

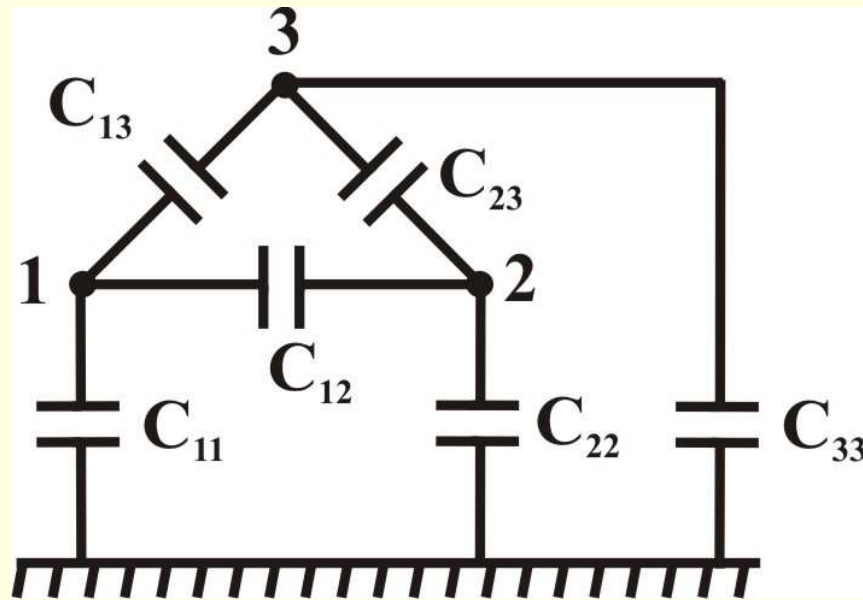
Elementi elektroenergetskih sistema

- Pogonska kapacitivnost
 - Proračun pogonske induktivnosti
 - Induktivnost pravolinijskog provodnika
 - Podužna induktivnost trofaznih vodova
- Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu
 - Podužna induktivnost dvostrukog voda na istim stubovima

2.4.1.3 Pogonska kapacitivnost

- Sopstvene kapacitivnosti – kapacitivnosti provodnika prema zemlji
- Medjusobne kapacitivnosti – kapacitivnost jednog provodnika prema drugom
- Sopstvene kapacitivnosti su jednake jedino ako je izvršena transpozicija provodnika.

