

d) Meziroční index  $k_1$  je poměr hodnoty určité veličiny a téže veličiny v předešlém roce.

Je-li letošní maximální výkon  $P_{\max 2}$  a loňský  $P_{\max 1}$ , je

$$k_1 = \frac{P_{\max 2}}{P_{\max 1}} \approx 1 \quad \text{resp.} \quad k_{1\%} = \frac{P_{\max 2}}{P_{\max 1}} 100 \quad (2-10)$$

Index je větší než 1 při růstu, menší při poklesu.

S činitelem  $k_1$  úzce souvisí trend  $\alpha$ , obvykle udávaný v procentech :

$$\alpha \% = (k_1 - 1) 100 \quad (2-11)$$

Je to tedy meziroční změna, vyjádřená v procentech. Při růstu je hodnota kladná, při poklesu záporná.

Poznámka : Těžko zařaditelný pojem je "měrné palivo". Rozumí se jím pomyslné palivo s výhřevností  $29,31 \cdot 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

### 3. Elektrické parametry prvků

Pro studium jevů v elektrických a magnetických obvodech je jednou ze základních úloh výpočet parametrů. Jsou východiskem pro stanovení matematických modelů jednotlivých prvků.

#### 3.1. Elektrické parametry venkovních vedení

Základními parametry jsou : rezistance, indukčnost (příp. indukční reaktance), konduktance a kapacita (příp. kapacitní susceptance). Zpravidla se určují na jednotku délky vedení. Obecně tyto veličiny závisí na více vlivech. Obvykle stanovíme jejich hodnoty při zadaných nebo zvolených podmínkách a pro příslušný výpočet je považujeme za konstanty.

##### 3.1.1. Rezistance

Vodiče venkovních vedení jsou dráty, případně lana jedno nebo dvoumateriálová (např. lana Alfe - vnitřní lano, tzv. duše je ocelové a splňuje především mechanické požadavky; hliníkové lano (plášť) na něm navinuté vede především proud). Specialitou jsou dutá lana, která se u nás nepoužívají.

Při ustáleném stejnosměrném proudu platí pro odpor vodičů o průřezu  $A$  a rezistivitě  $\rho_0$  při teplotě  $\vartheta_0$  na jednotku délky

$$R_{ss01} = \rho_0 / A \quad [\Omega \text{ m}^{-1}; \Omega \text{ m, m}^2 \text{ nebo } \Omega \text{ m}^{-1}; \Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{ mm}^2] \quad (3-1)$$

kde  $\rho_0$  je konstanta pro neferomagnetické materiály a funkce proudu pro feromagnetické materiály (např. ocelová lana).

Pro stanovení rezistance při provozu se uvažují :

- materiál a jeho čistota - respektujeme rezistivitou, předepsanou pro teplotu  $\vartheta_0$  (zpravidla 20°C) ČSN. U dobrých vodičů  $\rho_0$  roste nelineárně se stoupáním obsahu nečistot. Pro feromagnetické materiály je závislost na proudu zjišťována experimentálně;
- teplota (příp. oteplení) se respektuje činitelem

$$k_{\vartheta} = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [-; K^{-1}, ^\circ C, K^{-2}, ^\circ C] \quad (3-2)$$

kde  $\alpha, \beta$  jsou teplotní činitele odporu,  $\vartheta$  je uvažovaná teplota. V tabulce T 3-1 je uvedena také rezistivita při teplotě 20°C a u Fe vodičů při hustotě proudu 1 A.mm<sup>-2</sup> :

T 3-1

	Cu	Al Alfe	Fe (přibližně)	
$\alpha$	3,93 . 10 <sup>-3</sup>	4 . 10 <sup>-3</sup>	4,5 . 10 <sup>-3</sup>	K <sup>-1</sup>
$\beta$	0,45 . 10 <sup>-6</sup>	1,1 . 10 <sup>-6</sup>	9 . 10 <sup>-6</sup>	K <sup>-2</sup>
$\rho_0$	17,8 . 10 <sup>-3</sup>	28,7 . 10 <sup>-3</sup>	200 . 10 <sup>-3</sup>	$\mu \Omega m$

Člen  $\beta(\vartheta - \vartheta_0)^2$  lze zanedbat při oteplení do 100°C u vodičů Cu, Al a Alfe ; do 50°C u vodičů Fe;

- povrchový jev (skinefekt) - nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu. Důsledkem je zvětšení rezistance v porovnání s odporem pro stejnosměrný proud. Vyjadřuje se zavedením činitele zvětšení rezistance  $k_s$ . Pro vodič kruhového průřezu z jednoho materiálu se dá stanovit výpočtem pomocí Besselových funkcí. Zavedeme-li

$$m = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\mu \omega}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\mu f}{2 R_{SS01}}} \quad [-; m, \frac{H}{m}, \frac{1}{s}, \Omega m; \frac{H}{m}, Hz, \frac{\Omega}{m}] \quad (3-3)$$

kde  $\mu = \mu_0 \mu_r$  je permeabilita,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H.m^{-1}$ ,  $\mu_r [-]$ ,  $\omega$  je úhlový kmitočet,  $\rho_0$  rezistivita při teplotě  $\vartheta_0$ ,  $f$  kmitočet,  $r$  poloměr a  $R_{SS01}$  je odpor na jednotku délky (3-1), lze pro činitel zvětšení rezistance vlivem skinefektu psát zjednodušené výrazy

$$k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad \text{pro } m \leq 1,2 \quad (3-4)$$

$$k_s = 0,25 + 0,708 m + 0,06625 m^{-1} \quad \text{pro } m > 1,2 \quad (3-5)$$

Vodiče Al mají menší  $k_s$  než vodiče Cu téhož průměru. U vodičů z feromagnetických materiálů je permeabilita funkcí proudu. Z teoretických úvah vyplývají vzorce pro činitel zvětšení rezistance vlivem skinefektu :

$$k_s = 1 + 0,85 m^2 - 0,3 m^3 + 0,05 m^4 \quad \text{pro } m \leq 2 \quad (3-6)$$

$$k_s = 1,4 m \quad \text{pro } m > 2 \quad (3-7)$$

kde  $m$  je určeno rovnicí (3-3); za  $\mu_r$  dosazujeme poměrnou permeabilitu, příslušnou intenzitě magnetického pole na povrchu vodiče a při základní magnetické charakteristice materiálu vodiče.

Zvláštní postavení mají lana Alfe. Při jedné vrstvě vodičů Al na lanu Fe je  $k_s$  značně vysoké; závisí na permeabilitě a velikosti proudu. Při dvou vrstvách Al lze použít vzorců pro jednomateriálová lana. Při větším počtu vrstev než jedna lze také použít vzorců pro dutá lana, poněvadž ocelovým vnitřním lanem protéká 2 až 3 % celkového proudu. V tomto případě platí

$$k_s = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-13} \left[ \frac{(r_2 - r_1) f}{r_2 R_{ss01}} \right]^2 \left[ -; m, m, Hz, m, \frac{\Omega}{m} \right] \quad (3-8)$$

kde  $r_2$  resp.  $r_1$  je vnější resp. vnitřní poloměr Al vrstvy,  $f$  kmitočet a  $R_{ss01}$  odpor na jednotku délky při teplotě  $\vartheta_0$ ;

- d) kroucení lan - způsobí zvětšení odporu proti plnému vodiči stejné osové délky. Za předpokladu, že se jednotlivé dílčí vodiče lana pokryjí slabou vrstvou oxidu a nečistot, které vytvoří mezi nimi izolaci, rozdělí se proud na jednotlivé dílčí vodiče lana, které mají průměr  $d$ , a sleduje cestu šroubovicí. Jeden plný závit šroubovice je na výšku  $a_n$ , rovnou 10 až 15 násobku vnějšího průměru vrstvy  $D_n$ . Činitel zvětšení odporu zlaněním je dán poměrem délky závitu šroubovice k její výšce  $a_n$ , měřené v ose vodiče :

$$k_\ell = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n} \quad [-; mm] \quad (3-9)$$

Činitel  $k_\ell$  způsobí zvětšení odporu asi o 2 % u lan Cu, o (2 - 5) % u lan Al;

- e) odchylka skutečného průřezu - ČSN uvádějí jmenovité průřezy, což jsou zaokrouhlené hodnoty průřezů skutečných. Nedoporučuje se proto výpočet odporu s použitím průřezu jmenovitého místo skutečného ;
- f) průhyb - pro délku vodiče, zavěšeného ve dvou stejně vysokých bodech ve vzdálenosti  $d$  měřené po úsečce, platí podle vzorce pro délku řetězovky

$$l_h = 2 c \sinh \frac{d}{2 c} \quad (3-10)$$

kde  $c = p A G^{-1}$  je parametr řetězovky,  $p$  [Pa] je horizontální tah,  $G$  [N/m] je tíha na jednotku délky a  $A$  [m<sup>2</sup>] je průřez. Činitel zvětšení odporu, v praxi menší než 1,03, je  $k_p = l_h / d$ .

Vliv nerovnoměrnosti průřezu a spojek nelze matematicky zhodnotit. Např. ve spojkách je více materiálu než v běžné délce vodiče, přesto dochází právě ve spojkách k přehřátí.

Výsledně lze rezistanci na jednotku délky vypočítat z výrazu :

$$R_1 = R_{ss01} k_\vartheta k_s k_\ell k_p \quad (3-11)$$

Obvykle se však respektuje jen vliv teploty a skin efekt. Rezistance země jako vodiče střídavého proudu je vypočtena v odstavci 3.1.2.2.

### 3.1.2. Indukčnost a podélná impedance

Vychází se z poznatků získaných v předcházejících předmětech. Konkrétním cílem je vytvoření matematického modelu, kterým se soustava vodičů rovnoběžných se zemí a navzájem nahradí rovnocennou soustavou dvojic vodičů (skutečného a jemu odpovídajícího fiktivního) navzájem rovnoběžných. Model usnadní výpočty.

#### 3.1.2.1. Indukčnost a impedance ve smyčce

Ve smyčce, tvořené dvěma stejnými, přímými a rovnoběžnými vodiči kruhového průřezu a poloměru  $r$ , stejného konstrukčního provedení, předpokládáme (obr.3.1)

$$r \ll d \ll \ell \quad d_{kk'} = d \quad (3-12)$$

kde  $d$  je kolmá vzdálenost jejich os,  $\ell$  jejich délka. Pro fázory proudů platí:  $\hat{I}_k = -\hat{I}_{k'}$ . Uvažujeme poměry na jednotku délky uvnitř smyčky ve značné vzdálenosti od konců obou vodičů. Vliv deformace magnetického pole vlivem konců vodičů se neuplatní.

Vnitřní indukčnost, respektující magnetický tok na jednotku délky uvnitř vodiče, je podle odvození v teorii elektromagnetického pole na jednotku délky

$$L_{ik} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8 \pi} \alpha \quad (3-13)$$

kde  $\mu_{rv}$  je poměrná permeabilita materiálu vodiče,  $\alpha$  respektuje nerovnoměrné rozdělení proudu po průřezu.

Vnější indukčnost na jednotku délky je

$$L_{ek} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{r} \quad (3-14)$$

a respektuje magnetický tok vně vodiče. Poloměr  $R \gg d$  má zatím neurčenou, ale konečnou hodnotu.

Části magnetického toku druhého vodiče  $k'$ , která je v záběru s uvažovaným vodičem  $k$ , odpovídá indukčnost

$$L_{kk'} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{d} \quad (3-15)$$

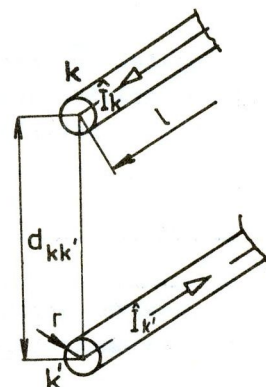
Pro celkové napětí  $\hat{U}_{ik}$ , indukované v uvažovaném vodiči na jednotku délky, platí:

$$\begin{aligned} -\hat{U}_{ik} &= j\omega \left[ (L_{ik} + L_{ek}) \hat{I}_k + L_{kk'} \hat{I}_{k'} \right] = j\omega (L_{ik} + L_{ek} - L_{kk'}) \hat{I}_k = \\ &= j\omega L_{kv} \hat{I}_k \end{aligned} \quad (3-16)$$

kde  $L_{kv}$  je vlastní indukčnost jednoho vodiče smyčky na jednotku délky. Po dosažení z předchozích rovnic dostáváme:

$$L_{kv} = \frac{\mu_0 \mu_{rv} \alpha}{8 \pi} + \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{r} - \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{R}{d} \quad (3-17)$$

Po dosazení za  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ , zavedení dekadických logaritmů za při-



Obr.3.1

rozené a po úpravách dostaneme

$$L_{kv} = 0,05 \mu_{rv} \alpha + 0,46 \log \frac{d}{r} \left[ \frac{\mu H}{m}; m, m \text{ nebo } \frac{mH}{km}; m, m \right] \quad (3-18)$$

Píšeme-li ještě

$$0,05 \mu_{rv} \alpha = 0,46 \log(\xi^{-1}) \longrightarrow \xi = 10 - \frac{0,05 \mu_{rv} \alpha}{0,46}$$

bude platit

$$L_{kv} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \left[ \mu H \cdot m^{-1}; m, m \text{ nebo } \frac{mH}{km}; m, m \right] \quad (3-19)$$

Činitel  $\xi$  závisí jednak na činiteli  $\alpha$ , jímž uvažujeme odchylku od rovnoměrného rozložení proudu po průřezu vodiče, jednak na permeabilitě materiálu vodiče  $\mu_{rv}$  u materiálů feromagnetických. Velikost  $\xi$  uvádí tabulka T 3-2.

