

2.1.4. Jedinčna vodljivost voda  $G_1$ 

Jedinčna vodljivost nastaje zbog nesavršene izolacije voda. Sastoji se od dva dijela:

$$G_1 = G_0 + G_d \text{ [S/m]} \quad (2.41)$$

gdje je:  $G_0$  strujno vođenje izolacije  
 $G_d$  gubici u izolaciji zbog izmjenične polarizacije

Vodljivost se računa kao omjer gubitaka snage zbog poprečne struje po jedinici duljine voda, prema kvadratu napona ili kao omjer djelatne komponente poprečne struje  $\Delta I$ , po jedinici duljine prema naponu:

$$G_1 = \frac{\Delta P}{V^2} = \frac{\Delta I_r}{V} \text{ [S/m]}, \text{ za fazni napon i jednu fazu} \quad (2.41)$$

$$G_1 = \frac{\Delta P}{U^2} \text{ [S/m]}, \text{ za linijski napon i tri faze} \quad (2.42)$$

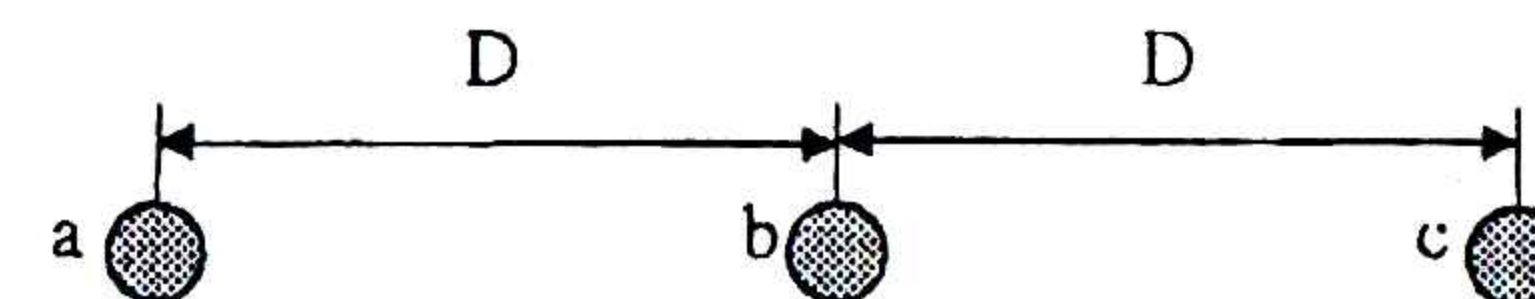
Obično je za nadzemne vodove vodljivosti neka stalna vrijednost, dok je za kabele ta vrijednost ovisna o frekvenciji i jediničnom kapacitetu voda:

$$G_1 = 0.1 \cdot 10^{-9} \text{ [S/m]}, \text{ za vodove} \quad (2.43)$$

$$G_1 = 0.5 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \cdot C_1, \text{ za kabele} \quad (2.44)$$

## 2.2. ZADACI

2.1. Izračunati pogonsku reaktanciju jednostrukog trofaznog voda s horizontalnim rasporedom vodiča za slučaj: a) neprepletenog voda; b) prepletenog voda. Međusobna udaljenost vodiča je  $D = 6.6 \text{ m}$ , a vodiči su kružnog presjeka, polumjera  $r = 13.3 \text{ mm}$ .



Metodom srednjih geometrijskih udaljenosti jedinični induktivitet računa se kao:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ [H/km]}$$

a) trofazni neprepleteni vod

Srednje geometrijske udaljenosti pojedinih faza su:

$$\begin{aligned} \text{Faza a: } D_m &= \sqrt[3]{D \cdot 2D} = D \cdot \sqrt{2} \\ D_s &= D_{aa} = r' = 0.7788 \cdot r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Faza b: } D_m &= \sqrt[3]{D \cdot D} = D \\ D_s &= D_{bb} = r' = 0.7788 \cdot r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Faza c: } D_m &= \sqrt[3]{2D \cdot D} = D \cdot \sqrt{2} \\ D_s &= D_{cc} = r' = 0.7788 \cdot r \end{aligned}$$

Jedinični induktiviteti pojedinih faza su:

$$L_a = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D \cdot \sqrt{2}}{0.7788 \cdot r} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{6.6 \cdot \sqrt{2}}{0.7788 \cdot 13.3 \cdot 10^{-3}} = 1.36 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

$$L_b = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{0.7788 \cdot r} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{6.6}{0.7788 \cdot 13.3 \cdot 10^{-3}} = 1.29 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

$$L_c = L_a = 1.36 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

Pogonska reaktancija ( $X = \omega \cdot L$ ) pojedinih faza je:



$$X_a = \omega \cdot L_a = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.36 \cdot 10^{-3} = 0.427 [\Omega/\text{km}]$$

$$X_b = \omega \cdot L_b = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.29 \cdot 10^{-3} = 0.405 [\Omega/\text{km}]$$

$$X_c = \omega \cdot L_c = X_a = 0.427 [\Omega/\text{km}]$$

Srednja vrijednost pogonske reaktancije iznosi:

$$X_l = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} = \frac{0.427 + 0.405 + 0.427}{3} = 0.42 [\Omega/\text{km}]$$

b) trofazni prepleteni vod

Srednje geometrijske udaljenosti sve tri faze (simetrija) su:

$$D_m = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = D \cdot \sqrt[3]{2}$$

$$D_s = r' = 0.7788 \cdot r$$

Jedinični induktiviteti sve tri faze:

$$L_a = L_b = L_c = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{0.7788 \cdot r} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{6.6 \cdot \sqrt[3]{2}}{0.7788 \cdot 133 \cdot 10^{-3}} = 1.34 \cdot 10^{-3} [\text{H}/\text{km}]$$

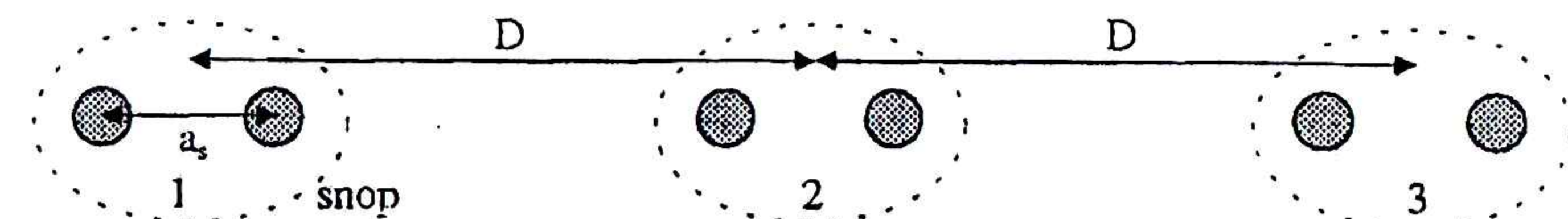
$$L_l = 1.34 \cdot 10^{-3} [\text{H}/\text{km}]$$

Pogonska reaktancija je tada:

$$X_l = \omega \cdot L_l = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.34 \cdot 10^{-3} = 0.42 [\Omega/\text{km}]$$

Vidljivo je da je srednja pogonska reaktancija neprepletenog voda jednaka pogonskoj reaktanciji prepletenog voda.

2.2. Metodom SGU izračunati induktivitet po vodiču i kilometru prepletenog nesimetričnog trofaznog voda kojem se svaka faza sastoji od dva vodiča u snopu koji su razmaknuti  $a_s = 40$  cm. Vodiči su izrađeni u obliku užeta od 19 žica za koje vrijedi  $d_i = 0.49 \cdot \sqrt{A}$ . Žice u užetu su promjera  $d_z = 4$  mm, a svi vodiči se nalaze na istoj visini iznad zemlje. Udaljenost između faza  $D = 10$  m.



Poprečni presjek užeta od 19 žica je:

$$A = 19 \cdot \frac{d_z^2 \cdot \pi}{4} = 238.64 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2]$$

Reducirani polumjer vodiča je:

$$d_i = r' = 0.49 \cdot \sqrt{A} = 0.49 \cdot \sqrt{238.64 \cdot 10^{-6}} = 7.57 \cdot 10^{-3} [\text{m}]$$

Kako je polumjer snopa vodiča (ekvivalentni polumjer)  $R = a_s/2 = 0.2$  m, vlastita geometrijska udaljenost snopa:

$$D_s = \sqrt[n]{n \cdot d_i \cdot R^{n-1}} = \sqrt[2]{2 \cdot 7.57 \cdot 10^{-3} \cdot 0.2^{2-1}} = 55.03 \cdot 10^{-3} [\text{m}]$$

Ukupna međusobna srednja geometrijska udaljenost prepletenog voda iznosi:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{m1} \cdot D_{m2} \cdot D_{m3}} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 12.60 [\text{m}]$$

Tada je jedinični induktivitet snopa polaznih vodiča:

$$L_{l\text{snopa}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{12.60}{55.03 \cdot 10^{-3}} = 1.09 \cdot 10^{-3} [\text{H}/\text{km}]$$

Kako su vodiči u snopu paralelni, induktivitet jednog vodiča po kilometru duljine je:

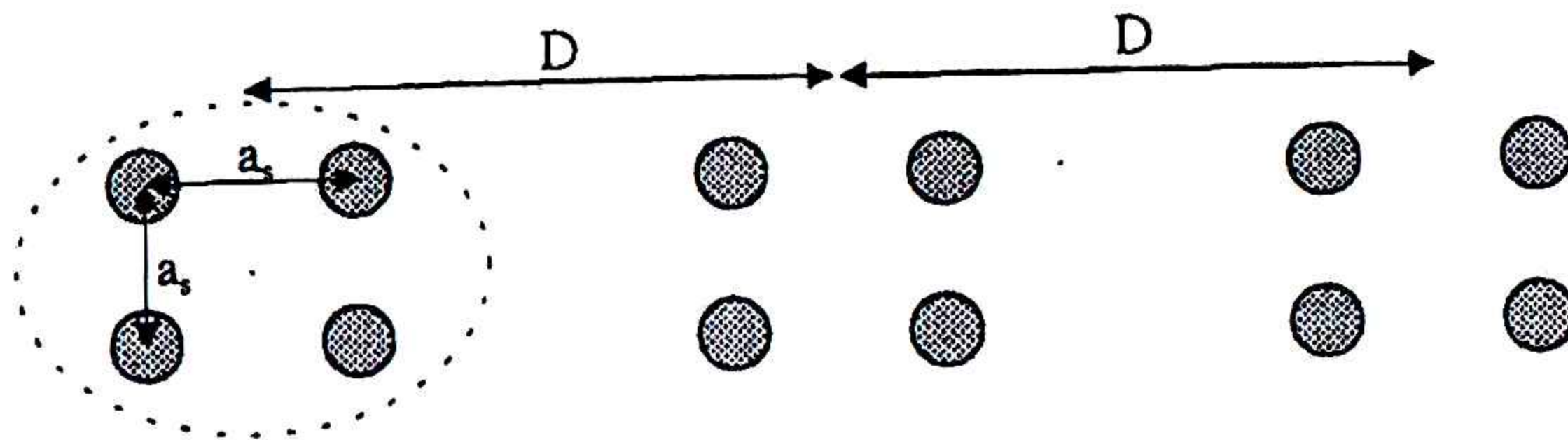
$$L_v = 2 \cdot L_{l\text{snopa}} = 2.17 \cdot 10^{-3} [\text{H}/\text{km}]$$

Reaktancija po jedinici duljine voda:

$$X_l = \omega \cdot L_l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_l = 0.342 [\Omega/\text{km}]$$



2.3. Metodom SGU izračunati jedinični pogonski induktivitet prepletenog nesimetričnog trofaznog voda kojem se faze sastoje od četiri vodiča u snopu. Vodiči su stvarnog presjeka  $A = 586 \text{ mm}^2$ , a izrađeni su od 61 žice ( $d_1 = 0.502 \cdot \sqrt{A}$ ), udaljenost faza je  $D = 12 \text{ m}$ , a udaljenost između vodiča u snopu  $a_s = 40 \text{ cm}$ .



Reducirani polumjer vodiča je:

$$d_1 = r' = 0.502 \cdot \sqrt{A} = 0.49 \cdot \sqrt{586 \cdot 10^{-6}} = 12.15 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

Međusobna srednja geometrijska udaljenost:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 15.12 \text{ [m]}$$

Kako je ekvivalentni polumjer je  $R = \frac{a_s \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{0.4 \cdot \sqrt{2}}{2} = 0.282 \text{ [m]}$ , vlastita srednja geometrijska udaljenost (snopa od samog sebe):

$$D_1 = \sqrt[3]{11 \cdot d_1 \cdot R^{11}} = \sqrt[3]{4 \cdot 12.15 \cdot 10^{-3} \cdot 0.282^{11}} = 181.7 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

Sada je jednostavno izračunati jedinični induktivitet snopa:

$$L_{\text{snopu}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_m}{D_1} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{15.12}{181.7 \cdot 10^{-3}} = 0.88 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

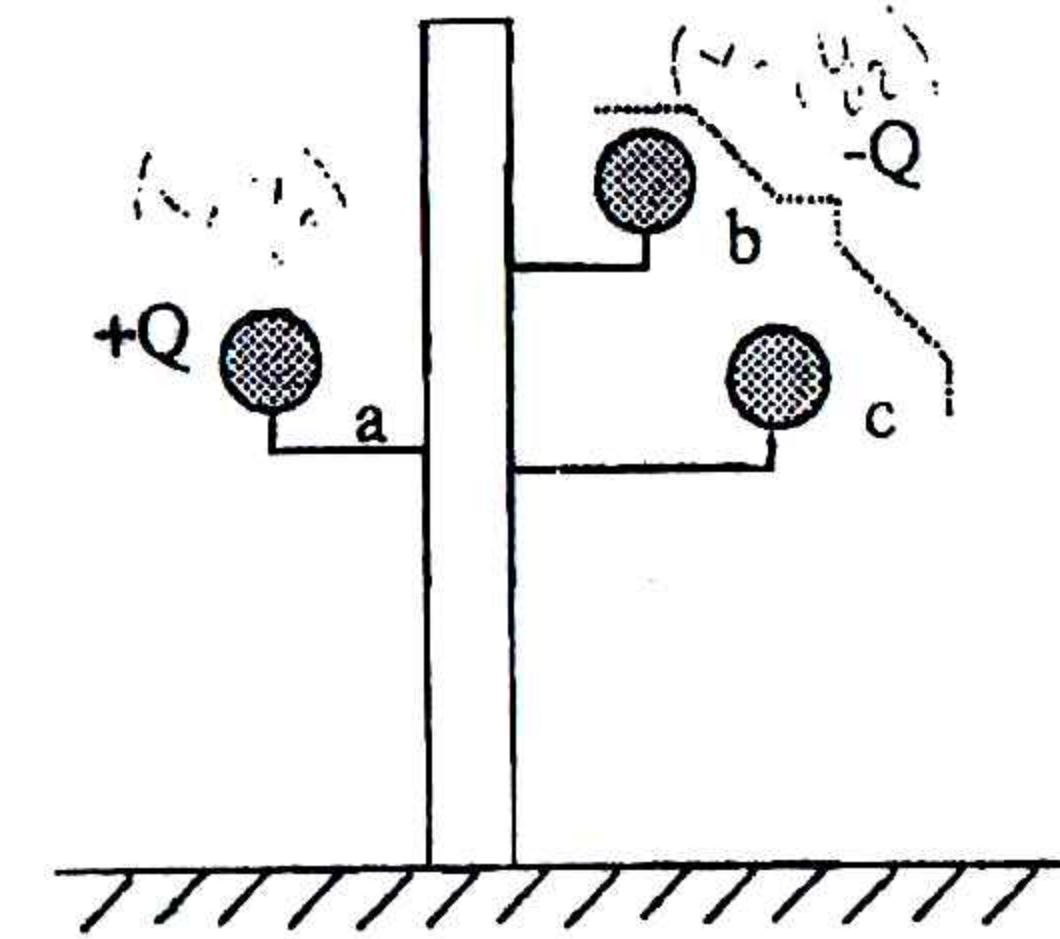
Jedinični induktivitet jednog vodiča (iz snopa 4 paralelna vodiča) je:

$$L_v = 4 \cdot L_{\text{snopu}} = 3.54 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

Jedinična reaktancija voda:

$$X_1 = \omega \cdot L_{\text{snopu}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\text{snopu}} = 314 \cdot 0.88 \cdot 10^{-3} = 0.276 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

2.4. Položaji ovjesišta vodiča trofaznog nesimetričnog prepletenog voda (s ishodištem koordinatnog sustava u podnožju stupa) su: faza a (-4m, 10m), faza b (4m, 15m), faza c (6m, 9m). Provjes je  $f = 1.43 \text{ m}$ . Primjenom SGU metode izračunati jedinični pogonski kapacitet jednog vodiča, ako je  $r = 12 \text{ mm}$



Utjecaj provjesa na visine pojedinih faza uzima se u obzir kroz srednje visine koje računaju se na sljedeći način:

$$h_a = H_a - 0.7f = 10 - 1 = 9 \text{ [m]}$$

$$h_b = H_b - 0.7f = 15 - 1 = 14 \text{ [m]}$$

$$h_c = H_c - 0.7f = 9 - 1 = 8 \text{ [m]}$$

Udaljenosti između faza a, b i c u sljedeće:

$$D_{ab} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} = \sqrt{8^2 + 5^2} = 9.43 \text{ [m]}$$

$$D_{ac} = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} = \sqrt{10^2 + (-1)^2} = 10.07 \text{ [m]}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2} = \sqrt{2^2 + (-6)^2} = 6.32 \text{ [m]}$$

