

Zbigniew Lechowski

BADANIA PROCESU EROZJI WYWOŁANEJ WYŁADOWANIAM
NIEZUPEŁNYMI W IZOLACJI UZWOJEN MASZYN ELEKTRYCZNYCH

11. Uwagi ogólne

Nowoczesne układy izolacyjne uzwojeń maszyn elektrycznych charakteryzują małe wartości współczynnika strat dielektrycznych oraz przenikalności dielektrycznej, a także niewielkie przyrosty $\operatorname{tg} \delta$ i ϵ_{ω} w funkcji napięcia. Zapewnia to równowagę termiczną układu przy wysokich natężeniach pola. Można wykluczyć prawdopodobieństwo wystąpienia przebiccia cieplnego. Nie wystąpi również przebiccie o mechanizmie czysto elektrycznym, ponieważ nawet w obszarach silnie niejednorodnego pola elektrycznego jego natężenie jest zbyt małe, aby wywołać jonizację lawinową w dielektryku stałym.

Elektryczne uszkodzenia izolacji mają charakter przebiccia jonizacyjnego. Impulsem jest jonizacja fazy gazowej, w której powstaje pierwotny strumień elektronów. Wywołuje on na powierzchni fazy stałej, w gazowych szczelinach układu emisję wtórną. Jej efektem jest wprowadzenie do dielektryku elektronów pierwotnych i wtórnych, znaczna deformacja pola, zwiększenie natężenia pola miejscowego.

W izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych znajdują się bariery mikowe, wyróżniające się dużą odpornością na destrukcyjne działanie elektronów o dużych energiach. Dzięki nim proces rozwoju wyładowania jest hamowany.

Doc.dr inż. Zbigniew Lechowski - Zakład Izolacji Instytutu Energetyki
w Poznaniu

Pełne przebicie jonizacyjne poprzedzają zjawiska erozji. Zwiększa się wtedy zawartość jonizowanej fazy gazowej. Zdaniem autora odporność układu na działanie wyładowań niezupełnych można oceniać na podstawie rezultatów badania dynamiki procesów erozyjnych. Jak dalej wykazano, zastosowanie takiej metody pozwala uniknąć, szczególnie w przypadku izolacji uzwojeń maszyn, czasochłonnych badań regresji wytrzymałości elektrycznej, wymagających określenia czasu do przebicia.

2. Metody badania erozji dielektryka wywołanej wyładowaniami niezupełnymi

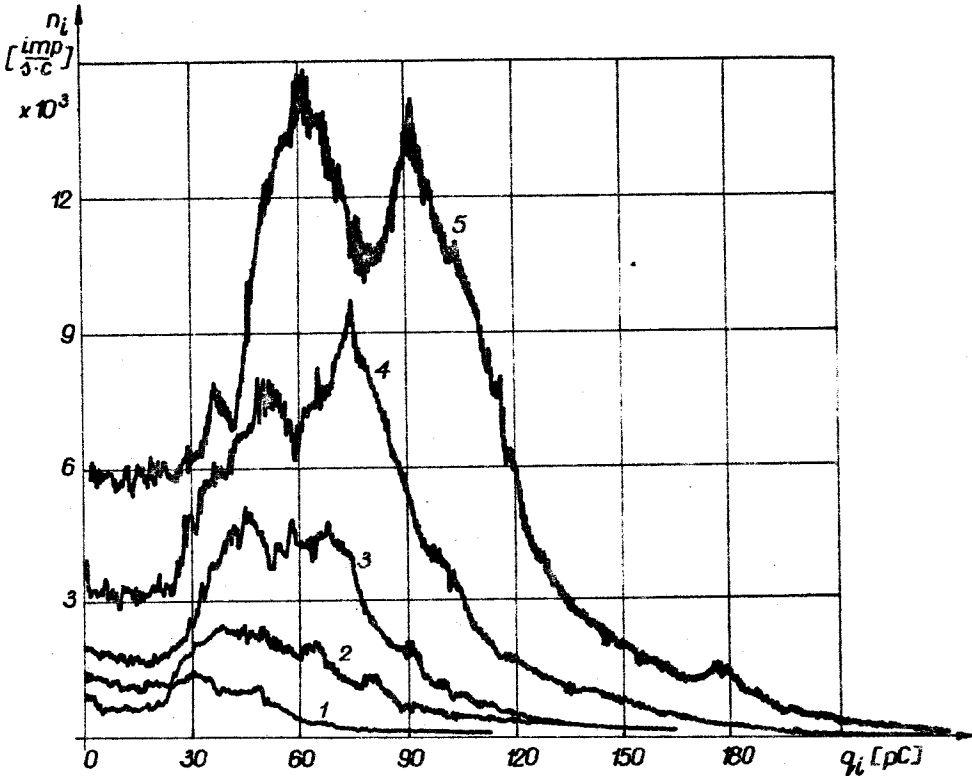
W obserwacjach procesu erozji istotne znaczenie ma odwzorowanie narażeń wywołanych działaniem pola elektrycznego. Niezbędne jest przyspieszenie procesów starzeniowych. W badanych układach destrukcyjny wpływ oddziaływania pola jest wyłącznie następstwem wyładowań niezupełnych w fazie gazowej. Dlatego proces starzenia przyspieszany, zwiększając energię wyładowań. Stawia się bowiem hipotezę proporcjonalnej zależności między energią traconą w układzie w wyniku jednego wyładowania a objętością wyerodowanego dielektryku [1].

