

ROZDZIAŁ IV.

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W GAZACH.

Do wyładowań niezupełnych, t.j. takich, przy których nie dochodzi do przewodzącego połączenia elektrod iskrą lub łukiem świetlnym, należą:

a/ wyładowania świetlące i snojące w układach powietrznych /jednorodnych/ ;

b/ wyładowania ślizgowe w układach izolacyjnych o dielektryku złożonym z powietrza i materiału stałego.

Obu tym rodzajom wyładowań towarzyszy powstawanie ładunków przestrzennych w polu elektrycznym, które wpływają w dużym stopniu na zjawiska tam zachodzące. Jaką formę przybierze wyładowanie, zależy to od rozkładu pola oraz od źródła napięcia, które ma tu większy wpływ, niż przy wyładowaniach w polu elektrostatycznym.

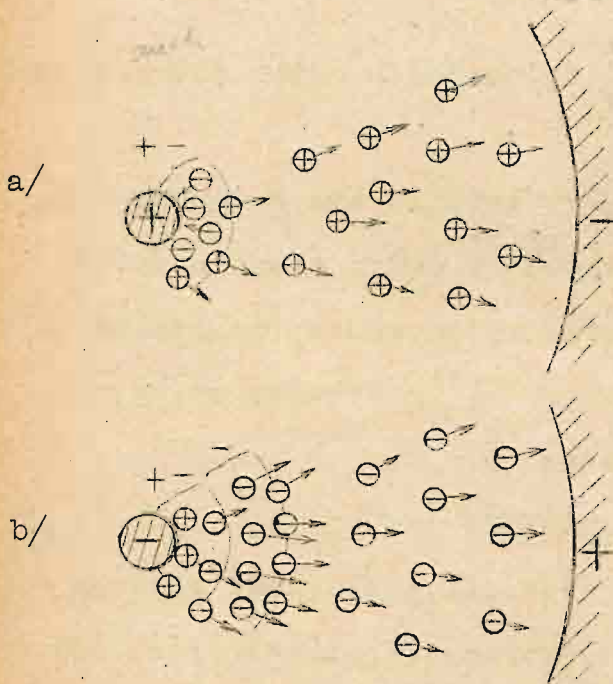
1. POWSTAWANIE ŁADUNKÓW PRZESTRZENNYCH.

Skutkiem jonizacji, jak mówiliśmy w Rozdz. III, sząsteczki zostają rozbite na jony dodatnie oraz ujemne i elektrony. Ponieważ elektrony mają większą prędkość własną /ruchliwość/, niż jony dodatnie, prędzej usuwają się ze strefy jonizacyjnej, tak, że w tej strefie i w jej sąsiedztwie przeważa ładunek dodatni związany z anjonami. Skutkiem tego elektrostatyczny rozkład pola, uwarunkowany ładunkami na elektrodach, zmienia się i następuje odkształcenie pola. Jest więc ono spowodowane naogół dodatnimi ładunkami przestrzennymi. W polu jednostajnym, jakie występuje np. między okładzinami iskiernika płytowego, do których przyłożono napięcie stałe, ładunki przestrzenne dodatnie nie usuwają się tak prędko z przed katody, jak ujemno, przeto następuje tam zwiększenie naprężenia, a natomiast przy anodzie naprężenie się zmniejsza /por. Rys 44c/.

Zjawiska te występują szczególnie jaskrawo w polu niejednostajnym, np. w układzie ostrze-płyta, lub walce spółśrodkowe o dużej różnicy średnic. Nie są one jednak dostatecznie zbadane dla różnych warunków pracy; przy napięciu stałym są one łatwiej dostępne, niż przy zmiennym, lub przy falach uskokowych. Rozpatrzmy te zjawiska na przykładzie

iskiernika walcowego, przy prądzie stałym.

Rys. 59. przedstawia wycinek pola iskiernika walcowego dla przypadku, kiedy promień zewnętrzny jest kilka razy /np. 10/ większy od wewnętrzne-
go. Do elektrod przyłożone jest źródło napięcia stałego. Największe
naprężenie występuje przy elektrodzie wewnętrznej, tam też następują



Rys. 59.

zjawiska jonizacji bodźczej, jeżeli
naprężenie osiągnie wartość trzydzies-
tu kilku kV/cm.

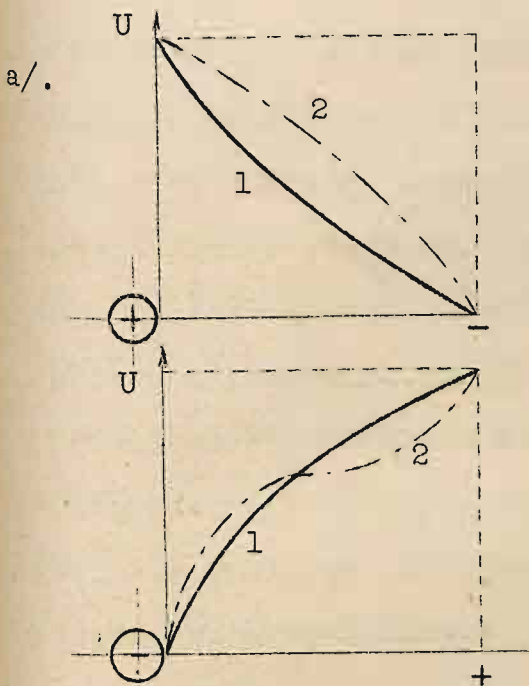
Jeżeli elektroda wewnętrzna jest
dodatnia /Rys. 59a/, to elektromy znaj-
dujące się pomiędzy elektrodami dosta-
ją się prędzej z powodu większej ruch-
liwości, niż jony dodatnie, w sferę dzia-
łań anody i wywołują tam wcześniej,
niż tamte, jonizację bodźczą. Jony do-
datnie natomiast pędzone są ku kato-
dzie; z powodu małej ich ruchliwości
pozostają one jednak w sferze joniza-

cji bodźczej, t.j. przy anodzie, dłużej w stosunku do ruchu elektronów,
które tam dążą ku anodzie. Wskutek tego przeważa przy anodzie ładunek
dodatni, przez co następuje tam zmniejszenie naprężenia, a spadek napię-
cia przy anodzie staje się mniejszy. Jony dodatnie zaś, wypełniające
resztę przestrzeni, wywołują przy katodzie większe różnice potencjałów;
spadek napięcia przy katodzie powiększa się. Rys. 60 a. przedstawia te
stosunki: krzywa 1 odpowiada przebiegowi elektrostatycznemu napięcia,
krzywa 2- zmienionemu skutkiem ładunków przestrzennych dodatnich.