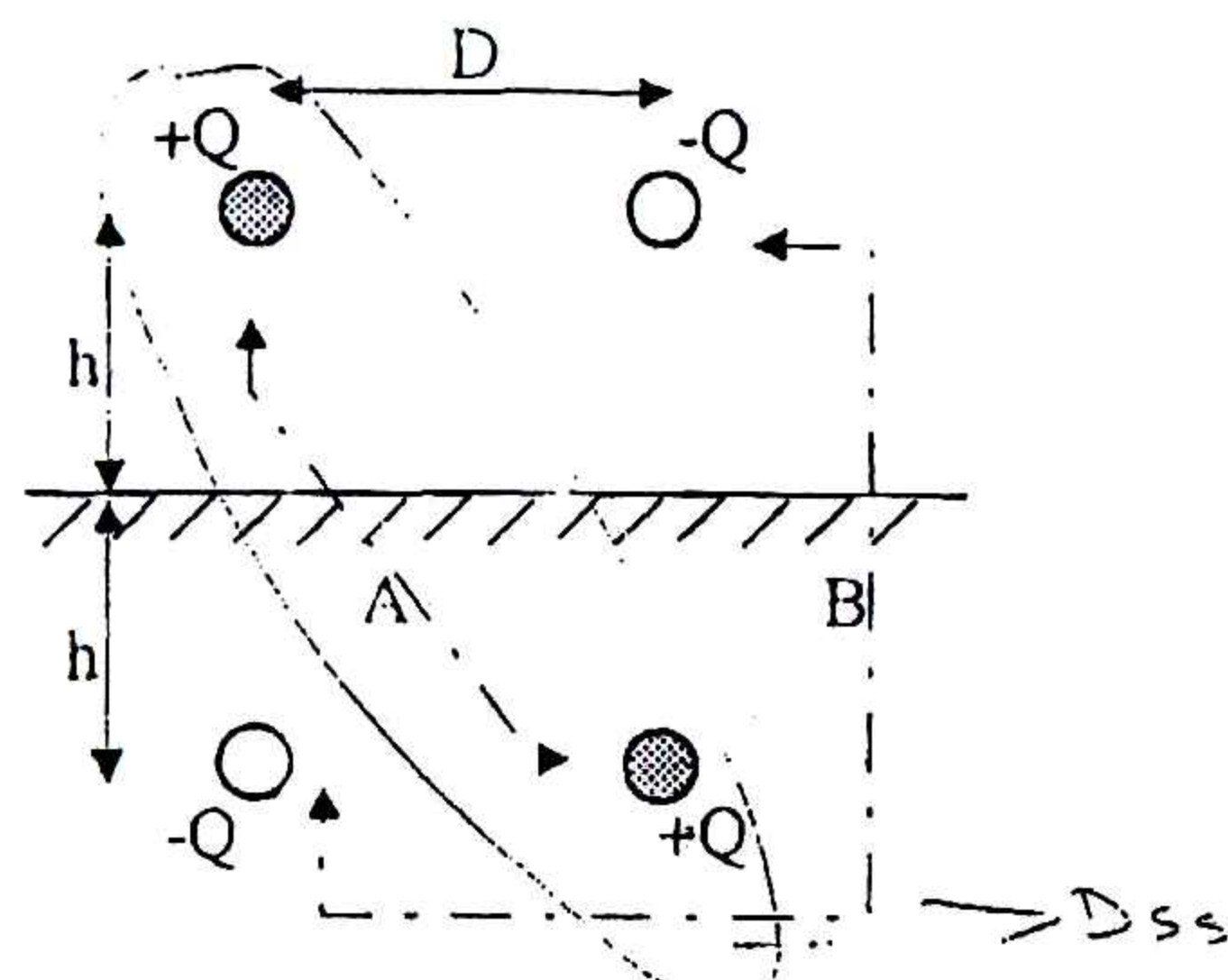
Kako se radi o prepletenom vodu, srednja visina i srednja udaljenost između faza su:

$$h = \sqrt[3]{h_a \cdot h_b \cdot h_c} = 10.03 \text{ [m]}$$

$$D = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} = 8.43 \text{ [m]}$$

Za proračun jediničnog pogonskog kapaciteta SGU metodom možemo trofazni nesimetrični prepleteni vod predstaviti na sljedeći način:





Sada možemo jednostavno izračunati srednje geometrijske udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = 13 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot x \cdot r \cdot x} = 0.51 \text{ [m]}$$

Tada je pogonski kapacitet skupine A (pozitivno nabijeni vodiči):

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}}$$

A pogonski kapacitet jednog vodiča je:

$$C_a = \frac{C_A}{2} = 8.578 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

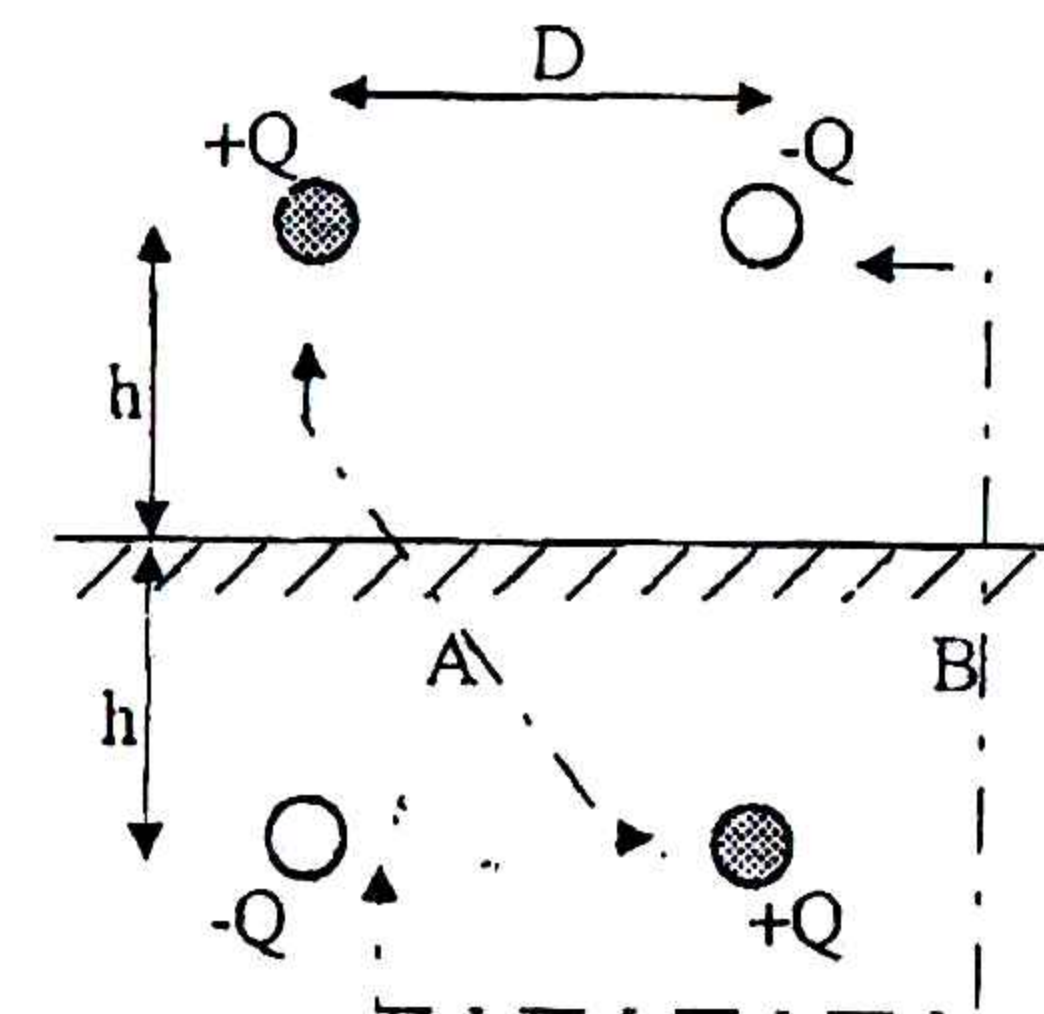
↓  
-9  
10

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \left( \frac{D}{r} \cdot \frac{2h}{3} \right)}$$

↑  
 $\ln \left( \frac{D}{r} \cdot \frac{2h}{3} \right)$

2.5. Za dvožični vod na međusobnoj udaljenosti  $D = 3 \text{ m}$  i na jednakim srednjim visinama nad zemljom od  $h = 6 \text{ m.}$ , uz polumjer vodiča je  $r = 1 \text{ cm}$ , odrediti:

- pogonski kapacitet jednog vodiča
- dozemni kapacitet jednog vodiča
- međusobni kapacitet jednog vodiča.
- pogonski kapacitet



Udaljenost između dvaju pozitivno ili dvaju negativno nabijenih vodiča računa se iz slike:

$$x = \sqrt{D^2 + (2h)^2} = \sqrt{3^2 + 12^2} = 12.37 \text{ [m]}$$

Određivanje srednjih geometrijskih udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot D} = \sqrt{2 \cdot 6 \cdot 3} = 6 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot x \cdot r \cdot x} = \sqrt{r \cdot x} = \sqrt{0.01 \cdot 12.37} = 0.35 \text{ [m]}$$

Kapacitet skupine A tada je:

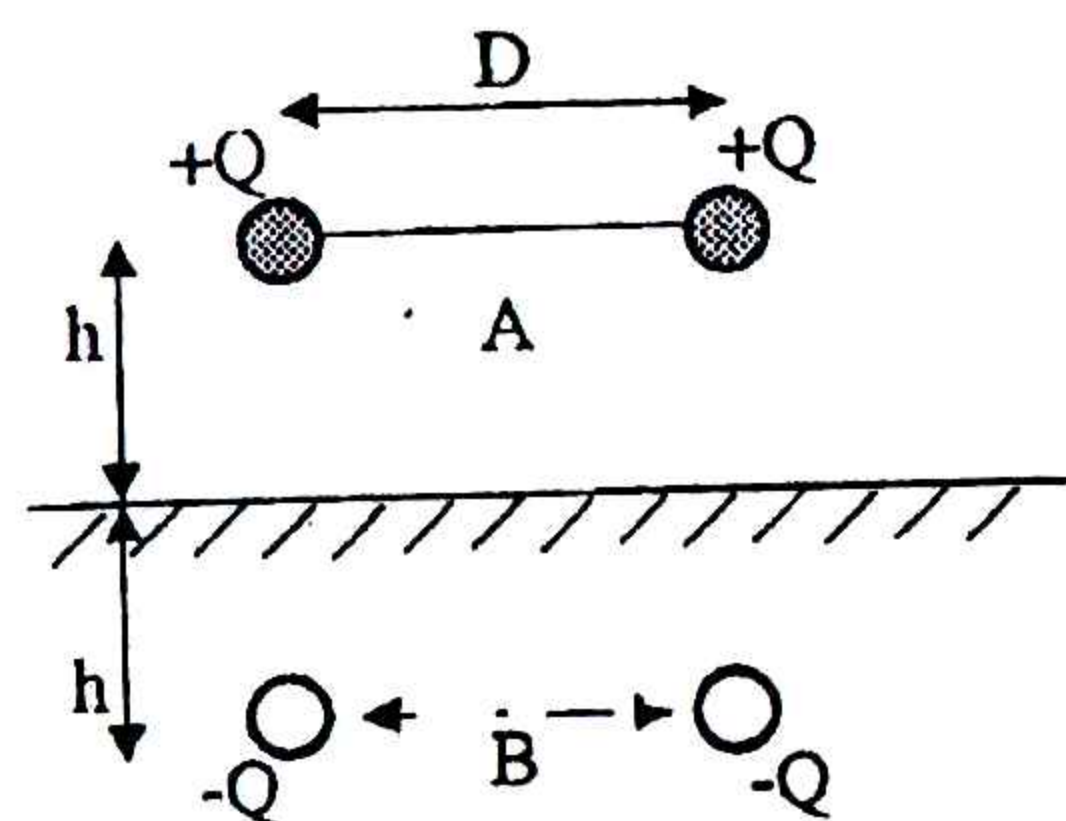
$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{6}{0.35}} = 19.6 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Pogonski kapacitet jednog vodiča iznosi:

$$C_a = \frac{C_A}{2} = 9.8 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$



