

Dr inż. Ryszard Dobroszewski
Mgr inż. Włodzimierz Górczewski
Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska

BADANIE STABILNOŚCI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH NA MODELU DIELEKTRYKU STAŁEGO

1. Wstęp

Rola jaką odgrywają wyładowania niezupełne w procesie degradacji własności izolacyjnych dielektryków jest powodem, dla którego zagadnieniem wpływu tych wyładowań na dielektryki poświęca się wiele uwagi. Panuje zgodny pogląd, że wyładowania niezupełne występujące w szczelinach gazowych zawartych wewnątrz warstwowych układów izolacyjnych decydują o czasie eksploatacji tych układów. Występowanie wyładowań niezupełnych w dielektryku jest równoznaczne z występowaniem tzw. "składowej jonizacji strat dielektrycznych". Gdy wartość jej maleje, następuje tzw. samowygaszenie wyładowań. Samowygaszenie wyładowań jest zjawiskiem korzystnym z punktu widzenia eksploatacji urządzeń elektrycznych, gdyż ogranicza w pewnym stopniu skutki wydzielania się energii w dielektryku.

Może natomiast komplikować ocenę struktury układu izolacyjnego na podstawie pomiaru strat dielektrycznych.

Mimo znaczenia jakie może mieć wygaszenie wyładowań, np. dla "żywności" izolacji wysokonapięciowej, zjawisko to nie zostało do tej pory wszechstronnie zbadane. W szeregu publikacji wskazuje się na możliwość samoistnych wahań intensywności wyładowań niezupełnych, upatrując w tym jednej z przyczyn rozrzutu wyników, np. przy badaniu "czasu życia" izolacji. Przypadkowość występowania zjawiska wygaszenia oraz stopień obniżenia intensywności wyładowań przy wygaszaniu może być jedną z przyczyn komplikacji przy porównywaniu wyników badań przeprowadzanych przez różnych autorów.

Jak się wydaje, wyjaśnienie przyczyn występowania samowygaszania wyładowań uzupełni stan wiedzy o wyładowaniach niezupełnych, będzie również stanowiło cenną informację przy projektowaniu układów izolacyjnych.

2. Stabilność wyładowań niezupełnych

Polska norma PN-70/E-04066 "Wyładowania niezupełne w izolacji przy napięciu przemiennym" określa wyładowania niezupełne jako stabilne, jeżeli nie zanikają w czasie, tzn., że przerwy w występowaniu poszczególnych wyładowań lub ich grup nie przekraczają 10s.

Tego rodzaju określenie traktuje jako stabilne wyładowania występujące w dość szczególnym przypadku, mianowicie przy wartościach napięcia probierczego bliskiego napięciu progu wyładowań niezupełnych - U_0 . Może tu dochodzić do chwilowych zaników wyładowań na skutek samowygaszania. Częstość repetycji wyładowań może być dla tego przypadku wielkością zmienną i komplikować np. kwalifikowanie występujących wyładowań jako stabilnych lub niestabilnych. Mogą również wynikać pewne komplikacje z wyznaczeniem stratności układów izolacyjnych przy założeniu określonej w ten sposób stabilności wyładowań, dopuszczającej możliwość ich całkowitego zaniku. Obniżanie intensywności wyładowań - częściowe wygaszanie jest obserwowane także przy napięciach znacznie wyższych od napięcia progu wyładowań niezupełnych - U_0 . Przy napięciach wyższych od U_0 można w zasadzie mówić o obniżeniu intensywności wyładowań, choć nie należy wykluczać przypadków całkowitego ich zaniku.

Polemizując z określeniem podanym w normie, wydaje się, że trudno jest formalnie uznać wyładowania za stabilne, jeżeli dopuszczana jest możliwość ich całkowitego, choć chwilowego zaniku. W świetle powyższego stwierdzenia wydaje się słusznym przyjęcie innego określenia stabilności wyładowań, które wykluczałoby możliwość występowania chwi-

lowych zaników wyładowań, a jednocześnie precyzowało stabilność wyładowań niezupełnych w aspekcie obniżania intensywności wyładowań.