Wzrost energii wyładowań niezupełnych można uzyskać różnymi sposobami. Najczęściej stosowanym jest zwiększenie natężenia pola. W tym przypadku wzrost energii można dokładnie określić za pomocą analizy amplitudowej wyładowań niezupełnych [2]. Umożliwia to oszacowanie współczynnika przyspieszenia procesów starzeniowych.

Wyznacza się empirycznie rozkłady brzegowe ładunku pozornego wyładowań, określając liczbę impulsów n_1 o ładunku pozornym zawartym w przedziale q i $q + dq$ przy stałym natężeniu pola E . Przykład rejestrowanych za pomocą analizatora funkcji $n_i = f(q_i)$ przedstawiono na rysunku 1.

Na podstawie rozkładów brzegowych ładunku można obliczyć rozkład warunkowy napięcia zapłonu źródeł wyładowań niezupełnych. Określa on liczbę impulsów o napięciu zapłonu zawartym w przedziale U ; $U + dU$

pod warunkiem, że ładunek tego impulsu jest zawarty w określonym przedziale q i $q+dq$. Przykład takich obliczeń przedstawiono na rysunku 2.



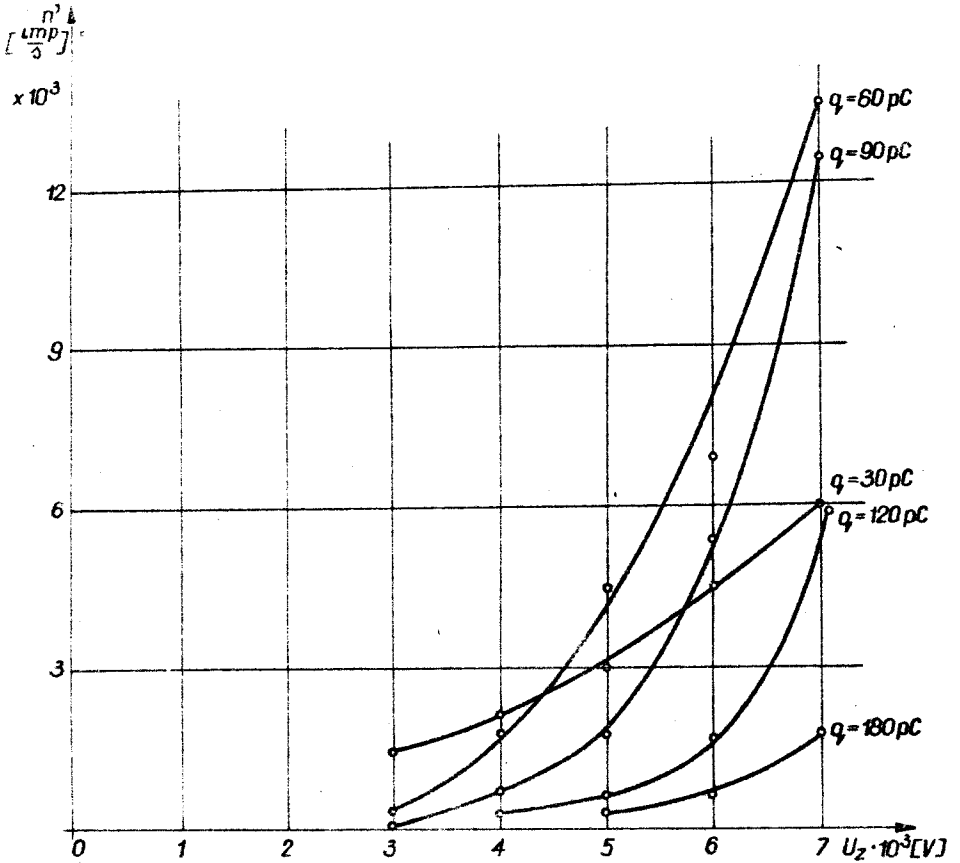
Rys.1. Funkcje $n_i=f(q_i)$ wyznaczone dla różnych natężeń pola.

Izolacja typu papier mikowy - epoksyd. szkło:

1 - $E = 3$ kV/mm; 2 - $E = 4$ kV/mm; 3 - $E = 5$ kV/mm;

