

5.6. ULOT

5.6.1. Wprowadzenie

W polu elektrycznym równomiernym lub umiarkowanie nierównomiernym iskra pojawia się nagle bez poprzedzenia wyładowaniami niezupełnymi (nie zwierającymi elektrod). W polach o dużej nierównomierności (np. dla elektrod ostrzowych) przy stosunkowo wolnym wzroście napięcia najpierw obserwuje się wyładowania niezupełne w postaci świecenia a następnie snopienia. Wyładowania świetlące występujące po spełnieniu warunku samoistności wyładowania i obejmujące stosunkowo niewielką przestrzeń wokół elektrody nazywa się **ulotem** (w literaturze zagranicznej i w publikacjach fizyków, korona). Przy ulocie elektroda jest otoczona słabo świecącą warstwą, przy czym rzeczywisty promień warstwy ulotowej jest prawie dwukrotnie większy od zaobserwowanego wizualnie. Obszar ciemny wysyła jedynie promienie ultrafioletowe.

Zjawisko ulotu ma w technice wysokich napięć dwojakie znaczenie:

1. pozytywne, gdyż jest wykorzystywane do rozdziału cząstek ciał stałych lub cieczy od powietrza (dotyczy to pyłów węglowych, cementowych, mgły olejowej itd.) w urządzeniach zwanych separatorami lub elektrofiltrami. Separator działa zwykle na zasadzie ujemnej elektrody wysokonapięciowej i dodatniej elektrody zbierającej. Ulot powoduje ujemne ładowanie cząstek pyłu, które to cząstki zdążając do elektrody dodatniej, są na tej elektrodzie gromadzone,



2) negatywne w liniach energetycznych napowietrznych gdzie występowanie ulotu wskutek wielkich rozmiarów układu izolacyjnego daje bardzo niekorzystne zjawiska takie jak

- a) straty energii czynnej;
- b) zakłócenia radioelektryczne;
- c) zakłócenia akustyczne;
- d) chemiczne oddziaływanie na metale i organiczne materiały izolacyjne.

Problem **strat mocy czynnej** (tzw. strat ulotowych) jest problemem bardzo poważnym (patrz rozdz. 5.6.2). Przykładowo, obliczono dla radzieckiej linii 1150 kV, że gdyby na całej długości linii wystąpiły jednocześnie niekorzystne warunki atmosferyczne (co jest oczywiście założeniem czysto teoretycznym) to przy długości linii równej około 1000 km straty ulotowe sięgałyby mocy około 600 MW. Zatem jedna spora elektrownia musiałaby pracować tylko na straty ulotowe. Na szczęście wzdłuż tak długiej linii warunki są zróżnicowane w czasie i w przestrzeni tak, że straty rzeczywiste są znacznie mniejsze. Tym niemniej problem zmniejszania strat ulotowych jest jednym z podstawowych problemów występujących przy konstruowaniu linii napowietrznych.

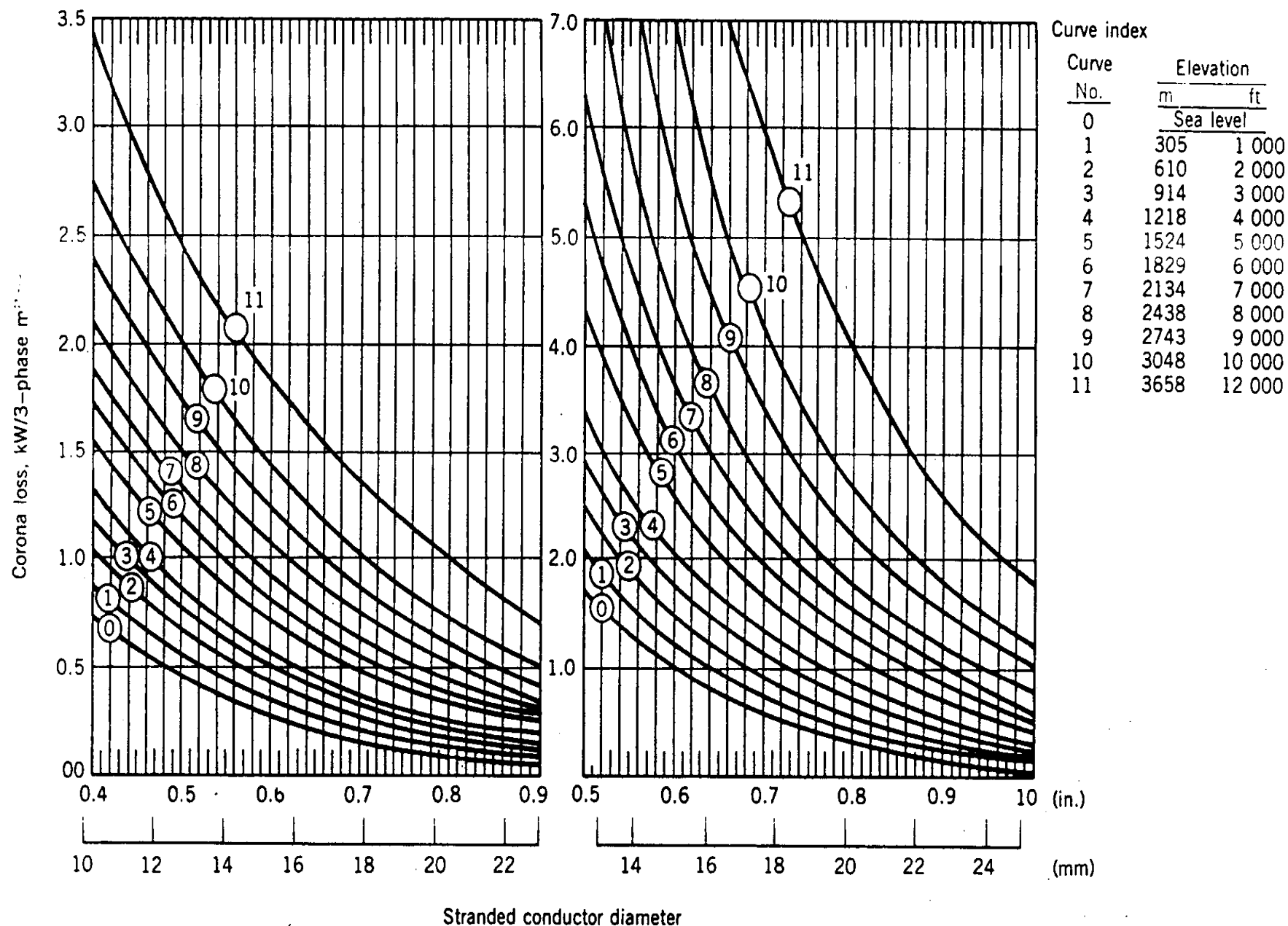


Figure 8.5. Corona loss curves for: (a) 115-kV line with 12 ft horizontal spacing; (b) 161-kV line with 17 ft horizontal spacing [15]. All curves computed by Carroll-Rockwell method for fair weather at 25 °C (77 °F).

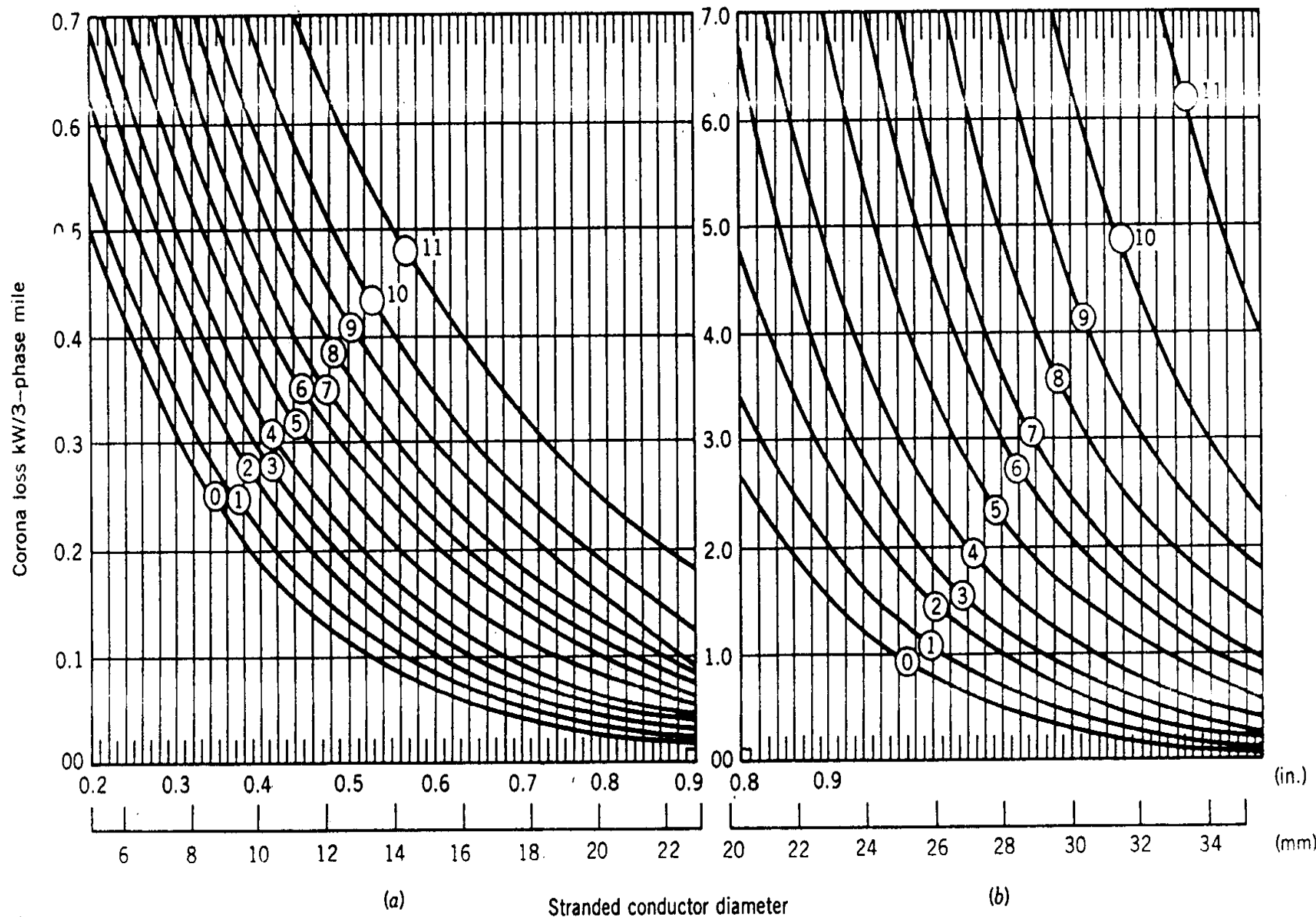


Figure 8.6. Corona loss curves for: (a) 69-kV line with 10 ft horizontal spacing; (b) 230-kV line with 22 ft horizontal spacing [15].

Największe **zakłócenia radioelektryczne** występują gdy ulot jest niewielki. Impulsy ulotowe stanowią źródło impulsów elektromagnetycznych zakłócających np. stacje radiolokacyjne. Stąd przykładowo w niektórych krajach istnieje zakaz budowy linii UHV wzdłuż wybrzeża morskiego.