T 3-2

Typ vodiče	$\xi$
masivní vodič kruhového průřezu	0,779
jednomateriálové lano 7 dílčích vodičů	0,726
19	0,758
37	0,768
61	0,772
91	0,774
127	0,776
lana Alfe 26 dílčích vodičů ve 2 vrstvách	0,809
30 2	0,826
54 3	0,810
s jednou vrstvou Al vodičů	0,55 až 0,7
vodič obdélníkového profilu se stranami a, b	0,2235 (a + b)

Impedance jednoho vodiče ve smyčce dvou rovnoběžných vodičů na jednotku délky bude

$$\hat{Z}_{kv} = R_k + j\omega L_{kv} = R_k + j\omega \cdot 0,46 \cdot 10^{-6} \log \frac{d}{\xi r} \left[ \frac{\Omega}{m}; \frac{\Omega}{m}, \frac{\Omega}{m}; \frac{\Omega}{m}, \frac{1}{s}, m, m \right] \quad (3-20)$$

kde  $R_k$  je rezistance vodiče na jednotku délky.

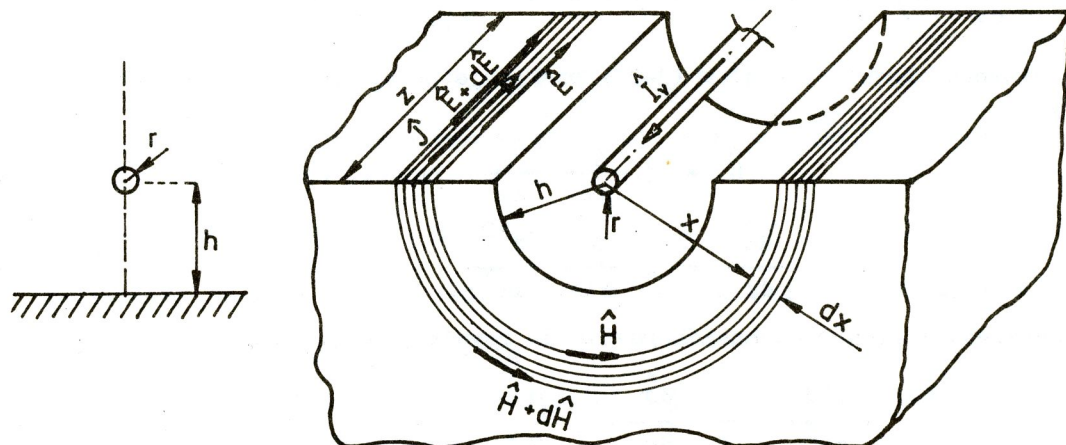
### 3.1.2.2. Země jako vodič stacionárního střídavého proudu

V místě vstupu elektrického proudu do země nebo jeho výstupu, závisí poměry především na uspořádání elektrod a elektrickém odporu přechodových vrstev země, která je obecně nehomogenní. V prostoru podél vedení, v postačující vzdálenosti od elektrod (více než 30 m), prochází ustálený stejnosměrný proud tak širokým příčným průřezem, že výsledný odpor cesty zemí v této části je nepatrný a technicky zanedbatelný. U střídavého proudu se v téže oblasti uplatní vliv magnetického pole. V důsledku jevu analogického se skin efektem je hustota střídavého proudu v zemi nerovnoměrná. Pro její výpočet je více koncepcí, které se liší podle pojetí o uspořádání a vlastnostech přisuzovaných zemi. Společně však docháze-

jí k závěru, že střídavý proud v zemi sleduje přesně trasu vodičů nad zemí, jeho největší hustota je přímo pod vedením a rychle klesá jak do stran, tak do hloubky.

Matematicky nejspodnější je koncepce Růdenbergova, která poskytuje výsledky s přesností, vyhovující pro technické úkoly. Vychází z těchto předpokladů :

- a) rezistivita země je konstantní a má konečnou velikost; země neobsahuje feromagnetické materiály [ $\mu_{rg} = 1$ ],
- b) skutečné uspořádání země a vodiče ve výšce  $h$  nad zemí se nahrazuje v částech, kde se neuplatní vliv elektrod, modelem (obr.3.2) : vodič se myšleně klade na povrch země a zemina se v poloválci o poloměru  $h$  vypouští. Vodič je v ose poloválce ;



Obr.3.2

- c) proud ve vodiči je sinusový bez vyšších harmonických s konstantní amplitudou; totéž platí pro intenzitu magnetického pole a hustotu proudu v zemi .

V dalším textu je :  $\hat{H}(x)$  intenzita magnetického pole [A/m],  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m permeabilita vakua,  $\mu_{rg} = 1$  poměrná permeabilita země,  $\hat{I}_v(x)$  proud ve vodiči nad zemí [A],  $\hat{J}(x)$  hustota proudu v zemi [A/m<sup>2</sup>],  $r$  poloměr vodiče nad zemí [m],  $h$  výška vodiče nad zemí [m] a zároveň poloměr půlválce s osou v ose vodiče [m],  $\rho$  rezistivita zeminy [ $\Omega \cdot m$ ],  $\hat{E}(x)$  intenzita elektrického pole [V/m],  $x \geq h$  poloměry [m],  $\mu = \mu_0 \mu_{rg}$  .

Podle 1.Maxwellovy věty, použité na kružnici o poloměrech  $x$ ,  $(x + dx)$ , které jsou přibližně siločarami, platí :

$$2\pi x \hat{H} = \hat{I}_v - \int_h^x \hat{J} \pi x dx \quad (3-21)$$

$$2\pi (x + dx) (\hat{H} + d\hat{H}) = \hat{I}_v - \int_h^{x+dx} \hat{J} \pi x dx \quad (3-22)$$

Odečteme-li na každé straně předchozí rovnice, dostaneme po úpravě a zanedbání malých veličin druhého řádu

$$\frac{\hat{H}}{x} + \frac{d\hat{H}}{dx} = -\frac{1}{2} \hat{J} \quad (3-23)$$

Podle Ohmova zákona pro proudové vlákno platí :

$$\hat{E} = \rho \hat{J} \longrightarrow \frac{d\hat{E}}{dx} = \rho \frac{d\hat{J}}{dx} \quad (3-24)$$

Podle 2. Maxwellovy věty, použité pro elementární úsek délky  $z$  a šířky  $dx$ , dostaneme

$$\left( \hat{E} + \frac{d\hat{E}}{dx} dx \right) z - \hat{E} z = -j\omega\mu \hat{H} z dx \longrightarrow \frac{d\hat{E}}{dx} = -j\omega\mu \hat{H} \quad (3-25)$$

Porovnání rovnic (3-24) a (3-25) poskytuje po úpravě a poté po derivaci podle  $x$

$$\hat{H} = j \frac{\rho}{\mu\omega} \frac{d\hat{J}}{dx} \quad (3-26)$$

$$\frac{d\hat{H}}{dx} = j \frac{\rho}{\mu\omega} \frac{d^2\hat{J}}{dx^2} \quad (3-27)$$

Dosazení z obou předchozích rovnic do rovnice (3-23) poskytuje :

$$\frac{d^2\hat{J}}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\hat{J}}{dx} - j \frac{\mu\omega}{2\rho} \hat{J} = 0 \quad (3-28)$$

Z fyzikální koncepce přísluší této rovnici okrajové podmínky : a) proud  $\hat{I}_g$  v zemi je proudem ve smyčce vodič-zem, b) hustota proudu v zemi pro  $x \rightarrow \infty$  musí být rovna nule. Tomu odpovídají rovnice :

$$\int_h^\infty \hat{J}(x) \mathcal{K} x dx = \hat{I}_g = -\hat{I}_v \quad (3-29)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \hat{J}(x) = 0 \quad (3-30)$$

Rovnice (3-28) je Besselova rovnice 2.řádu. Při jejím řešení se výhodně využije vlastností Besselových funkcí 3.druhu, zvaných též funkce Hankelovy. Jsou definovány rozvojem do mocninových řad, u nichž lze někdy zanedbat členy s vyššími mocninami proměnné. Speciálně při splnění dále uvedených podmínek lze s přesností, požadovanou v technických úlohách, psát pro hustotu proudu v zemi jako funkci vzdálenosti od vodiče (  $k$  mitočet  $f$  se považuje za konstantu ) :

$$\hat{J}(x) = \left( \frac{\pi^2 f}{\rho} + j \frac{4\mathcal{K} f}{\rho} \ln \frac{0,178\sqrt{\rho \cdot 10^7}}{x \sqrt{f}} \right) \cdot 10^{-7} \hat{I}_g \quad (3-31)$$

jestliže  $f \leq 5 \text{ kHz}$   $x \sqrt{\mu\omega / (2\rho)} \leq 0,5$

Druhá podmínka je v případech uvažovaných v praxi splněna ; první podmínka s ohledem na sledovaný cíl je vyhovující. Reálná část v rovnici (3-31) v závorce na pravé straně je konstanta, imaginární část je při konstantních  $\rho$  a  $f$  jen funkcí  $x$ . Fázový úhel hustoty proudu v zemi se proto mění. Velikost hustoty

proudu na povrchu země, kde je největší, je jen (1 až 10) A/km<sup>2</sup> na každý 1 A proudu ve vodiči nad zemí pro  $f = 50$  Hz .

### 3.1.2.3. Vlastní impedance smyčky vodič-zem

Celý magnetický tok vyvolaný proudem v zemi je spřažen také s proudem v elementární vrstvě na povrchu půlválce o poloměru  $h$  , kde v proudovém vláknu vyvolá úbytek napětí na jednotku délky

$$\Delta \hat{U}(h) = \rho \hat{J}(h) = \left( \pi^2 f + j 4 \pi f \ln \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \sqrt{f}} \right) \cdot 10^{-7} \hat{I}_g \quad (3-32)$$

Současně lze psát pro úbytek napětí

$$\Delta \hat{U}(h) = (R_{1g} + j 2 \pi f L_{1g}) \hat{I}_g \quad (3-33)$$

Porovnání obou předchozích rovnic poskytuje reálnou částí v závorce na pravé straně rezistanci země na jednotku délky

$$R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-7} [\Omega \text{ m}^{-1}; \text{Hz}] \quad \text{resp.} \quad R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} [\Omega/\text{km}; \text{Hz}] \quad (3-34)$$

Rezistance smyčky, tvořené vodičem  $k$  a zemí, na jednotku délky bude :

$$R_{kk} = R_k + R_{1g} \quad [\Omega/\text{m} \quad \text{resp.} \quad \Omega/\text{km}] \quad (3-35)$$

Pro výpočet indukčnosti smyčky, případně její reaktance, uvážíme vliv magnetických toků spřažených se smyčkou.