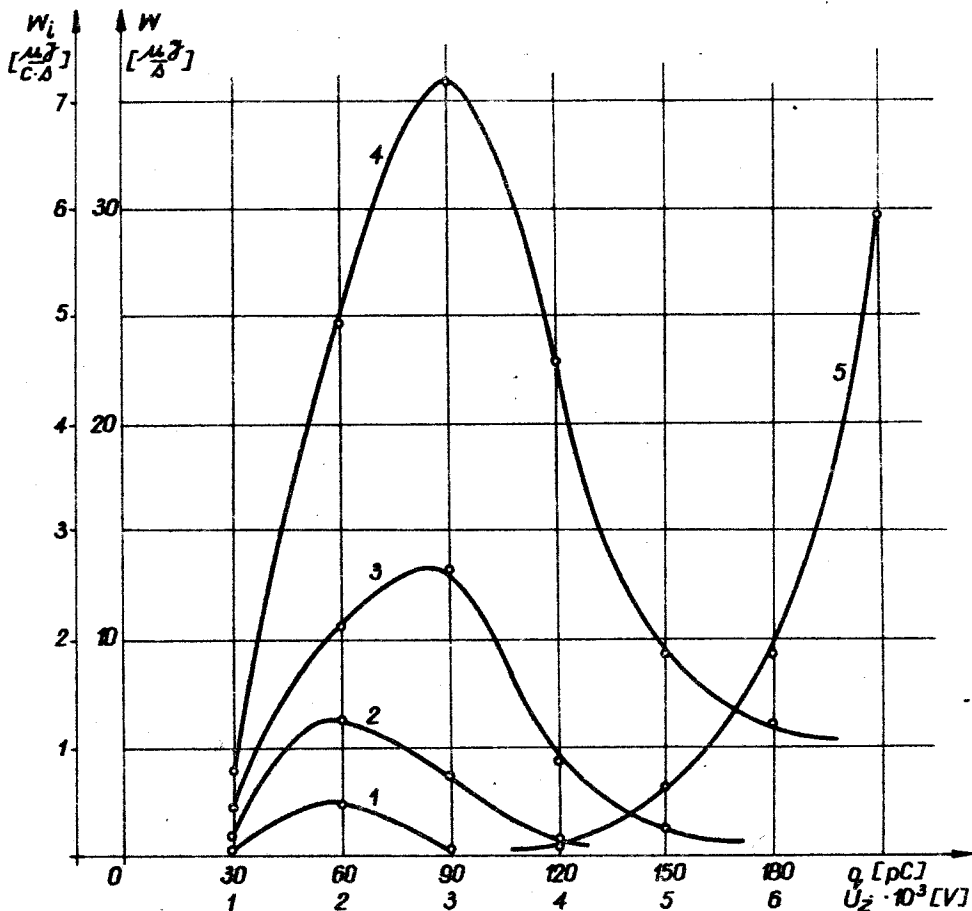
4 - $E = 6$ kV/mm; 5 - $E = 7$ kV/mm

Znajomość rozkładu brzegowego ładunku i napięcie zapłonu pozwala wyznaczyć funkcję określającą wartość energii pozornej związanej z elementarnymi wyładowaniami o określonych ładunkach pozornych. Można także wyznaczyć całkowitą wartość energii pozornej wyładowań i jej zależność od natężenia pola. Przykład takich obliczeń przedstawiono na rysunku 3



Rys.2. Rozkład warunkowy napięć zapłonu wyładowań niezupełnych wyznaczony dla przypadku z rysunku 1

Ze wzrostem natężenia pola energia pozorna wyładowań rośnie wykładniczo. Przebieg funkcji $W_{CZ} = f(E)$ jest zależny od statystycznego rozkładu parametrów określających wymiary poszczególnych źródeł wyładowań i może być wyznaczony jedynie empirycznie. Zazwyczaj znaczne przyspieszenie procesów starzeniowych można uzyskać już przy niewielkim przyroście natężenia pola. Można wtedy dostatecznie dokładnie szacować współczynnik przyspieszenia jako stosunek całkowitych energii wyładowań niezupełnych.



Rys.3. Rozkład energii wyładowań niezupełnych obliczony dla różnych natężeń pola 1 - 4 kV/mm; 2 - 5 kV/mm; 3 - 6 kV/mm; 4 - 7 kV/mm i 5 - przyrost całkowitej energii pozornej wyładowań niezupełnych w funkcji natężenia pola

Jak wynika z zależności przedstawionej na rysunku 3, ze wzrostem natężenia pola rośnie udział energii elementarnych wyładowań o dużych ładunkach. Stanowi to trudną do określenia zmianę w mechanizmie oddziaływania wyładowań niezupełnych na dielektryk stały. Uwzględnienie tego czynnika, niewątpliwie stanowiącego dodatkowe zaostrożenie warunków próby, wymaga odrębnych badań.