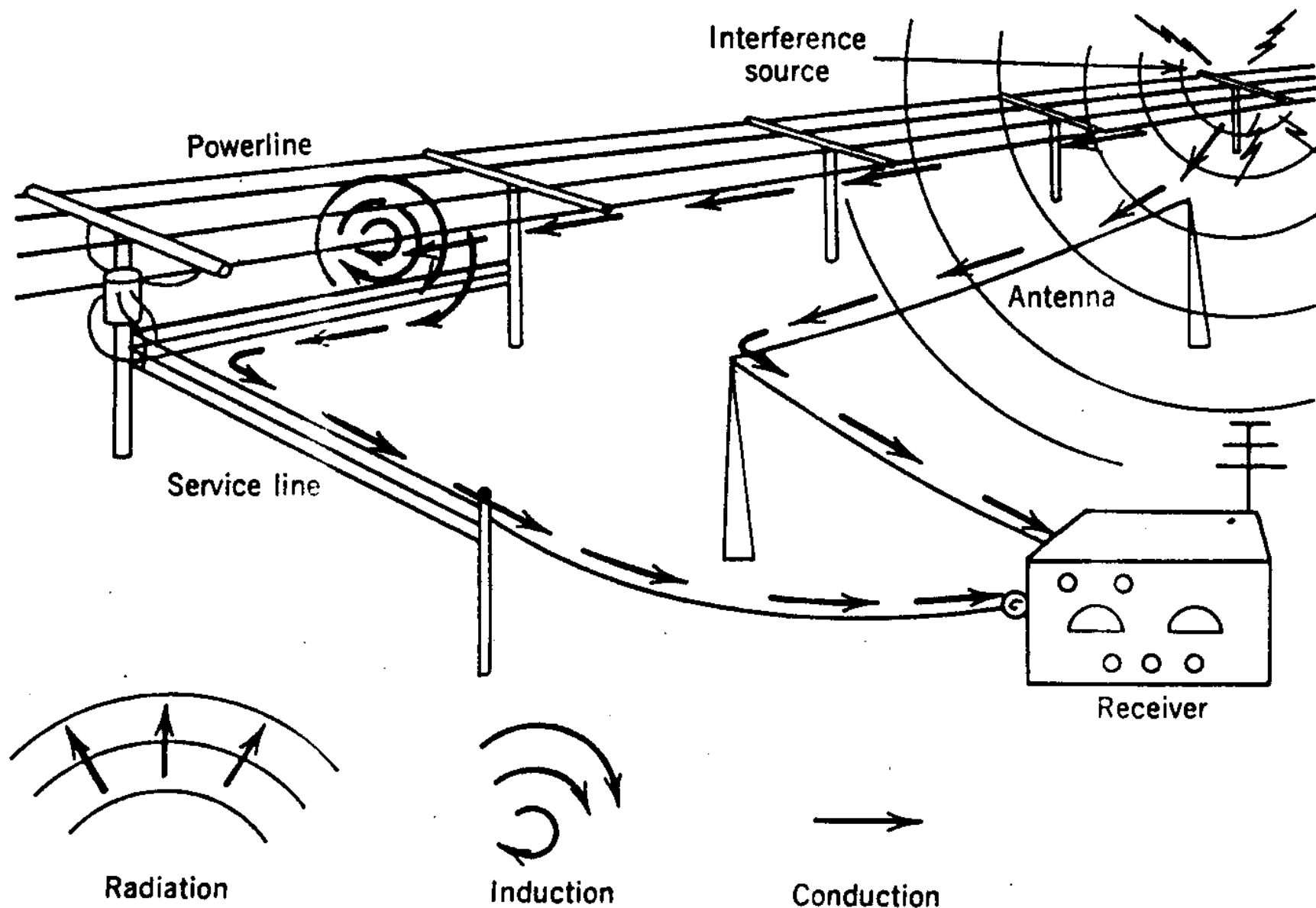


Figure 8.7. Paths by which interference energy travels from source to radio receiver.
(From Ref. 17. Used with permission. © 1976 IEEE.)

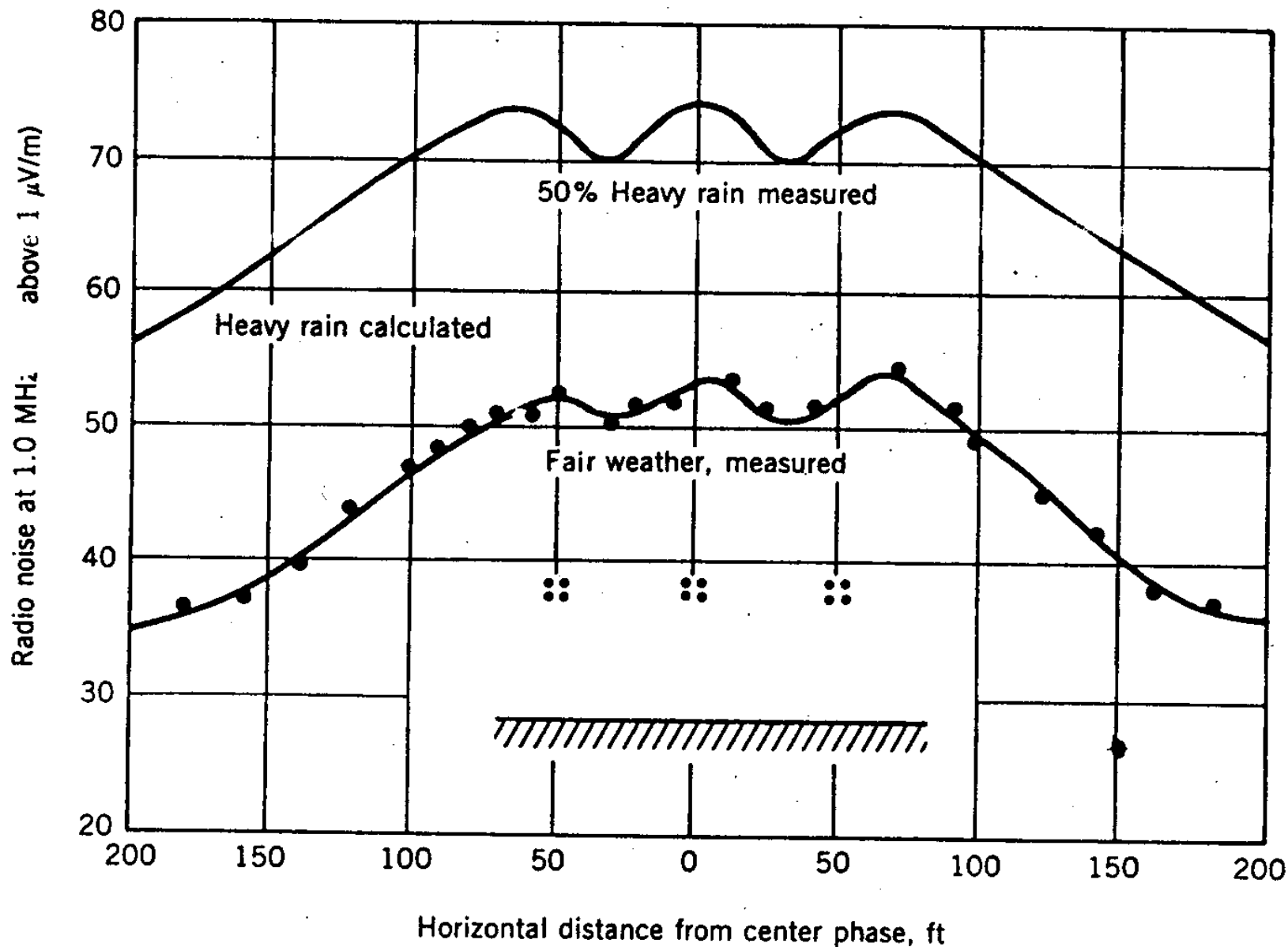


Figure 8.10. Comparison of measured fair weather RN profile and computed heavy rain RN profile for 735-kV line. (From Ref. 27. Used with permission. © 1971 IEEE.)

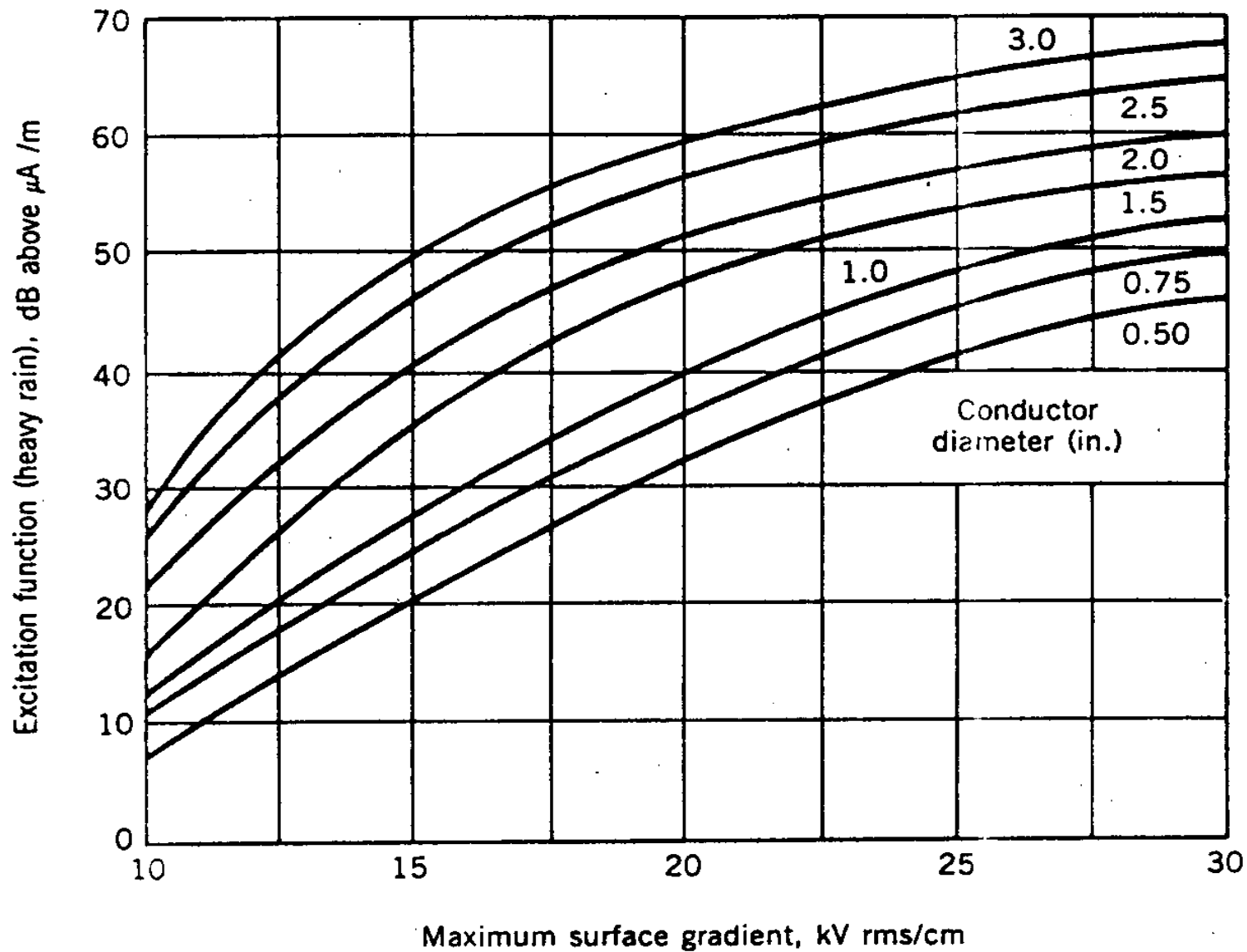


Figure 8.11. Radio interference excitation function in heavy rain of different bundles as function of maximum surface gradient (add 7 dB for $n = 1$, 2 dB for $n = 2$, and 0 dB for $n = 3$, where n is number of subconductors). (From Ref. 27. Used with permission. © 1971 IEEE.)

