

Dr inż. Barbara Florkowska  
Mgr inż. Ryszard Gacek

Instytut Maszyn i Sterowania  
Układów Elektroenergetycznych  
Akademii Górniczo-Hutniczej  
w Krakowie

## O STABILNOŚCI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W IZOLACJI PAPIEROWO-OLEJOWEJ

### 1. Wstęp

Wśród problemów dotyczących wyładowań niezupełnych i ich wpływu na proces niszczenia dielektryków, interesujące jest zagadnienie stabilności wyładowań a więc przebiegów ich w czasie działania napięcia i rodzajów pod względem skutków. Okazuje się bowiem, iż nie zawsze fakt występowania wyładowań w izolacji, oznacza szybki ich rozwój prowadzący do przebicia. Stwierdzono, że w niektórych przypadkach wielkości charakteryzujące wyładowania wykazują tendencję do zmniejszania swych wartości pod działaniem napięcia, co oznacza zanikanie zjawiska w czasie.

Proces ten zwany czasem samowygaszaniem wyładowań [3], charakteryzują duże zmiany intensywności w początkowym okresie a następnie ustalenie zjawiska. Może również nastąpić całkowity zanik wyładowań.

W pracach na powyższy temat, ograniczających się głównie do badań modelowych, brak jest jednolitego poglądu co do przyczyn powodujących wygaszanie się wyładowań w izolacji. Niewątpliwie proces ten jest silnie uzależniony od struktury materiału stałego i rodzaju gazu w nim zawartego.

Spotykane w literaturze informacje odnośnie zagadnienia stabilności wyładowań dotyczą różnych materiałów izolacyjnych, głównie z tworzyw sztucznych, w mniejszym stopniu izolacji papierowo-olejowej.

W tym ostatnim przypadku, szczególnie w odniesieniu do izolacji papierowo-olejowej kondensatorów, stosowany jest podział na wyładowania początkowe [3, 4] /mało intensywne/ i krytyczne, przy czym poza wartością prądu wyładowań kryterium podziału jest głównie zmiana napięcia progowego wyładowań w czasie. Wyładowania początkowe charakteryzuje nieznaczny wzrost napięcia progowego, podczas gdy w innych przypadkach obniża ono swą wartość.

W artykule przedstawiono wyniki badań stabilności wyładowań w izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych, w których proces samowygaszania wyładowań jest szczególnie złożony, obejmuje bowiem zarówno wyładowania całkowicie zanikające jak i dążące do ustalenia się po pewnym czasie.

Nie zbadana bliżej dynamika tego procesu jest przy tym różnorodna, zależna zarówno od konstrukcji układu izolacyjnego, warunków badania wyładowań niezupełnych, jak również od mechanizmów wyładowań o małej intensywności. Wśród hipotez mechanizmów wyładowań w izolacji papierowo-olejowej, w oparciu o które można tłumaczyć zanikanie wyładowań, wymienić można np. działanie katarforetyczne drobnych cząstek zanieczyszczeń o charakterze koloidalnym w oleju.

Z punktu widzenia powtarzalności wyników pomiarów oraz wnioskowania na tej podstawie o stanie izolacji, badania stabilności wyładowań mają szczególne znaczenie.

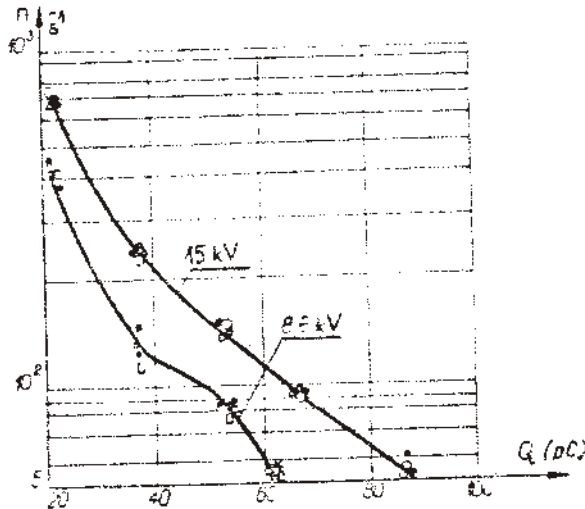
## 2. Wpływ czasu działania napięcia na przebieg wyładowań niezupełnych

W izolacji papierowo-olejowej różnych typów kabli elektroenergetycznych, występujące wyładowania niezupełne, można pod względem stabilności w czasie, zaliczyć do jednej z poniższych grup:

- a/ wyładowań o stałej intensywności w czasie /stabilne/
- b/ wyładowań zanikających w czasie /niestabilne/
- c/ wyładowań początkowo zanikających i następnie stabilnych /quasistabilne/.

