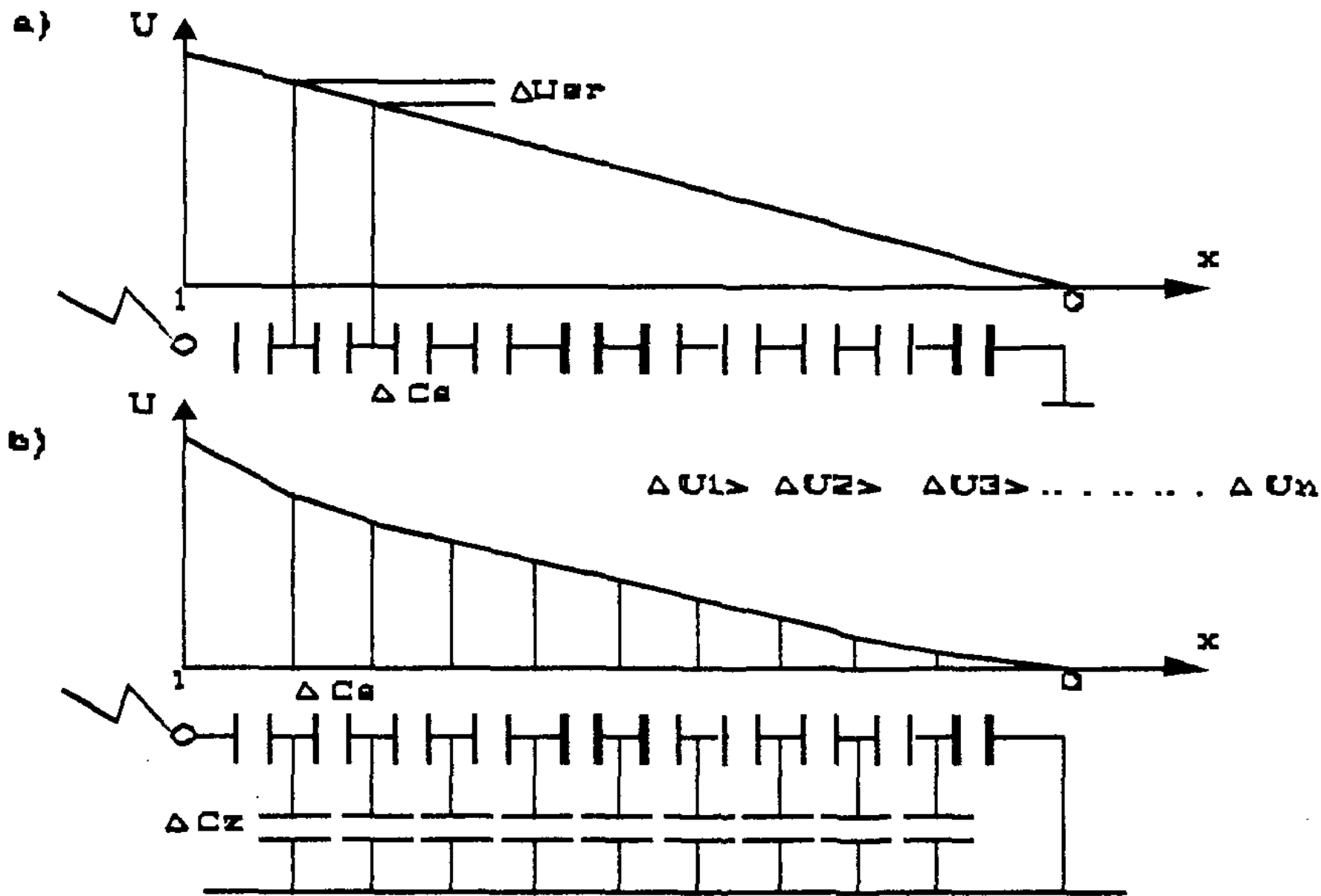


3.4. ROZKŁAD POTENCJAŁÓW W SZEREGOWYM UKŁADZIE POJEMNOŚCI

3.4.1. Wprowadzenie

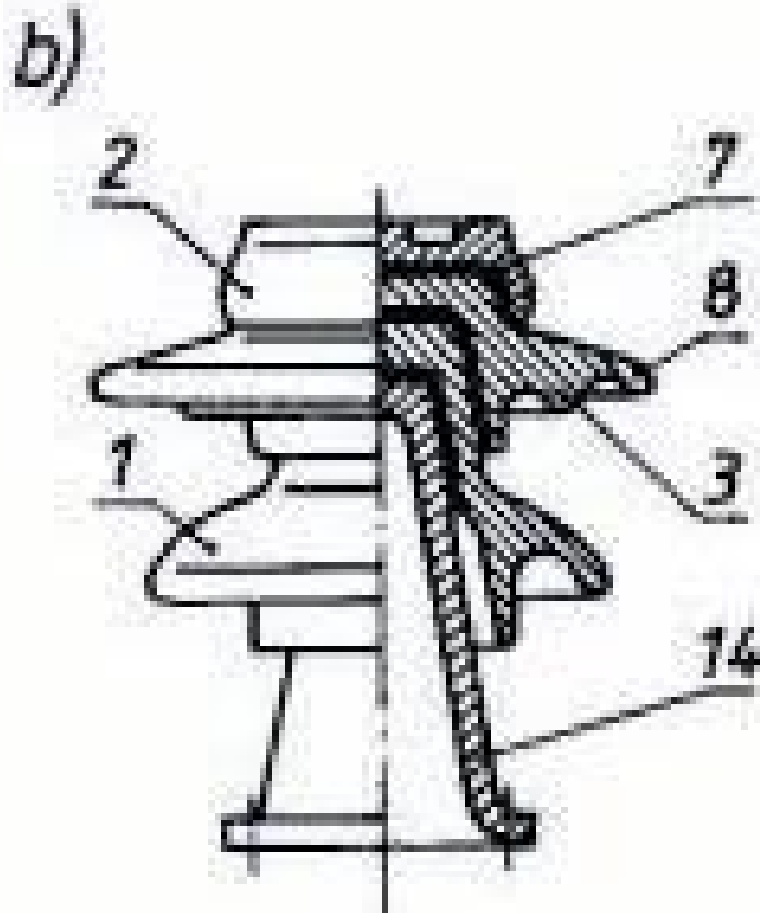
Typowym wysokonapięciowym schematem zastępczym jest układ szeregowo połączonych pojemności odwzorowujących warstwy czy segmenty układu izolacyjnego. W takim szeregowym, idealnym układzie jednakowych pojemności rozkład napięć jest liniowy i na każdą z pojemności przypada jednakowy przyrost napięcia oznaczony na rysunku 3.20a jako ΔU_{sr} . Jednakże w układach rzeczywistych oprócz pojemności szeregowych ΔC_s występują dodatkowe pasożytnicze pojemności doziemne ΔC_z . Zatem rzeczywisty schemat zastępczy będzie miał postać jak na rysunku 3.20b.