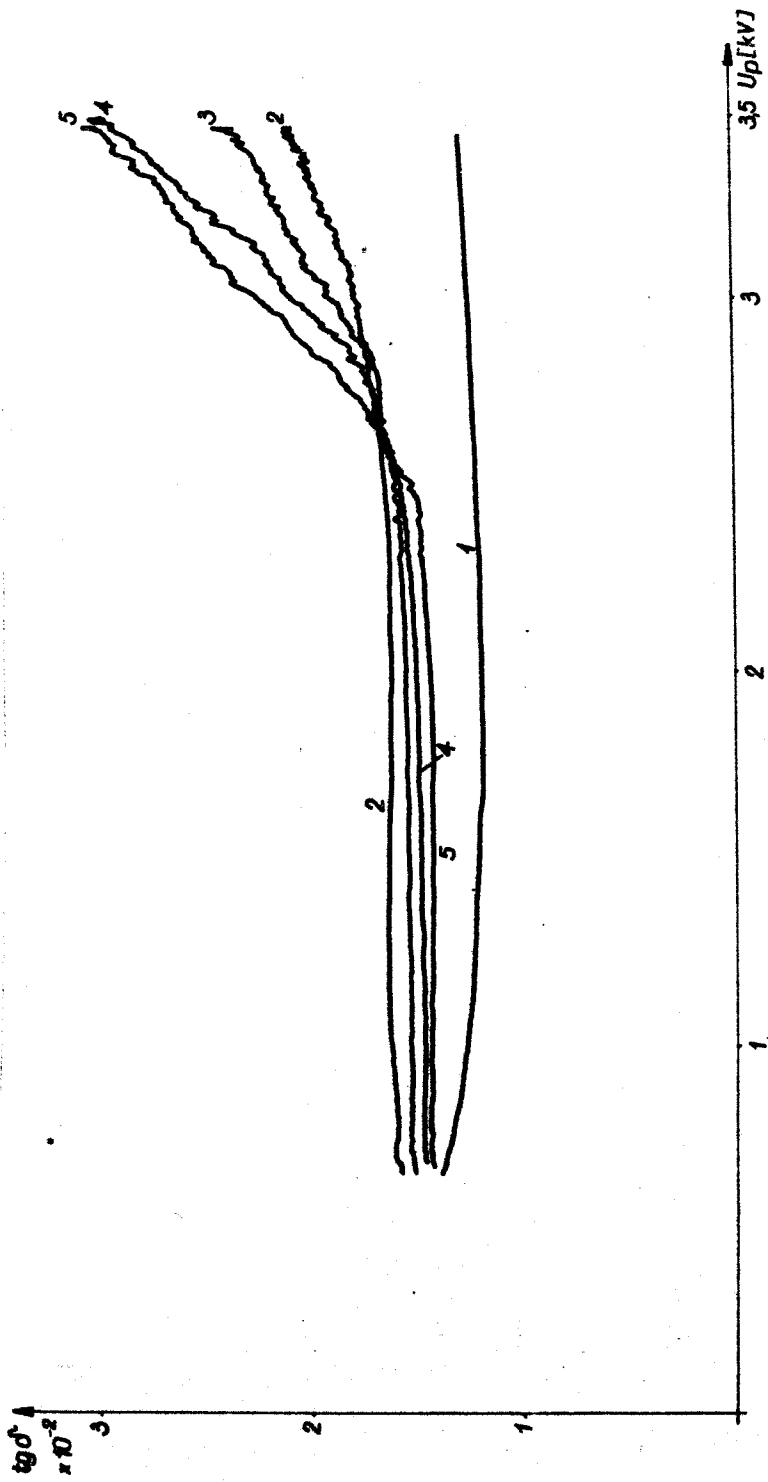
Równoległe ze zwiększeniem wartości natężenia pola stosuje się czę-
sto zwiększenie częstotliwości napięcia probierczego [3]. Uzyskujemy
tą drogą wzrost liczby impulsów /elementarnych wyładowań/ w określonym
przedziale czasu. Istnieje poparty doświadczeniami pogląd [3], że
prędkość degradacji wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych
z jonizującą fazą gazową jest wprost proporcjonalna do napięcia pro-
bierczego.

Ograniczeniem w przyspieszaniu procesów starzeniowych jest wzrost
energii cieplnej wydzielanej w układzie. Przy zastosowaniu zbyt wyso-
kich natężeń pola lub wysokich częstotliwości może to doprowadzić do
znaczących lokalnych przyrostów temperatury ponad wartość założoną w
próbie. Zmieniłoby to warunki oddziaływania wyładowań na dielektryk
stały z uwagi na zmianę energii wiązań molekularnych. W przedstawionych
dalej badaniach zastosowano nie wyższy niż dwukrotny wzrost natężenia
pola i dziesięciokrotny wzrost częstotliwości uzyskując 100-krotne
przyspieszenie procesów starzeniowych bez widocznych przyrostów tempe-
ratury.

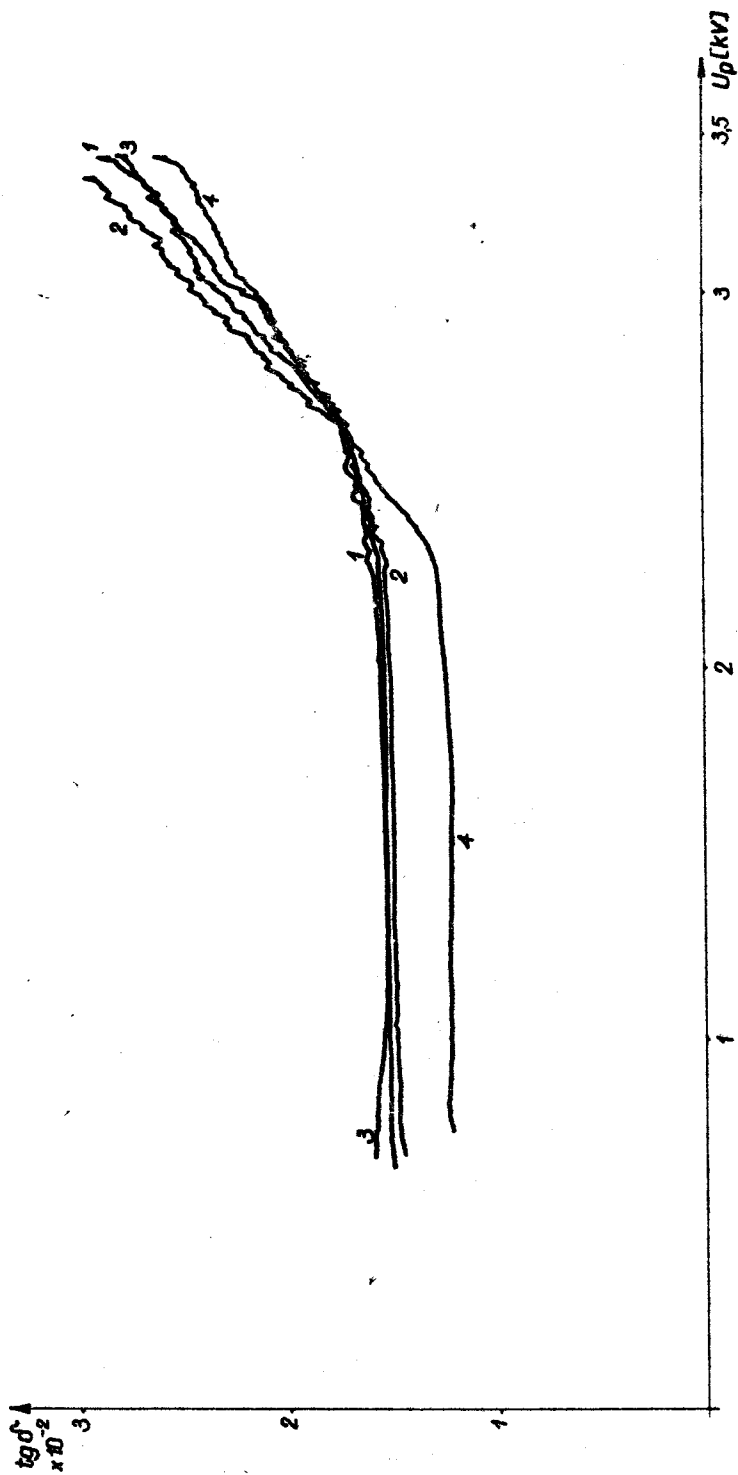
3. Przykłady rezultatów badania dynamiki procesów erozyjnych

