

Barbara Florkowska, Ryszard Gacek, Romuald Włodek

STATYSTYCZNY CHARAKTER WYŁADÓWAŃ NIEZUPEŁNYCH
W MODELOWYCH UKŁADACH ELEKTROD W POLU NIEJEDNOSTAJNYM

1. Wstęp

W źródłach wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych mogą - zależnie od warunków lokalnych - działać różne formy wyładowań: lawiny elektronowe, pojedyncze lub wielokrotne, lokalne wyładowania kanałowe, wyładowania ślizgowe, emisja polowa elektronów. W zależności od formy wyładowań różne są charakterystyki ich zewnętrznych objawów impulsowych. Również różnorodność intensywności i liczności źródeł wpływają na charakterystyki wyładowań, którymi są rozkłady jedno- lub wielowymiarowe wielkości opisujących impulsy. Formy rozkładu i jej zmiany na przykład w czasie lub w funkcji napięcia probierczego stanowią zatem jedną z podstaw interpretacji zjawisk, a w połączeniu z innymi wielkościami uzupełniają badania mechanizmów wyładowań lub identyfikacji struktury układu izolacyjnego.

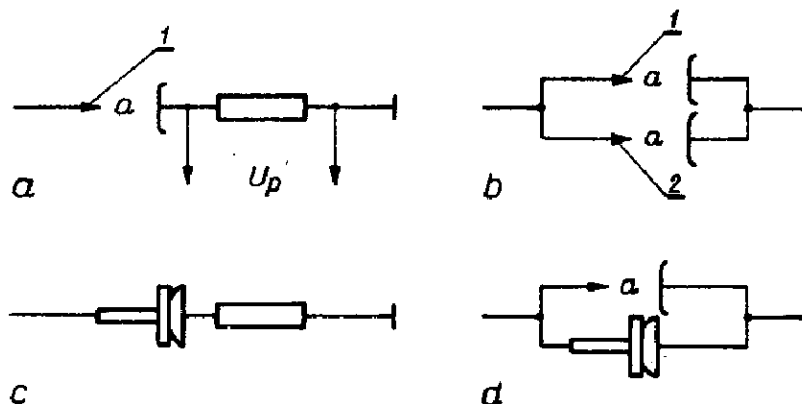
W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad objawami impulsowymi kilku form wyładowań niezupełnych w powietrzu, działających niezależnie oraz łącznie.

2. Układy modelowe

Obiekty do badań stanowiły zestawy elektrod stalowych ostrze - płaszczyna z możliwością oddzielnego /a/ lub jednoczesnego /b/ działania

dr Barbara Florkowska, dr Ryszard Gacek, doc.dr hab. Romuald Włodek
Instytut Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

wyładowań ulotowych w dwóch zespołach elektrod ostrze-płaszczyzna oraz z możliwością oddzielnych /c/ lub równoczesnych z poprzednimi /d/ wyładowań ślizgowych na przegrodzie izolacyjnej umieszczonej pomiędzy sworzniem a płaszczyzną /rys.1/.



Rys.1. Układy modelowe elektrod pomiarowych : a/ oddzielne, b/ jednoczesne działanie wyładowań ulotowych w dwóch zespołach elektrod ostrze-płaszczyzna, c/ oddzielne, d/ równoczesne z poprzednimi działanie wyładowań ślizgowych

Stosowane w badaniach trzy hiperboloidalne ostrza stalowe miały następujące promienie krzywizny : $r_1 = 86 \mu\text{m}$, $r_2 = 345 \mu\text{m}$, $r_3 = 518 \mu\text{m}$. Wyznaczone dla tych elektrod natężenie początkowe wyładowań przy odstępnie elektrod $a = 15 \text{ mm}$ wynosiły :

$r[\mu\text{m}]$	86	345	518
$E_0[\text{kV/mm}]$	16,2	7,9	7,4

Warunki atmosferyczne były zbliżone do normalnych : $293 \pm 20 \text{ K}$, 980 - 1000 hPa, napięcie przemienne 50 Hz.

Detekcji i pomiarom podlegały impulsy prądowe wytworzone w tych półokresach przebiegu napięcia, podczas których elektroda ostrzowa posiadała potencjał ujemny względem elektrody płaskiej.

3. Układ pomiarowy

Wyznaczono rozkłady ładunków wyładowań $n = f(Q)$, przy czym parametrami w przedstawionych badaniach były : wartość napięcia probierczego

i promień krzywizny elektrod ostrzowych. Zastosowano wielokanałowy analizator amplitudy impulsów zbudowany w systemie CAMAC [1].

Schemat blokowy przedstawia rys. 2.