Magnetický tok uvnitř vodiče nad zemí respektuje vnitřní indukčnost (3-13)

$$L_{ik} = \frac{\mu_0 \mu_r v}{8 \pi} \alpha = 0,46 \log \frac{1}{\xi} \quad , \quad (3-36)$$

indukčnost (3-14)

$$L_{ek} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} \ln \frac{h}{r} = 0,46 \log \frac{h}{r} \quad (3-37)$$

respektuje magnetický tok ve vzduchu, kde  $x \in \langle r, h \rangle$  . Konečně magnetický tok v zemi respektuje indukčnost  $L_{1g}$  , kterou dostaneme porovnáním rovnic (3-32) a (3-33) a po formálních úpravách

$$L_{1g} = 0,46 \log \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \sqrt{f}} = 0,46 \log \frac{D_g}{h} \quad , \quad (3-38)$$

kde tedy

$$D_g = \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad [ \text{m} ; \Omega \text{ m}, \text{Hz} ] \quad (3-39)$$

se nazývá hloubka "vodiče", který by vedl proud v zemi. Celková indukčnost ve smyčce vodič-zem na jednotku délky bude

$$L_{kk} = L_{ik} + L_{ek} + L_{1g} = 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} \left[ \frac{\mu\text{H}}{\text{m}} ; \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}, \text{m}, \text{m} \right] \quad (3-40)$$

Pak však impedance ve smyčce vodič-zem na jednotku délky bude :

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + j \omega L_{kk} = R_k + R_{1g} + j \omega 0,46 \cdot 10^{-6} \log \frac{D_g}{r} \left[ \frac{\Omega}{\text{m}} ; \frac{\Omega}{\text{m}}, \frac{1}{\text{s}}, \frac{1}{\text{H}}, \frac{\Omega}{\text{m}}, \frac{1}{\text{s}}, \text{m}, \text{m} \right] \quad (3-41)$$

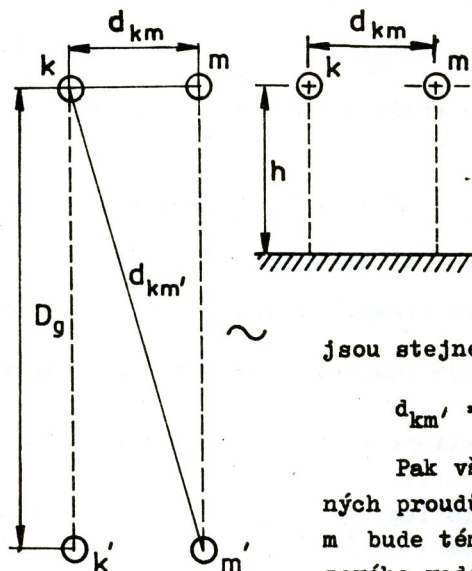


Tuto impedanci označujeme jako vlastní impedanci smyčky na jednotku délky. Číslo  $10^{-6}$  v rovnici (3-40) převádí indukčnost z jednotek  $[\mu\text{H}/\text{m}]$ , v nichž je v rovnici (3-39), na jednotky  $[\text{H}/\text{m}]$ .

### 3.1.2.4. Vzájemná impedance dvou smyček vodič-zem

Dvouvodičové jednofázové vedení lze s ohledem na magnetické pole jím vytvářené považovat za rovnocenné dvěma vedením vodič-zem (obr.3.3), protože lze přijmout, že zpětné proudy v zemi se navzájem kompenzují a nedávají výsledně žádný účinek. Tvzení platí jen tehdy, je-li vzdálenost mezi skutečnými vodiči  $k, m$  menší nebo rovna jejich výšce nad zemí :

$$d_{km} \leq h \quad (3-42)$$



Obr.3.3

Při splnění této podmínky budou s potřebnou přesností platit pro vzájemnou impedanci  $\hat{Z}_{km}$  výrazy, které určíme dalším výpočtem. Poněvadž  $D_g \gg d_{km}$ , jak vyplývá z rovnice (3-39) a poté porovnáním s  $d_{km}$ , lze přijmout, že vzdálenosti každého z fiktivních zpětných vodičů  $k', m'$  od každého skutečného vodiče  $k, m$  jsou stejné, tj. že velmi přibližně platí

$$d_{km'} = d_{k'm} = d_{kk'} = d_{mm'} \quad (3-43)$$

Pak však výsledné elektromagnetické působení zpětných proudů ve vodičích  $k'$  a  $m'$  na skutečné vodiče  $k, m$  bude téměř rovno nule. Záměna dvouvodičového jednofázového vedení za dvě smyčky vodič-zem umožňuje určit výslednou impedanci jednoho vodiče  $\hat{Z}_{kv}$  jako součet vlastní impedance jedné smyčky vodič-zem, např.  $\hat{Z}_{kk}$ , a hledané impedance vzájemné  $\hat{Z}_{km}$  od druhé smyčky, např.  $m - m'$ . Přihlédneme-li, že proudy uvažovaného i indukujícího vedení jsou stejné co do velikosti, ale opačné polarity, bude platit :

$$\hat{Z}_{kv} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{km} \longrightarrow \hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{kk} - \hat{Z}_{kv} \quad (3-44)$$

Dosadíme-li z rovnic (3-20) a (3-41), kde  $d = d_{km}$ , do rovnice (3-44) vpravo, dostaneme pro vzájemnou impedanci na jednotku délky po úpravě :

$$\hat{Z}_{km} = R_{1g} + j\omega \cdot 10^{-6} \log \frac{D_g}{d_{km}} \left[ \frac{\Omega}{\text{m}} ; \frac{\Omega}{\text{m}} , \frac{1}{\text{s}} , \text{m} , \text{m} \right] \quad (3-45)$$

Rovnice pro  $\hat{Z}_{kk}, \hat{Z}_{km}$  spolu s rovnicí pro  $D_g$  jsou základem pro další výpočty.

### 3.1.2.5. Základní rovnice pro výpočet podélných impedancí a jejich vlivů

Předešlé úvahy rozšíříme na soustavu  $n$  skutečných, navzájem a se zemí rovnoběžných vodičů a zem. Příslušným matematickým modelem je soustava  $n$  dvojic vodičů, z nichž jeden je skutečný, druhý fiktivní, respektující zpětný proud zemí. Vlastní i vzájemné impedance na jednotku délky vyjádříme pro další použití

v  $[\Omega/\text{km}]$ .

Podle rovnic (3-41) a (3-45) bude při kmitočtu  $f = 50 \text{ Hz}$  platit :  
Vlastní impedance smyčky ( $k - k'$ ) na 1 km délky :

$$\hat{Z}_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_k + R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r_k} \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} ; \frac{\Omega}{\text{km}} ; \frac{\Omega}{\text{km}}, \frac{\Omega}{\text{km}}, m, m \right] \quad (3-46)$$

a vzájemná impedance mezi smyčkami ( $k - k'$ ) a ( $m - m'$ ) na 1 km délky :

$$\hat{Z}_{km} = R_{km} + j\omega L_{km} = \hat{Z}_{mk} = R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{d_{km}} \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} ; \frac{\Omega}{\text{km}} ; \frac{\Omega}{\text{km}}, m, m \right] \quad k \neq m \quad (3-47)$$

kde  $R_k$  je rezistance k-tého vodiče na 1 km délky (3-11),  $R_{1g}$  rezistance země na 1 km délky (3-34),  $D_g$  "hloubka" fiktivního vodiče (3-39),  $d_{km}$  vzdálenost skutečných vodičů  $k$  a  $m$ ,  $r_k$  poloměr k-tého vodiče,  $\xi$  činitel (tab.T 3-2).

Rezistivita  $\rho$  v rovnici (3-39) nabývá těchto hodnot : rašelina  $30 \Omega\text{m}$ , ornice a jíl  $100 \Omega\text{m}$ , vlhký písek  $200$  až  $300 \Omega\text{m}$ , suchý štěrka nebo suchý písek  $1000$  až  $3000 \Omega\text{m}$ , kamenitá půda  $3000$  až  $10000 \Omega\text{m}$ .

Výsledné působení proudů všech smyček na uvažovaný vodič  $k$  poskytuje rovnice

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m \quad \left[ \frac{\text{V}}{\text{km}} ; \frac{\Omega}{\text{km}}, \text{A} \right] \quad (3-48)$$

případně v maticovém zápisu :

$$[\Delta \hat{U}] = [\hat{Z}] [\hat{I}] \quad (3-49)$$

kde  $\Delta \hat{U}_k$  je úbytek napětí v k-tém vodiči na 1 km délky, způsobený magnetickými účinky proudů ve všech vodičích. V maticovém zápisu je  $[\Delta \hat{U}]$  matice typu  $(n,1)$  úbytků napětí na vodičích,  $[\hat{Z}]$  symetrická matice impedancí typu  $(n,n)$ , kde hlavní prvky  $\hat{Z}_{kk}$  jsou vlastní impedance, vedlejší prvky  $\hat{Z}_{km} = \hat{Z}_{mk}$  pro  $m \neq k$  vzájemné impedance a  $[\hat{I}]$  matice proudů ve skutečných vodičích typu  $(n,1)$ .

V praxi se definičně zavádí provozní impedance (na 1 km)  $\hat{Z}_k$  :

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m = \hat{Z}_k \hat{I}_k \longrightarrow \hat{Z}_k = \frac{\sum_{m=1}^n \hat{Z}_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k} \quad (3-50)$$

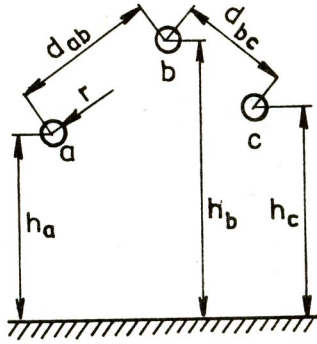
Využívá se jí u symetrických nebo symetrizovaných vedení (viz dále), zvláště části jejího imaginárního členu  $L_k$ , což je provozní indukčnost ( $\hat{Z}_k = R_k + j\omega L_k$ ). Je určena impedancí jedné smyčky, která by měla též účinek jako výsledně všechny smyčky na uvažovaný vodič.

### 3.1.2.6. Trojfázové vedení bez zemnicích lan

Vedení má tři vodiče s osami rovnoběžnými navzájem a s povrchem ideální země, jinak v obecné poloze. Předpokládáme, že vodiče fází jsou stejné ( $r_a = r_b = r_c$ ). Pro fázory proudů platí (obr.3.4):

$$\hat{I}_a = I_a \quad \hat{I}_b = b I_a \underline{\beta} = b I_a (\cos \beta + j \sin \beta) \quad \hat{I}_c = c I_a \underline{\gamma} \quad (3-51)$$

Pro úbytky napětí ve fázích platí :



Obr.3.4

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

Uvedený zápis má význam v případě, kdy by bylo třeba vypočítávat souměrné složky impedancí. Podle předchozího lze psát pro jeden hlavní prvek, např.

$$\begin{aligned} \text{fáze } b : \hat{Z}_{bb} &= R_{bb} + j X_{bb} = \\ &= R_b + R_{1g} + j 0,1445 \log(D_g/\xi r) \\ \text{a vedlejší prvek } \hat{Z}_{ab} &= R_{ab} + j X_{ab} = \\ &= R_{1g} + j 0,1445 \log(D_g/d_{ab}). \end{aligned}$$

Pro provozní impedance fází platí :

$$\begin{aligned} \hat{Z}_a &= (\hat{Z}_{aa}\hat{I}_a + \hat{Z}_{ab}\hat{I}_b + \hat{Z}_{ac}\hat{I}_c) / \hat{I}_a = \\ &= (R_{aa} + j X_{aa}) + (R_{ab} + j X_{ab}) b (\cos\beta + j \sin\beta) + \\ &\quad + (R_{ac} + j X_{ac}) c (\cos\gamma + j \sin\gamma) \end{aligned} \quad (3-53)$$

$$\hat{Z}_b = (\hat{Z}_{ba}\hat{I}_a + \hat{Z}_{bb}\hat{I}_b + \hat{Z}_{bc}\hat{I}_c) / \hat{I}_b = \frac{1}{b} \hat{Z}_{ba} \underline{-\beta} + \hat{Z}_{bb} + \frac{c}{b} \hat{Z}_{bc} \underline{\gamma - \beta} \quad (3-54)$$

$$\hat{Z}_c = (\hat{Z}_{ca}\hat{I}_a + \hat{Z}_{cb}\hat{I}_b + \hat{Z}_{cc}\hat{I}_c) / \hat{I}_c = \frac{1}{c} \hat{Z}_{ca} \underline{-\gamma} + \frac{b}{c} \hat{Z}_{cb} \underline{\beta - \gamma} + \hat{Z}_{cc} \quad (3-55)$$

V rovnicích jsme využili, že

$$\begin{aligned} \underline{\beta} = \exp(j\beta) &\rightarrow (\underline{\beta})^{-1} = [\exp(j\beta)]^{-1} = \exp(-j\beta) = \\ &= \underline{-\beta} = \cos\beta - j \sin\beta. \end{aligned}$$

Vyčíslení rovnic (3-53) až (3-55) by ukázalo, že provozní impedance mají různé jak reálné, tak imaginární části. Ani souměrnost proudů, tj. platnost rovnic

$$\hat{I}_a = I_a \quad \hat{I}_b = I_a \sqrt{4\pi/3} = \hat{a}^2 I_a \quad \hat{I}_c = I_a \sqrt{2\pi/3} = \hat{a} I_a \quad (3-56)$$

nepřivodí rovnost provozních impedancí.

Nerovnost provozních impedancí jednotlivých fází způsobí nesymetrii napětí v jinak souměrné soustavě a předávání činného výkonu mezi fázemi elektromagnetickou vazbou, aniž se touto výměnou výsledně zatěžuje zdroj.