W przypadku znacznych zmian objętości jonizującej fazy gazowej moż-
liwe jest zastosowanie znanej metody analizy przyrostu współczynnika
strat dielektrycznych [4] i można obserwować zmiany maksymalnej warto-
ści pochodnej $(\frac{d \operatorname{tg} \delta^*}{d U_p})_{\max}$.
Przykład rezultatów badania rzadko obecnie stosowanego układu izolacyj-
nego typu mika - szelak - papier przedstawiono na rysunku 4. Analogowa
i cyfrowa rejestracja funkcji $\operatorname{tg} \delta^* = f(U_p)$ z dokładnością pomiaru
 $\frac{d \operatorname{tg} \delta^*}{d U_p} > 0,002/kV$ nie wykazywała istnienia źródeł wyładowań niezupełnych.
Analiza funkcji $n_i = f(q_i)$ wskazywała na istnienie nielicznych źródeł
wyładowań.

Pomimo niewielkiej początkowo zawartości jonizowanej fazy gazowej



Rys. 4a. Wyniki badań wpływu działania wyładowań niezupełnych w izolacji typu papier młkowy - szelak - papier. $E_p = 10 \text{ kV/mm}$, częstotliwość 500 Hz. Czasy napięcia:
 1 - $t = 0 \text{ h}$; 2 - $t = 2 \text{ h}$; 3 - $t = 3 \text{ h}$; 4 - $t = 4 \text{ h}$; 5 - $t = 5 \text{ h}$.



Rys.4b. Wyniki badania jak na rysunku 4a. Czasy napięć: 1 - $t = 7$ h; 2 - $t = 8$ h ;
3 - $t = 10$ h ; 4 - $t = 12$ h

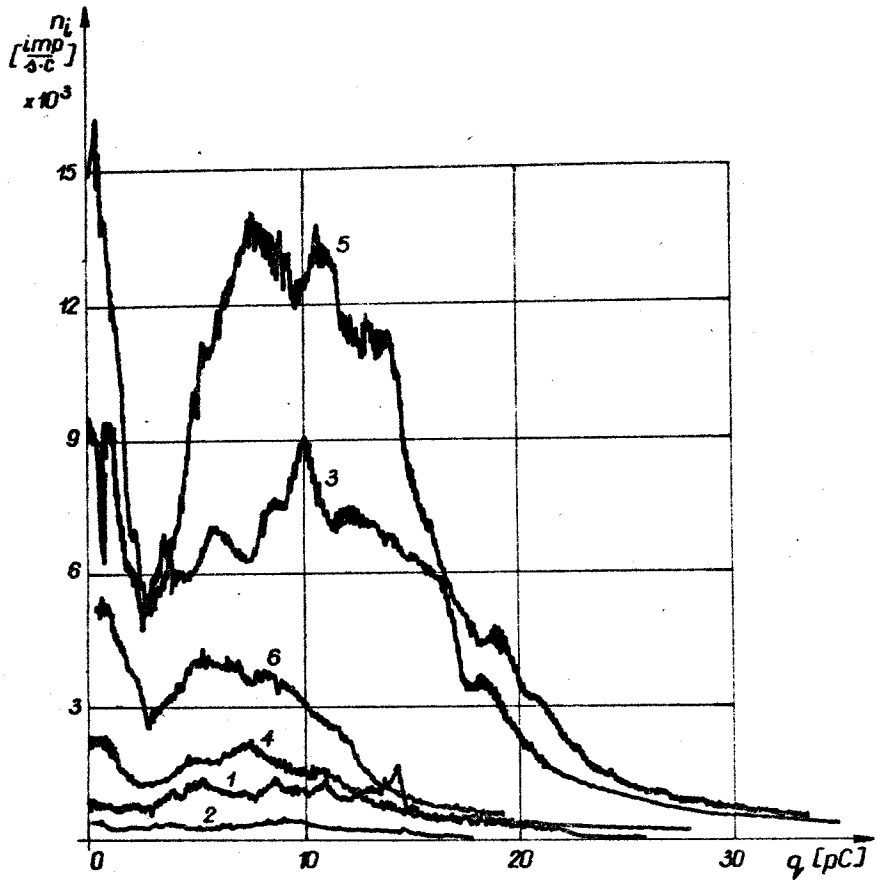
badany obiekt okazał się szczególnie mało odporny na działanie wyładowań niezupełnych. Już po pierwszej godzinie działania pola o natężeniu $E = 10 \text{ kV/mm}$ i częstotliwości 500 Hz wartość $\left(\frac{d \text{tg} \delta^t}{d U_p}\right)_{\text{max}}$ wynosiła 0,008/kV, a po 7-miu godzinach wzrosła dziesięciokrotnie. Te obserwacje potwierdzają słuszność przypuszczeń o erozyjnym charakterze oddziaływania wyładowań niezupełnych na otaczający szczeliny dielektryk.

