empiryczny ładunków (a) i zależność liczby wyładowań od napięcia (b). Izolacja kablowa papierowa nasycona, uszkodzona



Rys. 4. Funkcja gęstości rozkładu energii. Izolacja kablowa papierowa nasycona, uszkodzona



Rys. 5. Rozkład empiryczny ładunków (a) i zależność liczby wyładowań od napięcia (b). Izolacja kablowa polietylenowa, uszkodzona



Rys. 6. Funkcja gęstości rozkładu energii. Izolacja kablowa polietylenowa, uszkodzona

Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady empiryczne ładunków i napięć zmierzane w chwili początkowej procesu rozwoju wyładowań. Na rysunku 4 pokazana jest postać funkcji gęstości rozkładu energii, obliczonej z rozkładów Q i U . Celem dalszych badań powinno być określenie roli poszczególnych charakterystycznych zakresów rozkładu energii w procesie destrukcji materiału.

Przykładem drugim jest źródło wyładowań niezupełnych w izolacji polietylenowej kabla elektroenergetycznego na napięcie 15 kV, uszkodzonej przez nakłucie i pozostawienie w niej ostrza stalowego, przy czym zewnętrzny ekran na izolacji został usunięty. Wyładowania odbywające się przy działaniu napięcia 15 kV wykazywały tendencję do rozwoju, nie doprowadzono jednak w tym przypadku do grzebienia izolacji. Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady empiryczne ładunków i napięć, zmierzane w chwili początkowej po załączeniu napięcia. Na rysunku 6 pokazana jest postać funkcji rozkładu energii, obliczonej z poprzednich rozkładów Q i U . W tym przypadku widocznym jest, że rozkład przyjmuje dwie wartości lokalnie maksymalne, co nasuwa sugestię zbadania szczególnie wpływu tych dwóch zakresów energii. Można przy tym przypuszczać, iż przyczyną dwóch wartości maksymalnych w rozkładzie energii są dwa rodzaje wyładowań, jakie w tym przypadku posiadały warunki do rozwoju a mianowicie: 1) wyładowanie wgląd izolacji od końca ostrza, 2) wyładowania po powierzchni izolacji wokół ostrza (wyładowania typu ślizgowego).

4. Zakończenie

Postać funkcji gęstości rozkładu energii informuje o względnym udziale wartości energii w różnych jej zakresach. Występowanie wartości maksymalnych jest szczególnie interesujące, gdyż wskazuje na dominację źródła lub źródeł o zbliżonych intensywnościach. Okazuje się przy tym, iż postać rozkładu energii może różnić się w sposób istotny od postaci rozkładu ładunków. Rozpatrywanie więc łączne rozkładu ładunków i roz-

kładu energii pozwala na poszerzenie zakresu informacji o zjawisku.

Probabilistyczne ujęcie energii wyładowań inspirowane następnie celowość rozróżnienia przynajmniej dwóch skrajnych rodzajów impulsów:

- a) impulsy o największym prawdopodobieństwie występowania,
- b) impulsy o największej energii.

Określenie, które wyładowania wywołują szybciej trwałe nieodwracalne zmiany w izolacji: wyładowania częste lecz o małej intensywności, czy wyładowania rzadkie lecz o dużej intensywności (dużej energii) - wymaga nadal badań fizycznych w zakresie reakcji struktury materiału na bombardowanie ładunkami wyładowań.

Literatura

1. Bui Ai, Lacoste R., Mengin P., Galand I.: Phénomènes de décharges partielles. Rev. Gen. de l'Electr. No 3, 79, 1970.
2. Böning W.: Luftgehalt und Luftspaltverteilung geschichteter Dielektrika. Archiv für Elektrotechnik XLVIII Bd, H. 1,2, 1963.
3. Dakin T.W., Malinaric P.I.: A Capacitance Bridge Method for Measuring Integrated Corona Charge Transfer and Power Loss per Cycle. Tr. A.I.E.E. III, 1960.
4. Dobroszewski R.: Badanie porównawcze odporności folii elektroizolacyjnych na działanie wyładowań niesupełnych. AGH - PKME, 1972.
5. Hogg W.K., Walley C.A.: Breakdown of Insulation by Partial Discharges. Proc. I.E.E. No 1, 117, 1970.
6. Szczepański Z.: Nowa interpretacja Schematu Zastępczego Stosowanego przy badaniach degradacji dielektryków. Symposium "Wyładowanie niesupełne jako czynnik ~~destrukcji izolacji~~" AGH - PKME, 1972.
7. Szczepański Z.: Wyładowanie niesupełne w izolacji urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1973.

8. I.E.C. Publ. 270: Partial discharge measurement.
9. Meyer H.: Zur Bedeutung von Verlustfaktorkenngrößen für Wicklungsisolierungen elektrischer Maschinen. ETZ-A, 83, H. 2.
10. Kojkow S.N., Cykin A.N.: Elektriceskoje stareniye tverdykh dielektrikov i nadieznost' dielektricheskikh izdeliy. Energiya, Leningrad 1968.
11. Kreuger F.H.: Discharge Detection in High Voltage Equipment, Heywood Book, London 1964
12. Włodak R.: Analiza wyładowań niesupełnych i jej zastosowanie do ich interpretacji w technicznych układach elektroizolacyjnych. Zeszyty Naukowe AGH, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, Z. 61, 1974.
13. Veverka A., Chladek I.: Vliv povrchového odporu dutiny na ionizační pochody v pevnych izolantach. Elektrotechnický Obzor No 11, 51, 1962.
14. Veverka A.: Zur Problematik der Ionisation. Elektrische 17, H. 1, 1963.