Większy spadek napięcia przy katodzie przyspiesza jonizację w tej
części pola, co ułatwia przeskok iskry.

Inaczej rzecz się przedstawia, jeżeli elektroda wewnętrzna jest
ujemna /Rys. 59 b, 60 b./. Jonizacja zaczyna się przy katodzie. Jony dodat-
nie dążą do katody z bezpośredniego jej otoczenia i z powodu mniejszej

ruchliwości pozostają tam dłużej, niż elektrony, powiększają przez to spadek napięcia, a więc i naprężenie na katodzie. Skutkiem zwiększone-



Rys. 60.

go naprężenia jony dodatnie nabierają większej prędkości i powodują ze swej strony jonizację bodźczą. Powstają niejako dwie strefy jonizacyjne przy katodzie: jonów dodatnich i ujemnych bliżej, samych ujemnych dalej od katody. W reszcie przestrzeni występuje zwykły ruch elektronów, które dążą do anody i powiększają tam naprężenie. Elektrostatyczny rozkład napięcia /Rys. 60b, krzywa 1 /zmienia się przeto według krzywej 2.

Duży spadek napięcia na katodzie /drut/ odciąża resztę przestrzeni i przez to powiększa napięcie przebicia, które nastąpi, aż jonizacja wystąpi i na anodzie /walec/.

Tem tłumaczy się, że wyładowanie jest wcześniejsze, jeżeli anoda jest bardziej zakrzywiona, niż katoda. Napięcie przebicia jest wtedy niższe, niż przy silniej zakrzywionej katodzie.

Powyższe zjawiska zachodzące w układzie walcowym, występują podobnie w każdym innym układzie o ostro zakrzywionych elektrodach. W takich układach napięcie krytyczne $/U_0/$ leży znacznie poniżej napięcia przeskoku; wyładowania świetlne i snopowe poprzedzają wyładowania zupełne. Dla danego odstępów elektrod napięcie przebicia zależy znacznie więcej od zakrzywienia anody, niż katody. Napięcie początkowe jest jednak niższe, gdy katoda jest bardziej zakrzywiona, gdyż dodatnie ładunki przestrzenne wywołują tam większe naprężenia, niż gdy jest przeciwnie. Z tego samego względu napięcie przebicia w układach, w których wpada ono w napięcie krytyczne, jest niższe, gdy katoda jest bardziej zakrzywiona, niż gdy zakrzywienie anody jest większe.

Z powyższego jest również jasne, że zjawisko świetlenia występuje

przy napięciu niższem, gdy elektroda bardziej zakrzywiona jest anodą; elektrony prędzej do niej przybiegają, niż jony dodatnie do bardziej zakrzywionej, w przeciwnym przypadku, katody.

Przy prądzie zmiennym zjawiska są podobne. Jeżeli częstotliwość prądu jest mała, np. techniczna, prędkość zmiany napięcia jest w stosunku do prędkości zjawisk jonizacyjnych bardzo mała. Zjawiska poprzednio opisane odbywają się w podobny sposób z tem, że za każdą zmianą kierunku prądu zmienia się biegunowość elektrod. Chwila występowania i znikania zjawiska zależna jest od chwilowej wartości napięcia. Z powodu zmian kierunku jonów, pozostaje ich w przestrzeni międzyelektrodowej większa ilość swobodnych, niż przy prądzie stałym; jonizacja jest przeto ułatwiona. Przy większej częstotliwości mogą się zjawiska skomplikować; jony mogą być częściej zawracane przy zmianie kierunku natężenia pola, zwłaszcza powolne jony dodatnie.

Przy falach uskokowych, krótkotrwałych, jeszcze bardziej daje się odczuć wpływ małej ruchliwości jonów dodatnich. Może się zdarzyć, że elektrony same biorą udział w zjawisku. Sprawa ta nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśniona.

2. WYŁADOWANIA ŚWIETŁACE.

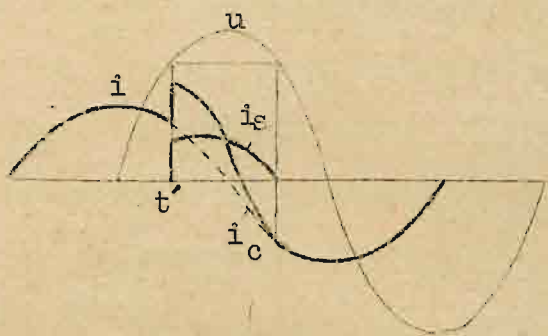
Wyładowanie świetlące występuje w takich układach, gdzie zmiana natężenia pola w pobliżu elektrody jest wielka w porównaniu ze zmianami w reszcie przestrzeni międzyelektrodowej, a samo natężenie pola przekroczy tam granicę wytrzymałości powietrza. Dzieje się to naogół w razie, jeżeli promień krzywizny elektrod jest mały w porównaniu z ich wzajemnym odstępem.

Wtedy przy pewnej wysokości napięcia nie następuje odrazu wyładowanie zupełne, lecz przybiera ono postać świecącej zjonizowanej warstwy otaczającej elektrodę; dopiero przy dalszem podnoszeniu napięcia może nastąpić przeskok iskrowy lub łukowy między elektrodami. Charakterystyka takiego wyładowania, t.j. napięcie w funkcji prądu, jest wzrastająca się, zwiększeniu się prądu odpowiada zwiększenie napięcia.

Napięcie, przy którym zjawiają się wyładowania świetlące, nazywa się napięciem świetlenia $/U_s/$, jest ono zarazem napięciem krytycznym $/U_o/$ układu. Przy dalszem podnoszeniu napięcia może nastąpić od razu /przy pewnym kształcie elektrod/ wyładowanie iskrowe czyli przebicie warstwy powietrza. Napięcie temu odpowiadające jest napięciem iskrzenia czyli napięciem przeskoku iskry.