## b) dozemni kapacitet



Određivanje srednjih geometrijskih udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2]{x \cdot 2h \cdot x \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot x} = \sqrt{2 \cdot 6 \cdot 1237} = 1218 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot D \cdot r \cdot D} = \sqrt{r \cdot D} = \sqrt{0.01 \cdot 3} = 0.17 \text{ [m]}$$

Kapacitet skupine A tada je:

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{1218}{0.17}} = 1301 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Dozemni kapacitet jednog vodiča iznosi:

$$C_z = \frac{C_A}{2} = 6.5 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

## c) međusobni kapacitet

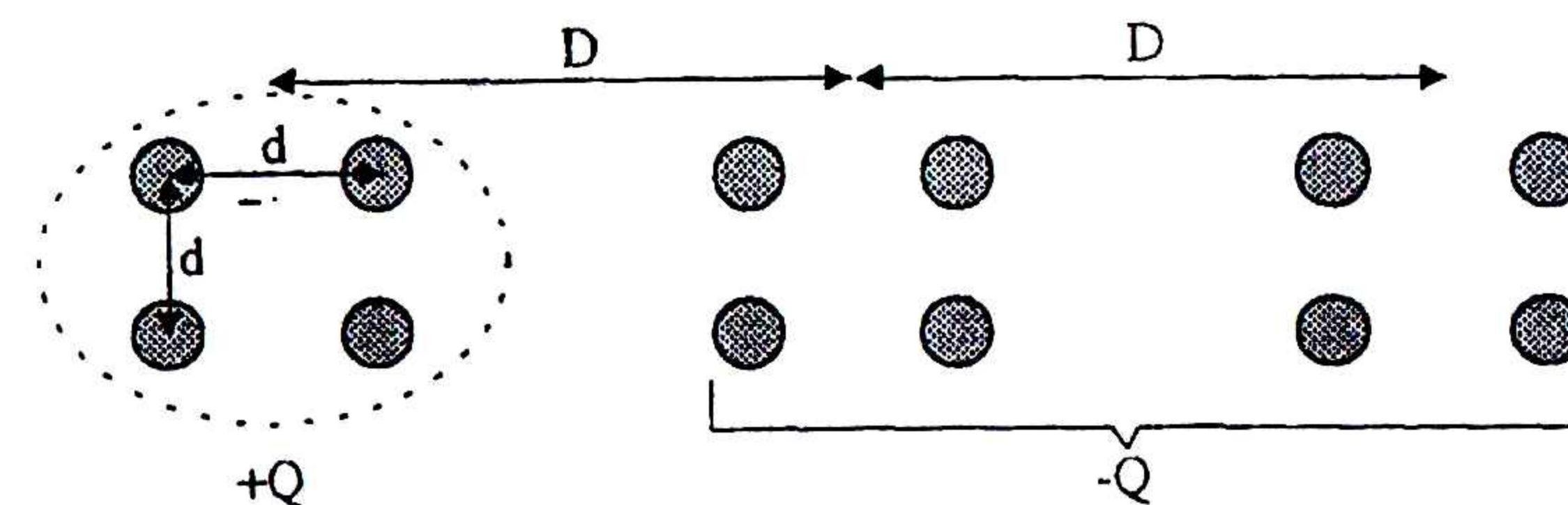
Kako se radi o dvožičnomvodu, pogonski kapacitet faze a je:

$$C_a = 2 \cdot C_m + C_z$$

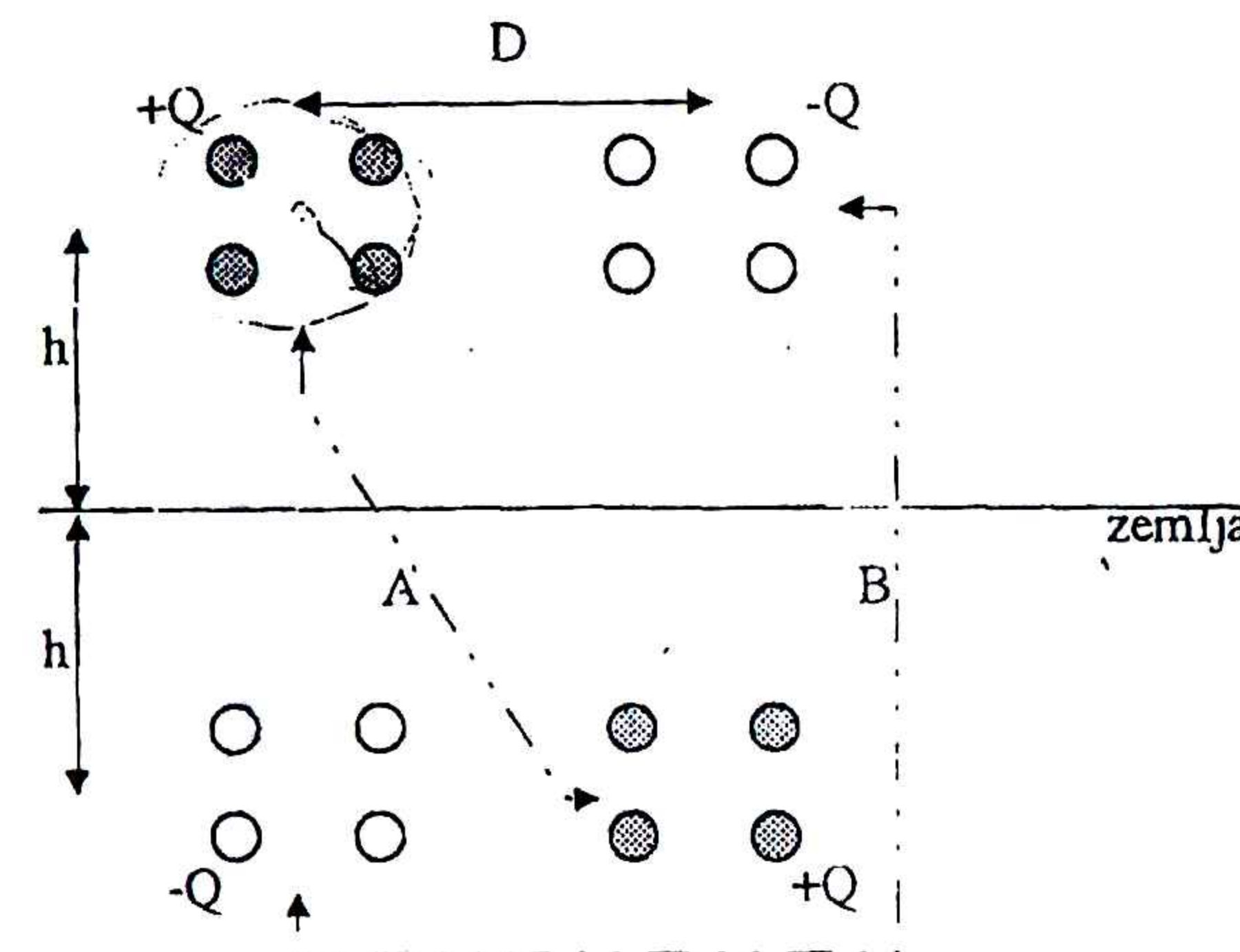
Međusobni kapacitet jednog vodiča iznosi:

$$C_m = \frac{C_a - C_z}{2} = \frac{9.8 - 6.5}{2} \cdot 10^{-9} = 1.65 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

2.6. Metodom SGU izračunati pogonski kapacitet po vodiču i kilometru prepletenog nesimetričnog trofaznog voda kojem se svaka faza sastoji od četiri vodiča u snopu prema slici. Vodiči su promjera  $d = 31.5 \text{ mm}$ , a srednja visina simetrala snopova nad zemljom je  $h = 20 \text{ m}$ . Udaljenost između snopova vodiča  $D = 12 \text{ m}$ .



Snop vodiča promatramo kao jedan vodič, uz uvažavanje da se umjesto polumjera jednog vodiča uzima vrijednost vlastite srednje geometrijske udaljenosti snopa od samog sebe.