2.4.1.3 Pogonska kapacitivnost



$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_0$$

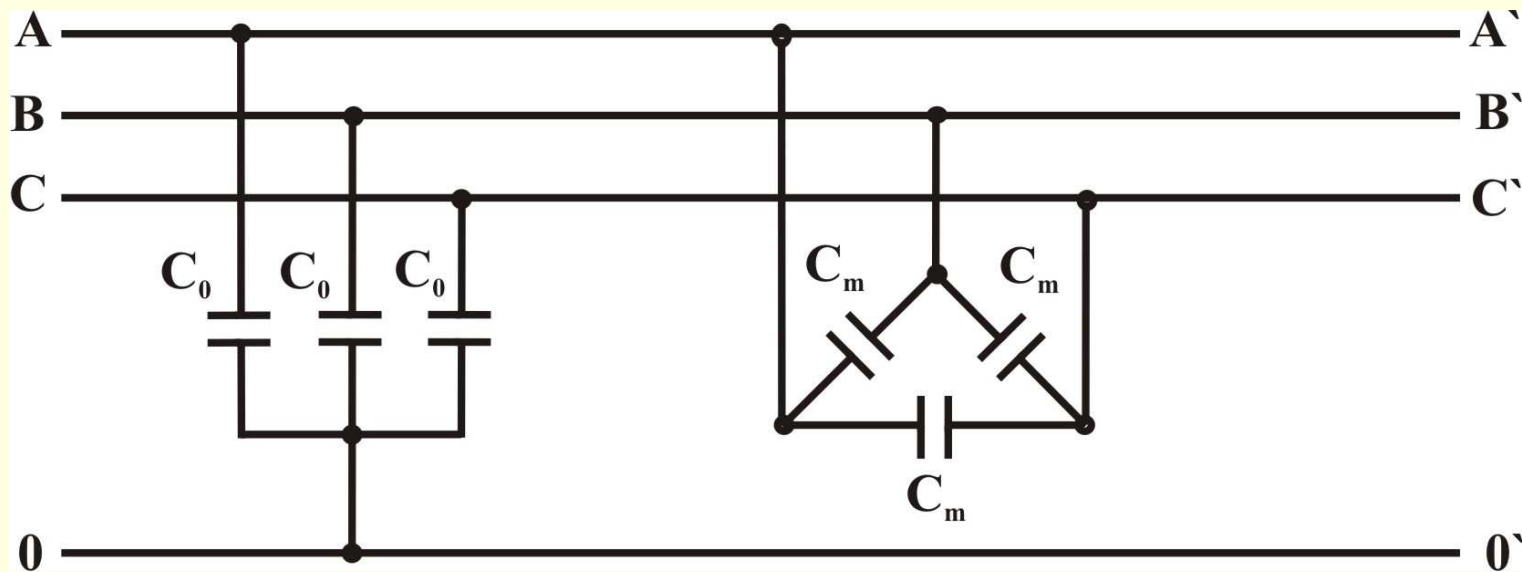
$$C_{12} = C_{23} = C_{13} = C_m$$

C_m - sopstvena kapacitivnost

C_0 - medjusobna kapacitivnost

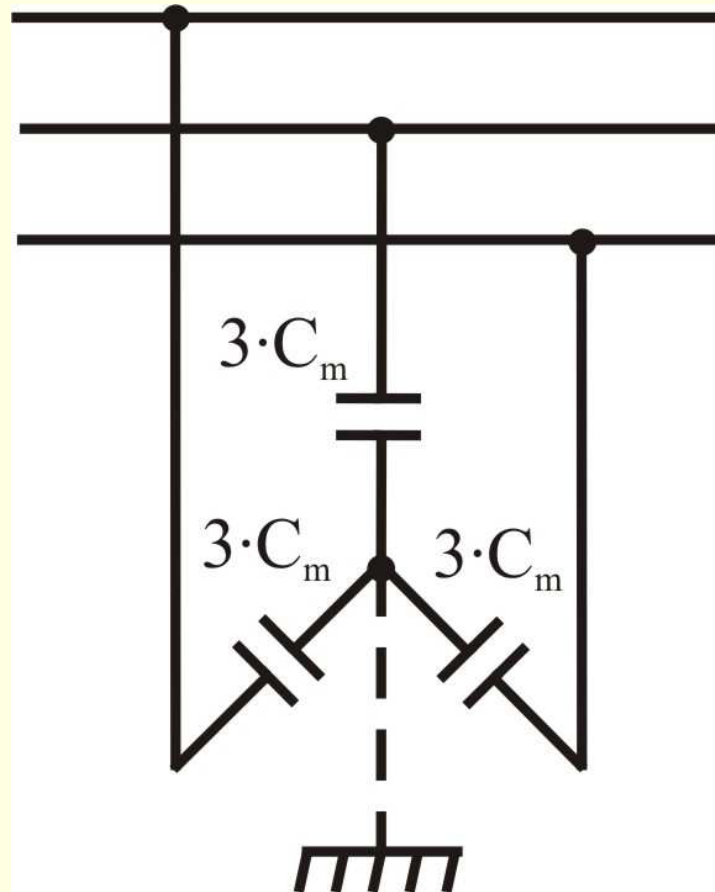
2.4.1.3 Pogonska kapacitivnost

- Zamenska šema voda sa aspekta samo kapacitivnosti:



2.4.1.3 Pogonska kapacitivnost

- Ako trougao sa C_m , transformišemo u zvezdu, dobija se:



2.4.1.3 Pogonska kapacitivnost

- Dobija se: $C_f = C_0 + 3 \cdot C_m$, gde je C_f - pogonska kapacitivnost, $C_f = c_f \cdot L_V$, gde je c_f - podužna kapacitivnost voda, a L_V - dužina voda
- Znači treba izračunati pogonsku induktivnost, kapacitivnost i otpor, bilo za šemu sa raspodeljenim, bilo za šemu sa koncentrisanim parametrima.
- Uбудuće, indeks f se neće pisati, jer se podrazumeva da se radi sa faznim vrednostima.

2.4.2 Proračun pogonske induktivnosti

Objasniti pojmove:

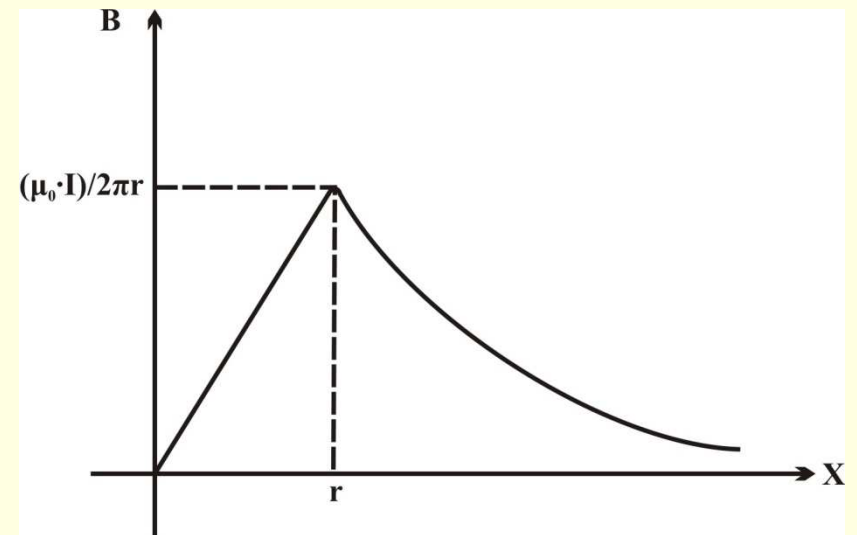
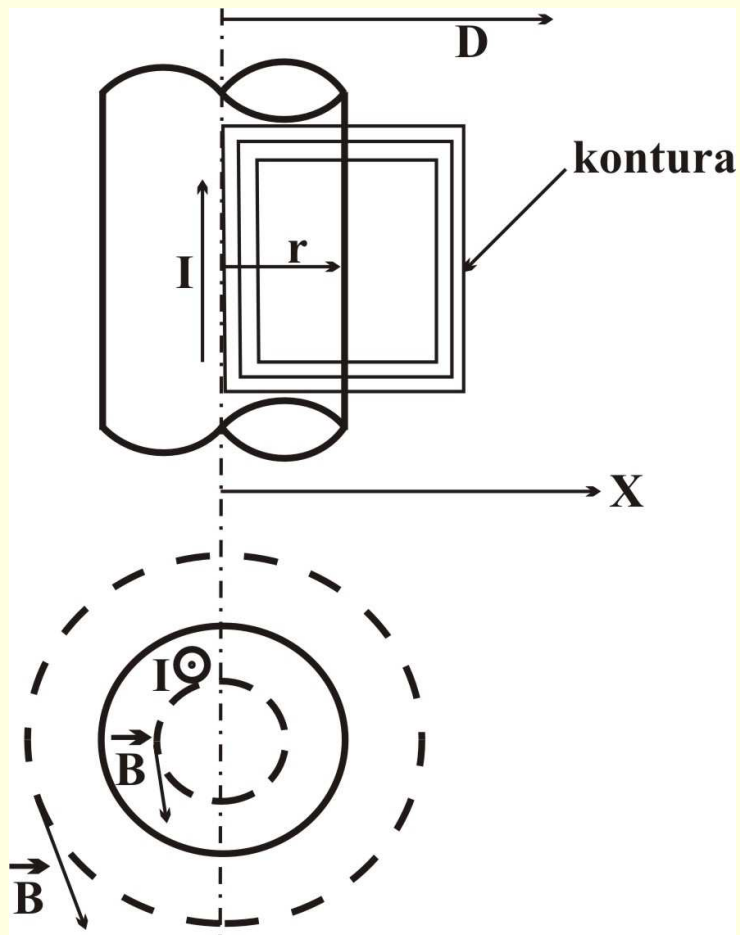
μ = permabilnost (permabilnost vakuumu)

μ_0 = magnetna konstanta (apsolutna permabilnost vazduha)

μ_r = relativna permabilnost

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

- Imamo provodnik kroz koji protiče struja.



2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

- Magnetna indukcija (B) unutar provodnika, na rastojanju X, od ose provodnika:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot x, \quad x \leq r$$

- Magnetna indukcija u tački izvan provodnika:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot x}, \quad x \geq r, \quad (\mu_r = 1, \text{ za vazduh})$$

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad L = \frac{\Phi}{I} \quad \mu = M \cdot I$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right] = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right]$$

l_i, l_e = podužne interne i eksterne induktivnosti

$$l_i = l_{unutr.} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} = \frac{\mu_r}{2} \cdot 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right]$$

$$l_e = l_{spolj.} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{r} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{r} \left[\frac{H}{km} \right]$$

l = ukupna podužna induktivnost

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

$$l = l_i + l_e = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\ln \frac{D}{r} + \frac{\mu_r}{4} \right)$$

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\ln \frac{D}{r} + \ln_e \frac{\mu_r}{4} \right)$$

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}}} \Rightarrow l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{r_e}$$

$$r_e = r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}}$$

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

r_e = ekvivalentni poluprečnik, kojim se provodnik poluprečnika r , može ekvivalentirati sa aspekta ukupne podužne induktivnosti

D = udaljenost od centra (ose provodnika) do „naslonjene” konture

r_e = udaljenost od centra do ekvivalentne površine provodnika za $\mu_r = 1$, vazduh i nemagnetni materijali.

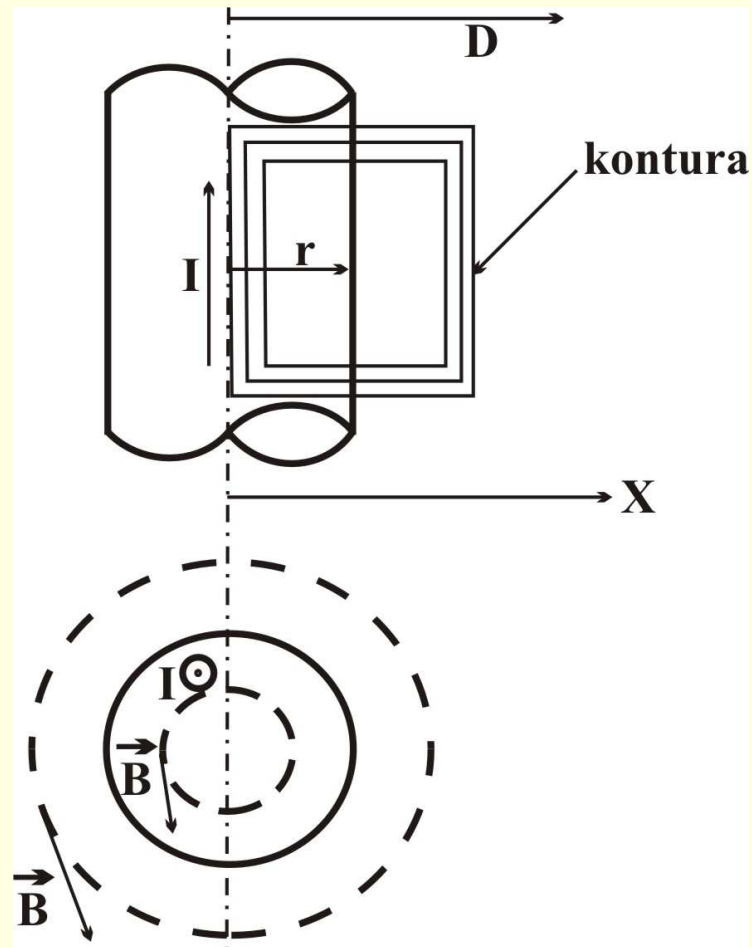
$$r_e = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 0.7788 \cdot r$$