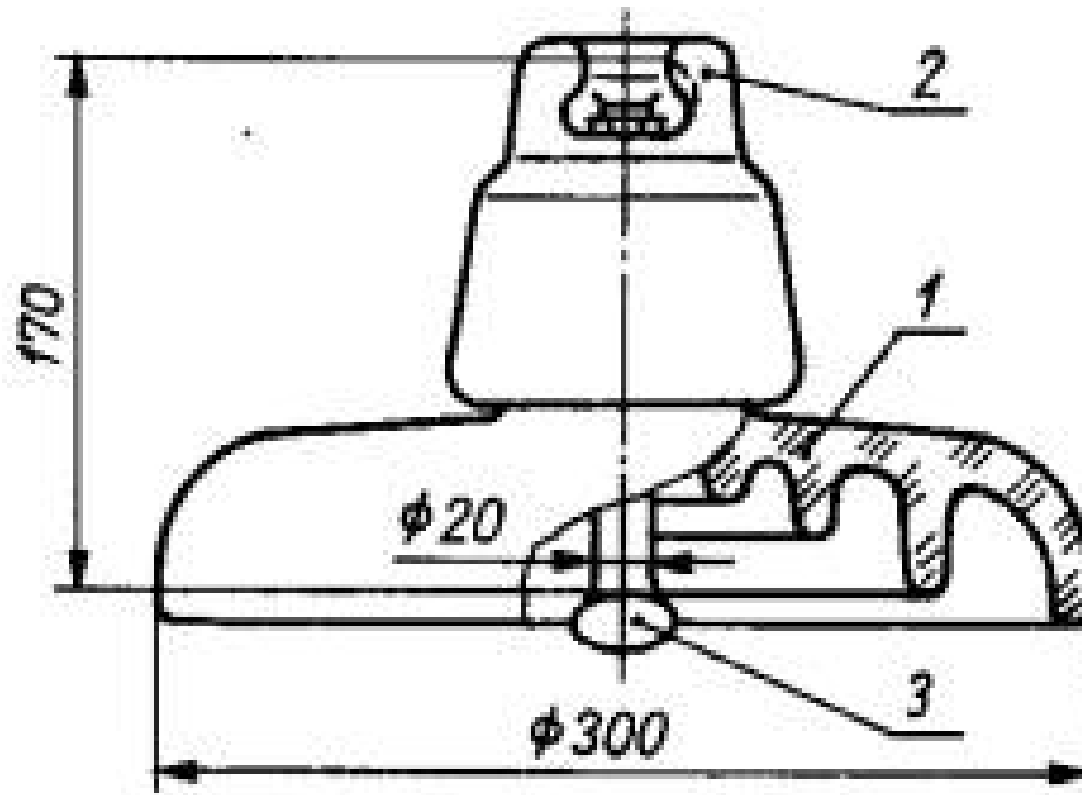
Rys. 3.20. Rozkład napięcia na szeregowym połączeniu pojemności: a) w układzie bez pojemności pasozytniczych, b) z uwzględnieniem pasozytniczych pojemności doziemnych

Przykładami układów izolacyjnych odwzorowywanych schematem zastępczym z rysunku 3.20b są np.:

- kolumna izolatorów stacyjnych wsporczych;



- łańcuch izolatorów liniowych, wiszących kołpakowych;



- uzwojenia transformatorów, przekładników i maszyn przy szybkozmiennych przebiegach udarowych (patrz rozdz. 13);
- iskierniki wielokrotne klasycznych odgromników zaworowych (patrz rozdz. 12);
- wyłączniki wieloprzerwowe itd.

3.4.2. Rozkład napięcia w układzie rzeczywistym

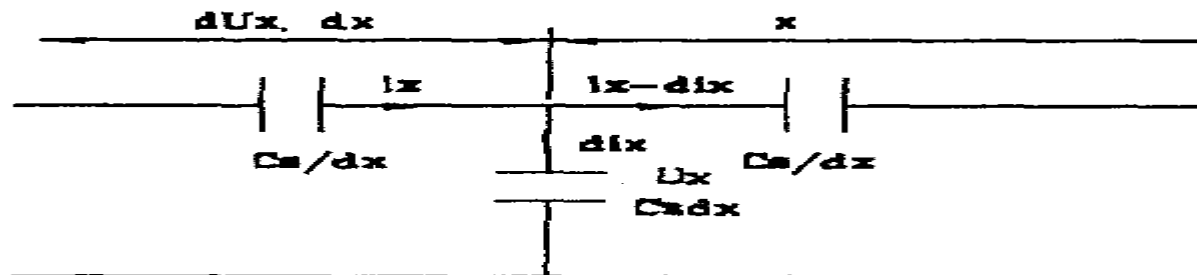
Punktem wyjścia do rozważań jest schemat pojemnościowy z rysunku 3.20b. W każdym węźle schematu prąd rozplywa się na dwie części i część prądu odpływa do ziemi poprzez pojemności ΔC_z . Zatem im bliżej uziemionego zacisku tym uzyskuje się mniejsze spadki napięcia ΔU na pojemnościach szeregowych, a rozkład napięcia jest dany krzywą łamaną jak na rysunku 3.20b.

Przy nieskończenie dużej liczbie elementów schematu uzyskuje się możliwość stosowania rachunku różniczkowego. Przy tym pojemności szeregowie i doziemne można zdefiniować jako:

$$\left. \begin{aligned} \Delta C_s &= \frac{C_s}{\Delta x} \\ \Delta C_z &= C_z \cdot \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

gdzie C_z i C_s to całkowite pojemności doziemne i szeregowie liczone jako samotne układy równoległe lub szeregowie. Innymi słowy C_z oblicza się pomijając elementy wchodzące w skład C_s i odwrotnie.

