

# Proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda pomoću računala

---

**Bijelić, Davor**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:255508>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**PRORAČUN JEDINIČNOG KAPACITETA  
DALEKOVODA POMOĆU RAČUNALA**

**Završni rad**

**Davor Bijelić**

**Osijek, 2016.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 17.09.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>  | Davor Bijelić   |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika   |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>   | 3715, 27.08.2013.   |
| <b>OIB studenta:</b>  | 72313287498   |
| <b>Mentor:</b>  | Doc.dr.sc. Krešimir Fekete  |
| <b>Sumentor:</b>  |   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>  | Proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda pomoću računala   |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>   | <b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>   |
| <b>Predložena ocjena završnog rada:</b>   | Izvrstan (5)  |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 3<br>Razina samostalnosti: 3 |
| <b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>   | 17.09.2016.   |
| <b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>   | 28.09.2016.   |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:         | Potpis:   |
|   | Datum:  |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 28.09.2016.

**Ime i prezime studenta:**

Davor Bijelić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

3715, 27.08.2013.

**Ephorus podudaranje [%]:**

0%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda pomoću računala**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Krešimir Fekete

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Mišljenje i odluka člana odbora (Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin):

-Ime programa MATLAB je akronim i sva bi se slova trebala pisati velikim slovima!

-Uz PrtSc iz MATLABA rad bi bio još bolji!

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 1.1. Zadatak završnog rada.....  | 1  |
| 2. ELEKTROENERGETSKI VODOVI .....                                      | 2  |
| 2.1. Karakteristični parametri voda.....                               | 5  |
| 2.2. Djelatni otpor voda.....  | 7  |
| 2.3. Induktivitet voda .....   | 8  |
| 2.4. Odvod voda.....   | 9  |
| 2.5. Kapacitet voda .....  | 9  |
| 3. IZRAČUN KAPACITETA DALEKOVODA.....                                  | 10 |
| 3.1. Kapacitet jednofaznih vodova .....                                | 12 |
| 3.2. Razlika potencijala u konfiguraciji sa više vodiča .....          | 14 |
| 3.3. Kapacitet trofaznih vodova.....                                   | 15 |
| 3.3.1 Međusobni kapacitet trofaznog dalekovoda .....                   | 15 |
| 3.4. Posljedica preplitanja .....                                      | 19 |
| 3.5. Kapacitet trofaznih dvostrukih vodova .....                       | 20 |
| 3.6. Veza između pogonskog induktiviteta i kapaciteta dalekovoda ..... | 21 |
| 3.7. Utjecaj zemlje na kapacitet.....                                  | 22 |
| 3.8. Indukcija magnetskog polja .....                                  | 27 |
| 3.9. Elektrostatska indukcija .....                                    | 27 |
| 3.10. Korona .....   | 28 |
| 3.11. Primjeri izračuna kapaciteta.....                                | 28 |
| 3.12. Primjeri proračuna jediničnog pogonskog kapaciteta .....         | 30 |
| 4. ZAKLJUČAK.....  | 46 |
| LITERATURA .....   | 47 |
| SAŽETAK.....   | 48 |
| ABSTRACT .....   | 48 |
| ŽIVOTOPIS .....  | 49 |
| PRILOZI .....  | 50 |

# 1. UVOD

Pod pojmom električne energetske mreže podrazumijevamo sve sljedeće međusobno povezane elemente sustava, a to su: generatori, transformatori, vodovi te trošila kod potrošača električne energije. Električna mreža se sastoji od tri dijela: izvor, prijenosna mreža i distribucijska mreža. Razlika između distribucijske i prijenosne mreže nije jednoznačna. Prema tehničkoj podjeli pod izvorima smatramo elektrane, dok pod prijenosnom mrežom podrazumijevamo vodove i postrojenja nazivnog napona 110 kV i više, a distribucijska mreža se odnosi na vodove i postrojenja nazivnog napona nižih od 110 kV. Za razliku od tehničke podjele u funkcionalnoj podjeli prijenosna mreža obuhvaća sve dijelove sustava koji djeluju zajedno sa izvorima električne energije, a ostali dijelovi električnih mreža predstavljaju distribucijsku mrežu [1]. Elektroenergetski vodovi mogu biti nadzemni i kabelski vodovi. Nadzemni vodovi su skup svih dijelova koji služe za nadzemno vođenje električne energije, dok kabelski vodovi predstavljaju vodiče koji prenose električnu energiju, a isti su izolirani i zaštićeni tako da se mogu polagati u zemlju ili vodu. Nadzemni i kabelski vodovi imaju svoje karakteristične parametre koji predstavljaju karakteristiku voda koja utječe na električne prilike u cijeloj dužini voda, a to su djelatni otpor  $R$ , induktivitet  $L$ , kapacitet  $C$  i odvod  $G$ . U završnom radu pozornost će biti usmjerena na proračun pogonskog kapaciteta nadzemnog voda kao jednog od parametara voda.

U prvom dijelu završnog rada opisani su elektroenergetski vodovi, zatim njihova podjela po različitim kriterijima i osnovni elementi nadzemnih vodova. Nakon toga obrađene su karakteristične veličine voda i dat je opis za svaki od navedenih veličina voda s posebnim osvrtom na kapacitet i poprečnu admitanciju. Metodu srednjih geometrijskih udaljenosti korištena je prilikom izračuna parametara nadzemnih vodova, te će također biti detaljnije obrađena u nastavku rada. U zadnjem dijelu obrađen je i izračunat pogonski kapacitet za nekoliko primjera dalekovoda.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Potrebno je dati opis jediničnih parametara dalekovoda sa posebnim osvrtom na kapacitet i poprečnu admitanciju, također je potrebno opisati metodu srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU) za izračun kapaciteta. Na kraju potrebno je napraviti nekoliko primjera proračuna uz pomoć računalnog programa.

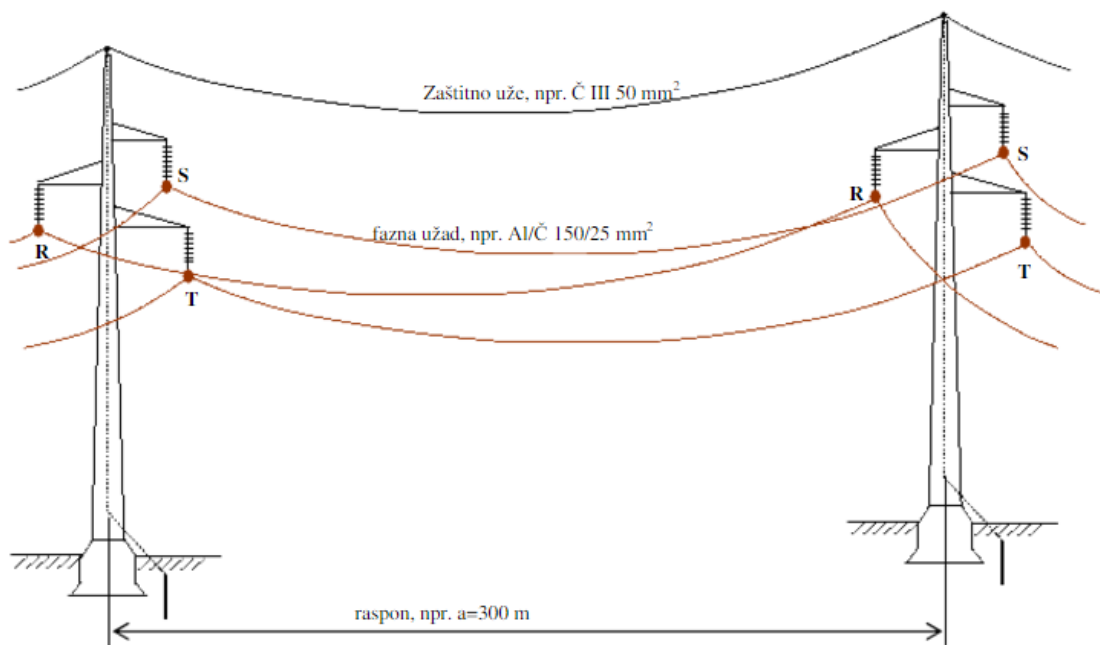
## 2. ELEKTROENERGETSKI VODOVI

Za prijenos i distribuciju električne energije koristimo nadzemne vodove, koji mogu biti zračni ili slobodni, te kabelski elektroenergetski vodovi. Podjela nadzemnih vodova može se izvršiti po više kriterija:

- nazivni napon voda,
- broj strujnih krugova,
- materijal i konstrukcija vodiča,
- materijal i konstrukcija stupova [2].

Osnovni elementi nadzemnog voda kako je prikazano na Slici 2.1. su:

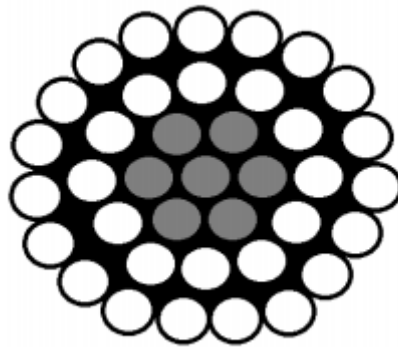
- temelji,
- stupovi,
- izolatori,
- vodiči,
- spojni ovjesni i zaštitni materijal (pribor),
- uzemljenje i zaštitna užad [2].



Sl.2.1. Dio nadzemnog voda sa osnovnim elementima [3]

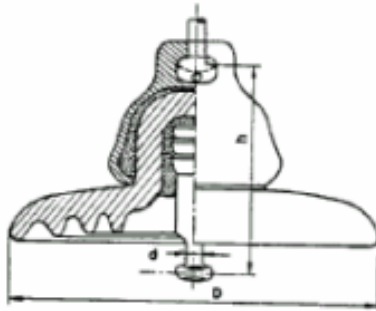


Vodiči predstavljaju aktivni dio voda i osnovni su električni dio voda, njihova glavna zadaća je prenošenje električne energije. Materijali od kojih se izrađuju električni vodiči trebaju imati sljedeće osobine: dobru električnu vodljivost, veliku mehaničku čvrstoću, otpornost protiv oštećenja, starenja i korozije. Da bi se zadovoljili gore navedeni uvjeti, u praksi se vodiči izrađuju od više materijala tzv. kombinirani vodiči, zbog toga što u jednom vodiču ne možemo pronaći sva zahtjevana svojstva. Najčešći materijali koji se koriste za izradu vodiča su: bakar, aluminij, čelik, bronza, aldrej, alučel te razni drugi kombinirani vodič [2]. Primjer jednog kombiniranog vodiča prikazan je na Sl.2.2.



Sl.2.2. Izgled alučel užeta pri čemu je jezgra ispunjena čelikom, a omotač aluminijem [4]

Izolatori imaju dvije zadaće, a to su da vodiče električki izoliraju od stupova, te da ih mehanički drže u određenom položaju. Materijali od kojih se izrađuju izolatori osim električnih svojstava trebaju imati i zahtjevanu mehaničku čvrstoću i otpornost na vanjske utjecaje, a primjer jednog izolatora imamo na sljedećoj slici (Sl.2.3). Korišteni materijali za izradu izolatora su porculan, steatit i staklo [2].



S1.2.3. Izgled kapastog izolatora [3]

Spojni materijal i pribor služe za stalan prolaz električne energije na mjestima gdje se dužine vodiča nastavljaju jedna na drugu. Pribor može biti spojni, zaštitni ili ovjesni, a razlikuju se po funkcijama koje imaju. Spojni materijal omogućuje prolaz električne struje, dok ovjesni ima mehaničku funkciju, a zaštitni materijal ima ostale funkcije [2].

Zaštitno uže ima više uloga, prva od njih je zaštita od neposrednog udara munje u fazne vodiče dalekovoda. Druga uloga zaštitnog užeta da osigura dovoljno nisku nultu impedanciju voda kako ne bi došlo do kvarova. Materijali od kojih zaštitno uže izrađuje potrebno je da bude dobre vodljivosti [2].

Stupovi omogućavaju vodičima dovoljnu visinu u odnosu na tlo. S obzirom na položaj trase stupovi mogu biti linijski koji se nalaze u ravnome dijelu vertikalne proekcije trase, te kutni koji se nalaze na mjestima loma vertikalne proekcije trase. Ovisno o načinu zavješene vodiča stupove dijelimo na nosne i zatezne. Materijali koje koristimo za izradu stupova su drvo, armirani beton i čelik [2].