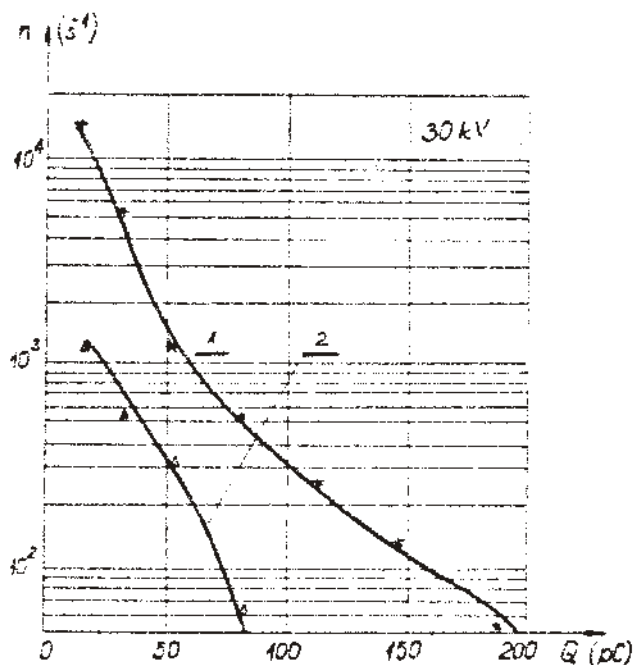
Badanie stabilności wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej kabli z izolacją rdzeniową i o polu promieniowym przeprowadzono metodą analizy amplitudowej na kilkumetrowych odcinkach kabli, wyznaczając zależność liczby wyładowań  $n$  o danym ładunku  $Q$  od wartości tego ładunku, a następnie pozostałe wielkości charakteryzujące zjawisko wyładowań: średni prąd wyładowań  $I$ , częstość powtarzania  $N$ , maksymalny ładunek pozorny  $Q_{max}$ .

Przykład zależności  $n = f(Q)$  dla wyładowań stabilnych występujących w kablach na napięciu 15 kV o polu promieniowym, dla których liczba wyładowań o danym ładunku nie ulega zmianie podczas 10 godzinnej próby, zarówno pod działaniem napięcia fazowego 8,6 kV jak i międzyprzewodowego 15 kV, przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Wyładowania stabilne w kablu na napięciu 15 kV.  
 Czas próby przy napięciu fazowym i międzyprzewodowym 10 godzin.  
 \*  $\blacktriangle$  - początek próby,  $\bullet$  - po 1 godz.,  $\blacksquare$  - po 5 godz.  
 $\circ$  - po 10 godz.

W grupie wyładowań niestabilnych występowało znaczne zróżnicowanie ich pod względem czasu zanikania. Zawierał się on w granicach od około kilkudziesięciu minut do kilkudziesięciu godzin. Przykład zależności  $n=f/Q$  dla kabla na napięcie 30 kV, w którym czas zanikania wynosił 70 min przedstawiono na rys.2.



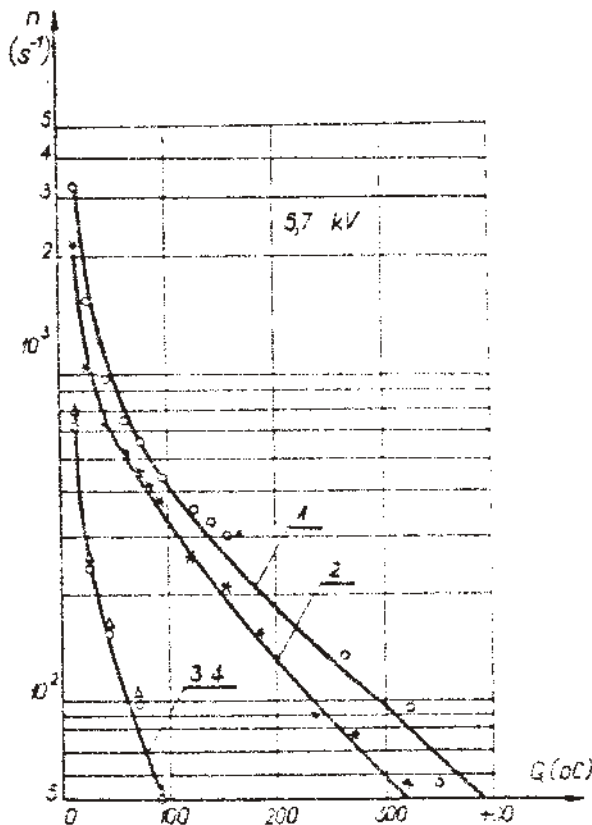
Rys.2. Wyładowanie niestabilne w kablu na napięcie 30 kV  
1 - początek próby, 2 - po 30 min działania napięcia.