Budući da je vod prepleten, računa se srednja geometrijska udaljenost između vodiča snopa:

$$D_1 = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 12 \cdot \sqrt[3]{2} = 15.12 \text{ [m]}$$

Međusobna srednja geometrijska udaljenost računa se na već poznat način, pri čemu se snop vodiča smatra jednim nabojem (odnosno jednim vodičem):

$$D_m = \sqrt[2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = \sqrt{2 \cdot h \cdot D} \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 15.12} = 24.59 \text{ [m]}$$



Vlastita srednja geometrijska udaljenost  $D_s$  računa se na isti način kao i kod proračuna induktiviteta, samo se u obzir uzima stvarni, a ne reducirani polumjer vodiča, a u ovom zadatku još je riječ i o snopu vodiča ( $D$ , umjesto  $r$ ):

$$D_{ss} = \sqrt[2]{D_s \cdot x \cdot D_s \cdot x} = \sqrt{D_s \cdot x}$$

Pri tome je ekvivalentni polumjer  $R$  snopa:

$$R = \frac{d \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{0.4 \cdot \sqrt{2}}{2} = 0.282 \text{ [m]}$$

Za snop vodiča računa vlastita SGU  $D_s$  isto kao kod proračuna induktiviteta, ali sa stvarnim polumjerom vodiča  $r$ :

$$D_s = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} = \sqrt[4]{4 \cdot 15.75 \cdot 0.282^3} = 0.194 \text{ [m]}$$

Udaljenost  $x$  jednostavno se izračuna kao:

$$x = \sqrt{D^2 + (2h)^2} = \sqrt{15.12^2 + 40^2} = 42.76 \text{ [m]}$$

Tada je vlastita srednja geometrijska udaljenost:

$$D_{ss} = \sqrt{0.194 \cdot 42.76} = 2.88 \text{ [m]}$$

Kapacitet skupine A:

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{24.59}{2.88}} = 24 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Kapacitet faze a (prvog snopa koji smo označili kao pozitivni naboj) jednak je naravno polovini ukupnog kapaciteta skupa A svih pozitivnih naboja:

$$C_a = \frac{C_A}{2} = 12 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Kapacitet jednog vodiča iz snopa:

$$C_v = \frac{C_a}{4} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

2.7. Odrediti jedinični induktivitet za slučaj neprepletenog i prepletenog voda, te jedinični pogonski i dozemni kapacitet po jednom vodiču trofaznog dalekovoda napona 10 kV, za koji su dani sljedeći podaci:

1. vodiči: aldrej 50 mm<sup>2</sup>, promjera  $d = 9 \text{ mm}$
2. udaljenosti među fazama:  $D_{ab} = D_{bc} = 0.8 \text{ m}$ ,  $D_{ac} = 0.65 \text{ m}$
3. trokutasti raspored vodiča, sa ishodištem koordinatnog sustava u stupu: faza a (-0.4m, 7m), faza b (0.4m, 7.32m), faza c (-0.4m, 7.65m)

a) jedinični induktivitet neprepletenog voda

Metodom srednjih geometrijskih udaljenosti jedinični induktivitet računa se kao:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ [H/km]}$$

Srednje geometrijske udaljenosti pojedinih faza su:

$$\text{Faza a: } D_m = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{aa}} = \sqrt[3]{0.8 \cdot 0.65 \cdot 0.65} = 0.72 \text{ [m]}$$

$$D_s = D_{aa} = r' = 0.7788 \cdot r = 3.5 \text{ [mm]}$$

$$\text{Faza b: } D_m = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{bb}} = \sqrt[3]{0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.8} = 0.8 \text{ [m]}$$

$$D_s = D_{bb} = r' = 0.7788 \cdot r = 3.5 \text{ [mm]}$$

$$\text{Faza c: } D_m = \sqrt[3]{D_{ac} \cdot D_{bc} \cdot D_{cc}} = \sqrt[3]{0.65 \cdot 0.8 \cdot 0.8} = 0.72 \text{ [m]}$$

$$D_s = D_{cc} = r' = 0.7788 \cdot r = 3.5 \text{ [mm]}$$

Jedinični induktiviteti pojedinih faza su:

$$L_a = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{0.72}{3.5 \cdot 10^{-3}} = 1.065 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

$$L_b = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{0.8}{3.5 \cdot 10^{-3}} = 1.086 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

$$L_c = L_a = 1.065 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

Pogonska reaktancija ( $X = \omega \cdot L$ ) pojedinih faza je:

$$X_a = \omega \cdot L_a = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.065 \cdot 10^{-3} = 0.334 \text{ [\Omega/km]}$$



$$X_b = \omega \cdot L_b = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.086 \cdot 10^{-3} = 0.341 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_c = \omega \cdot L_c = X_a = 0.334 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Srednja vrijednost pogonske reaktancije:

$$X_1 = \frac{X_a + X_b + X_c}{3} = 0.337 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

b) jedinični induktivitet prepletenog voda

Srednje geometrijske udaljenosti sve tri faze (simetrija) su:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} = \sqrt[3]{0.8 \cdot 0.65 \cdot 0.8} = 0.75 \text{ } [\text{m}]$$

$$D_s = r' = 0.7788 \cdot r = 3.5 \text{ } [\text{mm}]$$

Jedinični induktiviteti sve tri faze:

$$L_1 = L_a = L_b = L_c = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{0.75}{3.5 \cdot 10^{-3}} = 1.073 \cdot 10^{-3} \text{ } [\text{H}/\text{km}]$$

Pogonska reaktancija je tada:

$$X_1 = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.073 \cdot 10^{-3} = 0.337 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

c) jedinični pogonski kapacitet

Kako nema podataka o provjesu, dane y koordinate faza ujedno su i srednje visine. Kod proračuna kapaciteta riječ je o prepletenom vodu, pa su srednja visina i srednja udaljenost između faza:

$$h = \sqrt[3]{h_a \cdot h_b \cdot h_c} = 7.32 \text{ } [\text{m}]$$

$$D = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} = 0.75 \text{ } [\text{m}]$$

Srednje geometrijske udaljenosti vodiča:

$$D_m = \sqrt[2.2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = \sqrt{0.75 \cdot 2 \cdot 7.32} = 3.31 \text{ } [\text{m}]$$

$$D_{ss} = \sqrt[2.2]{r \cdot x \cdot r \cdot x} = \sqrt{4.5 \cdot 10^{-3} \cdot 14.66} = 0.26 \text{ } [\text{m}]$$

Tada je pogonski kapacitet skupine A (pozitivno nabijeni vodiči):

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}}$$

A pogonski kapacitet jednog vodiča je:

$$C_a = \frac{C_A}{2} = 10.86 \cdot 10^{-9} \text{ } [\text{F}/\text{km}]$$

d) jedinični dozemni kapacitet

Srednje geometrijske udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2.2]{x \cdot 2h \cdot x \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot x} = \sqrt{2 \cdot 7.32 \cdot 14.66} = 14.65 \text{ } [\text{m}]$$

$$D_{ss} = \sqrt[2.2]{r \cdot D \cdot r \cdot D} = \sqrt{r \cdot D} = \sqrt{4.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.75} = 0.058 \text{ } [\text{m}]$$

Dozemni kapacitet jednog vodiča iznosi:

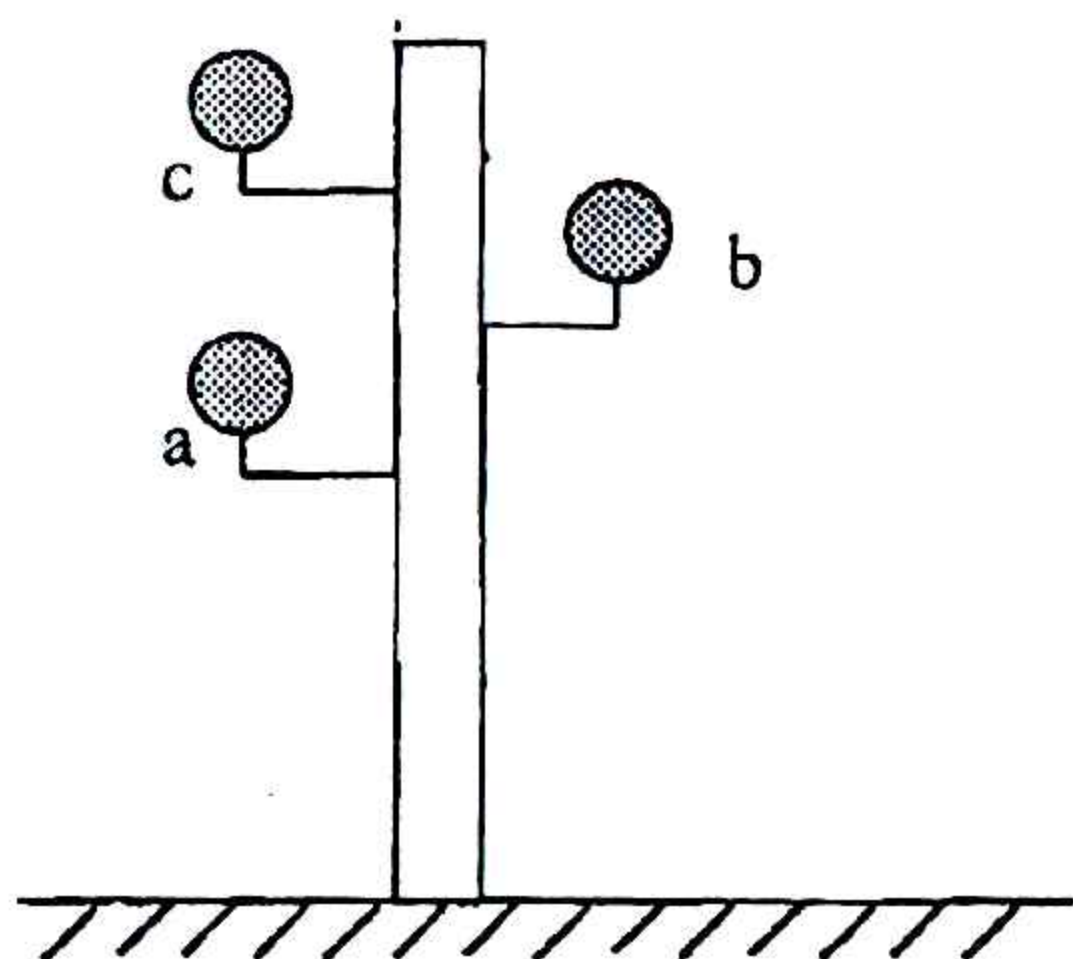
$$C_z = \frac{C_A}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{14.66}{0.058}} = 3.96 \cdot 10^{-9} \text{ } [\text{F}/\text{km}]$$

