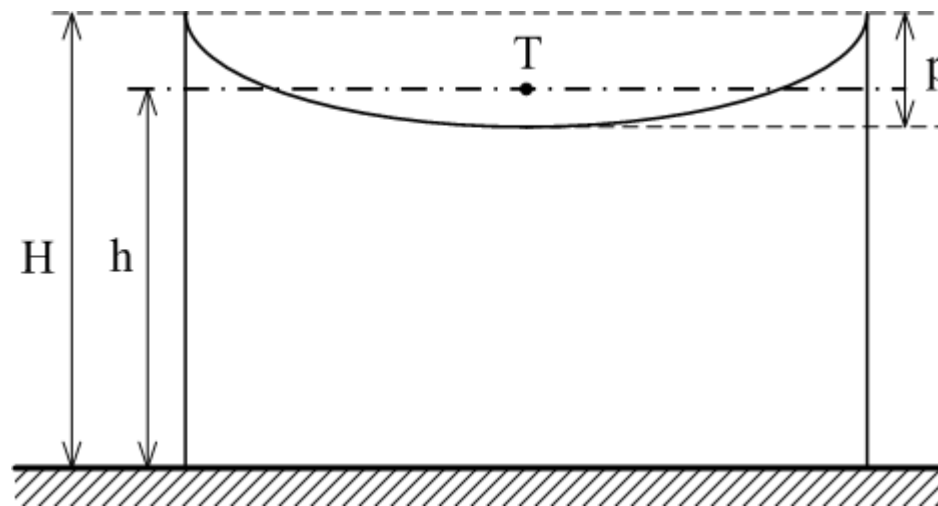


## Kapacity venkovních vedení

Vodiče stejné, přímkové, rovnoběžné navzájem i s povrchem země.



Řetězovka ( $\cosh x$ ) nahrazena přímkou procházející těžištěm:

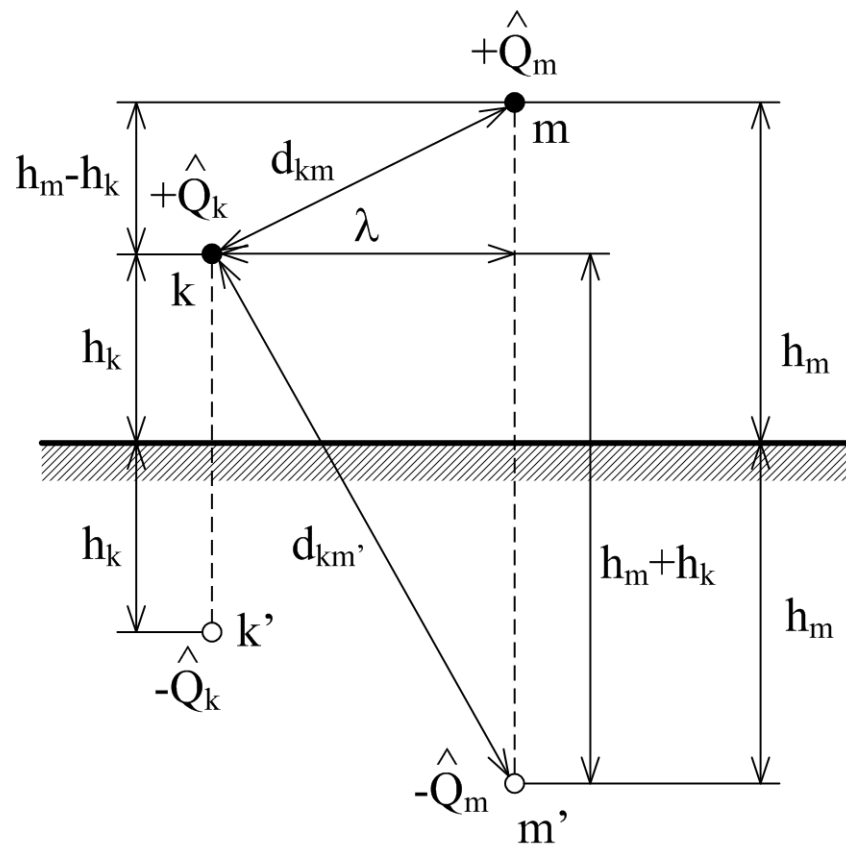
$$h = H - 0,7p \quad (\text{m})$$

H...závěsná výška

p...průhyb

h...výpočtová výška

El. potenciál v bodě P v soustavě  $n$  rovnoběžných vodičů ( $d_{kk'} \ll l$ ) a země s nulovým potenciálem  $\rightarrow$  metoda zrcadlení



$$\hat{U}_P = \sum_{k=1}^n (\hat{U}_{Pk} + \hat{U}_{Pk'}) = \sum_{k=1}^n \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}} \quad (\text{V}; \text{C}/\text{m}, \text{m}, \text{m})$$