Zanikaniu zjawiska towarzyszyło zmniejszanie się całkowitej liczby wyładowań  $N$ , prądu wyładowań  $I$  i maksymalnego ładunku  $Q_{max}$ . Najczęściej spotykanym jest przypadek wyładowań quasistabilnych, kiedy to po okresie zanikania wyładowań następuje ich ustalenie się. Wyładowania te stwierdzono zarówno w kablach z izolacją rdzeniową

jak i w kablach o polu promieniowym, przy czym znaczne różnice dotyczą głównie czasu do ustalenia się wyładowań.

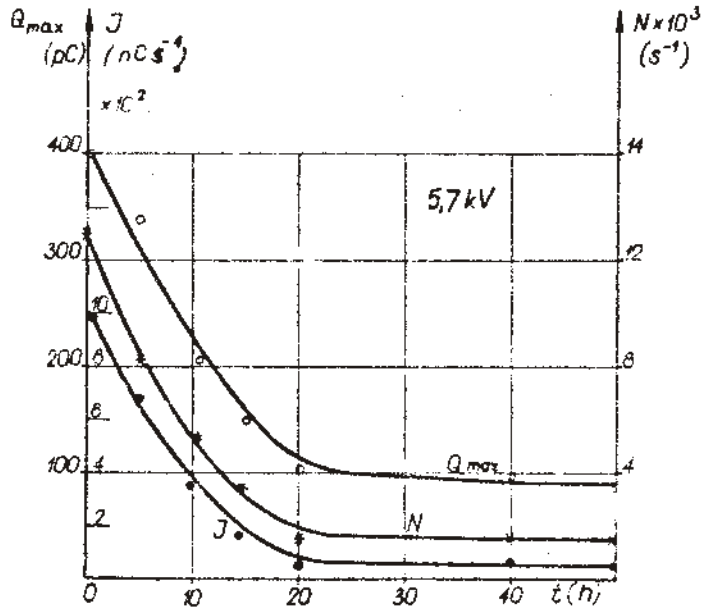
Tak np. badania kabli z izolacją rdzeniową 10 kV wykazały, podczas 60 godzinnej próby przy napięciu fazowym 5,7 kV, zanikanie zjawiska wyładowań, przy czym po upływie ok. 20 godz. nastąpiło ustalenie się wartości wielkości charakterystycznych.

Zmiany zależności  $n = f/Q$  po upływie 5 godzin, 20 i 60 oraz przebieg początkowy, przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Zmiana zależności  $n=f/Q$  podczas próby długotrwałej, kable z izolacją rdzeniową na napięciu 10 kV przy napięciu fazowym 5,7 kV.  
1 - początek próby, 2- po 5 godz., 3- po 20 godz., 4 - po 60 godz.

Zmniejszanie się prądu wyładowań od wartości początkowej ok.  $1000 \text{ nC s}^{-1}$  do ok.  $100 \text{ nC s}^{-1}$  oraz około 8-krotnie całkowitej liczby wyładowań przedstawiono na rys.4.

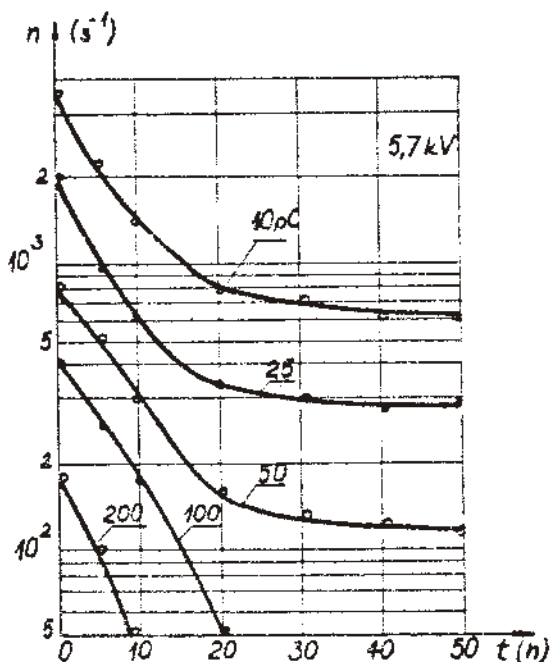


Rys.4. Zmniejszanie się wielkości  $I, N$  i  $Q_{max}$  dla wyładowań quasistabilnych /kabel z izolacją rdzeniową 10 kV/, napięcie próby 5,7 kV.

