

7. MECHANIZM PRZEBICIA DIELEKTRYKÓW STAŁYCH

7.1 WPROWADZENIE

Przebiecie dielektryka stałego wiąże się z jego nieodwracalnym uszkodzeniem. Zjawiska związane z przebicciem dielektryków stałych mają bardzo złożony charakter ze względu na bardzo dużą różnorodność ich składu chemicznego, struktury, dodatków i zanieczyszczeń jak również technologii wytwarzania. Zatem technicznych dielektryków stałych nie można uważać za ciała o ściśle zdefiniowanej strukturze wewnętrznej.

Stąd również wynikają dwie definicje wytrzymałości elektrycznej dielektryków stałych:

1. Wytrzymałość **swoista** (istotna), którą przewiduje się dla idealnego dielektryka bez jakichkolwiek domieszek i zanieczyszczeń, wówczas gdy zachodzi czysto elektryczny proces lawinowego rozwoju wyładowania elektrycznego. Wytrzymałość tego typu udaje się czasem osiągnąć, w specyficznych warunkach laboratoryjnych, dla niewielkich próbek, uzyskanego specjalnymi metodami materiału.
2. Wytrzymałość **praktyczna**, wielokrotnie niższa od swoistej, dla dielektryków o technicznym stopniu czystości. Dla dielektryków rzeczywistych czysto elektryczny mechanizm przebiccia jest zakłócany dodatkowymi zjawiskami, które zwykle decydują o rzeczywistej wytrzymałości elektrycznej.

Przykładowo, dla szkła wytrzymałość swoista zawiera się w przedziale $2\div 6$ MV/cm, gdy praktycznie osiąga się najwyżej $0.25\div 0.45$ MV/cm.

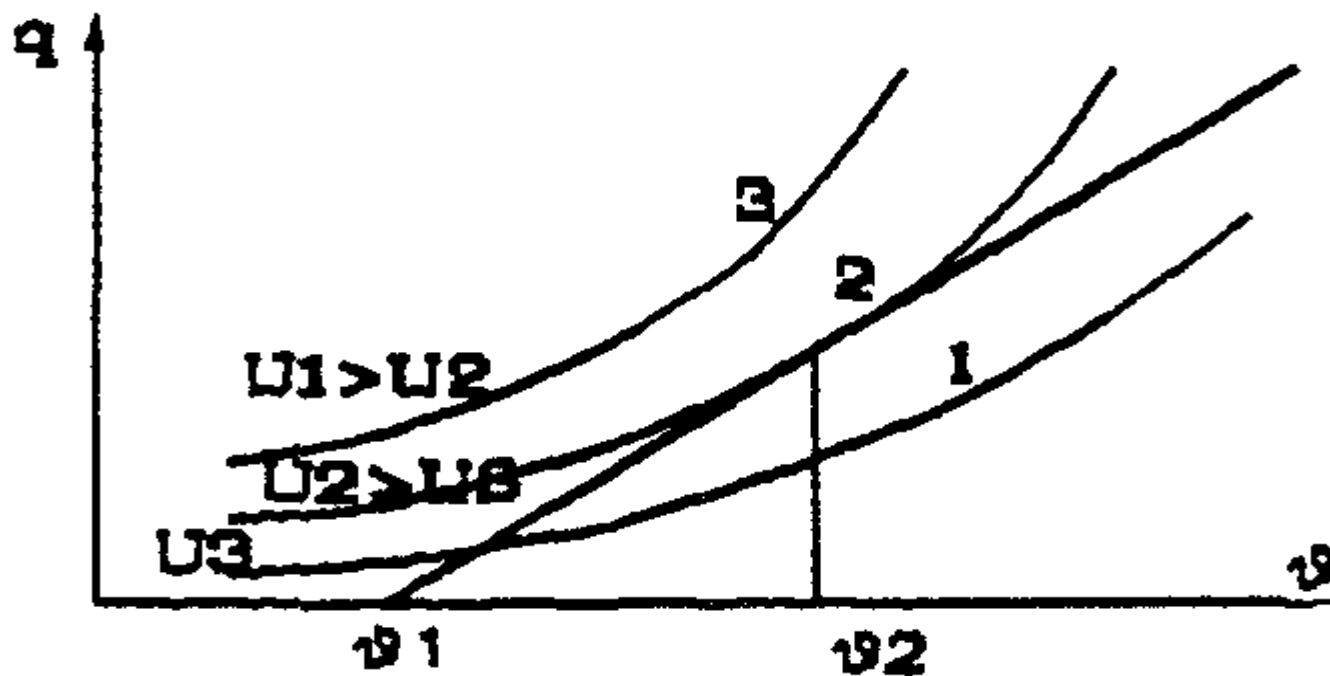
Czysto elektryczny mechanizm przebicia dielektryków stałych, odgrywający pewną rolę przy napięciach udarowych o czasach trwania napięcia rzędu mikrosekund, oparty o ruch swobodnych elektronów, ich mnożenie się i oddziaływanie z cząstkami materii daje się opisać tylko dla czystych dielektryków, o prostszych strukturach krystalicznych. Zatem istniejące teorie przebicia elektrycznego są nieprzydatne praktycznie.

