

Włodzimierz Sitek

WPLYW POŁOŻENIA WTRĄCINY GAZOWEJ NA PRZEBIEG
WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

1. Wstęp

Jednym z czynników wpływających na własności wyładowań niezupełnych jest położenie wtrąciny gazowej, w której odbywają się wyładowania. Wyładowania we wtrącinie gazowej przylegającej do elektrody metalowej wyraźnie różnią się od wyładowań we wtrącinie umieszczonej we wnętrzu dielektryku stałego. Podstawową różnicą jest to, że jeżeli jedną ze ścianek wtrąciny stanowi elektroda metalowa, to intensywność wyładowań zależy od biegunowości napięcia. Ma to miejsce nie tylko w przypadku napięcia stałego i udarowego, ale i przy napięciu przemiennym. Zależność od biegunowości napięcia jest charakterystyczna dla wszystkich wyładowań niezupełnych, które odbywają się między elektrodą metalową a dielektrykiem stałym, tj. dla wyładowań: powierzchniowych, w szczelinie gazowej między elektrodą metalową a powierzchnią dielektryku stałego i we wtrącinie gazowej przylegającej do elektrody metalowej. Przy napięciu przemiennym, przy biegunowości dodatniej, tzn. gdy na elektrodzie metalowej potencjał jest wyższy niż na powierzchni dielektryku stałego, liczba wyładowań na jednostkę czasu jest mniejsza, a ładunek pozorny poszczególnych wyładowań większy niż przy biegunowości przeciwnej.

Porównując wyładowania we wtrącinach o tych samych wymiarach usytuowanych przy elektrodzie metalowej i wewnątrz dielektryku okazuje się, że

Dr inż. W. Sitek, Instytut Transformatorów, Maszyn i Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej.

w tym pierwszym przypadku amplitudy mierzonych impulsów są znacznie większe i bardziej stabilne.

Powodem przeprowadzenia opisywanych tu badań jest potwierdzenie powyższych własności, a także stwierdzenie, jak wpływa usytuowanie wtrąciny na czas do przebicia dielektryku.

2. Warunki badań

Pomiar przeprowadzono na modelu dielektryku z wtrąciną gazową. Model ten składał się z dwóch warstw folii polietylenowoteraftalonowej, każda o grubości 36 μm i jednej warstwy o grubości 80 μm , w której wycięto otwór o średnicy 10 mm. Warstwę z otworem umieszczano albo przy elektrodzie wysokonapięciowej, albo między dwoma nie perforowanymi warstwami dielektryku. Tak przygotowaną próbkę umieszczano w płaskim układzie elektrod. Badania prowadzono na jedenastu takich układach elektrod. Jeden wykorzystano do pomiarów intensywności, a dziesięć, połączonych równolegle, używano do pomiaru czasu do przebicia. Dokładne opisy omawianych układów przedstawiono w pracy [23].

Pomiary intensywności wyładowań niezupełnych prowadzono przy napięciu 1,2 ; 1,8 i 2,4 kV za pomocą analizy amplitudowej, zdejmując tzw. krzywe dyskryminacji. Krzywe te zdejmowano oddzielnie dla wyładowań ujemnych i dodatnich.

Pomiary "krzywych życia" przeprowadzono przy napięciu 2,4 ; 3,0 ; 3,6 ; 4,2 ; 4,8 i 5,4 - z tym, że pomiar przy napięciu 5,4 kV nie był możliwy w układzie z wtrąciną przylegającą do elektrody metalowej, bo w ciągu 2 minut nastąpiło przebicie większości próbek. Pomiary wykonano w atmosferze powietrza w temperaturze 20 - 22°C i wilgotności względnej 45 - 55%.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Pomiar intensywności

W przeprowadzonych pomiarach stwierdzono, że gdy wtrącina przylega do elektrody metalowej, wówczas przy dodatniej biegunowości napięcia na elekt. nie obserwuje się mniej wyładowań, ale za to o większym ładunku pozornym, niż to miało miejsce w przypadku biegunowości przeciwnej. Gdy wtrącina znajduje się w środku międzydwoma warstwami dielektryku stałe-