Samowygaszaniu wyładowań w izolacji towarzyszyło zmniejszenie się liczby wyładowań o danym ładunku, a stabilizacji zjawiska utrzymywanie się tej liczby na pewnym poziomie /rys.5/.

Zakres maksymalnego ładunku pozornego zmniejszył się do ok. 100 pC po 20 godzinach próby od wartości początkowej ok. 400 pC /rys.4/.

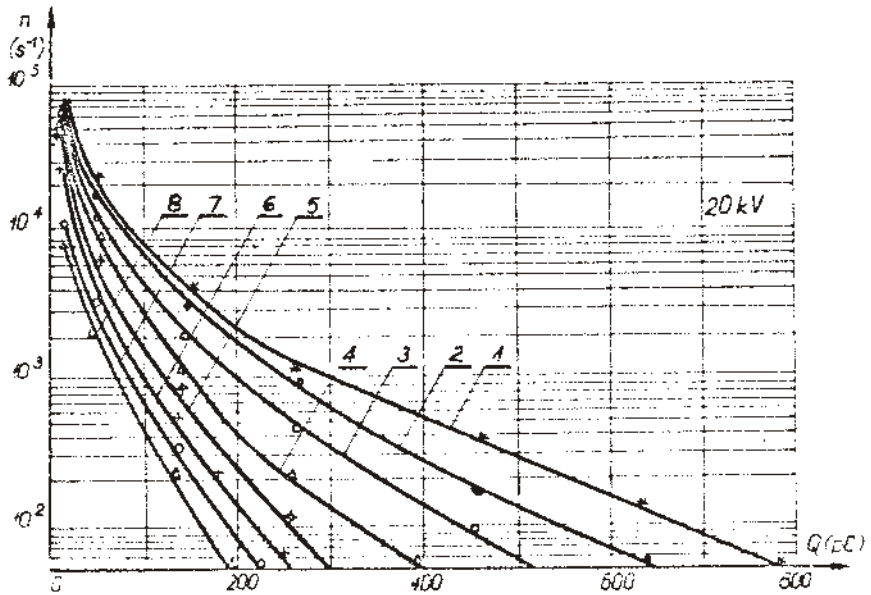
W celu zbadania wpływu napięcia probierczego na przebieg wyładowań poddano próbnie długotrwałej kabel z izolacją rdzeniową 10 kV, przy napięciu probierczym 20 kV, w ciągu 60 godzin.



Rys.5. Wyładowania quasistabilne przy napięciu 5,7 kV w kablu 10 kV.

Również w tym przypadku, przy napięciu ok. 4-krotnie przewyższającym napięcie progowe, następowało samowygaszanie wyładowań a następnie stabilizacja ławiska. Zmniejszanie się liczby wyładowań o danym ładunku w czasie trwania próby przedstawiono na rys.6.

Zmiany funkcji rozkładu w czasie tej próby, przedstawione na rys. 7, wyjaśniają iż procesy samowygaszania wyładowań dotyczą głównie wyładowań o największym ładunku, których zakres w tym przypadku zmniejszył się od wartości początkowej ok. 300 pC do ok. 200 pC.



Rys.6. Wyładowania quasistabilne przy napięciu 20 kV w kablu 10 kV.

