

Dr inż. Barbara Florkowska
Mgr inż. Ryszard Gacek
Instytut Maszyn i Sterowania
Układów Elektroenergetycznych
Akademia Górniczo-Hutnicza
w Krakowie

WPLYW NAPIĘCIA NA INTENSYWNOŚĆ WYŁADOWAŃ W IZOLACJI KABLOWEJ

1. Wstęp

Wytrzymałość elektryczną izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych pracujących przy napięciu przemiennym o częstotliwości technicznej warunkują w znacznym stopniu zjawiska wyładowań niezupełnych, rozwijające się w tej izolacji pod działaniem pola elektrycznego.

Jakościowe i ilościowe opisanie procesów wyładowań w izolacji wymaga wielu badań ze względu na skomplikowany charakter zjawiska, które może obejmować różne formy wyładowań w izolacji. Mogą to być wyładowania w warstwach olejowych, przylegających do żyły, wyładowania w oleju w miejscach o silnie niejednostajnym rozkładzie pola elektrycznego, wyładowania we wtrącinach gazowych, wyładowania powierzchniowe, po powierzchni taśm papierowych w danej warstwie.

Nasycanie izolacji papierowo-olejowej kabli odbywa się przy ostatecznym ciśnieniu ok. 0,1-10 mm Hg, w wyniku czego w całkowitej objętości izolacji pozostaje od 0,01 do 1 % powietrza [1]. Rozpuszczalność powietrza w oleju mineralnym wynosi ok. 10 % objętościowo, stąd powietrze pozostałe w izolacji po procesie technologicznym jest w całości rozpuszczane w oleju. Wtrąciny gazowe mogą więc powstać w izolacji tylko wskutek intensywnego rozkładu oleju w polu elektrycznym lub w wyniku procesów cieplnych w izolacji.

W izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych grubość szczelin olejowych zależy od grubości papieru i wynosi ok. 100-120 μ . W polu elektrycznym w przybliżeniu jednorodnym, natężenie pola w szczelinie olejowej jest ok. 1,7 razy większe niż w papierze. Można więc przypuszczać, iż w początkowym stadium wyładowania rozwijają się w szczelinach olejowych w izolacji kablowej, w miejscu o największym natężeniu pola elektrycznego [4]. To stadium wyładowania charakteryzuje się małą intensywnością. Iluściowej zmianie charakteru wyładowań odpowiada jakościowa zmiana zjawiska, a mianowicie: powstanie wtrącin gazowych oraz substancji o większym ciężarze cząsteczkowym, umocławiających rozwój wyładowania po powierzchni taśm papieru. Stadium to zwane wyładowaniem krytycznym charakteryzuje się znacznie większą intensywnością.

Interesujący jest wpływ konstrukcji kabli elektroenergetycznych i warunków procesu technologicznego na możliwość powstania i rozwoju wyładowań w izolacji.

2. Opis badań

W artykule przedstawiono wyniki badań kabli elektroenergetycznych na napięciu 10 kV z izolacją rżeniową oraz kabli o polu promieniowym na napięciu 15, 20 i 30 kV pochodzących z bieżącej produkcji.

Kable powyższe różniły się nie tylko konstrukcją, bowiem kable na napięciu 10 kV posiadają budowę trójżyłową we wspólnej powłoce aluminiowej, natomiast kable na napięciu 15, 20 i 30 kV są kablami o polu promieniowym, lecz również wartością natężenia pola elektrycznego jakie w warunkach badania występowało w izolacji.

Celem badań było określenie stopnia zagrożenia izolacji przez wyładowania niezupełne oraz zbadanie rozwoju zjawiska przy napięciu probierczym przewyższającym napięcie znamionowe fazowe. Badania umożliwiły również porównanie poszczególnych żył oraz odcinków kabli te-

go samego i różnych typów pod względem napięcia progu wyładowań, maksymalnego ładunku pojedynczego wyładowania, średniego prądu wyładowań i częstotliwości powtarzania wyładowań.