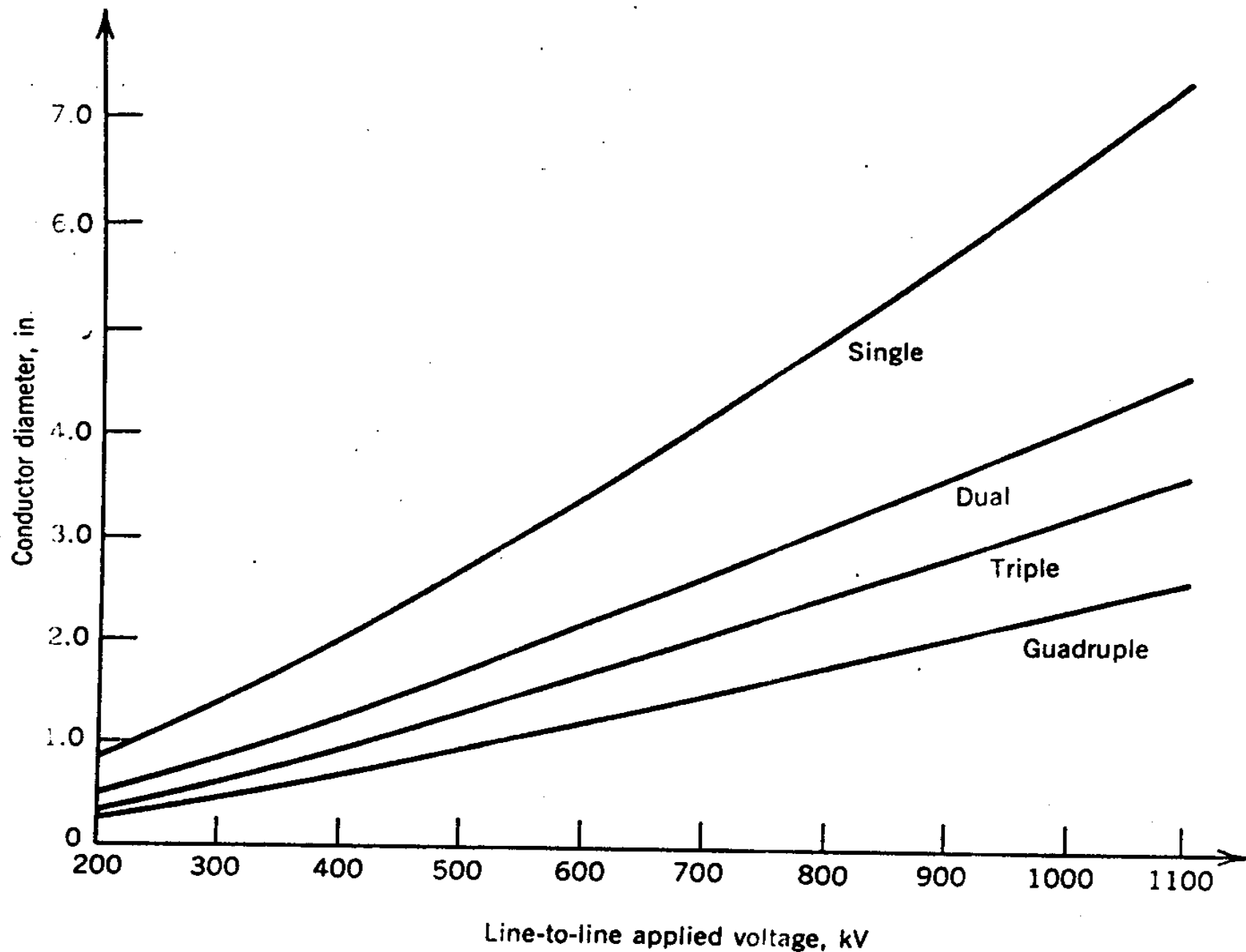


Figure 8.9. Typical values of conductor diameter that yield acceptable levels of interference.

W przypadku linii UHV występują również problemy **hałasu** spowodowanego ulotem przy złych warunkach atmosferycznych. Walka z hałasem, którego źródłem jest ulot jest jednym z istotniejszych problemów ekologicznych związanych z budową linii UHV i EHV.

Wskutek występowania ulotu wytwarza się ozon O_3 i bezwodnik kwasu azotowego NO_3 . Oba te związki są szkodliwe dla istot żywych jak również powodują korozję. W przypadku linii napowietrznych oddziaływanie tych związków, z powodu dobrego przewietrzania, jest niezauważalne.

5.6.2. Natężenie pola elektrycznego początku ulotu

5.6.2.1. Układ walców współosiowych

Układ walców współosiowych stanowi przejście od układów płaskich do układów ostrzowych i bywa stosowany do modelowania zjawisk ulotowych. Natężenie pola elektrycznego, przy którym rozpoczyna się ulot można dla tego układu wyznaczyć z wzoru Peek'a:

$$K_0 = 223 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \left[\frac{kV}{cm} \right] \quad (5.40)$$

gdzie: r - promień elektrody wewnętrznej [cm], δ - gęstość względna powietrza (rozdz. 5.1.1).

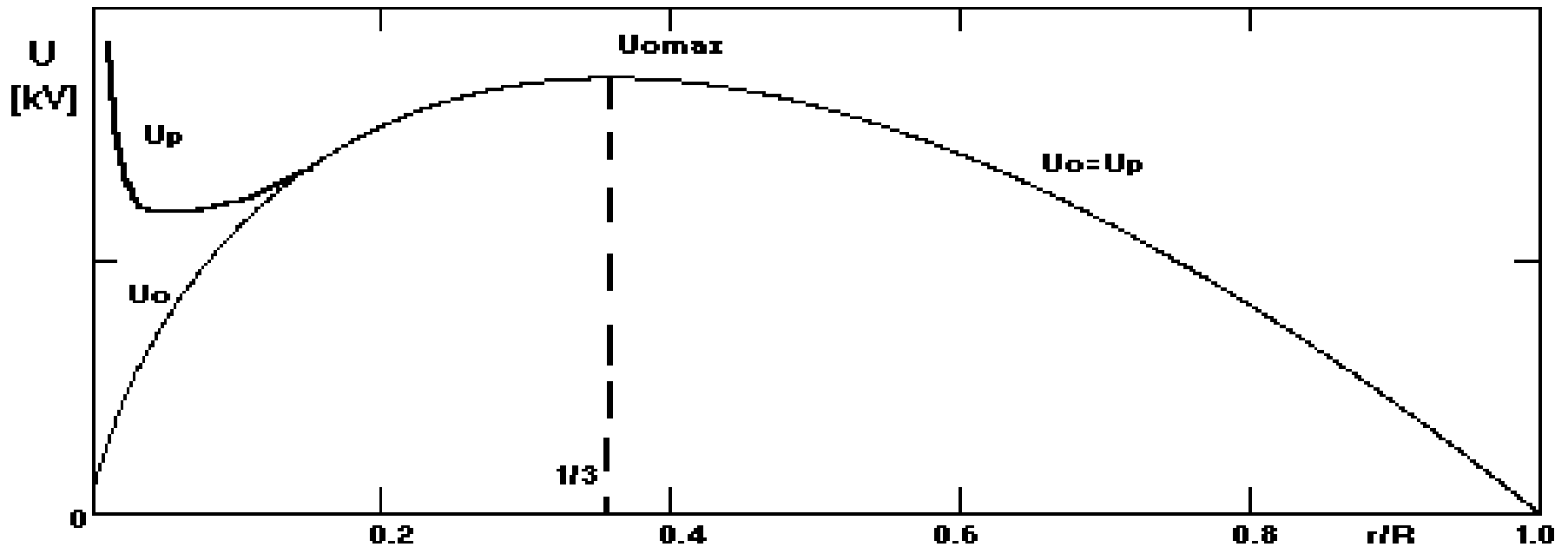
Wzór jest słuszny dla częstotliwości 50 Hz a wynik, ze względów praktycznych, podano w wartościach skutecznych, choć ulot jest warunkowany maksymalnymi wartościami natężenia pola elektrycznego.

W oparciu o wzór (5.40) można, dla układu walców współosiowych wyznaczyć napięcie początkowe ulotu:

$$U_0 = K_0 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) = 22.3 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad (5.41)$$

gdzie R - jest promieniem walca zewnętrznego.

Wykres zależności napięcia przeskoku U_p oraz napięcia początkowego ulotu U_0 w funkcji ilorazu promieni r/R podano na rysunku 5.19.



Jak widać z tego rysunku, ze wzrostem promienia walca wewnętrznego napięcie początkowe ulotu rośnie, by przy ilorazie promieni r/R większym od $1/4$ pokryć się z napięciem przeskoku, tak jak w układzie płaskim.

5.6.2.2. Przewody linii napowietrznych

Dla przewodów linii napowietrznych obowiązuje następujący wzór określający napięcie początkowe ulotu:

$$U_0 = \frac{1}{1.15 \div 1.19} \cdot 21.1 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot 2 \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \ln \left(\frac{a}{r} \right) \quad (5.42)$$

gdzie: 21.1 - natężenie pola elektrycznego [kV/cm] odpowiadające w warunkach normalnych w powietrzu progowi jonizacji (patrz również rozdz. 5.2.1); 1.15 - współczynnik dla trójkąowego ułożenia przewodów linii; 1.19 - współczynnik dla płaskiego ułożenia przewodów linii; m_1 - współczynnik uwzględniający gładkość przewodu i zawierający się w granicach 0.8÷0.9 dla linek stalowo-aluminiowych stosowanych w liniach napowietrznych. Osobliwością tego współczynnika jest to, że dla przewodów starych jest on bliższy 0.9 a dla przewodów nowych jest bliższy 0.8, czyli że ulot jest mniejszy w liniach już przez pewien czas eksploatowanych; tłumaczy się to wygładzającym powierzchnię przewodu wpływem ulotu; m_2 - współczynnik uwzględniający warunki atmosferyczne i wynoszący: 1 - dla dobrej pogody; 0.8 - dla drobnego deszczu; 0.3 - dla deszczu ulewnego; mgła, śnieg, sadz lodowa itp. obniżają znacznie ten współczynnik; z ekonomicznego punktu widzenia jest niemożliwe zbudowanie linii, która w trudnych warunkach atmosferycznych byłaby bez ulotu.

Dla warunków normalnych, gdy wszystkie współczynniki zależne od warunków atmosferycznych są równe jedności wzór (5.42) przybiera postać:

$$U_0 = \frac{2}{1.15 \div 1.19} \cdot 21.1 \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \ln \left(\frac{a}{r} \right) \quad (5.43)$$

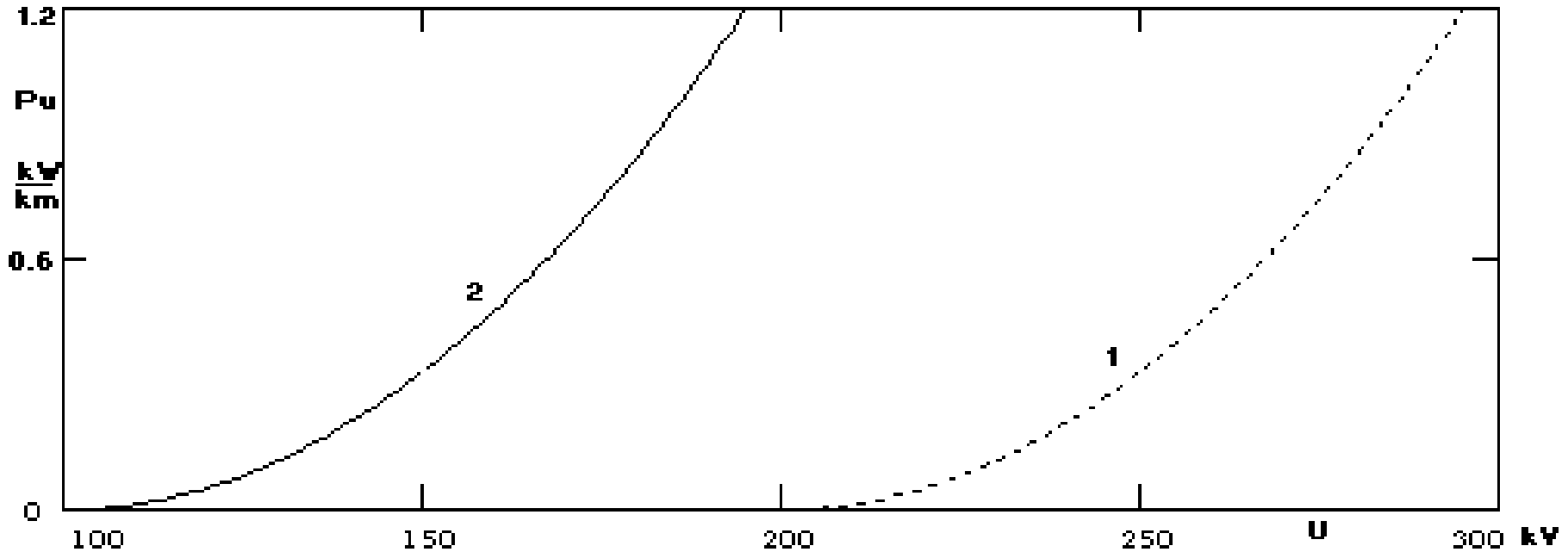
gdzie wyrażenie w nawiasie jest współczynnikiem korekcyjnym uwzględniającym fakt, że w warunku samoistności wyładowania (5.35), przy małym promieniu r wartość x_0 jest znacznie mniejsza niż przy r dużym.