Bod P na povrchu skutečného vodiče  $k$  ( $r_k \ll d_{km}$ ):

$$\hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \frac{\hat{Q}_m}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} = \sum_{m=1}^n \delta_{mk} \hat{Q}_m$$

( $d_{kk} = r_k$ ;  $d_{kk'} = 2h_k$ )

Bod na zemi

$$d_{zk} = d_{zk'}$$
$$\hat{U}_z = \sum_{m=1}^n \frac{\hat{Q}_m}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{zm'}}{d_{zm}} = \sum_{m=1}^n \frac{\hat{Q}_m}{2\pi\epsilon} \ln 1 = 0$$

Vlastní potenciálový součinitel vodiče  $k$  ( $m = k$ )

$$\delta_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_k}{r_k} \quad (m / F; F / m, m, m)$$

## Vzájemný potenciálový součinitel ( m ≠ k )

$$\delta_{km} = \delta_{mk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} \quad (m / F; F / m, m, m)$$

$$d_{km'} = \sqrt{(h_k + h_m)^2 + d_{km}^2 - (h_m - h_k)^2}$$

$$\delta_{km} = \delta_{mk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{\sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2}}{d_{km}}$$

## Úpravy

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F / m ; } \varepsilon_r = 1 ; \ln x = 2,3 \log x$$

$$\Rightarrow \delta_{kk} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h_k}{r_k} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

---

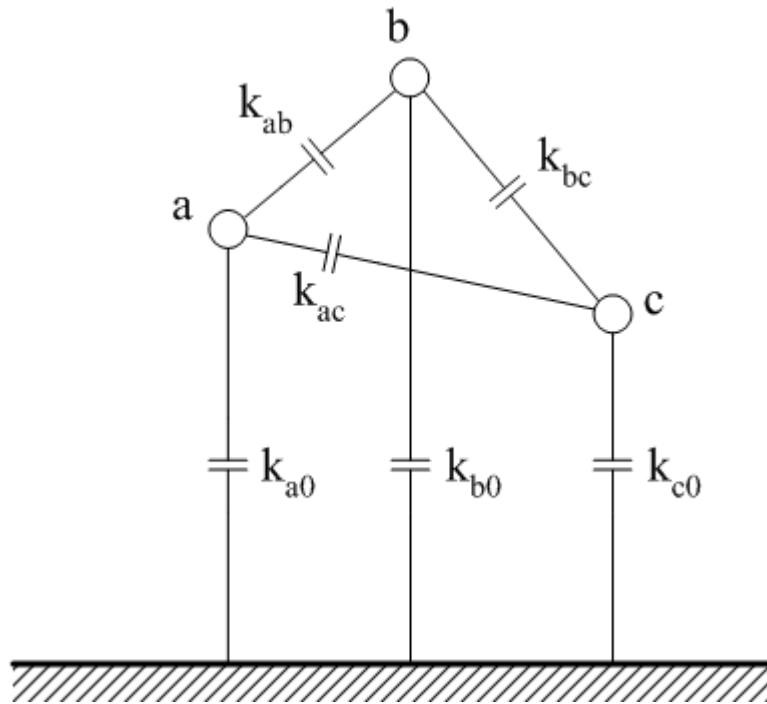
$$\delta_{\text{km}} = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h_k h_m + d_{\text{km}}^2}}{d_{\text{km}}} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

---

Maticově

$$(\hat{U}) = (\delta_{\text{km}})(\hat{Q})$$

## Jednoduché trojfázové vedení bez zemnicích lan



Dílčí kapacita k zemi:  $k_{x0}$

Dílčí kapacita vzájemná:  $k_{xy}$

Symetrická napětí

$$\hat{U}_a = \hat{U}_a \quad \hat{U}_b = \hat{a}^2 \hat{U}_a \quad \hat{U}_c = \hat{a} \hat{U}_a$$

## Náboje jednotlivých vodičů

$$\hat{Q}_a = k_{a0} \hat{U}_a + k_{ab} (\hat{U}_a - \hat{U}_b) + k_{ac} (\hat{U}_a - \hat{U}_c)$$

$$\hat{Q}_b = k_{b0} \hat{U}_b + k_{ab} (\hat{U}_b - \hat{U}_a) + k_{bc} (\hat{U}_b - \hat{U}_c)$$

$$\hat{Q}_c = k_{c0} \hat{U}_c + k_{ac} (\hat{U}_c - \hat{U}_a) + k_{bc} (\hat{U}_c - \hat{U}_b)$$