Jako jednostkę przetwarzającą i sterującą zastosowano procesor autonomiczny typ 131, zapewniający wraz z odpowiednią konstrukcją programu minimalny czas martwy systemu podczas analizy. Do pomiaru amplitudy użyto spektrometryczny przetwornik analogowo-cyfrowy typ 711. Za pomocą tego typu przetwornika widma analizowanych impulsów można podzielić na: $2^5, 2^6, 2^7, 2^8, 2^9$ kanałów przy pojemności każdego z nich $1,6 \times 10^7$ impulsów. Umożliwia to zgromadzenie w pamięci ferrytowej typ 201 odpowiednio 32, 16, 8, 4, 2 analizowanych widm, następujących np. kolejno po sobie, a następnie ich wyświetlenie na ekranie oscyloskopu lub wskaźniku cyfrowym. Wyniki można wyprowadzić również na taśmę papierową przeznaczoną do dalszej obróbki za pomocą mc Odra 1325. Czas analizowania impulsów jest wybierany z przedziału $1 - 6,5 \times 10^4$ jpc /jednostka pomiarowa czasu - wybrana ze zbioru $\{1 \mu s, 10 \mu s, \dots, 1 s, 10 s\}$.

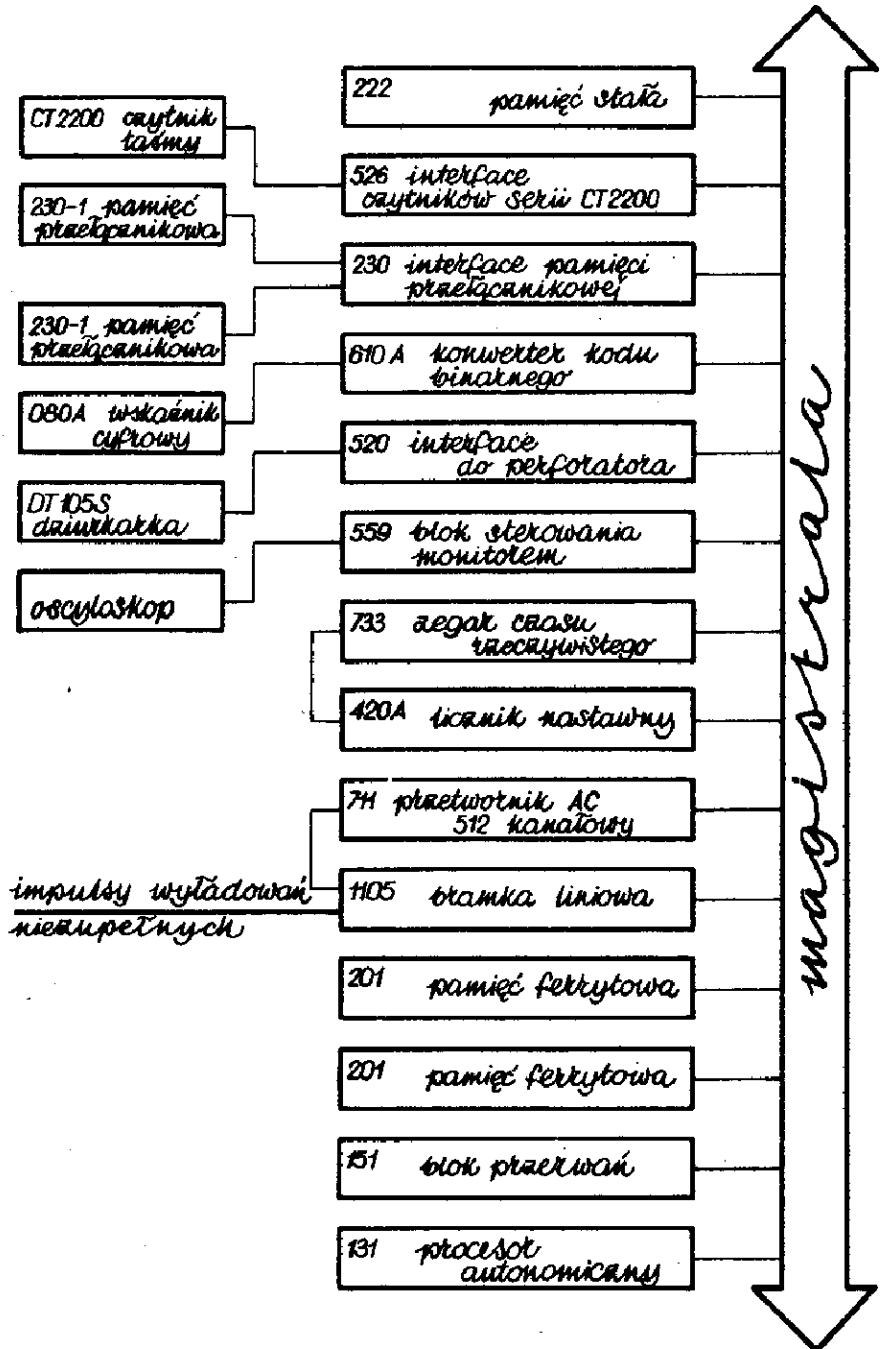
4. Charakterystyki wyładowań ulotowych

Początkowe fazy impulsowe wyładowań niezupełnych, zwane impulsami Trichela, powstają w wyniku okresowego osłabienia pola przy katodzie ładunkiem przestrzennym, znane są głównie z badań przy napięciu stałym [2, 3]. Podczas działania napięcia przemiennego wyładowania impulsowe występują w zakresie napięć chwilowych wyższych od początkowego.

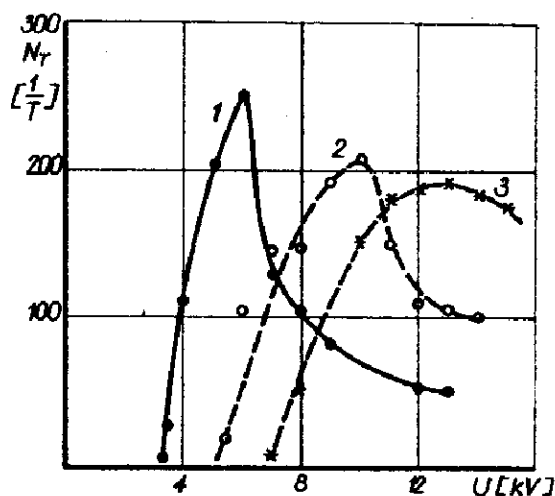
Jako napięcie początkowe przyjęto w badaniach tę jego wartość, przy której powtarza się w sposób trwały jeden impuls wyładowania w jednej ujemnej połowie napięcia probierczego. Impuls ten występuje w chwili amplitudy napięcia probierczego. Przy zwiększaniu napięcia probierczego zwiększa się częstość powtarzania wyładowań, przy czym impulsy grupują się z obu stron szczytu sinusoidy napięcia.