W kablach na napięcie 10 kV badano poszczególne żyły danego kabla /a, b, c/ przy pozostałych żyłach zwartych, połączonych z powłoką aluminiową i uziemionych oraz przy zasilaniu trzech żył zwartych względem powłoki /d/. Wymienione rodzaje połączeń odpowiadają przeciętnemu badaniu tego rodzaju kabli. W każdym przypadku napięcie probiercze było równe znamionowemu napięciu fazowemu i międzyprzewodowemu. Rozważając wiska dla określenia wpływu napięcia badano w szerszym zakresie napięć.

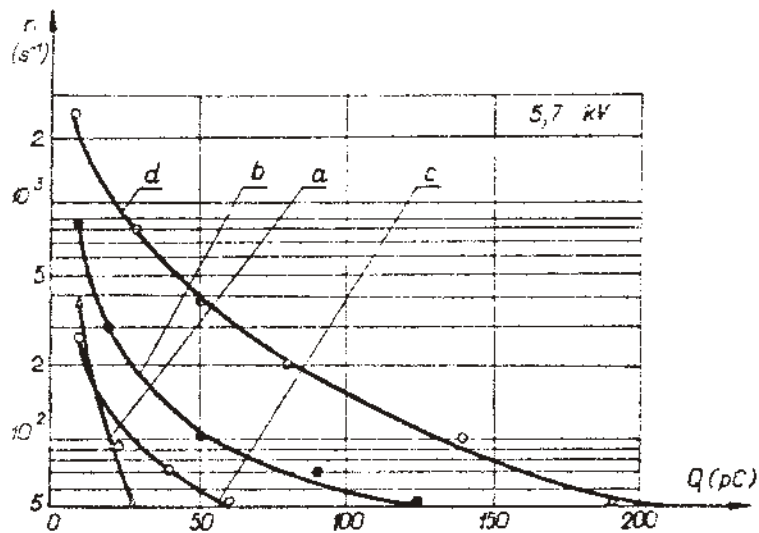
W badaniach stosowano metodę analizy amplitudowej [2], umożliwiającą wyznaczenie zależności liczby wyładowań n danym ładunkiem Q od wartości tego ładunku, $n = f/Q$, a następnie funkcji rozkładu wyładowań $\frac{dN}{dQ} = f/Q$, gdzie N jest całkowitą liczbą wyładowań, a także pozostałych wielkości charakteryzujących zjawisko wyładowań niezupelnego. Analizę przeprowadzono w zakresie od ok. 10 pC do kilku tysięcy pC.

3. Badanie wpływu napięcia na rozkład ładunku pozornego wyładowania niezupelnego.

Występowanie zjawiska wyładowań w izolacji wymienionych kabli elektroenergetycznych stwierdzono już przy napięciu progowym mniejszym od znamionowego napięcia fazowego. Wśród badanych kabli pewne cechy wspólne charakteryzują kable o polu promieniowym, w odróżnieniu od kabli z izolacją rdzeniową. Pod względem napięcia progu wyładowań poszczególne żyły i odcinki kabli o danym napięciu znamionowym 15, 20 i 30 kV różniły się nieznacznie, natomiast duże różnice wystąpiły w przypadku kabli z izolacją rdzeniową, co świadczy o wpływie niejednorodności budowy tych kabli na możliwość inicjowania w nich zjawiska wyładowań niezupelnego.

maksymalny ładunek pozorny Q_{\max} we wszystkich typach kabli przy znamionowym napięciu fazowym zawierał się w granicach od ok. 50 do 200 pC przy czym wartości tego ładunku dla poszczególnych żył kabli o polu promieniowym były prawie jednakowe, natomiast w kablach 10 kV zawierały się w dość dużym zakresie.

