

Jacek Goliński

POWSTAWANIE I ROZWOJ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH
POWIERZCHNIOWYCH

1. Wstęp

Wyładowania niezupełne powierzchniowe /wnzp/ są najczęściej występującym rodzajem wnz. Typowym miejscem występowania wnzp jest punkt potrójny styku krawędzi elektrod z powierzchnią styku dielektryków stałych z dielektrykami gazowymi. Wnzp mogą jednak występować w miejscach nie sąsiadujących z elektrodą, ponieważ towarzyszą wnz w szczelinach i wtrącinach gazowych, o ile ich średnica przekracza ok. 0,2 mm. Uproszczony opis mechanizmu powstawania i rozwoju wnzp podano w następnym punkcie, ze zwróceniem uwagi na wpływ parametrów na ogół mniej eksponowanych przy określaniu napięcia początkowego U_0 . Wnzp mogą również powstawać w wąskich / $h < 10 \mu\text{m}$ / szczelinach gazowych między dwoma dielektrykami [4] albo między dielektrykiem gazowym a elektrodą. Rezultaty pomiarów ostatniego rodzaju wnzp omówiono w oddzielnym punkcie referatu.

2. Mechanizmy powstawania i rozwoju wnzp

Do powstania wnzp konieczne jest spełnienie 3 warunków niezbędnych również przy innych typach wyładowań :

- 1/ przekroczenie E_{kryt} w odpowiednich obszarze,
- 2/ obecność swobodnych elektronów pierwotnych w tym obszarze,
- 3/ powstawanie wystarczającej ilości elektronów wtórnych.

doc.dr Jacek Goliński - Instytut Elektrotechniki w Warszawie.

Obecność dielektryka stałego w bezpośrednim sąsiedztwie wnzp wpływa na powyższe 3 warunki ; w szczególności dotyczy to drugiego i trzeciego warunku.

Powyższe trzy warunki można właściwie sprowadzić do tego, że konieczne są warunki zapewniające powstanie jonizacji lawinowej oraz jej przejście w wyładowanie kanałowe.

Mechanizm powstawania wnzp przy elektrodzie składa się z dwóch etapów :

- powstanie wyładowań w gazie między elektrodą a dielektrykiem stałym w miejscach, w których spełnienie powyższych 3 warunków następuje przy najmniejszej wartości doprowadzającego napięcia U ,

- rozwój wyładowań powierzchniowych od zlokalizowanego ładunku powierzchniowego w miejscach styku kanału wyładowania w gazie z dielektrykiem.

Zlokalizowany ładunek powierzchniowy wytwarza składową pola styczną E_{stp} , która dodaje się do odpowiedniej składowej pola elektrody E_s zewn' wytwarzając łącznie pole zapoczątkowujące jonizację gazu wzdłuż powierzchni dielektryka. Dalszy rozwój wyładowania, jego przejście w mechanizm strimerowy, zależy również od jego biegunowości.

Przy napięciu przemiennym istotne znaczenie ma także ładunek powierzchniowy pozostawiony przez wyładowania w kolejnych półokresach, a także przy uprzednich doprowadzeniach napięcia. Obok ładunku jonów zaadsorbowanych na powierzchni należy uwzględnić wpływ ładunku elektronów uwięzionych na płytkach poziomach energetycznych znajdujących się na i pod powierzchnią dielektryka. Obecność ładunków powierzchniowych wywołuje obok E_{stp} również składową normalną E_{nlp} , która wpływa także na rozwój wyładowań w gazie. Następuje więc sprzężenie zwrotne między drugim a pierwszym etapem wnzp.

Uwzględniając powyższy uproszczony opis mechanizmu powstawania wnzp można stwierdzić, że wzór analityczny na U_0 ma postać złożonej funkcji wielu zmiennych :

