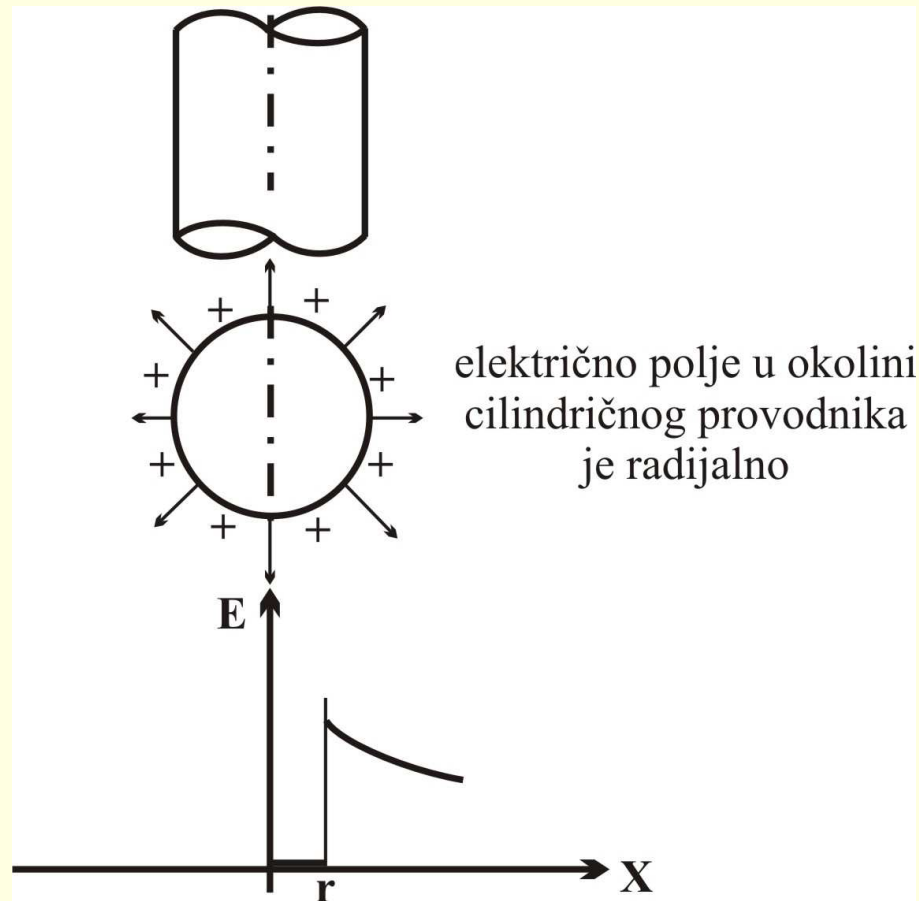


Elementi elektroenergetskih sistema

- Kapacitivnost pravolinijskog provodnika
 - Podužna kapacitivnost trofaznih vodova
- Podužna kapacitivnost trofaznog voda sa fazama u snopu
- Podužna kapacitivnost dvostrukog voda na istim stubovima
 - Podužna aktivna odvodnost nadzemnih vodova
 - Korona

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

- Električno polje cilindričnog provodnika:



2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

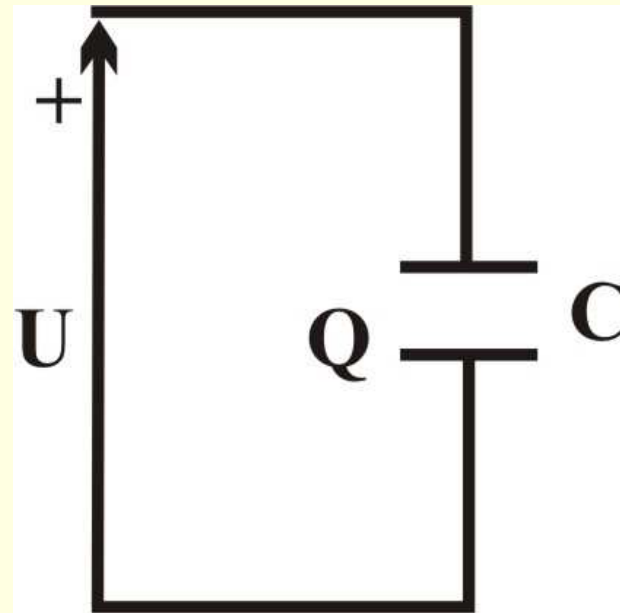
- Kapacitet je po definiciji odnos količine naelektrisanja na elektrodama i napona između elektroda.