Świetlenie, jakie zjawia się wtedy na elektrodach, ma postać zależną od biegunowości elektrod. Jeżeli elektroda jest dodatnia, świetlenie jest niebieskawe, spokojne i towarzyszy mu lekki szmer; na elektrodzie ujemnej zjawia się żółte światło, raczej czerwone, w postaci iskier, nie spokojne i silniej słyszalne. Przy prądzie zmiennym wrażenie wzrokowe nie odróżnia tego, jakkolwiek te różnice występują.

Wyładowanie świetlące połączone jest, jako zjawisko jonizacyjne, z wydatkiem prądu elektrycznego, jaki musi źródło dostarczyć. Przy prądzie zmiennym prąd ten nakłada się na prąd pojemnościowy płynący do układu i powoduje odkształcenie prądu wypadkowego. Zasadę tego odkształcenia podaje Rys. 61. W chwili rozpoczęcia jonizacji /chwila t' / następuje wyraźny skok krzywej prądu i wcześniejszy, t.j. przy napięciu niższym, gdy elektroda bardziej zakrzywiona jest dodatnia. Prąd pojemnościowy $/i_c/$ dotąd nieodkształcony, odkształca się pod wpływem zjawiającego się prądu jonowego $/i_s/$. Występują harmoniczne rzędu 3, 5, 7 i t.d.



Rys. 61.

Wpływ kształtu elektrod nie jest tu tak znaczny, jak na U_o . Napięcie przeskoku $/U_p/$, jako na następstwo wyładowań niezupełnych.

Wpływ kształtu elektrod nie jest tu tak znaczny, jak na U_o . Napięcie przeskoku dla kul o małej średnicy i dla ostrzy różnią się tylko

o parę %, a z rosnącym odstępem elektrod rosną linjowo. Średnio można liczyć wzrost U_p o 3,6 do 4 kV/cm /skut./. Peek sprawdził tę zależność do 1000 kV.

Po wsunięciu między elektrody cienkiej przegrody z metalu lub z izolatora i ułożeniu jej w płaszczyźnie ekwipotencjalnej /aby pole mało odkształcić/ następuje bardzo duży / do 100%/, zależny od częstotliwości, wzrost napięcia przeskoku /podczas gdy należałoby się spodziewać jego zmniejszenia, gdyż długość przerwy zmalała./.

Zmiana składu chemicznego powietrza w granicach naturalnych i tutaj, podobnie jak i na U_0 , nie wywiera praktycznie wpływu na wartość U_p , z wyjątkiem wilgotności powietrza. Wilgotność podnosi nieco napięcie przeskoku. Tłumaczymy to obciążeniem jonów parą wodną, przez co potrzebne jest większe napięcie dla nadania im odpowiedniej prędkości.

Charakter zależności U_p od temperatury i ciśnienia jest podobny do zależności U_0 od tych czynników, poprawki jednak, uwzględniające zmianę U_p przy zmianie b i t , są niepewne.

Przy dużej częstotliwości napięcie przeskoku jest mniejsze, niż przy 50 okr./sek. Przy falach uskokowych krótkotrwałych U_p jest natomiast naogół większe, niż przy 50 okr./sek, podobnie jak dla U_0 . Stosunek U_p przy falach uskokowych do U_p przy 50 okr./sek jest duży dla ostrzy, mały dla kul i elektrod płytowych.

Czynniki jonizujące przerwę iskrową nie mają wpływu na U_p , gdy napięcie przyłożone jest w sposób ciągły, natomiast przy falach uskokowych obniżają napięcie przeskoku /o ile jest ono większe, niż przy 50 okr./sek./

Materiał elektrod i kurz na nich osiadły wpływu na wartość U_p nie wywierają.

Moc źródła prądu ma duży wpływ. Źródło o małej mocy daje przy tym samym prądzie skrośnym mniejsze napięcie na zaciskach iskiernika. Wpływ wielkości mocy źródła prądu, czyli wielkość zmiany spadku napięcia

ze wzrastającym prądem, objawia się tem, że przy małej mocy /duże oporności wszereg z iskiernikiem, mała pojemność elektrod/ zamiast iskry możemy otrzymać obfite światlenia przy napięciu, któreby było napięciem przeskoku dla źródła napięcia o dużej mocy.

Straty. - Wyładowania świetlące stanowią, jak o tem wyżej była mowa, wydatek mocy, który musi pokryć źródło prądu. Moc stracona przy tem rośnie bardzo szybko, skoro tylko napięcie przyłożone do elektrod przekroczy krytyczną wartość. Przy prądzie zmiennym zjawisko to występuje przy każdej zmianie. W ciągu półokresu moc traci się, gdy chwilowa wartość napięcia przekroczy wartość krytyczną. Im wyższe napięcie, tem przez dłuższy czas, w ciągu tego półokresu, napięcie ma tę wartość, tem straty są większe i tem większy wydatek energii.

Zjawisko to ma szczególne znaczenie przy ulocie elektrycznym, jak występuje w przewodach elektrycznych. Będzie o tem mowa w ustępie 4.

3. WYŁADOWANIA SNOPIĄCE I ISKROWE.

Zwiększając napięcie przyłożone do elektrod ostrzowych lub kulowych o małej średnicy, przy stosunkowo dużym odstępnie elektrod, zauważymy wyładowania w postaci snopu iskier niespokojnych. Jest to w tych warunkach dalsza forma wyładowań niezupełnych, rozpoczynających się w postaci światlenia na elektrodach, zwana wyładowaniami snopiącymi; zjawisko zaś same nazywamy snopieniem. Zależnie od biegunowości elektrod wygląd ich jest inny. Wreszcie przy dalszem podnoszeniu napięcia następuje przeskok iskry.

Przebieg napięcia $/U_{sn}/$, przy którym światlenie przechodzi w snopienie, czyli napięcie snopienia, przedstawia Rys. 57. dla elektrod ostrzowych. Krzywa napięcia iskrzenia $/U_p/$, przy którym następuje przeskok iskry wychodzącej z wyładowań snopiących, jest od pewnego odstępu elektrod prostolinijna. Strefa A przedstawia obszar światlenia, strefa B - snopienia.