Na podstawie rozkładów ładunków wyznaczono charakterystyki częstości powtarzania wyładowań N_T [1/T] w funkcji napięcia probierczego.

Przedstawiono je dla wymienionych promieni krzywizny elektrod na rys. 3.



Rys.2. Schemat blokowy zestawu aparatury



Rys. 3. Częstość powtarzania impulsów wyładowań w funkcji napięcia probierczego. Promienie krzywizny elektrod ostrzowych :
1 - 86 μm , 2 - 345 μm , 3 - 518 μm

Stwierdzono, że wzrost liczby wyładowań w okresie praktycznie liniowy ma miejsce tylko do pewnej granicznej wartości napięcia, po czym następuje zmniejszanie się częstości impulsów. Tuż przed wyładowaniem zupełnym liczba wyładowań wynosi kilka do kilkunastu. Zmniejszaniu się liczby wyładowań powyżej pewnej wartości towarzyszy zmiana formy wyładowań z impulsowej na częściowo bezimpulsową. Graniczna wartość tej zmiany wynosi w badanym zakresie krzywizn elektrod około $2U_0$.

Odstęp czasu pomiędzy kolejnymi wyładowaniami impulsowymi nieco powyżej U_0 w zakresie częstości kilku impulsów na okres/ wynosi : dla elektrody 1: 80 μs , 2: 95 μs , 3: 125 μs .

Zakres zmian pola elektrycznego pomiędzy elektrodami można w przybliżeniu podzielić na dwa obszary.

W pierwszym obszarze /rozkład pola elektrycznego w pobliżu elektrody ostrzowej o zasięgu w przestrzeni zbliżonym wymiarem do promienia krzywizny r / występuje znaczny gradient natężenia pola elektrycznego. Pole elektryczne wzdłuż osi x łączącej elektrody /odstęp a / można w tym obszarze obliczyć w przybliżeniu z wzoru :

$$E_1(x) = \frac{2U}{\ln \frac{4a}{r}} \cdot \frac{1}{2x + r} \quad //$$

W drugim obszarze oddalonym od ostrza, o znacznie mniejszym gradientie pola, natężenie pola wyraża się w przybliżeniu wzorem :

$$E_2(x) = \frac{2U}{\ln \frac{4d}{r}} \cdot \frac{1}{2x} \quad /2/$$

Dla każdego z tych obszarów można obliczyć oddzielnie prędkość jonów ujemnych jako :

$$v_- = u E(x) = \frac{dx}{dt} \quad /3/$$

gdzie : u - ruchliwość jonów.