Przechodząc do nieskończenie małych przyrostów uzyskuje się schemat złożony z elementów jak na rysunku 3.21, gdzie odległość elementu x od punktu uziemionego jest odległością względną odniesioną do całkowitej długości układu izolacyjnego.



Rys. 3.21. Element schematu zastępczego o parametrach rozłożonych, w szeregowym układzie pojemności z pasywnymi pojemnościami doziemnymi

Dla takiego schematu można, z równań Kirchoffa, napisać układ równań:

$$\left. \begin{aligned} dU_x &= i_x \cdot \frac{1}{\omega \cdot \frac{C_s}{dx}} \\ di_x &= \omega \cdot C_z \cdot dx \cdot U_x \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

Z równań tych eliminując prąd uzyskuje się równanie:

$$\frac{di_x}{dx} = \omega \cdot C_s \cdot \frac{d^2 U_x}{dx^2} \quad (3.36)$$

z którego po podstawieniu za $\frac{di_x}{dx}$ z drugiego z równań (3.35) uzyskuje się:

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = \alpha^2 \cdot U_x \quad \text{gdzie} \quad \alpha = \sqrt{\frac{C_z}{C_s}} \quad (3.37)$$

Rozwiązaniem ogólnym równania (3.37) jest:

$$U_x = A_1 \cdot e^{\alpha \cdot x} + A_2 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (3.38)$$

gdzie stałe A_1 i A_2 można wyznaczyć z warunków brzegowych dla punktu uziemionego ($U_x = 0$ dla $x = 0$) oraz dla punktu początkowego o napięciu U ($U_x = U$ dla $x = 1$). Stąd uzyskuje się układ równań:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= A_1 + A_2 \\ U &= A_1 \cdot e^{\alpha} + A_2 \cdot e^{-\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{U}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} \\ A_2 &= \frac{-U}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

co po podstawieniu zależności (3.40) do (3.38) daje w wyniku:

$$U_x = \frac{e^{\alpha \cdot x} - e^{-\alpha \cdot x}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} \cdot U \quad (3.41)$$

Wprowadzając zależność na **sinh x** oraz **sinh αx** uzyskuje się ostatecznie:

$$U_x = \frac{\sinh(\alpha \cdot x)}{\sinh(\alpha)} \cdot U \quad (3.42)$$

Dla $\alpha > 3$ wzór (3.42) można uprościć ponieważ $\sinh(\alpha \cdot x) \approx \frac{e^{\alpha \cdot x}}{2}$ oraz $\sinh(\alpha) \approx \frac{e^{\alpha}}{2}$, stąd

dla $\alpha > 3$ w przybliżeniu jest:

$$U_x \approx U \cdot e^{-\alpha \cdot (1-x)} \quad (3.43)$$

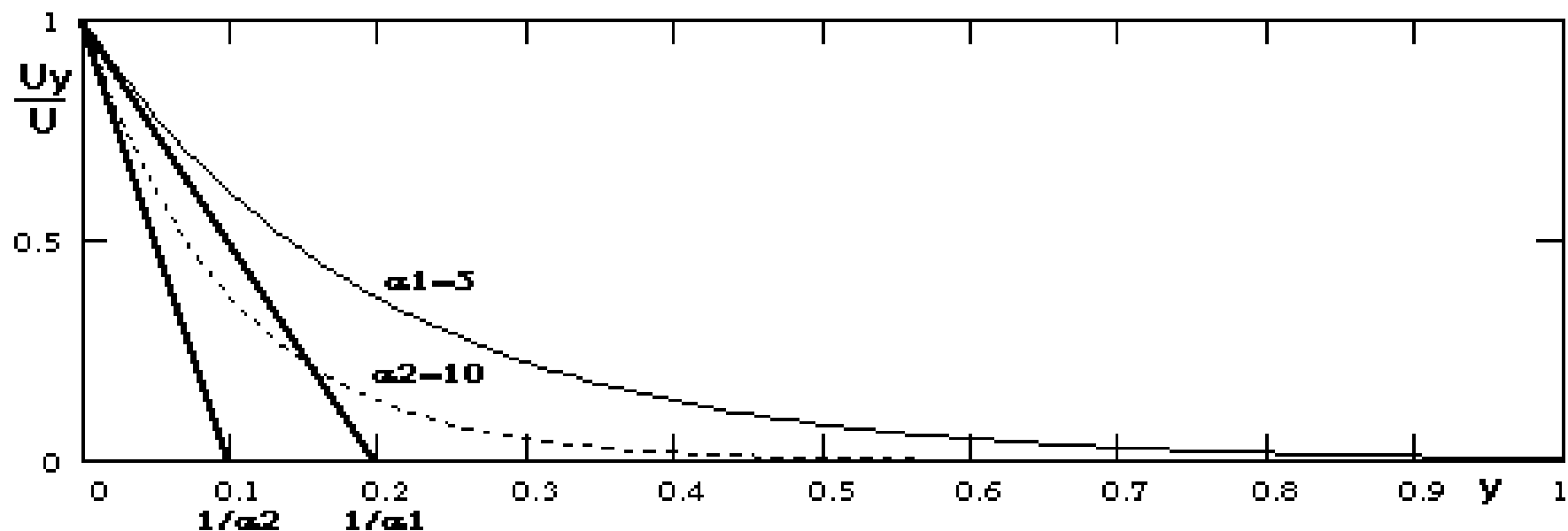
gdzie: $1 \geq x \geq 0$

lub po podstawieniu $y = 1 - x$ (gdzie y jest teraz odległością liczoną od zacisku o napięciu U):

$$U_y = U \cdot e^{-\alpha \cdot y} \quad (3.44)$$

gdzie: $1 \leq y \leq 0$

Zatem ostatecznie uzyskano wykładniczy rozkład napięcia zaprezentowany na rysunku 3.22. Maksymalny spadek napięcia występuje w pobliżu zacisku napięciowego, a minimalny w pobliżu zacisku uziemionego.