Jak wynika z powyższych wzorów główną drogą do podwyższenia napięcia progu ulotu a tym samym do obniżenia strat ulotowych, jest zwiększenie promienia przewodu co uzyskuje się przez stosowanie przewodów rurowych lub wiązkowych (patrz również rozdz. 3.5). Przybliżony wzór na straty ulotowe ma według Peek'a postać:

$$P_u = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{a}} \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{U_j}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^5 \quad [kW/km/fazę] \quad (5.44)$$

gdzie U_j jest napięciem progu jonizacji określonym w przybliżeniu wzorem (5.42).

Zatem można stwierdzić, że straty ulotowe są proporcjonalne do kwadratu różnicy między napięciem na przewodach linii U oraz napięciem początkowym ulotu U_0 , czyli $P \sim (U - U_0)^2$ (rys. 5.20).

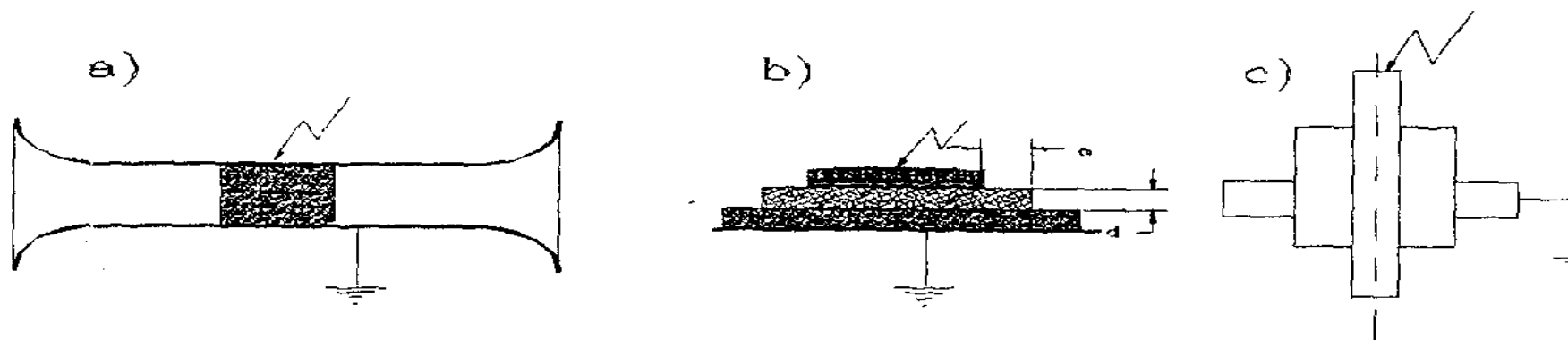


Stosunek strat przy pogodzie złej do strat przy pogodzie dobrej może dochodzić do **100**. Tzw. średniodobowe straty ulotowe w długich liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia liczone są w megawatach.

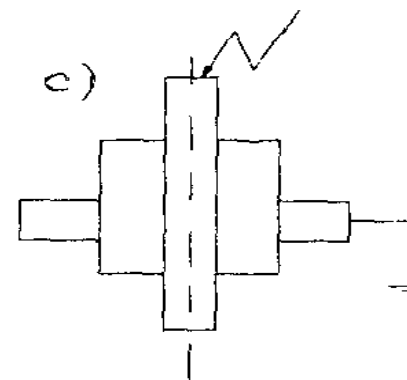
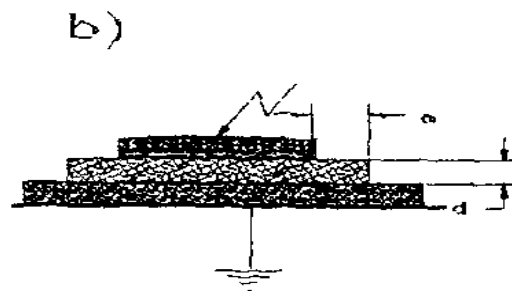
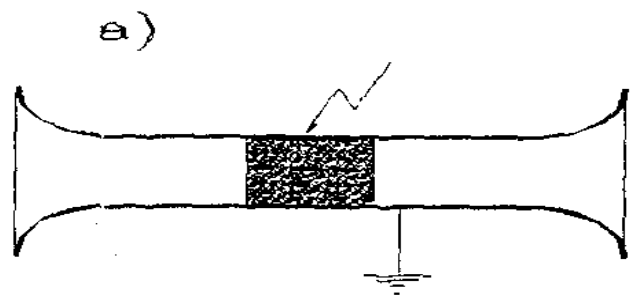
5.7. WYŁADOWANIA POWIERZCHNIOWE

5.7.1. Wprowadzenie

Jednym z trudniejszych zjawisk, z którymi boryka się technika izolacyjna są wyładowania mogące rozwijać się w powietrzu po powierzchni izolacji stałej. Na rysunku 5.21 podano trzy przykłady układów izolacyjnych, w których o wytrzymałości elektrycznej mogą decydować zjawiska na powierzchni dielektryka stałego.

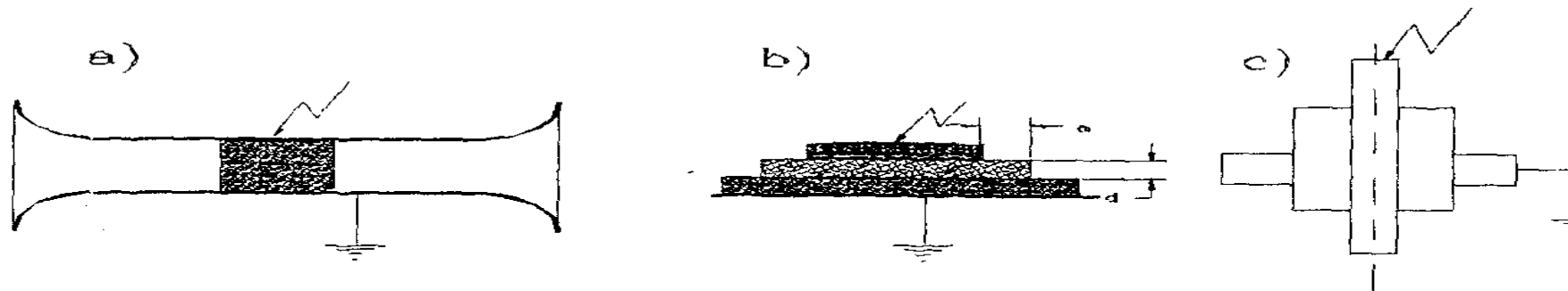


Rys. 5.21. Przykłady układów izolacyjnych skłonnych do generowania wyładowań po powierzchni dielektryka stałego



Rys. 5.21. Przykłady układów izolacyjnych skłonnych do generowania wyładowań po powierzchni dielektryka stałego

W układzie jak na rysunku 5.21a napięcie przeskoku po powierzchni dielektryka stałego jest zwykle znacznie niższe niż napięcie przeskoku w układzie płaskim bez obecności przekładki izolacyjnej. W układzie jak na rysunku 5.21b na powierzchni dielektryka stałego **D** po osiągnięciu odpowiedniej wartości napięcia pojawiają się przy elektrodzie **E** iskry, które ze wzrostem napięcia wydłużają się by, z dalszym wzrostem napięcia doprowadzić ostatecznie do przeskoku. Podobnie jest w układzie z rysunku 5.21c odwzorowującym tzw. układ przepustowy. Różnice między napięciem początkowym iskier zwanych iskrami ślizgowymi a napięciem przeskoku mogą być znaczne.



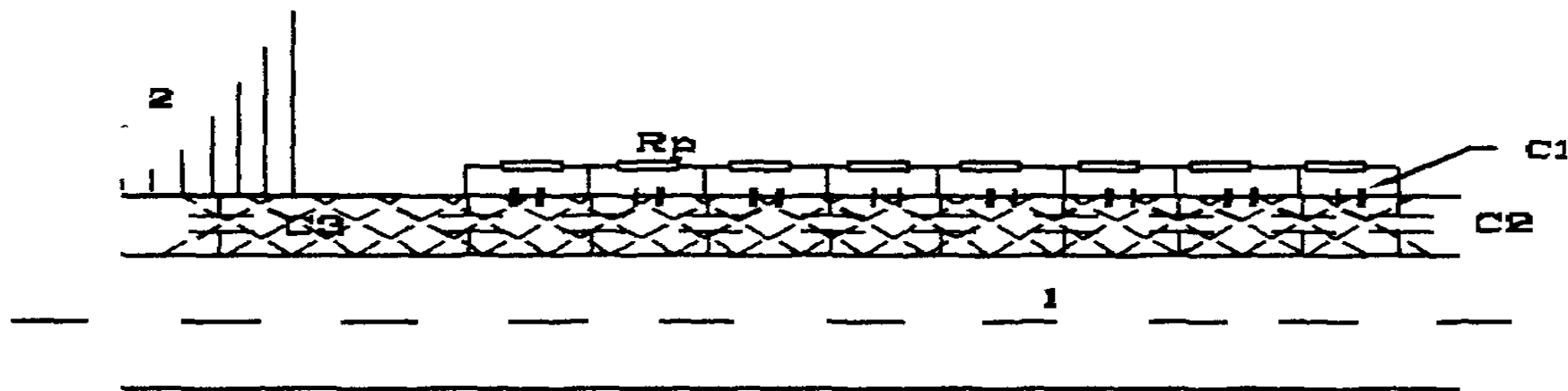
Rys. 5.21. Przykłady układów izolacyjnych skłonnych do generowania wyładowań po powierzchni dielektryka stałego

Przyczyna powstawania wyładowań powierzchniowych tkwi w istnieniu składowej stycznej do powierzchni dielektryka stałego natężeń pola elektrycznego. Jest to jeszcze jedna przyczyna, by przy konstruowaniu układu izolacyjnego znać obraz pola elektrycznego. Wytrzymałość elektryczna układów typu b) lub c), zwanych również układami typu przepustowego, zależy przede wszystkim od wymiaru d (rys. 5.21b), a mniej od wymiaru a , czyli $U = f(d, a)$, przy czym za wytrzymałość takiego układu należy przyjmować napięcie, przy którym pojawiają się iskry ślizgowe, a nie dopiero napięcie przeskoku. Wynika to z faktu, iż iskry rozwijające się po powierzchni izolacji stałej mają destrukcyjny wpływ na tę izolację i np. dielektryki organiczne ulegają zwęgleniu. Najodporniejsze są takie izolatory jak mika czy porcelana. Stąd wynika np. stosowanie miki w komutatorach maszyn elektrycznych.

Problem wyładowań ślizgowych dotyczy izolatorów przepustowych, głowic kablowych, kondensatorów, wyjść połączeń czołowych z blach stojana lub wirnika maszyn elektrycznych itp. Dotyczy to głównie napięć przemiennych. Przy napięciach udarowych wyładowania powierzchniowe są mniej groźne ze względu na krótkie czasy oddziaływania tych napięć. Przy napięciu stałym wyładowania powierzchniowe wiążą się z zagadnieniami prądów upływnościowych po zabrudzonej powierzchni izolacji.