$Q [C]$ *Kulon*

$U [V]$ *Volt*

$C [F]$ *Farad*

$$C = \frac{Q}{U} \Rightarrow 1F = \frac{1C}{1V}$$



C=kapacitivost sistema elektroda, U = napon između elektroda

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

- Električno polje je u okolini cilindričnog provodnika radijalno:

$$E_x = 0, \text{ za } x < r$$

$$E_x = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{x}, \text{ za } x \geq r$$

q - podužno naelektrisanje provodnika $\left[\frac{C}{km} \right]$

ε_0 - dielektrična konstanta vakuumu, $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi} \left[\frac{F}{m} \right] = \frac{10^{-6}}{36 \cdot \pi} \left[\frac{F}{km} \right]$

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

$$\blacksquare \text{ Za } x \geq r \Rightarrow E_x = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{x} = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

V – potencijal (skalarna veličina)

Potencijal tačke A na rastojanju x od centra provodnika:

$$V_x = -\int E_x \cdot dx = -\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln x + V_0$$

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

V_0 -integraciona konstanta koja zavisi od izbora referentne tačke nultog potencijala

Ako je na rastojanju x_0 , potencijal jednak nuli, tada sledi:

$$\left[\begin{array}{l} x = x_0 \\ V_x = x_0 = 0 \end{array} \right] \Rightarrow 0 = -\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln x_0 + V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln x_0$$

Konačno se dobija da je potencijal tačke na rastojanju

$$x \Rightarrow V_x = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{x_0}{x}, \text{ pri čemu se ne sme usvojiti da je}$$

$$x_0 \text{ u } \infty, x_0 \not\rightarrow \infty$$

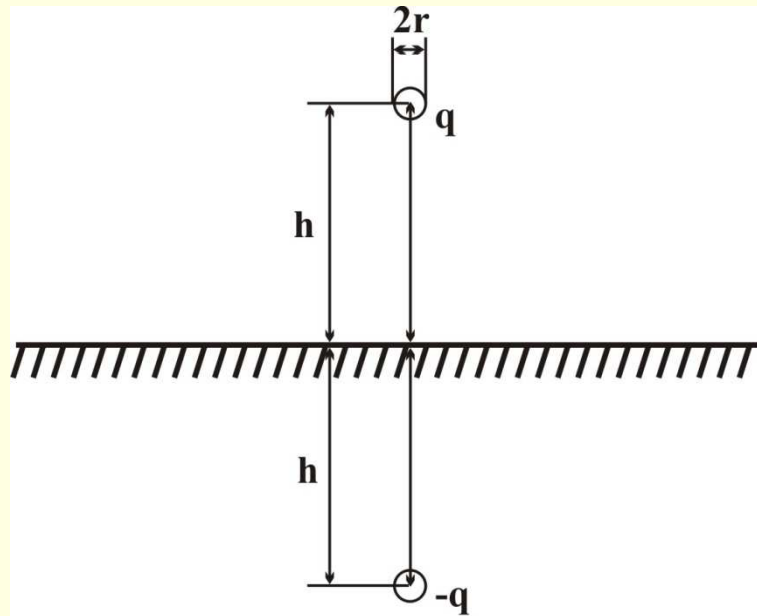
2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

- Iz elektrotehnike, poznato je da se zemlja može ekvivalentirati sa provodnikom $-q$ na rastojanju h .
- Pri proračunima c provodna ravan (zemlja) može se zameniti fiktivnim provodnicima, odnosno likovima u ogledalu stvarnih provodnika. Suprotnog su naelektrisanja. Pod tim uslovima, električno polje u prostoru iznad provodne ravni se ne menja zamenom provodne ravni fiktivnim provodnicima.

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

- Potencijal na površini provodnika je:

$$V_{x=r} = V_q + V_{-q}$$



Lik u ogledalu (fiktivni provodnik)

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

$$V_q = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{h}{r}, \text{ gde je:}$$

h -udaljenost provodnika od tačke nultog potencijala, zemlje

r -udaljenost centra od površine provodnika (od mesta na kome se računa potencijal)