$x := 0, 0.01 \dots 1$

$\alpha 1 := 1$

$\alpha 2 := 3$

$\alpha 3 := 5$

$\alpha 4 := 10$

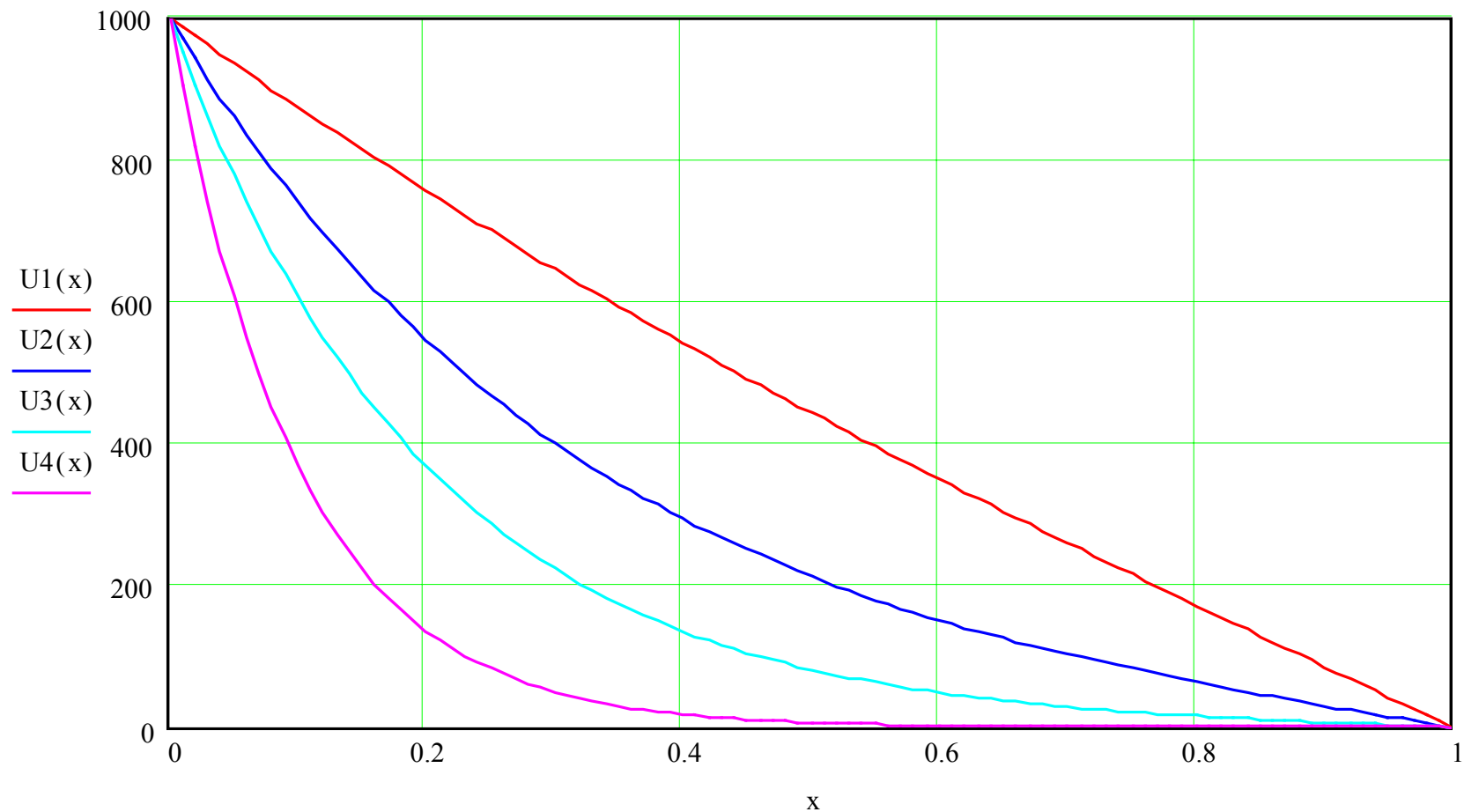
$U := 1000$

$$U1(x) := \frac{\exp[\alpha 1 \cdot (1 - x)] - \exp[-\alpha 1 \cdot (1 - x)]}{\exp(\alpha 1) - \exp(-\alpha 1)} \cdot U$$

$$U2(x) := \frac{\exp[\alpha 2 \cdot (1 - x)] - \exp[-\alpha 2 \cdot (1 - x)]}{\exp(\alpha 2) - \exp(-\alpha 2)} \cdot U$$

$$U3(x) := \frac{\exp[\alpha 3 \cdot (1 - x)] - \exp[-\alpha 3 \cdot (1 - x)]}{\exp(\alpha 3) - \exp(-\alpha 3)} \cdot U$$

$$U4(x) := \frac{\exp[\alpha 4 \cdot (1 - x)] - \exp[-\alpha 4 \cdot (1 - x)]}{\exp(\alpha 4) - \exp(-\alpha 4)} \cdot U$$



W oparciu o zależność (3.44) można obliczyć w przybliżeniu wartość maksymalnego spadku napięcia przy zacisku napięciowym

$$\frac{\Delta U_{ym}}{\Delta y} = \left[\frac{dU_y}{dy} \right]_{y=0} \quad (3.45)$$

czyli

$$\Delta U_{ym} \approx -\alpha \cdot U \cdot \Delta y \quad (3.46)$$

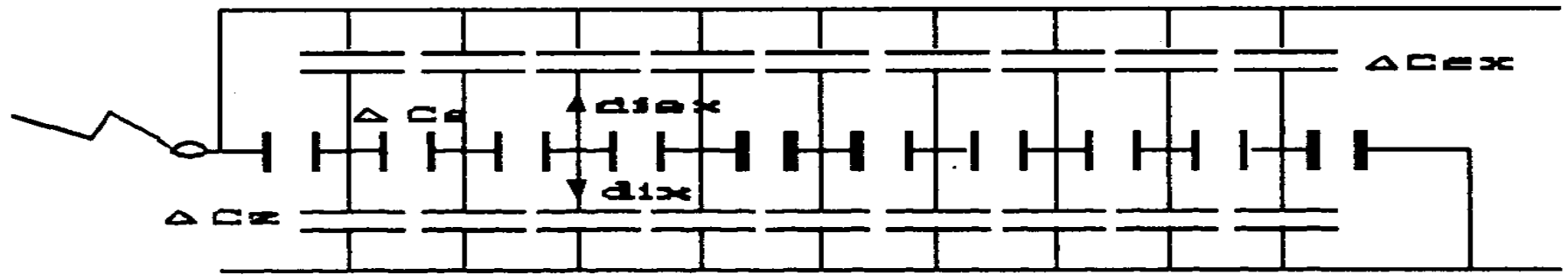
Zatem spadek napięcia rośnie ze wzrostem wartości współczynnika α wyrażonego wzorem (3.37). Należy przy tym brać pod uwagę, iż ze zmniejszaniem się Δy , czyli ze wzrostem liczby elementów w łańcuchu pojemności, α rośnie. Minus we wzorze (3.46) świadczy o obniżaniu się napięcia w miarę oddalania się od zacisku napięciowego. Jak więc wynika z wykresu 3.22 i z wzoru (3.46) zwiększanie liczby szeregowych elementów układu izolacyjnego (np. liczby izolatorów w łańcuchu izolatorów liniowych) może nie powodować wzrostu wytrzymałości, a nawet przeciwnie wskutek wzrostu napięcia na pierwszym ogniwie całkowita wytrzymałość może maleć.