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

- Kod skupa dva ili više provodnika, medjusobno konačno udaljenih, sa strujama čija je algebarska suma jednaka nuli, postoji konačna vrednost rastojanja D za svaki provodnik iz skupa.
- Veličina D određena je tačkama u kojima magnetna indukcija menja smer. Kod vazdušnih vodova, rastojanja između faznih provodnika su mnogo veća od njihovih poluprečnika, te je efekat blizine zanemarljiv.

2.4.2.1 Induktivnost pravolinijskog provodnika

- Za AlČ vodove ($r_e = (0.85 \div 0.95) \cdot r$, $D \rightarrow \infty$, $l \rightarrow \infty \Rightarrow$ nema smisla)



2.4.2.2 Podužna induktivnost trofaznih vodova

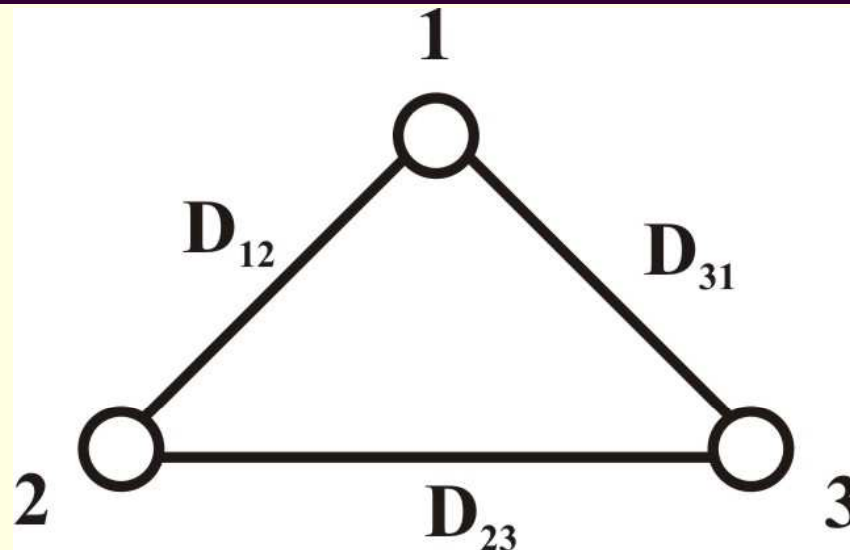
- Izvor za određivanje podužne induktivnosti provodnika je opšteg karaktera i može se iskoristiti za određivanje podužne induktivnosti faznih provodnika trofaznog voda.
- Kada imamo simetrično opterećenje sistema, sledi normalni stacionarni režim i transponovan

2.4.2.2 Podužna induktivnost trofaznih vodova

- Ako je transponovan vod izveden duž uske trase istim provodnicima i simetrično opterećen (za struje važi $I_2 + I_3 = -I_1$), za podužnu induktivnost se dobija:

$$l = l_1 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}{r_e} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SG}}{r_e} \left[\frac{H}{km} \right]$$

2.4.2.2 Podužna induktivnost trofaznih vodova



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

D_{SG} - ekvivalentno srednje geometrijsko rastojanje provodnika trofaznog voda

Znači, izraz za induktivnost ima isti oblik kao i za jedan provodnik:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{r_e}, r_e - \text{ekvivalentni poluprečnik sa aspekta induktivnosti}$$

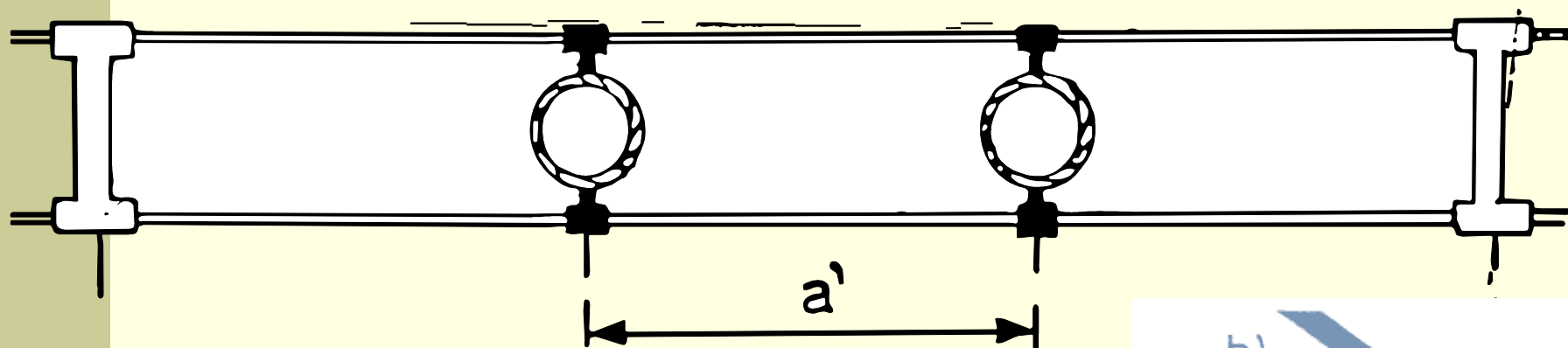
2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Nadzemni vodovi $U_n \geq 110kV$, grade se sa fazama u vidu snopa, koji se sastoje od više paralelnih provodnika raspoređenih u temenima pravilnog poligona.
- Ovakvim izvodjenjem faznih provodnika, postiže se:
 - smanjivanje električnog polja u okolini faznih provodnika i izbegava se pojava korone
 - korišćenje standardnih vrsta užadi na različitim naponskim nivoima.