Teprve, bude-li vedle platnosti rovnic (3-56) ještě geometrická souměrnost uspořádání

$$d_{ab} = d_{ac} = d_{bc} = d, \quad (3-57)$$

potom bude

$$\hat{Z}_{ab} = \hat{Z}_{bc} = \hat{Z}_{ac} = \hat{Z}' = R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{d} \quad (3-58)$$

$$\hat{Z}_{aa} = \hat{Z}_{bb} = \hat{Z}_{cc} = \hat{Z} = R_1 + R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r}; \quad (3-59)$$

provozní impedance všech fází budou stejné, jak prokážeme aplikací rovnic

(3-56), (3-58) a (3-59) na rovnici (3-50) ; výpočet ukážeme pro fázi b ; pro fáze a , c je analogický. Připomínáme, že  $1 + \hat{a} + \hat{a}^2 = 0$  ,  $\hat{a}^3 = 1$  :

$$\hat{Z}_b = \frac{\hat{Z}'\hat{I}_a + \hat{Z}\hat{a}^2\hat{I}_a + \hat{Z}'\hat{a}\hat{I}_a}{\hat{a}^2\hat{I}_a} = \hat{Z} - \hat{Z}' = \hat{Z}_a = \hat{Z}_c = \hat{Z}_1 \quad (3-60)$$

Po dosazení dostáváme :

$$\hat{Z}_1 = R_1 + j 0,1445 \log \frac{d}{\xi r} = R_1 + j X_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (3-61)$$

$\hat{Z}_1$  je provozní impedance zcela souměrného trojfázového vedení.  $R_1$  je rezistance vodiče fáze na 1 km délky.  $X_1$  resp.  $L_1$  je provozní reaktance resp. provozní indukčnost na 1 km délky. Podle rovnice (3-61) lze psát ( $f=50$  Hz):

$$L_1 = \frac{0,1445}{\omega} \log \frac{d}{\xi r} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \cdot 10^{-3} \text{ [H/km ; m, m]} \quad (3-62)$$

V rovnici (3-61) se nevyskytuje rezistance země, neboť zemí výsledně neprochází žádný proud. Jiným způsobem, jak dosáhnout výsledně symetrie, je symetrizace. Dosahuje se jí křížením (transpozicí) vodičů vedení.

### 3.1.2.7. Transpozice (křížení) trojfázových vedení

Symetrizace lze dosáhnout výměnou poloh vodičů (transpozicí - obr.3.5). Po délce úplného cyklu transpozice se dostane každý vodič do své původní polohy. Polohám jsou přiděleny indexy 1, 2, 3, fázím a, b, c . Vyjme-li z každého transpozičního úseku délku 1/3 km, bude pro úbytky napětí ve fázích na 1 km délky platit :

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{Z}_{11} & \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{13} \\ \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{22} & \hat{Z}_{23} \\ \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{33} & \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{23} \\ \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{11} & \hat{Z}_{12} \\ \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{22} & \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{12} \\ \hat{Z}_{23} & \hat{Z}_{33} & \hat{Z}_{13} \\ \hat{Z}_{12} & \hat{Z}_{13} & \hat{Z}_{11} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3-63)$$

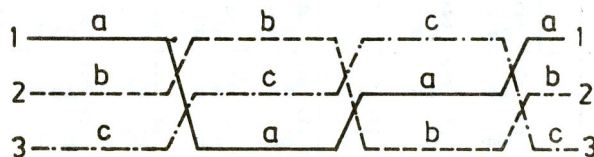
Jak patrně, platí pro diagonální prvky matice impedancí transponovaného vedení (podle rovnice (3-46)) :

$$\begin{aligned} \hat{Z} &= \frac{1}{3} (\hat{Z}_{11} + \hat{Z}_{22} + \hat{Z}_{33}) = \\ &= R_1 + R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r} \end{aligned} \quad (3-64)$$

neboť jde o vlastní impedanci smyčky ; pro prvky mimo hlavní diagonálu (vzájemné impedance smyček) pak bude podle rovnice (3-47)

$$\hat{Z}' = \frac{1}{3} (\hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{13} + \hat{Z}_{23}) = R_{1g} + j 0,1445 \log \frac{D_g}{d} , \text{ kde } d = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} \quad (3-65)$$

Transpozicí ztratily jednotlivé fáze svá výsadní postavení. Bude-li navíc



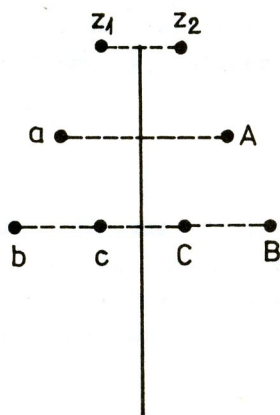
Obr.3.5

pro fázory proudu platit rovnice (3-56), budou provozní impedance jednotlivých fází stejné po jednom úplném cyklu transpozice.

Vedle uvažovaného vlivu podélných impedancí se však uplatní také příčné parametry, hlavně kapacity. Proto se nedosáhne úplně symetrie jedním úplným cyklem transpozice. Naproti tomu stožáry, na nichž se uskutečňuje výměna poloh vodičů, jsou nákladnější a vzhledem ke složitosti izolátorové výzbroje i poruchovější než stožáry v běžné trase. Z tohoto důvodu se nejdříve zjišťuje velikost nesymetrie, způsobené netransponováním vedení. Transpozice se uskuteční tam, kde je to nezbytné, a v nejnútnejším rozsahu. U nás ji předpisuje ČSN 34 1100 jen pro dlouhá vedení se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším.

### 3.1.2.8. Dvojité vedení se dvěma zemnicími lany

Tvoří je dva soubory trojfázových vedení na společných stožárech. Obr.3.6 ukazuje jedno z možných prostorových uspořádání vodičů. Fázím prvního vedení přidělíme indexy (a, b, c), druhého (A, B, C). Ve vrcholech stožárů jsou umístěna zemnicí lana (indexy z1, z2), Mají tyto úlohy :



Obr.3.6

a) snižují četnost přímých atmosférických výbojů do fázových vodičů vedení, b) snižují indukovaná elektrostatická přepětí, c) snižují krokové a dotykové napětí při nesymetrických zemních zkratech, d) snižují vliv na vedení a zařízení v souběhu, a to tím lépe, čím větší je vodivost lana (materiálově jsou zemnicí lana Fe, méně často Alfe). Zemnicí lana jsou na stožárech (nemusí být na všech) dobře spojena se zemí.

Dvojité vedení může pracovat : a) obě vedení paralelně, b) jedno vedení v provozu, druhé naprázdno nebo nakrátko, c) obě vedení v téže elektrizační soustavě, ale buď na různé přípojnice, nebo s různými napětími, d) každé vedení patří jiné elektrizační soustavě (prakticky se nevyskytuje). Možnost d) dále neuvažujeme.

Aplikace rovnice (3-49) poskytuje pro náš případ maticovou rovnici :

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_a \\ \Delta \hat{U}_b \\ \Delta \hat{U}_c \\ \Delta \hat{U}_A \\ \Delta \hat{U}_B \\ \Delta \hat{U}_C \\ \Delta \hat{U}_{z1} \\ \Delta \hat{U}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{aA} & \hat{Z}_{aB} & \hat{Z}_{aC} & \hat{Z}_{az1} & \hat{Z}_{az2} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bA} & \hat{Z}_{bB} & \hat{Z}_{bC} & \hat{Z}_{bz1} & \hat{Z}_{bz2} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cA} & \hat{Z}_{cB} & \hat{Z}_{cC} & \hat{Z}_{cz1} & \hat{Z}_{cz2} \\ \hat{Z}_{Aa} & \hat{Z}_{Ab} & \hat{Z}_{Ac} & \hat{Z}_{AA} & \hat{Z}_{AB} & \hat{Z}_{AC} & \hat{Z}_{Az1} & \hat{Z}_{Az2} \\ \hat{Z}_{Ba} & \hat{Z}_{Bb} & \hat{Z}_{Bc} & \hat{Z}_{BA} & \hat{Z}_{BB} & \hat{Z}_{BC} & \hat{Z}_{Bz1} & \hat{Z}_{Bz2} \\ \hat{Z}_{Ca} & \hat{Z}_{Cb} & \hat{Z}_{Cc} & \hat{Z}_{CA} & \hat{Z}_{CB} & \hat{Z}_{CC} & \hat{Z}_{Cz1} & \hat{Z}_{Cz2} \\ \hat{Z}_{z1a} & \hat{Z}_{z1b} & \hat{Z}_{z1c} & \hat{Z}_{z1A} & \hat{Z}_{z1B} & \hat{Z}_{z1C} & \hat{Z}_{z1z1} & \hat{Z}_{z1z2} \\ \hat{Z}_{z2a} & \hat{Z}_{z2b} & \hat{Z}_{z2c} & \hat{Z}_{z2A} & \hat{Z}_{z2B} & \hat{Z}_{z2C} & \hat{Z}_{z2z1} & \hat{Z}_{z2z2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \\ \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \\ \hat{I}_{z1} \\ \hat{I}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{vv} & \hat{Z}_{vV} & \hat{Z}_{vz} \\ \hat{Z}_{Vv} & \hat{Z}_{VV} & \hat{Z}_{Vz} \\ \hat{Z}_{zv} & \hat{Z}_{zV} & \hat{Z}_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_v \\ \hat{I}_V \\ \hat{I}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{U}_v \\ \Delta \hat{U}_V \\ \Delta \hat{U}_z \end{bmatrix} \quad (3-66)$$

$v \sim (a, b, c)$   
 $V \sim (A, B, C)$

V rozepsané matici impedancí jsou prvky diagonální vlastní impedance smyček (3-46), mimodiagonální jsou vzájemné impedance smyček (3-47), vždy na 1 km délky. Matice impedancí je naznačenými řezy rozdělena na bloky. Význam jednotlivých bloků vyplývá z významu jejich prvků. Diagonální blok  $[\hat{Z}_{VV}]$  typu (3,3) má za prvky vlastní a vzájemné impedance vedení s indexy (a,b,c); další diagonální blok  $[\hat{Z}_{VV}]$  s prvky, které jsou vlastními a vzájemnými impedancemi vedení s indexy (A,B,C), je též typu (3,3); poslední diagonální blok  $[\hat{Z}_{ZZ}]$  typu (2,2) obsahuje v prvcích vlastní a vzájemné impedance zemnicích lan. Všechny diagonální bloky jsou regulární matice. Bloky  $[\hat{Z}_{VV}]^T = [\hat{Z}_{VV}]$  typu (3,3) mají za prvky vzájemné impedance mezi oběma vedeními. Bloky  $[\hat{Z}_{VZ}]^T = [\hat{Z}_{ZV}]$  obsahují vzájemné impedance mezi vodiči vedení (a,b,c) a zemnicími lany,  $[\hat{Z}_{zV}]$  je typu (2,3). Analogicky jsou bloky  $[Z_{Vz}]^T = [Z_{zV}]$  se vzájemnými impedancemi mezi vedením (A,B,C) a zemnicími lany.

U zemnicích lan se zpravidla přijímá, že jsou uzemněna spojitě, tj. v každém místě podél vedení, nikoliv jen na stožárech. Tento předpoklad poskytuje :

$$\Delta \hat{U}_{z1} = 0 = \Delta \hat{U}_{z2} \longrightarrow [\Delta \hat{U}_z] = [0] \quad (3-67)$$

Neznámé jsou pak prvky matice  $[\hat{I}_z]$ , tj. fázory proudů v zemnicích lanech. Rovnici (3-66) lze rozepsat do tří rovnic s maticemi

$$[\Delta \hat{U}_v] = [\hat{Z}_{VV}] [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{VZ}] [\hat{I}_z] \quad (3-68)$$

$$[\Delta \hat{U}_V] = [\hat{Z}_{VV}] [\hat{I}_V] + [\hat{Z}_{Vz}] [\hat{I}_z] \quad (3-69)$$

$$[0] = [\Delta \hat{U}_z] = [\hat{Z}_{zV}] [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{zV}] [\hat{I}_V] + [\hat{Z}_{zz}] [\hat{I}_z] \quad (3-70)$$

které umožní řešit další úlohy. Ukážeme :

a) zjištění proudů v zemnicích lanech :

z rovnice (3-70) po násobení maticí  $[\hat{Z}_{zz}]^{-1}$  zleva dostaneme :

$$[\hat{I}_z] = -[\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot ([\hat{Z}_{zV}] [\hat{I}_v] + [\hat{Z}_{zV}] [\hat{I}_V]) \quad (3-71)$$

Poněvadž zemnicí lana mají rezistanci, můžeme určit dodatečné ztráty výkonu v zemnicích lanech;

b) modifikace vedení - vytváříme pomyslné vedení bez zemnicích lan, které by se chovalo jako skutečné vedení se zemnicími lany. Úkon je nutný při převodu impedancí do souměrných složek. Z rovnice (3-71) vložíme za  $[\hat{I}_z]$  do rovnic (3-68) a (3-69) :

$$[\Delta \hat{U}_v] = ([\hat{Z}_{VV}] - [\hat{Z}_{Vz}] [\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}]) [\hat{I}_v] + ([\hat{Z}_{Vv}] - [\hat{Z}_{Vz}] [\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}]) [\hat{I}_V] \quad (3-72)$$

$$[\Delta \hat{U}_V] = ([\hat{Z}_{VV}] - [\hat{Z}_{Vz}] [\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}]) [\hat{I}_V] + ([\hat{Z}_{VV}] - [\hat{Z}_{Vz}] [\hat{Z}_{zz}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{zV}]) [\hat{I}_V] \quad (3-73)$$

Maticové výrazy v okrouhlých závorkách se nazývají modifikované matice (někdy též korigované).