3.4.3. Ekrany elektrostatyczne

Aby wyeliminować niekorzystne zjawisko nieliniowego rozkładu napięcia w szeregowych układach pojemnościowych z doziemnymi pojemnościami pasożytniczymi stosuje się odpowiednie ekrany dołączane do zacisku napięciowego. Ekran taki wprowadza do schematu zastępczego dodatkowe pojemności C_{ex} (rys. 3.23). W rozwiązaniach praktycznych stosuje się ekrany w postaci pierścienia lub torusa. Należy pamiętać, że ekran znajduje się pod pełnym napięciem ekranowanego urządzenia.



Korzystając ze schematu zastępczego uzupełnionego o pojemności wprowadzone przez ekran (rys. 3.23) oraz wprowadzając, przez analogię do oznaczeń (3.34), oznaczenie $\Delta C_{ex} = C_{ex} \Delta x$ i zakładając, że prąd wprowadzony przez ekran do dowolnego węzła schematu di_{ex} jest równy prądowi odpływającemu w tymże węźle do ziemi, uzyska się stan idealnego ekranowania, a więc charakteryzujący się liniowym rozkładem napięcia na pojemnościach szeregowych, jak wówczas gdy w rozdziale 3.4.1 rozważano schemat bez pojemności pasożytniczych.



Rys. 3.23. Schemat zastępczy z uwzględnieniem pojemności ekranu

Zatem dla $di_{ex} = di_e$:

$$\omega \cdot (U - U_x) \cdot C_{ex} \cdot \Delta x = \omega \cdot U_x \cdot C_z \cdot \Delta x \quad (3.47)$$

Ponieważ przy założeniu liniowości rozkładu napięcia można przyjąć, że $U_x = U \cdot x$ zatem z wzoru (3.47) można określić pojemność ΔC_{ex} ekranu idealnego:

$$\Delta C_{ex} = C_z \cdot \frac{x}{1-x} \cdot \Delta x \quad (3.48)$$

skąd dla wybranych wartości x :

$x = 0$	$\Delta C_{ex} = 0$
$x = 1/2$	$\Delta C_{ex} = \Delta C_z$
$x = 1$	$\Delta C_{ex} = \infty$

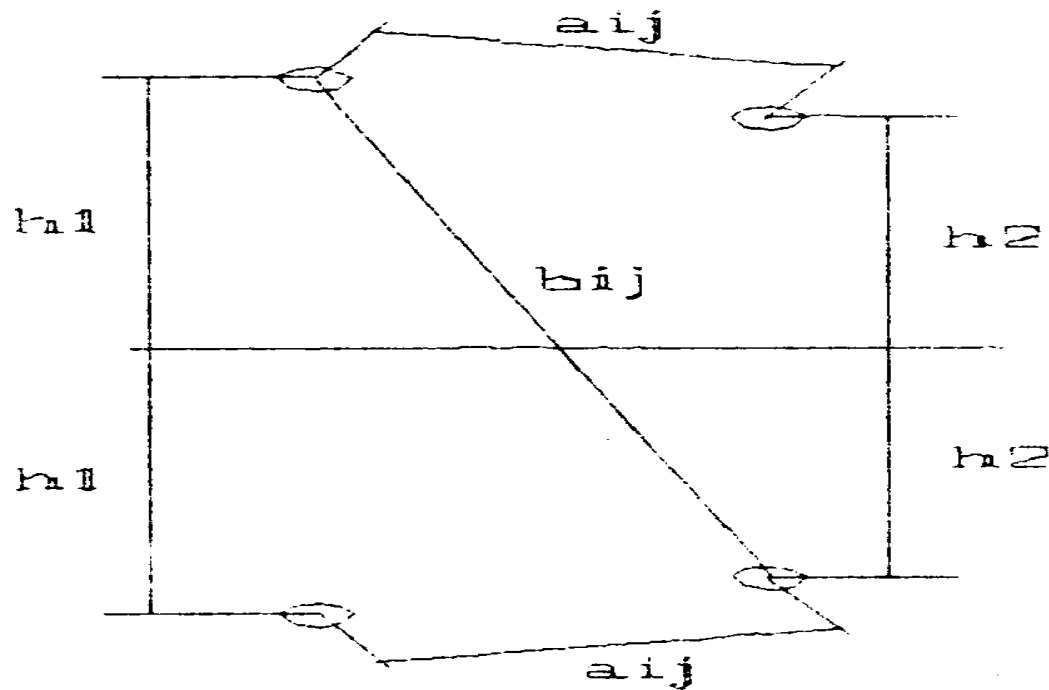
Dokładne spełnienie warunków wzoru (3.48) jest możliwe jedynie przy zastosowaniu ekranów o bardzo dużych wymiarach i skomplikowanych kształtach (hiperboloidea obrotowa). W rozwiązaniach praktycznych poprzestaje się na częściowym ekranowaniu za pomocą wzmiankowanych już, stosunkowo prostych, ekranów pierścieniowych lub podobnych.