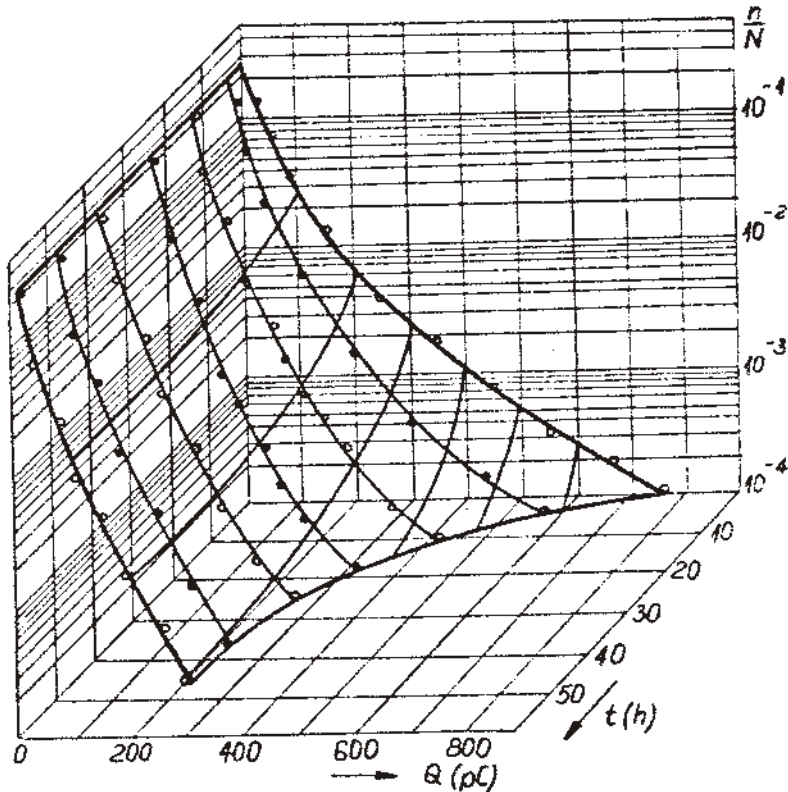
- 1 - początek próby, 2 - po 15 min., 3 - po 1 godz.  
 4 - po 5 godz., 5 - po 15 godz., 6 - po 27 godz.  
 7 - po 50 godz., 8 - po 63 godz.

Ustalenie się zjawiska nastąpiło po ok. 30 godz. próby, po którym to czasie wartość przeciętna ładunku wyładowań  $\bar{Q}$  i odchylenie standardowe  $\bar{G}$  praktycznie nie ulegały już zmianie /tablica I/.

Tablica I

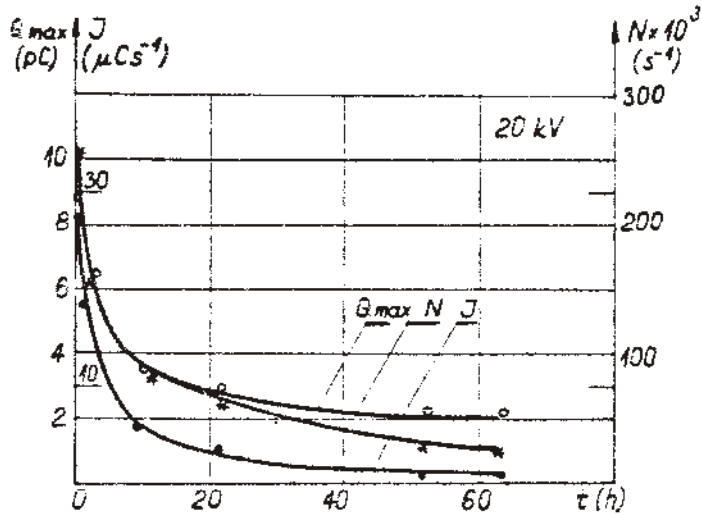
t	godz.	0	0,25	1	5	15	27	50	63
$\bar{Q}$	pC	81	73	63	50	41	39	43	41
$\bar{G}$	pC	105	87	74	57	46	41	39	37





Rys.7. Funkcje rozkładu wyładowań  $\frac{n}{N} = f/Q$ ,  $\frac{n}{N} = f/t$  oraz  $Q = f/t$  dla próby długotrwałej przy napięciu 20 kV /kabel 10 kV/

Charakterystyczne dla wyładowań quasistabilnych jest przeszło 20-krotne zmniejszenie się prądu wyładowań, zarówno przy napięciu probierczym 5,7 kV tj. równym ok. 1,4 napięcia progowego  $U_0$  jak i przy napięciu ok.  $5 U_0$ , z tym, że wartość prądu w stanie ustalonym w drugim przypadku była znacznie większa i wynosiła ok.  $1/\mu C s^{-1}$ . Również całkowita liczba wyładowań zmniejszyła się ok. 7-krotnie /rys.8/.



Rys.8. Zmniejszenie się wielkości  $I$ ,  $N$  i  $Q_{\max}$  dla wyładowań quasistabilnych przy napięciu 20 kV /kabel 10 kV/.