2.4.3.1 Kapacitivnost pravolinijskog provodnika

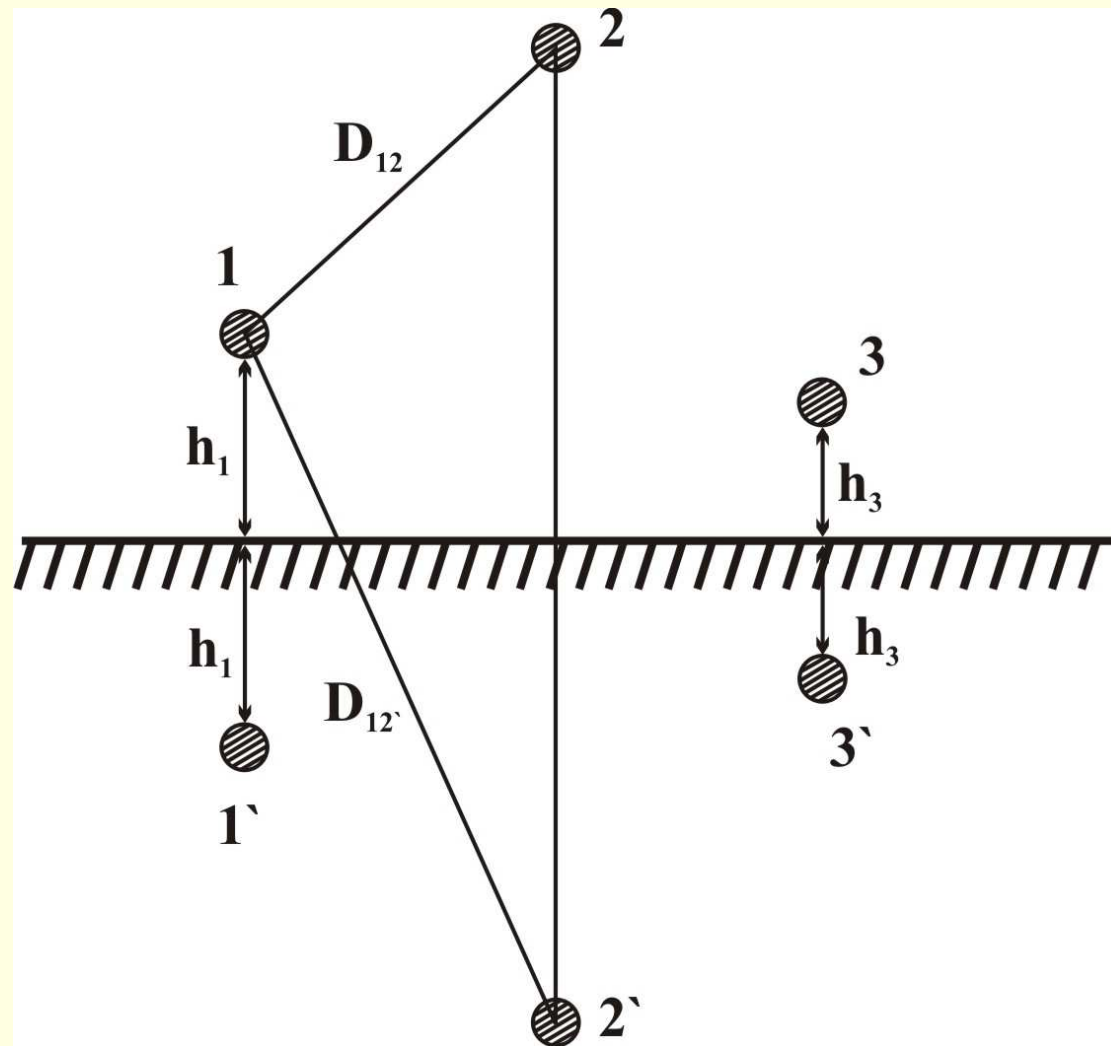
$$V_{-q} = \frac{-q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{h}{(2 \cdot h - r)}$$

$$V_{x=r} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{r} \text{ -potencijal na površini provodnika naelektrisanog sa } q$$

2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih užadi)

- Vod koji je u elektromagnetnom smislu simetričan (fazni provodnici, postavljeni u temenima jednakostraničnog trougla) u elektrostatičkom smislu nije simetričan.
- Asimetriju izaziva zemlja koja je provodna za razliku od vazduha, dok je u magnetskom smislu približno jednaka vazduhu.
- U elektrostatičkom smislu vod može postati simetričan, ako se izvrši preplitanje faznih provodnika, tako da se u proseku svaki fazni provodnik nađe u istom položaju u odnosu na zemlju.