Dla przypadku gdy w układzie izolacyjnym można wyróżnić rzeczywiście n ogniw, jak to ma miejsce w przypadku łańcucha izolatorów liniowych, przyjmując, że Δx to jedno ogniwo, x to ogniwo k -te, a względna długość układu l to n ogniw, wzór (3.48) przybierze postać

$$\Delta C_{ex} = C_z \cdot \frac{1}{\frac{n}{k} - 1} \quad (3.49)$$

Wzór powyższy wykorzystuje się przy analizie rozkładu napięcia dla łańcuchów lub kolumn izolatorów.

3.5. NATEŻENIE POLA ELEKTRYCZNEGO NA PRZEWODACH LINII NAPOWIETRZNYCH



Rys. 3.24. Ilustracja do
metody odbić zwierciadlanych

3.5.1. Wprowadzenie

W liniach napowietrznych, ze względu na większą od 1 liczbę przewodów linii, do obliczania natężenia pola elektrycznego na przewodach nie można stosować wzorów dla układu walec-płyta podanych w rozdziale 3.3. Natężenie pola na powierzchni przewodu oblicza się przy wykorzystaniu metody zwierciadlanego odbicia względem płaszczyzny ziemi, z zastosowaniem współczynników potencjalnych Makswella: współczynnika potencjalnego własnego (oznaczenia jak na rys. 3.24):

$$\gamma_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_i}{r_i} \right) \quad (3.50)$$

i współczynnika potencjalnego wzajemnego:

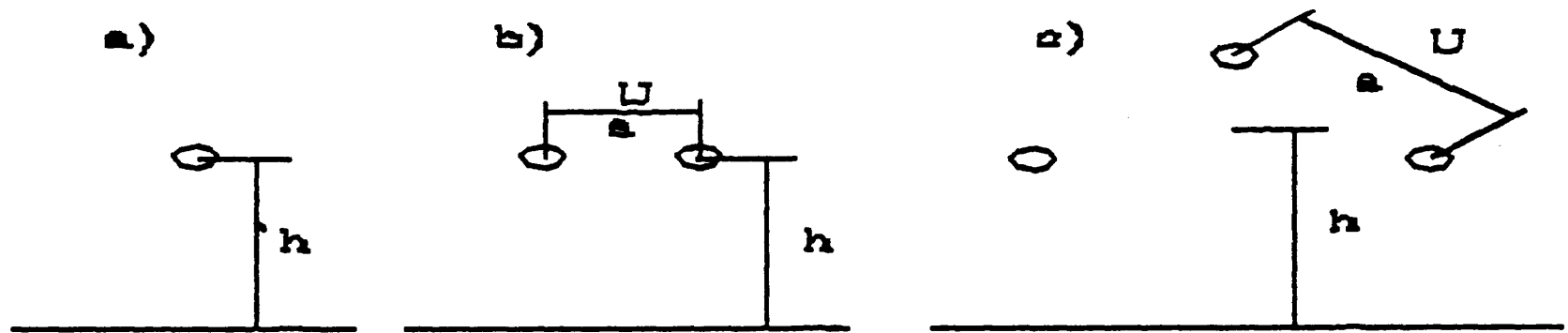
$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot b_{ij}}{a_{ij}} \right) \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_i}{a_{ij}} \right) \quad (3.51)$$

Wykorzystując właściwości superpozycji potencjałów od poszczególnych ładunków (podobnie jak w metodzie ładunków pozorowanych z rozdz. 3.2.1.3) uzyskuje się układ równań:

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = \gamma_{11} \cdot q_1 + \gamma_{12} \cdot q_2 + \dots + \gamma_{1n} \cdot q_n \\ \hline U_n = \gamma_{n1} \cdot q_1 + \gamma_{n2} \cdot q_2 + \dots + \gamma_{nn} \cdot q_n \end{array} \right\} \quad (3.52)$$

Tą drogą, dla symetrycznych napięciowo i geometrycznie (jednakowe odległości między przewodami) układów, można dojść do zależności $K = f(U)$. Np. dla przewodu samotnego, linii jednofazowej i trójfazowej w układzie trójkąta równobocznego (rys. 3.25) zależności te wynoszą odpowiednio:

$$K = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{r}\right)}; \quad K = \frac{\frac{U}{2}}{r \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right)}; \quad K = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{r \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (3.53)$$



Rys. 3.25. Przykłady układów przewodów linii napowietrznych: a) dla samotnego przewodu, b) dla dwóch przewodów w układzie płaskim, c) dla linii trójfazowej z przewodami w układzie trójkąta równobocznego:

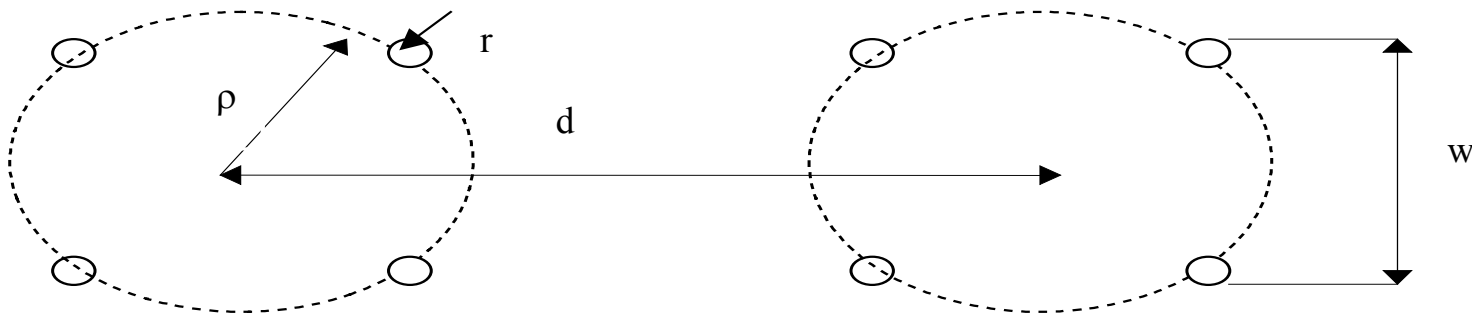
Zatem dla symetrycznych linii wieloprzewodowych natężenia pola elektrycznego na przewodach linii nie zależą od wysokości zawieszenia przewodu. Decydującym parametrem jest promień przewodu. Wpływ odległości między przewodami jest znikomy gdyż, jak widać we wzorach (3.53), odległość występuje pod logarytmem. Jedyną drogą zmniejszenia natężeń pola na powierzchni przewodów jest zastosowanie dostatecznie dużego promienia przewodu. Jednakże promień przewodu jest dobierany ze względu na dopuszczalną gęstość prądu i zwiększanie promienia, a więc i przekroju poprzecznego przewodu jest nieuzasadnione.