Wyładowanie quasistabilne, występujące również w kablach o polu promieniowym, charakteryzował w porównaniu z poprzednimi kablami z izolacją rdzeniową, znacznie krótszy czas po którym następowało ustalenie się zjawiska. Również intensywność wyładowań i zakres maksymalnego ładunku uległy tylko ok. 2-krotnej zmianie, przy czym wartości początkowe tych wielkości były w porównaniu z kablami z izolacją rdzeniową wielokrotnie mniejsze. Tak np. w kablu 20 kV badanym przy napięciu fazowym 11,6 kV, ustalenie się procesu nastąpiło po kilku godzinach działania napięcia /rys.9/, przy czym prąd wyładowań i całkowita liczba wyładowań zmniejszyły się wartości ok. 2-krotnie /z 60  $\text{nC s}^{-1}$  do ok. 30  $\text{nC s}^{-1}$  i z ok. 1600  $\text{s}^{-1}$  do ok. 800  $\text{s}^{-1}$ / - /rys.10/.

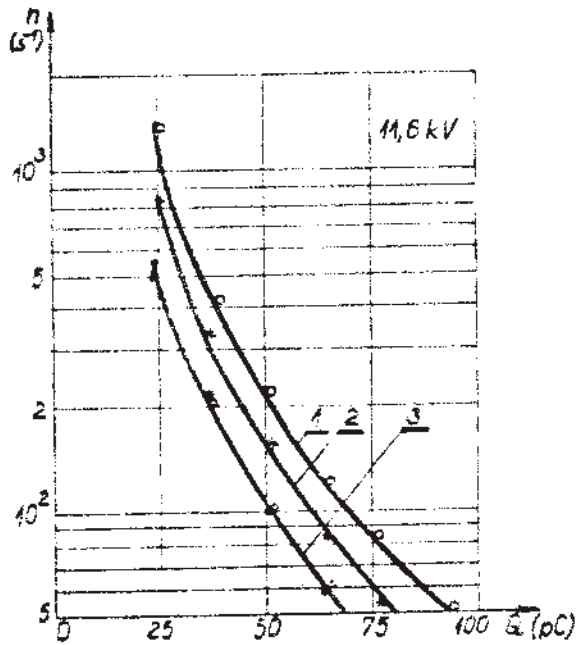


Fig. 9. Wyładowania quasistabilne w kablu o polu promieniowym przy napięciu fazowym 11,6 kV.  
1 - początek próby, 2 - po 2 godz., 3 - po 3, 4, 1 i 5 godz.

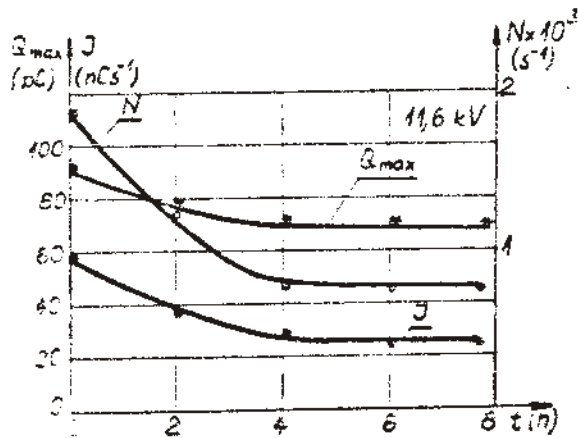
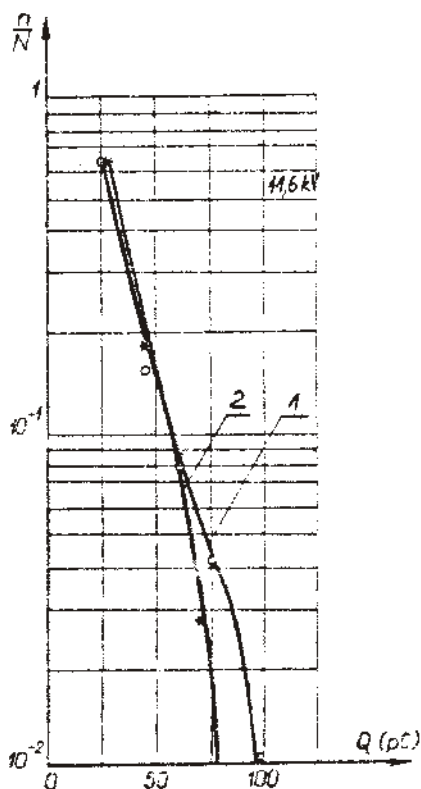


Fig. 10. Zmiana wielkości  $I$ ,  $N$ ,  $Q_{max}$  w kablu o polu promieniowym przy napięciu 11,6 kV.

maksymalny ładunek pozorny uległ w tym przypadku tylko nieznacznej zmianie z ok. 90 pC do 70 pC, co praktycznie nie spowodowało zmian funkcji rozkładu wyładowań przedstawionych na rys.11.