go, wpływ biegunowości nie występuje. O wpływie biegunowości napięcia na intensywność wyładowań wspomina się dość często [9], [16], traktując to zjawisko jako stałe w czasie. Spowodowane jest to tym, że przeprowadzono przy napięciu przemiennym badania wzn w funkcji czasu wykonano w krótkim czasie /około 20 minut/ [18] oraz tylko przy jednej biegunowości napięcia [12]. Dopiero długotrwałe badania wzn obu biegunowości, prowadzone przy różnych wilgotnościach względnych powietrza [15], wykazały, że opisana wcześniej zależność intensywności wzn od biegunowości napięcia zasilającego może ulegać zmianie w miarę upływu czasu działania wyładowań. Może wystąpić zjawisko zmniejszania się amplitudy wyładowań dodatnich i wzrost ich liczby oraz wzrost ładunku pozornego wyładowań ujemnych i zmniejszenie się ich liczby. Po odpowiednio długim czasie działania wzn, szczególnie przy małej wilgotności względnej powietrza, może nastąpić odwrotna niż opisana w literaturze [10] zależność intensywności wzn od biegunowości przyłożonego napięcia.

W prowadzonych badaniach stwierdzono również, że gdy wtrącina przylega do elektrody metalowej, rejestruje się większe wartości maksymalnego ładunku pozornego niż przy innej lokalizacji wtrąciny.

W trakcie długotrwałych badań zmian intensywności wyładowań w czasie stwierdzono znaczne zmiany tej intensywności. Maksymalny ładunek pozorny znacznie maleje w miarę upływu czasu działania wzn, szczególnie szybko, gdy wtrącina jest umieszczona między dwoma warstwami dielektryku. Zmiany te są również szybsze przy wyższej wilgotności względnej powietrza [14].

W prowadzonych badaniach obserwowano, że już po 12 godzinach działania wyładowań ich ładunek zmniejszył się poniżej 5 pC /próg czułości układu/, gdy wtrącina była między dwoma warstwami dielektryku. Przy wtrącinie w pobliżu elektrody jeszcze po 48 godzinach wyładowania znacznie przekraczały 5 pC.

W przypadku obu położań wtrąciny, podobnie jak w badaniach Megaheda [12] oraz przy wyładowaniach w otwartej szczelinie gazowej [15] najpierw zanikają wyładowania o największych ładunkach pozornych.

3.2. Pomiar czasu życia

Z pomiarów uzyskano po 10 czasów do przebiccia dla każdej wartości napięcia. Wyniki te opracowano statystycznie zakładając, że rozkład

czasów życia dielektryków jest zgodny z rozkładem Weibulla. Po wyznaczeniu dystrybuant wyznaczono mediany czasów do przebicia i podobnie jak w pracy [4] wyznaczono "krzywe życia" w postaci $Me(t) = B_1 t^{-n}$.