Glavna uloga temelja je da sve sile sa stupova prenesu na tlo, a oni mogu biti zategnut vertikalno prema dolje, na izvlačenje i na prevrtanje. Uzemljenje predstavlja cijeli sustav u koji pripada zaštitno uže, uzemljivač i međusobni galvanski spojevi metalnih dijelova koji nisu pod naponom [2].

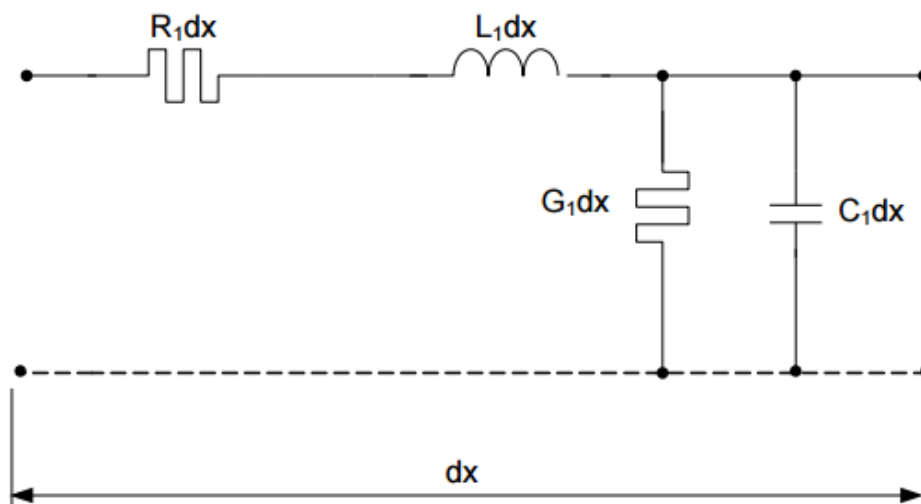
## 2.1. Karakteristični parametri voda

Karakteristični parametri pomoću kojih se definiraju električne prilike na vodu u pogonskim slučajevima nazivaju se parametri voda. Parametri voda sadrže brojčane vrijednosti koje ovise o svojstvima materijala od kojih su konstruirani, zatim o okolini koja ga okružuje i o geometrijskom odnosu dijelova voda međusobno i prema okolini. Također treba voditi računa da mnoge od ovih utjecajnih veličina ovise o vanjskim utjecajima, npr. o promjeni temperature, vlažnosti i sl. Parametri voda su navedeni po jedinici dužine voda, po kilometru i po jednoj fazi, a u njih ubrajamo:

- jedinični djelatni otpor:  $R_1$  [ $\Omega/\text{km}$ ]
- jedinični induktivitet:  $L_1$  [ $\text{H}/\text{km}$ ]
- jedinični kapacitet:  $C_1$  [ $\text{F}/\text{km}$ ]
- jedinični odvod:  $G_1$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]

Kada su svi parametri voda različiti od nule tada taj vod nazivamo realni vod. Dijelimo ih na tople i hladne, jer kroz otpor i odvod prolazi struja koja izaziva toplinske gubitke, a kapacitet i induktivitet pripadaju u hladne [2].

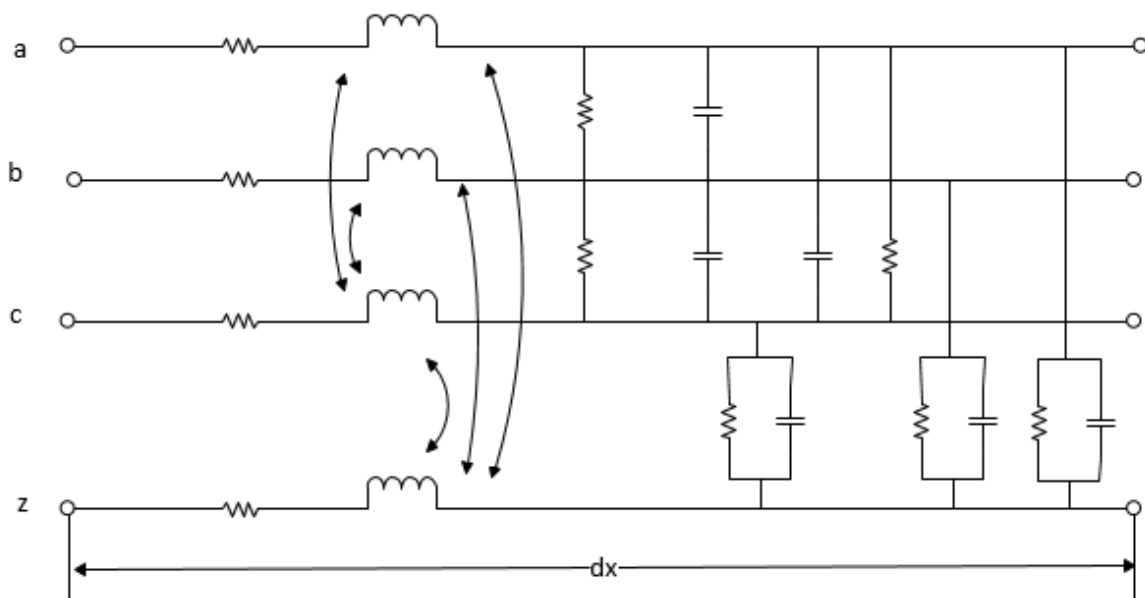
Sve četiri parametra se nalaze unutar voda i raspoređene su kontinuirano uzduž voda, pa stoga po volji maleni dio voda sadrži njih sve četiri. Raspored parametara unutar voda određuje njihov naziv, te se djelatni otpor i induktivitet nazivaju uzdužnim, a odvod i kapacitet popriječnim parametrima [2].



Sl.2.4. Položaj parametara voda na dužini  $dx$  [5]

Sa Slike 2.4. možemo viditi da se na uzdužnoj grani nalaze jedinični djelatni otpor voda  $R_1$  i jedinični induktivitet voda  $L_1$ , a u poprečnu granu spadaju jedinični odvod voda  $G_1$  i jedinični kapacitet voda  $C_1$  [2].

Ako je trofazni vod simetričan on se može prikazati jednofazno što je vidljivo sa Slike 2.4., a to znači da sve tri faze imaju jednake električne karakteristike ili ako je vod pogonski simetričan, a to znači da su po iznosu jednaki, a po fazi za  $120^\circ$  zakrenuti naponi i struje u sve tri faze. U suprotnom potreban je grafički prikaz trofaznog modela voda, kojeg će biti prikazan na sljedećoj slici (Sl.2.5.) [2].



Sl.2.5. Trofazni model voda dužine dx

Prilikom računanja hladnih parametara voda ovise i o frekvenciji i mogu se zapisati u sljedećim oblicima:

- jedinični uzdužni induktivni otpor ili jedinična reaktancija  $X_1 = \omega L_1 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right]$
- jedinična poprečna kapacitivna vodljivost ili jedinična susceptancija  $B_1 = \omega C_1 \left[ \frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$

Na kraju parametre voda možemo prikazati pomoću kompleksnih vrijednosti:

- jedinični uzdužni prividni otpor ili jedinična impedancija:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad [\Omega / \text{km}] \quad (2-1)$$

- jedinična poprečna prividna vodljivost ili jedinična admitancija:

$$\bar{Y}_1 = G_1 + jB_1 \quad [\text{S} / \text{km}]. \quad (2-2)$$

Duljina voda  $l$  važna je za konkretni vod, te kada jedinične parametre voda pomnožimo s dužinom voda  $l$  dobivamo:

- djelatni otpor voda ili rezistenciju  $R$  [ $\Omega$ ]
- induktivni otpor voda ili reaktanciju  $X$  [ $\Omega$ ]
- djelatni odvod voda ili konduktanciju  $G$  [ $\text{S}$ ]
- kapacitivnu vodljivost voda ili susceptanciju  $B$  [ $\text{S}$ ]

tj. prividni otpor voda ili impedanciju:

$$\bar{Z} = R + jX \quad [\Omega] \quad (2-3)$$

te prividnu vodljivost voda ili admitanciju:

$$\bar{Y} = G + jB \quad [\text{S}]. \quad (2-4)$$

## 2.2. Djelatni otpor voda

„Djelatni otpor voda je definiran padom napona ili gubitkom snage po jedinici dužine voda, ako vodičem teče istosmjerna struja od 1 ampera] [2].“

$$R_1 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{\rho}{q} \quad \left[ \frac{\Omega}{\text{m}} \right] \quad (2-5)$$

gdje je:

$\Delta U$  – promjena napona po jedinici duljine voda [ $\text{V}/\text{m}$ ]

$\Delta P$  – gubitak djelatne snage po jedinici duljine voda [W/m]

$I$  – struja kroz vodič [A]

$\rho$  = specifični otpor vodiča u [ $\Omega\text{m}$ ]

$q$  = presjek vodiča u [ $\text{m}^2$ ]

Otpor ovisi o više faktora koji mogu povećati ili smanjiti njegov učinak, kao što su temperatura, presjek vodiča, razmak među vodičima, duljina voda, materijal od kojeg je vodič izrađen tj. o specifičnom otporu i vodljivosti, toku izmjenične struje (skin-efekt i efekt blizine).

### **2.3. Induktivitet voda**

„Induktivitet je svojstvo petlje da se opire promjeni struje, jer svaka promjena struje izaziva promjenu obuhvatnog toka, koja inducira u petlji napon suprotnog smjera [5].“

Induktivitet voda nastaje zbog promjenljivog magnetskog polja koje nastaje okolo i unutar vodiča voda kada kroz njega teče izmjenična struja. Jakost magnetskog polja i magnetska indukcija proporcionalni, te magnetski tok možemo računati kao sumu magnetskih tokova koji su proizvedeni raznim dijelovima strujnog kruga [5].

Na veličinu induktivnog otpora najviše utiče razmak između vodiča i njegova veličina je puno veća kod zračnih nego kod kablskih vodova.

Za mjerenja induktiviteta koristi se jedinica 1 henri (H), te nju ima onaj strujni krug unutar kojeg se inducira napon od 1V, s tim da se struja jednolično mijenja za 1 amper u 1 sekundi. U vodovima koje koristimo za prijenos električne energije pretpostavljamo da je permeabilitet konstantan, te da su jakost magnetskog polja i magnetska indukcija proporcionalni. Iz toga možemo zaključiti da magnetski tok možemo računati kao sumu magnetskih tokova koji su proizvedeni raznim dijelovima strujnog kruga [5].

## 2.4. Odvod voda

„Odvod po jedinici dužine voda  $G_1$  možemo definirati kao omjer trofaznih djelatnih gubitaka po jedinici dužine zbog kliznih poprečnih struja i korone  $\Delta P_0$  [W/m] i kvadrata linijskog napona  $U$  [V] [5].“

$$G_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \quad [S/m] \quad (2-6)$$

Ovaj izraz također vrijedi i za jednofazni prikaz voda ako u obzir uzmemo gubitke jedne faze i fazni napon. Važno je naglasiti da se dužina nadzemnih vodova računa u kilometrima, pa je stoga i odvod najčešće zapisan u kilometrima.

U principu nadzemni vod je nesavršeni kondenzator gdje su vodiči ovješeni na izolator. Taj nesavršeni kondenzator često je praćen gubicima koji su prouzročeni koronom i gubicima koji su nastali zbog kliznih struja [2].

## 2.5. Kapacitet voda

„Kapacitet vodiča daje odnos između količine naboja na vodiču i visine napona na kojem se vodič nalazi. Jedinica za mjerenje kapaciteta je farad (F). Kapacitet od 1F ima onaj vodič kod kojega povećanje napona za 1V dovede do povećanja naboja za 1 As [2].“

$$1 \text{ F} = 1 \left| \frac{\text{As}}{\text{V}} \right| \quad (2-7)$$

Što se tiče voda vodiči unutar njega su zajedno električni povezani i čine sustav vodiča. Količina naboja na vodičima i razlika napona među vodičima su u čvrstoj međusobnoj vezi, a električno polje prostoru nastaje djelovanjem naboja svih vodiča, dok naboj svih vodiča nastaje pod utjecajem svih ostalih vodiča [2].