3. Zjawisko częściowego wygaszania wyładowań niezupełnych

Wygaszanie wyładowań niezupełnych powstających w izolacji jest zwykle rejestrowane w przypadkach, gdy wyładowania te występują w szczelinach lub wtrącinach gazowych zawartych w izolacji stałej. Nie należy jednak wykluczać możliwości występowania analogicznego zjawiska w przypadku wyładowań niezupełnych np. na powierzchni dielektryku.

Zmiany intensywności wyładowań w szczelinach izolacji zachodzą najczęściej już w pierwszych minutach po przyłożeniu napięcia probierczego, przekraczającego poziom progu wyładowań - U_0 [5, 6]. W wyniku tego wartość strat dielektrycznych i intensywność wyładowań maleją, ustalają się jednak po czasie rzędu kilku lub kilkudziesięciu minut. Zmiany te są najczęściej odwracalne i zależnie od czasu ekspozycji próbek, $\text{tg}\delta$ wraca do wartości początkowej, a intensywność wyładowań osiąga poziom zbliżony do poprzedniego po upływie kilku lub kilkudziesięciu godzin po ustąpieniu działania pola elektrycznego. Pownowny wzrost intensywności wyładowań jest obserwowany w interwale czasowym poprzedzającym bezpośrednie przebicie dielektryku.

W wyniku działania wyładowań następują również zmiany wartości napięcia progu wyładowań - U_0 i napięcia gaśnięcia wyładowań U_g . Rogers [6] rejestrował wzrost wartości U_g i na tej podstawie analizował wygaszanie wyładowań. Goliński [3] wskazuje na zależność charakteru zmian wartości napięć U_0 i U_g od materiału badanego dielektryku. Dla tywic epoksydowych obserwowano obniżanie się wartości napięć U_0 i U_g . Zmiany te, podobnie jak zmiany $\text{tg}\delta$ i intensywności wyładowań są w dużym stopniu odwracalne.

W publikacjach spotyka się szereg hipotez wyjaśniających przyczyny samowygaszania wyładowań:

- Rogers [6] tłumaczy samowygaszanie wyładowań wzrostem konduktywności ścianek wtrąciny na drodze zmian strukturalnych powierzchni wtrąciny. W rezultacie działania wyładowań następuje ekwipotencjalizacja wtrąciny - zwieranie pojemności związanej z wtrąciną. Ekwipotencjalizacja wtrąciny wyjaśnia między innymi fakt znacznej niezależności samowygaszania wyładowań od wartości napięcia probierczego.

Koncepcja Rogersa tłumaczy samowygaszanie, ale nie oddaje istoty zjawiska, gdyż jak się wydaje, mało prawdopodobne jest wystąpienie w krótkim stosunkowo czasie daleko idących zmian strukturalnych powierzchni wtrąciny, powodujących wzrost konduktywności jej ścianek. Zmiany takie występują zwykle po dłuższym okresie działań wyładowań niezależnych na dielektryk. Nie należy jednak wykluczać indywidualnych różnic szybkości wzrostu konduktywności dla różnych materiałów izolacyjnych.

Ciekawą hipotezę na temat samowygaszania podano w pracy [5]. Autorzy pojmają jako nieistotny dla zjawiska wygaszania wpływ ciśnienia i temperatury gazu w szczelinie. Następnie, wychodząc z równania energii dla szeregowego układu szczeliny dochodzą do wniosku, że wzrost napięcia U_0 muszą powodować zmiany elektrycznego stanu gazu. Ładunki powstałe w wyniku jonizacji gazu mogą być związane z lokalnym polem dipoli polarnego dielektryku, doprowadzając do powolnych zmian własności dielektrycznych szczeliny gazowej, zwiększania jej pojemności, a zatem i do zmniejszania energii czynnej. Zastosowanie przedmuchu szczeliny poddawanej działaniu wyładowań niezależnych eliminowało samowygaszanie. W ten sposób potwierdzono przypuszczenie o zmianach elektrycznego stanu gazu powodujących wygaszanie wyładowań.