W celu obniżenia wartości natężeń pola elektrycznego na przewodach stosuje się dwa następujące sposoby:

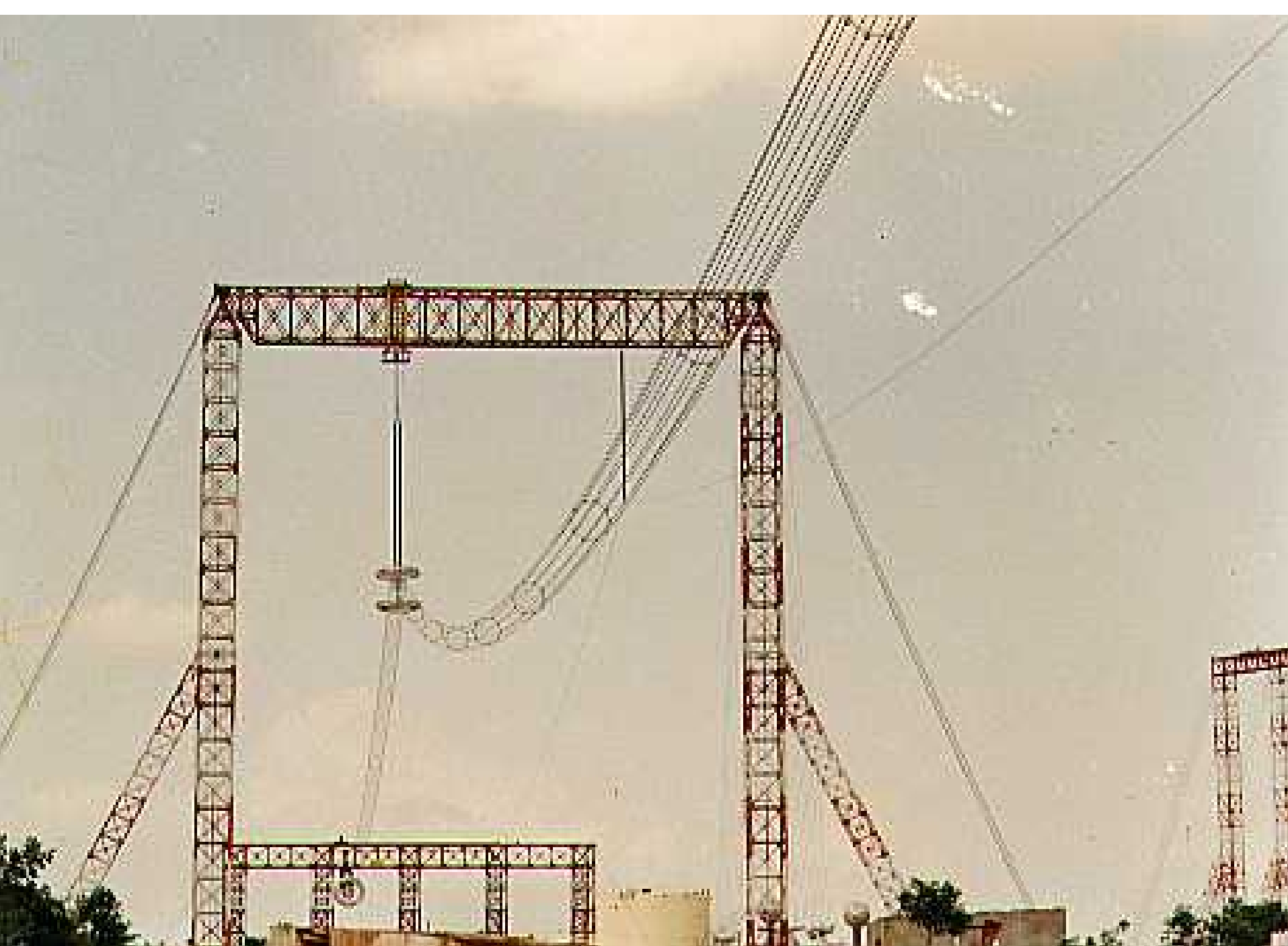
1. Przewody puste w środku, rurowe (np. oszynowanie polskiej stacji energetycznej 750 kV);
2. Przewody wiązkowe (poczynając od linii 400 kV).

3.5.2. Przewody wiązkowe

Jeśli przewód o danej powierzchni przekroju i przy danym promieniu zamienić na n przewodów o odpowiednio mniejszych powierzchniach przekroju (a więc i promieniach), tak dobranych, by sumaryczne pole przekroju pozostało nie zmienione i te przewody rozmieścić na obwodzie okręgu to uzyska się przewód zwany przewodem wiązkowym. Przykład przewodów wiązkowych (wiązka czteroprzewodowa) dwóch sąsiednich faz pokazano na rysunku 3.26. Rysunek ten definiuje również parametry przewodów wiązkowych.



Rys. 3.26. Wymiary przewodu wiązkowego: r - promień przewodu składowego, ρ - promień wiązki, d - odległość między środkami przewodów wiązkowych sąsiednich faz, w - odległość przewodów w wiązce





Dla pojedynczego przewodu, natężenie pola elektrycznego, w zależności od ładunku znajdującego się na przewodzie, wynosi:

$$K = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l \cdot r} \quad (3.54)$$

natomiast w przypadku przewodu wiązkowego ładunek rozkłada się na poszczególne przewody wiązki czyli, w przybliżeniu:

$$K = \frac{\frac{q'}{n}}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l \cdot r} \quad (3.55)$$

gdzie q' jest większe (lecz znacznie mniej niż n -krotnie) od q ze względu na to, że pojemność wiązki jest większa od pojemności pojedynczego przewodu; n jest liczbą przewodów składowych w wiązce.