W przypadku stabilnych układów izolacyjnych, o małej zawartości jonizowanej fazy gazowej, analiza funkcji $\text{tg} \delta^t = f(U_p)$ jest niedostatecznie czułym narzędziem badania zmian struktury. Wnioskowanie utrudniają zmiany molekularnej struktury dielektryka. Na skutek przenikania elektronów z obszaru działania wyładowań niezupełnych zmienia się jego konduktancja, a tym samym wartość współczynnika strat dielektrycznych przy napięciach niższych od początkowego napięcia wyładowań niezupełnych.

Przedstawione trudności skłaniają do posłużenia się w badaniach dynamiki erozji metodą analizy amplitudowej ładunku pozornego wyładowań.

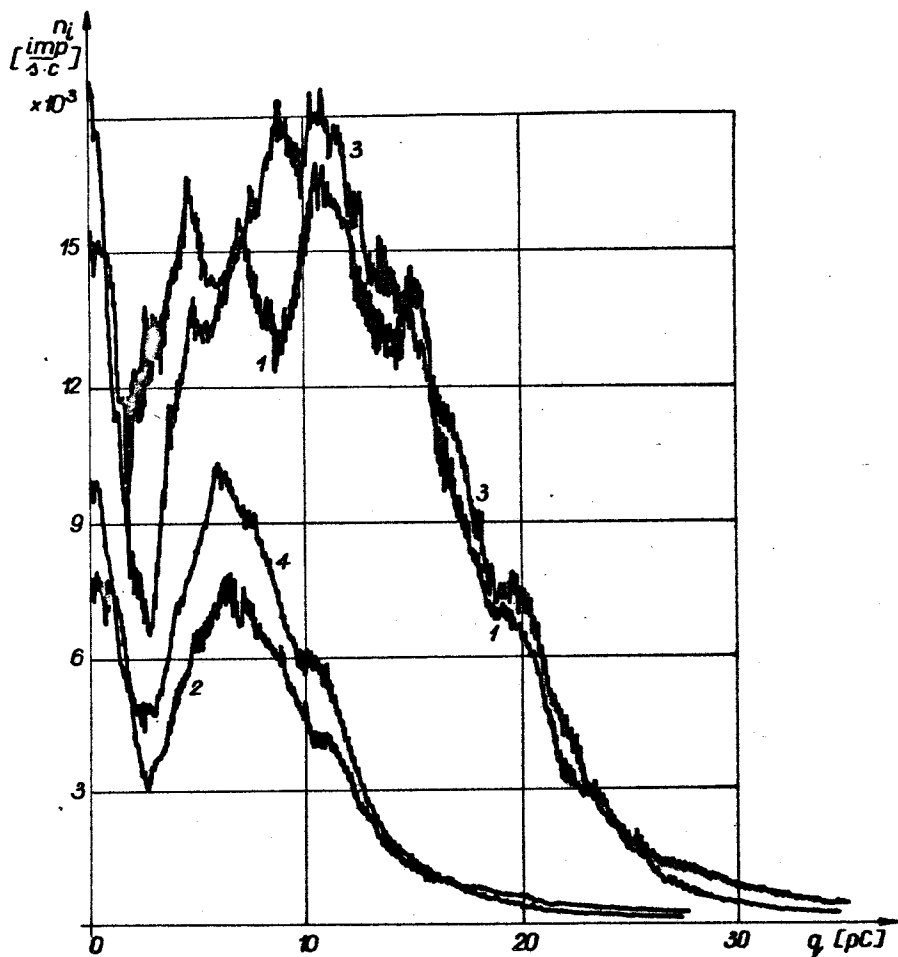
Zarejestrowane dla przypadku z rysunku 4 funkcje $n_i = f(q_i)$ przedstawiono na rysunku 5. Niewielkiej początkowo objętości szczelin gazowych odpowiada niewielka liczba impulsów w przedziale badanych wartości ładunków. W układzie znajdują się nieliczne źródła wyładowań o dość zróżnicowanych wartościach ładunku przeciętnego \bar{q} . Wyładowania w tych źródłach i związane z nimi zjawiska erozji są przyczyną istotnych zmian w przebiegu funkcji $n_i = f(q_i)$. Rośnie wyraźnie liczba impulsów dla poszczególnych wartości ładunków q . Pojawiają się także impulsy o większych wartościach ładunku, a w przebiegu funkcji $n_i = f(q_i)$ pojawia się maksimum.

W badanym przypadku działanie wyładowań nadaje funkcji $n_i = f(q_i)$ w pewnym przedziale ładunków q kształt zbliżony do rozkładu normalnego. Świadczy to o decydującym udziale zbioru źródeł wyładowań o podobnych wartościach ładunku przeciętnego \bar{q} . Można przypuszczać, że są to szczeliny o podobnych wymiarach.