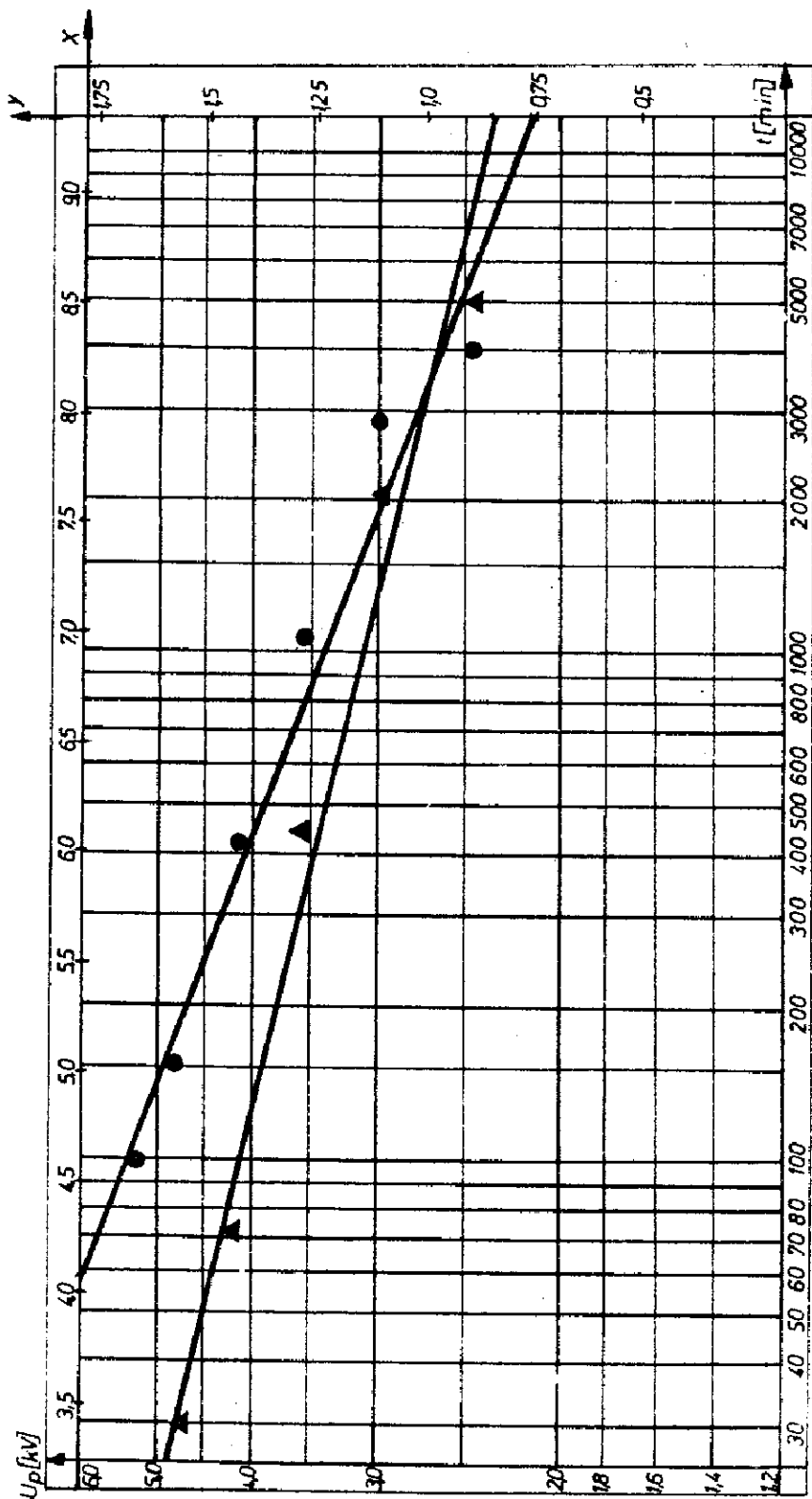
We współrzędnych logarytmicznych dla stosowanego zakresu napięć jest to zależność liniowa /rys. 1/. Z rysunku tego wynika wyraźnie, że dla stosowanego przedziału napięć czas życia układu z wtrąciną przylegającą do elektrody metalowej jest znacznie krótszy niż układu z wtrąciną w głębi dielektryku.

4. Omówienie wyników pomiarów

Wpływ biegunowości napięcia zasilającego na intensywność wyładowań również i przy napięciu przemiennym można wyjaśnić w oparciu o interpretację podaną w [16] dla napięcia udarowego. Wpływ biegunowości jest charakterystyczny dla wszystkich wyładowań między elektrodą a powierzchnią dielektryku - niezależnie od tego, czy jest to wyładowanie powierzchniowe czy wewnętrzne [15]. Również w przypadku wyładowań we wtrącinie, na dnie wtrąciny rozwija się wyładowanie powierzchniowe, które w sposób istotny wpływa na amplitudę mierzonych impulsów wzn [15 - 17]. W przypadku wyładowań przy napięciu przemiennym występuje znaczna liczba wyładowań i powstałe w ich trakcie figury Lichtenberga wzajemnie na siebie zachodzą i tracą charakterystyczną dla pojedynczego wyładowania symetrię, ale zachowują tę własność, że figura dodatnia jest większa od ujemnej [15]. Tak więc zaraz po przyłożeniu napięcia przemiennego w dodatniej połowie sinusoidy obserwuje się większe wyładowania, ale o mniejszej częstotliwości występowania niż przy przeciwnej biegunowości. Przy długotrwałych badaniach z dużą liczbą wyładowań na jednostkę czasu, może po pewnym czasie wystąpić odwrotna zależność od biegunowości napięcia, tzn. przy biegunowości ujemnej mogą występować większe wyładowania o mniejszej częstotliwości powtarzania.

Jak wynika z badań Thomasa [19] nad figurami Lichtenberga, kolejne wyładowania nie w pełni równoważą ładunek powierzchniowy powstały po wyładowaniu przeciwnej biegunowości.