Z powyższego przybliżony czas przebywania ładunku jonów ujemnych w przestrzeni międzyelektrodowej podczas ruchu ku anodzie wynosi :

$$t_- = t_1 + t_2 = \int_0^{t_1} dt + \int_0^{t_-} dt = \frac{1}{u} \left[\int_0^{mr} \frac{dx}{E_1/x} + \int_{mr}^a \frac{dx}{E_2/x} \right] \quad /4/$$

$$t_- = \frac{1}{2} \frac{\ln \frac{4a}{r}}{u U} \left[r^2 (m - 2) + a^2 \right] \quad /5/$$

gdzie : m - zasięg obszaru pierwszego wyrażony jako krotność promienia ostrza r .

W wyniku obliczeń wykonanych na przykładzie elektrody 2 o promieniu $345 \mu\text{m}$ przy napięciu nieznacznie wyższym od początkowego, otrzymuje się czas $t_- = 270 \mu\text{s}$ przy założeniu ruchliwości jonów $3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Porównanie z odstępem czasu między kolejnymi impulsami wskazuje na rozpoczęcie następnego wyładowania przed zakończeniem ruchu ładunków z poprzedniego wyładowania do anody.

Odpowiednie obliczenia dla napięcia krytycznego dla tej elektrody $U_{kr} = 10 \text{ kV}$ daje wartość $t_- = 137 \mu\text{s}$. Doświadczalnie wyznaczony odstęp czasu między impulsami wynosi : dla elektrody 1 - $25 \mu\text{s}$, 2 - $32 \mu\text{s}$, 3 - $33 \mu\text{s}$. Dalsze badania powinny wskazać na kryterium przejścia od impulsowych do bezimpulsowych form wyładowań niezupełnych od katody przy napięciu przemiennym.

Wartość ładunku pojedynczego impulsu została wyznaczona po wykonaniu skalowania przez całkowanie przebiegu czasowego impulsu prądowego na impedancji detekcyjnej.

Ładunek pojedynczego impulsu zależy od promienia elektrody ostrzowej i wartość jego przy napięciu nieznacznie przekraczającym U_0 wynosi :

$$\text{elektroda } r_1 = 86 \mu\text{m} \quad Q = 54 \text{ pC}$$

$$\text{elektroda } r_2 = 345 \mu\text{m} \quad Q = 74 \text{ pC}$$

$$\text{elektroda } r_3 = 568 \mu\text{m} \quad Q = 120 \text{ pC}$$

Przy podno zenu napięcia probierczego powstają dalsze impulsy, ułożone wokół amplitudy napięcia. Wartości ich tworzą zbiory, będące rozkładami ładunków o pewnym rozstępie.

Są dwie grupy przyczyn tworzenia zbiorów wartości ładunków wyładowań gdy napięcie probiercze jest przemienne. Pierwszą stanowi zespół czynników przypadkowych, jak chwilowe wahania napięcia i przepięcia, zmiany lokalne atmosfery i inne. Drugą, bardziej znaczącą przyczyną, jest fakt występowania impulsów przy kolejno zmieniających się wartościach chwilowych napięcia. Lokalna gęstość energii pola elektrostatycznego przy elektrodzie ostrzowej zmienia się z kwadratem natężenia pola. W taki również w przybliżeniu sposób zależy od natężenia pola energia udzielana ładunkom przy każdej akcji inicjacji wyładowania, lecz proces odbywa się przy zmieniających się wartościach chwilowych napięcia.

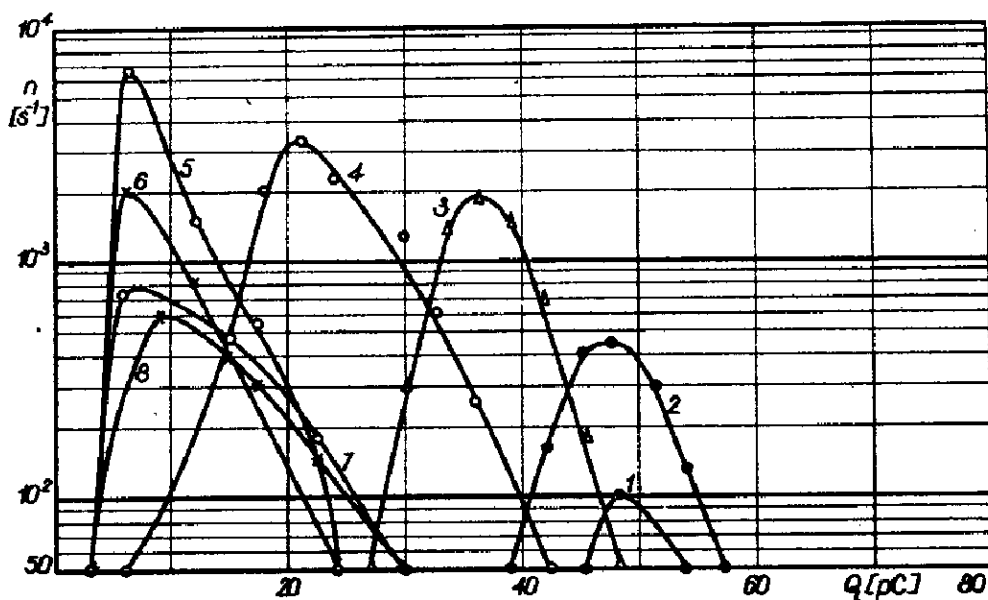
Ładunek impulsu mierzony w obwodzie zewnętrznym maleje zatem ze wzrostem napięcia, gdyż zmiana energii podczas wyładowania wynosi :