W przypadkach praktycznych decydującą rolę odgrywają inne zjawiska noszące nazwy:

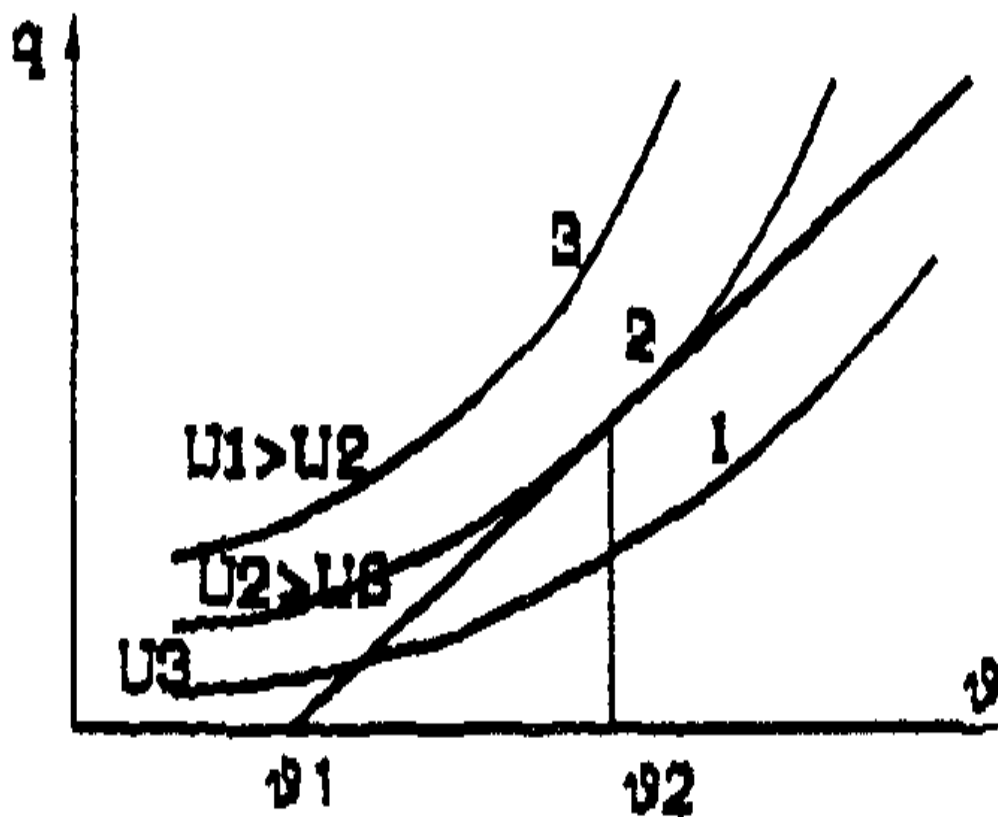
- mechanizmu cieplnego;
- mechanizmu wyładowań niezupełnych;
- mechanizmu zanieczyszczeniowego;
- mechanizmu starzeniowego.