Autorzy pracy [5] podają również, że badania żywic epoksydowych poddawanych działaniu wyładowań niezależnych wykazały znaczne zmiany ich rezystywności w granicach od 10^{11} do $10^8 \Omega \text{ cm}$ po upływie 5-10 minut. Autorzy zaznaczają, że zjawisko to było odwracalne i zależne od stopnia utwardzenia żywicy.

W uzupełnieniu hipotezy autorów pracy [5] należy dodać, że na powierzchni ścianek wtrąciny może dochodzić do absorpcji jonów powstałych w wyniku jonizacji gazu we wtrącinie [3].

Jony te, jak się wydaje, mogą zostać związane na powierzchni ścianek wtrąciny dzięki ich oddziaływaniu z jonami znajdującymi się w dielektryku /niepolarnym/ otaczającym wtrącinę. W wyniku oddziaływania jonów absorbowanych na ściankach wtrąciny ze zjonizowanym gazem mogą tworzyć się lokalne ładunki przestrzenne utrudniające rozwój wyładowań niezupełnych. Absorpcja jonów na powierzchni ścianek wtrąciny może również wyjaśniać fakt szybkiego wzrostu konduktywności powierzchni ścianek wtrąciny poddanej działaniu wyładowań niezupełnych.

Za takim opisem zjawiska wygaszania wyładowań przemawia wpływ przedmuchu wtrąciny obserwowany przez autorów pracy [5]. Przedmuch wtrąciny usuwa absorbowane na jej ściankach jony. W wyniku tego intensywność wyładowań rośnie i osiągając poziom pierwotny utrzymuje się na nim w sposób stabilny. W podobny sposób przebiegają zmiany rezystywności powierzchniowej ścianek wtrąciny. Odwracalność zjawisk zachodzących we wtrącinie pozostającej w stanie beznapięciowym można wytłumaczyć między innymi neutralizacją znajdujących się tam jonów.

Fornijanie wpływu ciśnienia wewnątrz wtrąciny na wygaszanie wyładowań w ogólnym przypadku wydaje się niesłuszne, ponieważ gazowe produkty rozkładu dielektryku mogą powodować wzrost ciśnienia wewnątrz "szczelnej" wtrąciny, zgodnie więc z prawem Paschena, należy spodziewać się wzrostu wytrzymałości elektrycznej zawartego w niej gazu. Wzrost ciśnienia gazu wewnątrz wtrąciny może powodować także powiększenie jej wymiarów, powodując tym samym zmiany jej pojemności. Przy zmniejszeniu pojemności wtrąciny może nastąpić obniżenie wartości napięć U_0 i U_g oraz wzrost intensywności wyładowań. Kojkow i Cikin [4], którzy obserwowali zmiany ciśnienia w szczelinie gazowej poddawanej działaniu wyładowań, stwierdzają, że charakter tych zmian jest różny. Zależnie od badanego materiału ciśnienie rośnie, należy

lub utrzymywało się na stałym poziomie. Obserwowano także różny charakter zmian ciśnienia w czasie dla próbek z danego materiału.

Przedstawione rozważania wskazują na złożoność procesu samowygaszania wyładowań. Należy przypuszczać, że samowygaszanie wyładowań jest wynikiem występowania szeregu przyczyn. Przewaga jednej nad pozostałymi zależy między innymi od badanego układu izolacyjnego, np. zawierającego otwarte lub zamknięte wtrąciny gazowe. Dane literaturowe wskazują także na wpływ badanego materiału izolacyjnego na proces samowygaszania wyładowań.