Poznámka : Vliv transpozic se probírá ve cvičeních. Zde uvedeme jen to, že při transponování jednoho vedení třikrát tak často než druhého a v opačném smyslu se při paralelní práci a souměrnosti proudů neuplatní vliv druhého vedení ani zemnicích lan. U krátkých dvojitéch vedení se obvykle vliv nesymetrie zanedbá a

uvažuje se, jako kdyby vedení bylo dokonale transponováno.

### 3.1.3. Konduktance venkovních vedení

Konduktance způsobuje ztráty činného výkonu (tzv. příčné ztráty), které závisí málo na zatížení, ale značně na napětí a povětrnostních vlivech. Nelze je vyjádřit přesnými matematickými vzorci. Dělí se na ztráty svodem přes izolátory a ztráty korónou, které převládají.

Podle starších měření se ztracená energie přes izolátory uvádí při napětí 10 kV hodnotou 67 kWh/(r.km) a 2000 kWh/(r.km) pro 110 kV.

Ztráty korónou se podstatněji uplatní až od jmenovitého napětí 110 kV. Odpovídající hodnoty konduktance jsou :

jm. napětí	110	220	380	500	kV
konduktance	$(3,6 \div 5) \cdot 10^{-8}$	$(2,5 \div 3,6) \cdot 10^{-8}$	$(1,4 \div 2) \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	S.km <sup>-1</sup>

Uvážíme-li, že přes konduktanci  $G_1$  [S.km<sup>-1</sup>] prochází proud  $I_S$  [A] a síť má fázové napětí  $U_F$  [V], resp. sdružené  $U$  [V], budou ztráty výkonu svodem na tři fáze a 1 km délky  $P_S$  [W.km<sup>-1</sup>] ve zcela souměrné síti

$$P_S = 3 U_F I_S = 3 U_F G_1 U_F = 3 G_1 U_F^2 = G_1 U^2 \quad (3-74)$$

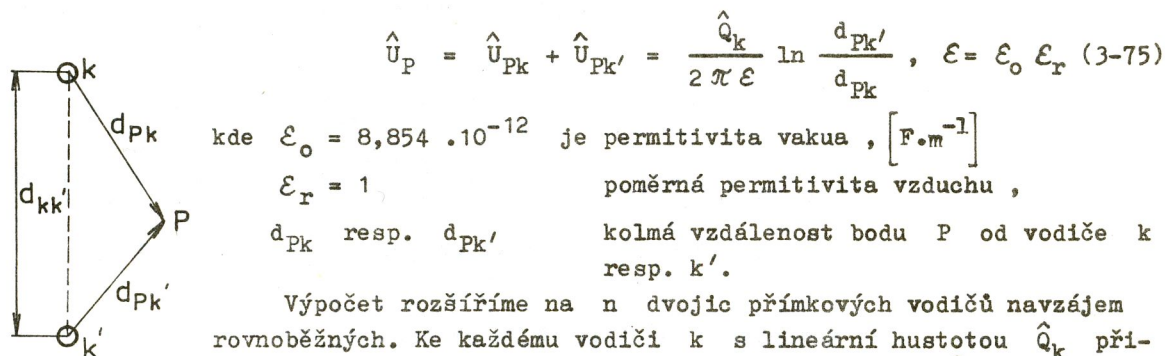
Ztráty svodem se zpravidla respektují u vedení se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším, a to jen při podrobnějších výpočtech.

### 3.1.4. Kapacity

Při výpočtu vycházíme ze soustav rovnic  $[\hat{U}] = [\hat{\sigma}][\hat{Q}]$  a  $[\hat{Q}] = [k][\hat{U}]$ , kde  $\hat{U}$  jsou potenciály vodičů,  $\hat{Q}$  lineární hustoty nábojů,  $\hat{\sigma}$  potenciálové součinitele a  $k$  kapacitní součinitele. Zpracování obou soustav rovnic umožňuje vypočítat kapacity dílčí a případně provozní. Vodič a zem, případně dva vodiče tvoří elektrody kondenzátorů; dielektrikem je vzduch ( $\epsilon_r = 1$ ).

#### 3.1.4.1. Potenciál v poli navzájem rovnoběžných vodičů

Dva přímkové rovnoběžné vodiče délky  $l$  ve vzájemné vzdálenosti  $d_{kk} \ll l$ , první s lineární hustotou náboje  $\hat{Q}_k$ , druhý  $\hat{Q}_{k'} = -\hat{Q}_k$  vyvolají při zanedbání konců vedení v libovolném bodě P potenciál (obr.3.7)



$$\hat{U}_P = \hat{U}_{Pk} + \hat{U}_{Pk'} = \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}}, \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3-75)$$

kde  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  je permitivita vakua, [F.m<sup>-1</sup>]

$\epsilon_r = 1$ , poměrná permitivita vzduchu,

$d_{Pk}$  resp.  $d_{Pk'}$  kolmá vzdálenost bodu P od vodiče k resp. k'.

Výpočet rozšíříme na n dvojic přímkových vodičů navzájem rovnoběžných. Ke každému vodiči k s lineární hustotou  $\hat{Q}_k$  přiřadíme odpovídající vodič k' s lineární hustotou  $\hat{Q}_{k'} = -\hat{Q}_k$ , kde  $k, k' \in N_n$ . Podle věty o nerušené superpozici působení jednotlivých nábojů bude pro potenciál v bodě P platit :

Obr.3.7

$$\hat{U}_P = \sum_{\substack{k=1 \\ k'=1}}^n (\hat{U}_{Pk} + \hat{U}_{Pk'}) = \sum_{k,k'=1}^n \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}}, \quad d_{kP} = d_{Pk}, \quad d_{k'P} = d_{Pk'} \quad (3-76)$$

kde  $\hat{U}_{Pk}$  resp.  $\hat{U}_{Pk'}$  jsou příspěvky na potenciál v bodě P od vodiče k resp. k'.

Skutečné vodiče nejsou přímkovými zdroji s náboji v osách, ale mají určitý poloměr, např. k-tý vodič  $r_k$ . Ekvipotenciální plochy při 2n-vodičové soustavě rovnoběžných přímkových vodičů jsou válcové plochy; jejich řezy v rovinách kolmých k osám vodičů mají tvar kružnic jen v těsné blízkosti os vodičů. Za předpokladu, že  $r_k \ll d_{km}$  (pro  $m \neq k$ ), kde  $d_{km} = d_{mk}$  je vzdálenost os vodičů k, m, lze jednu z ekvipotenciálních ploch ztotožnit s povrchem skutečného vodiče a přisoudit jí též potenciál jako ose vodiče. Pak  $d_{kk} = r_k$  bude "vzdálenost vodiče k sama od sebe".

Položíme-li bod P kamkoliv na povrch m-tého vodiče, bude jeho potenciál roven potenciálu m-tého vodiče

$$\hat{U}_m = \sum_{k,k'=1}^n \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{mk'}}{d_{mk}} \quad (3-77)$$

#### 3.1.4.2. Rovnice pro výpočet kapacit

U venkovních vedení musíme vedle vodičů fází a zemnicích lan respektovat ještě zem. Zanedbáme vliv průhybu vodičů a nerovnosti povrchu země, který pak uvažujeme jako nekonečnou rovinu a elektricky jako ekvipotenciální plochu. Vodiče nad zemí budou rovnoběžné navzájem a s povrchem země (označíme je jako "skutečné vodiče", jimiž jsou).

Přiřadíme ke každému skutečnému vodiči k fiktivní (pomyslný) vodič k' s ním rovnoběžný tak, aby byl uložen zrcadlově k povrchu země. Vytvoříme tak dvojice vodičů (k, k') k sobě přiřazených. Kterýkoliv bod Z, ležící na povrchu země, bude mít od obou vodičů k sobě přiřazených stejnou vzdálenost  $d_{Zk} = d_{Zk'}$ . Dosazením této podmínky do rovnice (3-77) dostaneme

$$d_{Zk} = d_{Zk'} \quad \longrightarrow \quad \hat{U}_Z = 0 \quad (3-78)$$

Povrch země je tedy ekvipotenciální plochou s nulovým potenciálem. Proto napětí skutečných vodičů proti zemi bude rovno potenciálům. Toto zjištění a přijaté předpoklady o vodičích a povrchu země umožňují nahradit uspořádání n skutečných vodičů fázových včetně zemnicích lan a země uspořádáním n dvojic vodičů, tvořených vždy vodičem skutečným, např. k-tým, s lineární hustotou náboje  $(+\hat{Q}_k)$  a odpovídajícím vodičem fiktivním k' s lineární hustotou náboje  $(-\hat{Q}_k)$ . Musíme mít na zřeteli, že pole pod povrchem země je fiktivní, zavedené pro zjednodušení výpočtu.

Na obr. 3.8 jsou vyznačeny dvě dvojice sobě odpovídajících vodičů (k, k') a (m, m'). Pro vzdálenosti platí:

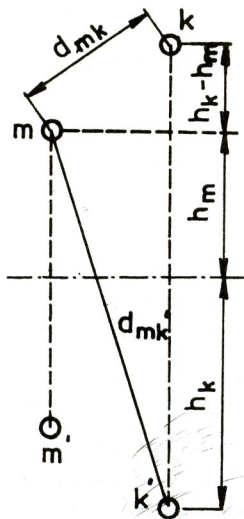
vzdálenost vodiče sama od sebe:

$$d_{mm} = r_m \quad d_{kk} = r_k \quad (3-79)$$

vzdálenost mezi dvěma skutečnými vodiči:

$$d_{km} = d_{mk} \quad (3-80)$$





Obr. 3.8.

vzdálenost skutečného a jemu odpovídajícího fiktivního vodiče:

$$d_{mm'} = 2 h_m \quad d_{kk'} = 2 h_k \quad (3-81)$$

a vzdálenost skutečného vodiče od neodpovídajícího fiktivního:

$$d_{km'} = d_{m'k} = d_{mk'} = d_{k'm} = \sqrt{(h_k + h_m)^2 + [d_{km}^2 - (h_k - h_m)^2]} = \\ = \sqrt{4 h_k h_m + d_{km}^2} \quad (2-82)$$

Rovnici (3-77) lze psát ve tvaru:

$$\hat{U}_m = \sum_{k=1}^n \delta_{km} \hat{Q}_k$$

kde obecně:

$$\delta_{mk} = \delta_{km} = \frac{\ln (d_{mk'} / d_{mk})}{2 \pi \epsilon} \quad (3-83)$$

příp.  $\delta_{mm} = \frac{\ln (2 h_m / r_m)}{2 \pi \epsilon}$  ,  $\delta_{mk} = \frac{\ln (\sqrt{4 h_m h_k + d_{mk}^2} / d_{mk})}{2 \pi \epsilon}$  (3-84)

$m \neq k$

jsou potenciálové součinitele. Určí se ze zadaného geometrického uspořádání vodičů a zemnicích lan vedení.

Náboj  $m$ -tého vodiče o lineární hustotě  $\hat{Q}_m$  a jemu odpovídající dielektrický tok lze rozdělit na část  $k$  zemi  $\hat{Q}_{m0}$  a části  $k$  vodičům s indexem  $k$ , tedy  $\hat{Q}_{mk}$ . Vyjádříme-li každý dílčí náboj jako součin kapacity a napětí mezi příslušnými vodiči, bude :

$$\hat{Q}_m = \hat{Q}_{m0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \hat{Q}_{mk} = c_{m0} \hat{U}_m + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n c_{mk} (\hat{U}_m - \hat{U}_k) \quad (3-85)$$

příp.  $\hat{Q}_m = (c_{m0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n c_{mk}) \hat{U}_m + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (-c_{mk}) \hat{U}_k \quad (3-86)$

kde  $c_{m0}$  je dílčí kapacita vodiče  $m$  k zemi,  $c_{mk} = c_{km}$  je dílčí kapacita mezi vodiči ( $m, k$ ). Obě veličiny jsou na jednotku délky. Abychom formálně zjednodušili předchozí rovnice, zavedeme definičně kapacitní součinitele  $k_{mm}$ ,  $k_{mk}$  :

$$k_{mm} = c_{m0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n c_{mk} \quad k_{mk} = -c_{mk} = k_{km}, \quad k \neq m \quad (3-87)$$