Promień zastępczy wiązki oblicza się z zależności:

$$R_z = \sqrt{n \cdot r \cdot \rho^{n-1}} \quad (3.56)$$

natomiast natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodu wiązkowego wyniesie:

$$K = \frac{\frac{U}{n}}{n \cdot r \cdot \ln\left(\frac{a}{R_z}\right)} \quad (3.57)$$

Zakładając, że zużycie metalu w przewodzie wiązkowym jest takie samo jak w pojedynczym przewodzie, który wiązka zastępuje, czyli że promień pojedynczego przewodu jest równy $R_p = \sqrt{n} \cdot r$, gdzie n - liczba przewodów w wiązce, a r - promień przewodu składowego, można udowodnić, że iloraz natężenia pola na przewodzie wiązkowym do natężenia pola na pojedynczym przewodzie wynosi [5]:

$$\frac{K_w}{K_p} = \frac{1 + \frac{n-1}{2} \cdot \frac{r}{\rho}}{\sqrt{n}} \quad (3.58)$$

Przykładowe wyniki obliczeń według wzoru (3.58) zestawiono w tabeli 5. Jak widać już wiązka dwuprzewodowa skutecznie zmniejsza wartość natężenia pola na powierzchni przewodu.

T a b e l a 5 Wyniki obliczeń z wzoru (3.58)

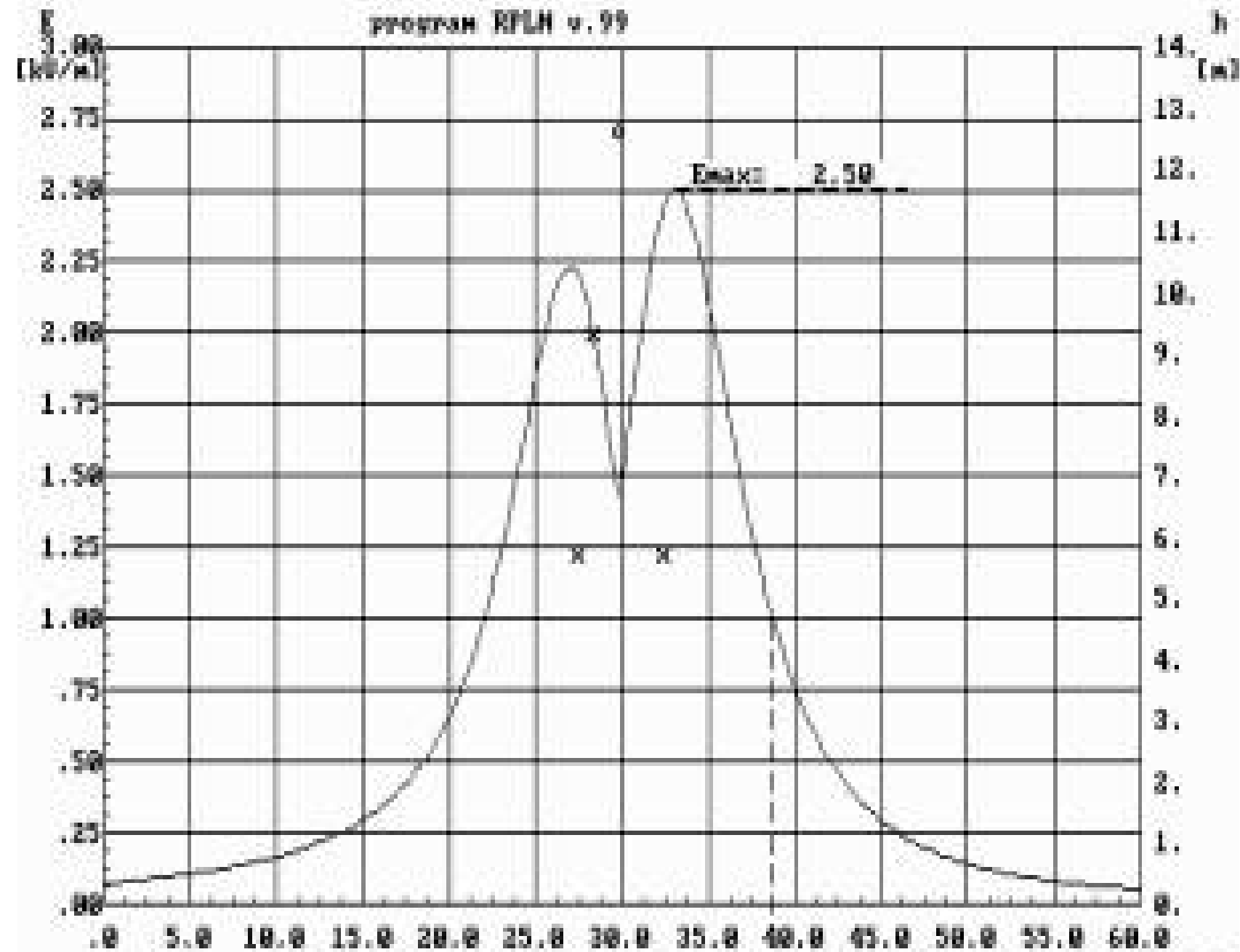
n	$\frac{K_w}{K_p} \cdot 100 \%$
2	74
3	64
4	55

Jednym z parametrów przewodu wiązkowego jest odległość między przewodami składowymi wiązki w (rys. 3.26). W klimacie Polski odległość ta jest uwarunkowana zjawiskiem sadzi lodowej. Przy w mniejszym od **40 cm** lód ma tendencję do łączenia się w tafłę między przewodami wiązki, co stanowiłoby zbyt duże zagrożenie wskutek parcia wiatru na przewody. Zatem stosuje się $w \geq 40 \text{ cm}$ co zapewnia równomierny rozkład lodu wzdłuż przewodu, chociaż lepiej, ze względu na natężenie pola na przewodzie, byłoby stosować odległość $w \approx 20 \text{ cm}$.

Przewody wiązkowe, których teoria została opracowana dla potrzeb zmniejszania natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu linii przesyłowej EHV, znalazły ostatnio nowe zastosowanie także w liniach ŚN do celów budowy tzw. linii o spójnej budowie. Linie takie charakteryzują się, wskutek zastosowania przewodu wiązkowego, podwyższoną mocą naturalną

$$P_n = \frac{U_n^2}{Z_f} \quad (\text{gdzie } Z_f - \text{impedancja falowa linii; patrz rozdz. 11}), \text{ co poprawia warunki pracy systemu}$$

energetycznego poprzez samokompensację mocy biernej linii (rozwinięcie tego zagadnienia można znaleźć w [18]).



$x_1 = 28.73$