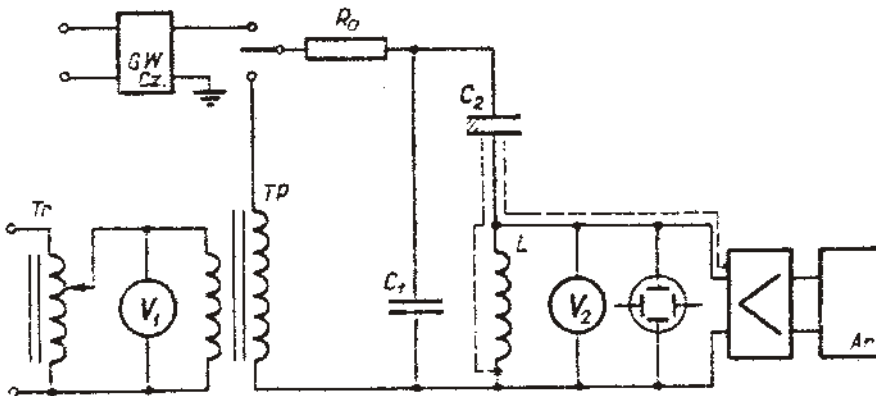
4. Metodyka, zakres, cel badań

Stabilność wyładowań niezupełnych można zasadniczo rozpatrywać w trzech aspektach:

- zmian intensywności wyładowań w funkcji czasu ekspozycji próbki,
- zmian wartości napięcia U_0 i U_E w funkcji czasu ekspozycji próbki,
- zmian wartości $tg\delta$ badanego układu w funkcji czasu jego ekspozycji.

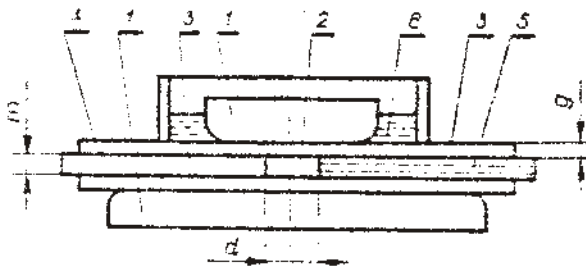
Pełne zastrzeżenia może budzić ostatnia z podanych możliwości, gdyż przyczyną zmian wartości $tg\delta$ mogą być również postępujące procesy starzenia izolacji. Nie mniej, badania wszystkich wymienionych wielkości dają pełniejszy obraz zjawisk występujących w układach izolacyjnych poddawanych działaniu wyładowań niezupełnych.

W przeprowadzonych badaniach stabilność wyładowań określano w zasadzie na podstawie pomiaru prądu wyładowań. Pomiar napięć U_0 i U_E oraz pomiary $tg\delta$ były pomiarami uzupełniającymi. Badania przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-70/E-04066. Zastosowany układ probierczy przedstawiono na rys.1. Badania ograniczono do pomiarów w/w wielkości na przedstawionym na rys.2 modelu dielektryku zawierającym wtrącinę gazową. Dla określenia wpływu ciśnienia na stabilność wyładowań układ przedstawiony na rys.2 umieszczano w komorze umożliwiającej zmiany ciśnienia od 10 do 1200 tr.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego.

TR - transformator regulacyjny, TP - transformator
 probierczy, C_1 - filtr przeciwskłóceniuowy,
 R_0 - opornik ochronny, C_2 - model dielektryku,
 L - cewka dławekcyjna, V_2 - miliwoltomierz skal.,
 A_r - rejestrator.



Rys.2. Model dielektryku z wtrąciną gazową.