Rys. 5a. Wyniki badania wpływu wyładowań niezupełnych jak na rysunku 4. Pomiar funkcji $n_i = f(q_i)$ po czasie naprężania, przy natężeniach pola:

1	- t = 0h	6 kV/mm ;	2 - t = 0h	4 kV/mm ;
3	- t = 1h	6 kV/mm ;	4 - t = 1h	4 kV/mm ;
5	- t = 2h	6 kV/mm ;	6 - t = 2h	4 kV/mm



Rys.5b . Wyniki badania jak na rysunku 5a.

1 - $t = 3h$ 6 kV/mm ; 2 - $t = 3h$ 4 kV/mm
 3 - $t = 4h$ 6 kV/mm ; 4 - $t = 4h$ 4 kV/mm

Autor przyjmuje, że zmiana rozkładu brzegowego ładunków wynika przede wszystkim z erozyjnych zmian wymiarów istniejących w momencie rozpoczęcia próby, źródeł wyładowań. Jest to założenie prawdopodobne. Należy jednak zauważyć, że zmiany wymiarów wtrącin gazowych mogą wpłynąć na rozkład lokalnych natężeń pola w układzie. Dotychczas nieaktywne wtrąciny mogą stać się źródłami wyładowań.

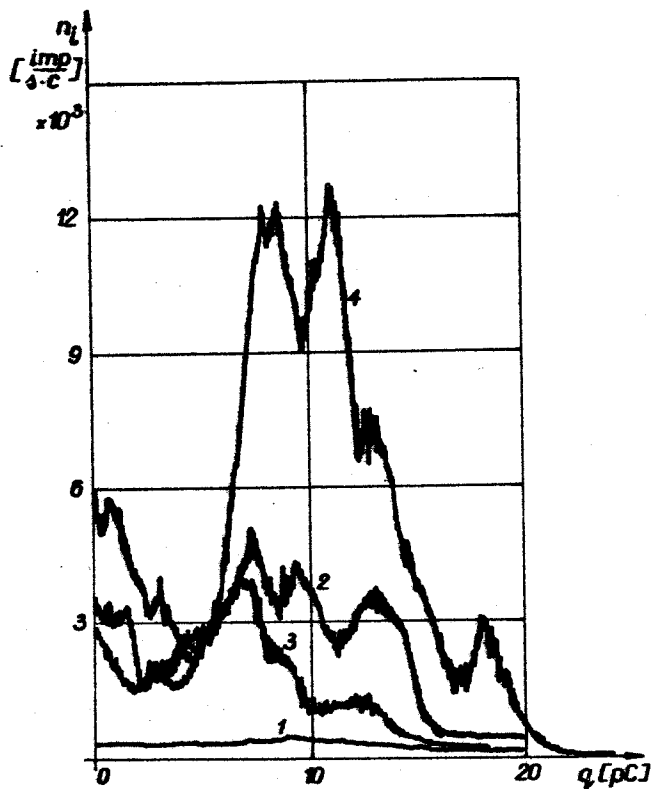
Istotne jest przypuszczenie, że długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych powoduje ograniczoną erozję szczelin, zwiększając ich objętość. Zmniejsza się dyspersja ładunków elementarnych impulsów. W tym stadium proces erozji ustaje lub przynajmniej jest bardzo zwolniony. W niektórych przypadkach obserwowano nawet zmniejszenie liczby impulsów w całym zakresie wartości badanych ładunków q .

Zahamowanie procesu erozji i zmniejszenie ładunku pozornego wyładowań można przypisać jedynie zmniejszeniu natężenia pola w szczelinie w następstwie molekularnych zmian fazy stałej.

Autor stwierdził, że niektóre materiały wchodzące w skład układów izolacyjnych w szczególnie sposób wpływają na hamowanie procesu erozji. Dotyczy to między innymi folii poliestrowych.

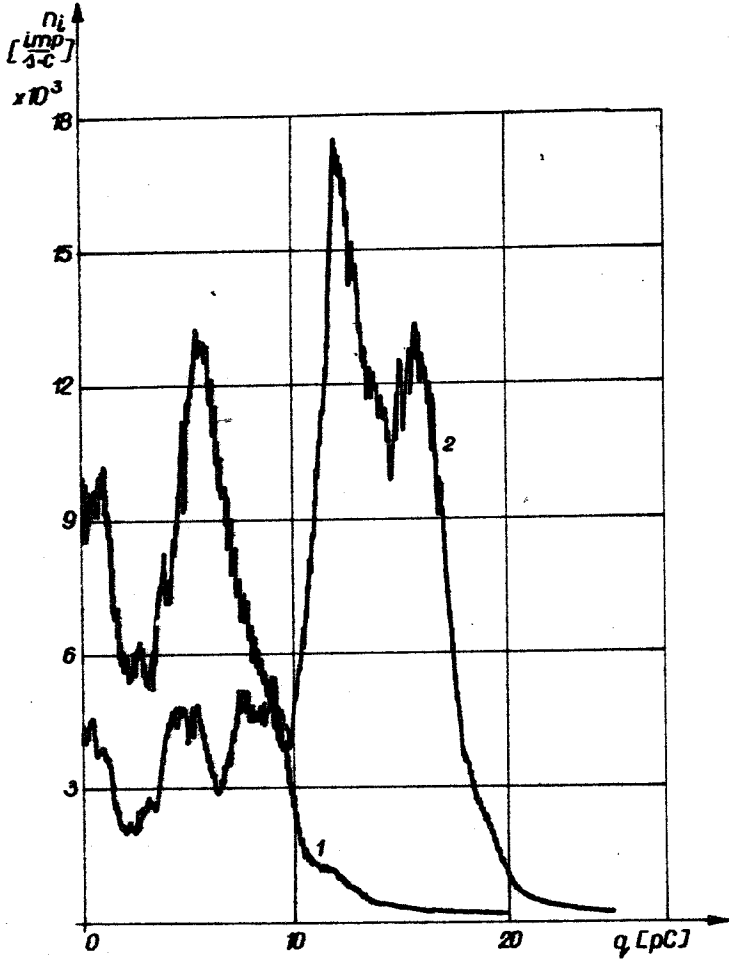
Stwierdzenie zjawiska stabilizacji wyładowań niezupełnych ma istotne znaczenie dla prognozowania wytrzymałości elektrycznej.