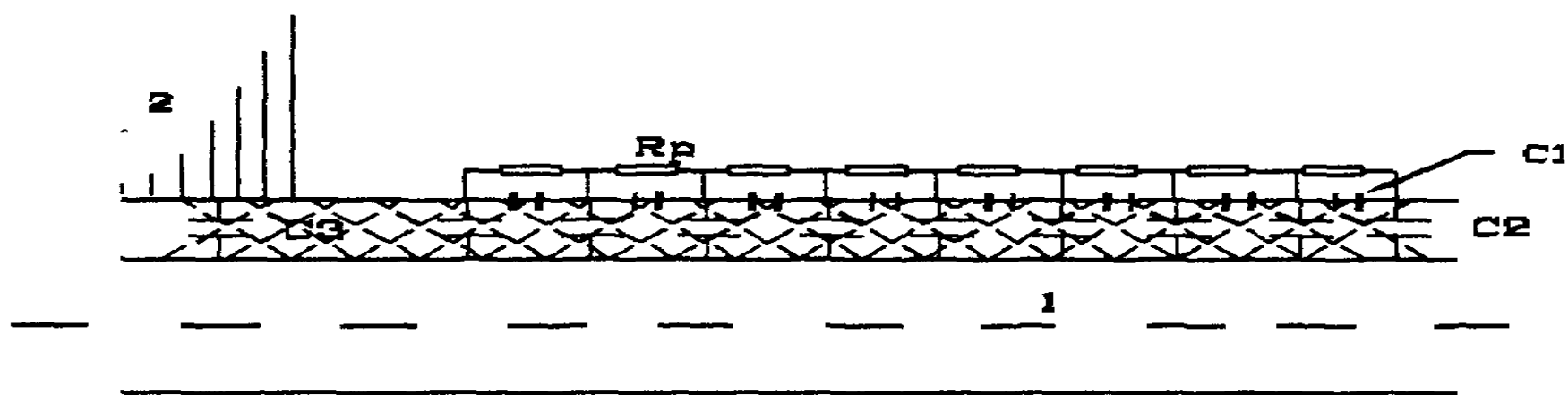
5.7.2. Schemat zastępczy do analizy wyładowań ślizgowych

Schemat zastępczy dielektryka odwzorowujący zagadnienia wyładowań ślizgowych w układzie z rysunku 5.21b może mieć postać jak na rysunku 5.22.



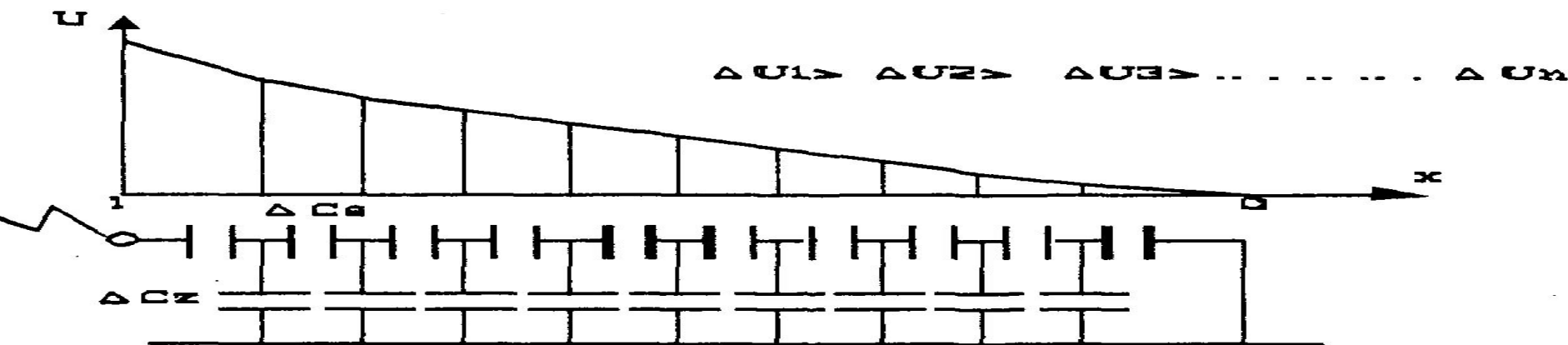
Rys. 5.22. Schemat zastępczy do teorii iskier ślizgowych
1 - przewód pod napięciem, 2- metalowy, uziemiony kołnierz (np. stojan maszyny),
3 - izolacja stała

Pojemności C_2 odwzorowują rozłożoną pojemność między powierzchnią dielektryka stałego, a elektrodą uziemioną w obszarze poza elektrodą wysokonapięciową. Pojemność C_3 to pojemność między elektrodami wynikająca z pola powierzchni elektrody wysokonapięciowej. I wreszcie pojemności C_1 to pojemności w powietrzu wzdłuż powierzchni dielektryka stałego o rezystancji powierzchniowej R_p .

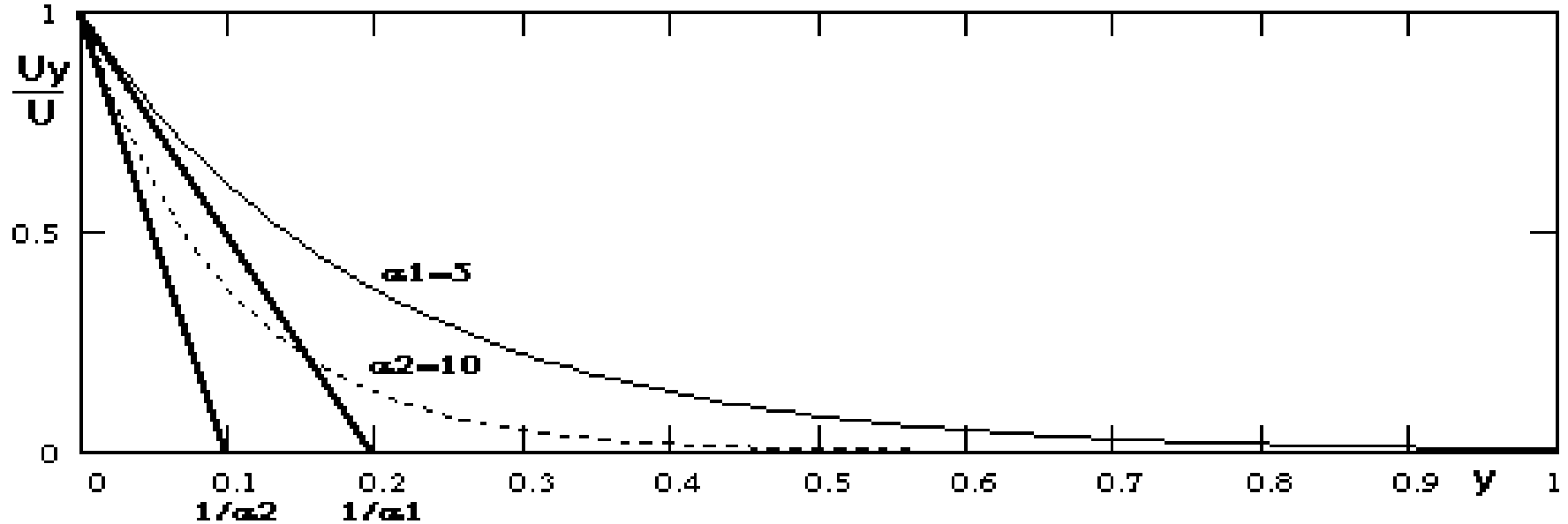


Rys. 5.22. Schemat zastępczy do teorii iskier ślizgowych
 1 - przewód pod napięciem, 2- metalowy, uziemiony kołnierz (np. stojan maszyny),
 3 - izolacja stała

Jeśli założyć, że rezystancja powierzchniowa R_p jest bardzo duża ($R_p \rightarrow \infty$) to schemat z rysunku 5.22 jest taki sam jak schemat na rysunku 3.20b.



Słuszne są zatem wszystkie rozważania i wnioski zawarte w rozdziale 3.4.2, czyli wzdłuż powierzchni dielektryka stałego wystąpi rozkład napięcia pokazany na rysunku 3.22 i opisany wzorami (3.42÷3.44), czyli rozkład silnie nierównomierny.



Zatem na elementy pojemnościowe C_1 zbliżone do elektrody wysokiego napięcia będą przypadać duże spadki napięcia. Innymi słowy można powiedzieć, że przy R_p dążącym do nieskończoności napięcie rozkłada się na pojemności C_1 i C_2 w ten sposób, że na C_1 bliskie elektrody przypada duża część napięcia doprowadzonego do układu. Ponieważ C_1 odwzorowuje odstęp powietrzny, zatem wypełniony dielektrykiem o stosunkowo małej wytrzymałości elektrycznej to przy odpowiednio dużej wartości napięcia w odstępie tym musi wystąpić wyładowanie elektryczne.

Gdy rezystancja powierzchniowa nie może być uznana za nieskończenie dużą, to wówczas właśnie rezystancja może decydować o rozkładzie napięcia na powierzchni izolatora stałego. Stąd wniosek, że zmieniając rozkład rezystancji R_p można sterować rozkładem napięcia na powierzchni dielektryka stałego, a zatem można w ten sposób sterować napięciem początkowym wyładowań ślizgowych (patrz rozdz. 5.7.4).

Jak wynika ze schematu zastępczego (rys. 5.22) wówczas gdy powstają iskry ślizgowe nie zwierające elektrod, to prąd tych iskier musi się zamknąć na drodze pojemnościowej przez pojemności skrośne dielektryka C_2 . Zatem prąd iskry zawiera dwie składowe:

$$i_s = C_2 \cdot \frac{dU}{dt} + U \cdot \frac{dC_2}{dt} \quad (5.45)$$

Przy napięciach przemiennych o częstotliwości technicznej, w prądzie wyładowań ślizgowych dominuje druga składowa z wzoru (5.45).

Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych w układzie jak na rysunku 5.21c dla środowiska powietrznego można oszacować z wzoru Toeplera:

$$U_{sl} = \frac{25.8}{C^{0.44}} \quad (5.46)$$

gdzie: U_{sl} - wartość skuteczna [kV] napięcia początkowego wyładowań ślizgowych, C - jest pojemnością jednostkową przypadającą na 1 cm² powierzchni dielektryka stałego [pF/cm²].



August Toepler (Töpler) b. September 7, 1836
d. March 6, 1912

Dla układu płaskiego (rys. 5.21b) wzór (5.46) po uwzględnieniu wzoru na pojemność kondensatora płaskiego (3.8) przy założeniu $s = 1 \text{ cm}^2$, uzyskuje się:

$$U_{sl} = 74.8 \cdot \left(\frac{d}{\varepsilon'} \right)^{0.44} \quad (5.47)$$

gdzie: U_{sl} - wartość skuteczna napięcia [kV]; d - grubość dielektryka [cm]; ε' - przenikalność elektryczna względna dielektryka stałego.

Oczywiście, jeśli układy izolacyjne z rysunku 5.21b lub 5.21c znajdują się w innym środowisku niż powietrze to napięcie początkowe wyładowań ślizgowych wzrasta. Przykładowo, dla oleju transformatorowego U_{sl} rośnie ponad trzykrotnie i dla układu płaskiego może być oszacowane z przybliżonej zależności:

$$U_{sl} = 5.2 \cdot \sqrt{d} \quad (5.48)$$

Długość iskier ślizgowych w układzie płaskim można ocenić z przybliżonych zależności:

$$l_{sl} = k_l \cdot (U - U_{sl}) \quad (5.49)$$

gdzie: U - napięcie w układzie [kV]; U_{sl} - napięcie progu wyładowań ślizgowych [kV]; k_l - współczynnik równy 1.8 dla powietrza i 0.8 dla oleju transformatorowego.