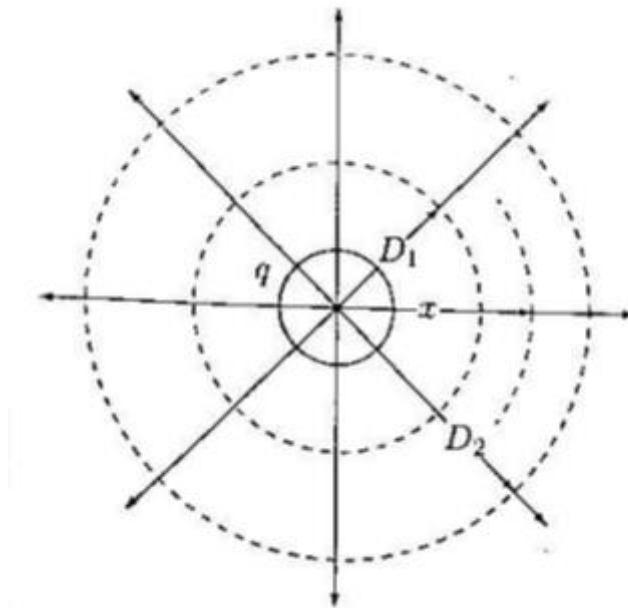
Za napon kažemo da je razlika potencijala, te jednu ekvipotencijalnu plohu odabiremo kao referentnu i to je obično ploha nultog potencijala pomoću koje se određuje napon svih vodiča [2].

### 3. IZRAČUN KAPACITETA DALEKOVODA

Vodiči prijenosnih vodova imaju kapacitet jedan u odnosu na drugi zbog razlike potencijala među njima. Iznos kapaciteta među vodičima ovisi o veličini vodiča, razmaku, između njih i visini od zemlje. Po definiciji je kapacitet  $C$  omjer naboja  $q$  i napona  $U$ , kako je prikazano u jednadžbi:

$$C = \frac{Q}{U} [F] \quad (3-1)$$

Potrebno je uzeti u obzir dugačak okrugli vodič radijusa  $r$ , sa nabojem  $q$  kulona po metru kako je prikazano na Slici 3.1. [6].



S1.3.1. Električno polje oko dugog okruglog vodiča [6]



Naboj na vodiču izaziva električno polje sa radijalnim linijama toka. Ukupni električni tok je numerički jednak vrijednosti naboja na vodiču. Intenzitet polja u bilo kojoj točki definiran je silom po jedinici naboja i naziva se jakost električnog polja i označava se sa  $E$ . Koncentrični cilindri koji okružuju vodič su ekvipotencijalne plohe i imaju jednaku gustoću toka. Iz Gaussovog zakona, za jedan metar duljine vodiča, gustoća električnog toka radijusa  $x$  računa se pomoću:

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi x(1)} \quad (3-2)$$

Jakost električnog polja  $E$  može se izračunati pomoću relacije:

$$E = \frac{D}{\epsilon_0} \quad (3-3)$$

gdje je  $\epsilon_0$  permitivnost vakuuma i jednaka je  $8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m. Zamjenjujući (3-2) u (3-3) rezultira:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} \quad (3-4)$$

Razlika potencijala cilindra od pozicije  $D_1$  do  $D_2$  definirana je kao obavljen rad pomicanja jedinice naboja jednoga kulona od  $D_2$  do  $D_1$  kroz električno polje stvarajući naboj na vodiču. Ovo je dano izrazom:

$$U_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (3-5)$$

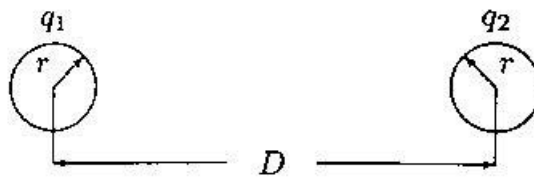
Oznaka  $U_{12}$  znači pad napona od 1 do 2, gdje se, 1 smatra pozitivan u odnosu na 2. Naboj  $q$  nosi svoj predznak [6].

### 3.1. Kapacitet jednofaznih vodova

Potrebno je uzeti u obzir metar duljine jednofaznog voda koji se sastoji od dva puna vodiča radijusa  $r$  kako je prikazano na Slici 3.2. Dva vodiča su razmaknuta za udaljenost  $D$ . Vodič 1 nosi naboj  $q_1$  kulona po metru, dok vodič 2 nosi naboj  $q_2$  kulona po metru. Prisutnost drugog vodiča i zemlje uzrokuje smetnje kod polja prvog vodiča. Udaljenost između žica  $D$  je velika u usporedbi sa  $r$ , a visina vodiča je puno veća od  $D$ . Iz toga slijedi, efekt izobličenja je mali, a naboj je pravilno raspoređen po plaštovima vodiča [6].

Pretpostavljajući samo vodič 1 nabijenog sa  $q_1$ , napon između vodiča 1 i 2 je:

$$U_{12(q_1)} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad (3-6)$$



Sl.3.2. Jednofazni vod sa dva vodiča [6]

Sada pretpostavljajući samo vodič 2, nabijen sa  $q_2$ , napon između vodiča 2 i 1 je:

$$U_{21(q_2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad (3-7)$$

Pošto je  $U_{12(q_2)} = -U_{21(q_2)}$ , imamo

$$U_{12(q_2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \quad (3-8)$$

Iz principa superpozicije, razlika potencijala uzrokovana prisustvom oba naboja je:

$$U_{12} = U_{12(q_1)} + U_{12(q_2)} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \quad (3-9)$$

Za jednofazni vod  $q_2 = -q$ , i (3-9) se skraćuje na

$$U_{12} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad [F / m] \quad (3-10)$$

Iz (3-1), kapacitet među vodičima je

$$C_{12} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F / m] \quad (3-11)$$

Jednadžba (3-11) daje kapacitet između vodiča u vodu. U svrhu modeliranja prijenosnog voda, možemo definirati kapacitet po jedinici dužine voda  $C_1$  između pojedinih vodiča i nultog vodiča kako je ilustrirano na Sl.3.3. Pošto je napon prema nuli jednak polovici  $U_{12}$ , kapacitet po jedinici voda prema nuli je  $C_1 = 2C_{12}$ , ili:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad [F / m] \quad (3-12)$$



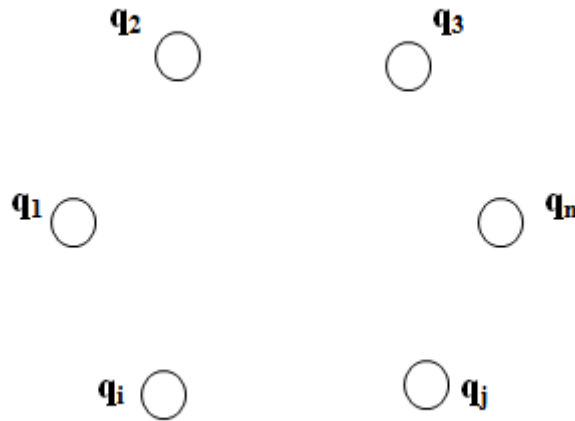
Sl.3.3. Ilustracija kapaciteta prema nultom vodiču

Prisjećamo se  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m i pretvara se u  $\mu F$  po kilometru, imamo:

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{D}{r}} \quad [\mu F / km] \quad (3-13)$$

### 3.2. Razlika potencijala u konfiguraciji sa više vodiča

Potrebno je uzeti u obzir  $n$  paralelnih vodiča nabijenih nabojima  $q_1, q_2, \dots, q_n$  kulona po metru kako je prikazano na Sl.3.4. [6].



Sl.3.4. Konfiguracija sa više vodiča

Pretpostavimo da je efekt izobličenja neznatan i da je naboj pravilno raspoređen oko vodiča sa slijedećim ograničenjem:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0 \quad (3-14)$$

Koristeći superpoziciju i (3-5), razlika potencijala između vodiča  $i$  i  $j$  zbog prisutnosti svih naboja je:

$$U_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n q_k \ln \frac{D_{kj}}{D_{ki}} \quad (3-15)$$

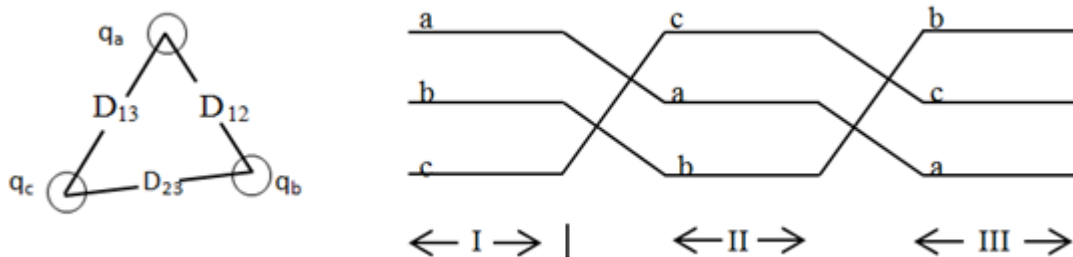
Kada je  $k = i$ ,  $D_{ii}$  je udaljenost između površine vodiča  $i$  i njegova središta, naime, njegova radijusa  $r$  [6].

### 3.3. Kapacitet trofaznih vodova

#### 3.3.1 Međusobni kapacitet trofaznog dalekovoda

Međusobni kapacitet predstavlja kapacitet između faza dalekovoda i ne uzima se u obzir utjecaj zemlje i zaštitnog užeta.

Potrebno je uzeti u obzir jedan metar duljine trofaznog voda sa tri duga vodiča, radijusa  $r$ , sa razmakom između vodiča prikazano kao na Slici 3.5. [6].



Sl.3.5. Trofazni prijenosni vod

Pošto imamo uravnoteženi trofazni sustav:

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (3-16)$$

Pretpostavimo da je vod prepleten. Nastavljamo sa proračunom razlike potencijala između a i b za svaki dio prepleta. Primjenjujući (3-15) na prvi dio prepleta  $U_{ab}$  je:

$$U_{ab(I)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} \right) \quad (3-17)$$

Slično, za drugi dio prepleta imamo:

$$U_{ab(II)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \right) \quad (3-18)$$

i za zadnji dio.:

$$U_{ab(III)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{D_{13}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right) \quad (3-19)$$

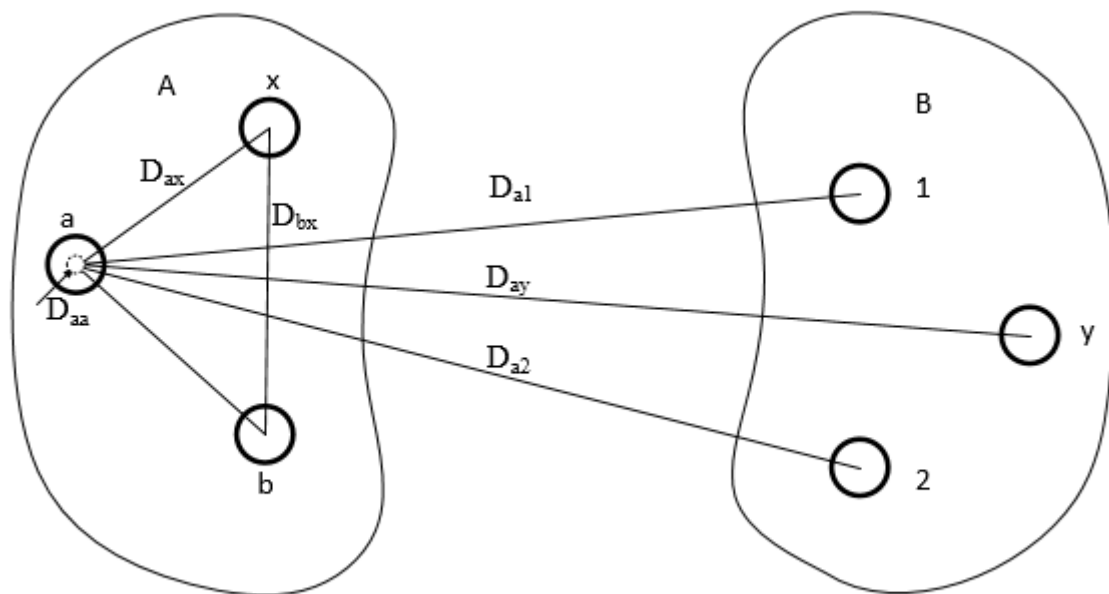
Srednja vrijednost  $U_{ab}$  je:

$$U_{ab} = \frac{1}{(3)2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_{12}D_{23}D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{D_{12}D_{23}D_{13}} \right) \quad (3-20)$$

ili:

$$U_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r} + q_b \ln \frac{r}{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (3-21)$$

Za izračun jediničnog pogonskog induktiviteta i kapaciteta, može se koristiti metoda srednjih geometrijskih udaljenosti (MSGU). Ova metoda počiva na pretpostavci da se vodiči mogu podijeliti u dvije skupine s obzirom na njihov naboj na skupinu polaznih vodiča A i skupinu povratnih vodiča B kako je prikazano na Slici 3.6. koji stvaraju jednu ekvivalentnu petlju. Općenito za MSGU možemo reći da je ekvivalentni razmak vodiča između dvije skupine, što je vidljivo iz Slike 3.6.