1 - elektrody, 2 - wtrącina gazowa - średnica wtrąciny
 $d = /2, 5, 10/\text{mm}$, głębokość wtrąciny $a = /0,25, 0,5,$
 $0,75/\text{mm}$, 3 - folia izolacyjna, 4 - przekładka izolacyj-
 na, 5 - kanał łącz.wtrącinę z atm., 6 - olej izolacyjny

W badaniach dokonano pomiarów stabilności wyładowań niezupełnych dla następujących materiałów izolacyjnych:

- polietylen - folia, grubość: 40 μm , 50 μm ,
- polistyren - folia, grubość: 40 μm ,
- politereftalen etylenu - folia, grubość: 36 μm .

Celem badań było określenie:

- wpływu ciśnienia na stabilność wyładowań niezupełnych w zakresie ciśnień od 100-1100 Tr
- wpływu częstotliwości napięcia probierczego na stabilność wyładowań niezupełnych w zakresie częstotliwości od 50-3000 Hz.

Przeprowadzone pomiary stanowią uzupełnienie badań nad opracowaniem przyspieszonej metody badania odporności dielektryków na wyładowania niezupełne.

3. Wyniki badań

Dla badanych materiałów zaobserwowano występowanie częściowego zanikania intensywności wyładowań - wygaszania wyładowań. Charakter zmian intensywności wyładowań w warunkach ciśnienia atmosferycznego był we wszystkich przypadkach podobny.

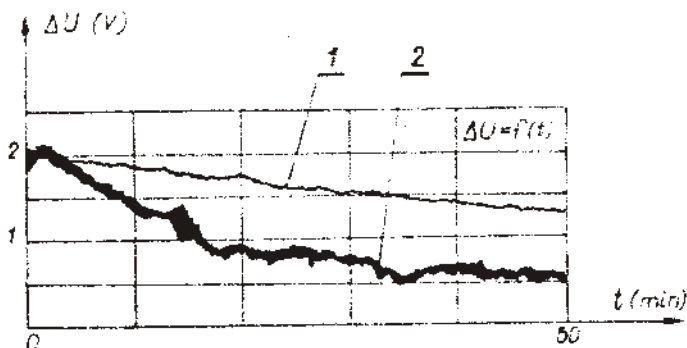
Wyniki badań wskazują na niezależność wygaszania wyładowań od wartości napięcia probierczego. Wygaszanie wyładowań rejestrowano w zakresie napięć od U_0 do 6 kV. Wartość napięcia progu wyładowań wynosiła od 1,5 - 2,6 kV zależnie od głębokości wtrąciny i grubości badanej folii. Wytrzymałość dopasna na przebicie wynosiła odpowiednio od 9 do 10 kV.

Stwierdzono niezależność wygaszania wyładowań od wielkości wtrąciny w zakresie podanych wymiarów, a także niezależność wygaszania wyładowań od częstotliwości napięcia probierczego w zakresie stosowanych częstotliwości.

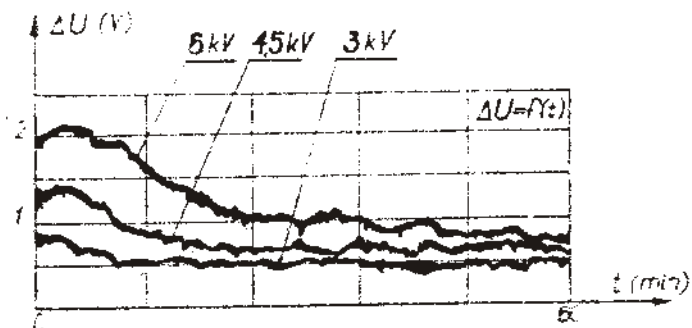
Potwierdzono znaczenie wymiany gazu we wtrącinie dla stabilności wyładowań. Wymiana gazu - przedmuch wtrąciny eliminował wygaszanie wyładowań.

Zaobserwowano wpływ ciśnienia na stabilność wyładowań. Ciężenie ciśnienia we wnętrzu eliminowało w znaczący sposób wyparcie wyładowań.