$$W = U \Delta Q$$

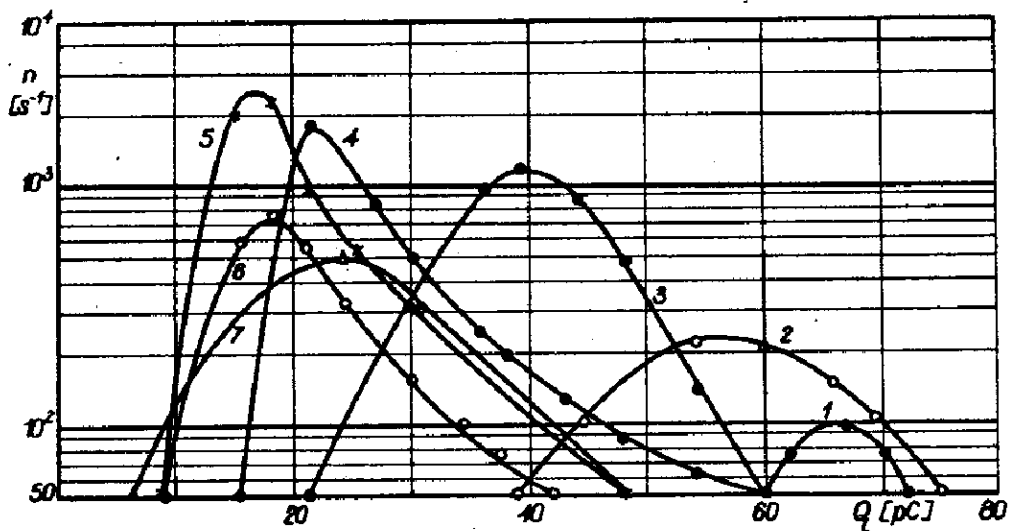
/6/

Tak więc zbiory impulsów wyładowań przy danym napięciu tworzą rozkłady, zaś zwiększenie napięcia probierczego zmniejsza ładunek przeciętny w zbiorze /rys. 4 - 6/.

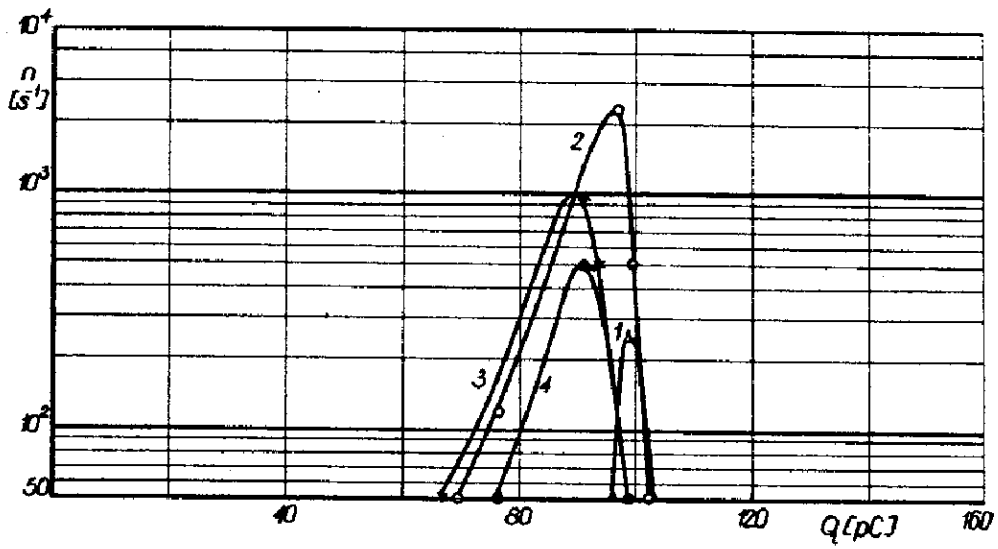
Charakter zmian impulsów wyładowań ze wzrostem napięcia przedstawiono na rys. 7.