Zgodnie z badaniami radzieckimi [7] po wyładowaniach dodatnich na powierzchni dielektryku pozostaje tylko ładunek dodatni, a po wyładowaniach ujemnych ładunek powierzchniowy obu znaków. Fakt ten można wyjaśnić



● $B_1 = 52 \cdot 10^5$, $n_1 = 51$ - układ z wtrąciną wewnątrz dielektryku
 ▲ $B_2 = 85 \cdot 10^5$, $n_2 = 80$ - układ z wtrąciną przy elektrodzie metalowej

Fig. 1. Krzywe łyca.

w oparciu o interpretację rozwoju wyładowań powierzchniowych podaną przez von Hippa [11]. W dodatniej figurze Lichtenberga elektrony poruszają się do środka figury w kierunku rosnącego pola i szybko są przechwytywane przez dodatnią elektrodę. W figurze ujemnej elektrony poruszają się od elektrody ujemnej w kierunku brzoju figury. Elektrony pozostawiają za sobą ładunek dodatni, który nie jest w pełni neutralizowany przez ujemną elektrodę. Otrzymuje się dwa pierścienie ładunku powierzchniowego: wewnętrzny ładunku dodatniego i zewnętrzny ujemnego. Może więc przy dużej liczbie wyładowań po odpowiednio długim czasie wystąpić na powierzchni dielektryku nadmiar ładunku dodatniego. Przy mniejszej wilgotności względnej, gdy rezystancja powierzchniowa jest znaczna, ładunek ten może pozostawać w lokalnych skupieniach o różnej gęstości. Stan taki może wspomagać rozwój wyładowań ujemnych, przez co obszar objęty przez te wyładowania może być większy, a zatem i większy będzie ich ładunek pozorny.

Fakt, że ładunek pozorny wyładowań jest większy, gdy wtrącina przylega do elektrody metalowej, stwierdzono między innymi w pracach [6, 12, 18, 22].

W pracy [6] poświęconej czynnikom sprzyjającym pełnemu rozładowaniu pojemności wtrąciny, tj. powstawaniu teoretycznie największych wyładowań, jako jeden z czynników wpływających na powstawanie dużych wyładowań wymienia się położenie wtrąciny przy elektrodzie metalowej. Wśród wymienionych w pracy [6] czynników sprzyjających powstawaniu największych wyładowań, wątpliwości budzi rola atmosfery we wtrącinie. Szczególnie dotyczy to wpływu wilgotności i gazowych produktów rozkładu dielektryku.

Pogląd, że w przypadku wyładowań we wtrącinach wpływ wilgotności może być inny niż przy wyładowaniach w otwartej szczelinie gazowej [14, 15] i wyładowaniach powierzchniowych [5] wydaje się być problematyczny. Wiadomo bowiem, że wzrost wilgotności względnej powoduje wzrost przewodności powierzchniowej, co zawsze prowadzi do zmniejszenia ładunku pozornego mierzonych wyładowań. Ma to szczególne znaczenie dla wyładowań we wtrącinie, gdzie wzrost przewodności zarówno ścianek równoległych [15] i prostopadłych [8] do linii pola elektrycznego powoduje liniowe zmniejszenie się maksymalnego ładunku pozornego.

Również pogląd, że wpływ na występowanie dużych wartości ładunku pozornego mają gazowe produkty rozkładu dielektryków pod wpływem wzniesienia

wydaże się być w pełni uzasadniony. Fakt, że wyładowania o dużych wartościach ładunku występują w szczelnych wtrącinach, nie musi świadczyć o wpływie gazowych produktów rozkładu. Są natomiast pewne przesłanki, by sądzić, że zjawisko nie jest związane z gazowymi produktami rozkładu dielektryków. Duże wyładowania występują bowiem w tych wtrącinach natychmiast po przyłożeniu napięcia, a więc w chwili, gdy nie ma gazowych produktów rozkładu [22]. W miarę upływu czasu działania wyładowań, ich ładunek pozorny maleje - i to maleje szybciej niż w takich samych wtrącinach nieszczelnych [22]. Uważa się też powszechnie, że samowygaszanie się wyładowań występuje szczególnie wyraźnie w szczelnych wtrącinach; jako jeden ze środków zaradczych stosuje się wentylowanie wtrącin. Ponadto podstawowym gazem, który wydziela się podczas wyładowań, jest wodór, a - jak wynika z porównań krzywych Paschena - napięcie przeskoku w wodorze jest znacznie mniejsze niż w innych gazach [3, 20]. Zgodnie z wzorami podanymi w pracy [6] powinno to sprzyjać rejestracji mniejszych wyładowań, a nie większych.

Stwierdzona w niniejszej pracy większa skłonność do samowygaszania wyładowań, gdy wtrącina jest między dwoma warstwami dielektryku syntetycznego, potwierdza hipotezę podaną w pracy [18], że powodem zmniejszania się ładunku pozornego jest wzrost przewodności ścianek bocznych, wywołany między innymi osiadaniami na nich ładunków powierzchniowych. Usytuowanie wtrąciny przy elektrodzie lub przedmuchiwanie wtrąciny powoduje zwiększenie rezystywności powierzchniowej ścianek i wzrost ładunku pozornego.