Na rysunkach 3-8 przedstawiono kilka spośród uzyskanych charakterystyk, są one reprezentatywne dla całosci przeprowadzonych badań.



Rys.3. Zmiany intensywności wyładowań niezupełnych dla dwóch rodzajów szczelin w izolacji polietylenowej.
1 - szczelina otwarta, 2 - szczelina zamknięta, $w = 0,5$ mm
 $\delta = 10$ mm, $U_{pr} = 6$ kV, $f = 50$ Hz.



Rys.4. Zmiany intensywności wyładowań niezupełnych w "zamkniętej" szczelinie izolacji polietylenowej dla różnych wartości napięcia probierczego. $w = 0,5$ mm, $\delta = 10$ mm,
 $f = 50$ Hz.

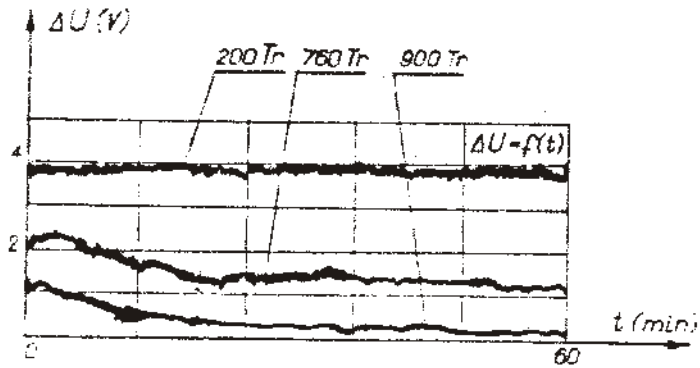


Fig. 5. Zmiany intensywności wyładowań niezupełnych w szczelinie izolacji polietylenowej przy różnym ciśnieniu. $m = 0,5$ mm, $d = 10$ mm, $f = 50$ Hz, $U_{pp} = 5$ kV.

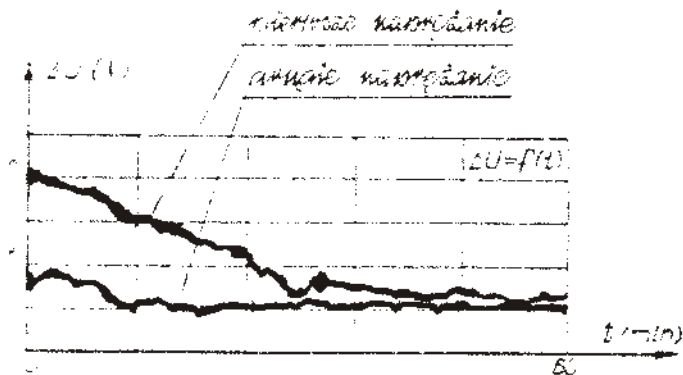
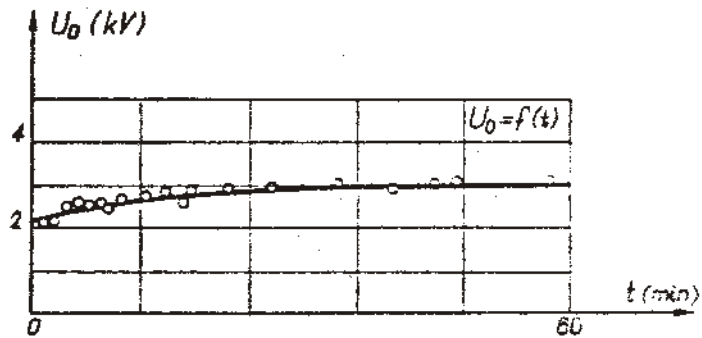
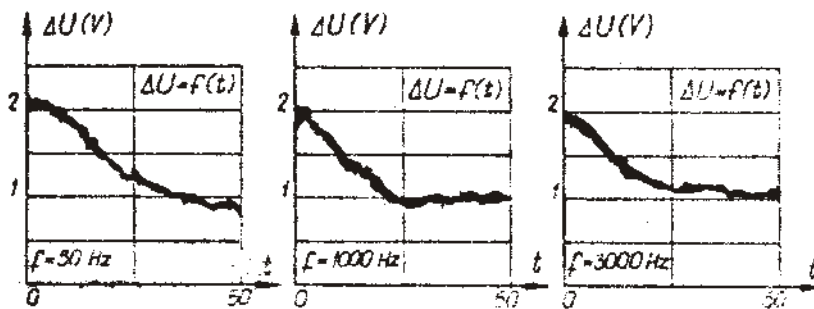