Wyładowania snopiące występują tylko wtedy, jeżeli tylko stosunek odstępu elektrod do ich promienia krzywizny przekroczy pewną wartość

przy odpowiednio wysokiem napięciu. Są one połączone z silnem jonizowaniem powietrza i powstawaniem dużych ładunków przestrzennych. Wobec tego te czynniki postronne, które mają duży wpływ na te zjawiska, wpływają również na wysokość napięcia tych wyładowań. Szczególny wpływ ma tu wilgotność, która utrudnia powstawanie wyładowa^a z powodu obciążenia jonów wilgocią i zmniejszenia ich ruchliwości. Pył, krople wody i t.p., powodujące "działanie ostrzy", zmniejszają znacznie /do 50%/ napięcie wyładowań. Z tem zjawiskiem trzeba się zawsze liczyć przy obliczaniu konstrukcyj izolacyjnych. Pozatem te czynniki, które mają wpływ na zjawiska wyładowań świetlanych, odbijają się podobnie na snopiących.

Napięcie iskrzenia zależy od czynników postronnych, stosownie do formy, z jakiej powstaje, a więc jeżeli jest następstwem wyładowań snopiących, zależy od warunków powstawania tych wyładowań; jeżeli zaś wyładowanie jest bezpośrednie, to czynniki te wpływają w sposób, omówiony w Rozdz. III.

Przy obliczaniu napięcia iskrzenia układów izolacyjnych miarodajne są stosunki zachodzące dla iskiernika ostrzowego. Według A. Rotha dla odstępów a ponad 8 cm i napięć ponad 40 kV, napięcie iskrzenia U_p /z wyładowań snopiastych/ wynosi w wartościach skutecznych:

$$U_p = /14 + 3,36.a/ \text{ kV} \quad \text{dla układu symetrycznego}$$

$$U_p = /14 + 3,16.a/ \text{ kV} \quad \text{" " niesymetrycznego}$$

gdzie a jest w cm.

W praktyce posługujemy się powyższymi wzorami z uwzględnieniem, że stosują się one do niekorzystnego przypadku, t.j. dla ostrzy. Można zatem liczyć się z tem, że napięcie przeskoiku, obliczone według tych wzorów, będzie za małe i zastosować prostsze wzory do obliczania odstepu części metalowych pod napięciem /skut./ ;

$$a = \frac{U - 14}{4} \text{ cm} \quad \text{przy napięciach 40 do 100 kV,}$$

$$a = \frac{U}{4} \text{ cm} \quad \text{przy napięciach wyższych.}$$

To znaczy, że każdy cm odstepu wytrzyma 4 kV napięcia w wartościach

skutecznych. Stopień pewności będzie jednak wtedy bardzo mały. Założysz stopień pewności 2, trzeby przyjąć 2 kV na każdy cm drogi przeskoku / przewidywanej/.

Przy drutach równoległych o promieniu r i odstępie a wyładowania snopiące ani świetlące nie występują, jeżeli $a:r$ jest mniejsze, niż 25+30; wtedy od razu następuje wyładowanie iskrowe.

Do wywołania zjawiska przeskoku iskry potrzebny jest pewien czas; przy wyładowaniach snopiących jest on znacznie dłuższy, niż przy bezpośrednich i świetlących. Powoduje to opóźnienie wyładowania, o czym była mowa w Rozdz. III.

Czas trwania iskry liczymy w mikrosekundach. Czas ten zależy od napięcia w chwili powstawania iskry i odstępu elektrod. Przy wyższych napięciach czas jest dłuższy, niż przy niższych.

4. ULOT ELEKTRYCZNY.

Drut pod wysokim napięciem, po przekroczeniu pewnej granicy tego napięcia, zaczyna świecić w ciemności. Są to wyładowania, zachodzące między nim, a drugą elektrodą, np. drugim drutem, ziemią lub przedmiotem uziemionym. Przewody linii elektrycznych zwykle wykazują te zjawiska przy napięciach powyżej 60 do 80 kV. Zjawisko może przybrać również postać wyładowań snopiących, wytryskujących z nierówności i występow na przewodach, zwłaszcza przy linkach. Pociąga to za sobą stratę energii, która uchodzi w powietrze. Nazywamy to ulotem elektrycznym albo koroną elektryczną i mówimy, że linja posiada ulotność.

Napięcie potrzebne do wywołania zjawiska ulotu $/U_u/$ nosi nazwę napięcia ulotu, naprężenie zaś panujące wtedy na powierzchni przewodu $/K_u/$ - naprężenia ulotu. Stwierdzono doświadczalnie /F.W. Peek/, że zależność naprężenia ulotu od promienia przewodu $/r/$

$$K_u = g_0' / l + \frac{0,301}{\sqrt{r}},$$

przy gęstości powietrza $\delta = 1$, przytem $g_0 = \text{const.}$ Z drugiej strony dla przewodów równoległych o promieniu r w odległości a od siebie naprężenie ulotu, t.j. naprężenie, jakie panuje na powierzchni przewodu

w chwili powstawania zjawiska, określa wzór rachunkowo otrzymany:

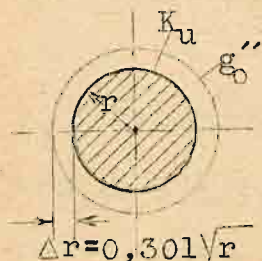
$$K_u = \frac{U_u}{2r \log_n \frac{a}{r}}$$

wobec tego:

$$g_o'' = \frac{U_u}{2/r + 0,301\sqrt{r}/\log_n \frac{a}{r}} = \frac{U_u}{2/r + \Delta r/\log_n \frac{a}{r}}$$

Jak widać z ostatniego, g_o'' jest naprężeniem

w chwili zjawienia się ulotu, panującym nie na powierzchni drutu, lecz w odległości od niego $\Delta r = 0,301\sqrt{r}$. Tę wartość naprężenia nazywamy naprężeniem krytycznym ulotu /por. Rys. 62/.



Rys. 62.

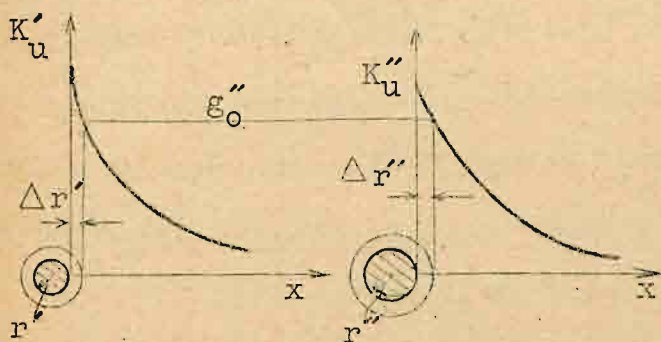
Napięcie ulotu $/U_u/$ jest to zatem napięcie, przy którym w chwili powstawania zjawiska panuje na powierzchni przewodu naprężenie ulotu $/K_u/$, w odległości zaś Δr od powierzchni naprężenie krytyczne ulotu $/g_o''/$.