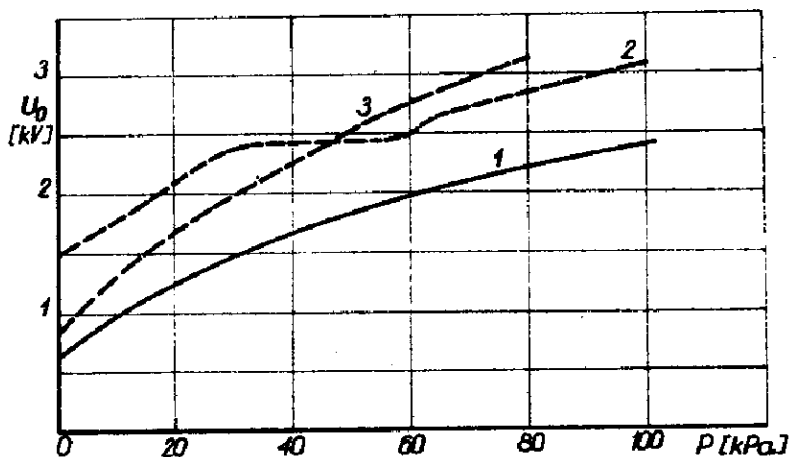
$$U_0 = f(E_{kryt}, p, r, \phi, \epsilon/\epsilon_0, \rho_s) \quad //$$

przy czym : E_{kryt} - naprężenie krytyczne gazu zależne od jego rodzaju i ciśnienia p , od promienia krzywizny krawędzi elektrody r o średnicy ϕ ; g - grubość dielektryka stałego między elektrodami o przenikalności ϵ i rezystancji powierzchniowej ρ_s .

Brak dotychczas w literaturze tematu, teoretycznego lub eksperymentalnego rozwiązania [1], uwzględniającego wpływ wszystkich parametrów. Można znaleźć natomiast szereg wzorów na U_0 , określonych na podstawie badań wpływu jednego parametru /zwykle g/\mathcal{E} / albo dodatkowo przy uwzględnieniu wpływu zmian p . Pozostałe parametry pozostawały niezmiennie lub często w ogóle nie uwzględniane w rozważaniach. Można przyjąć, że, r wpływa w pierwszym rzędzie na składową normalną E_n zew, a przez to na rozwój pierwszego etapu wnzp /w gazie/, natomiast ϕ wpływa głównie na E_s zewn, czyli głównie na drugi etap wnzp /wzduż powierzchni dielektryka/.

Dość złożony jest wpływ ρ_s , który dla małych wartości, tj. $\rho_s < 10^{10} - 10^{11} \Omega$ wpływa na E_s zew i w rezultacie wzrost ρ_s powoduje zmniejszenie U_0 . Dla wartości większych ρ_s stają się miarą zdolności dielektryka do wytwarzania elektronów pierwotnych i wtórnych. Przeprowadzone przez autora badania przy napięciu 50 Hz wykazały, że wzrost ρ_s o około rząd wielkości powoduje wzrost U_0 o 10 - 15% w przypadku powstawania wnzp w powietrzu przy $p = 0,1$ MPa, przy czym wpływ ten był praktycznie taki sam dla elektrod prętowych / $\phi = 3$ mm, $r = 0,1$ mm/, jak i elektrod płaskich / $\phi = 70$ mm, $r = 5$ mm/ przy $g/\mathcal{E} = 2,4$ mm. Badania przeprowadzone przy napięciu udarowym wykazały, że wpływ wzrostu ρ_s na wzrost wartości U_0 uwiadcza się wyraźnie dla $\rho_s > 5 \cdot 10^{15} \Omega$ [2]. Wpływ zmian ϕ i r zależy od wielkości g/\mathcal{E} , gdyż wszystkie te parametry wpływają na E_n zew oraz E_s zew. Tak więc przykładowo z badań autora wynika, że przejście z elektrody o $\phi = 3$ mm, $r = 1,5$ mm na elektrodę o $\phi = 30$ mm i $r = 0,15$ mm przy $g/\mathcal{E} = 2,4$ mm spowodowało wzrost U_0 o około 75%, a przy $g/\mathcal{E} = 0,1$ mm obniżenie o 10%. Analogicznie przejście z pierwszej elektrody na elektrodę o $\phi = 70$ mm i $r = 5$ mm powodowało przy $g/\mathcal{E} = 2,4$ mm wzrost U_0 4,7 razy, a przy $g/\mathcal{E} = 0,2$ mm wzrost 1,4 razy. Wpływ zmian p na wartość U_0 ilustruje rysunek 1, na którym przedstawiono rezultaty pomiarów w powietrzu /krzywe 1 i 3/ oraz w SF_6 /krzywa 2/. Krzywa 1 przedstawia rezultaty badań autora dla elektrody $\phi = 70$ mm, $r = 5$ mm przy $g/\mathcal{E} = 0,31$ mm i odpowiednio krzywa 2 przy $\phi = 3$ mm, $r = 0,1$ mm $g/\mathcal{E} = 0,31$ mm, natomiast krzywa 3 przedstawia rezultaty w układzie elektrod Rogowskiego $\phi = 58$ mm, $r = 19$ mm, $g/\mathcal{E} = 0,42$ mm i została przytoczona z literatury [1]. Należy podkreślić,