### Sl.3.6. Podjela vodiča nekog voda u skupine „polaznih“ i „povratnih“ vodiča

Dakle, naboj mjerodavan za određivanje kapaciteta stvarno se nalazi na površini vodiča, gdje se zanemaruje unutarnje magnetsko polje, tj. unutarnji induktivitet vodiča. Osim ovoga, prilikom primjene metode MSGU za određivanje kapaciteta u obzir uzimamo pripadnost svih vodiča (a,b,...,x,1,2,...,y;  $x + y = n$ ) istom strujnom krugu, te se ona iskazuje uvjetom:

$$\sum_{j=a}^n \bar{Q}_j = 0 \quad (3-22)$$

Izrazi sa međusobnu srednju geometrijsku udaljenost glasi:

$$MSGU = \sqrt[xy]{D_{a1} \cdot \dots \cdot D_{ay} \cdot D_{b1} \cdot \dots \cdot D_{by} \cdot \dots \cdot D_{x1} \cdot \dots \cdot D_{xy}} \quad (3-23)$$

Potrebno je napomenuti da se MSGU vodiča pojavljuje u argumentu logaritma i računa se:

$$MSGU = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}} \quad (3-24)$$

Iz toga slijedi da je  $U_{ab}$ :

$$U_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{MSGU}{r} + q_b \ln \frac{r}{MSGU} \right) \quad (3-25)$$

Slično se računa i  $U_{ac}$ :

$$U_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \frac{MSGU}{r} + q_c \ln \frac{r}{MSGU} \right) \quad (3-26)$$

Zbrajanjem (3-25) i (3-26) i zamjenjujući za  $q_b + q_c = -q_a$ , dobivamo:

$$U_{ab} + U_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( 2q_a \ln \frac{MSGU}{r} - q_a \ln \frac{r}{MSGU} \right) = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{MSGU}{r} \quad (3-27)$$

Za simetričan trofazan sustav napona vrijedi:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{an} \angle 0^\circ - U_{an} \angle -120^\circ \\ U_{ac} &= U_{an} \angle 0^\circ - U_{an} \angle -240^\circ \end{aligned} \quad (3-28)$$

Stoga,

$$U_{ab} + U_{ac} = 3U_{an} \quad (3-29)$$

Zamjenjujući u (3-27) kapacitet po fazi prema nuli je:

$$C_1 = \frac{q_a}{U_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{MSGU}{r}} \quad [F / m] \quad (3-30)$$

ili kapacitet prema nuli u  $\mu F$  po kilometru je:

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{MSGU}{r}} \quad [\mu F / km] \quad (3-31)$$



Ovo je jednaka forma kao i izraz za kapacitet jedne faze jednofaznog voda. MSGU je ekvivalentni razmak vodiča. Za gore spomenuti trofazni vod ovo je produkt trećeg korijena trofaznog razmaka [6].

### 3.4. Posljedica preplitanja

Kada se uzmu u obzir nesimetrični vodovi tada se dobije različit kapacitet u različitim fazama, te da bi dobili simetrične vodove vršimo njihovo preplitanje i izračunom dobivamo jednak pogonski kapacitet o fazi. Postupak za pronalaženje kapacitet po fazi za trofazni prepleteni vod sa prepletenim vodičima se računa prema sljedećoj formuli:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{MSGU}{r^b}} [F/m] \quad (3-32)$$

Pojam SGR predstavlja srednju geometrijski radijus faznih vodiča, te prema Slici 3.6. dobivamo sljedeću formulu:

$$SGR = \sqrt[3]{D_{aa} \cdot \dots \cdot D_{ax} \cdot D_{ba} \cdot \dots \cdot D_{bx} \cdot \dots \cdot D_{xa} \cdot \dots \cdot D_{xx}} \quad (3-33)$$

Posljedica preplitanja je uvođenje ekvivalentnog radijusa  $r^b$ . Ekvivalentni radijus  $r^b$  sličan je SGR-u, ako je  $d$  međusobno rastojanje između vodiča u snopu, dobivamo za dva prepletena podvodiča:

$$r^b = \sqrt{r \cdot d} \quad (3-34)$$

za tri prepletena podvodiča:

$$r^b = \sqrt[3]{r \cdot d^2} \quad (3-35)$$

za četiri prepletena podvodiča:

$$r^b = 1.09 \sqrt[4]{r \cdot d^3} \quad (3-36)$$

### 3.5. Kapacitet trofaznih dvostrukih vodova

Promatramo trofazne dvostruke vodove sa relativnim pozicijama faza  $a_1b_1c_1 - c_2b_2a_2$ . Svaki fazni vodič prepleten je unutar svoje grupe u odnosu na paralelni trofazni vod. Posljedica zaštitnog užeta i zemlje smatraju se neznatnim za ovo uravnoteženo stanje. Sljedeći postupak, prosječni naponi  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$  i  $U_{an}$  proračunati su i ekvivalentni kapacitet po fazi prema nuli dobija se iz:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{MSGU}{SGR_c}} [F / m] \quad (3-37)$$

ili kapacitet prema nuli u  $\mu F$  po kilometru:

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{MSGU}{SGR_c}} [\mu F / km] \quad (3-38)$$

Izraz za MSGU jednak je kao u proračunu induktiviteta i dan je formulom:

$$MSGU = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}} \quad (3-39)$$

$SGR_c$  se računa prema sljedećoj formuli:

$$SGR_c = \sqrt[3]{r_A r_B r_C} \quad (3-40)$$

Gdje se  $r_A$ ,  $r_B$  i  $r_C$  računaju prema sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} r_A &= \sqrt{r^b D_{a_1a_2}} \\ r_B &= \sqrt{r^b D_{b_1b_2}} \\ r_C &= \sqrt{r^b D_{c_1c_2}} \end{aligned} \quad (3-41)$$

gdje je  $r^b$  srednji geometrički radijus prepletenih vodiča [6].

Na Slici 3.7. prikazan dvostruki trofazni 110 kV dalekovod Županja-Orašje i Tuzla-Orašje tipa “bačva“ koji služi kao dvostruko napajanje trafostanice 110/35/10 kV Orašje.



Sl.3.7. Primjer dvostrukog trofaznog 110 kV dalekovoda Županja-Orašje, Tuzla-Orašje

### 3.6. Veza između pogonskog induktiviteta i kapaciteta dalekovoda

Umnožak pogonskog kapaciteta i pogonskog induktiviteta po jedinici dužine idealnog voda prema teoriji prijenosa električne energije jednak je recipročnoj vrijednosti kvadrata brzine svjetlosti:

$$C_1 L_1 = \frac{1}{c^2} \quad (3-42)$$

tu je  $c = 3 \cdot 10^8$  [m/s] [5].

Ako imamo slučaj realnog voda ( $R_1 \neq 0$ ,  $G_1 \neq 0$ ) gornja ovisnost bi ovisila samo za vanjski induktivitet vodiča:

$$L_{v1}C_1 = \frac{1}{c^2} \quad (3-43)$$

Za vanjski induktivitet uvrštavamo izraz dobiven prema metodi srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU):

$$L_{v1} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{MSGU}{SGR_A} \quad [H/m] \quad (3-44)$$

gdje se na SGR odnosi na skupinu polaznih vodiča, pa uvrštavajući (3-44) u (3-43) dobivamo izraz za pogonski kapacitet skupine A:

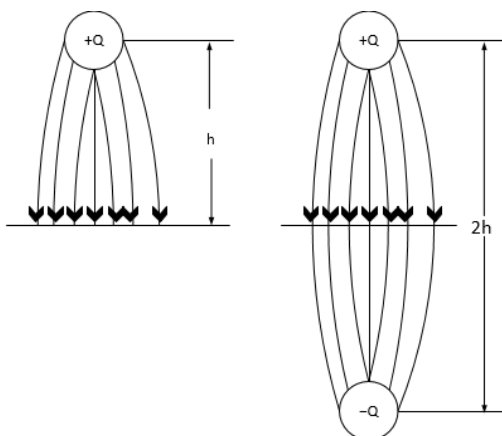
$$C_{A1} = \frac{1}{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{MSGU}{SGR_A}} = \frac{0.0556}{\ln \frac{MSGU}{SGR_A}} \quad [\mu F/km] \quad (3-45)$$

### 3.7. Utjecaj zemlje na kapacitet

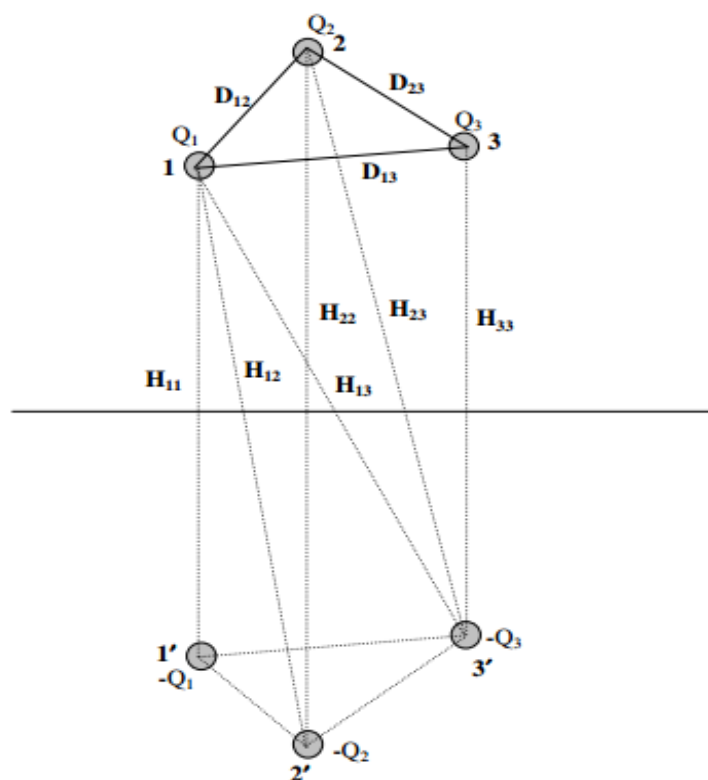
Za izolirani nabijeni vodič silnice električnog toka su radijalne i ortogonalne cilindričnim ekvipotencijalnim površinama. Prisutnost zemlje primijeniti će raspodjelu silnica i ekvipotencijalnih ploha električnog toka, što će promijeniti efektivni kapacitet voda. Razina zemlje je ekvipotencijalna ploha, stoga, silnice toka su prisiljene sjeći površinu zemlje ortogonalno. Posljedica prisutnosti zemlje se može reći da je odgovorna za metodu prividnih naboja koju je predstavio Kelvin. Da bi se ilustrirala ova metoda, potrebno je uzeti u obzir vodič sa nabojem  $q$  kulona po metru na visini  $H$  iznad zemlje. Također, potrebno je zamisliti naboj  $-q$  stavljen na dubinu  $H$  u zemlju. Ova konfiguracija bez prisutnosti površine zemlje stvorit će jednaku raspodjelu polja kao jedan naboj i površina zemlje. Stoga, zemlja se može zamijeniti u proračunu potencijala električnog polja sa fiktivnim nabijenim vodičem suprotnog predznaka koji se nalazi na jednakoj dubini ispod zemlje kao što je pravi vodič iznad zemlje. Ovaj imaginarni vodič nazvan je preslikom pravog vodiča [6].

Na Slici 3.8. imamo prikaz utjecaja električnog polja vodiča na visini  $h$  iznad zemlje, koji izgleda identično kao i električno polje između vodiča i njegove zrcalne slike na dubini  $h$  ispod površine zemlje. Primjer zrcaljenja za trofazni dalekovod prikazan je na Slici 3.9., gdje vidimo

kako su originalni vodiči 1, 2 i 3 preslikani simetrično u odnosu na zemlju u vodiče 1', 2' i 3' i da ti vodiči imaju naboj suprotnog predznaka.