Rovnice (3-86) nabude pak tvar :

$$\hat{Q}_m = \sum_{k=1}^n k_{mk} \hat{U}_k \quad (3-88)$$

Rovnice (3-83) a (3-88) platí pro každý vodič (fází nebo zemnicí lana),  $m \in N_n$ . Každou z uvedených rovnic lze rozepsat do soustavy  $n$  rovnic a dát jim maticový tvar :

$$[\hat{U}] = [\delta][\hat{Q}] \quad (3-89)$$

$$[\hat{Q}] = [k][\hat{U}] \quad (3-90)$$

kde  $[\hat{U}]$  resp.  $[\hat{Q}]$  jsou sloupcové matice typu  $(n,1)$  potenciálů resp. lineárních hustot nábojů,  $[\delta]$  čtvercová symetrická a regulární matice typu  $(n,n)$  a  $[k]$  matice stejných vlastností jako  $[\delta]$  s prvky, které jsou kapacitní součinitele. Z obou předchozích rovnic lze získat rovnici

$$[\hat{U}] = [\delta][k][\hat{U}] \longrightarrow [k] = [\delta]^{-1} \quad (3-91)$$

která slouží pro výpočet dílčích kapacit na základě rovnice (3-87), které lze psát i ve tvaru, potřebném pro výpočet dílčích kapacit :

$$0 < c_{km} = +c_{mk} = -k_{mk} = -k_{km} \quad ; \quad c_{m0} = k_{mm} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n k_{mk} > 0 \quad (3-92)$$

Poněvadž v praktických výpočtech používáme dekadické logaritmy místo přirozených a dílčí kapacity v  $[\mu F/km]$ , upravíme rovnice (3-84) tak, aby potenciálové součinitele byly v  $[km/\mu F]$  :

$$\delta_{mm} = \frac{\log \frac{2 h_m}{r_m}}{0,0242} \left[ \left( \frac{\mu F}{km} \right)^{-1}; m, m \right] \quad \delta_{mk} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 h_m h_k + d_{mk}^2}}{d_{mk}}}{0,0242} \left[ \left( \frac{\mu F}{km} \right)^{-1}; m, m \right] \quad (3-93)$$

$m \neq k$

Stejně jako u impedancí definujeme i zde provozní kapacitu fáze  $m$  :

$$\hat{C}_m = \frac{c_{m0} \hat{U}_m + \sum_{m=1}^n c_{mk} (\hat{U}_m - \hat{U}_k)}{\hat{U}_m} = \frac{\hat{Q}_m}{\hat{U}_m} \quad (3-94)$$

Tato kapacita, popisující celkové působení na vodič ve vícevodičové soustavě, je obecně komplexní číslo.

Konečně vztah mezi lineární hustotou náboje a odpovídajícím proudem procházejícím příslušným kondenzátorem je

$$\hat{I}_{kc} = j\omega \hat{Q}_k \quad (3-95)$$

Dohoda : veličiny  $\delta$ ,  $k$ ,  $c$ ,  $C$  budou určeny na jednotku délky vodiče. Speciálně pro  $\delta$   $[km/\mu F]$  budou  $k$ ,  $c$ ,  $C$   $[\mu F/km]$ . Výrok "na jednotku délky" budeme dále vynechávat.

### 3.1.4.3. Kapacity jednoduchého trojfázového vedení

Předpokládáme vedení bez zemnicích lan s uspořádáním vodičů podle obr.3.4. Rovnice (3-89) a (3-90) lze psát ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ab} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ac} & \delta_{bc} & \delta_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ab} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ac} & k_{bc} & k_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} , \quad (3-96)$$

kde jsme použili vztahů  $\delta_{km} = \delta_{mk}$  ,  $k_{km} = k_{mk}$  .

Podle rovnice (3-91) lze psát :

$$[\delta]^{-1} = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ab} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ac} & k_{bc} & k_{cc} \end{bmatrix} = \quad (3-97)$$

$$= \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \delta_{bb} \delta_{cc} - \delta_{bc}^2 & -\delta_{ab} \delta_{cc} + \delta_{ac} \delta_{bc} & \delta_{ab} \delta_{bc} - \delta_{ac} \delta_{bb} \\ -\delta_{ab} \delta_{cc} + \delta_{ac} \delta_{bc} & \delta_{aa} \delta_{cc} - \delta_{ac}^2 & -\delta_{aa} \delta_{bc} + \delta_{ab} \delta_{ac} \\ \delta_{ab} \delta_{bc} - \delta_{bb} \delta_{ac} & -\delta_{aa} \delta_{bc} + \delta_{ab} \delta_{ac} & \delta_{aa} \delta_{bb} - \delta_{ab}^2 \end{bmatrix}$$

kde determinant

$$D = \delta_{aa} \delta_{bb} \delta_{cc} + 2 \delta_{ab} \delta_{ac} \delta_{bc} - \delta_{ac}^2 \delta_{bb} - \delta_{bc}^2 \delta_{aa} - \delta_{ab}^2 \delta_{cc} \quad (3-98)$$

Podle rovnice (3-92) budou dílčí kapacity vzájemné (např. mezi fázemi a,b)  $c_{ab} = c_{ba}$  a kapacita dílčí proti zemi (např. fáze a proti zemi)  $c_{ao}$  po porovnání s rovnicí (3-97) na jednotku délky

$$c_{ab} = -k_{ab} = D^{-1} \cdot (\delta_{ab} \delta_{cc} - \delta_{ac} \delta_{bc}) \quad (3-99)$$

$$\begin{aligned} c_{ao} &= k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = \\ &= D^{-1} \cdot (\delta_{cc} \delta_{bb} - \delta_{bc}^2 - \delta_{ab} \delta_{cc} + \delta_{ac} \delta_{bc} - \delta_{ac} \delta_{bb} + \delta_{ab} \delta_{bc}) \end{aligned} \quad (3-100)$$

Analogicky by se vypočítaly ostatní dílčí kapacity. Pro výpočet provozních kapacit přijmeme předpoklad :

$$\begin{aligned} \hat{U}_a &= U_a ; \quad \hat{U}_b = b U_a \sqrt{\beta} = b U_a (\cos \beta + j \sin \beta) ; \\ \hat{U}_c &= c U_a \sqrt{\gamma} = c U_a (\cos \gamma + j \sin \gamma) \end{aligned} \quad (3-101)$$

Podle rovnice (3-94) bude pro provozní kapacity platit :

$$\hat{C}_a = \frac{c_{ao} \hat{U}_a + c_{ab} (\hat{U}_a - \hat{U}_b) + c_{ac} (\hat{U}_a - \hat{U}_c)}{\hat{U}_a} = C_{ar} + j C_{aim} =$$

$$= (c_{ao} + c_{ab} + c_{ac} - c_{ab} b \cos \beta - c_{ac} c \cos \gamma) - j (c_{ab} b \sin \beta + c_{ac} c \sin \gamma) \quad (3-102)$$

$$\hat{C}_b = \frac{c_{bo} \hat{U}_b + c_{ab} (\hat{U}_b - \hat{U}_a) + c_{bc} (\hat{U}_b - \hat{U}_c)}{\hat{U}_b} = C_{br} + j C_{bim} =$$

$$= \left[ c_{bo} + c_{ab} + c_{bc} - \frac{c_{ab}}{b} \cos \beta - c_{bc} \frac{c}{b} \cos(\gamma - \beta) \right] + \quad (3-103)$$

$$+ j \left[ \frac{c_{ab}}{b} \sin \beta - c_{bc} \frac{c}{b} \sin(\gamma - \beta) \right]$$

a analogicky

$$\hat{C}_c = \left[ c_{co} + c_{ac} + c_{bc} - c_{ac} \frac{\cos \gamma}{c} - c_{bc} \frac{b}{c} \cos(\beta - \gamma) \right] + \quad (3-104)$$

$$+ j \left[ \frac{c_{ac}}{c} \sin \gamma - c_{bc} \frac{b}{c} \sin(\beta - \gamma) \right]$$

Výkon spotřebovaný v jednotlivých provozních kapacitách (např. fáze a) bude :

$$\hat{S}_{Ca} = j\omega \hat{C}_a \hat{U}_a \hat{U}_a^* = j\omega (C_{ar} + j C_{aim}) U_a^2 = -\omega C_{aim} U_a^2 + j\omega C_{ar} U_a^2 \quad (3-105)$$

Imaginární složka kapacity je původcem činného výkonu, který se vyměňuje mezi fázemi elektrostatickou vazbou. Součet těchto činných výkonů je roven nule ; vyměňuje se tudíž mezi fázemi, aniž výsledně zatěžuje zdroj. Důsledek nestejných kapacit je proudová nesymetrie v síti jinak souměrné.

Symetrizace lze dosáhnout transpozicí (stať 3.1.2.7). Pro matici potenciálových součinitelů dostaneme :

$$\delta = \frac{1}{3} \left\{ \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & \delta_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{33} & \delta_{13} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{12} & \delta_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{33} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{11} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \delta & \delta' & \delta' \\ \delta' & \delta & \delta' \\ \delta' & \delta' & \delta \end{bmatrix} \quad (3-106)$$

$$\text{kde } \delta = \frac{1}{3} (\delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33}) = \frac{\log \frac{2h}{r}}{0,0242}, \quad (3-107)$$

$$\delta' = \frac{1}{3} (\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23}) = \frac{\log \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}}{0,0242}$$

$$h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3} \quad \text{resp.} \quad d = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}} \quad \text{jsou střední výška, resp. střední vzájemná vzdálenost vodičů.}$$

Inverzní matice k matici potenciálových součinitelů je matice kapacitních

součinitelů. Výpočet poskytuje pro ni stejné prvky v hlavní diagonále a stejné prvky (různé od diagonálních) na ostatních místech matice :

$$\begin{bmatrix} \delta & \delta' & \delta' \\ \delta' & \delta & \delta' \\ \delta' & \delta' & \delta \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} k & k' & k' \\ k' & k & k' \\ k' & k' & k \end{bmatrix} \quad (3-108)$$

kde pro  $k$ , resp.  $k'$  platí

$$k = \frac{\delta + \delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')} , \quad k' = \frac{-\delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')} \quad (3-109)$$

Pak podle rovnice (3-92) bude dílčí vzájemná kapacita

$$c' = c_{ab} = c_{ac} = c_{bc} = -k' = \frac{\delta'}{(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')} \quad (3-110)$$

tedy stejná mezi kterýmikoliv dvěma vodiči a dílčí kapacita proti zemi bude stejná pro všechny fáze :

$$c_o = k + 2k' = c_{ao} = c_{bo} = c_{co} = \frac{1}{\delta + 2\delta'} \quad (3-111)$$

Provozní kapacita jedné fáze transponovaného vedení, které navíc bude mít symetrická napětí k zemi

$$\hat{U}_a = U_a \quad \hat{U}_b = \hat{a}^2 U_a \quad \hat{U}_c = \hat{a} U_a \quad (3-112)$$

bude podle (3-101) až (3-103), kam dosadíme  $b = c = 1$ ,  $|\beta| = \hat{a}^2 = \frac{4\pi}{3}$ ,  $|\gamma| = \hat{a} = \frac{2\pi}{3}$ ,  $c_{ao} = c_{bo} = c_{co} = c_o$ ,  $c_{ab} = c_{ac} = c_{bc} = c'$ ,

$$C_a = C_b = C_c = C \quad C = c_o + 3c' = \frac{1}{\delta - \delta'} \quad (3-113)$$

Provozní kapacita kterékoliv fáze bude stejné reálné číslo ; je to důsledek transpozice. Jestliže do rovnice (3-113) dosadíme za potenciálové součinitele z rovnice (3-107), platné pro transponované vedení, dostaneme :

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{2hd}{r\sqrt{4h^2 + d^2}}} \left[ \frac{\mu F}{km} ; m, m, m \right] \quad (3-114)$$

Speciálně, bude-li  $4h^2 \gg d^2 \longrightarrow \sqrt{4h^2 + d^2} \doteq 2h$  ; pak však dostaneme pro provozní kapacitu přibližný výraz, vydávaný někdy za obecně platný :

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{d}{r}} \left[ \frac{\mu F}{km} ; m, m, m \right] \quad (3-115)$$

3.1.4.4. Kapacity dvojitého trojfázového vedení se dvěma zemnicími lany

Uvážíme uspořádání podle obr.3.6 a předpokládáme, že obě vedení přísluší téže elektrizační soustavě. Rovnice (3-89) dostane tvar