7.2. MECHANIZM CIEPLNY

Mechanizm cieplny oparty jest o porównanie ilości ciepła wytworzonego w dielektryku wskutek strat dielektrycznych i ciepła odprowadzanego do otoczenia (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Zależność ciepła wytwarzanego w dielektryku (1, 2, 3 przy różnych wartościach napięcia) i ciepła oddawanego na zewnątrz od temperatury



Rys. 7.1. Zależność ciepła wytwarzanego w dielektryku (1, 2, 3 przy różnych wartościach napięcia) i ciepła oddawanego na zewnątrz od temperatury

W punkcie ϑ_2 przy napięciu U_2 , ilość ciepła oddawanego do otoczenia jest mniejsza niż ilość ciepła wytwarzanego wskutek strat dielektrycznych. Będzie więc następował nieograniczony wzrost ciepła i musi dojść do przebicia. W punkcie ϑ_1 jest równowaga termiczna, ilość ciepła wytwarzanego jest równa ilości ciepła oddawanego do otoczenia. Jednocześnie w punkcie ϑ_1 jest zachowany pewien margines bezpieczeństwa. Jeśli w układzie wystąpi chwilowy wzrost napięcia do np. wartości U_2 i temperatura wzrośnie do np. wartości ϑ_2 to po zaniku przepięcia U_2 i po powrocie do stanu pracy przy napięciu U_3 wystąpi nadmiar ciepła oddawanego do otoczenia i powrót do temperatury stanu równowagi ϑ_1 . Oczywiście, długi czas trwania przepięcia U_2 lub nadmierne przepięcie U_1 mogą doprowadzić do stanu nierównowagi cieplnej i w konsekwencji do przebicia.

W oparciu o powyższą zasadę są wyprowadzane wzory pozwalające ocenić napięcie przebicia cieplnego w zależności od geometrii układu izolacyjnego np. dla układu typu przepustowego, płaskiego, walcowego uwarstwionego itp. Przykładowo dla układu walców współosiowych z dielektrykiem jednorodnym (układ przepustowy) napięcie przebicia jest wyrażone wzorem

$$U_p = 1.6 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{p_t \cdot \alpha}} \quad (7.1)$$

gdzie: λ - przewodność cieplna [W/(Km)]; p_t - straty jednostkowe, dla jednostki natężenia pola elektrycznego, przy temperaturze odniesienia (normalnej) i przy danej częstotliwości [W/(V²·m)]; α - temperaturowy współczynnik strat dielektrycznych [1/K].

Wzór ten uwzględnia zarówno odprowadzanie ciepła w kierunku promieniowym jak i w kierunku osiowym. Przy braku odprowadzania ciepła w kierunku osiowym współczynnik liczbowy maleje do wartości 1.42.

Odpowiedni dopuszczalny przyrost temperatury na powierzchni dielektryka określa się z wzoru:

$$\Delta \vartheta = \frac{y}{\alpha} \tag{7.2}$$

gdzie współczynniki **m** i **y** zależą od ilorazu promieni *r₁/r₂* odpowiednio dla wewnętrznego i zewnętrznego walca i są podane w tabeli 18.