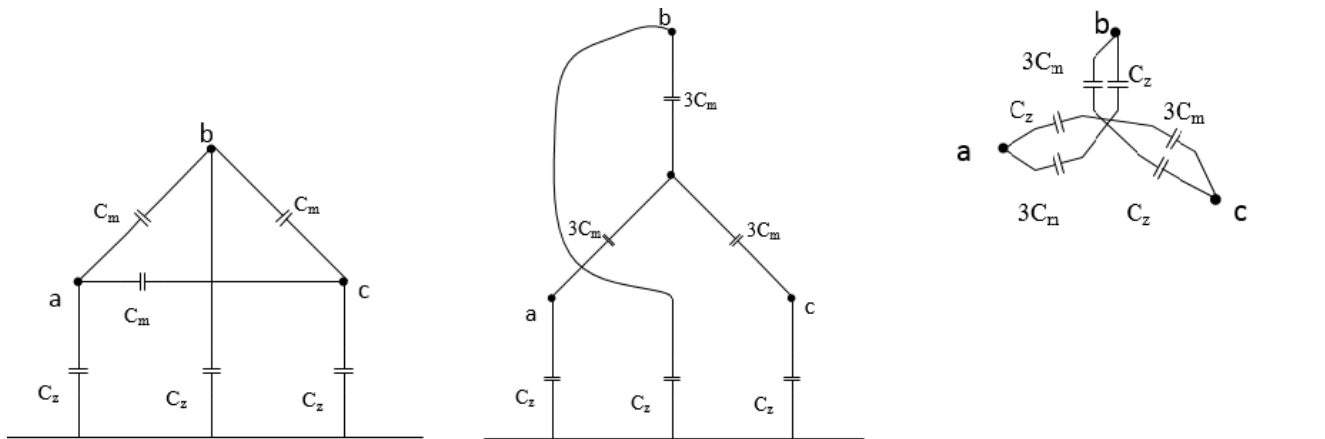


Sl.3.8. Metoda zrcaljenja



Sl.3.9. Vodiči trofaznog voda i njegova slika [3]

U nastavku rada na Slici 3.10. prikazana je ovisnost između pogonskog, dozemnog i međusobnog kapaciteta, gdje je simetrični trokut sa međusobnim kapacitetima  $C_m$  pretvoren u zvijezdu, tako da se na svaku fazu nadoveže jedan krak zvijezde kapaciteta  $3C_m$ .



### Sl.3.10. Prikaz ovisnosti pogonskog, dozemnog i međusobnog kapaciteta trofaznog simetričnog voda

Pogonski kapacitet tj. kapacitet direktnog redoslijeda vodiča  $a$  dobivamo kao omjer naboja direktnog redoslijeda  $\bar{Q}_{a_1}$  i potencijala direktnog redoslijeda  $\bar{V}_{a_1}$ :

$$C_{a_1} = \frac{\bar{Q}_{a_1}}{\bar{V}_{a_1}} = k_{aa} + k_{ab} \quad (3-46)$$

gdje su  $k_{aa} = C_{az} + C_{ab}$ , a  $k_{ab} = C_{ab}$  iz čega slijedi:

$$C_{a_1} = C_{az} + 2C_{ab} \quad (3-47)$$

Pri uvažavanju da je  $k_{ab} = k_{ba}$ , odnosno  $C_{ab} = C_{ba}$  dobijemo pogonski kapacitet vodiča  $b$ :

$$C_{b_1} = k_{bb} + k_{ab} = C_{bz} + 2C_{ab} \quad (3-48)$$

Na kraju dobivamo formulu za izračunavanje pogonskog kapaciteta vodiča  $a$  i  $b$ :

$$C_{a_1} = \frac{\ln \frac{2h_b}{r} + \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \ln \frac{2h_a}{r} \cdot \ln \frac{2h_b}{r} - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} \quad [\text{F/m}] \quad (3-49)$$

$$C_{b_1} = \frac{\ln \frac{2h_a}{r} + \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \ln \frac{2h_a}{r} \cdot \ln \frac{2h_b}{r} - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} \quad [\text{F/m}] \quad (3-50)$$

S obzirom na to da je  $C_{ab} = k_{ab}$  međusobni kapacitet vodiča možemo izračunati iz sljedećeg izraza:

$$C_{ab} = k_{ab} = \frac{\ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \ln \frac{2h_a}{r} \cdot \ln \frac{2h_b}{r} - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} \quad [\text{F/m}] \quad (3-51)$$

Dozemni kapacitet vodiča  $a$  i  $b$  se dobiva iz izraza:

$$C_{az} = k_{aa} - k_{ab} = \frac{\ln \frac{2h_b}{r} - \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \ln \frac{2h_a}{r} \cdot \ln \frac{2h_b}{r} - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} \quad [\text{F/m}] \quad (3-52)$$

$$C_{bz} = k_{bb} - k_{ab} = \frac{\ln \frac{2h_a}{r} - \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \ln \frac{2h_a}{r} \cdot \ln \frac{2h_b}{r} - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} \quad [\text{F/m}] \quad (3-53)$$

Ako su  $h_a = h_b = h$  tada promatramo simetrični slučaj tada nazivnik izraza (3-51) možemo opisati kao razliku kvadrata članova, odnosno kao njezin na faktore rastavljeni oblik. U tom slučaju pogonski kapacitet vodiča  $a$  i  $b$  je jednak i dobiva se prema sljedećem izrazu:

$$C_1 = C_{a_1} = C_{b_1} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{2hD_{ab}}{rD_{a'b}}} \quad [\text{F/m}] \quad (3-54)$$

Na sličan dobijemo i jednake dozemne kapacitete  $C_z$  i međusobni kapacitet  $C_m = C_{ab}$  dvaju simetrično postavljenih vodiča jednofaznog voda:

$$C_z = C_{az} = C_{bz} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{2h D_{a'b}}{r D_{ab}}} [F/m] \quad (3-55)$$

$$C_m = C_{ab} = \frac{\ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}}}{18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \left( \ln \frac{2h}{r} \right)^2 - \left( \ln \frac{D_{a'b}}{D_{ab}} \right)^2 \right]} [F/m] \quad (3-56)$$

Ovisnost između pogonskog, dozemnog i međusobnog kapaciteta za ovaj simetrični slučaj glasi:

$$C_1 = C_z + 2C_m \quad (3-57)$$

Za trofazni vod dobijemo vezu između direktnog, dozemnog i međusobnog uzimajući u obzir praktične prilike:

$$C_1 = C_z + 3C_m \quad (3-58)$$

Za trofazni vod bez zaštitnog užeta pogonski kapacitet po jedinici duljine vodiča:

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2h_{sr} \cdot MSGU}{SGR \cdot X_{sr}}} [\mu F / km] \quad (3-59)$$

gdje je :

$$MSGU = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{AC}} \quad (3-60)$$

$h_{sr}$  je srednja geomterijska udaljenost vodiča prema zemlji, a formula glasi:

$$h_{sr} = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3} \quad (3-61)$$

SGR je srednji geometrijski radijus,  $X_{sr}$  je srednje geometrijsko rastojanje između faznih vodiča i odgovarajućih likova dobivenih metodom zrcaljenja.

$$X_{sr} = \sqrt[3]{D_{AB'} D_{AC'} D_{BC'}} \quad (3-62)$$



### **3.8. Indukcija magnetskog polja**

Magnetska polja prijenosnih vodova imaju određeni utjecaj na predmete koji se nalaze u blizini voda. Magnetska polja, izazvana prolaskom struje kroz vod, inducira napon u u predmetu koji je dovoljno dugo paralelan vodu, kao što su na primjer ograde, cjevovodi i telefonske žice.

Magnetsko polje je utjecano od prisustva povratnih struja kroz zemlju. Carson je predstavio jednadžbu za računanje međusobnog otpora i induktiviteta koje su funkcije zemljine otpornosti. Za uravnotežene trofazne vodove, povratna struja kroz zemlju je nula. Pod normalnim radnim uvjetima, magnetsko polje u blizini uravnoteženog trofaznog voda može se izračunati uzimajući u obzir struje koje prolaze kroz vodiče, a zanemarujući struje kroz zemlju.

Istraživanja su ustvrdila da magnetska polja utječu na sastav krvi, rast, ponašanje, imunološki sustav i živčani sustav. Postoje određene brige u vezi biološkog utjecaja elektromagnetskog i elektrostatskog polja na ljude. Dugotrajne posljedice predmet su nekoliko istraživanja u svijetu [6].

### **3.9. Elektrostatska indukcija**

Električno polje prijenosnog voda utječe na predmete u blizini voda. Električno polje stvoreno visokonaponskim vodovima inducira struju u predmetima koje se nalaze u prostoru električnog polja. Većim naponima povećavaju se i posljedice električnog polja. Električna polja, uzrokovana naponom voda, glavni su uzrok indukcije na vozilima, zgradama i objektima slične veličine. Ljudsko tijelo izloženo je posljedicama električnih pražnjenja nabijenih objekata u blizini voda. To mogu biti stalne struje ili iskrenja. Gustoća struje u ljudskom tijelu koja se inducira električnim poljem može biti puno veća od one inducirane magnetskim poljem.

Rezultantno električno polje u blizini prijenosnog voda može se dobiti predstavljanjem zemljinog efekta prividnim nabojima smještenim ispod vodiča na dubinu jednaku visini vodiča [6].

### 3.10. Korona

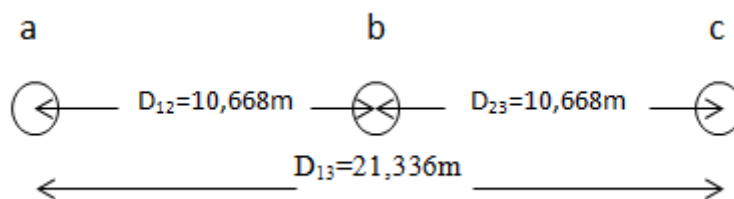
Kada gradijent potencijala površine vodiča postigne vrijednost veću od dielektrične čvrstoće okolnog zraka, dolazi do ionizacije u okolnom prostoru površine vodiča. Ova djelomična ionizacija naziva se korona. Dielektrična čvrstoća zraka za vrijeme normalnim atmosferskih prilika (25°C i 76 cm žive) je oko 30 kV/cm.

Korona uzrokuje gubitke snage, čujni pišteći zvuk u blizini voda, ozon te radio i telefonske smetnje. Čujni zvuk je problem za okoliš i događa se kad je loše vrijeme. Radio smetnje se događaju u elektromagnetskom spektru. Kiša i snijeg mogu stvoriti televizijske smetnje u područjima gdje je signal slab. Korona ovisi o promjeru vodiča, konfiguraciji voda, vrsti vodiča i uvjetima površine vodiča. Atmosferski uvjeti, kao što su gustoća zraka, vlažnost i vjetar utječu na stvaranje korone. Gubici zbog korone za vrijeme kiše i snijega su puno veći nego za lijepog vremena. Na površini vodiča, nepravilnost, kao što je kontaminirajuća čestica, izazivaju gradijent napona koji može postati izvor pražnjenja. Također, izolatori su kontaminirani prašinom i naslagama kemikalija koje smanjuju razorni napon i povećavaju gubitke zbog korone. Izolatori se zato često čiste da bi se smanjili razmjeri tog problema. Korona se može smanjiti povećanjem veličine vodiča i prepletanjem vodiča [6].

### 3.11. Primjeri izračuna kapaciteta

Za ilustraciju navedenog proračuna pogonskog kapaciteta, prikazana su dva primjera preuzeta iz literature Power System Analysis [6]. Primjeri predstavljaju 500 kV trofazni vod karakterističan za SAD, gdje je razlika u primjerima što je zamijenjen vodič i promatran je utjecaj toga na konačan rezultat kapaciteta.

Primjer 1. 500 kV trofazni transponirani vod sastoji se od jednog ACSR 6.445 mm<sup>2</sup>, 45/7 Bittern vodič po fazi sa vodoravnom konfiguracijom vodiča kako je prikazano na Slici 3.11. Vodiči su promjera 3,416 cm. Potrebno je izračunati kapacitet po fazi po kilometru voda [preuzeto iz literature Power System Analysis, u pitanju je američka, te je ovo primjer za njihove standardne dalekovode].