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \\ \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \\ \hat{U}_{z1} \\ \hat{U}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} & \delta_{aA} & \delta_{aB} & \delta_{aC} & \delta_{az1} & \delta_{az2} \\ \delta_{ab} & \delta_{bb} & \delta_{bc} & \delta_{bA} & \delta_{bB} & \delta_{bC} & \delta_{bz1} & \delta_{bz2} \\ \delta_{ac} & \delta_{bc} & \delta_{cc} & \delta_{cA} & \delta_{cB} & \delta_{cC} & \delta_{cz1} & \delta_{cz2} \\ \delta_{aA} & \delta_{bA} & \delta_{cA} & \delta_{AA} & \delta_{AB} & \delta_{AC} & \delta_{Az1} & \delta_{Az2} \\ \delta_{aB} & \delta_{bB} & \delta_{cB} & \delta_{AB} & \delta_{BB} & \delta_{BC} & \delta_{Bz1} & \delta_{Bz2} \\ \delta_{aC} & \delta_{bC} & \delta_{cC} & \delta_{AC} & \delta_{BC} & \delta_{CC} & \delta_{Cz1} & \delta_{Cz2} \\ \delta_{az1} & \delta_{bz1} & \delta_{cz1} & \delta_{Az1} & \delta_{Bz1} & \delta_{Cz1} & \delta_{z1z1} & \delta_{z1z2} \\ \delta_{az2} & \delta_{bz2} & \delta_{cz2} & \delta_{Az2} & \delta_{Bz2} & \delta_{Cz2} & \delta_{z1z2} & \delta_{z2z2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Q}_a \\ \hat{Q}_b \\ \hat{Q}_c \\ \hat{Q}_A \\ \hat{Q}_B \\ \hat{Q}_C \\ \hat{Q}_{z1} \\ \hat{Q}_{z2} \end{bmatrix} \quad (3-116)$$

případně pro rozeptání do bloků :

$$\begin{bmatrix} [\hat{U}_v] \\ [\hat{U}_z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\delta_{vv}] & [\delta_{vV}] & [\delta_{vz}] \\ [\delta_{Vv}] & [\delta_{VV}] & [\delta_{Vz}] \\ [\delta_{zv}] & [\delta_{zV}] & [\delta_{zz}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\hat{Q}_v] \\ [\hat{Q}_V] \\ [\hat{Q}_z] \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} v \sim (A,B,C) \\ v \sim (a,b,c) \end{array} \quad (3-117)$$

Význam bloků vyplývá porovnáním. Konkrétně blok  $[\delta_{vz}]$  má za prvky potenciálové součinitele, respektující vzájemný vliv vodičů (A,B,C), zkráceně označených indexem V, a zemnicích lan (z1,z2), zkráceně označených indexem z. Vytvoříme-li k matici typu (8,8) potenciálových součinitelů v rovnici (3-116) matici inverzní, bude

$$[\delta]^{-1} = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} & k_{aA} & k_{aB} & k_{aC} & k_{az1} & k_{az2} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} & k_{bA} & k_{bB} & k_{bC} & k_{bz1} & k_{bz2} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} & k_{cA} & k_{cB} & k_{cC} & k_{cz1} & k_{cz2} \\ k_{Aa} & k_{Ab} & k_{Ac} & k_{AA} & k_{AB} & k_{AC} & k_{Az1} & k_{Az2} \\ k_{Ba} & k_{Bb} & k_{Bc} & k_{BA} & k_{BB} & k_{BC} & k_{Bz1} & k_{Bz2} \\ k_{Ca} & k_{Cb} & k_{Cc} & k_{CA} & k_{CB} & k_{CC} & k_{Cz1} & k_{Cz2} \\ k_{z1a} & k_{z1b} & k_{z1c} & k_{z1A} & k_{z1B} & k_{z1C} & k_{z1z1} & k_{z1z2} \\ k_{z2a} & k_{z2b} & k_{z2c} & k_{z2A} & k_{z2B} & k_{z2C} & k_{z2z1} & k_{z2z2} \end{bmatrix} \quad (3-118)$$

Prvky této matice umožňují podle rovnice (3-92) vypočítat dílčí kapacity. Vzájemné dílčí kapacity budou rovny mimodiagonálním prvkům, ale s opačným znaménkem. Např.:  $-k_{aB} = c_{aB}$  bude dílčí vzájemná kapacita mezi vodičem a vedení

(a,b,c) a vodičem B vedení (A,B,C). Dílčí kapacity k zemi určíme jako součet prvků příslušného řádku v matici. Konkrétně dílčí kapacita k zemi vodiče B vedení (A,B,C) bude :

$$c_{Bo} = k_{BB} + \sum_k k_{Bk} \quad k \in \{a, b, c, A, C, z1, z2\} \quad (3-119)$$

Maticová rovnice (3-117) slouží pro hlubší studium různých provozních stavů. Uvažme např. poměry, kdy druhé vedení (s indexy A,B,C) bude naprázdno. Pak však

$$\hat{Q}_A = \hat{Q}_B = \hat{Q}_C = 0 \quad \longrightarrow \quad [\hat{Q}_V] = [0] \quad (3-120)$$

Dobře uzemněná zemnicí lana mají potenciál země a ten je nulový. Proto

$$\hat{U}_{z1} = 0 = \hat{U}_{z2} \quad \longrightarrow \quad [\hat{U}_z] = [0] \quad (3-121)$$

Předmětem vyšetření bude proud přitékající do zemnicích lan a napětí ve vodičích A, B, C. Dosadíme-li za  $[\hat{Q}_V]$  a  $[\hat{U}_z]$  do rovnice (3-117), kterou rozepíšeme do tří rovnic, bude :

$$[\hat{U}_V] = [\delta_{VV}] [\hat{Q}_V] + [\delta_{VZ}] [\hat{Q}_Z] \quad (3-122)$$

$$[\hat{U}_V] = [\delta_{VV}] [\hat{Q}_V] + [\delta_{VZ}] [\hat{Q}_Z] \quad (3-123)$$

$$[0] = [\delta_{ZV}] [\hat{Q}_V] + [\delta_{ZZ}] [\hat{Q}_Z] \quad (3-124)$$

Z rovnice (3-124), kde  $[\delta_{ZZ}]$  je regulární, vypočteme

$$[\hat{Q}_Z] = -[\delta_{ZZ}]^{-1} \cdot [\delta_{ZV}] [\hat{Q}_V] \quad (3-125)$$

a vložíme do rovnic (3-122) a (3-123) :

$$[\hat{U}_V] = ([\delta_{VV}] - [\delta_{VZ}] [\delta_{ZZ}]^{-1} \cdot [\delta_{ZV}]) [\hat{Q}_V] \sim [\hat{U}_V] = [\delta_{k1}] [\hat{Q}_V] \quad (3-126)$$

$$[\hat{U}_V] = ([\delta_{VV}] - [\delta_{VZ}] [\delta_{ZZ}]^{-1} \cdot [\delta_{ZV}]) [\hat{Q}_V] \sim [\hat{U}_V] = [\delta_{k2}] [\hat{Q}_V] \quad (3-127)$$

Za předpokladu, že čtvercová matice  $[\delta_{k1}]$  je regulární, bude

$$[\hat{Q}_V] = [\delta_{k1}]^{-1} \cdot [\hat{U}_V] \quad (3-128)$$

Po dosazení do rovnic (3-125) a (3-127) za  $[\hat{Q}_V]$  a při uvážení rovnice (3-95) bude napětí proti zemi ve vodičích (A, B, C) vzniklé kapacitními vazbami

$$[\hat{U}_V] = [\delta_{k2}] [\delta_{k1}]^{-1} \cdot [\hat{U}_V] \quad (3-129)$$

a proudy, přitékající do zemnicích lan kapacitními vazbami,

$$j\omega [\hat{Q}_Z] = [\hat{I}_{zc}] = -j\omega [\delta_{ZZ}]^{-1} \cdot [\delta_{ZV}] [\delta_{k1}]^{-1} \cdot [\hat{U}_V] \quad (3-130)$$

Tento jednoduchý případ ukazuje možnost širšího využití metody, původně zamýšlené pro výpočet kapacit venkovních vedení.

#### 3.1.4.5. Poznámky pro praktický výpočet kapacit

- Za výšku vodiče nad zemí  $h$  se považuje výška těžiště řetězovky. Je-li  $H$  výška závěsného bodu,  $p$  průhyb, bude  $h = H - 0,7 p$ .
- Kovové stožáry zvětšují kapacitu k zemi proti vypočteným hodnotám. Činitel zvětšení je závislý na jmenovitém napětí. Pro napětí 22 - 35 - 110 - 220 - 400 kV nabývá hodnot postupně 1,065 - 1,06 - 1,04 - 1,035 - 1,03.

#### 3.1.5. Shrnutí

Rezistance  $R$  a indukční reaktance  $X = \omega L$  vytvářejí podélnou impedanci

$$\hat{Z}_l = R + j\omega L = R + jX = Z_l \angle \varphi \quad (3-131)$$

kde  $Z_l = \sqrt{R^2 + X^2}$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = X/R$   $\varphi \in \langle 0, \pi/2 \rangle$

Podélná impedance může být vlastní, vzájemná nebo provozní podle toho, kterou rezistancí a k ní příslušnou reaktancí uvažujeme.

Konduktance  $G$  a kapacitní susceptance  $B = \omega C$  vytvářejí příčnou admitanci

$$\hat{Y}_q = G + j\omega C = G + jB = Y_q \angle \psi \quad (3-132)$$

kde  $Y_q = \sqrt{G^2 + B^2}$ ,  $\operatorname{tg} \psi = B/G$   $\psi \in \langle 0, \pi/2 \rangle$

Příčná admitance může být dílčí k zemi, dílčí vzájemná nebo provozní podle toho, kterou konduktancí a k ní příslušnou susceptancí uvažujeme.

Pokud veličiny  $R$ ,  $X$ ,  $G$ ,  $B$  jsou na jednotku délky, jsou i podélná impedance a příčná admitance na jednotku délky.

#### 3.2. Elektrické parametry kabelových vedení

Kabely se jmenovitým napětím do 35 kV se běžně používají např. v městských a průmyslových rozvodech; s vyšším jmenovitým napětím pak ve velkoměstech, příp. pro zvláštní účely. Pořizovací náklady kabelových vedení jsou podstatně vyšší než u venkovních vedení. Pro napětí 380/220 V se používá převážně trojfázových kabelů. U nich jsou vodiče (dráty nebo lana) opatřeny izolací (PVC, polyetylen, napouštěný papír). Takto vzniklé žíly se pak zlaní, opatří společnou izolační obálkou a podle druhu kabelu případně ještě kovovým obalem (olovo, hliník) a pancířem.

Pro napětí 22 kV a 35 kV se používá trojfázových kabelů, u nichž každá žíla je opatřena buď olověným pláštěm nebo kovovou fólií nebo pokoveným papírem; kabel má společný olověný plášť a další krycí obaly. Začínají se uplatňovat jednožilové kabely, u nichž izolaci tvoří síťovaný polyetylen. Pro napětí 110 kV až do 380 kV (pokusně 500 kV) se používá jednožilových kabelů speciálních konstrukcí (trojfázové jsou vyjíměčné).



### 3.2.1. Podélná impedance kabelových vedení

Jako u venkovních vedení ji tvoří rezistance  $R$  a indukční reaktance  $\omega L = X$ . S malými odchylkami lze použít rovnic (3-46) až (3-50) a (3-131). Trojfázový kabel je jediným případem (geometricky) souměrného vedení; v jiných případech nutno symetrizovat (transpozicemi), je-li toho třeba. U jednožilových kabelů uložených vedle sebe se transponuje jen při větších délkách a napětí 110 kV nebo vyšším. Jsou-li jednožilové kabely uspořádány do stejnostranného trojúhelníka, není transpozice třeba.

Rezistance se určí stejně jako u venkovních vedení. Místo průhybu se uvažuje její zvětšení při střídavém proudu proti odporu při proudu stejnosměrném vlivem případné existence kovového pláště a kovového pancíře (vířivé proudy a hystereze) a vlivem jevu blízkosti (proximity-efekt). Zvětšení uvedenými vlivy závisí i na konstrukci kabelu a je matematicky těžko postižitelné exaktním výpočtem. Proto se přídavná část rezistance  $\Delta R$ , způsobená předchozími vlivy, udává tabelárně. Pak

$$R = R_{\sim} + \Delta R \quad (3-133)$$

kde  $R_{\sim}$  je rezistance bez respektování vlivu proximity-efektu pláště a pancíře při střídavém proudu.

Přídavná rezistance  $\Delta R$  roste s průřezem a závisí na typu a jmenovitém napětí kabelu. Pro průřezy (35 až 400 mm<sup>2</sup>) nabývá hodnot (0,0003 až 0,003)  $\Omega/\text{km}$  u celoplastových kabelů nn, (0,002 až 0,009)  $\Omega/\text{km}$  u kabelů nn s papírovou izolací a pláštěm, (0,008 až 0,014)  $\Omega/\text{km}$  u trojplášťových kabelů do 35 kV.

Výsledně bude :

$$R = k_{\gamma} k_s k_{\ell} R_{ss01} + \Delta R \quad (3-134)$$

kde  $k_{\gamma}$ ,  $k_s$ ,  $k_{\ell}$  viz (3-11). Tabulky rezistancí v ČSN již respektují vliv zlanění ( $k_{\ell}$ ) a skinefektu ( $k_s$ ). Přídavná rezistance  $\Delta R$  se respektuje jen při podrobných výpočtech a známé teplotě vodičů kabelu.