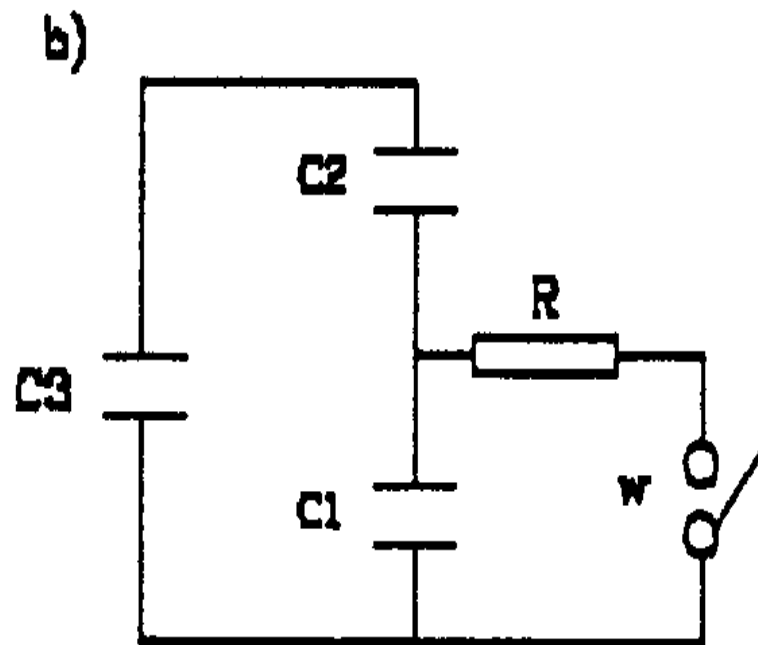
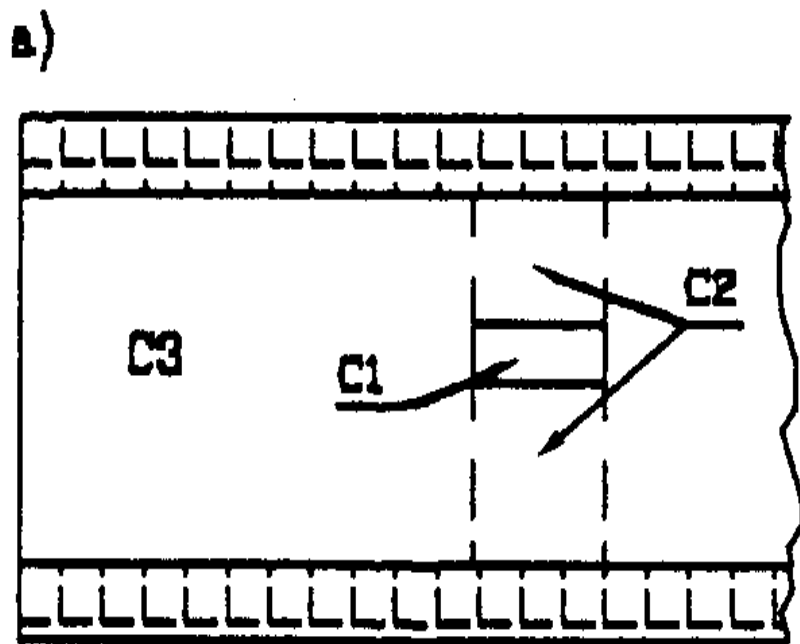
T a b e l a 18
 Współczynniki do wzorów (7.1) i (7.2).

r ₁ /r ₂	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
m	1	0.92	0.86	0.82	0.79	0.75	0.73
y	1.39	1.35	1.32	1.29	1.26	1.24	1.23

7.3. MECHANIZM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

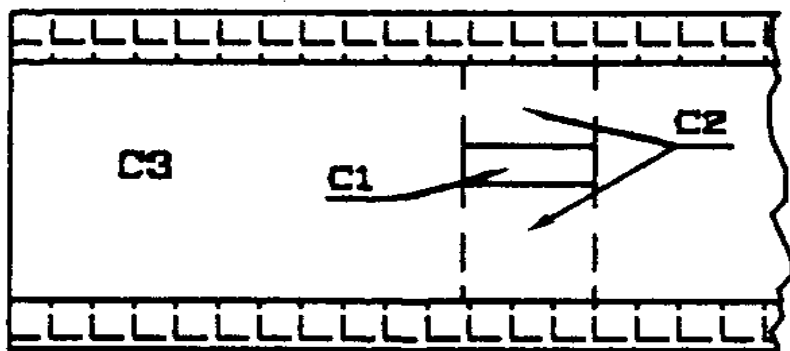
Jeśli we wnętrzu dielektryka stałego znajduje się wtrącina (kawerna) gazowa to wskutek panujących w tej kawernie natężeń pola elektrycznego wyższych niż w otaczającym ją materiale stałym oraz z powodu mniejszej wytrzymałości elektrycznej gazu (powietrza) w miarę wzrostu napięcia wyładowania elektryczne muszą rozpocząć się w kawernie gazowej.