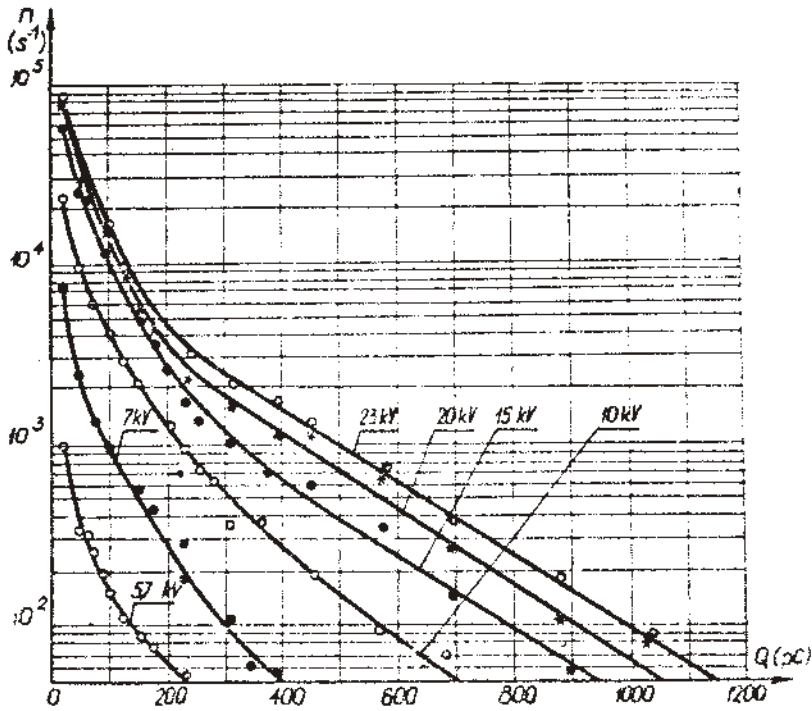
Dla przykładu na rys.1 przedstawiono dla 3 żył /a,b,c/ jednego odcinka kabla z izolacją rdzeniową zależność liczby wyładowań n o danym ładunku Q od wartości tego ładunku.



Rys.1. Zależność liczby wyładowań n o ładunku Q od wartości tego ładunku dla kabla z izolacją rdzeniową $U_N = 10$ kV, przy napięciu fazowym $U_f = 5,7$ kV.

Pod wpływem napięcia probierczego zawierającego się w granicach od napięcia progowego U_p do napięcia międzyprzewodowego U_N , a w przypadku kabli z izolacją rdzeniową do $4 U_f$, następował rozwój wyładowań w izolacji. Zależności $n = f/Q$ dla kabla na napięcie 10 kV przy kilku wartościach napięcia probierczego przedstawiono na rys.2, na-

tomiast dla kabla o polu promieniowym na napięciu 30 kV na rys.3.



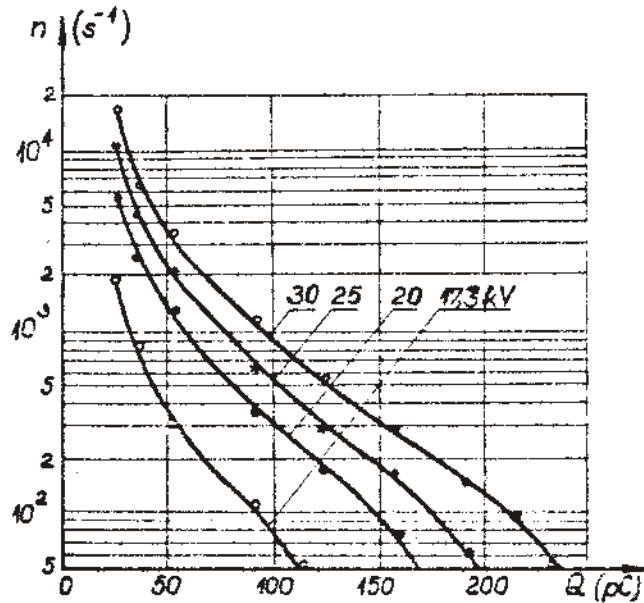
Rys.2. Wzrost liczby wyładowań n o danym ładunku przy napięciu probierczym 5,7, 7, 10, 15, 20 i 23 kV
/kabel $U_N = 10 \text{ kV}$ /

Funkcje rozkładu wyładowań przedstawione dla kabla z izolacją rdzeniową na rys.4, a dla kabla na napięciu 30 kV na rys.5, wskazują na powiększenie się zakresu maksymalnego ładunku wraz ze wzrostem napięcia od U_T do U_N , przy czym wzrost ten w pierwszym przypadku w zakresie od 5,7 kV do 10 kV jest około 3-krotny, natomiast w drugim w zakresie od 17,3 kV do 30 kV około 2-krotny.