że wszystkie rezultaty autora przeprowadzone były dla płaskiej elektrody uziemionej o $\phi = 100$ mm, natomiast krzywa 3 jest uzyskana dla dwóch identycznych elektrod oddzielonych przekładką izolacyjną.



Rys. 1. Zależność $U_0 = f/p$ dla wnzp. Objaśnienia w tekście.

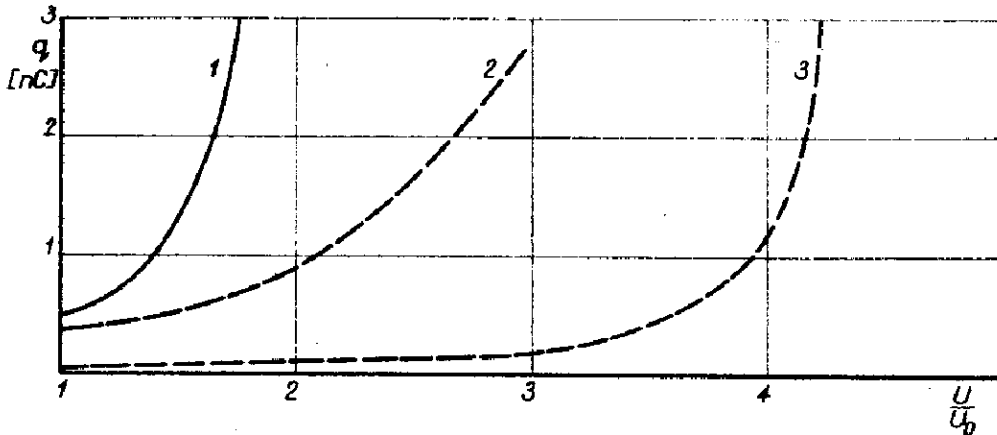
Rezultaty uzyskane w tym układzie były porównywane przez autorów z wartościami obliczanymi na podstawie krzywej Paschena [1]. Stwierdzono, że wartości zmierzone leżą o 20 - 30% poniżej obliczonych, co przypisano występowaniu emisji wtórnej o rząd wielkości większej niż dla elektrod metalowych. Cytowani autorzy nie uwzględniają wcale wpływu ładunku powierzchniowego na rozkład pola w szczelinie gazowej i to przypuszczalnie decydowało o rozbieżnościach obliczeń z eksperymentem. Ze względu na występujące odkształcenia pola od pola jednorodnego mało prawdopodobne jest, aby zachodził mechanizm przeskoku Townsenda, jak to przyjmowali cytowani autorzy.

Analizując rezultaty pomiarów autor stwierdził, że mechanizm Townsenda występuje w stosowanych układach elektrod dla $p < 5$ kPa. Dla wyższych p mierzone wnzp miały charakter wyładowań kanałowych, przy czym stwierdzono, że ładunek pozorny q_0 zmierzony przy U_0 spełnia zależność $q_0 \cdot p = \text{const}$ /dla krzywej 2 z rys. 1: $q_0 \cdot p \approx 50 \mu\text{C} \cdot \text{Pa}$ /. Wartość q jest proporcjonalna do długości kanału wnzp l_k , czyli stwierdzono zależność $l_{k0} \cdot p = \text{const}$, co oznaczałoby, że wnzp przy progu podlegają regułom prawa podobieństwa.