2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih uđadi)



2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih užiadi)

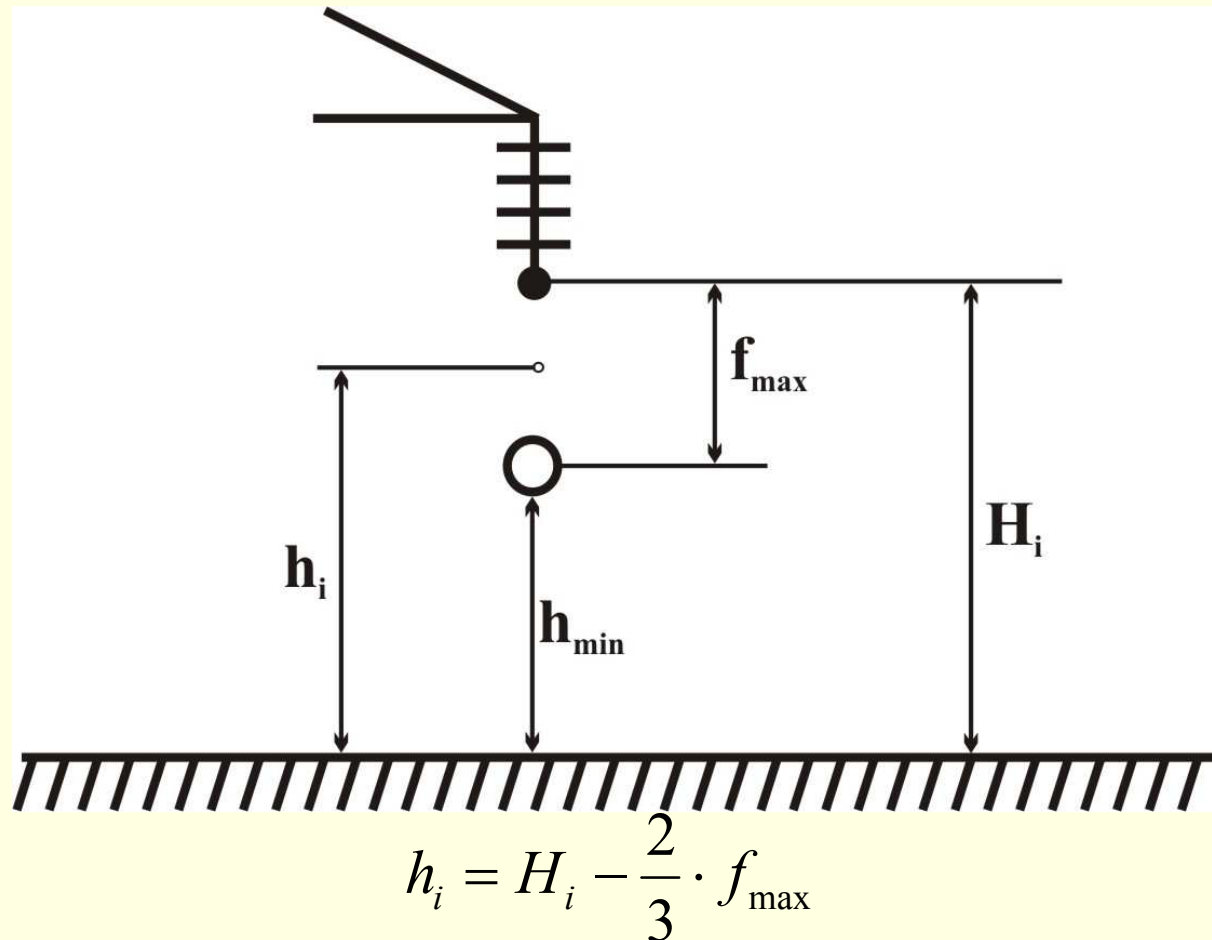
- Zbog transpozicije, uzimaju se srednje vrednosti:

$$h_{SG3f} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$$

$$D_{SGij} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}$$

2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih uđadi)



h_i - zbog različite visine provodnika duž trase

2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih užadi)

- Fazni provodnici, zbog ugiba nisu strogo pravi i horizontalni. Pri izračunavanju c treba raditi sa srednjim visinama vešanja faznih provodnika: $h_i = H_i - \frac{2}{3} \cdot f_{\max}$, gde je H_i - visina tačaka vešanja provodnika.