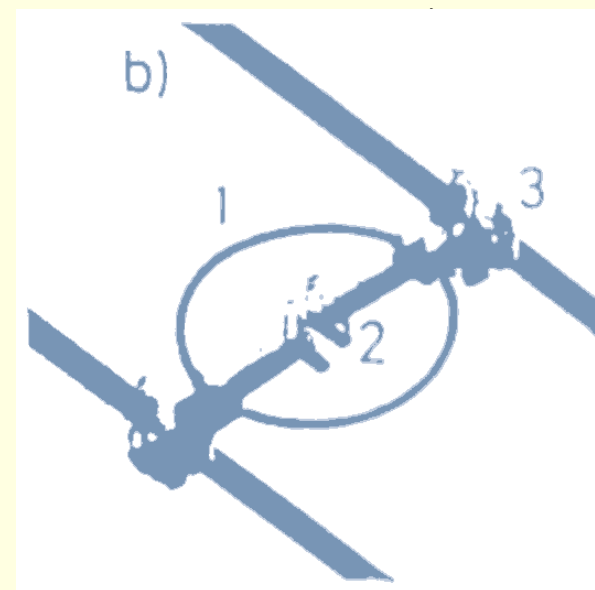
2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Kod nadzemnog vodova provodnici se izvode u vidu snopa koji sadrži 2,3,4 i 6 užadi.
- Da bi užad istog faznog provodnika bila na istom rastojanju unutar raspona koriste se odstoynici koji formiraju podraspone.
- Pri vetrovitom vremenu javljaju se oscilacije provodnika u podrasponima. Ove oscilacije se prigušuju pomoću elastičnog odstoynika.

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu



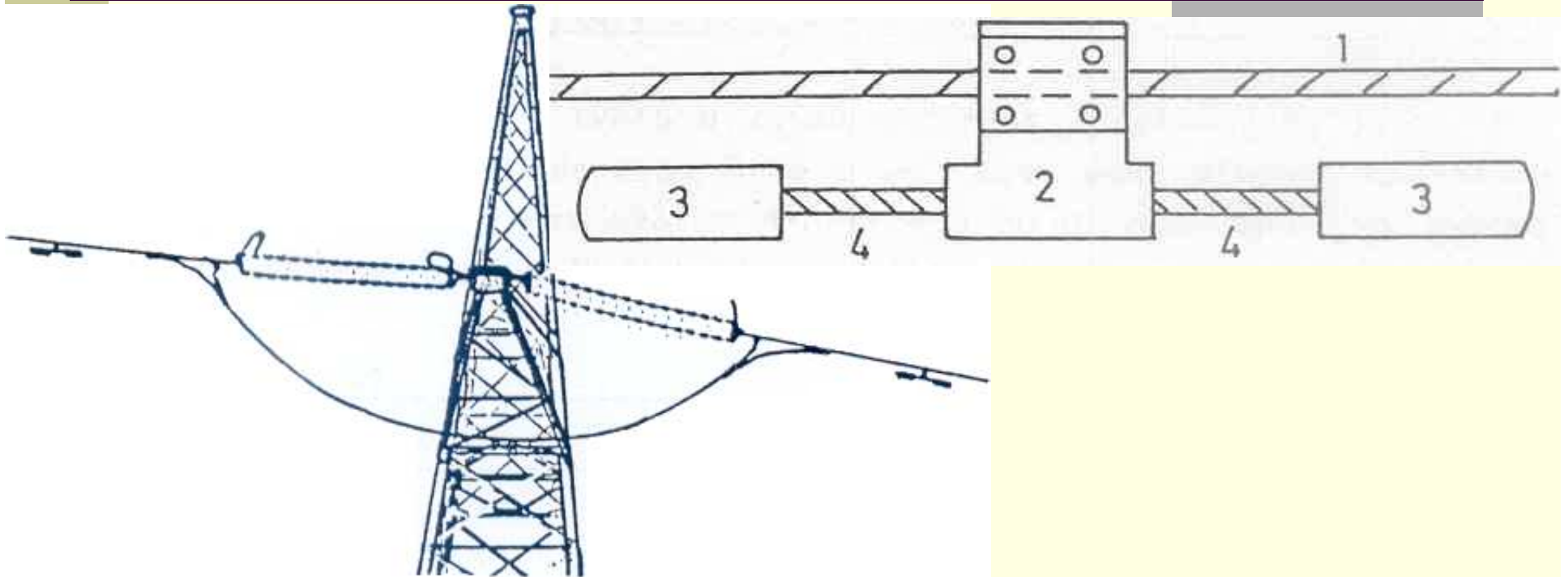
- a) formiranje podraspona pomoću elastičnog odstoynika; b) elastični odstoynik: 1-krug od elastičnog čeličnog užeta, 2-odbojnici, 3-stezaljke