Wartości parametrów funkcji rozkładu: ładunku przeciętnego \bar{Q} i średniego odczytania skalowego \bar{S} podano w tabelicy 1 i 2.

Tablica 1

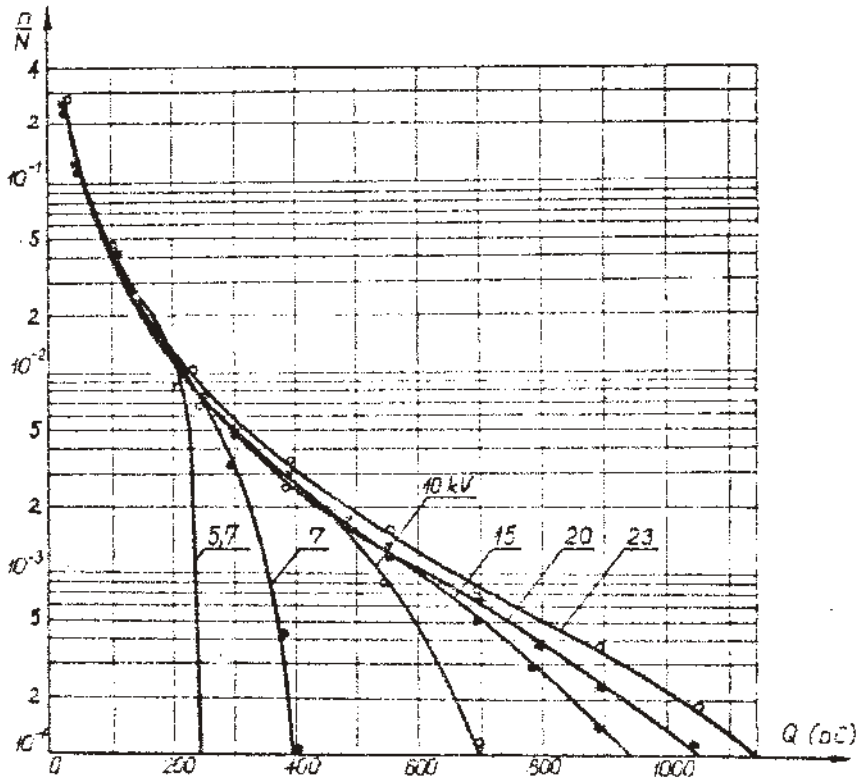
$U, \text{kV/}$	5,7	7	10	15	20	23	Uwagi
$\bar{Q} / \mu\text{C/}$	60	63	88	111	113	116	kable z izolacją rdzeniową
$\sigma / \mu\text{C/}$	51	59	91	142	132	130	



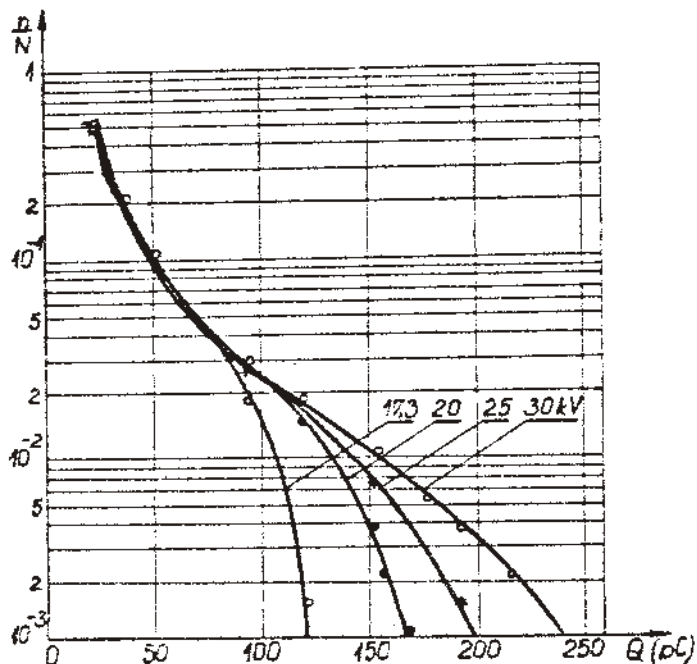
rys.3. Zależność $n = f/Q$ przy napięciu próbierczy:
17,3, 20, 25 i 30 kV/ kabel $U_{\text{N}} = 30 \text{ kV/}$