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{D_{SGij'}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{D_{SGij'}}} \left[\frac{F}{km} \right]$$

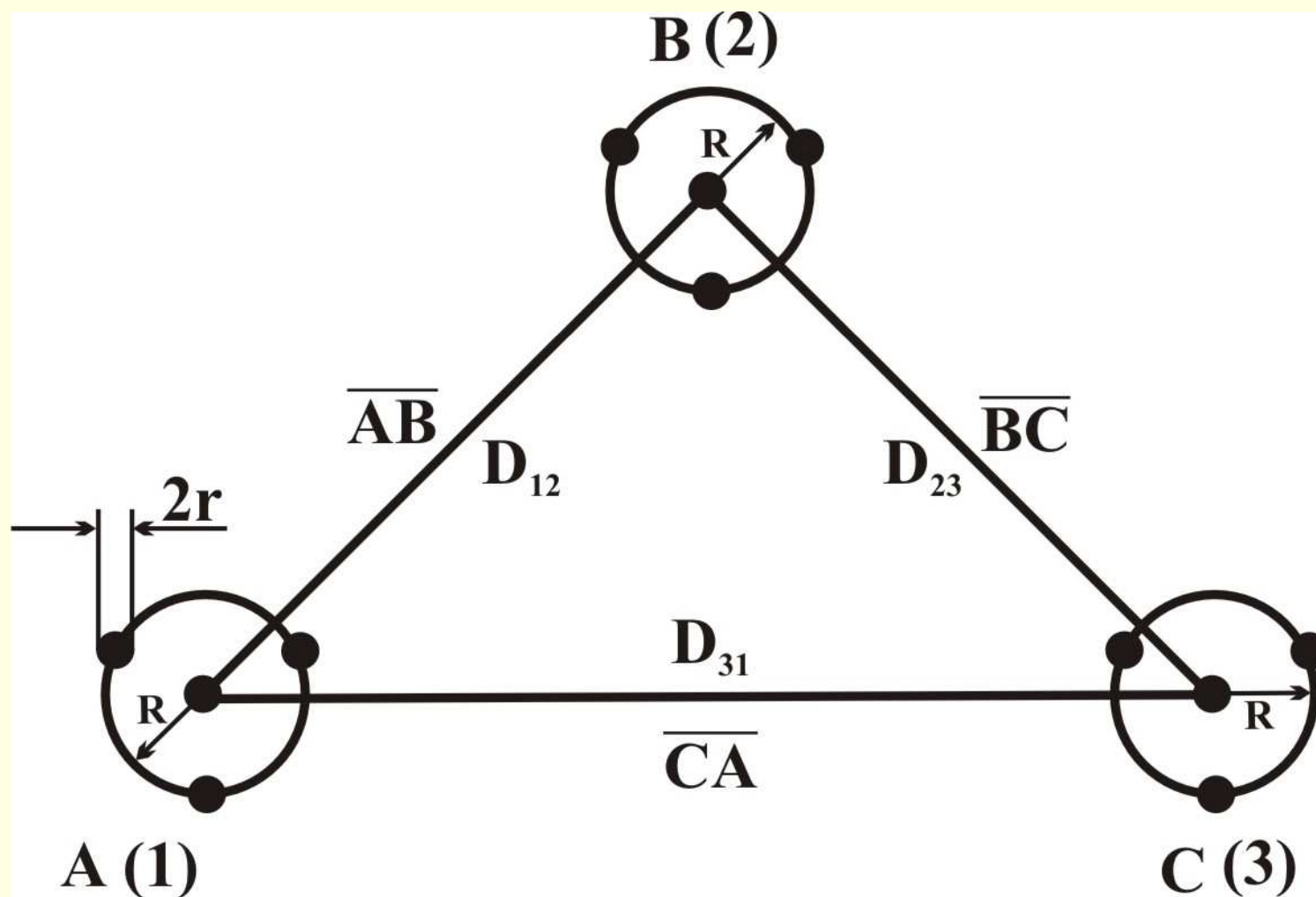
2.4.3.2 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema (bez zaštitnih užiadi)

- Približno se može napisati:

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \left[\frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{\sqrt{(2 \cdot h_{SG})^2 + (D_{SGij})^2}} \right]} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right]}{\ln \left[\frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{\sqrt{(2 \cdot h_{SG})^2 + (D_{SGij})^2}} \right]}$$

- Ovakav način je pogodan jer ne mora da se računa D_{SGij} ,

2.4.3.3 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema sa provodnicima u snopu



2.4.3.3 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema sa provodnicima u snopu

- Ako je ispunjen uslov: $\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CA} \gg R, R \gg r$, može se izračunati ekvivalentni poluprečnik:

$$r_{esc} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$$

- (Razlika u odnosu na induktivnost, je što se računa sa „pravim” poluprečnikom, a ne sa r_e)

2.4.3.3 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema sa provodnicima u snopu

- Kod proračuna se koristi izraz:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{D_{SGij'}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG3f}}{D_{SGij'}}} \left[\frac{F}{km} \right]$$

$$D_{SGij} = \sqrt[3]{\overline{AB} \cdot \overline{BC} \cdot \overline{CA}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

2.4.3.3 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema sa provodnicima u snopu