Rys.11. Funkcje rozkładu wyładowań

- 1 - początek próby  $\bar{Q} = 43$  pC,  
 $\bar{Q} = 36$  pC  
 2 - po ustaleniu się zjawiska  
 $\bar{Q} = 38$  pC  $\bar{Q} = 27$  pC  
 $U_p = 11,6$  kV/

Zwiększenie napięcia probierczego do napięcia międzyprzewodowej 20 kV spowodowało zwiększenie prądu wyładowań i ładunku wyładowań, lecz nie spowodowało zmian charakteru zjawiska, które również zanikało do ustalenia się po kilku godzinach.

### 3. Zagadnienie powtarzalności wyładowań niestabilnych i quasistabilnych.

W każdym przypadku występowania wyładowań niestabilnych i quasistabilnych, następowało ich powtórne pojawienie się po upływie pewnego czasu przerwy beznapięciowej. Wyładowania niestabilne charakteryzujące się kilkugodzinnym czasem zanikania, wymagały kilkudziesięciogodzinnej przerwy beznapięciowej, aby prąd wyładowań i pozostałe wielkości przywróciły swe wartości początkowe.

Powtarzalność wyładowań badano w cyklach pomiarowych, zawierających:

- odstępy czasu od pojawienia się wyładowań w danym kablu do ich zaniku  $t_z$ , t.zn. odstępy w których kabel był załączony na napięcie, oraz
- odstępy czasu, w których napięcie było wyłączone, t.zw. czasy przerwy  $t_p$ , przyjęte jako równe 2 godziny.

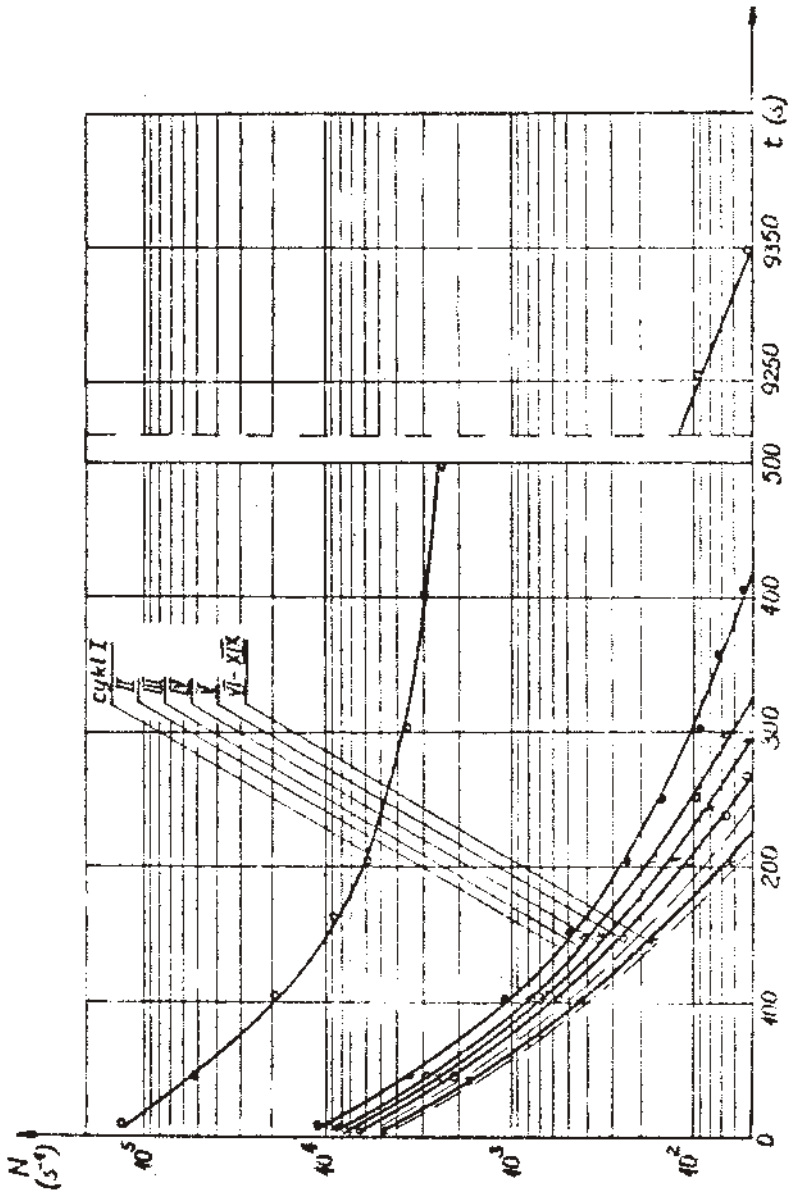
Przy tak dobranej przerwie beznapięciowej, wyładowania nie osiągały w kolejnych cyklach pomiarowych swych pierwotnych wartości.