Niech wtrącina gazowa ma wyidealizowany kształt jak na rysunku 7.2a, gdzie grubość wtrąciny d_1 jest znacznie mniejsza niż całkowita grubość dielektryka stałego d .

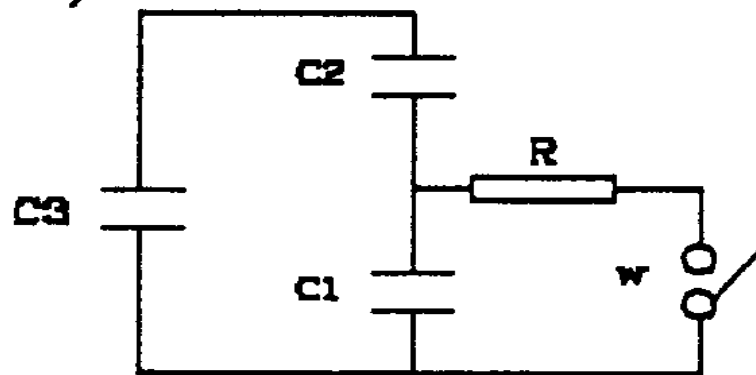


Rys. 7.2. Dielektryk z wtrąciną gazową: a) przekrój, b) schemat zastępczy

a)



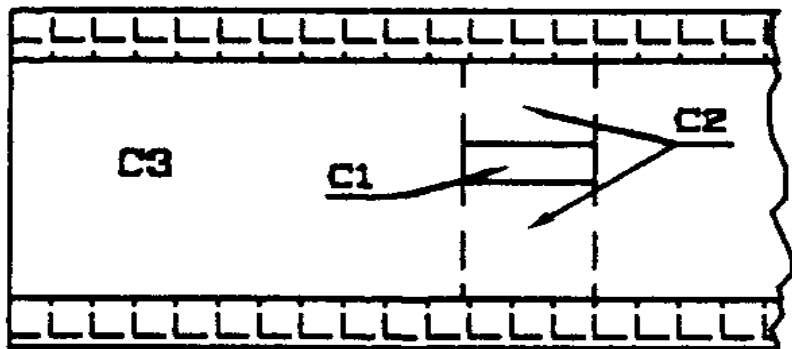
b)



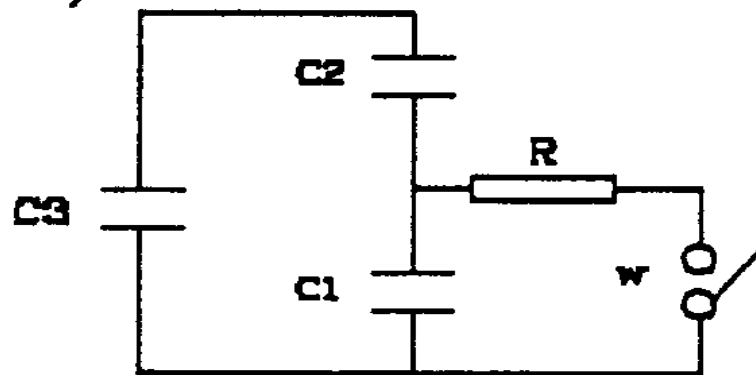
Rys. 7.2. Dielektryk z wtrąciną gazową: a) przekrój, b) schemat zastępczy

Schemat zastępczy takiego układu izolacyjnego przedstawia rysunek 7.2b. Występują tu trzy pojemności: C_1 odwzorowująca pojemność wtrąciny gazowej; C_2 jako pojemność pasa szeregowego z wtrąciną oraz C_3 - pojemność pozostałej objętości dielektryka. Wskutek różnicy przenikalności elektrycznej gazu i izolatora stałego, we wtrącinie panuje natężenie pola wyższe niż w pozostałej, połączonej w szereg z wtrąciną, objętości dielektryka. Jeśli natężenie pola jest większe od wytrzymałości elektrycznej gazu to we wtrącinie wystąpi zapłon wyładowań niezupełnych.