- Može se premestiti da je $r_{esc} > D_{SG_{sop}}$

$D_{SG_{sop}}$ - sopstveno srednje geometrijsko rastojanje pri proračunu induktivnosti provodnika u snopu.

$$D_{SG_{sop}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}, \text{ gde figuriše } r_e \text{ umesto } r.$$

$$l_x = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SG_{uz}}}{D_{SG_{sop}}};$$

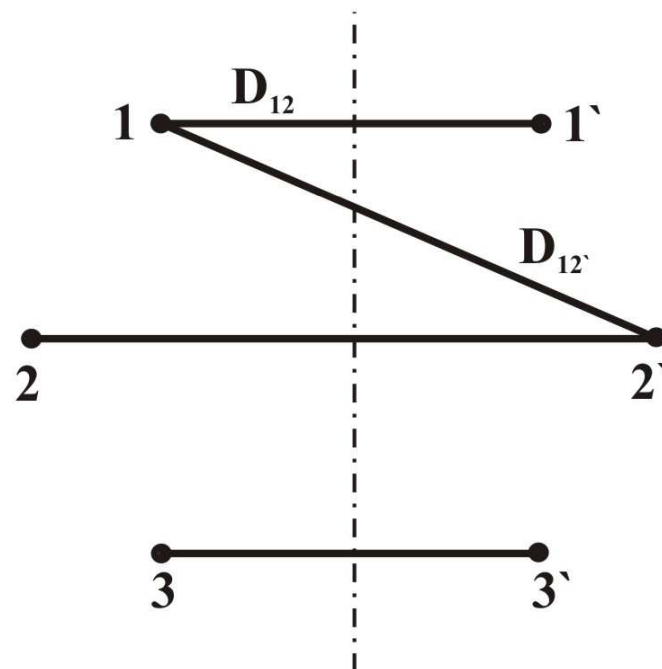
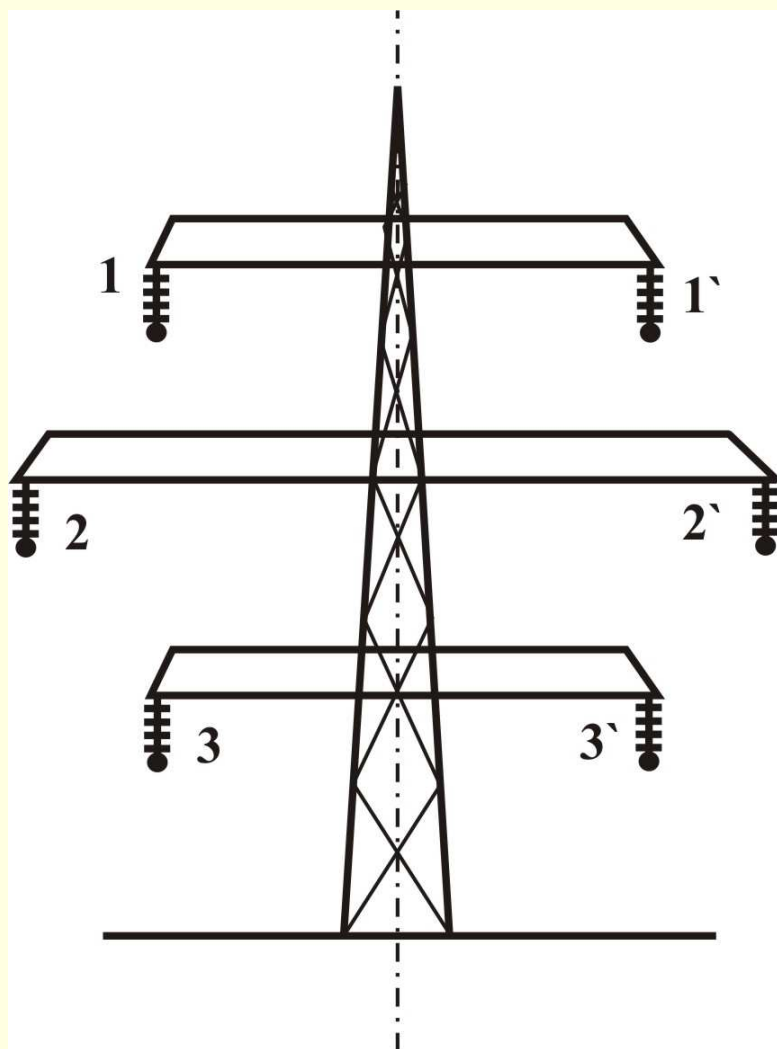
$r_e = 0.7788 \cdot r$ - za nemagnetne materijale ;

$$r_e = (0.85 \div 0.95) \cdot r$$

2.4.3.3 Podužna kapacitivnost trofaznog sistema sa provodnicima u snopu

- $r_{esc} > D_{SG_{sop}}$ je posledica činjenice da magnetno polje postoji unutar provodnika, a električno samo van provodnika.
- Generalno, sa povećanjem broja provodnika po fazi, ekvivalentni poluprečnik raste, ln opada, pa ukupna kapacitivnost raste.
- Npr: Sa povećanjem broja provodnika, kapacitivnost raste