~~3.96~~ 5,023 F/km



2.8. Za prepleteni trofazni dalekovod vrijede sljedeći podaci: vodiči od aldreya 50 mm<sup>2</sup>, promjera  $d = 9$  mm; udaljenosti između faza  $D_{ab} = D_{bc} = 0.8$  m,  $D_{ca} = 0.65$  m; provjes  $f = 1.86$  m; visine pojedinih faza  $H_a = 8.3$  m,  $H_b = 8.62$  m,  $H_c = 8.95$  m. Položaj vodiča na stupu (trokutast) je prikazan slikom. Odrediti:

- a) jedinični induktivitet  
b) jedinični pogonski kapacitet



Srednje visine faza računaju se na sljedeći način :

$$h_a = H_a - 0.7f = 8.3 - 0.7 \cdot 1.86 = 7 \text{ [m]}$$

$$h_b = H_b - 0.7f = 8.62 - 0.7 \cdot 1.86 = 7.32 \text{ [m]}$$

$$h_c = H_c - 0.7f = 8.95 - 0.7 \cdot 1.86 = 7.65 \text{ [m]}$$

Kako se radi o prepletenom vodu srednja visina i srednja međusobna geometrijska udaljenost između faza su:

$$h = \sqrt[3]{h_a \cdot h_b \cdot h_c} = 7.32 \text{ [m]}$$

$$D = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} = 0.75 \text{ [m]}$$

- a) jedinični induktivitet

Neka je faza a skupina polaznih vodiča, a faze b i c skupine povratnih vodiča. Kako je međusobna srednja geometrijska udaljenost, kod proračuna induktiviteta jednaka izračunatoj vrijednosti  $D$  ( $D_m = D$ ), ostaje odrediti vlastitu geometrijsku udaljenost:

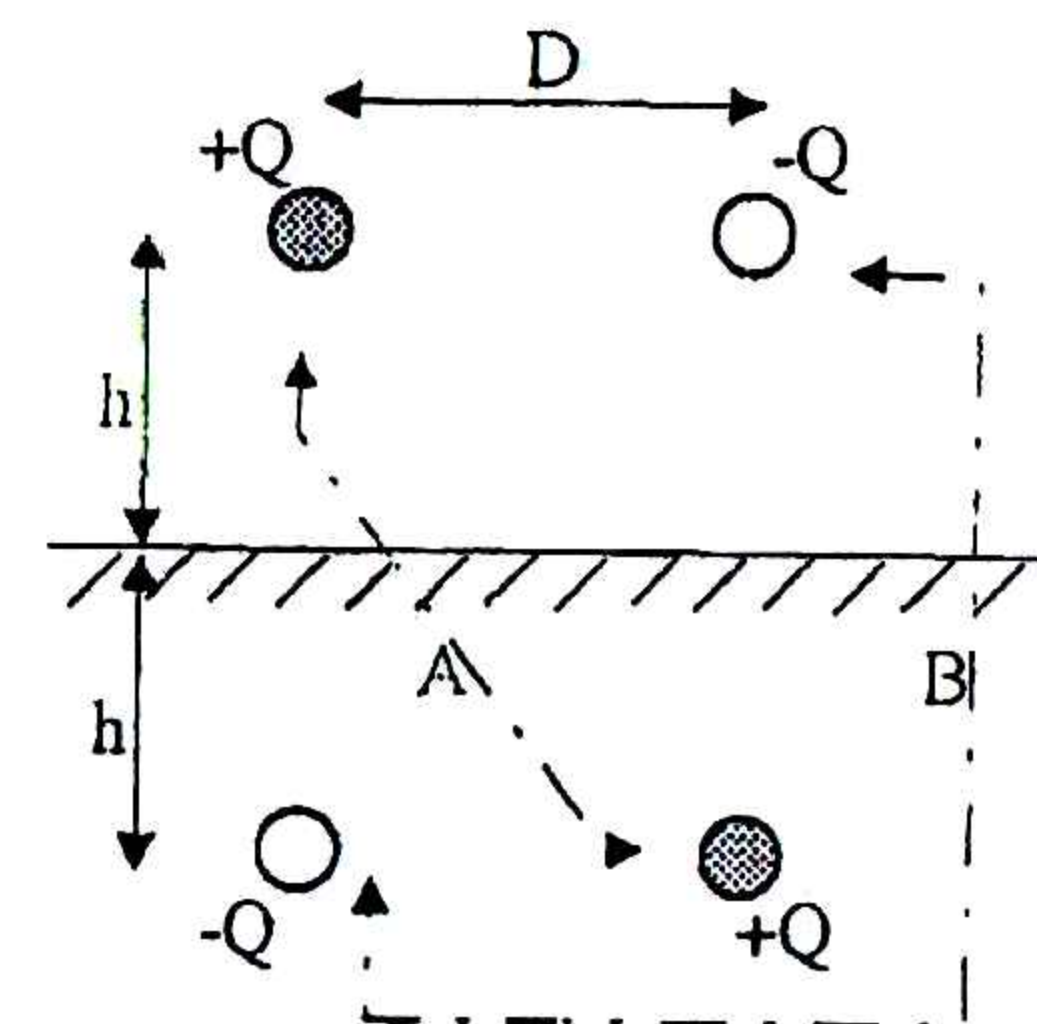
$$D_s = r' = 0.7788 \cdot r = 0.7788 \cdot \frac{9}{2} = 3.50 \text{ [mm]}$$

Jedinični induktiviteti skupine polaznih vodiča, odnosno faze a (te kod prepletenog voda i preostalih faza) iznosi:

$$L_1 = L_a = L_b = L_c = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{0.75}{3.50 \cdot 10^{-3}} = 1.073 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$$

- b) jedinični pogonski kapacitet

Za proračun jediničnog pogonskog kapaciteta možemo predstaviti trofazni nesimetrični prepleteni vod na sljedeći način:



Udaljenost između dva pozitivno nabijena vodiča:

$$x = \sqrt{(2h)^2 + D^2} = \sqrt{(2 \cdot 7.32)^2 + 0.75^2} = 14.66 \text{ [m]}$$

Sada možemo jednostavno izračunati srednje geometrijske udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = \sqrt{D \cdot 2h} = \sqrt{0.75 \cdot 2 \cdot 7.32} = 3.31 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot x \cdot r \cdot x} = \sqrt{r \cdot x} = \sqrt{4.5 \cdot 10^{-3} \cdot 14.66} = 0.26 \text{ [m]}$$

Tada je pogonski kapacitet skupine A (pozitivno nabijeni vodiči) :

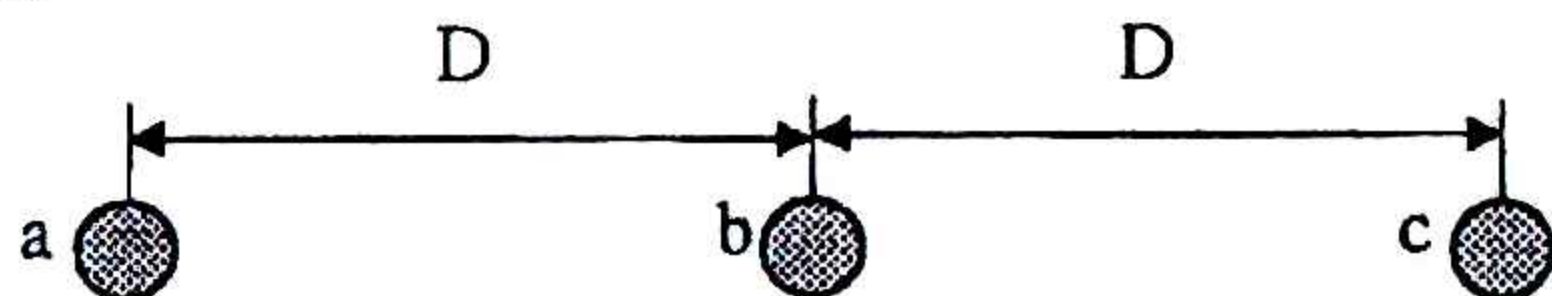
$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{3.31}{0.26}} = 21.83 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

A pogonski kapacitet jednog vodiča je:

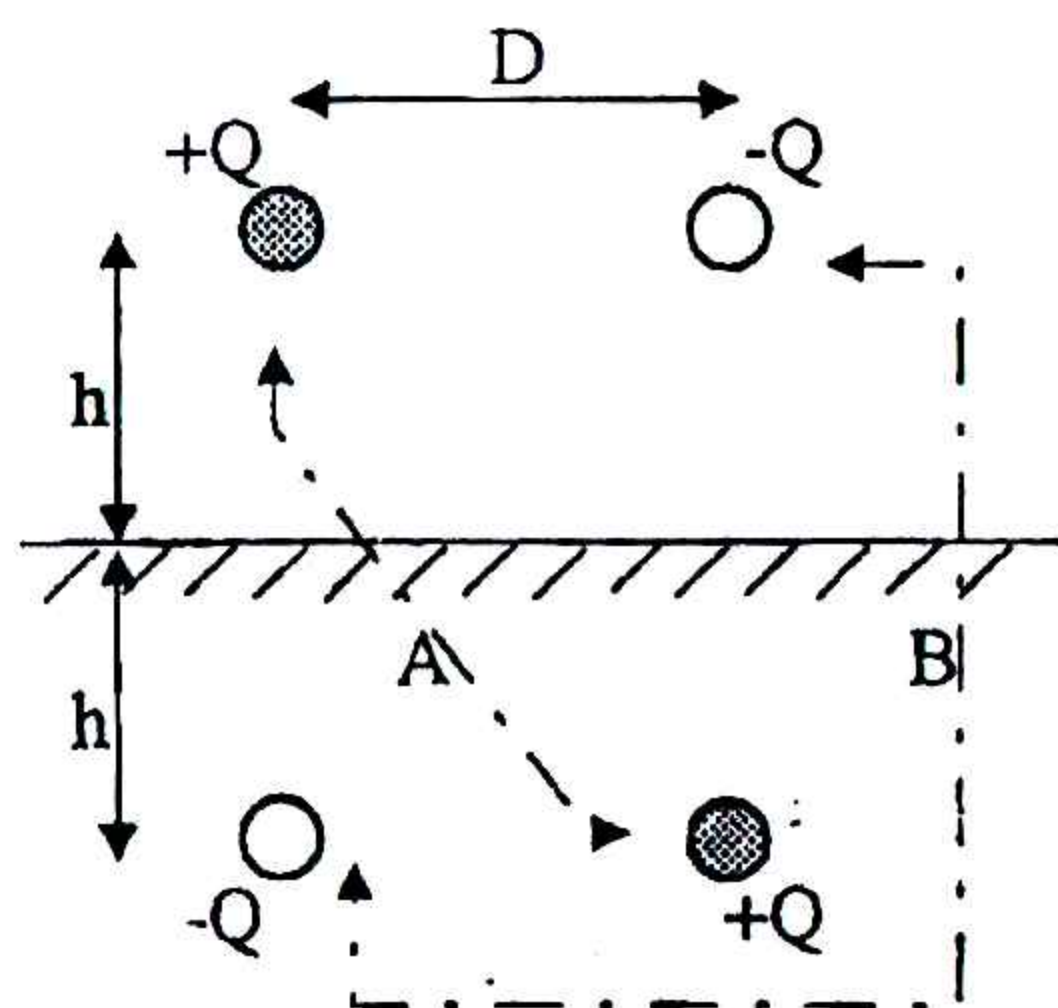
$$C_1 = \frac{C_A}{2} = 10.92 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$