Przykład zmian całkowitej liczby wyładowań  $N$  w czasie działania napięcia w poszczególnych cyklach pomiarowych przedstawiono na rys.12.

Całkowita liczba wyładowań  $N$  na początku każdego cyklu oraz czas zanikania wyładowań zmniejszały się, przy czym największa różnica wystąpiła po pierwszej 2-godzinnej przerwie beznapięciowej. Zwykle po kilku cyklach pomiarowych obserwowano tendencje do ustalania się przebiegu charakterystyk pomiarowych  $N = f(t)$ , co wskazywałoby na stabilizację procesu.

#### 4. Zakończenie

Wyładowania niezupełne w izolacji papierowo-olejowej są procesem dynamicznym pod działaniem napięcia. Uwzględnienie tego procesu na szczególne znaczenia z punktu widzenia powtarzalności wyników pomiarów wielkości charakteryzujących wyładowania. Okazuje się bowiem, iż



Bys.12. Zmiana całkowitej liczby wyładowań  $N$  w kolejnych cyklach pomiarowych dla kabla 30 kV

wszelkie stany napięciowe izolacji poprzedzające badania wyładowań, powodują zmniejszenie ładunku i prądu wyładowań, jeśli czas przerwy beznapięciowej jest za krótki. Tak więc informacje uzyskane o zjawisku wyładowań na podstawie pomiarów, nie będą w każdym przypadku charakteryzować izolacji w sposób jednoznaczny.

Z powyższych doświadczeń wynika, iż ustalenie granicznej dopuszczalnej wartości wielkości charakteryzujących intensywność wyładowań w izolacji papierowo-olejowej może napotykać na duże trudności.

Zagadnienie stabilności wyładowań w izolacji papierowo-olejowej wymaga dalszych jeszcze badań dla określenia przyczyn, które je powodują. Te bowiem, które tłumaczą zjawisko samowygazowania wyładowań w izolacji głównie z tworzyw sztucznych, a mianowicie zmiany ciśnienia lub oporności powierzchniowej wtrącin gazowych, nie będą dla izolacji papierowo-olejowej wykazujące wyładowania małointensywne odpowiednimi. Różnica nie sprowadza się tutaj tylko do środowiska, w którym wyładowania niezupełne odbywają się w izolacji papierowo-olejowej /szczeliny olejowe/ i z tworzyw sztucznych /wtrąciny gazowe/, ale również do faktu, iż zjawisko samowygazowania wyładowań było badane głównie w układach modelowych.

#### Literatura

1. Krasucki Z., Church H.P., Garton G.G. - A New Explanation of Gas Evolution in Electrically Stressed Oil-Impregnated Paper Insulation. Journal of Electrochemical Society, 1960 vol. 107 nr. 7, 592.
2. Florkowska A., Wiedek R. - Einfluss der Teilentladungen auf die Ölimpregnierte Papierisolation von Hochspannungskabeln. XIII Intern. Wiss. Koll. T.H. Ilmenau 1968
3. Kuczynski G.C., Lysakowski G.G. - Isledowanije naczalnych stadij jonizacionnych processow w bumatno maslannoj izolacii. Izv. Wuzow, Energetik, 1964, nr. 8, str. 32.

4. Pital J.S. - Jonizacyjnyje charakteristiki i starienije bumazno maslannoj kondensatornoj izolacji. Elektrichestwo 1965, nr.1, str.58.
5. Schmidt J. - Prubei elektrickich vyboju v uzavrennych plynem naplnenych dutinach papiroveho, olejem napustiteho dielektrika. El.Obzor 1963, nr.1, s.8.
6. Szczepański Z. - Mechanizm starzenia izolacji kondensatorów napięciowych udarowych. Rozprawy Elektrotechniczne, 1966 t.XV nr.2, str.255.
7. Aleksandrowa N.P., Mann A.K. - Swietoweje urżuczenije w izolacji pri wozdiejstwi napriazhenija. Elektrotehnika 1968, nr.12, str.36.
8. FN-70/E-04066 - Wyładowania niezupelne w izolacji przy napięciu przemiennym.