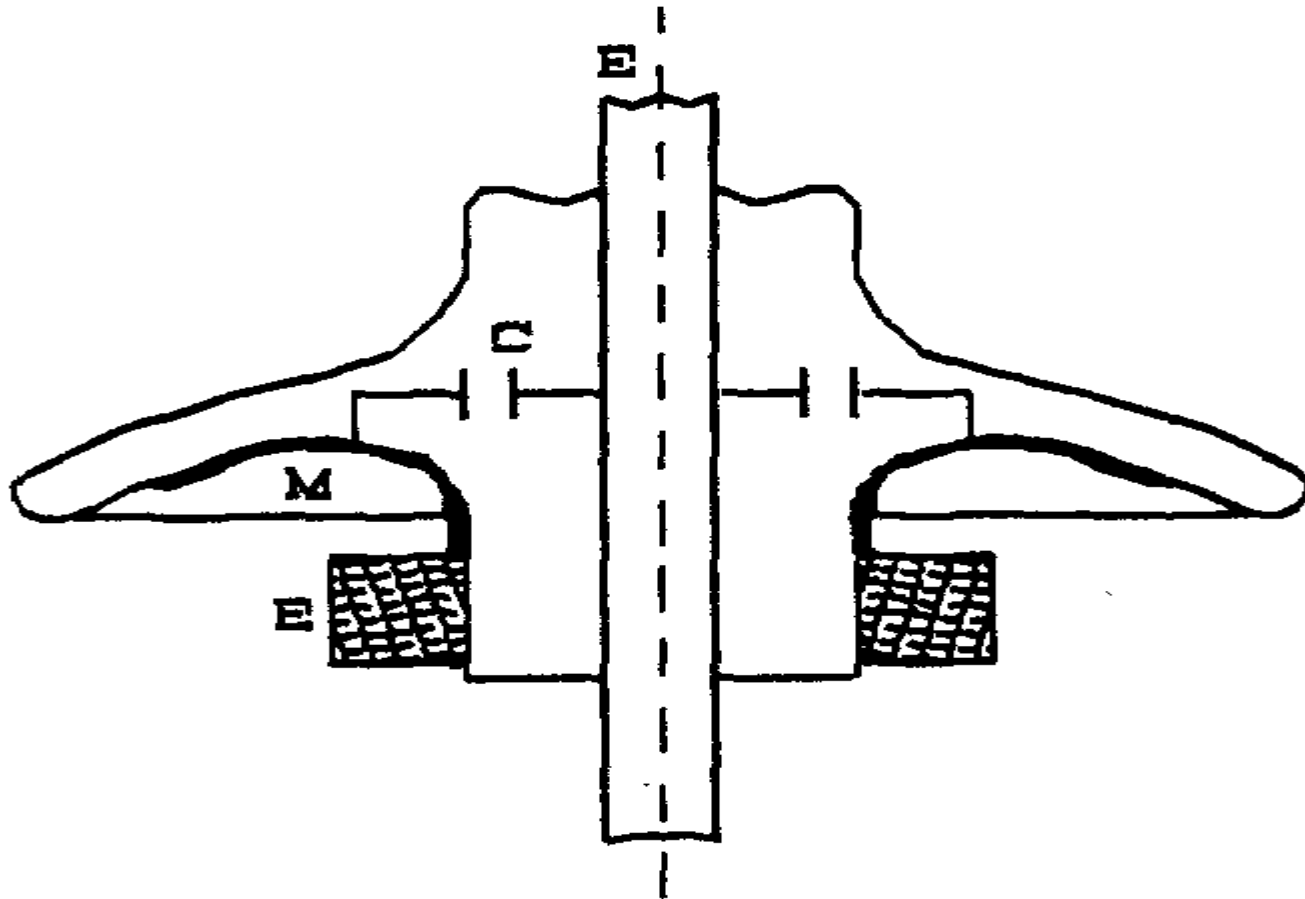
5.7.3. Środki zaradcze przeciwko iskrom ślizgowym

Skutki oddziaływania iskier ślizgowych polegające na degradacji powierzchni izolacji stałej oraz na obniżaniu wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego są na tyle niekorzystne, że należy tak konstruować izolację by iskry ślizgowe nie występowały.

Podstawowe sposoby zapobiegania wyładowaniom ślizgowym:

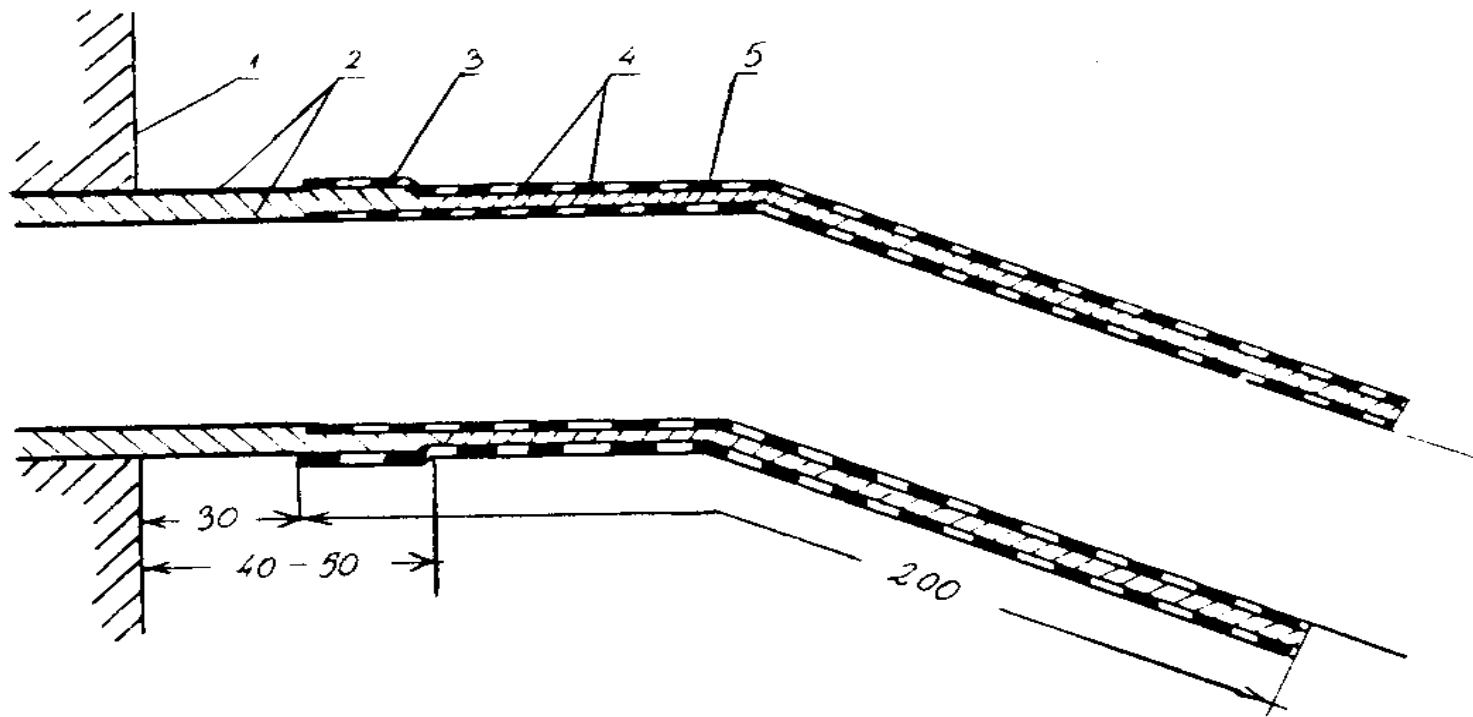
1. **Zwiększenie grubości** dielektryka stałego powoduje zmniejszenie pojemności we wzorach (5.46) czy (5.47) a tym samym wzrost wartości napięcia progu wyładowań ślizgowych; jednakże pociąga to za sobą dodatkowe koszty materiałowe;
2. Zastosowanie dielektryka stałego lub dodanie warstwy dielektryka o **mniejszej przenikalności elektrycznej** – maleje C i rośnie U_{sl} ;
3. Zastosowanie **zebra** lub **klosza**, co jest odmianą sposobu 1 bowiem również polega na (miejscowym) zwiększeniu grubości dielektryka stałego;

4. Zastosowanie **kieszni metalizowanej** (rys. 5.23), co powoduje zwieranie elektryczne odcinków powierzchni, pod którą jest warstwa dielektryku o małej grubości;



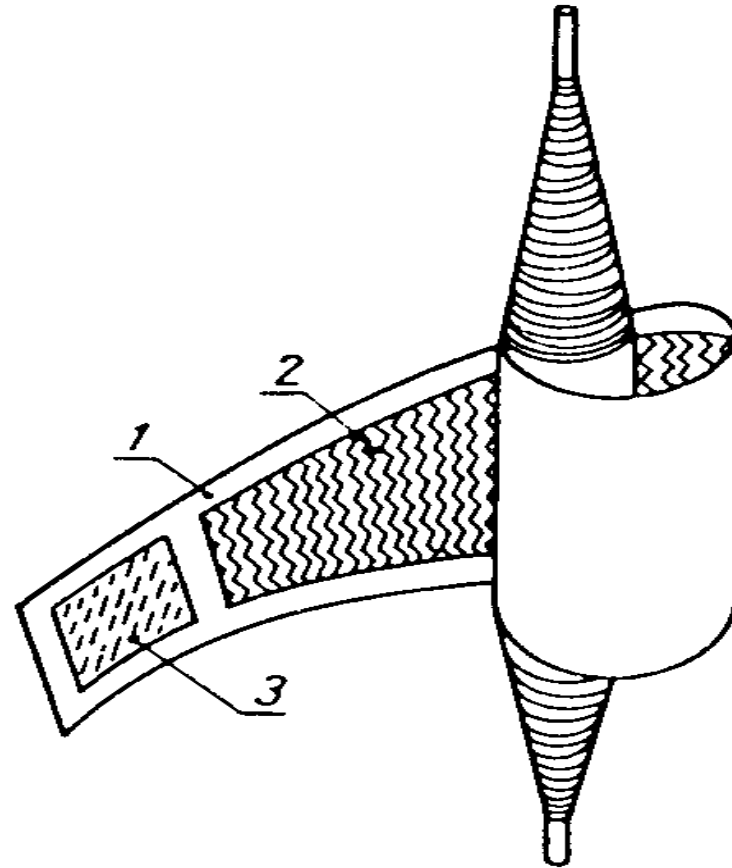
Rys. 5.23. Kieszeń metalizowana w izolatorze ceramicznym przepustowym
E - elektrody, M - kieszeń metalizowana

5. Stosowanie **warstw lakierów o różnych przewodnościach** (rys. 5.24), co pozwala na sterowanie rozkładem napięcia wzdłuż powierzchni dielektryka stałego poprzez zmianę rezystancji powierzchniowej (rys. 5.22) – tą drogą uzyskuje się rozkład znacznie bardziej równomierny niż na rysunku 3.22.



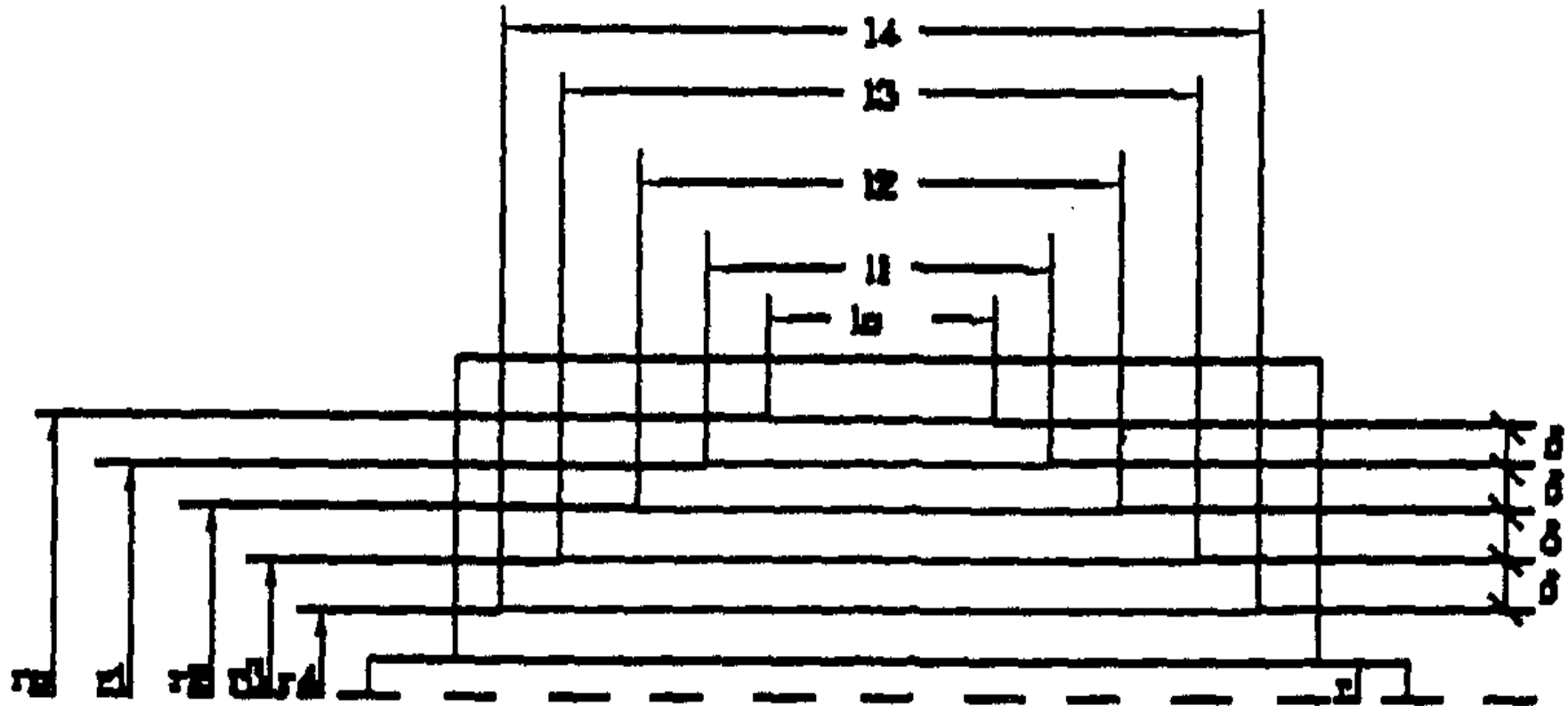
Rys. 5.24. Przykład zastosowania lakierów przewodzących dla zapobieżenia iskrom ślizgowym na wyprowadzeniach połączeń czołowych z blach stojana turbogeneratora [29]
 1- żelazo stojana, 2 - 1 kier żłobkowy, 3 - taśma izolacyjna, 4 - lakier połączeń czołowych
 5 - taśma izolacyjna