Sl.3.11. Raspored vodiča za Primjer 1.

$$d = 3.416 \text{ cm}$$

Radijus vodiča je  $r = \frac{3.416}{2} = 1.708 \text{ cm}$ , MSGU se dobiva koristeći formulu:

$$MSGU = \sqrt[3]{10.668 \cdot 10.668 \cdot 21.336} = 13.44 \text{ m}$$

Koristeći (3-35) dobivamo kapacitet po fazi:

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{13.44}{0.01708}} = 0.0083 \mu F / km$$

Primjer 2. Vod iz Primjera 1. zamijenjen je sa dva ACSR  $3.223 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$  24/7 Rook vodičima koji imaju jednak presjek aluminija kao i Bittern vodič. Razmak između vodiča, mjeren od sredine prepleta je jednak kao i prije i prikazan je na Slici 3.11. Promjer vodiča je 2.482 cm. Razmak prepleta je 45.72 cm. Potrebno je izračunati kapacitet po fazi po kilometru voda [6].

$$D = 2.482 \text{ cm}$$

$$d = 45.72 \text{ cm}$$

Radijus vodiča je  $r = \frac{2.482}{2} = 1.241 \text{ cm}$ , i iz Primjera 1  $MSGU = 13.44 \text{ m}$ . Ekvivalentni geometrički radijus sa dva vodiča po prepletu, za računanje kapaciteta dobivamo pomoću formule:

$$SGR_c = \sqrt{d \cdot r} = \sqrt{45.72 \cdot 1.241} = 7.53 \text{ cm}$$

Kapacitet po fazi iznosi:

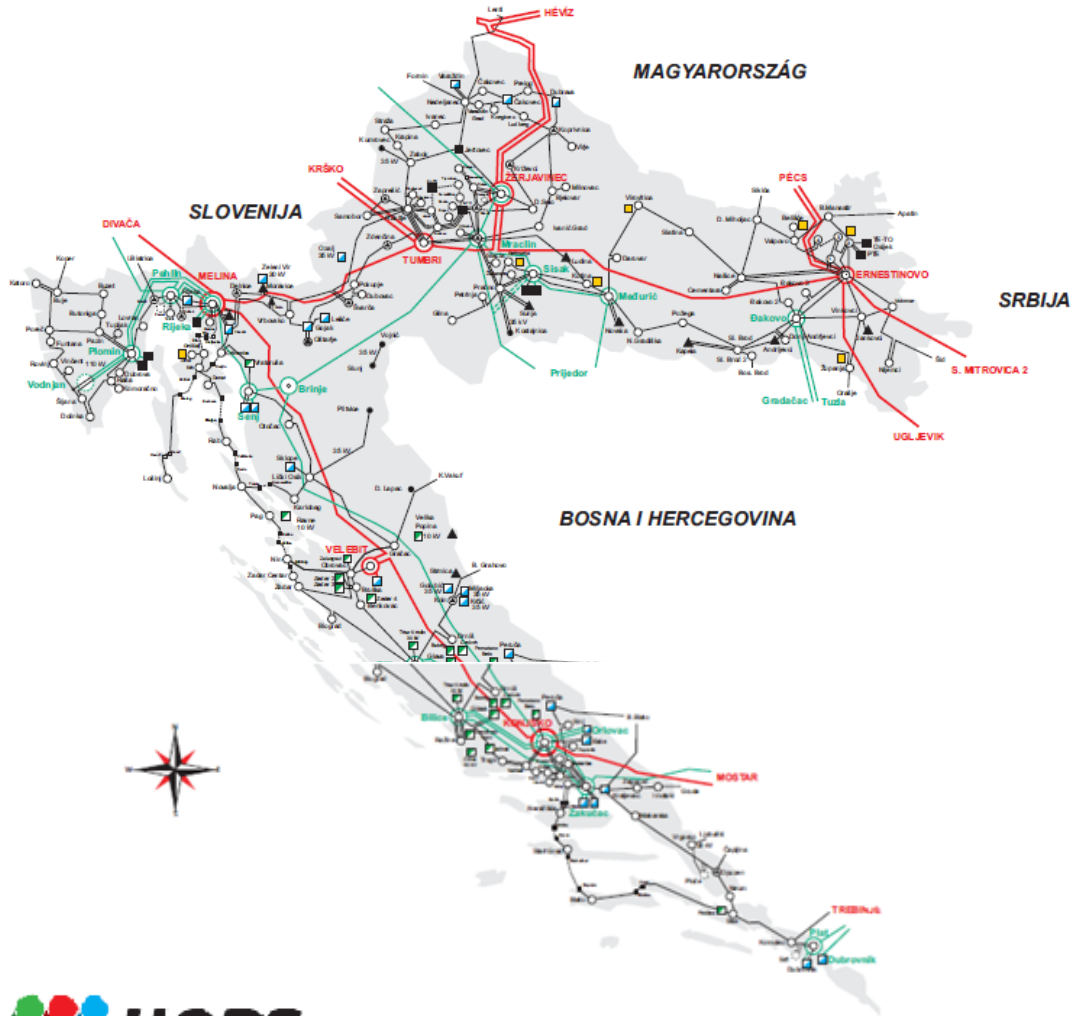
$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{13.44}{0.0753}} = 0.0107 \mu F / km$$

### 3.12 Primjeri proračuna jediničnog pogonskog kapaciteta

U nastavku rada obrađeni su primjeri za proračun jediničnog pogonskog kapaciteta za trofazne prijenosne vodove različitih naponskih nivoa. U proračunu je pogonski kapacitet izračunat tako da je uzet u obzir utjecaj i zemlje i međusobni utjecaj faza, a zanemaren utjecaj zaštitnog užeta. Zadana su tri primjera koja su najprije riješena “ručno“, a potom u računalnom programu MATLAB. U Hrvatskom elektroenergetskom sustavu i prijenosnoj mreži naponski nazivni nivoi su 110, 220 i 400-kV. Za primjere u ovom radu uzet će se karakterističan tip stupa za svaki prijenosni dalekovod. U ovom završnom radu izvršeni su proračuni jediničnog pogonskog kapaciteta za tri karakteristična stupa za naše naponske nivoe korištene u Republici Hrvatskoj. U prvom primjeru izračunat je kapacitet za 110-kV vod tipa “jela“ kao što je primjer za vod Županja-Orašje, zatim u drugom primjeru kapacitet za 220-kV vod tipa “portal“ kao što je primjer za vod Đakovo-Tuzla i u trećem primjeru izračunat kapacitet za 400-kV vod Ernestinovo-Pečuh gdje je potrebno napomenuti da je korišten vod karakterističan za Mađarsku, a svi ovi podaci o elektroenergetskom sustavu u Republici Hrvatskoj su vidljivi na Slici 3.12.



# HRVATSKA PRIJENOSNA MREŽA



### Legenda:

- |                                 |                      |                          |
|---------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 400 kV dvostrani nadzemni vod   | 800 / 220 / 110 kV   | EVP                      |
| 400 kV jednostrani vod          | 110 / 110 kV         | TE                       |
| 220 kV dvostrani nadzemni vod   | 220 / 110 kV         | Hc                       |
| 220 kV jednostrani nadzemni vod | 110 / 220 kV         | LF                       |
| 220 kV planinski vod            | 220 / > kV u laganoj | Industrijska postrojenja |
| 220 kV nadzemni vod             | 110 / 110 kV         | Kabelska križnica        |
| 110 kV nadzemni vod             | 110 / 110 kV         | Kabinice za opterećenje  |
| 110 kV dvostrani nadzemni vod   | 110 / 110 kV         |                          |
| 110 kV kabel                    | 110 / 110 kV         |                          |
| 110 kV jednostrani vod          | 110 / 110 kV         |                          |
| 110 kV jednostrani vod          | 110 / 110 kV         |                          |

Studeni, 2015.

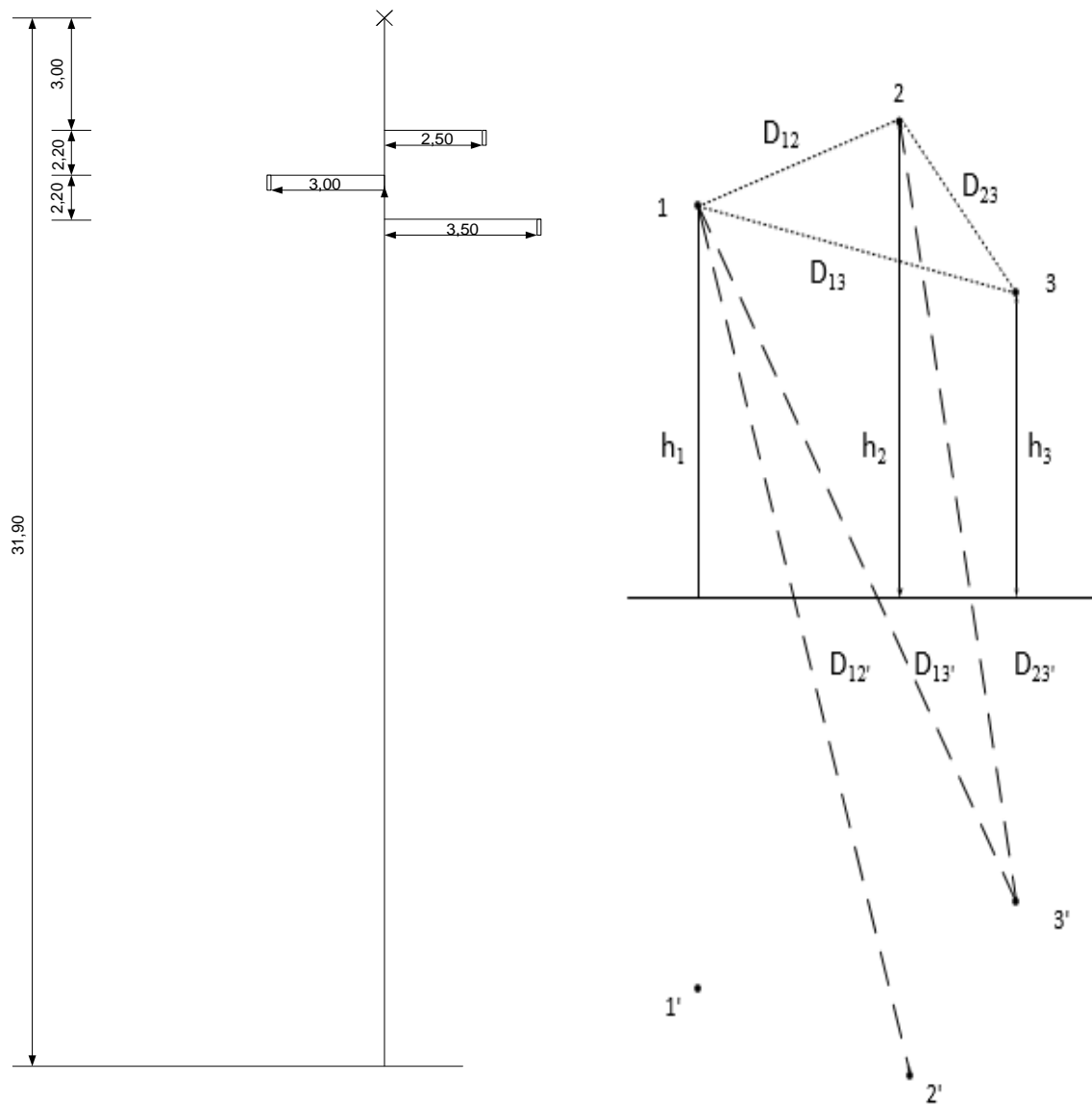
Slika 3.12. Shema prijenosnog sustava Republike Hrvatske [7]

Primjer 1. Zadan je 110-kV trofazni nadzemni vod čija je trasa izgrađena od čelično-rešetkastih stupova tipa "jela" kao što je to prikazano na Slici 3.14. Dimenzije stupa i udaljenosti su naznačene na Slici 3.14., te je vod prepleten. Vodiči su izrađeni od Al/Če užeta presjeka  $240/40 \text{ mm}^2$ , a u snopu se nalazi jedan vodič. Potrebno je odrediti jedinični pogonski kapacitet nadzemnog voda.

Primjer jednog 110-kV trofaznog dalekovoda tipa "jela" prikazan je na Slici 3.13:



Slika 3.13 Prikaz 110-kV trofaznog dalekovoda Županja-Orašje



Slika 3.14. Dimenzije nadzemnog voda tipa "jela"

a)

$$S_{Al/\check{C}e} = 240 / 40 \text{ mm}^2$$

$$S_{u\check{z}eta} = S_{Al} + S_{\check{C}e} = 240 + 40 = 280 \text{ mm}^2$$

$$S = r^2 \cdot \pi \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{280}{\pi}} = 9.44 \text{ mm}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2h_{sr} \cdot MSGU}{SGR \cdot X_{sr}}} \text{ [\mu F / km]}$$

Iz zadane formule najprije potrebno odrediti  $h_{sr}$  koja predstavlja srednju geometrijsku udaljenost vodiča prema zemlji.