a)



b)



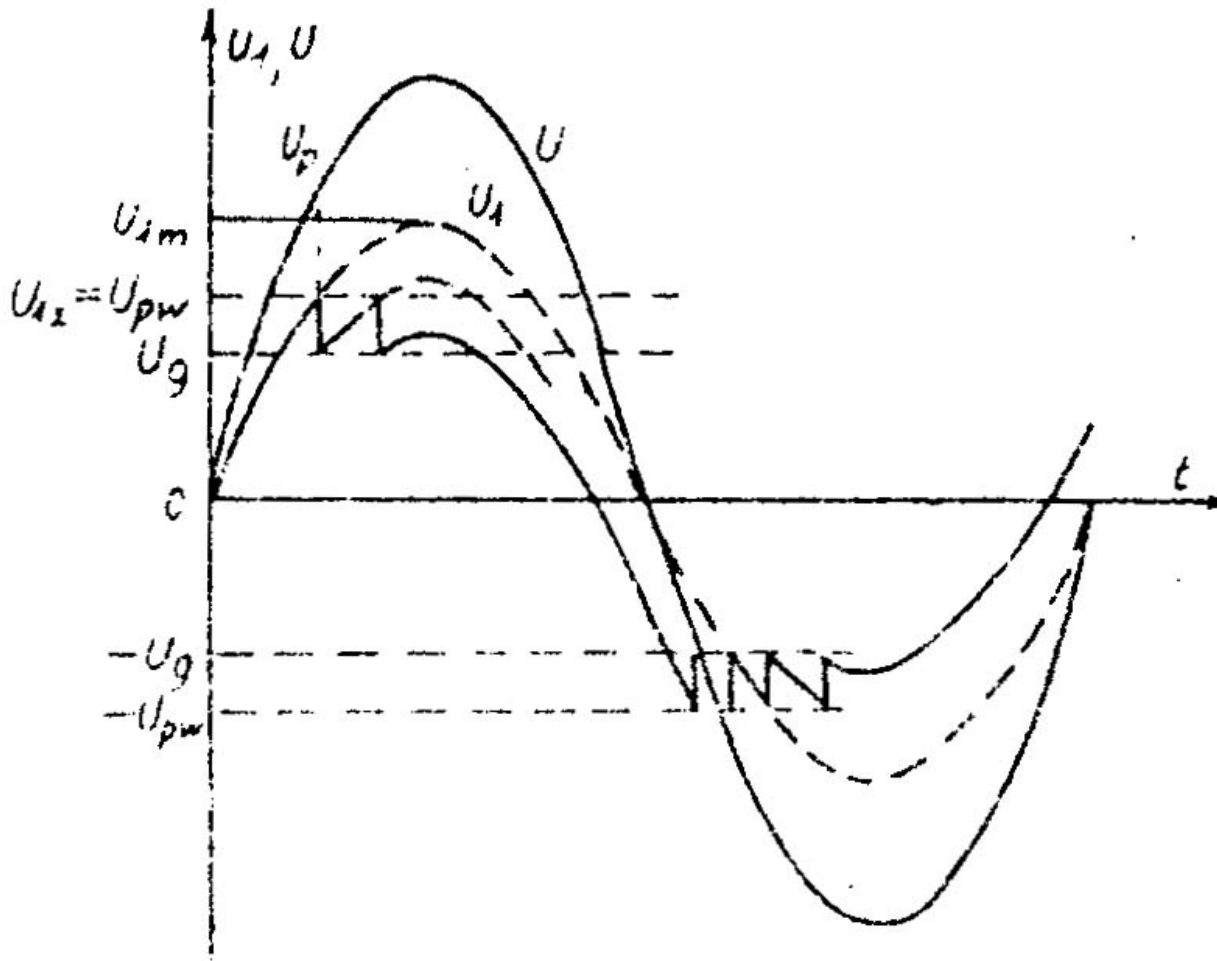
Rys. 7.2. Dielektryk z wtrąciną gazową: a) przekrój, b) schemat zastępczy