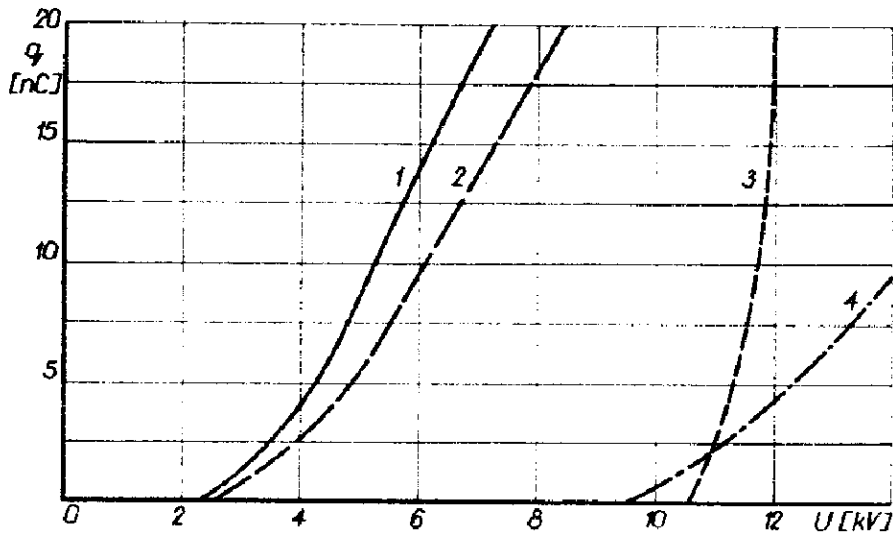
Rzeczony wnzp jest ściśle związany z ich zapoczątkowaniem.

Im bardziej intensywnie powstają wznpy przy U_0 , tym obserwuje się szybszy wzrost intensywności w funkcji U , co ilustruje rysunek 2.

Rezultaty przedstawione na rysunku 2 dotyczą układu z elektrodą prętową $\phi = 3$ mm, $r = 0,1$ mm, $g/\varepsilon = 0,31$ mm; w powietrzu przy $p = 35$ kPa /krzywa 1/ i przy $p = 100$ kPa /krzywa 2/ oraz w SF_6 przy $p = 100$ kPa /krzywa 3/.



Rys. 2. Zależność $q = f U/U_0$ dla wznpy. Objaśnienia w tekście.



Rys. 3. Zależność $q = f/U/$ dla wznpy. Objaśnienia w tekście.

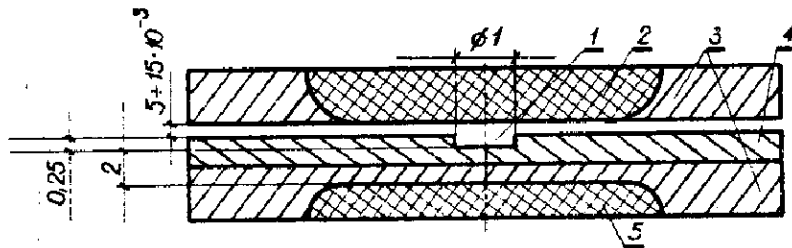
Rezultaty z rysunku 3 ilustrują wpływ na rozwój wnzp geometrii elektrod, tzn. krzywa 1 i 2 zostały zdjęte w układzie modelowym o $\phi = 3$ mm, $r = 1,5$ mm, $g/C = 2,4$ mm oraz odpowiednio krzywe 3 i 4 przy $\phi = 70$ mm, $r = 5$ mm, $g/C = 2,4$ mm. Krzywe 2 i 3 ilustrują ponadto wpływ zwiększenia ρ_g /przez podłożenie pod elektrodę folii PTFE/ na zdejmowane charakterystyki. Analogiczny wpływ zwiększania ρ_g na ograniczenie rozwoju wnzp /jak to wynika z porównania krzywych 1 i 2 z rys.3/ był obserwowany przy badaniach metodą fotograficzną długości kanałów wnzp [3].

3. Wyładowania powierzchniowe szczelinowe

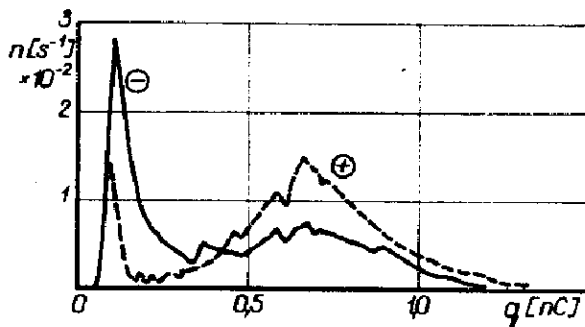
Występowanie wyładowań powierzchniowych szczelinowych /wnzp sz/ zostało zaobserwowane w układzie modelowym z rys. 4, stosowanym do badań we wtrącinach cylindrycznych usytuowanych przy elektrodzie. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wybrane rezultaty pomiarów wnz w układzie z rys. 4. Na podstawie porównania tych rezultatów z odpowiednimi rezultatami uzyskanymi dla identycznego układu modelowego, ale z uszczelnieniem smarem silikonowym w sąsiedztwie wtrąciny styku elektrody z dielektrykiem stałym, przyjęto, że obok wnz we wtrącinie powstawały wnzp sz.