2.9. Odrediti jedinični pogonski, dozemni i međusobni kapacitet trofaznog dalekovoda za koji vrijede sljedeći podaci: promjer vodiča  $d = 26.6$  mm; udaljenosti između faza  $D_{ab} = D_{bc} = 6$  m,  $D_{ca} = 12$  m; srednja visina vodiča od zemlje  $h = 7$  m. Raspored vodiča je vodoravan.



a) jedinični pogonski kapacitet



Udaljenost  $D$  računa se na već poznati način kao:

$$D = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} = \sqrt[3]{6 \cdot 6 \cdot 12} = 7.56 \text{ [m]}$$

Udaljenost između dva pozitivno ili dva negativno nabijena vodiča računa se iz slike:

$$x = \sqrt{D^2 + (2h)^2} = \sqrt{7.56^2 + 14^2} = 15.91 \text{ [m]}$$

Određivanje srednjih geometrijskih udaljenosti:

$$D_m = \sqrt[2]{D \cdot 2h \cdot D \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot D} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 7.56} = 10.29 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot x \cdot r \cdot x} = \sqrt{r \cdot x} = \sqrt{0.0133 \cdot 15.91} = 0.46 \text{ [m]}$$

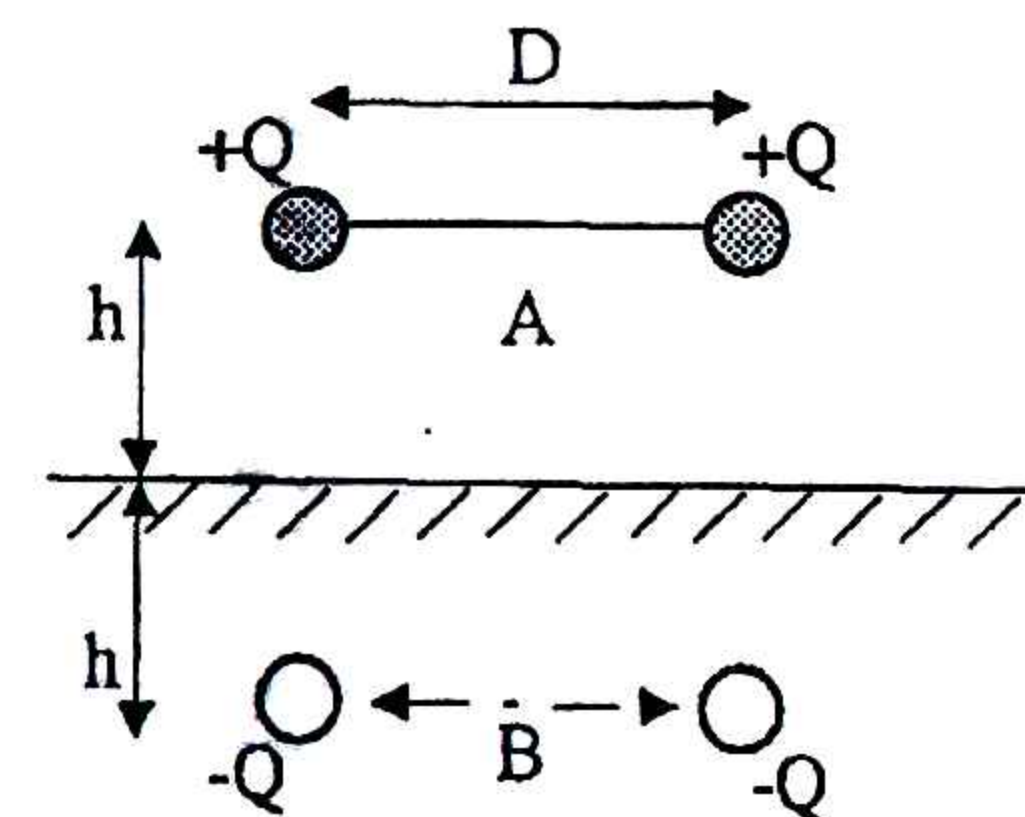
Kapacitet skupine A tada je:

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{10.29}{0.46}} = 17.88 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Pogonski kapacitet jednog vodiča iznosi:

$$C_a = \frac{C_A}{2} = 8.94 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

b) dozemni kapacitet



Određivanje srednjih geometrijskih udaljenosti:

$$D_{in} = \sqrt[2]{x \cdot 2h \cdot x \cdot 2h} = \sqrt{2h \cdot x} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 15.91} = 14.92 \text{ [m]}$$

$$D_{ss} = \sqrt[2]{r \cdot D \cdot r \cdot D} = \sqrt{r \cdot D} = \sqrt{0.0133 \cdot 7.56} = 0.32 \text{ [m]}$$

Kapacitet skupine A tada je:

$$C_A = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{14.92}{0.32}} = 14.46 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

Dozemni kapacitet jednog vodiča iznosi:

$$C_z = \frac{C_A}{2} = 7.23 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$

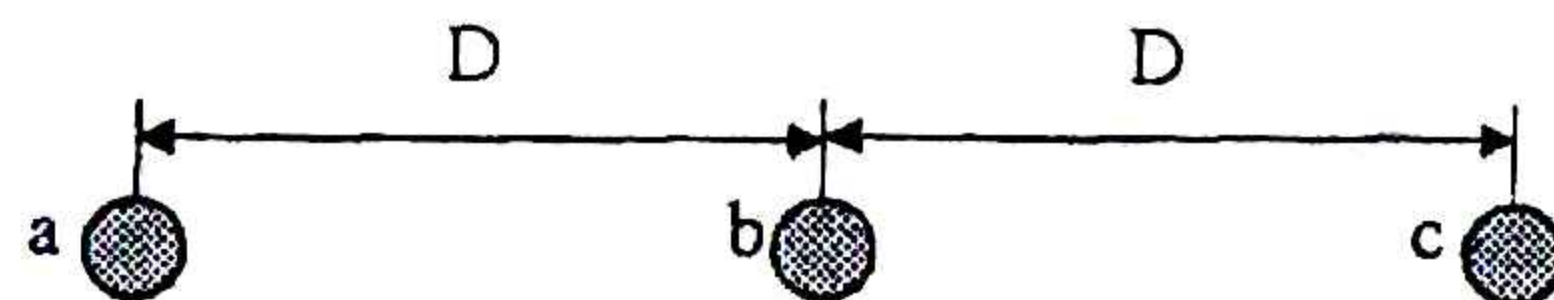
c) međusobni kapacitet

Kako se radi o trofaznom vodu, međusobni kapacitet jednog vodiča je:

$$C_m = \frac{C_a - C_z}{3} = \frac{8.94 - 7.23}{3} \cdot 10^{-9} = 0.57 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$$



2.10. Odrediti jedinični induktivitet te jedinični pogonski i dozemni kapacitet prepletenog trofaznog dalekovoda položaja vodiča prema slici, promjera vodiča  $d = 21.9 \text{ mm}$ , srednje visine  $h = 6.5 \text{ m}$ , udaljenosti između vodiča  $D = 3.1 \text{ m}$ .



Rješenje:  $L_1 = 1.225 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$ ;  $C_1 = 9.52 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$ ;  $C_{21} = 5.80 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$

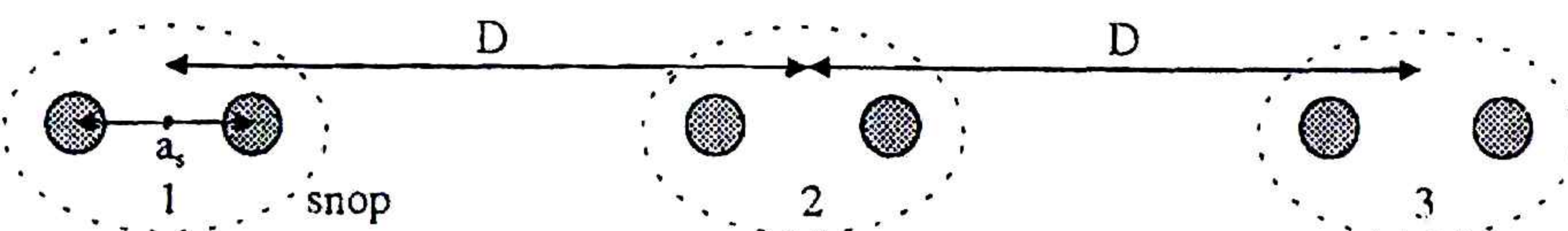
2.11. Odrediti jedinični induktivitet, te jedinični pogonski i dozemni kapacitet trofaznog nesimetričnog prepletenog dalekovoda, za koji vrijede sljedeći podaci: promjer vodiča  $d = 9.6 \text{ mm}$ ; udaljenosti između faza  $D_{ab} = D_{bc} = 1.5 \text{ m}$ ,  $D_{ca} = 1.35 \text{ m}$ ; provjes  $f = 2.14 \text{ m}$ ; visine pojedinih faza  $H_a = 8 \text{ m}$ ,  $H_b = 8.5 \text{ m}$ ,  $H_c = 9.3 \text{ m}$ . Položaj vodiča na stupu je trokutast.