2.4.3.4 Podužna kapacitivnost dvostrukog voda na istim stubovima



2.4.3.4 Podužna kapacitivnost dvostrukog voda na istim stubovima

- Ako su ispunjeni sledeći uslovi:
 - istoimene faze moraju biti simetrično rasporedjene u odnosu na vertikalnu osu stuba
 - oba voda moraju biti transponovana
 - oba voda moraju biti istog naponskog nivoa
 - preseci oba voda moraju biti jednaki

2.4.3.4 Podužna kapacitivnost dvostrukog voda na istim stubovima

- Približan izraz za kapacitivnost jedne faze je:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{D_{SG}}{r} \cdot \frac{D_{SGij'}}{D_{SGii'}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SG}}{r} \cdot \frac{D_{SGij'}}{D_{SGii'}}} \left[\frac{F}{km} \right]$$

gde su:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}$$

$$D_{SGii'} = \sqrt[3]{D_{11'} \cdot D_{22'} \cdot D_{33'}}$$

2.4.3.5 Red veličine podužne kapacitivnosti

- Približno se može napisati:

$$c \approx \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SG}}{r}} \left[\frac{F}{km} \right]$$

- Pre je rečeno da je odnos $\frac{D_{SG}}{r}$ u opsegu $(150 \div 900)$, pa je:

$$c = (8 \div 11) \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right]$$

$$c \approx 10^{-8} \left[\frac{F}{km} \right]$$

2.4.3.5 Red veličine podužne kapacitivnosti

- Susceptansa:

$$b = \omega \cdot c = 314 \cdot c = (2.5 \div 3.5) \cdot 10^{-6} [S]$$

$$b \approx 3 \cdot 10^{-6} [S]$$

- Sa porastom napona (U), r raste brže nego $D_{SG} \Rightarrow \frac{D_{SG}}{r}$ opada, odnosno $\ln \frac{D_{SG}}{r}$ opada, pa c raste.

2.4.3.5 Red veličine podužne kapacitivnosti

- r izrazito raste kada se ima više provodnika po fazi (u snopu): $r_{esc} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$
- Kapacitivna reaktansa, odnosno otočna:

$$jX_C = \frac{1}{jb} = -j \cdot \frac{1}{b}$$

$$x_C = -(0.3 \div 0.4) \left[\frac{M\Omega}{km} \right]$$

2.4.4 Transpozicija provodnika

- Ovi izrazi za L i C su izvedeni pod pretpostavkom da su sopstvene i medjusobne L i C pojedinih faza jednake.

2.4.4 Transpozicija provodnika

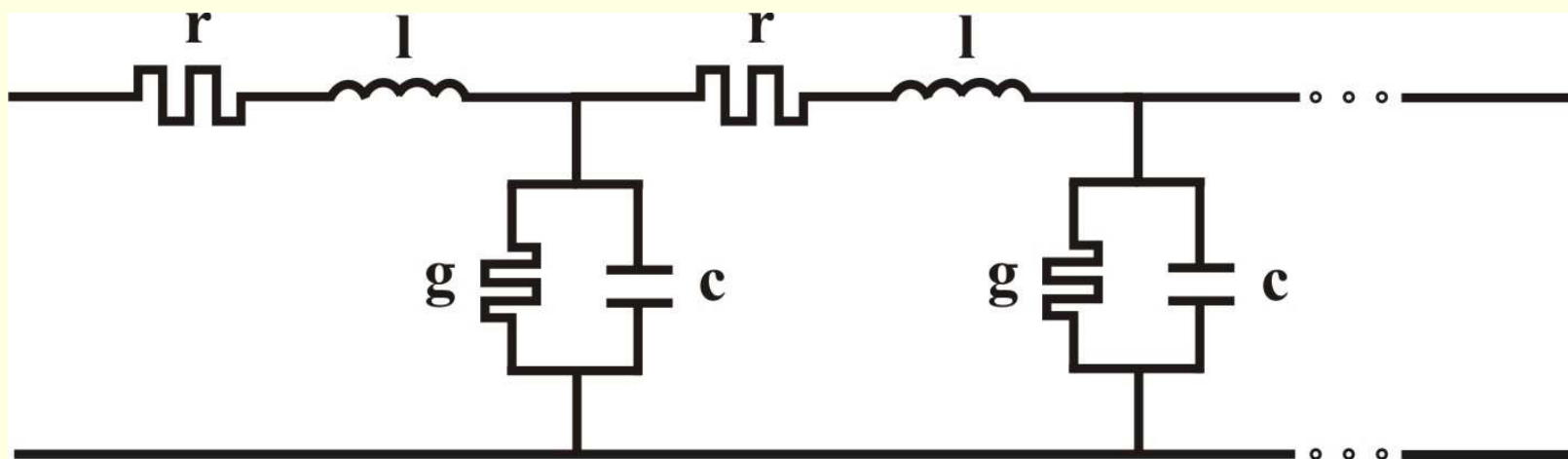
- Prethodna nn je ispunjena:
- za induktivnost:
 - ako je vod simetričan (u geometrijskom smislu), tj. ako su mu provodnici u temenima jednakostraničnog trougla
 - ako nije geometrijski simetričan, ali je izvršena transpozicija provodnika
- za kapacitivnost:
 - ako je izvršena transpozicija provodnika