Stosunki tu zachodzące przedstawia Rys. 63., gdzie podany jest przebieg $K_u = f/x$, dla $r' < r''$, przy stałych r' i r'' , gdzie x jest odległością od powierzchni drutu.

Naprężenie krytyczne ulotu jest jednakowe dla wszystkich grubości drutu i wynosi dla warunków normalnych według Peeka 29,8 kV/cm dla

drutów gładkich i 25,7 kV/cm dla linek 7-skrętkowych /wart. max./.

W rozważaniach powyższych nie uwzględnialiśmy zależności napięcia i naprężenia ulotów od ciśnienia barometrycznego i temperatury,



Rys. 63.

a więc od gęstości względnej powietrza. Jak poprzednio, oznaczmy indeksem n u dołu wartości naprężeń i napięć odnoszące się do warunków normalnych $/20^\circ\text{C}, 760 \text{ mm Hg}, \delta = 1./$, indeksem zaś δ dla temperatury $t^\circ\text{C}$ i ciśnienia $b \text{ mm Hg}$. Jeśli te wielkości po obu stronach wzoru nie posiadają żadnych takich indeksów, to odnoszą się do dowolnych warunków atmosferycznych, ale takich samych.

Naprężenie krytyczne ulotu zmienia się proporcjonalnie ze względną

gęstością powietrza δ :

$$g_0'' = g_{0n}'' \delta$$

Odległość Δr od powierzchni przewodu, na jakiej podczas zjawiska ulotu panuje naprężenie krytyczne, zmienia się natomiast /według pomiarów w Peeku/ odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z gęstości względnej ; zatem ogólnie:

$$\Delta r = \frac{0,301 \sqrt{r}}{\sqrt{\delta}}$$

Łącząc obydwie te wpływy składowe gęstości powietrza, otrzymamy wzór na naprężenie ulotu:

$$K_{u_\delta} = g_{0n}'' \cdot \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / 1a/$$

oraz na napięciu ulotu

$$U_{u_\delta} = 2g_{0n}'' \cdot r \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{a}{r} / 2a/$$

Wysokość napięcia ulotu zależy w dużym stopniu od stanu powierzchni drutu. Jeżeli powierzchnia ta nie jest gładka, napięcie ulotu leży niżej, niż wypada ze wzoru /2a/, ważnego dla drutów gładkich. Tembardziej wpływ ten będzie wyraźny przy linkach, złożonych z wiązki drutów cienkich, mających więc powierzchnię bardzo nierówną. Napięcie ulotu jeszcze bardziej się obniży w razie deszczu, krople bowiem wody osiadającej na drutach ułatwiają wyładowania. Według badań F.W. Peek'a, który pierwszy zbadał gruntownie zjawisko ulotu elektrycznego i ustalił wzory praktyczne, do dzisiaj mające znaczenie, napięcie ulotu ze wzoru /2a/ należy pomnożyć przez współczynnik stanu powierzchni m . Jeżeli dla drutu gładkiego $m = 1,0$, to dla linek wynosi $m = 0,85$ do $0,80$.

Przy uwzględnieniu nadto wpływu stanu powierzchni /współczynnik $m < 1$ zależnie od rodzaju przewodów/, powyższe wyrażenia przechodzą we wzory ogólne:

$$K_{u_\delta} = g_{0n}'' \cdot m \cdot \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / 1b/$$

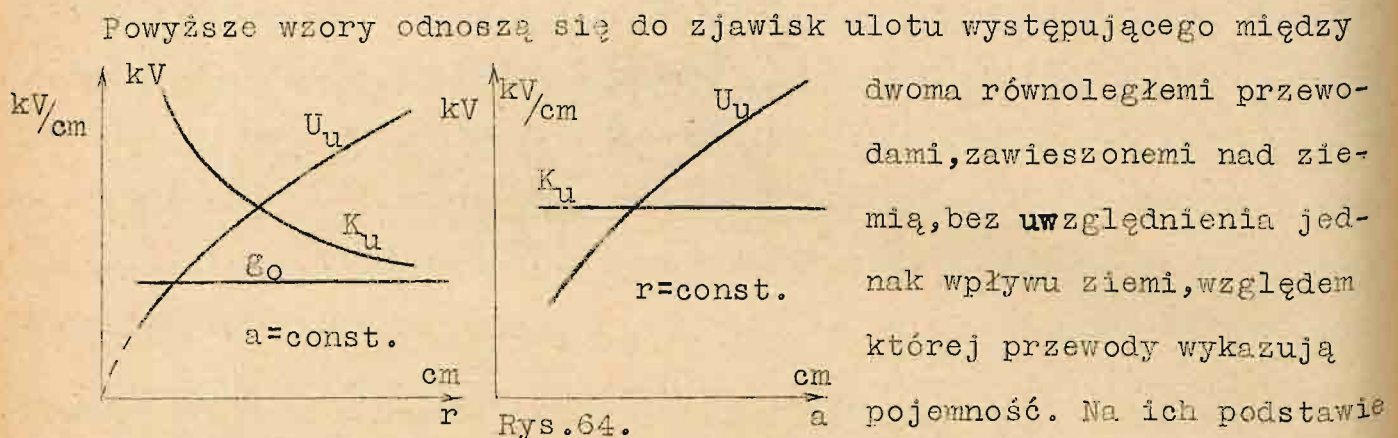
$$U_{u_\delta} = 2g_{0n}'' \cdot m \cdot r \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{a}{r} / 2b/$$

Pozatem ulot zależy od stanu atmosfery; podczas deszczu lub gęstej mgły napięcie ulotu zmniejsza się o 10 do 20% w stosunku do ładnej

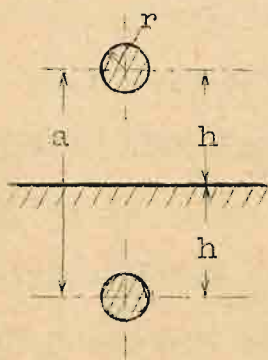
pogody.