2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Postoji problem pojavljivanja vibracija
- Kada nije moguće izborom maksimalnog radnog naprezanja, raspona i specifične težine provodnika izbeći pojavu vibracija još u fazi projektovanja nadzemnog voda upotrebljava se specijalni antivibracioni prigušivač.
- Najčešće se koristi prigušivač tipa “stock bridge”. Prigušivač se montira blizu tačaka vešanja zbog čega se vibracije prenose na elastično užice u kome se vibracije smanjuju. U težim slučajevima se može montirati više prigušivača.

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu



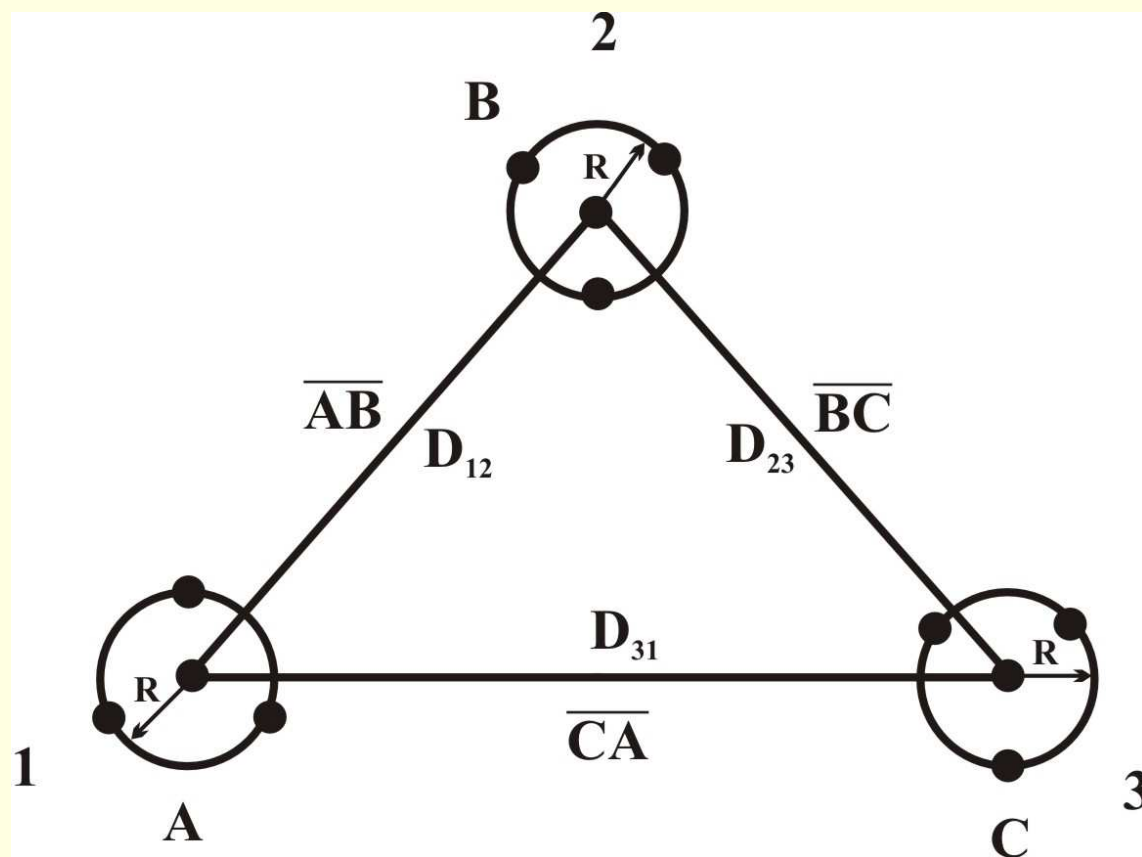
- a) prigušivač vibracija tipa “stock bridge” ;
- b) montaža prigušivača kod tačaka vešanja na zateznom stubu

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Prigušivač se montira u blizini tačaka vešanja, kao što je prikazano na prethodnoj slici.
- Provodnik je uklješten u stezaljci prigušivača.
- Zbog toga se vibracije provodnika delimično prenose na elastično uže u kome gube deo svoje energije, te se nivo vibracija kod stezaljki na stubu smanjuje.

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Ako imamo trofazni vod kao na slici, tj kada su fazni provodnici izvedeni sa tri užeta po fazi:



2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Može se zaključiti ili analognim izvodjenjem se može dobiti izraz sličnog oblika:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SG_{uzajamno}}}{D_{SG_{sopstveno}}}$$

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

$$\overline{AB} \gg R, \overline{BC} \gg R, \overline{CA} \gg R$$

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Analognim izvodjenjem se dobija:

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

- Računa se sa rastojanjem izmedju centara pojedinih faza u snopu.