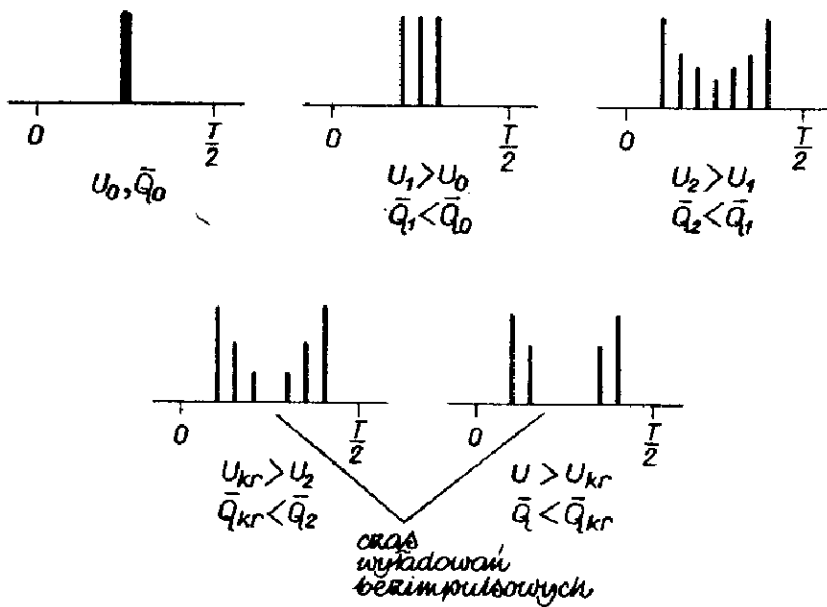
Rys.4. Rozkłady ładunków wyładowań w układzie ostrze-płaszczyzna. Promień elektrody $86\mu\text{m}$, odstęp 15 mm. 1 - 3,3 kV, 2 - 3,5 kV, 3 - 4 kV, 5 - 5,5 kV, 6 - 7 kV, 7 - 11 kV, 8 - 12 kV



Rys.5. Rozkłady ładunków wyładowań w układzie ostrze-płaszczyzna. Promień elektrody $345\mu\text{m}$, odstęp 15 mm. 1 - 5,3 kV, 2 - 5,5 kV, 3 - 6 kV, 4 - 9 kV, 5 - 10 kV, 6 - 13 kV, 7 - 15 kV



Rys.6. Rozkłady ładunków wyładowań w układzie ostrze-płaszczyzna. Promień elektrody $568 \mu\text{m}$, odstęp 15 mm. 1 - 7 kV, 2 - 9 kV, 3 - 11 kV, 4 - 14 kV