Rješenje:  $L_1 = 1.192 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$ ;  $C_1 = 9.74 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$ ;  $C_{21} = 4.42 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$

2.12. Odrediti induktivni i kapacitivni otpor trofaznog dalekovoda, za koji vrijede sljedeći podaci: promjer vodiča  $d = 10.5 \text{ mm}$ ; udaljenosti između faza  $D_{ab} = D_{bc} = 1.8 \text{ m}$ ,  $D_{ca} = 1.6 \text{ m}$ ; provjes  $f = 0.714 \text{ m}$ ; visine pojedinih faza  $H_a = 7.3 \text{ m}$ ,  $H_b = 7.8 \text{ m}$ ,  $H_c = 8.8 \text{ m}$ . Položaj vodiča na stupu je trokutast.

Rješenje:  $X_L = 9.88 \text{ } [\Omega]$ ;  $X_C = 12.78 \cdot 10^3 \text{ } [\Omega]$

2.13. Odrediti jedinični induktivitet te jedinični pogonski i dozemni kapacitet trofaznog prepletenog dalekovoda prema slici za koji su dani sljedeći podaci:  $D = 12 \text{ m}$ ,  $a_s = 0.4 \text{ m}$ , promjer vodiča  $d = 30.6 \text{ mm}$ , srednja visina vodiča  $h = 9 \text{ m}$ .



Rješenje:  $L_1 = 1.073 \cdot 10^{-3} \text{ [H/km]}$ ;  $C_1 = 11.12 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$ ;  $C_{21} = 8.79 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km]}$

### III. TEORIJA PRIJENOSA

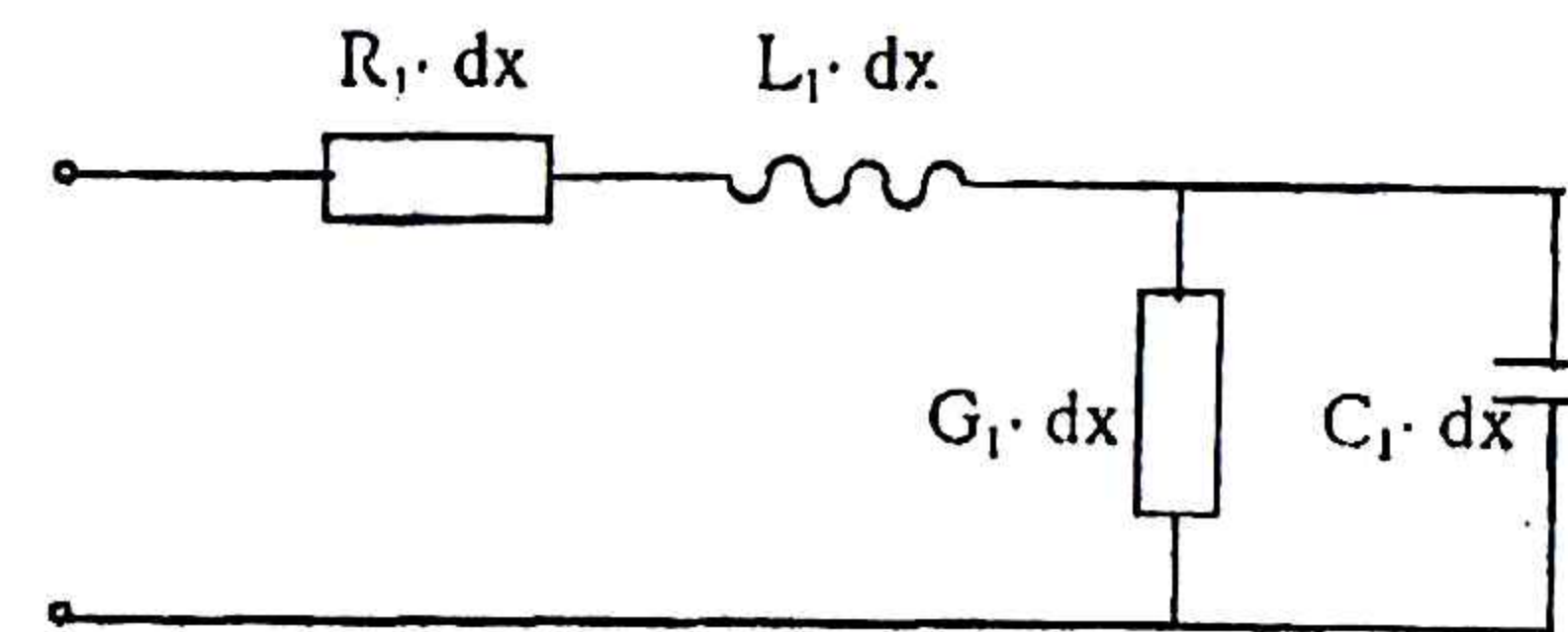
#### 3.1. OSNOVNE RELACIJE

##### 3.1.1. Konstante voda

##### 3.1.1.1. Primarne konstante voda

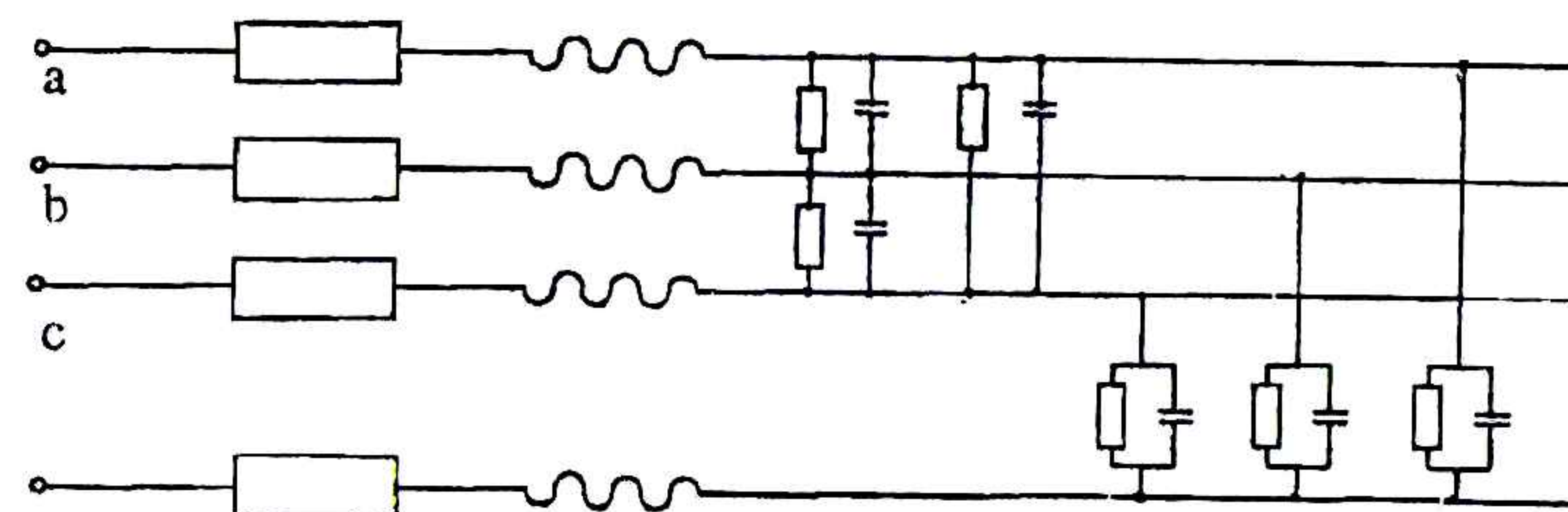
1. jedinični djelatni otpor  $R_1$   $[\Omega/\text{km}]$
2. jedinični induktivitet  $L_1$   $[\text{H}/\text{km}]$
3. jedinični kapacitet  $C_1$   $[\text{F}/\text{km}]$
4. jedinična vodljivost (odvod)  $G_1$   $[\text{S}/\text{km}]$

Vod sa sve četiri primarne konstante različite od nula zovemo realni vod. Idealnom vodu su jedinični otpor i vodljivost jednaki nula ( $R_1$  i  $G_1 = 0$ ). Idealni vod je naime vod bez gubitaka, a u djelatnom otporu ( $R$ ) i odvodu ( $G$ ) nastaju gubici, dok u  $L$  i  $C$  nema gubitaka. U stvarnosti su ove četiri konstante kontinuirano razdijeljene duž voda, pa čitavu duljinu voda možemo podijeliti na elementarne duljine voda  $dx$ . Dobijamo četveropol duljine  $dx$ :



Slika 3.1. Jednofazni prikaz elementarne duljine voda  $dx$

Ovo je jednofazni prikaz koji vrijedi za jednofazni ili simetrični trofazni vod. U slučaju nesimetričnih prilika ne možemo koristiti jednofazni nego trofazni prikaz:



Slika 3.2. Trofazni prikaz elementarne duljine voda  $dx$