## Úpravou

$$\hat{Q}_a = (k_{a0} + k_{ab} + k_{ac}) \hat{U}_a - k_{ab} \hat{U}_b - k_{ac} \hat{U}_c$$

$$\hat{Q}_b = -k_{ab} \hat{U}_a + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc}) \hat{U}_b - k_{bc} \hat{U}_c$$

$$\hat{Q}_c = -k_{ac} \hat{U}_a - k_{bc} \hat{U}_b + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc}) \hat{U}_c$$

## Zavedení kapacitních součinitelů

$$\hat{Q}_a = c_{aa} \hat{U}_a + c_{ab} \hat{U}_b + c_{ac} \hat{U}_c$$

$$\hat{Q}_b = c_{ab} \hat{U}_a + c_{bb} \hat{U}_b + c_{bc} \hat{U}_c$$

$$\hat{Q}_c = c_{ac} \hat{U}_a + c_{bc} \hat{U}_b + c_{cc} \hat{U}_c$$

## Maticově

$$\begin{aligned}(\hat{Q}) &= (\mathbf{c}_{km})(\hat{U}) \\(\hat{Q}) &= (\delta_{km})^{-1}(\hat{U}) \quad \Rightarrow \quad (\mathbf{c}_{km}) = (\delta_{km})^{-1}\end{aligned}$$

## Postup:

geometrie  $\rightarrow (\delta_{km}) \rightarrow (\mathbf{c}_{km}) \rightarrow$  kapacity:

$$m = k : k_{k0} = \sum_{m=1}^n c_{km}$$

$$m \neq k : k_{km} = -c_{km}$$

Provozní kapacita – osamocený  $k$ -tý vodič má stejný náboj jako v soustavě  $n$  vodičů

$$\hat{C}_k = \frac{\hat{Q}_k}{\hat{U}_k} = \frac{k_{k0} \hat{U}_k + \sum_{m=1, m \neq k}^n k_{km} (\hat{U}_k - \hat{U}_m)}{\hat{U}_k}$$



$$\hat{C}_a = \frac{(k_{a0} + k_{ab} + k_{ac})\hat{U}_a - k_{ab}\hat{U}_b - k_{ac}\hat{U}_c}{\hat{U}_a}$$

$$\hat{C}_b = \frac{-k_{ab}\hat{U}_a + (k_{b0} + k_{ab} + k_{bc})\hat{U}_b - k_{bc}\hat{U}_c}{\hat{U}_b}$$

$$\hat{C}_c = \frac{-k_{ac}\hat{U}_a - k_{bc}\hat{U}_b + (k_{c0} + k_{ac} + k_{bc})\hat{U}_c}{\hat{U}_c}$$

Obecně

$$k_{a0} \neq k_{b0} \neq k_{c0}$$

$$k_{ab} \neq k_{bc} \neq k_{ac}$$

$$\hat{C}_a \neq \hat{C}_b \neq \hat{C}_c$$

→ proudová nesymetrie ( $\hat{I}_{kc} = j\omega\hat{Q}_k$ ) → transpozice

## Transponované vedení

### Matrice potenciálových součinitelů

$$(\delta_{\text{km}}) = \frac{1}{3} \left\{ \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & \delta_{33} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_{33} & \delta_{13} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{12} & \delta_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{33} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{11} \end{pmatrix} \right\}$$

### Zavedeme

$$\delta = \frac{1}{3} (\delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33})$$

$$\delta = \frac{1}{0,0242} \log \frac{2h}{r} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

střední geometrická výška

$$h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}$$

$$\delta' = \frac{1}{3} (\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23})$$

$$\delta' = \frac{1}{0,0242} \log \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