6. Sterowanie pojemnościowe (kondensatorowe) stosowane w przepustach energetycznych wysokiego napięcia (powyżej 60 kV); sterowanie to uzyskuje się przez zastosowanie w warstwie dielektryka stałego pośrednich elektrod metalowych (rys.5.25).



Rys. 5.25. Sposób wykonania przepustu kondensatorowego
1 - papier, 2,3 - elektrody sterujące

Na rysunku 5.26 pokazano przekrój układu przepustowego kondensatorowego. W układzie takim dąży się do tego by rozkład pola elektrycznego był jak najbardziej równomierny zarówno wzdłuż powierzchni dielektryka jak i w kierunku promieniowym.



Rys. 5.26. Przekrój przepustu kondensatorowego

Przybliżone spełnienie tych wymagań można uzyskać dzieląc napięcie na równe części. Sprowadza się to w efekcie do spełnienia dwóch warunków geometrycznych:

a) jednakowych pojemności między kolejnymi okładzinami

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n$$
$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l_0}{\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l_1}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} = \dots = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l_n}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n+1}}\right)}$$

Ponieważ $\mathbf{r}_{n+1} = \mathbf{r}_n - \delta$ oraz $\delta/\mathbf{r}_n \ll 1$ nawet dla małego promienia \mathbf{r}_i wewnętrznej elektrody, zatem:

$$\ln\left(\frac{r_n}{r_{n+1}}\right) = \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{\delta}{r_n}}\right) \approx \frac{\delta}{r_n}$$

co w efekcie prowadzi do warunku

$$l_0 \cdot r_0 \approx l_1 \cdot r_1 \approx \dots \approx l_n \cdot r_n, \quad 0 \leq n \leq N \quad (5.50)$$

gdzie N jest całkowitą liczbą warstw (okładzin).

b) równomiernego stopniowania okładzin w kierunku osiowym

$$b = \frac{l_{n+1} - l_n}{2} = \textit{const} \quad (5.51)$$

Spełniając powyższe warunki uzyskuje się poprawę rozkładu natężeń pola stycznych do powierzchni dielektryka stałego. Napięcie ślizgowe rośnie w takim układzie w przybliżeniu \sqrt{N} - krotnie.

Umieszczenie pośrednich okładek stwarza, niestety, dodatkowe problemy gdyż na ich krańcach tworzą się puste przestrzenie (kawerny - rys. 5.27), w których występuje wzrost natężenia pola i w efekcie może wystąpić wyładowanie niezupełne drażące dielektryk.



Rys. 5.27. Kawerna na krańcu elektrody sterującej przepustu kondensatorowego

Napięcie początkowe wyładowań w takiej wtrącinie gazowej można ocenić z zależności:

$$U_0 = A \cdot d^{0.45} \quad (5.52)$$

gdzie: U - napięcie progu wyładowań [kV]; d - grubość warstwy dielektryka między okładkami [mm]; A - eksperymentalny współczynnik wynoszący 1.53 dla wypełnienia kawerny powietrzem i 5.39 gdy w kawernie jest olej.

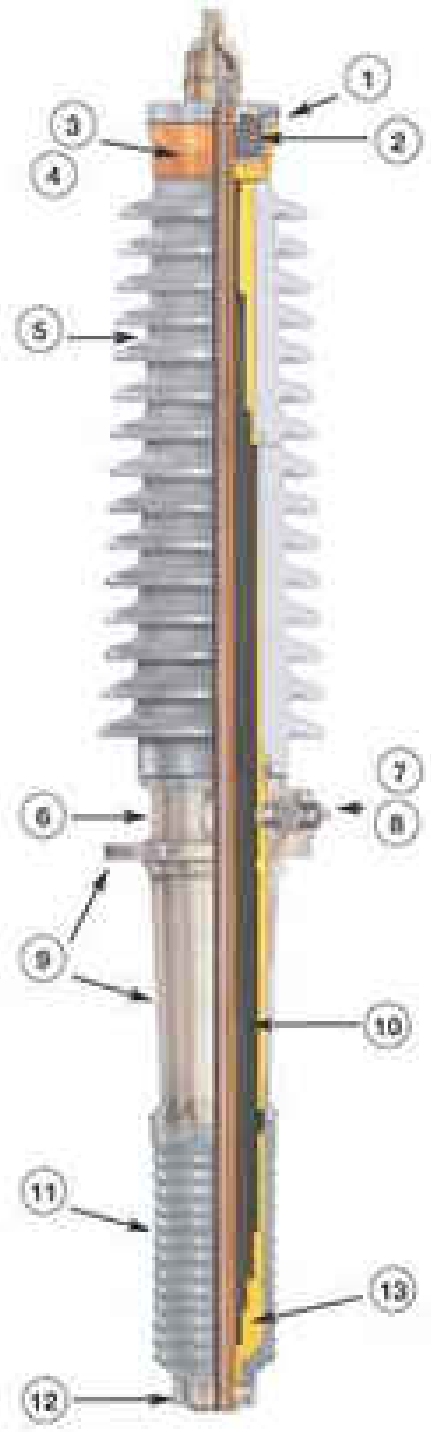
Dla poprawienia właściwości układu można zamiast okładzin pośrednich z folii metalowej stosować okładziny pośrednie z papieru grafitowego słaboprzewodzącego. Ułatwia to uzyskanie równomiernych rozkładów napięcia oraz poprawia wartość A dla powietrza do $A \approx 5$.



750 kV



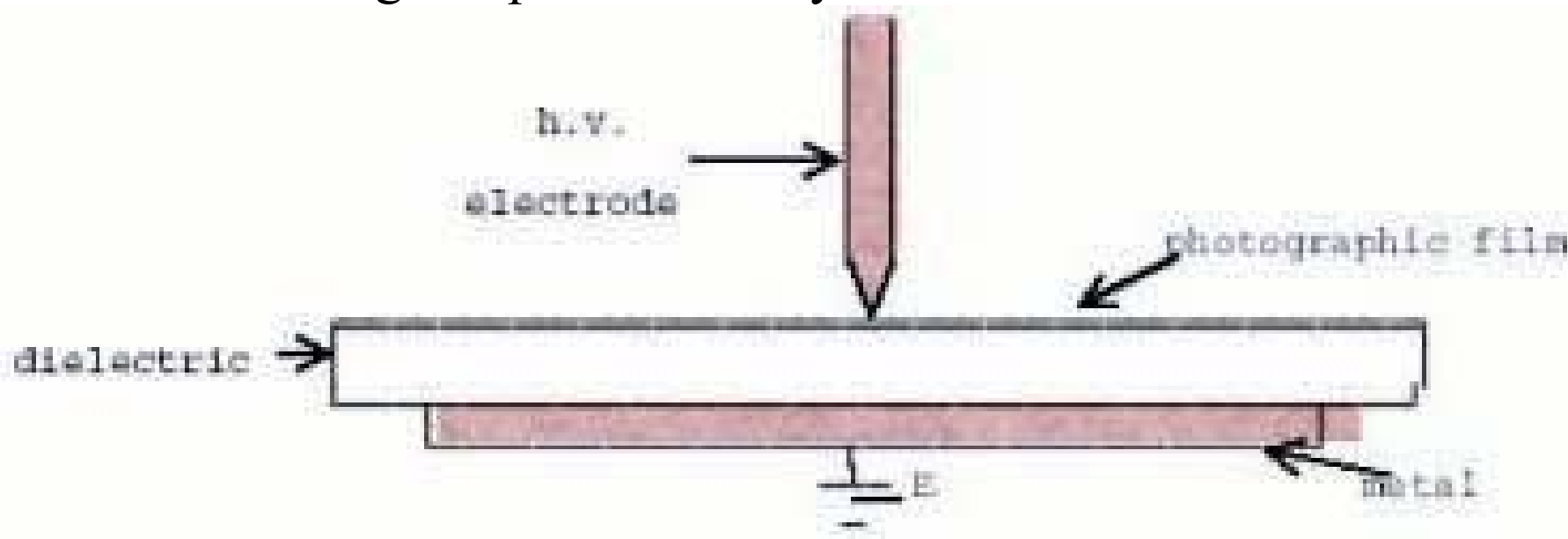
550 kV



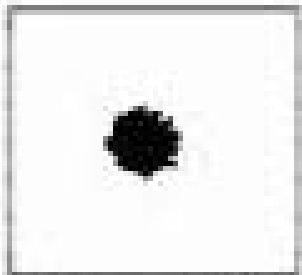
10. Paper-Foil Capacitor Core Conductive layers of aluminum foil with high dielectric paper are wound around the conductor and into the bushing core to produce uniformly valued capacitors in series. This capacitance grading distributes the voltage and the electrical field uniformly throughout the core. The core is vacuum-dried and impregnated with dried, degassed oil.

5.7.4. Klidonograf

Zjawisko wyładowań ślizgowych znajduje również pozytywne wykorzystanie praktyczne w urządzeniu zwanym klidonografem. Zasadę działania klidonografu przedstawia rysunek 5.28a.



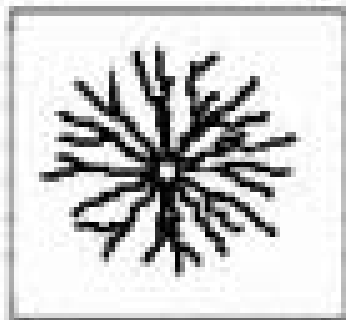
Do ostrzowej elektrody doprowadzone jest napięcie. Na dolnej uziemionej elektrodzie jest umieszczona warstwa dielektryka stałego i błona światłoczuła. Przy dostatecznie wysokim napięciu od elektrody ostrzowej będą się rozwijały iskry ślizgowe pozostawiając na błonie światłoczułej charakterystyczne figury wyładowcze zwane figurami Lichtenberga (rys. 5.28bc).