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

Sa Slike 3.14. možemo odrediti:

$$h_1 = 31.9 - 3 - 2.2 = 26.7 \text{ m}$$

$$h_2 = 31.9 - 3 = 28.9 \text{ m}$$

$$h_3 = 31.9 - 3 - 2.2 - 2.2 = 24.5 \text{ m}$$

$$h_{sr} = \sqrt[3]{26.7 \cdot 28.9 \cdot 24.5} = 26.64 \text{ m}$$

Zatim je potrebno odrediti MSGU-međusobnu srednju geometrijsku udaljenost između vodiča nadzemnog voda:

$$MSGU = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$$

$$D_{12} = \sqrt{(3 + 2.5)^2 + 2.2^2} = 5.92 \text{ m}$$

$$D_{23} = \sqrt{1^2 + (2.2 + 2.2)^2} = 4.51 \text{ m}$$

$$D_{13} = \sqrt{(3 + 3.5)^2 + 2.2^2} = 6.86 \text{ m}$$

$$MSGU = \sqrt[3]{5.92 \cdot 4.51 \cdot 6.86} = 5.68 \text{ m}$$

SGR predstavlja srednji geometrijski radijus vodiča nadzemnog vodiča:

$$SGR = r = 9.44 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



$X_{sr}$  predstavlja srednje geometrijsko rastojanje između faznih vodiča i odgovarajućih likova dobivenih metodom zrcaljenja.

$$X_{sr} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{13'} \cdot D_{23'}}$$

$$D_{12'} = \sqrt{(28.9 + 26.7)^2 + (3 + 2.5)^2} = 55.87 \text{ m}$$

$$D_{13'} = \sqrt{(24.5 + 26.7)^2 + (3 + 3.5)^2} = 51.61 \text{ m}$$

$$D_{23'} = \sqrt{(28.9 + 24.5)^2 + 1^2} = 53.41 \text{ m}$$

$$X_{sr} = \sqrt[3]{55.87 \cdot 51.67 \cdot 53.41} = 53.62 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2 \cdot 26.64 \cdot 5.68}{0.00944 \cdot 53.62}} = 8.70 \text{ [nF / km]}$$

b) Rješenje pomoću računalnog programa MATLAB:

>> Kapacitet

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 2: 5.92

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i 3: 4.51

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 3: 6.86

Međusobna srednja geometrijska udaljenost između vodiča je: 5.68

Unesite rastojanje u metrima vodiča 1 prema zemlji: 26.7

Unesite rastojanje u metrima vodiča 2 prema zemlji: 28.9

Unesite rastojanje u metrima vodiča 3 prema zemlji: 24.5

Srednja geometrijska udaljenost vodiča prema zemlji je: 26.64

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 2 dobivenog zrcaljenjem: 55.68

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 51.61

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 53.41

Srednje geometrijsko rastojanje vodiča prema odgovarajućim likovima je: 53.54

Unesite broj vodiča u snopu: 1

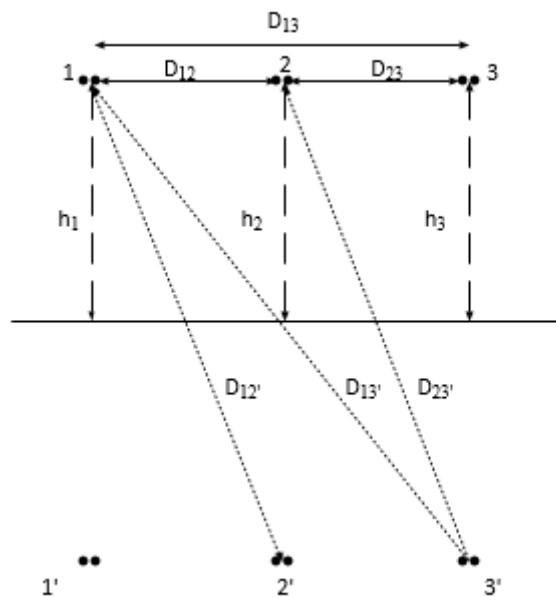
Unesite polumjer jednog vodiča u metrima: 0.00944

Srednji geomtrijski radijus je: 0.0094

Pogonski kapacitet nadzemnog voda iznosi:

$C = 8.6879 \text{ nF/km}$

Primjer 2. Zadan je 220-kV trofazni nadzemni vod čija je trasa izgrađena od čelično-rešetkastih stupova tipa "portal" kao što je prikazano na Slici 3.17. Dimenzije stupa i udaljenosti naznačene su na Slici 3.17. i vod je prepleten. Vodiči su izrađeni od Al/Če užeta presjeka  $360/57 \text{ mm}^2$ , a u snopu se nalaze dva vodiča razmaka 22 cm. Potrebno je odrediti jedinični pogonski kapacitet nadzemnog voda.

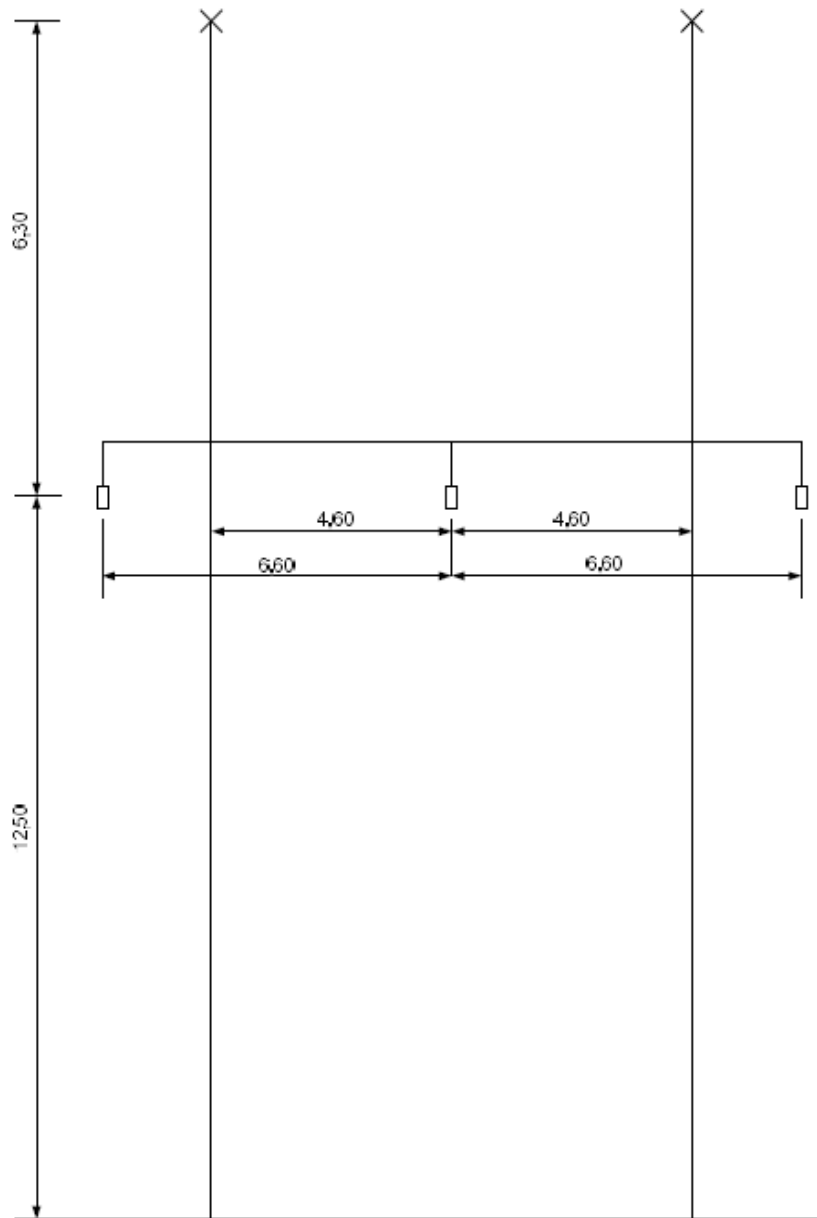


Slika 3.15. Oznake dimenzija za proračun

Primjer jednog 220-kV trofaznog dalekovoda tipa "portal" prikazan je na Slici 3.16.:



Slika 3.16. Prikaz 220-kV trofaznog dalekovoda Đakovo-Tuzla



Slika 3.17. Dimenzije nadzemnog voda tipa "portal"

a)

$$a_s = 0.22 \text{ m}$$

$$S_{Al/\check{C}e} = 360/57 \text{ mm}^2$$

$$S_{u\check{z}eta} = S_{Al} + S_{\check{C}e} = 360 + 57 = 417 \text{ mm}^2$$

$$S = r^2 \cdot \pi \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{417}{\pi}} = 11.52 \text{ mm}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2h_{sr} \cdot MSGU}{SGR \cdot X_{sr}}} \text{ [\mu F / km]}$$

Iz zadane formule najprije potrebno odrediti  $h_{sr}$ :

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

$$h_1 = h_2 = h_3 = h_{sr} = 12.5 \text{ m}$$

MSGU određuje na sljedeći način pomoću Slike 3.15.:

$$MSGU = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$$

$$D_{12} = 6.6 \text{ m}$$

$$D_{23} = 6.6 \text{ m}$$

$$D_{13} = 13.2 \text{ m}$$

$$MSGU = \sqrt[3]{6.6 \cdot 6.6 \cdot 13.2} = 8.32 \text{ m}$$

Opća formula za izračunavanje SGR-a:

$$SGR = \sqrt[n]{r \cdot a_s^{n-1}}$$

S obzirom da u ovom primjeru u snopu se nalaze 2 vodiča onda se dobije sljedeća formula:

$$n = 2$$

$$SGR = \sqrt{r \cdot a_s}$$

$$SGR = \sqrt{0.0115 \cdot 0.22} = 0.0503 \text{ m}$$

Potrebno je još odrediti  $X_{sr}$ :

$$X_{sr} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{13'} \cdot D_{23'}}$$

$$D_{12'} = \sqrt{(12.5 + 12.5)^2 + 6.6^2} = 25.86 \text{ m}$$

$$D_{13'} = \sqrt{(12.5 + 12.5)^2 + 13.2^2} = 28.27 \text{ m}$$

$$D_{23'} = \sqrt{(12.5 + 12.5)^2 + 6.6^2} = 25.86 \text{ m}$$

$$X_{sr} = \sqrt[3]{25.86 \cdot 28.27 \cdot 25.86} = 26.64 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2 \cdot 12.5 \cdot 8.32}{0.0503 \cdot 26.64}} = 11.02 \text{ [nF / km]}$$

b) Rješenje pomoću računalnog programa MATLAB:

>> Kapacitet

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 2: 6.6

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i 3: 6.6

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 3: 13.2

Međusobna srednja geometrijska udaljenost između vodiča je: 8.32

Unesite rastojanje u metrima vodiča 1 prema zemlji: 12.5

Unesite rastojanje u metrima vodiča 2 prema zemlji: 12.5

Unesite rastojanje u metrima vodiča 3 prema zemlji: 12.5

Srednja geometrijska udaljenost vodiča prema zemlji je: 12.50

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 2 dobivenog zrcaljenjem: 25.86