$$d = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}}$$

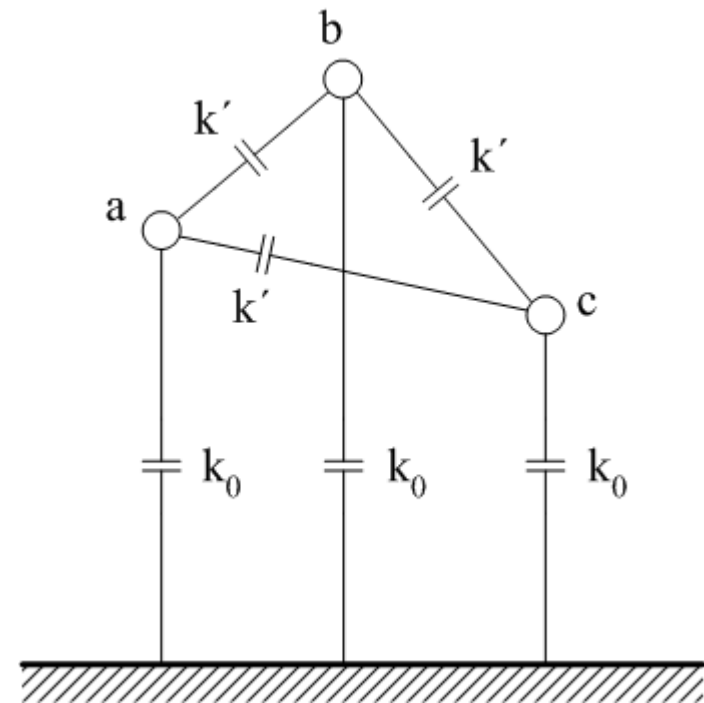
Potom

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta & \delta' & \delta' \\ \delta' & \delta & \delta' \\ \delta' & \delta' & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \end{pmatrix}$$

Schéma obsahuje pouze 2 kapacity

$$k_0 = k_{a0} = k_{b0} = k_{c0}$$

$$k' = k_{ab} = k_{bc} = k_{ac}$$



Pro náboje tedy platí

$$\begin{pmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 + 2k' & -k' & -k' \\ -k' & k_0 + 2k' & -k' \\ -k' & -k' & k_0 + 2k' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{pmatrix}$$

Řešením dostaneme:

Kapacita k zemi

$$k_0 = \frac{1}{\delta + 2\delta'}$$

Kapacita mezi vodiči

$$k' = \frac{\delta'}{(\delta + 2\delta') \cdot (\delta - \delta')}$$

Provozní kapacita (reálné číslo)

$$C = C_a = C_b = C_c = k_0 + 3k'$$

$$C = \frac{1}{\delta - \delta'}$$

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{2hd}{r\sqrt{4h^2 + d^2}}} \quad (\mu\text{F} / \text{km})$$

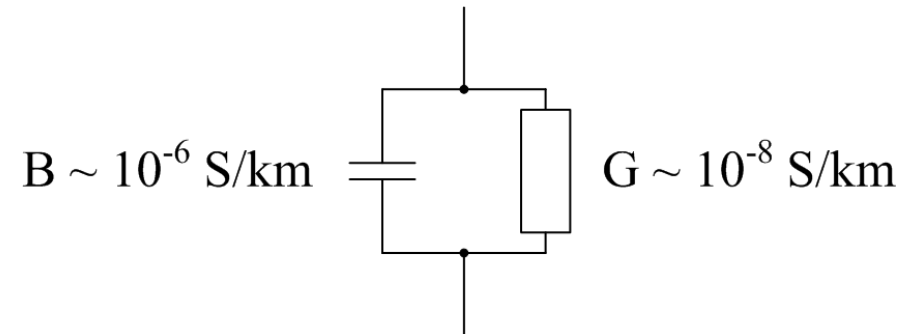
Vliv zemnicích lan:  $k_0$  vzroste,  $k'$  poklesne, C se nezmění

Vliv kovových stožárů:  $k_0$  vzroste (o 3-6%)

Hodnoty

- 400 kV -  $B_1 \approx (3,5 \div 4,5) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$
- 110, 220 kV -  $B_1 \approx (2,5 \div 3) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$
- 22 kV -  $B_1 \approx 1,4 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$

Svod vůči kapacitám zanedbatelný.



## Dvojité vedení se dvěma zemnicími lany

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \\ \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \\ \hat{U}_{z1} \\ \hat{U}_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} & \delta_{aA} & \delta_{aB} & \delta_{aC} & \delta_{az1} & \delta_{az2} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} & \delta_{bA} & \delta_{bB} & \delta_{bC} & \delta_{bz1} & \delta_{bz2} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} & \delta_{cA} & \delta_{cB} & \delta_{cC} & \delta_{cz1} & \delta_{cz2} \\ \delta_{Aa} & \delta_{Ab} & \delta_{Ac} & \delta_{AA} & \delta_{AB} & \delta_{AC} & \delta_{Az1} & \delta_{Az2} \\ \delta_{Ba} & \delta_{Bb} & \delta_{Bc} & \delta_{BA} & \delta_{BB} & \delta_{BC} & \delta_{Bz1} & \delta_{Bz2} \\ \delta_{Ca} & \delta_{Cb} & \delta_{Cc} & \delta_{CA} & \delta_{CB} & \delta_{CC} & \delta_{Cz1} & \delta_{Cz2} \\ \delta_{z1a} & \delta_{z1b} & \delta_{z1c} & \delta_{z1A} & \delta_{z1B} & \delta_{z1C} & \delta_{z1z1} & \delta_{z1z2} \\ \delta_{z2a} & \delta_{z2b} & \delta_{z2c} & \delta_{z2A} & \delta_{z2B} & \delta_{z2C} & \delta_{z2z1} & \delta_{z2z2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \\ \hat{Q}_A \\ \hat{Q}_B \\ \hat{Q}_C \\ \hat{Q}_{z1} \\ \hat{Q}_{z2} \end{pmatrix}$$