2.4.4 Transpozicija provodnika

- Za transpoziciju su potrebni specijalni i skupi stubovi, na kojima se vrši preplitanje faza. Praktično, transpozicija se vrši za vodove najviših napona ($U_n \geq 110kV$), koji su duži 100km.
- Za kraće vodove, transpozicija se vrši u trafostanicama, tako da su sa aspekta sistema L i C pojedinih faza, približno jednake.

2.4.5 Podužna aktivna odvodnost nadzemnih vodova (otočna aktivna otpornost)

- Pre je bila prikazana zamenska šema sa raspodeljenim parametrima:



$$\underline{y} = g + jb$$

$$\underline{z} = r + jx$$

2.4.5 Podužna aktivna odvodnost nadzemnih vodova (otočna aktivna otpornost)

- Otočna aktivna otpornost nadzemnih vodova se javlja usled:
 - Nesavršenosti izolatora, odnosno prljanja površine izolatora, preko koje dolazi do odvodjenja struje (unutrašnja aktivna otpornost dielektrika izolatora je , te su svi gubici aktivne snage, skoncentrisani na njegovoj površini)
 - Pojave korone, odnosno jonizacije vazduha u okolini faznih provodnika. Korona se javlja u slučajevima kada električno polje na površini faznih provodnika postane veće od kritičnog električnog polja za vazduh.

2.4.5 Podužna aktivna odvodnost nadzemnih vodova (otočna aktivna otpornost)

$$g = g_I + g_{korone}$$

$$g = \frac{1}{r} = f - (U, \text{ vremenskih uslova, stanja površine izolatora})$$

Pri lepom vremenu i kada je dobro dimenzionisan i održavan izolator (pr. Kad nema korone)

$$g_{kor} = 0, r = 20 \frac{M\Omega}{km}$$

$$g = g_I = 0.05 \left[\frac{\mu S}{km} \right] \ll b = 3 \cdot 10^{-6} \left[\frac{S}{km} \right] = 3 \left[\frac{\mu S}{km} \right]$$

$$r = \frac{1}{g} = 20 \left[\frac{M\Omega}{km} \right] \gg X_c = -\frac{1}{b} = -0.35 \left[\frac{M\Omega}{km} \right]$$

2.4.5 Podužna aktivna odvodnost nadzemnih vodova (otočna aktivna otpornost)

- Pa se u većini proračuna g , odnosno r zanemaruje.
- Ne zanemaruje se u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom
- Ne zanemaruje se u mrežama sa kompenzovanom kapacitivnom komponentom struje zemljospoja.

2.4.5.1 Korona

- Korona je pojava jonizovanog vazduha (jonizacije vazduha) u okolini faznih provodnika, koji u okolini provodnika postaje provodan, čime se u elektrostatičkom smislu povećava prečnik provodnika.
- Električno polje na površini takvog ekvivalentnog provodnika se smanjuje i prestaje dalja jonizacija vazduha.

2.4.5.1 Korona

- Korona ima više loših i jednu dobru osobinu:
- Loše osobine:
 - Uvećanje gubitaka aktivne snage
 - Buka
 - Radio smetnje
 - Razvija se ozon koji nagriza provodnik
- Dobre osobine:
 - Prigušuje udarne naponske talase atmosferskog porekla