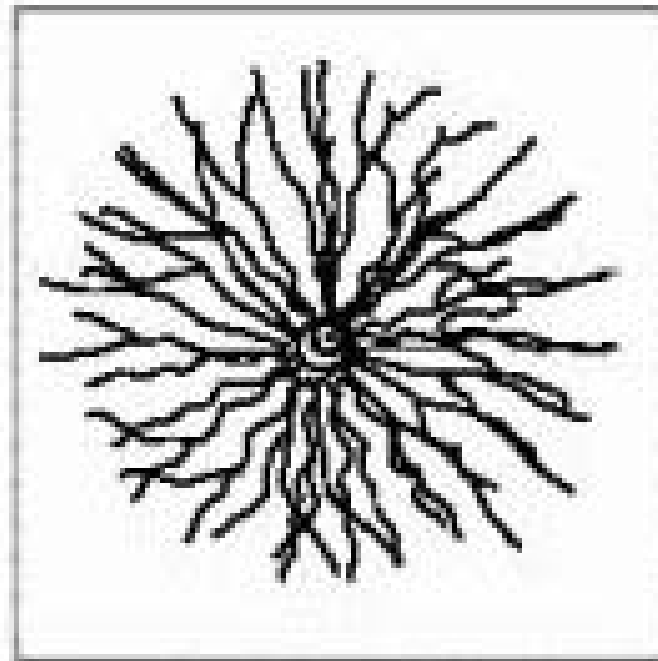
negative voltage



small positive voltage

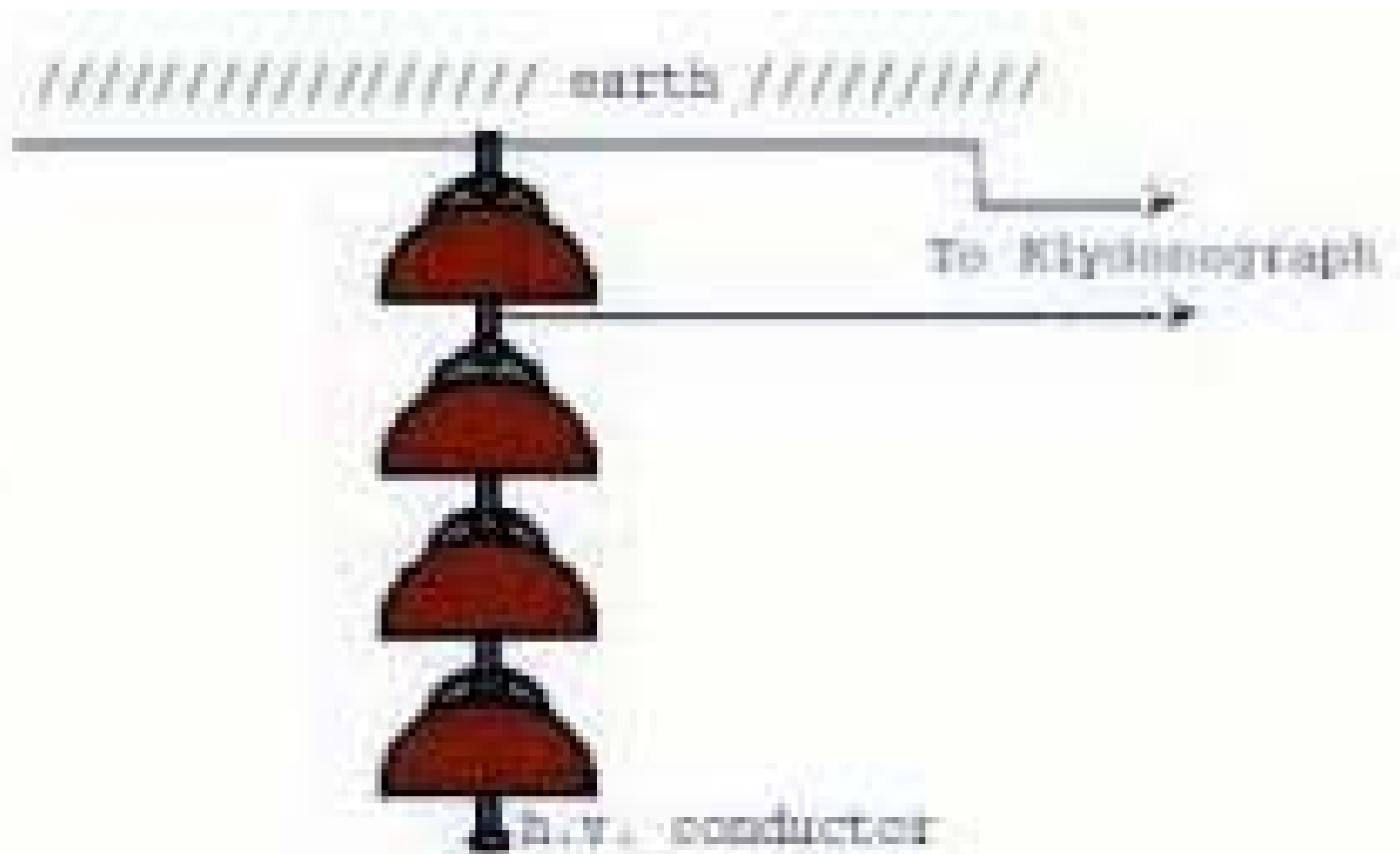


positive voltage



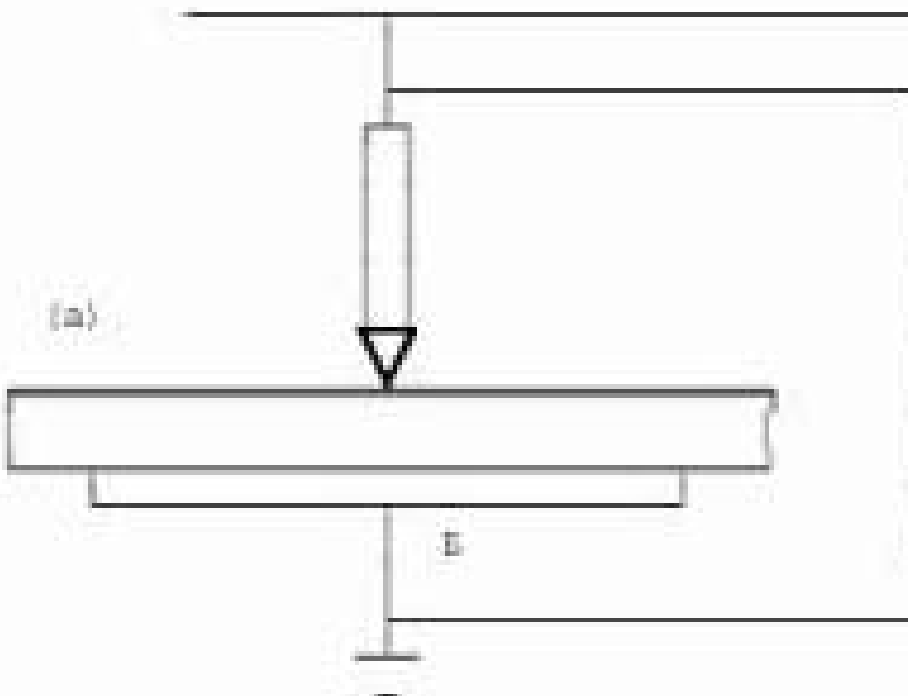
large positive voltage

Jak widać z rysunku 5.28 z kształtu figury można odczytać biegunowość napięcia, a średnica figury jest zależna od wartości szczytowej napięcia. Cechy powyższe pozwalają wykorzystywać klidonograf do rejestracji biegunowości i wartości szczytowej prądu wyładowań atmosferycznych (piorunowych).

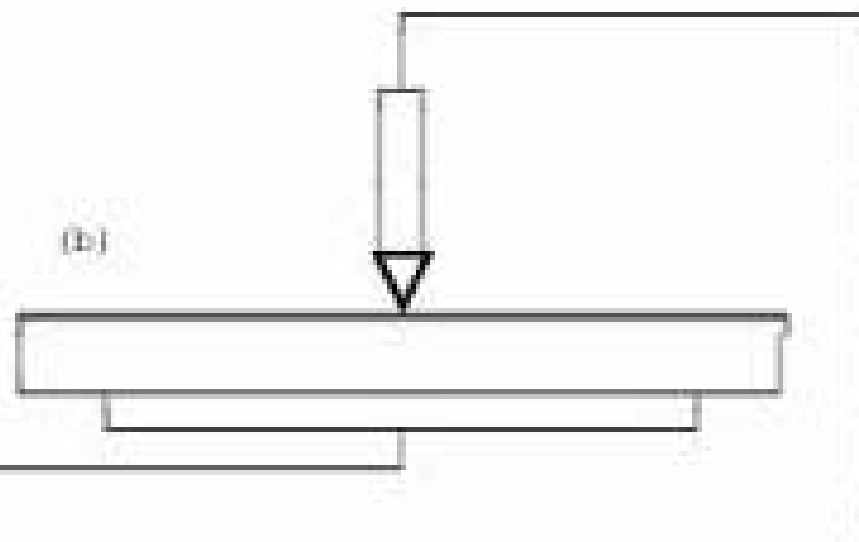


(b) Insulator string Potential divider

(a)



(b)

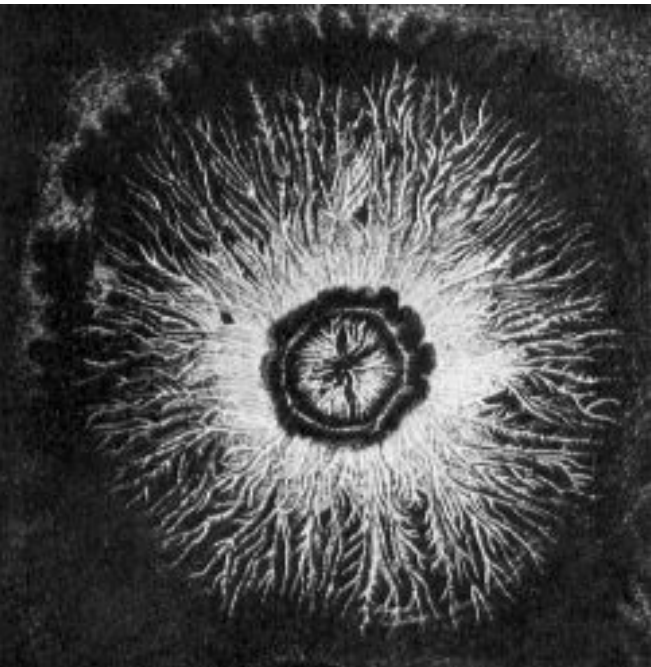




Georg Christoph Lichtenberg was born in Oberramstadt, near Darmstadt, on July 1, 1742.

Georg Christoph Lichtenberg was an experimental physicist, an astronomer, a mathematician, a practicing critic both of art and literature. As satirical writer, he is the best known for his ridicule of metaphysical and romantic excesses. He discovered in 1777 the basic principle of modern xerographic copying; the images that he reproduced are still called "Lichtenberg figures."

Died in Göttingen on February 24, 1799.



5.7.5. Wyładowania na powierzchniach zabrudzonych

Jeśli powierzchnia dielektryka stałego jest zabrudzona, a na dodatek zawilgocona wówczas rezystancje powierzchniowe (rys. 5.22) maleją. Wzdłuż powierzchni dielektryka płyną prądy o charakterze czynnym. Tego rodzaju wyładowania występują zarówno przy napięciu stałym jak i przy napięciu przemiennym. Przepływający prąd wysusza zanieczyszczenia stąd zapalenie się łuku elektrycznego może zaistnieć dopiero przy prądach powyżej **1 A** i wymaga dość długiego czasu. Ze względu na konieczne czasy oddziaływania napięcia do momentu zapalenia się łuku, wyładowania tego rodzaju nie odgrywają większej roli przy napięciach udarowych.

Problem wyładowań zabrudzeniowych dotyczy głównie izolatorów liniowych pracujących w atmosferze o dużym zapyleniu czy zasoleniu np. w pobliżu hut, kopalń, cementowni czy na wybrzeżu.

Środki zaradcze to wydłużenie drogi wzdłuż powierzchni poprzez zwiększenie długości izolatora lub zwiększenie szerokości czy liczby kłoszy, przerywanie drogi upływu prądu przez ostre krawędzie izolatora itd.

Ze względu na warunki zabrudzeniowe dzieli się obszar kraju na cztery strefy zabrudzeniowe, w których zróżnicowano kryteria doboru izolatorów. W strefie o dużych zabrudzeniach droga upływu po powierzchni izolatora musi być znacznie dłuższa niż w strefie gdzie zabrudzenia są niewielkie.