**Blokově**

$$\begin{aligned}
 (\hat{U}_v) &= (\delta_{vv})(\hat{Q}_v) + (\delta_{vV})(\hat{Q}_V) + (\delta_{vz})(\hat{Q}_z) \\
 (\hat{U}_V) &= (\delta_{Vv})(\hat{Q}_v) + (\delta_{VV})(\hat{Q}_V) + (\delta_{Vz})(\hat{Q}_z) \\
 0 = (\hat{U}_z) &= (\delta_{zv})(\hat{Q}_v) + (\delta_{zV})(\hat{Q}_V) + (\delta_{zz})(\hat{Q}_z)
 \end{aligned}$$

Opět lze počítat s modifikovaným vedením bez zemnicích lan (pro přepočet parametrů do souměrných složek)

$$\left(\hat{Q}_z\right) = -\left(\delta_{zz}\right)^{-1} \left[ \left(\delta_{zv}\right)\left(\hat{Q}_v\right) + \left(\delta_{zv}\right)\left(\hat{Q}_v\right) \right]$$

Výpočet provozních stavů

- vedení A, B, C naprázdno

$$\left(\hat{Q}_v\right) = 0$$

$$\left(\hat{U}_v\right) = \left(\delta_{vv}\right)\left(\hat{Q}_v\right) + \left(\delta_{vz}\right)\left(\hat{Q}_z\right)$$

$$\left(\hat{U}_v\right) = \left(\delta_{vv}\right)\left(\hat{Q}_v\right) + \left(\delta_{vz}\right)\left(\hat{Q}_z\right)$$

$$\rightarrow 0 = \left(\delta_{zv}\right)\left(\hat{Q}_v\right) + \left(\delta_{zz}\right)\left(\hat{Q}_z\right) \quad \rightarrow \left(\hat{Q}_z\right) = -\left(\delta_{zz}\right)^{-1} \left(\delta_{zv}\right)\left(\hat{Q}_v\right)$$

Úpravou

$$\left(\hat{U}_v\right) = \left[ \left(\delta_{vv}\right) - \left(\delta_{vz}\right)\left(\delta_{zz}\right)^{-1} \left(\delta_{zv}\right) \right] \left(\hat{Q}_v\right) = \left(\delta_{k1}\right)\left(\hat{Q}_v\right)$$

$$\left(\hat{U}_v\right) = \left[ \left(\delta_{vv}\right) - \left(\delta_{vz}\right)\left(\delta_{zz}\right)^{-1} \left(\delta_{zv}\right) \right] \left(\hat{Q}_v\right) = \left(\delta_{k2}\right)\left(\hat{Q}_v\right)$$

Napětí indukované na vedení naprázdno kapacitními vazbami

$$\left(\hat{Q}_v\right) = \left(\delta_{k1}\right)^{-1} \left(\hat{U}_v\right)$$

$$\left(\hat{U}_v\right) = \left(\delta_{k2}\right) \left(\delta_{k1}\right)^{-1} \left(\hat{U}_v\right)$$

Proudy přitékající do zemnicích lan kapacitními vazbami

$$\left(\hat{I}_{zc}\right) = j\omega \left(\hat{Q}_z\right) = -\left(\delta_{zz}\right)^{-1} \left(\delta_{zv}\right) \left(\delta_{k1}\right)^{-1} \left(\hat{U}_v\right)$$



## Elektrické parametry kabelů

### Rezistance

Stejně jako u venkovních vedení.

U jednožilových nárůst R díky vířivým proudům a hysterezním ztrátám v kovovém plášti.

### Indukčnost

U trojžilových stejná jako u transponovaných vedení.

$$L_1 = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \quad (\text{mH / km})$$

Neplatí  $d \gg r \rightarrow$  hodnoty L méně přesné, ale technicky použitelné.

6 kV  $X \sim 0,06 \Omega/\text{km}$

$X_0 \approx X_1$  pro trojplášťové

22 kV  $X \sim 0,1 \Omega/\text{km}$

$X_0 \approx 3X_1$  pro jednoplášťové

## Svod

Dán dielektrickými ztrátami.