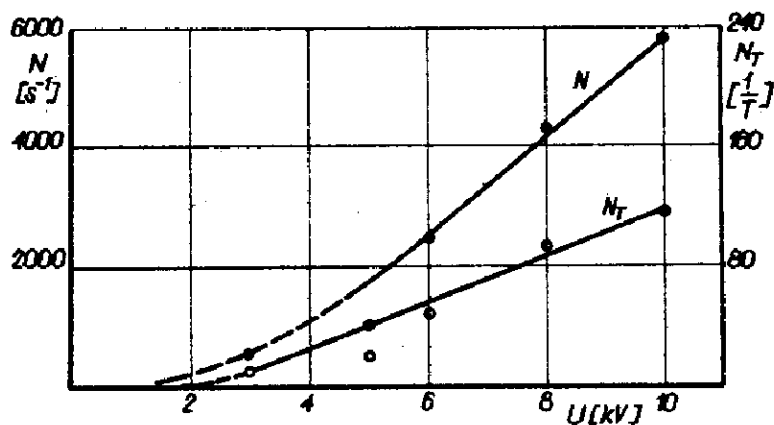


Rys.7. Zmiany ładunków przy zwiększaniu napięcia probierczego

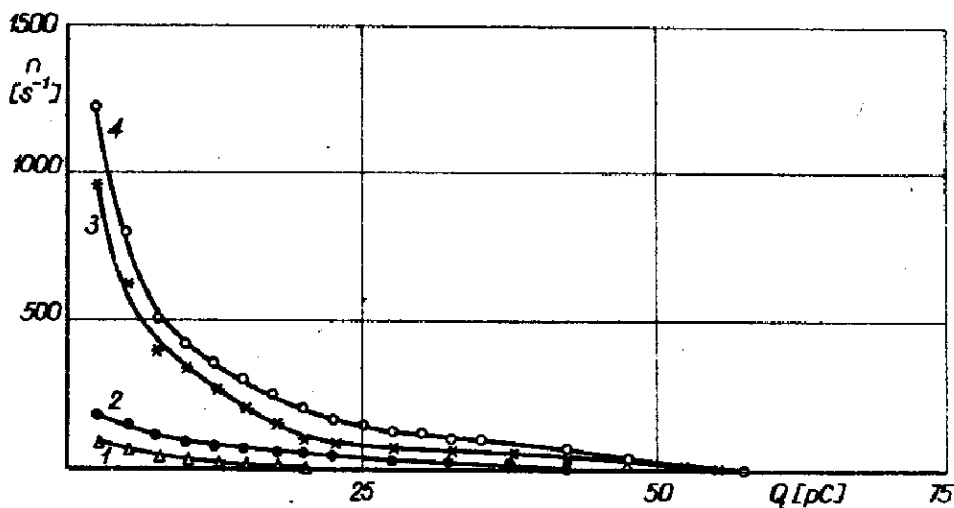
5. Charakterystyki wyładowań ślizgowych

Wyładowania ślizgowe ze względu na odmienną geometrię układu z materiałem izolacyjnym stałym wykazują znacznie szerszy zakres ładunków. Istnienie materiału stałego, który może kumulować ładunki powierzchniowe aż do wystąpienia warunków polowych do wyładowania, uzasadnia możliwość pojawienia się tutaj impulsów rzadszych niż 1 s^{-1} w stosunkowo szerokim zakresie napięć i ładunków. Przyczyną ich bowiem nie jest - jak w przypadku wyładowań ulotowych - losowy charakter pojawienia się elektronów inicjujących jonizację przestrzeni gazowej.

Rysunek 8 przedstawia zależność częstości wyładowań ślizgowych przy ujemnej elektrodzie sworzniowej od napięcia, zaś rys. 9 - typowe rozkłady ładunków wyładowań.



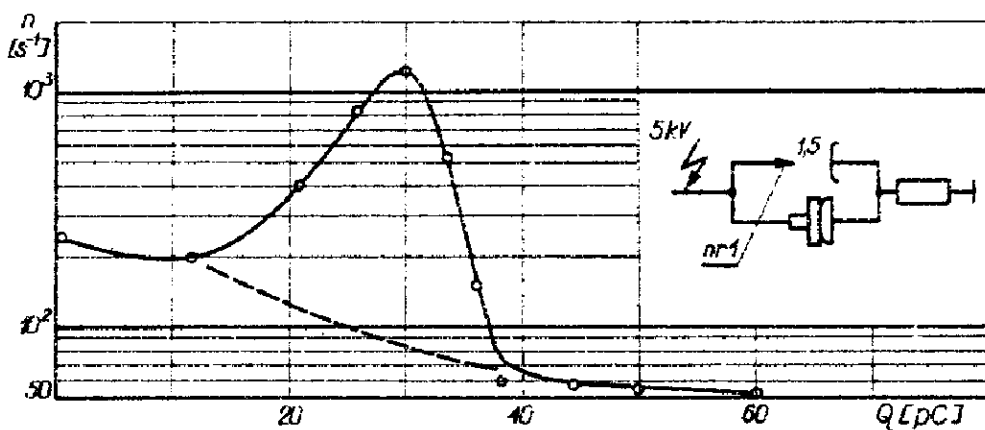
Rys.8. Zależność częstości wyładowań ślizgowych od napięcia



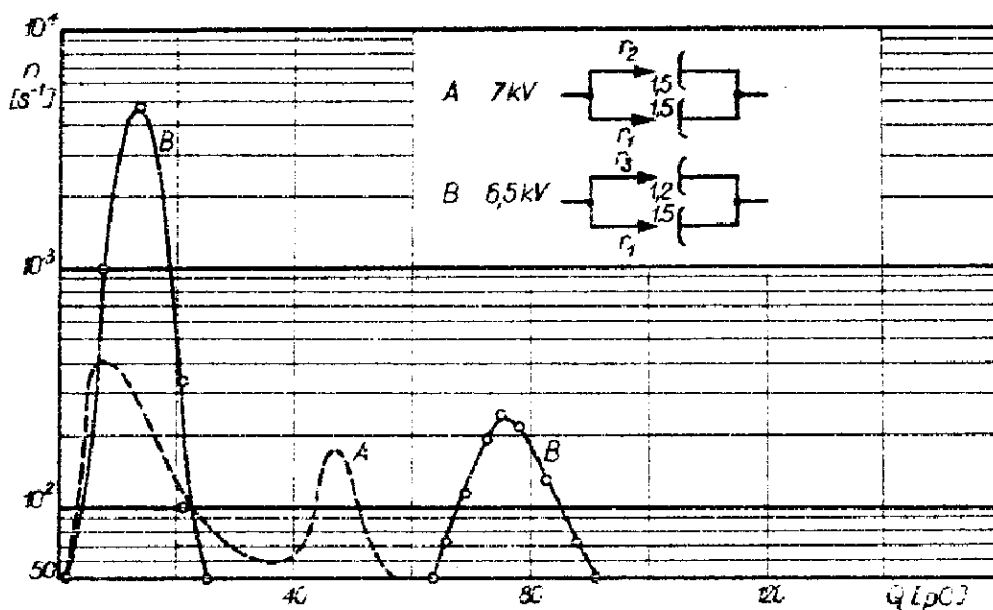
Rys.9. Rozkłady ładunków wyładowań ślizgowych. 1 - 3 kV ; 2 - 5 kV ;
3 - 8 kV ; 4 - 10 kV