Tablica 2

U /kV/	17,3	20	25	30	Uwagi
\bar{Q} /pC/	32	39	42	44	kabel o polu promieniowym
\bar{G} /pC/	23	32	33	38	



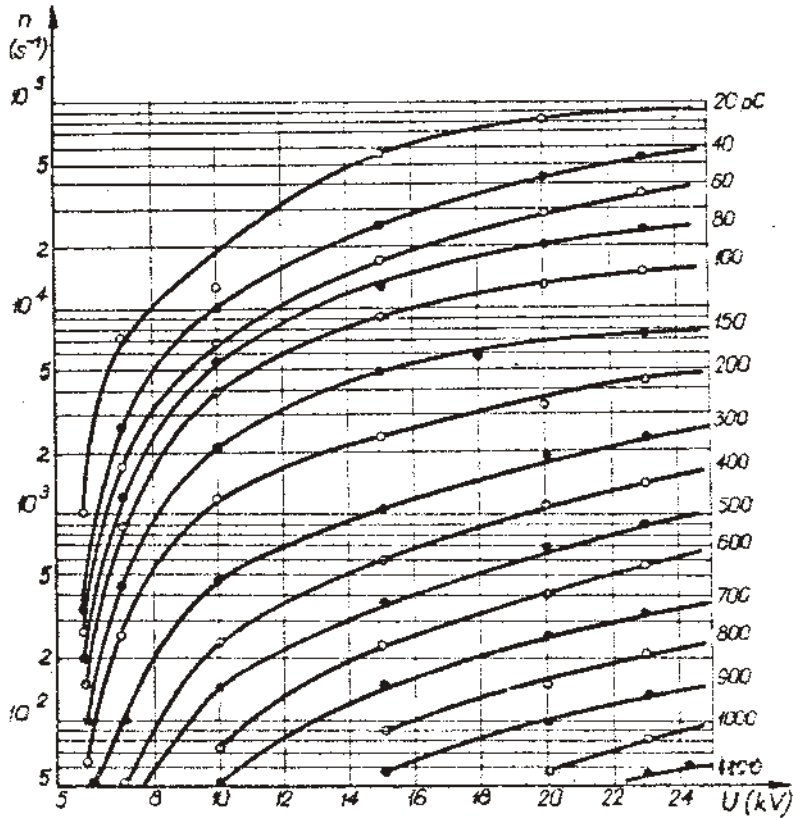
Rys.4. Funkcje rozkładu wyładowań w kablu z izolacją rیزeniową / $U_N = 10$ kV/.



rys.5. Funkcje rozkładu wyładowań w kablu o polu przemiennym $U_M = 30 \text{ kV}$

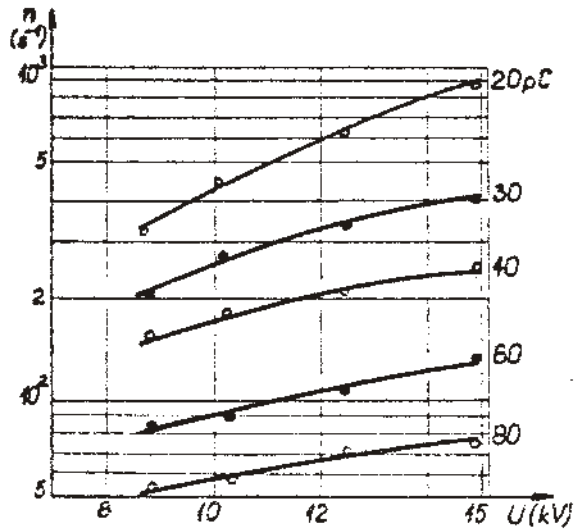
Cechą wspólną funkcji rozkładu wymienionych typów kabli jest podobny ich kształt oraz charakter zmienności pod wpływem napięcia. W obydwu przypadkach największa liczba n przypada na wyładowania o najmniejszym ładunku równym ok. 20 pC.