Trojfázově

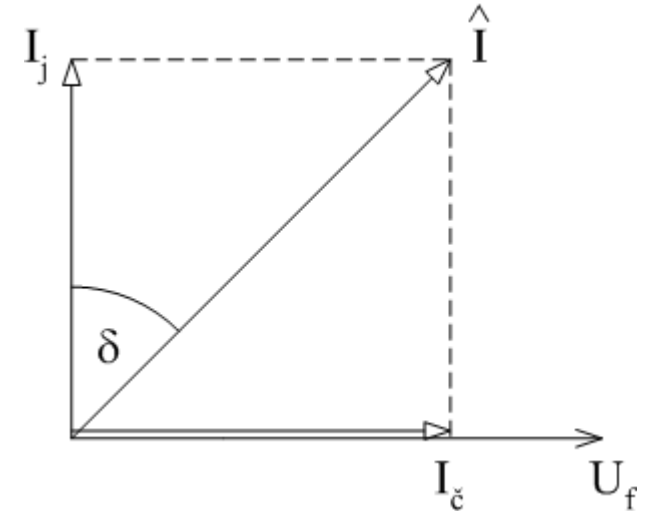
$$P_d = 3U_f I_{\check{c}} = 3U_f I_j \operatorname{tg} \delta \quad (\text{W})$$

$$P_d = 3U_f \omega C U_f \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta = Q_c \operatorname{tg} \delta$$

$Q_c$ ... nabíjecí výkon

Svod na jednotku délky

$$G_1 = \frac{P_{d1}}{U^2} \quad (\text{S / km; W / km, V})$$



## Kapacity

3 typy kabelů:

- a) celoplastové (bez vodivého pláště)
- b) jednožilové s kovovým pláštěm nebo vícežilové s pláštěm pro každý vodič
- c) trojžilové se společným kovovým pláštěm

ad a)

C se mění podle způsobu uložení a okolí. Určuje se měřením.

ad b)

Jen kapacita vodiče proti plášti = provozní.

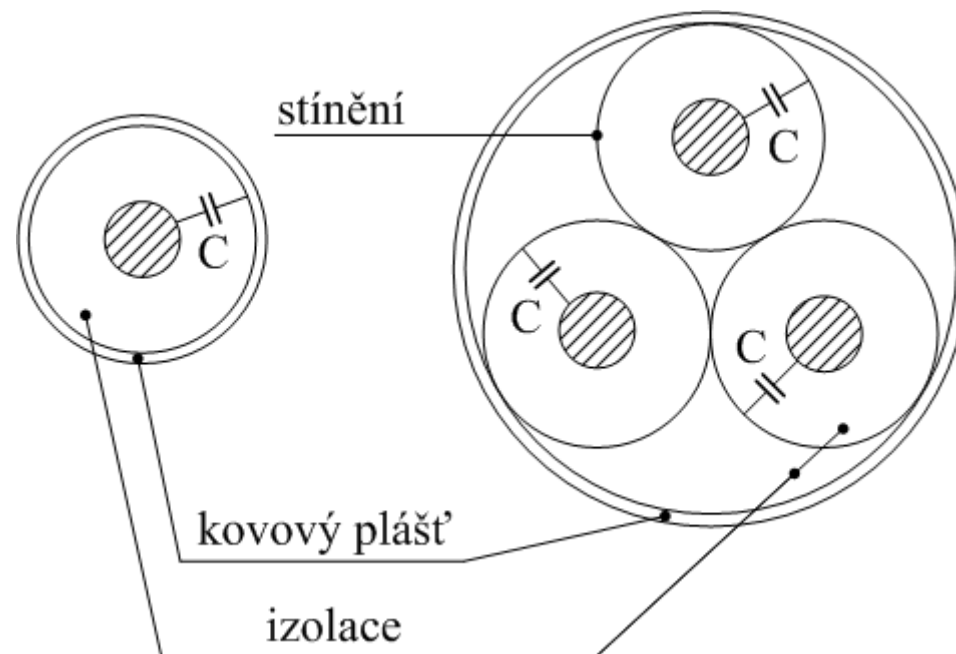
Pro souosý válec

$$C = \frac{0,0242 \varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad (\mu\text{F} / \text{km})$$