Ze wzorów na napięcie ulotu widać, że grubość drutu ma większy wpływ na nie, niż odstęp przewodów. Im drut grubszy, tem ulot później następuje. Ma to znaczenie przy obliczaniu przewodów i skupów elektrycznych.

Zależność U_u i K_u od r i a podają wykresy /Rys.64/.



można obliczyć ulot dla przypadku często spotykanego, a mianowicie dla przewodu pojedynczego, poprowadzonego nad ziemią na wysokości h /Rys.65/.



Rys.65.

Układ taki można rozpatrywać jako połowę układu poprzedniego. Drugą połowę można bowiem wyobrazić sobie jako zwierciadlane odbicie pierwszej pod ziemią, w odstępnie $a = 2h$.

Wtedy wzór na naprężenie można napisać w postaci

$$K_r = \frac{U}{r \log_n \frac{2h}{r}},$$

napięcie zaś ulotu

$$U_u = g_{on}'' m r \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{2h}{r} \quad /3/$$

W praktycznym użyciu posługujemy się napięciami skutecznymi nie maksymalnymi. Wzory zatem na napięcie ulotu przybiorą następujące formy: prąd jednofazowy, napięcie międzyprzewodowe:

$$U_{usk} = \frac{2}{\sqrt{2}} g_{on}'' m r \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{a}{r} \quad /4a/$$

prąd trójfazowy, napięcie międzyfazowe:

$$U_{usk} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} g_{on}'' m r \delta / 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{a}{r} \quad /4b/$$

prąd trójfazowy, napięcie fazowe:

$$U_{u_{sk}} = \frac{1}{\sqrt{2}} g_{0n}'' m r \delta / l + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} / \log_n \frac{a}{r} \quad /4c/$$

Straty ulotowe.

Ulotność powoduje stratę energii, którą możemy zmierzyć. Wprawdzie teoretycznie powinno się ją uwzględnić przy każdym napięciu, panującym pomiędzy dwoma przewodami, lecz zwykle jest ona znikomo mała. Dopiero kiedy napięcie robocze przekroczy wartość napięcia ulotu, straty stają się wyraźne i zależą od kwadratu różnicy tych napięć. Prócz tego zależą od średnicy drutu, odległości przewodów, częstotliwości /są do niej proporcjonalne w granicach częstotliwości technicznej/, stanu atmosfery itd.

Według Peeka straty ulotu są proporcjonalne do kwadratu różnicy napięcia roboczego /U/ i napięcia, przy którym rozpoczynają się zjawiska jonizacji na przewodach /U_o/, przy czym $U_o < U_u$

$$P = c / U - U_o / ^2$$

Przy uwzględnieniu wpływu czynników postronnych, częstotliwości i t.d. wzór Peeka przyjmuje postać:

$$P = \frac{241}{\delta} / f + 25 \sqrt{\frac{r}{a}} / U - U_o / ^2 10^{-5} \quad \text{kW/km} \quad /5/$$

W tym wzorze oznacza: P - straty w kW/km jednego przewodu, f - częstotliwość, r - promień przewodu w cm, a - odstęp osi przewodów w cm, U - napięcie robocze w KV w wart. skut., $U_o = 21,1 m' \delta \log_n \frac{a}{r}$ KV w wart. skut., m' - wynosi dla drutów gładkich 1, dla szorstkich 0,93 do 0,98, dla linek /7 żył/ 0,83 do 0,87.

Wzór powyższy stosuje się zarówno do układu trójfazowego, wtedy U i U_o są napięciami fazowymi, jak dla jednofazowego, wtedy wartości są połową napięcia układu dwuprzewodowego.

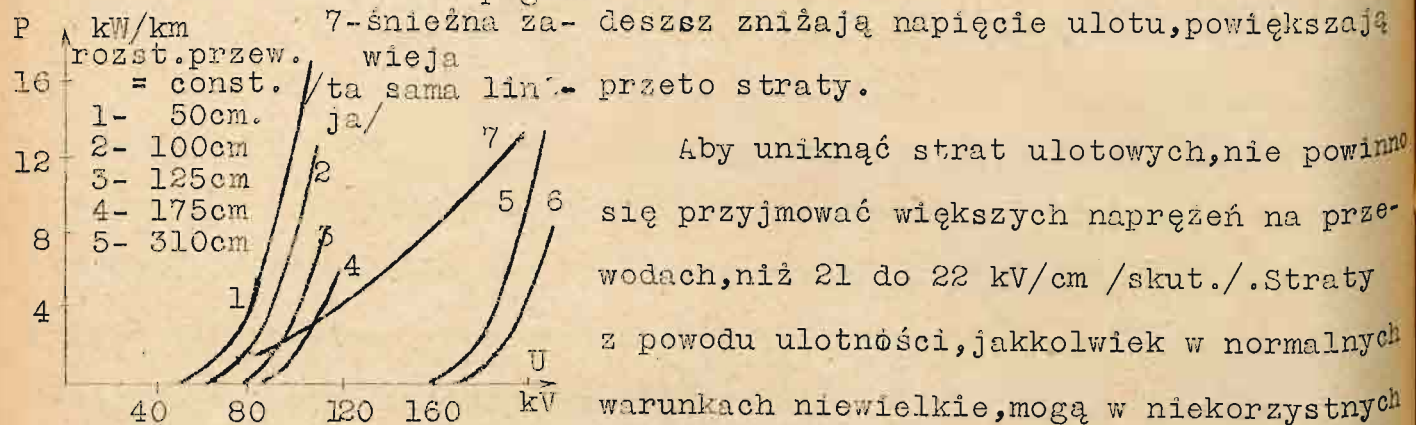
Jak widać straty rosną szybko po przekroczeniu napięcia krytycznego. Pozatem rosną one proporcjonalnie z częstotliwością; przy f = 0 pozostaje czynnik 25 jako stała.