Ze wzrostem napięcia liczba wyładowań o danym ładunku zwiększa się, przy czym największy przyrost wykazują wyładowania o najmniejszym ładunku. Tak np. dla kabla 10 kV w zakresie napięć od 5,7 do 10 kV liczba wyładowań o ładunku 20 pC zwiększyła się z $1000/s^{-1}$ do ok. $20000/s^{-1}$, a wyładowań o ładunku 500 pC z $50/s^{-1}$ do ok. $500/s^{-1}$ /rys.6/.

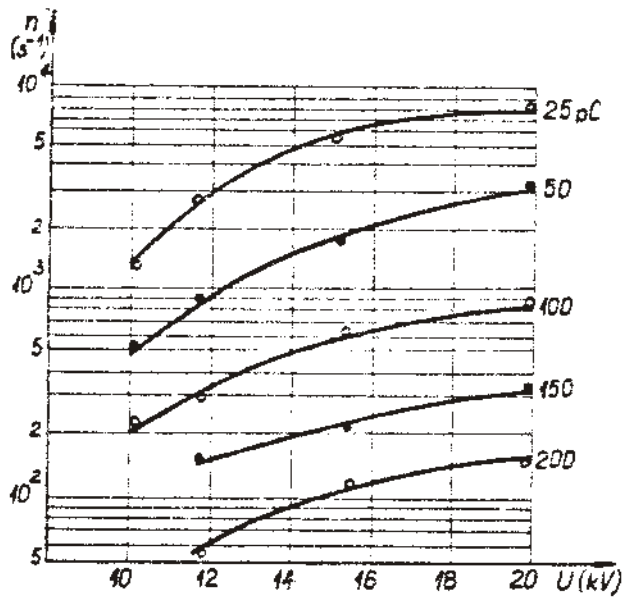


Rys.6. Wartość liczby wyładowań o danym ładunku w funkcji napięcia /kabel $U_N = 10$ kV/

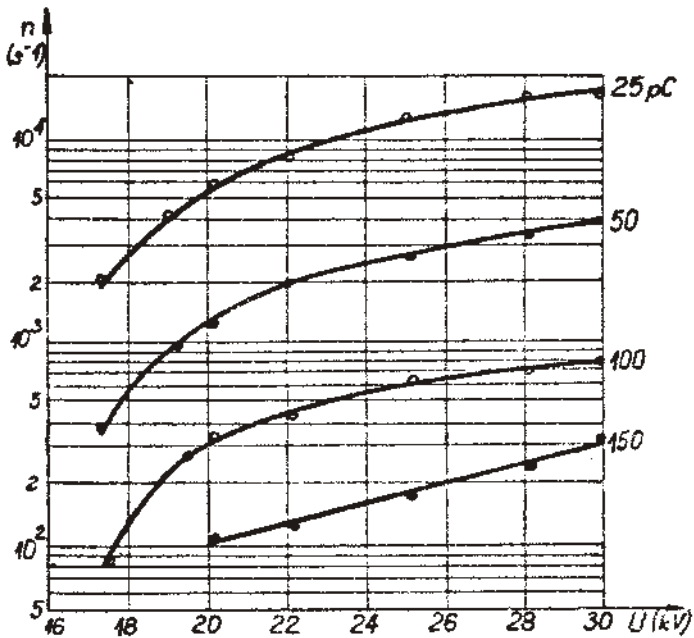
W pozostałych kablach przyrost liczby wyładowań o danym ładunku w zakresie od U_p do U_N jest mniejszy i dla ładunku 20 pC w kablu 15 kV i 20 kV jest ok. 3-krotny /rys.7 i 8/, a w kablu 30 kV ok. 10-krotny /rys.9/.