Istnieje pogląd, że napięcie progowe wyładowań samoistnych we wtrącinie spełnia prawo Paschena (patrz rozdz. 5.2.4). Dla wtrąciny prostokątnej jak na rysunku 7.2a napięcie początkowe wyładowań niezupełnych określa wzór:

$$U_z = K_g \cdot d_1 \cdot \left(1 + \frac{\frac{d}{d_1} - 1}{\varepsilon'} \right) \quad (7.3)$$

gdzie: K_g - natężenie pola elektrycznego, przy którym zachodzi przeskok w warstwie gazu o grubości d_1 ; ε' - przenikalność elektryczna względna dielektryka stałego.

Jak widać im przenikalność dielektryka stałego jest większa tym U_z jest mniejsze. Po zapłonie wyładowania napięcie U_1 a wtrącinie gazowej maleje aż do wartości, przy której wyładowanie gaśnie (rys. 7.3). Napięcie to, oznaczone na rysunku 7.3 jako U_g nosi nazwę napięcia gaśnięcia i jest o 30÷40% niższe niż napięcie zapłonu. Następnie cały cykl powtarza się.



Rys. 7.3. Zmiany napięcia na wtrącinie gazowej podczas zachodzących w niej wyładowań

Wyładowania niezupełne zachodzące w dłuższym okresie czasu mogą doprowadzić do przebicia dielektryka stałego wskutek:

- a) stopniowej erozji dielektryka pod wpływem bombardowania jonami i elektronami ścianek wtrąciny;
- b) chemicznego oddziaływania gazów wytwarzanych podczas wyładowania - proces ten zachodzi szczególnie intensywnie przy obecności wilgoci;
- c) tworzenia się kanałów przewodzących;
- d) ogrzewania dielektryka wskutek wzrostu strat wywołanych wyładowaniami niezupełnymi.

7.4. MECHANIZM ZANIECZYSZCZENIOWY

W dielektrykach stałych mogą pojawiać się obce ciała stałe np. wtrąciny węglowe, metaliczne czy wtrąciny innych dielektryków. Są to zwykle skutki niedoskonałości technologii wytwarzania dielektryków. Zanieczyszczenia te mogą być źródłem wyładowań niezupełnych, które erozyjnie, w długim okresie czasu doprowadzą do przebicia.

Jest to szczególnie istotne w przypadku żywic epoksydowych, które uzyskują wysoką jakość jako izolatory tylko wówczas, gdy są odlewane w sterylnych warunkach, najlepiej w wysokiej próżni. Nawet wtrąciny dielektryczne o przenikalności różnej od przenikalności środowiska mogą stanowić początek erozji.

7.5. MECHANIZM STARZENIOWY

W dielektrykach organicznych, głównie pod wpływem temperatury, zachodzą nieodwracalne zmiany chemiczne prowadzące do zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej a w konsekwencji, przy odpowiednio wysokiej wartości napięcia, do przebicia.

Przykładowo, w przypadku izolacji celulozowej wskutek procesów cieplnych (długotrwałych) zachodzi proces depolimeryzacji (zmniejszania się łańcuchów celulozy), co samo w sobie powoduje jedynie zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej a w małym stopniu elektrycznej. Jednakże kruchy papier, przy jakichkolwiek większych naprężeniach mechanicznych - pęka, co w konsekwencji prowadzi do przebicia elektrycznego.

Dla izolacji papierowej, w zakresie temperatur 100÷130 °C, obowiązuje prawo Mountsingera, zgodnie z którym, w uproszczeniu, wzrost temperatury o 8 °C skraca czas życia izolacji o połowę. W oparciu o tę zasadę formułuje się przepisy odnośnie izolacji urządzeń i maszyn elektrycznych, ustalając optymalny czas życia izolacji na 15 do 20 lat.