Straty do pewnego stopnia są zależne także od kształtu krzywej napięcia. Dla dwóch bowiem krzywych o tejsamej amplitudzie, lecz innego kształtu, czas trwania ulotu jest dłuższy przy krzywej płaskiej, niż przy

ostrej. Wilgotność naogół nie wpływa na wysokość strat. Mgła, śnieg, sadza,

6-ladna pogoda

7-śnieżna za- deszcz zniżają napięcie ulotu, powiększają



Aby uniknąć strat ulotowych, nie powinno

się przyjmować większych naprężeń na przewo-
dach, niż 21 do 22 kV/cm /skut./. Straty
z powodu ulotności, jakkolwiek w normalnych
warunkach niewielkie, mogą w niekorzystnych

warunkach stać się stosunkowo znaczne /parę kW na km, por. Rys. 66/. Toteż
przy obliczaniu przewodów należy skontrolować, jakie straty będą i do-
brać odpowiednie odstępy przewodów, a nawet ich grubości tak, aby napię-
cie ulotu było nie wiele większe od napięcia roboczego /ze względu na
koszt przewodów i słupów/.

Dla przykładu podam, że przy 100 kV przewody o przekroju 70 mm^2
/10,5 mm grube/ pracują normalnie bez większych strat skutkiem ulotności.
Jednak przy 220 kV musiałyby one mieć przekrój 360 mm^2 , t.j. ok. 25 mm
średnicy, aby straty te utrzymać na tej samej wysokości. Przewód taki
pod względem obciążenia prądem elektrycznym byłby bardzo źle wyzyska-
ny. Celem lepszego wyzyskania stosujemy przewody z materiału o mniej-
szej przewodności właściwej, np. aluminiowe lub stalowo-aluminiowe za-
miast miedzianych, lub też nawet/ w ostatnich latach/ linki drażone,
o średnicy do 40 i więcej mm.

W niektórych przypadkach ulot nawet może być pożyteczny, gdyż
skutkiem działania wentylowego może tłumić przepięcia /t.j. nagłe, zwykle
krótkotrwałe, podskoki napięcia roboczego/.

5. WYŁADOWANIA POWIERZCHNIOWE.

Wyładowania w powietrzu przybierają nieco inną postać, jeżeli odby-
wają się tuż w pobliżu innego dielektryku, przede wszystkim stałego.
W praktyce technicznej zachodzi to bardzo często, bo przy każdym izolatorze linjowym, a zwłaszcza przepustowym i wsporczym. Zjawiska te wystę-
pują obok przepływu prądu /zwykle bardzo małego/ po powierzchni izolato-

ra stałego, która jest zawsze, w pewnym przynajmniej stopniu, przewodząca; odbywają się jednak w samym powietrzu, a mianowicie w jego warstwie, przylegającej do tamtego izolatora, który tylko pośrednio bierze udział w tem zjawisku.

Najlepiej obserwować je można na płycie izolacyjnej między dwiema elektrodami płaskimi o ostrych krawędziach i powierzchni mniejszej, niż powierzchnia płyty. Po przyłożeniu napięcia do elektrod, narazie płynie prąd tylko powierzchniowy; przy zwiększaniu napięcia, na krawędzi elektrody przylegającej do płytki, pokaże się światółko dosyć jaskrawe, są to wyładowania krawędziowe. Przy dalszem zwiększaniu napięcia nastąpią na powierzchni płytki, tuż przy elektrodach, wyładowania smużyste - smugi światła jarzącego się, które rozszerzają się stopniowo, aż zjawiają się snopy świetlne, wyskakujące z elektrod ku krawędziom i trzymające się tuż przy powierzchni płytki, oraz pojedyncze iskry, ślizgające się po powierzchni izolatora; są to wyładowania ślizgowe, które przy dalszem zwiększaniu napięcia dosięgają krawędzi płytki i wywołują przeskok iskry naokoło dielektryku /o ile przedtem nie nastąpi jego przebicie/. Wyładowania smużyste i ślizgowe nazywamy wogóle wyładowaniami powierzchniowymi.

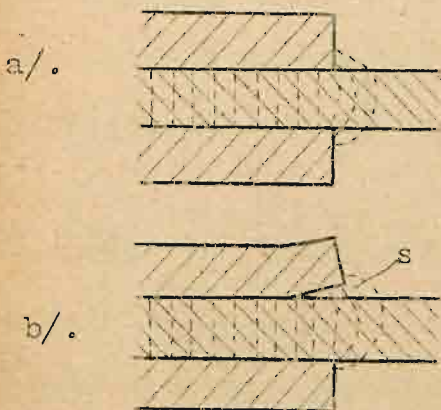
Zjawisko wyładowań ślizgowych występuje z reguły na granicy dwóch dielektryków o różnych stałych dielektrycznych, leżących ukośnie do pola. Zwykle jednym z nich jest powietrze; również i w oleju można obserwować wyładowania po powierzchni stałego izolatora w nim zanurzonego. Powstają one skutkiem naprężeń stycznych do powierzchni zetknięcia dielektryków.

Jak wiadomo, kierunek natężenia pola elektrycznego, przechodzącego z jednego dielektryku do drugiego, doznaje odchylenia tem większego, im większa jest stała dielektryczna tego drugiego materiału. Natężenie to można rozłożyć na składową prostopadłą do powierzchni zetknięcia, naprężającą dielektryk na przebicie, oraz styczną do powierzchni, powodującą wyładowania powierzchniowe, a więc naprężającą na przeskok.

Tylko w przypadkach, gdy kierunek pola jest prostopadły do powierzchni zetknięcia dielektryków, do wyładowań powierzchniowych nie dojdzie.

Przypadek prostopadłego przechodzenia pola elektrycznego przez dielektryk jest bardzo rzadki /np. w środku między okładzinami kondensatora płaskiego o dielektryku uwarstwionym/; najczęściej pole jest skrzywione na krawędziach elektrod. Tam powstają nadmierne skupienia pola i wyładowania wczesne, które powodują wytwarzanie swobodnych jonów; są to wyładowania krawędziowe. Powstające tu jony przebiegają drogę według kierunku pola elektrycznego. Jeżeli środowisko jest jednolite, wyładowania powinny iść według prostych; zwykle powierzchnia izolatora i jej najbliższe otoczenie nie jest jednolite, są pory, występy i t.d. tak, że droga wyładowań zmienia się rozmaicie.