Rys.7. Wzrost liczby wyładowań o danym ładunku w funkcji napięcia /kabel $U_N = 15$ kV/



Rys.8. Wzrost liczby wyładowań o danym ładunku w funkcji napięcia /kabel $U_N = 20$ kV/

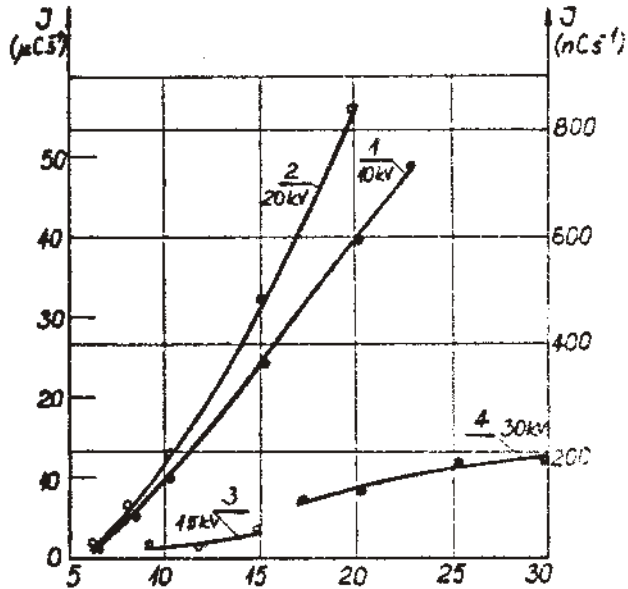


Rys.9 Wzrost liczby wyładowań o danym ładunku w funkcji napięcia /kabel $U_N = 30 \text{ kV}$ /

4. Wpływ napięcia na wielkości charakteryzujące wyładowania w izolacji.

Wielkościami, których zależność od napięcia badano są: częstość powtarzania wyładowań N zawierających się w całym zakresie zmienności ładunków oraz średni prąd wyładowania I . Przykłady zależności $I = f(U)$ przedstawiono na rys.10 dla kabla z izolacją rdzeniową /1/ i dla kabla o polu promieniowym /2,3,4/.

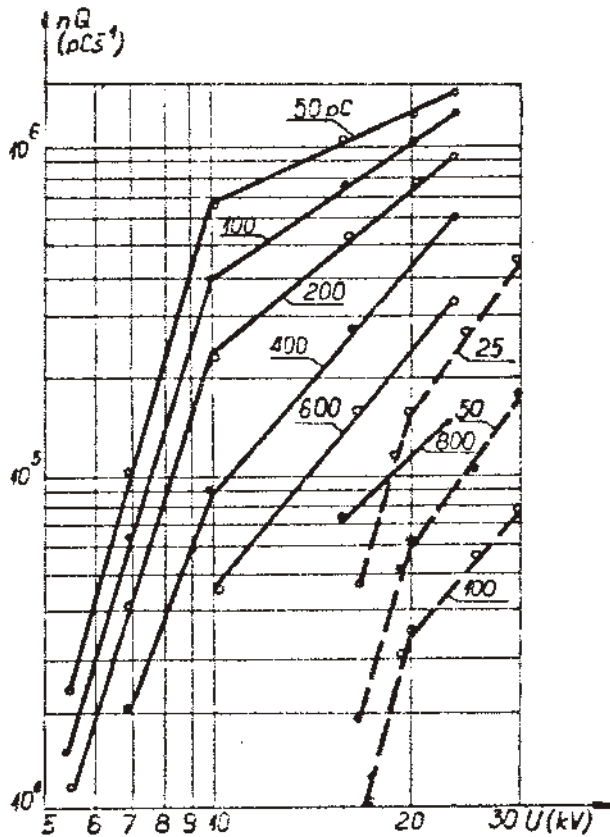
Wykresy powyższe wskazują na zasadniczą różnicę między wartością prądu w obu rodzajach izolacji, która jest dla kabli izolacją rdzeniową 10^3 razy większa.