Usytuowanie wtrąciny przy elektrodzie powoduje nie tylko wyższą intensywność i stabilność wyładowań, ale i krótszy czas przebicia izolacji. Fakt ten zdaje się sugerować, że istnieje pewien związek między czasem życia a intensywnością wyładowań w szczególności dla napięć badanych w niniejszej pracy, tj. wywołujących znaczną intensywność wyładowań i przebicie w stosunkowo krótkim czasie, do 220 godzin.

Literatura

1. Baker H.R., Bolster R.N. : Moisture displacement and the prevention of surface electrical leakage. IEEE Trans. vol. EJ-11, nr 3, 1976.

2. Dakin T.W., Berg D. : Theory of gas breakdown. Progress in dielectrics. Vol. 4, London 1962, Heywood.
3. Dakin T.W., i inni : Breakdown of gases in uniform fields. Paschen curves for nitrogen, air and sulfurhexafluoride. "Electra" nr 32, 1974.
4. Dobroszewski R. : Próba ustalenia nowej metody przyspieszonego badania odporności folii elektroizolacyjnych na wyładowania niezupełne. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1970.
5. Fujjoka N., Tsunoda Y. : Effect of humidity on the degradation of insulating materials exposed to partial discharge. IHV Symposium, Zurich 1975.
6. Goliński J. : Całkowite rozkładowanie wtrąciny przez wyładowanie niezupełne. III Symp. "Problemy wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych". AGH, Zakopane 1979.
7. Iwanow A.W., Łarionow W.Ł. : Raspriedielenije zariada w zonie jonizacji pri powierchnostnom razriadie. "Elektricitestwo" nr 3, 1970.
8. Karkkainen S. : Multichannel pulse analyser in partial discharge studies. Measuring methods and results of studies. IHV Symposium. Zurich 1975.
9. Mason J.H. : Dielectric breakdown in solid insulation. Chapter 1 in "Progress in dielectrics". Vol.1, London, Heywood, 1959.
10. Mason J.H. : Discharges. IEEE Trans. Vol. EI-13, nr 4, 1978.
11. Merrill F.H., Hippel A. : The atomophysical interpretation of Lichtenberg figures and their application to the study of gas discharge phenomena. Jour.Appl.Phys. 10, 1939.
12. Megahed I.Y. : The discharge - repetition rate in cavities in epoxy resin, polyetylene and mica under alternating voltage conditions. IEEE Trans. Vol. EI-10, nr 2, 1975.
13. Rogers B.C. : The self-extinction of gaseous discharges in cavities in dielectrics. Proc. IEE, 1958, cz. II.
14. Sitek W. : Badanie stabilności wyładowań niezupełnych w układzie metal - powietrze - dielektryk. III Sympozjum "Problemy wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych". AGH. Zakopane 1979.
15. Sitek W. : Weryfikacja schematu zastępczego dielektryka z otwartą kawerną gazową. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka. Łódź 1980.
16. Szczepański Z. : Wpływ biegunowości napięcia udarowego na intensywność jonizacji w układzie uwarstwionym dielektrykiem stałym i gazowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 22, 1967.
17. Szczepański Z. : W sprawie badań odporności dielektryków na degradację wywołaną wyładowaniami niezupełnymi. Archiwum Elektrotechniki, z. 1, 1970.
18. Tanaka T., Ikeda Y. : Internal discharges in polyetylene with an artificial cavity. IEEE Trans. Vol. PAS - 90, nr 6, 1974.
19. Thomas A.M. : Heat developed and "power" Lichtenberg figures and the ionization of dielectric surfaces produced by electrical discharges. B.Jour. of App.Phys. nr 2, 1951.

20. Winkelkenyer H. i inni : Breakdown of gases in uniform electric fields. Paschen curves for hydrogen, carbon dioxide and helium. "Electra" nr 52, 1977.
21. Wyderka S. : Wpływ układu modelowego na intensywność wyładowań niezuppełnych. III Sympozjum "Problemy wyładowań niezuppełnych w układach elektroizolacyjnych". AGH. Zakopane 1979.
22. Wyderka S. : Ocena intensywności wyładowań niezuppełnych za pomocą ładunku pozornego. Rozprawa doktorska, 1981, Instytut Elektrotechniki. Warszawa.
23. Zybert R., Stańczyk J., Sitek W. : Układy pomiarowe do badania zjawiska oddziaływania wyładowań niezuppełnych na materiały izolacyjne. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej "Elektryka", z. 63, 1978.