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

■ Opšti izraz za $D_{SG_{sop}}$: $D_{SG_{sop}} = \sqrt[n]{n \cdot r_e \cdot R^{n-1}}$, gde je:

n = broj provodnika u snopu

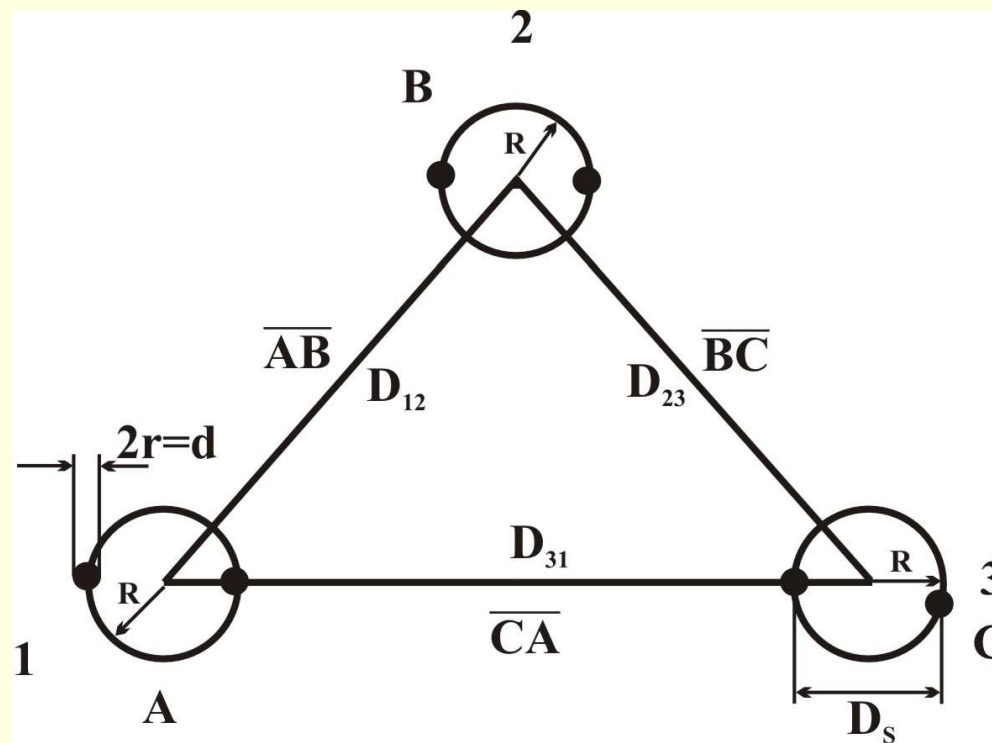
r_e = ekvivalentni poluprečnik sa aspekta induktivnosti

R = rastojanje provodnika u snopu jedne faze od centra faze

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA}}{\sqrt[n]{n \cdot r_e \cdot R^{n-1}}}$$

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Vod sa dva užeta po fazi:



$$n = 2, \quad l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SGuz}}{D_{SGsop}}$$

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

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

$$D_{SG_{sop}} = \sqrt[n]{n \cdot r_e \cdot R^{n-1}}$$

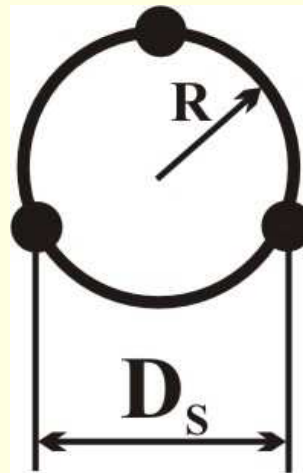
$$R = \frac{D_S}{2}$$

$$D_{SG_{sop}} = \sqrt[2]{2 \cdot r_e \cdot R^{2-1}} = \sqrt[2]{r_e \cdot D_S}$$

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Vod sa tri provodnika po fazi:

$n = 3 \Rightarrow R = \frac{D_s}{\sqrt{3}}$, gde je D_s - rastojanje susednih provodnika u snopu.

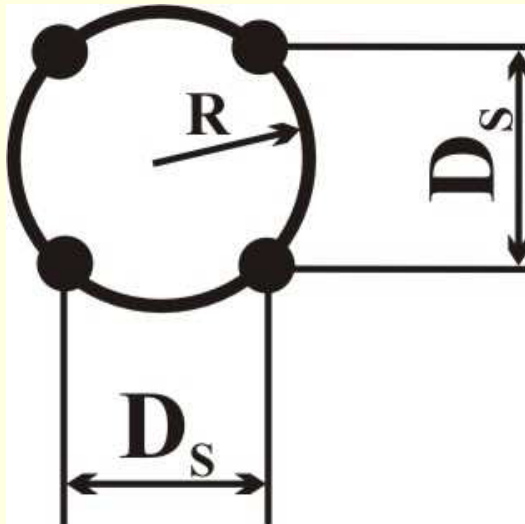


$$D_{SG_{sop}} = \sqrt[3]{3 \cdot r_e \cdot R^2}, \quad R = \frac{D_s}{\sqrt{3}} \Rightarrow D_{SG_{sop}} = \sqrt[3]{r_e \cdot D_s^2}$$