Zaobserwowane wnzp sz charakteryzowały się następującymi cechami :

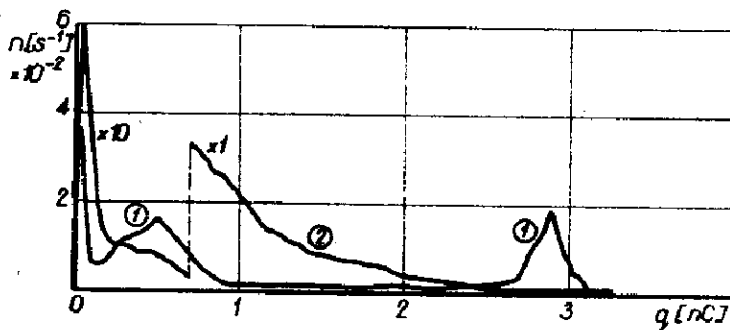
- 1/ bardzo wyraźny wzrost q_m o przeszło rząd wielkości w ciągu pierwszych kilkunastu minut przyłożenia napięcia,
- 2/ praktycznie identyczna wartość maksymalnego ładunku pozornego q przy obu biegunościach doprowadzonego napięcia U to znaczy $q_{mt} = q_m$ /rys. 5/,
- 3/ wpływ U na q_m zaobserwowano tylko dla $U < 1,4 U_0$, dla większych wartości U q praktycznie nie zależy od U /rys. 6/.



Rys.4. Układ modelowy z wtrąciną /1/, usytuowaną przy elektrodzie Al wn /2/, 3 - odlewy z EP, 4 - badana próbka EP, 5 - elektroda uziemiona. Wszystkie wymiary w mm.



Rys.5. Rozkład częstotliwości $n = f/q$ przy $U = 6,5$ kV, $t_{pom} = 2$ min, $\Delta q = 4,5$ pC/kan.



Rys.6. Rozkłady częstotliwości $n = f/q$ przy biegunowości ujemnej 1-8 kV, 2-15 kV, $t_{pom} = 2$ min, $\Delta q = 9$ pC/kan.

Przypuszczalnie powstawanie zaobserwowanych wnzp w szczelinie gazowej o wysokości kilku do kilkunastu μm , przylegającej do Al, było związane z istnieniem warstwy izolacyjnej Al_2O_3 , gdyż w innym przypadku elektrony powstające na czole kanału przy elektrodzie dodatniej byłyby przez nią przywiązane i neutralizowane i wtedy powinna zachodzić zależność

$$q_{mt} \ll q_m^-, \text{ a było } q_{mt} \gg q_m^-.$$

Zapoczątkowanie wnzp sz odbywa się pod wpływem E_s od ładunku objętościowego wywołanego jonizacją w gazie wtrąciny w bezpośrednim sąsiedztwie szczeliny, po zapoczątkowaniu wnzp sz dalszy ich rozwój związany jest z ładunkiem powierzchniowym w szczelinie pozostawianym przez wcześniejsze wnzp oraz ładunkiem objętościowym na czole kanału wnzp sz.

Literatura

1. Husain E., Nema R.S. : Surface discharge studies with uniform field electrodes at low pressures., IEEE Tr. on El.Ins. 1980, Vol.EI-15, No 2.
2. Kawashima A., Hoh S. : Lichtenberg figures on various electrical insulating materials., IEEE Tr. on El.Ins. 1978, Vol.EI-13, No 1.
3. Paciorek Z. : Badanie wpływu rezystywności powierzchniowej i pojemności jednostkowej materiałów elektroizolacyjnych na rozwój wyładowań ślizgowych. Praca doktorska 1982. Politechnika Łódzka.
4. Sierota A. : Rozwój wyładowań i przebiega na granicy styku dwóch powierzchni izolacyjnych. III Symp. "Problemy wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych" PTETIS-AGE, 1979, Zakopane.