$\varepsilon_r$ ...relativní permitivita izolace

$r_1$ ...poloměr vodiče

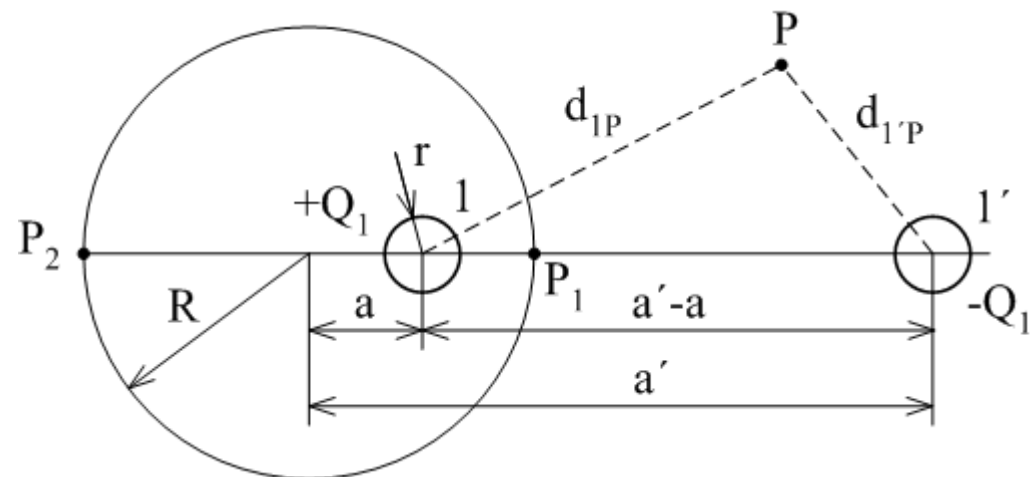
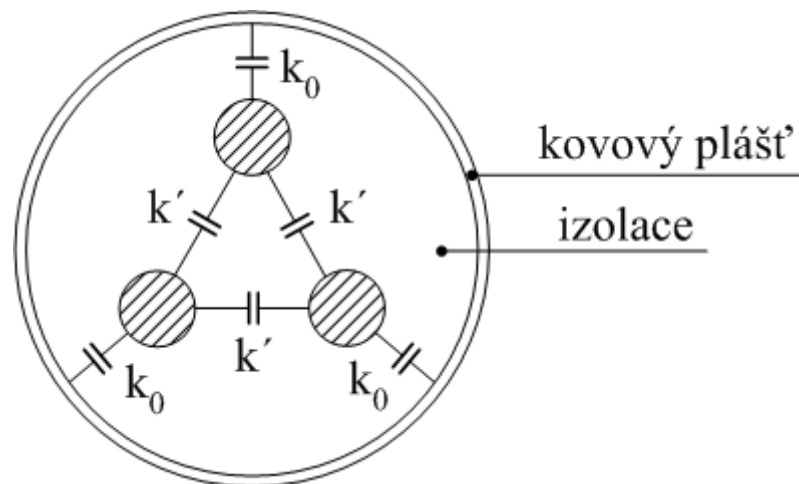
$r_2$ ...střední poloměr pláště



ad c)

Jako trojfázové symetrické vedení.

Metoda zrcadlení x podle kovového pláště.

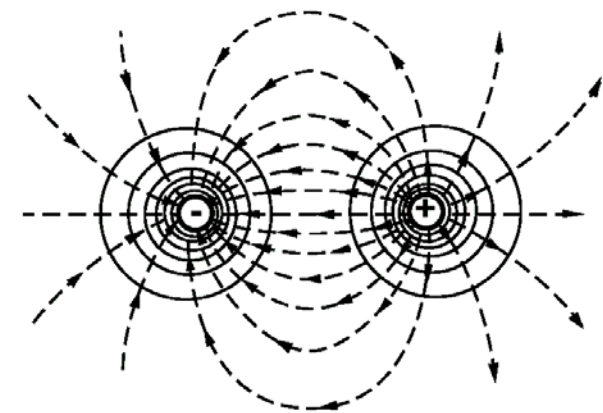


Potenciál v bodě P (od 1, 1')

$$\hat{U}_P = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{1'P}}{d_{1P}}$$

Potenciál na povrchu pláště všude stejný (od 1, 1')

$$\hat{U}_{pl} = \hat{U}_{P1} = \hat{U}_{P2}$$

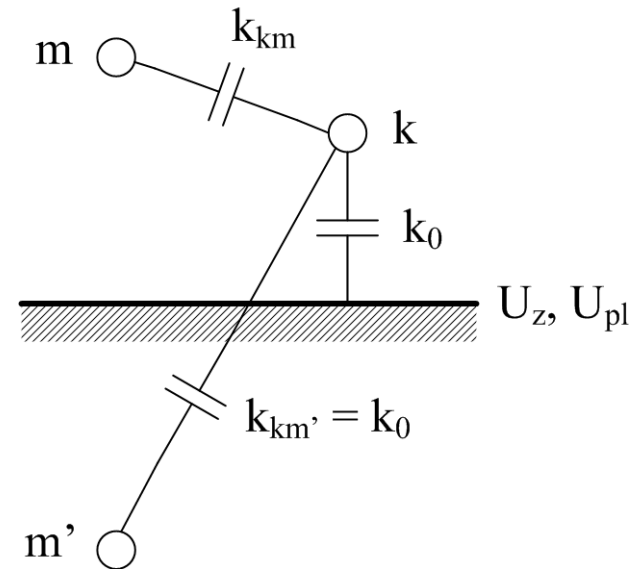


$$\frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{a'-R}{R-a} = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{a'+R}{R+a}$$