2.4.2.3 Podužna induktivnost trofaznog voda sa fazama u snopu

- Vod sa četiri provodnika po fazi:

$$n = 4 \Rightarrow R = \frac{D_s}{\sqrt{2}}$$

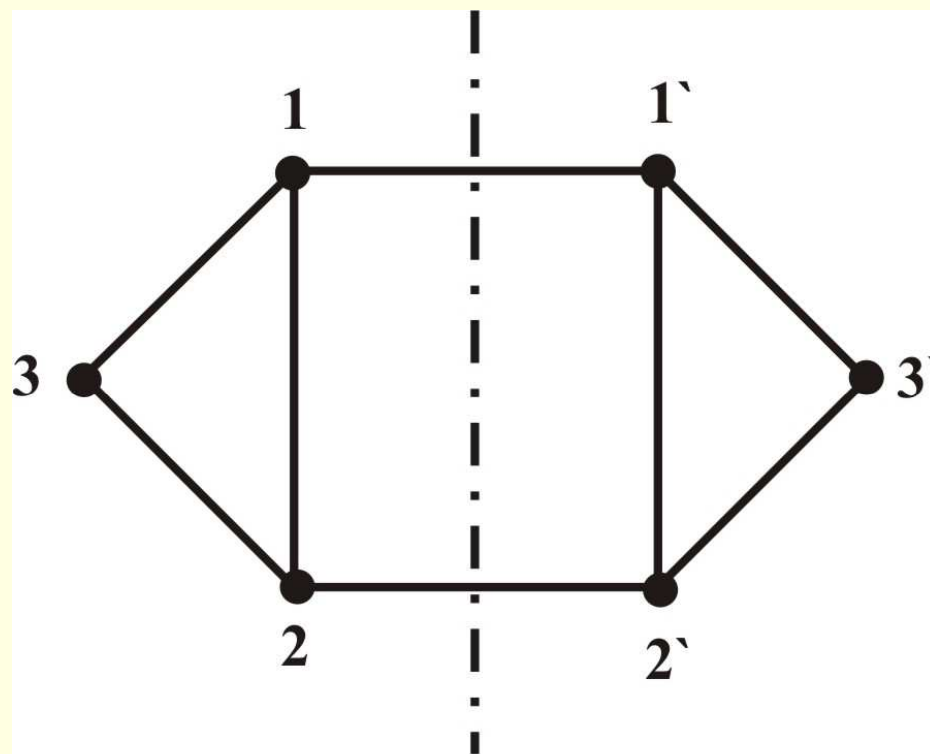


$$D_{SG_{sop}} = \sqrt[4]{4 \cdot r_e \cdot R^3} = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_e \cdot D_s^3}$$

2.4.2.4 Podužna induktivnost faza dvostrukog voda na istim stubovima

- Da bi podužna induktivnost dvostrukog voda bila konstantna i jednaka za oba sistema, moraju biti ispunjeni sledeći uslovi:
 - istoimene faze oba voda moraju biti simetrično rasporedjene u odnosu na vertikalnu osu stuba
 - oba voda moraju biti transponovana
 - oba voda moraju biti opterećena strujama istog intenziteta
 - poprečni presek svih faznih provodnika mora biti jednak

2.4.2.4 Podužna induktivnost faza dvostrukog voda na istim stubovima



Vertikalna osa stuba

2.4.2.4 Podužna induktivnost faza dvostrukog voda na istim stubovima

- Uvek mora da bude simetrično: $1-1', 2-2', 3-3' \Rightarrow$ takvo da bude transpozicija

- Ako je sistem geometrijski simetričan:

$D_{ij} = D_{i'j'}$ - isti raspored u oba sistema

$D_{ij'} = D_{i'j}$ - simetrija u odnosu na vertikalnu osu stuba

2.4.2.4 Podužna induktivnost faza dvostrukog voda na istim stubovima

- I ako je simetrično opterećen:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_1' + I_2' + I_3' = 0$$

$$I_1 = I_1'$$

$$l_{dvostruko} = l_1 = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SG} \cdot D_{SG}^{ij'}}{r_e \cdot D_{SG}^{ii'}}, \text{ gde su:}$$

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}; \quad D_{SG}^{ij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}; \quad D_{SG}^{ii'} = \sqrt[3]{D_{11'} \cdot D_{22'} \cdot D_{33'}}$$

2.4.2.5 Red veličine podužne induktivnosti

- Svuda se dobijao izraz: $l = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_{SG}}{r_e}$, ($r_e \Rightarrow D_{SGsop} \Rightarrow$ za faze u snopu)
- Za vodove $U_n \geq 10kV \Rightarrow \frac{D_{SG}}{r_e} = 150 \div 900 \Rightarrow l = 1 - 1.36 \left[\frac{mH}{km} \right]$
- Podužna reaktansa: $x = \omega \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l = 314 \cdot l = (0.314 \div 0.43) \left[\frac{\Omega}{km} \right]$
- Podužna induktivnost i reaktansa nadzemnih vodova leže u relativno uskim opsezima.