Rys.10. Prąd wyładowania jako funkcja napięcia
 1 - kabel z izolacją rdzeniową / μCs^{-1} /
 4, 3, 2 - kable o polu promieniowym / nCs^{-1} /

Badając wpływ napięcia na wielkości charakterystyczne wyładowań można ponadto dokonać następujących spostrzeżeń. Prąd wyładowań mierzony przy jednej wartości napięcia składa się z sumy ładunków nQ w jednostce czasu. Rozkład impulsów polega w całej ich grupie licząc n wyładowań o jednakowych wartościach średnich Q , wydzielonych przy pomocy analizatora o określonej szerokości kanału. Poszczególne ilocz-

ny nQ są więc składnikami całkowitego prądu wyładowań. Badając zależność $nQ = f/U$ dla różnych wartości ładunku Q można stwierdzić jedynakowy typ tej funkcji dającej w podwójnie logarytmicznej skali wykresy odcinkami linii prostej. Przykład ich dla kabli z izolacją rdzeniową i o polu promieniowym przedstawiono na rys.11.



Rys.11. Przykłady zależności $nQ = f/U$ dla kabli z izolacją rdzeniową /linia ciągła/ i o polu promieniowym /linie przerywane/.

Empirycznie określony wzór zależności $nQ = f/U$ ma dla każdego odcinka postać:

$$nQ = BU^a$$

gdzie a, B - stałe.

Wartości wykładników potęgowych obliczone dla poszczególnych przypadków zawierają się w granicach od 2 do 8. Ogólnie można stwierdzić, że wartości wykładników potęgowych obliczonych dla kabli o polu promieniowym są większe niż dla kabli z izolacją rdzeniową.

Wyniki przedstawione w podwójnie logarytmicznej skali wskazują na występowanie dwóch zakresów zmienności ładunków nQ od napięcia, przy czym w drugim zakresie przyrost ten jest wolniejszy. Mimo tego prawie równomierny wzrost średniego prądu wyładowań jest więc rezultatem rozszerzania się zakresu ładunków w miarę wzrostu napięcia. Fakt, że wykładnik potęgowy zależności $nQ = f/U$ jest większy od 1, może sugerować, iż otrzymany przebieg jest rezultatem stopniowego rozwijania się nowych źródeł wyładowań w izolacji.

4. Zakończenie.

We wszystkich badanych kablach maksymalny ładunek wyładowań przy napięciu fazowym nie przekroczył kilkaset pC. Duże zróżnicowanie wartości napięcia progu wyładowań w poszczególnych żyłach i odcinkach stwierdzono w kablach z izolacją rdzeniową, co świadczy o zróżnicowaniu budowy tych kabli i wpływie technologii produkcji na rozmieszczenie w izolacji miejsc, w których proces wyładowań może rozwinąć się najłatwiej. W kablach o polu promieniowym napięcie progowe w poszczególnych żyłach i odcinkach różniło się nieznacznie. Również maksymalny ładunek przy zwiększeniu napięcia wzrósł tylko nieznacznie. W normalnie wykonanej izolacji papierowo-olejowej kabli, poddanej działaniu napięcia przewyższającego o 75 % napięcie znamionowe, występują początkowe formy wyładowań o małej intensywności. Wzrost napięcia powoduje w przybliżeniu równomierny przyrost ładunku maksymalnego i średniego prądu wyładowań, co wskazuje, iż w tym zakresie

napięć nie powinno następować samoczynne potęgowanie się zjawiska i szybkie niszczenie izolacji. Można przypuszczać, iż dopiero czynniki eksploatacyjne, w tym głównie procesy cieplne w izolacji, stwarzają warunki dla rozwoju wyładowań, powodujących stopniową degradację izolacji.

Literatura.

1. Grejsuch M., Kuczyński G. - Bumażno-maslanaja izolacja w wysokowoltnych konstrukcjach. Gosenergoizdat, Moskwa 1963.
2. Florkowska B. - Badenia wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych. Konferencja "Materiały i Układy Elektroizolacyjne" Wrocław, marzec 1969.
3. Florkowska B., Włodek R. - Vorgänge des Abklingens der Teilentladungen in der Isolierung von Hochspannungskabeln unter Spannungseinfluss. Elektrie 1971 nr.8.
4. Kapten D.A., Kuczyński G. - Fiziczeskaja priroda jonizacjonnych procesow w bumażno-maslannoj izolacji. Izv. WUZ Energetika 1962 nr.9 28-33.