Odtud

$$a' = \frac{R^2}{a}$$

$$\hat{U}_{pl} = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{a}$$



Kapacity  $k_0$  proti plášti

→ příspěvek k potenciálu vodiče  $k$  od vodičů  $m$  a  $m'$

$$\hat{U}'_{km} \approx (\hat{U}_k - \hat{U}_m) + (\hat{U}_k - \hat{U}_{m'}) \approx (\hat{U}_k - \hat{U}_m) + (\hat{U}_k - \hat{U}_z)$$

$$\rightarrow \hat{U}'_{km} = \hat{U}_{km} - \hat{U}_{pl} = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} - \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{a} = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'} \cdot a}{d_{km} \cdot R}$$

$$\delta_{km}^x = \delta_{mk}^x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'} \cdot a}{d_{km} \cdot R}$$

## Rozměry

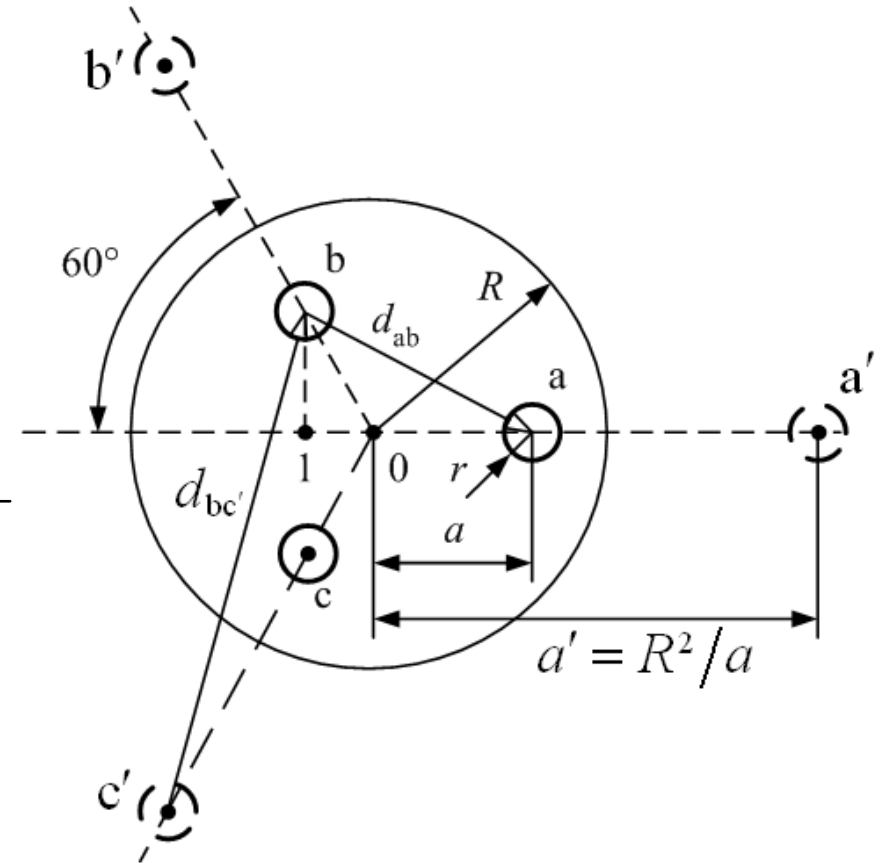
$$d_{kk} = r$$

$$d_{km} = a\sqrt{3}$$

$$d_{kk'} = a' - a = \frac{R^2 - a^2}{a}$$

$$d_{km'} = \sqrt{(a' + a \cos 60^\circ)^2 + (a \sin 60^\circ)^2}$$

$$= R \sqrt{1 + \frac{R^2}{a^2} + \frac{a^2}{R^2}}$$



## Potenciálové součinitele

$$\delta = \frac{1}{0,0242\varepsilon_r} \log \frac{R^2 - a^2}{R \cdot r} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

$$\delta' = \frac{1}{0,0242\varepsilon_r} \log \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{R}\right)^2}{3}} \quad (\text{km} / \mu\text{F})$$

## Kapacita k plášti

$$k_0 = \frac{1}{\delta + 2\delta'}$$

## Kapacita vzájemná

$$k' = \frac{\delta'}{(\delta + 2\delta') \cdot (\delta - \delta')}$$

## Provozní kapacita

$$C = \frac{1}{\delta - \delta'}$$



Kapacity kabelů výrazně větší než u venkovních vedení (cca 30÷50krát) → omezené délky kabelových sítí kvůli nabíjecím proudům (10x km).

- 22kV -  $B_1 \approx (70 \div 90) \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$