6. Jednoczesne działanie różnych źródeł wyładowań

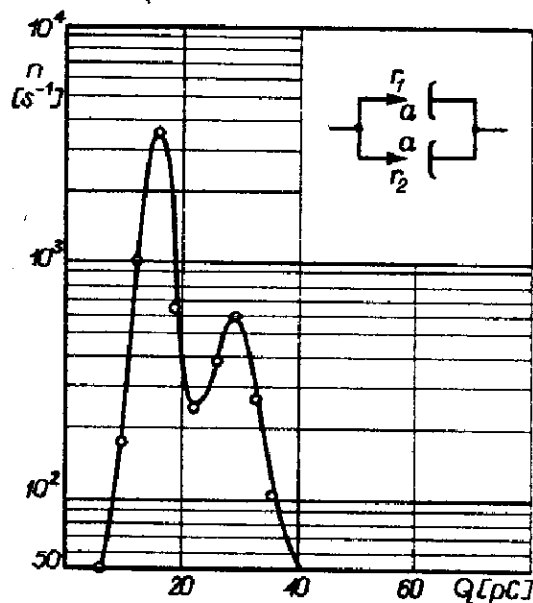
Należy przewidywać, że przy wystarczającej zdolności rozdzielczej układu i uwzględniając niewielkie prawdopodobieństwo losowego wystąpienia w jednym momencie różnych wyładowań, działanie jednoczesne odmiennych źródeł ujawni się superpozycją rozkładów ładunków do poszczególnych źródeł. Na rysunkach 10 - 12 przedstawiono otrzymane wyniki pomiarów rozkładów ładunków wyładowań w kilku kombinacjach, z równocześnie działającymi wyładowaniami : elektrod ostrzowych o różnych promieniach krzywizn i elektrod do wyładowań ślizgowych. Widoczny jest efekt superpozycji rozkładów od poszczególnych źródeł.



Rys.10. Rozkłady ładunków działających jednocześnie źródeł wyładowań ulotowych i ślizgowych przy napięciu 5 kV i odległości elektrod ulotowych 15 mm



Rys.11. Rozkłady ładunków dla dwu układów działających równocześnie dwu źródeł wyładowań ulotowych. Układ A : $r_1 = 86 \mu\text{m}$, $r_2 = 345 \mu\text{m}$, $U = 7 \text{ kV}$. Układ B : $r_1 = 86 \mu\text{m}$, $r_3 = 518 \mu\text{m}$



Rys.12. Rozkłady ładunków działających jednocześnie dwu źródeł wyładowań ulotowych : $r_1 = 86 \mu\text{m}$, $r_2 = 120 \mu\text{m}$, $U = 5 \text{ kV}$

7. Zakończenie

W pracy wykazano w badaniach modelowych wyładowań niezupełnych w powietrzu wpływ mechanizmów fizykalnych wyładowań na postać jednowymiarowego rozkładu ładunków. Kontynuując poprzednie prace w tym zakresie, zbadano wpływ parametrów geometrycznych układu elektrod oraz napięcia na charakterystyki wyładowań niezupełnych. Przeanalizowano typowe, zasadniczo odmienne formy rozkładu ładunków wyładowań lawinowych i ślizgowych. Wykazano, że jednoczesne działanie więcej niż jednego źródła prowadzi do superpozycji rozkładu wyładowań od poszczególnych źródeł. Badania powyższe wskazują na możliwości interpretacyjne detekcji impulsów wyładowań.

Literatura

1. B.Florkowska, Z.Florkowski, R.Garek, R.Włodek : System CALIAC w zastosowaniu do badań wyładowań niezupełnych. Przegląd Elektrotechniczny /w druku/.
2. Raether H. : Electron Avalanches and Breakdown in Gases. London, 1964.
3. Loeb L. : Electrical Coronas, Univ. of California Press 1965.