Na rysunku 6 przedstawiono zmiany przebiegu funkcji $n_i = f(q_i)$ o zupełnie innym charakterze. W badanym układzie typu papier mikowy - epoksyd - szkło już w stanie wyjściowym badana funkcja miała dwa maksima. Istniały więc dwa zbiory źródeł wyładowań o różnych wartościach ładunku przeciętnego. W pierwszym okresie oddziaływania wyładowań niezupełnych funkcja przyjęła kształt zbliżony do rozkładu normalnego. Po ośmiu godzinach pojawiło się wyraźnie drugie maksimum, o wyższej wartości ładunku przeciętnego. Oznacza to, że w części szczelin erozyjne działanie wyładowań niezupełnych doprowadziło do poważnych zmian. W rezultacie pojawiła się grupa impulsów o dużych ładunkach ze źródeł



Rys.6a. Wyniki badania wpływu wyładowań niezupełnych na izolację typu papier mikowy - epoksyd - szkło. Naprężenie $E_p = 10 \text{ kV/mm}$, $f = 500 \text{ Hz}$. Pomiar funkcji $n_i = f(q_i)$ po czasie naprężenia przy natężeniach pola:

1 - $t = 0 \text{ h}$	4 kV/mm ;	2 - $t = 0 \text{ h}$	6 kV/mm
3 - $t = 1 \text{ h}$	4 kV/mm ;	4 - $t = 1 \text{ h}$	6 kV/mm



Rys.6b. Wyniki badania jak na rysunku 6a. 1 - $t = 8h$ 4 kV/mm;
2 - $t = 8h$ 6 kV/mm

o wysokim napięciu zapłonu. Są to impulsy o dużej energii. Nie zauważono w tym przypadku stabilizacji wyładowań. Po 36 godzinach działania napięcia o częstotliwości 500 Hz przy natężeniu pola 10 kV/mm nastąpiło przebicie.

Badania wielu układów potwierdziły przypuszczenie, że niehamowany proces erozji, obserwowany w pierwszych kilku do kilkunastu godzinach oddziaływania pola, prognozuje szybką degradację wytrzymałości. W takich przypadkach obserwujemy równocześnie znaczne przesunięcie maksimum funkcji określającej wartość energii pozornej związanej z wyładowaniami o określonych ładunkach w kierunku wyższych wartości q . Stwierdzono także, że ograniczone zmiany energii pozornej wyładowań, a zwłaszcza "stabilizacja" wyładowań, są charakterystyczne dla układów o wysokiej długotrwałej wytrzymałości elektrycznej.

4. Wykorzystanie badań dynamiki procesów erozyjnych do oceny materiałów i układów izolacyjnych

Badania erozji w układach izolacyjnych uzwojeń maszyn elektrycznych zawierających jonizowaną fazę gazową mogą być wykorzystane do oceny odporności na działanie wyładowań niezupełnych. W tym przypadku własności izolacji porównuje się, poddając układy działania wyładowań o tej samej wartości energii pozornej. Można również oceniać długotrwałą wytrzymałość elektryczną układu, kontrolując odporność na działanie pola elektrycznego w warunkach zbliżonych do narażeń spotykanych w eksploatacji.

Dotychczas stosowane metody badań, polegające na bezpośrednim wyznaczaniu krzywych regresji wytrzymałości elektrycznej, nie nadają się do szybkiej oceny jakości nowych wyrobów, materiałów i technologii. Jako badania niszczące nie mogą być stosowane w próbach wyrobu.

Zastosowanie analizy rozkładu gęstości ładunku pozornego wyładowań niezupełnych umożliwia badanie gotowych układów również w próbach wyrobu. Jest próbą nieniszczącą i możliwą do realizowania w krótkim cza-

sie. Metodę tę zastosowano w Zakładzie Izolacji IEn w badaniach nad doborem materiałów i optymalizacją procesów technologicznych w produkcji izolacji elementów uzwojeń maszyn wysokiego napięcia.

LITERATURA

1. Bui Ai i inni: Studium doświadczalne i teoretyczne krzywych długości życia materiałów izolacyjnych poddawanych działaniu wyładowań niezupełnych. Przegl.Elektrotechn. nr 1, 1969.
2. Włodek R.: Analiza wyładowań niezupełnych i jej zastosowanie do ich interpretacji w technicznych układach izolacyjnych. Zeszyty Naukowe AGH Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa nr 61, 1974.
3. Wichmann A., Grunewald P.: Lebensdaueruntersuchungen an Hochspannungsisolierungen mit Zeittraffung durch Erhöhung der Prüffrequenz ETZ-A z.6 1974.
4. Lechowski Z.: The Influence of Jonisation on Alteration of Generator Insulation. A.I.M. - Liege 1966,