Fig. 6. Zmiany intensywności wyładowań w szczelinie izolacji polietylenowej po okresowym napięciu próbki. Czas pierwszego napięcia - 1 h, czas przerwy beznapięciowej - 20 h, $m = 0,5$ mm, $d = 10$ mm, $f = 50$ Hz, $U_{pp} = 6$ kV.



Rys.7. Zmiany wartości napięcia progu wyładowań dla izolacji polietylenowej z wtrąciną gazową.
 $m = 0,5 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $U_{Pr} = 6 \text{ kV}$.



Rys.8. Zmiany intensywności wyładowań niesugelanych w szczelinie izolacji polietylenowej dla różnych częstotliwości napięcia probierczego.
 $m = 0,5 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$, $U_{Pr} = 5 \text{ kV}$.

6. Wnioski.

1. Obniżenie i utrzymywanie się wyładowań na określonym poziomie intensywności jest, jak się wyiaje, odzwierciedleniem równowagi procesów zachodzących w szczelinach gazowych izolacji stałej.
2. Przeprowadzone badania potwierdzają znaczną zależność wygaszania wyładowań od stanu gazu we wtrącinie - warunków tworzenia się ładunków przestrzennych. Obniżenie ciśnienia we wtrącinie może zwiększać drogę swobodną cząstek i w znacznym stopniu ograniczać oddziaływanie tych ładunków.
3. Występowanie wygaszania wyładowań niezależnie od częstotliwości napięcia probierczego może obniżyć efektywność "przyspieszonej metody badania odporności dielektryków na wyładowania niezupełne", preferując między innymi zastosowanie w badaniach napięcia probierczego o wyższej częstotliwości.
4. Czas stabilizacji intensywności wyładowań jest różny dla różnych przypadków. Wyznaczenie strat dielektrycznych układu izolacyjnego w sposób jednoznaczny jest więc możliwe dopiero po upływie czasu potrzebnego na ustabilizowanie intensywności wyładowań. Należy także uwzględnić wpływ odwracalności procesów zachodzących w szczelinach izolacji pozostającej w stanie beznapięciowym na wiarygodność pomiarów $\tan \delta$ oraz U_0 i U_g .

Literatura

1. Bui-Ai, Guyetand A., Lacoste R., Phan Van Vui - Przegląd Elektrotechniczny 1961/1.
2. Dobroszewski R. - Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska 1970
3. Goliński J. - Postępy Techniki Wysokich Napięć. z.4 1965r
4. Kojkow S.N., Cikin A.N. - Elektrizieskoje starienie twierdych dielektrikow i nadzieznost dielektriczieskich dietalej. Izdatielstwo Energija, Leningrad 1966.

5. Lechowski Z., Pałodziecka E. - Energetyka XXV, 1971 nr.1
Biuletyn Instytutu Energetyki XIV nr.1/2
6. Rogers E.C. - Proceeding IEE. 1958 prt II.
7. Stołca M. - Materiały konferencji nauk.-techn. Wrocław 1969
8. Szczepański Z. - Rozprawy Elektrotechniczne, tom X, z.5 1964
9. Szczepański Z. - Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka
Nr.20 1967r
10. PN-70/E-04068 "Wyładowania niezupełne w izolacji przy napięciu
przebiegającym".