Na wysokość napięcia, przy którym powstają wyładowania powierzchniowe, ma wpływ pośredni stała dielektryczna materiału. Przedewszystkiem wpływa ona na wyładowania krawędziowe; zjawiają się one przy napięciu tem niższem, im większa jest stała dielektryczna. Wyładowania te powstają na krawędzi zetknięcia się elektrod z materiałem dielektryku stałego. Skutkiem zakrzywienia linii pola następuje tam niekorzystne uwarstwienie dielektryku /Rys. 67a/, powietrze jest nadmiernie naprężane i tam właśnie powstają wyładowania. Poza tem często elektroda nie przystaje ściśle do dielektryku, powstaje szczelina powietrzna /Rys. 67b/



i znowu nadmierne jej naprężenie. Im większa jest stała dielektryczna, tem zjawiska te wcześniej powstają. Skutkiem sił stycznych do powierzchni jony, tam właśnie zjawiające się, posuwają się według tych sił i ułatwiają dalsze wyładowania powierzchniowe.

Rys. 67.

Na podstawie pomiarów i doświadczeń stwierdzono, że wyładowania te zjawiają się, skoro naprężenie owej warstwy powietrza przy elektrodzie przekroczy

11 kV/cm /skut./. Jako długość, na którą wyładowania smużyste się rozciągają, a więc jako szerokość smugi, otrzymano z pomiarów

$$l = \frac{U - U_0}{5} \text{ cm},$$

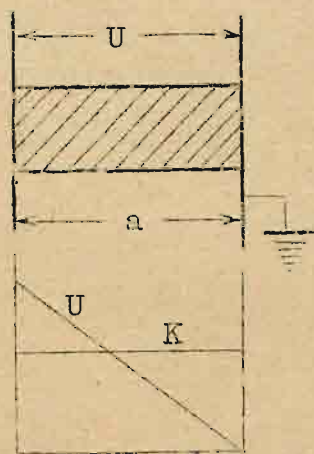
gdzie U oznacza napięcie przyłożone do elektrod a U_0 napięcie wyładowań krawędziowych.

Jako empiryczny wzór na napięcie, przy którym zaczynają występować iskry ślizgowe z wyładowań smużystych, podają

$$U_s = \frac{1,355}{c^{0,44}} \cdot 10^{-4} \text{ kV},$$

gdzie c jest pojemnością w faradach na 1 cm^2 powierzchni dielektryku. Zależność od pojemności tłumaczyć sobie można tem, że do wytworzenia iskier potrzebny jest prąd, a ten związany jest z pojemnością obiektu badanego.

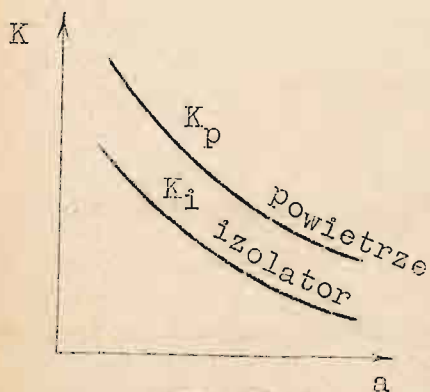
Prawa, według których odbywają się wyładowania powierzchniowe, nie są jeszcze tak dobrze zbadane, jak prawa wyładowań zwykłych w powietrzu. Ostatnie badania wykazują, że te prawa są naogół takie same, jak prawa wytrzymałości na przebicie powietrza. A więc :w polu jednostajnym możliwe jest tylko wyładowanie zupełne ; rozkład napięć wzdłuż powierzchni przed powstaniem zjawisk jonizacyjnych jest taki sam, jak w powietrzu między równoległymi płytami /Rys.68./ ; naprężenie krytyczne zmniejsza się z rosnącą odległością i t.d. Krzywa naprężeń krytycznych



Rys.68.

tych wyładowań $/K_1/$, /Rys.69/leży niżej, niż tamta $/K_p/$, ale ma prawie identyczny przebieg. Wnosiemy stąd, że zjawisko przeskoku nie jest czemś innym, niż zjawisko przebicia powietrza iskrą, tylko znajduje się pod wpływem ubocznych zjawisk w środowisku.

Niższe wartości krzywej tłumaczą się wpływem wilgotności na powierzchni izolatora. Naprężenie krytyczne na przeskok maleje ze wzrostem wilgotności. Ponieważ wilgoć występuje naogół zawsze na izolatorach porcelanowych, ułatwia ona powstawanie dłuższych iskier ślizgowych na ich



Rys.69.

powierzchni. Materiały izolacyjne "tłuste", np. parafina, zachowują się bardziej odpornie pod tym względem, niż "chude".

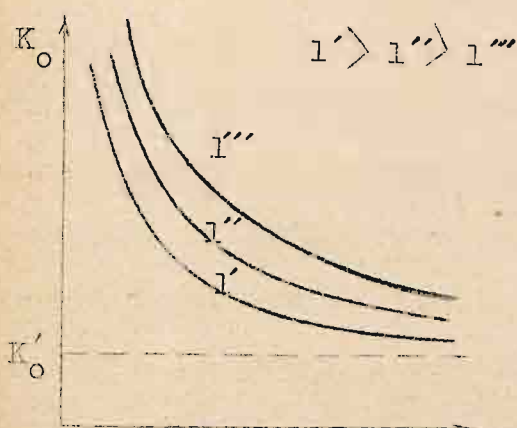
Z malejącą wilgotnością rośnie naprężenie krytyczne /Rys.70/. Przedłużenie krzywych $K_0 = f(\text{wilg.})$ dla różnych odstępów, czyli dla różnych długości materiału izolacyjnego

$l' > l'' > l'''$ odetnie na ich osi wartość K_0

odpowiadającą przeskokowi w powietrzu dla tych odległości /bez obecności materiału izolacyjnego/. Jest to jeszcze jeden dowód wpływu wilgotności na napięcie przeskoku przy powierzchni izolatora, oraz tego, że prawa rządzące wyładowaniami w powietrzu w pobliżu izolatora lub zdala od niego są te same.

Oporność powierzchniowa ma tylko wpływ pośredni na wyładowania po-

wierzchniowe; zależnie od stopnia wilgotności, spada ona dosyć znacznie z rosnącą wilgotnością. Powstawaniu więc wyładowań ślizgowych sprzyja zanieczyszczenie powierzchni. Nawet słabo przewodząca /zanieczyszczona/ powierzchnia izolatora bierze bowiem udział w rozdziale napięcia



Rys.70.

% wilg. na izolatorze.

Celem uniknięcia lub zmniejszenia wyładowań powierzchniowych uniknąć należy konstrukcyj, powodujących duże składowe styczne pola elektrycznego.