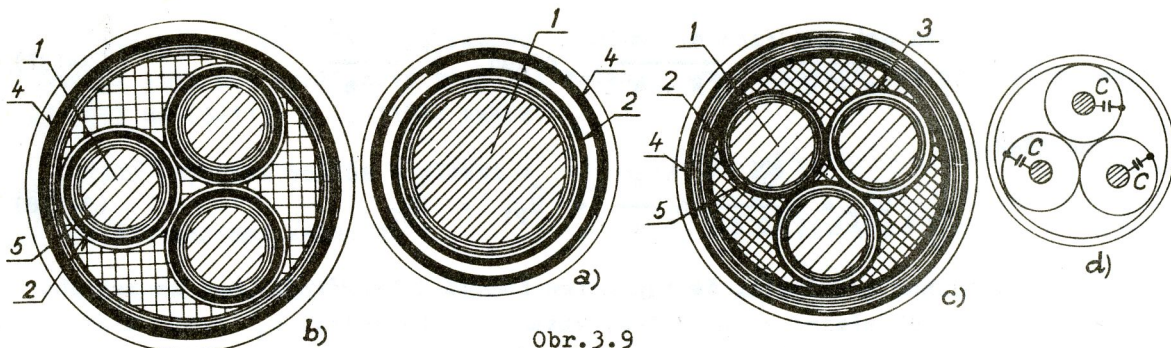
Pro výpočet indukční reaktance se použije stejných vzorců jako u venkovních vedení. Vzhledem k tomu, že u kabelů není splněna podmínka  $d \gg r$  ( $d$  je vzdálenost os vodičů,  $r$  jejich poloměr), jsou vypočítané hodnoty méně přesné než u venkovních vedení, avšak pro technické účely plně použitelné.

### 3.2.2. Příčná admitance kabelových vedení

Tvoří ji konduktance  $G$  a kapacitní susceptance  $B = \omega C$ . Různá konstrukční uspořádání a izolační materiály vodičů způsobují značně rozdílné hodnoty v jednotlivých případech. Všimneme si nejdříve imaginární složky admitance (3-132), tedy kapacitní susceptance a s ní souvisejících kapacit.

#### 3.2.2.1. Kapacity kabelových vedení

Rozlišujeme dvě skupiny kabelů : a) jednožilové a vícežilové s vlastním kovovým obalem na každé žíle, b) vícežilové se společným kovovým pláštěm pro všechny žíly. U kabelů ad a) jednožilových (obr.3.9a), trojplášťových, tj. s olověným pláštěm na každé žíle (obr.3.9b) a stíněných, tj. s kovovou fólií nebo pokoveným papírem na každé žíle (obr.3.9c), je kapacita jediná (obr.3.9d), která je kapacitou vodiče proti plášti a zároveň provozní. Elektrické pole tohoto kabelu (při zanedbání vlivu konců) je radiální. Kapacita se vypočte jako kapacita sousých válců (na jednotku délky)



Obr. 3.9

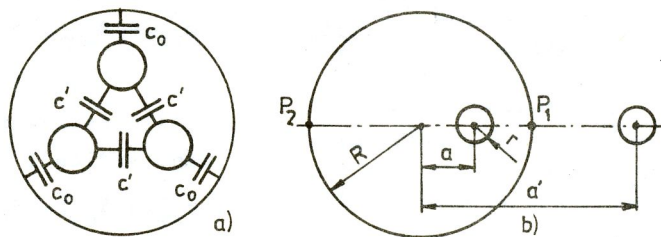
1...vodič, 2...olověný plášť, 3...pokovený papír, 4...ocelový pancíř, 5...izolace vodiče

$$C = c_{ko} = \frac{0,0242 \epsilon_r}{\log(r_2/r_1)} \left[ \frac{\mu F}{km} ; cm, cm \right] \quad (3-135)$$

kde  $\epsilon_r$  je poměrná permitivita izolační hmoty mezi vodičem a kovovým obalem,  
 $r_1$  poloměr vodiče,  
 $r_2$  vnitřní poloměr kovové obálky.

Kabely ad b) nemají na každé žíle kovový obal, ale jen společný kovový plášť pro všechny tři žíly. U nich se vedle provozní kapacity vyskytují další dílčí kapacity k plášti  $c_0$  a vzájemné  $c'$  (obr.3.10a) pro všechny fáze stejné s ohledem na geometrickou souměrnost tohoto kabelového vedení. Elektrické pole není čistě radiální. Tyto trojfázové kabely představují při zanedbání zlanění soustavu tří rovnoběžných válcových elektrod s poloměrem rovným poloměru vodiče  $r$  a "obálky" ve tvaru válce o poloměru  $R$ , která je ekvipotenciální plochou. Obálku představuje kovový plášť, společný všem třem žilám. Analogicky jako u venkovních vedení vytvoříme pro výpočet matematický model. Bude jím soustava tří dvojic vodičů navzájem rovnoběžných, která splňuje podmínku, že obálka je ekvipotenciální plochou. Jeden vodič je skutečný, druhý ve dvojici je fiktivní. Roviny určené dvojicí k sobě přiřazených vodičů zde nebudou rovnoběžné, ale jejich průsečnicí bude osa obalového válce, představovaného zmíněnou obálkou.

V řezu s rovinou, kolmou k ose vodičů, je znázorněn obalový válec kružnicí o poloměru  $R$  (obr.3.10b) a jeden ze skutečných vodičů, např. k-tý, s hustotou náboje  $(+\hat{Q}_k)$ , který má od osy válce danou vzdálenost  $a$ ; k němu příslušný fiktivní vodič s lineární hustotou náboje  $(-\hat{Q}_k)$  má hledanou vzdálenost  $a'$ .



Obr. 3.10

Podle předpokladu je obalový válec ekvipotenciální plochou. Pro jeho potenciál  $\hat{U}_{pl}$  bude platit podle rovnice (3-75) s použitím bodů  $P_1$  a  $P_2$  :

$$\hat{U}_{pl} = \hat{U}_{P1} = \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{a' - R}{R - a} = \hat{U}_{P2} = \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{a' + R}{a + R} \quad (3-136)$$

Pro splnění této rovnice musí platit

$$\frac{a' + R}{a + R} = \frac{a' - R}{R - a}, \text{ odkud } a' = \frac{R^2}{a} \quad (3-137)$$

Pak však

$$\hat{U}_{pl} = \frac{\hat{Q}_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{a} = \hat{U}_{P1} = \hat{U}_{P2} \quad (3-138)$$

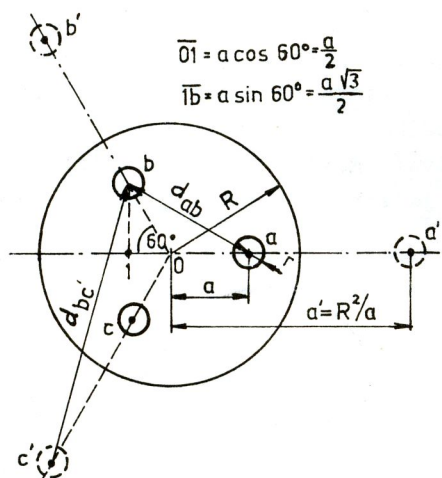
Výpočtem bychom prokázali, že týž potenciál má i kterýkoliv bod na povrchu obalového válce. Jak zřejmě z obr.3.10a, vztahujeme kapacity  $c_0$  proti plášti; proto musíme pracovat nikoliv s potenciály vodičů k zemi, ale s rozdíly potenciálů vodičů a pláště. Příspěvek na potenciál vodiče k od vodičů m a m' pak bude

$$\hat{U}_{km}^x = \hat{U}_{km} - \hat{U}_{pl} = \frac{\hat{Q}_m}{2\pi\epsilon} \left[ \ln \frac{d_{km'}}{d_{km}} - \ln \frac{R}{a} \right] = \frac{\hat{Q}_m}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{km'} a}{d_{km} R} \quad (3-139)$$

případně

$$\hat{U}_{km}^x = \delta_{km}^x \hat{Q}_m \longrightarrow \delta_{km}^x = \delta_{mk}^x = \frac{\ln \frac{d_{km'} a}{d_{km} R}}{2\pi\epsilon} \quad (3-140)$$

Potřebné vzdálenosti pro výpočet potenciálových součinitelů zjistíme z obr.3.11 :



Obr.3.11

poloměry vodičů :  $d_{kk} = r_a = r_b = r_c = r$  (3-141)

vzdálenost dvou skutečných vodičů :

$$d_{km} = d_{ab} = d_{ac} = d_{bc} = a\sqrt{3} \quad (3-142)$$

$m \neq k$

vzdálenost sobě odpovídajících vodičů :

$$d_{kk'} = d_{aa'} = d_{bb'} = d_{cc'} = a' - a = (R^2 - a^2)/a \quad (3-143)$$

vzdálenost skutečného a neodpovídajícího fiktivního vodiče :

$$\begin{aligned} d_{km'} &= d_{ab'} = d_{ac'} = d_{bc'} = \\ &= \sqrt{(a' + a \cos 60^\circ)^2 + (a \sin 60^\circ)^2} = \\ &= R \sqrt{\frac{R^2}{a^2} + 1 + \frac{a^2}{R^2}} \end{aligned} \quad (3-144)$$

Jestliže do rovnice (3-140) zavedeme dekadické logaritmy místo přirozených a požadujeme potenciálové součinitele v [km/μF], bude po úpravách :

$$\delta_{kk}^x = \delta = \frac{\log \frac{R^2 - a^2}{R r}}{0,0242 \epsilon_r}; \quad \delta_{km}^x = \frac{\log \sqrt{\frac{1 + (R^2/a^2) + (a^2/R^2)}{3}}}{0,0242 \epsilon_r}, \quad k \neq m \quad (3-145)$$

Trojžilový kabel je trojfázové souměrné vedení; lze pro ně psát analogické rovnice jako pro trojfázové venkovní vedení, symetrizované bez zemnicích lan, (3-108) až (3-111) a (3-115), takže

$$\text{dílní kapacita vodiče k plášti : } c_0 = 1/(\delta + 2\delta') \quad (3-146)$$

$$\text{dílní vzájemná kapacita : } c' = \delta' / [(\delta - \delta')(\delta + 2\delta')] \quad (3-147)$$

$$\text{kapacita provozní [při platnosti rovnice (3-112)] : } \\ C = c_0 + 3 c' = 1/(\delta - \delta') \quad (3-148)$$

Za  $\delta$  a  $\delta'$  dosazujeme z rovnice (3-145). Kapacity jsou v [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ].

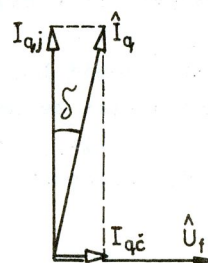
Poznámka : Kapacity jsou závislé na permitivitě izolantu, který je zpravidla složitým prostředím. Zjišťuje se měřením. Výrobci pak udávají přímo kapacity v tabulkách. Výpočet je třeba jen v případě, není-li příslušná hodnota zjistitelná z tabulek.

### 3.2.2.2. Konduktance kabelových vedení

Souvisí s dielektrickými ztrátami v izolaci kabelu, namáhané napětím. Na obr.3.12 značí  $\hat{I}_q$  fázor proudu jdoucího do dielektrika kabelu, tedy napříč k vodiči kabelu, na 1 km délky. Dielektrické ztráty na 1 km délky a jednu fázi jsou :

$$\Delta P_{d1} = U_f I_{q\check{c}} = U_f I_{qj} \operatorname{tg} \delta = Q_{c1} \operatorname{tg} \delta = \omega C \cdot U_f^2 \operatorname{tg} \delta \quad [\text{W}/(\text{km}, \text{fáze})] \quad (3-149)$$

kde  $U_f$  [V] je fázové napětí ,  
 $Q_c$  [VAr/km] nabíjecí výkon ,  
 $C$  [F/km] provozní kapacita ,  
 $\omega$  [1/s] úhlový kmitočet ,  
 $\operatorname{tg} \delta$  tangenta ztrátového úhlu, značně závislá na druhu dielektrika a teplotě [pro 20°C a 50 Hz je  $\operatorname{tg} \delta$  v rozmezí (0,2 až 0,4) · 10<sup>-3</sup> pro síťovaný polyetylén, (0,02 až 0,1) pro PVC a 10<sup>-2</sup> pro napuštěný papír].



Obr.3.12

Konduktance na 1 km délky bude :

$$G_1 = \Delta P_{d1} / U_f^2 \quad [\text{S}/\text{km}; \text{W}/(\text{km}, \text{fáze}), \text{V}] \quad (3-150)$$

a respektuje se u řádně udržovaných kabelů až od jmenovitého napětí 220 kV, pokud nejde o výpočet ztrát.

### 3.3. Tlumivky v trojfázové soustavě

Jsou to přístroje s jediným vinutím v každé fázi, případně s jediným vinutím vůbec. Spotřebovávají převážně jalový indukční výkon; jejich spotřeba činného výkonu (ztráty) má být co nejmenší. Podle postavení v soustavě rozeznáváme tři základní druhy : podélné, příčné a uzlové. Parametry dále uvedené mají platnost pro stacionární chod a pro pomalé přechodné jevy. Pro rychlé přechodné jevy, např. při vniknutí atmosférických výbojů do vedení, je podle okolností třeba dalšího zpřesnění (viz technika vysokých napětí).