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 28.27

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 25.86

Srednje geometrijsko rastojanje vodiča prema odgovarajućim likovima je: 26.64

Unesite broj vodiča u snopu: 2

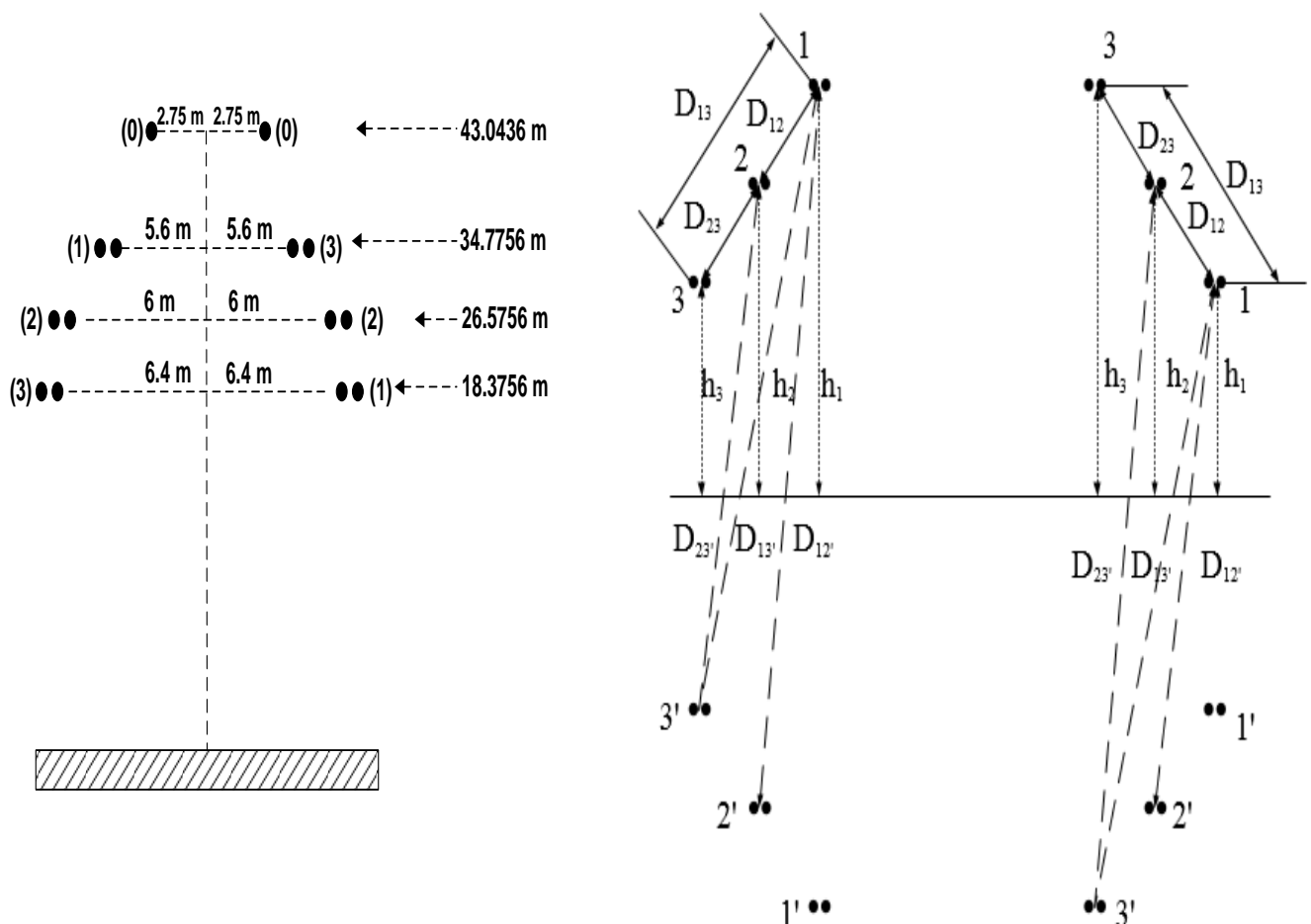
Unesite polumjer jednog vodiča u metrima: 0.0115

Unesite razmak u metrima između vodiča: 0.22

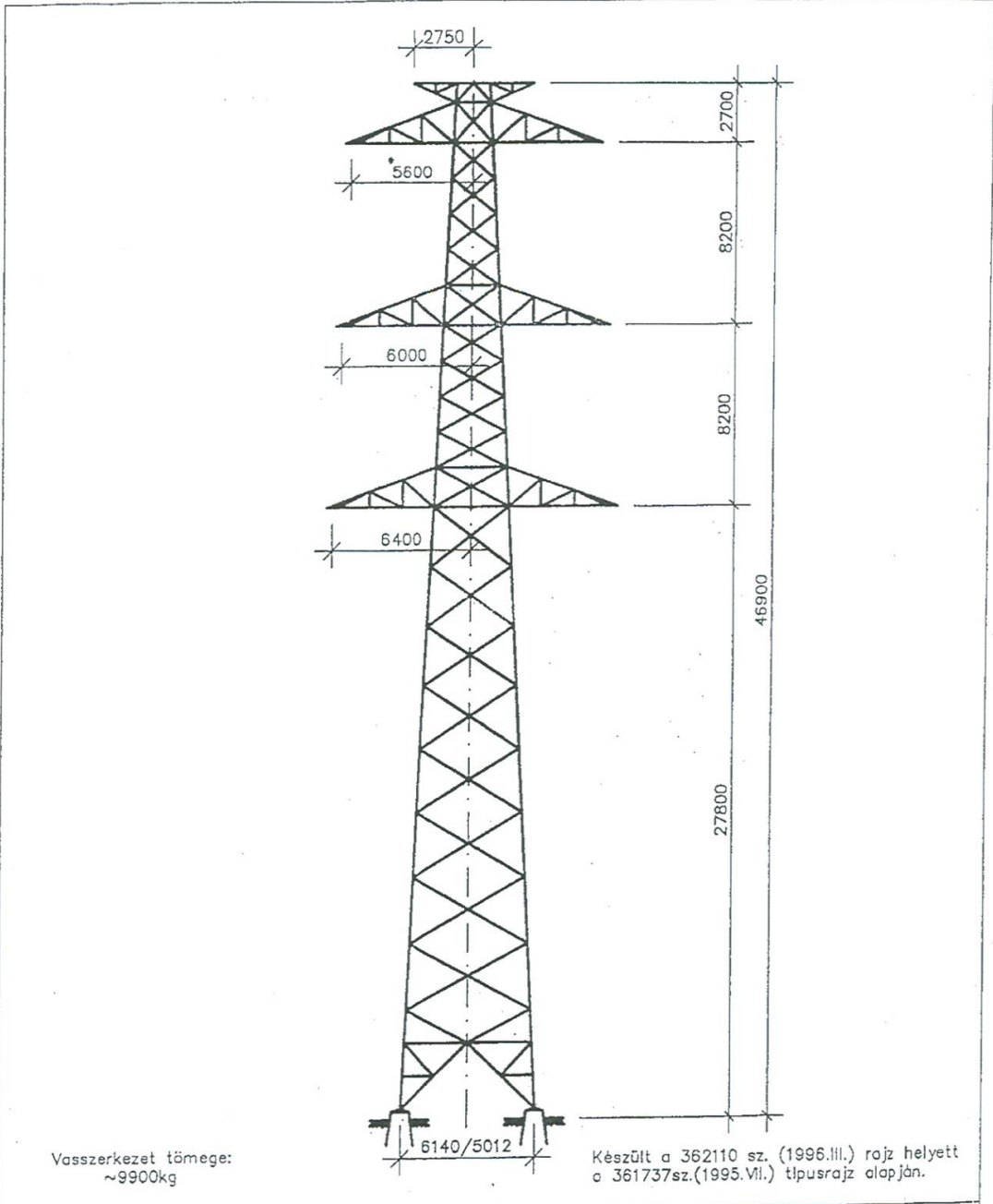
Srednji geometrijski radijus je: 0.0503

Pogonski kapacitet nadzemnog voda iznosi:  $C=11.0135$  nF/km

Primjer 3. Zadan je 400-kV trofazni nadzemni vod čija je trasa izgrađena od čelično-rešetkastih stupova tipa “trapez“ kao što je prikazano na Slici 3.18. Dimenzije stupa i udaljenosti naznačene su na Slici 3.18. i vod je prepleten. Presjek vodiča ACSR iznosi  $500/65$  mm<sup>2</sup>, a u snopu se nalaze dva vodiča razmaka 40 cm. Zadan je i promjer vodiča koji iznosi 31.05 mm. Prosječni provjes faznih vodiča iznosi 8.96 m i uračunat je na Slici 3.16. Potrebno je odrediti jedinični pogonski kapacitet nadzemnog voda. Primjer jednog 400-kV trofaznog dalekovoda tipa “trapez“ prikazan je na Slici 3.19., navedeni primjer je za dalekovod Ernestinovo-Pečuh za mađarsku stranu, te izgleda kako je prikazano na slici. U Hrvatskoj se na granici od Mađarske do Ernestinova koristi drugi oblik sa drugim dimenzijama.



Slika 3.18. Dimenzije nadzemnog voda tipa “trapez“



Vasszerkezet tömege:  
~9900kg

Készült a 362110 sz. (1996.III.) rajz helyett  
a 361737sz.(1995.VII.) típusrajz alapján.

|  |              |                    |  |           |           |
|--|--------------|--------------------|--|-----------|-----------|
| <h2 style="margin: 0;">FENYŐ 400kV</h2> <h3 style="margin: 0;">OT+0 tartóoszlop</h3> |              |                    | <p style="font-size: small;">Energetikai Tervező és Vállalkozó<br/>Részvénytársaság</p> <p style="font-size: small;">Tervezeték Iroda<br/>BUDAPEST</p> |           |           |
| Statikus   | Iványi E.    | <i>[Signature]</i> | Méretarány:  | Rajzszám: | Lapok sz. |
| Ellenőr  | Cserhalmi M. | <i>[Signature]</i> | 1: 250   | 362460    | 1         |
| Szakágvez.   | Wéber Gy.    | <i>[Signature]</i> | Lapméret:  | Változás: | 1.        |
|  |              |                    | A4   |           | sz. lap   |
|  |              |                    | Dátum: 1996. X.  |           |           |

Slika 3.19. Prikaz 400-kV trofaznog dalekovoda tipa "trapez"



a)

$$a_s = 0.40 \text{ m}$$

$$S_{\text{ACSR}} = 500 / 65 \text{ mm}^2$$

$$d = 31.05 \text{ mm} \Rightarrow r = \frac{31.05}{2} = 15.53 \text{ mm}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2h_{\text{sr}} \cdot \text{MSGU}}{\text{SGR} \cdot X_{\text{sr}}}} \text{ [\mu F / km]}$$

Najprije je izračunat  $h_{\text{sr}}$ :

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

$$h_1 = 34.7756 \text{ m}$$

$$h_2 = 26.5756 \text{ m}$$

$$h_3 = 18.3756 \text{ m}$$

$$h_{\text{sr}} = \sqrt[3]{34.7756 \cdot 26.5756 \cdot 18.3756} = 25.70 \text{ m}$$

Da bi odredili MSGU najprije je potrebno naći udaljenosti između vodiča:

$$\text{MSGU} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$$

$$D_{12} = \sqrt{(34.7756 - 26.5756)^2 + 0.4^2} = 8.21 \text{ m}$$

$$D_{23} = \sqrt{(26.5756 - 18.5637)^2 + 0.4^2} = 8.21 \text{ m}$$

$$D_{13} = \sqrt{(34.7756 - 18.3756)^2 + 0.8^2} = 16.42 \text{ m}$$

$$\text{MSGU} = \sqrt[3]{8.21 \cdot 16.42 \cdot 8.21} = 10.34 \text{ m}$$

Formula za određivanje SGR-a:

$$\text{SGR} = \sqrt[n]{r \cdot a_s^{n-1}}$$

Broj vodiča u snopu je 2, stoga formula poprima sljedeći oblik:

$$n = 2$$

$$\text{SGR} = \sqrt{r \cdot a_s}$$

$$\text{SGR} = \sqrt{0.01553 \cdot 0.40} = 0.0788 \text{ m}$$

Za određivanje pogonskog jediničnog kapaciteta potrebno i  $X_{\text{sr}}$ :

$$X_{sr} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{13'} \cdot D_{23'}}$$

$$D_{12'} = \sqrt{(34.7756 + 26.5756)^2 + 0.4^2} = 61.35 \text{ m}$$

$$D_{13'} = \sqrt{(34.7756 + 18.3756)^2 + 0.8^2} = 53.16 \text{ m}$$

$$D_{23'} = \sqrt{(26.5756 + 18.3756)^2 + 0.4^2} = 44.95 \text{ m}$$

$$X_{sr} = \sqrt[3]{61.35 \cdot 53.16 \cdot 44.95} = 52.73 \text{ m}$$

$$C_1 = \frac{0.0556}{\ln \frac{2 \cdot 25.7 \cdot 10.34}{0.0788 \cdot 52.73}} = 11.46 \text{ nF / km}$$

Dobiveni jedinični pogonski kapacitet odnosi se na lijevi vod dalekovoda sa Slike 3.18., a jedinični pogonski kapacitet desnog voda jednak je lijevom, pošto se radi o istim karakteristikama vodiča i jednakim visinama i međusobnim udaljenostima vodiča.

b) Rješenje pomoću računalnog programa MATLAB:

>> Kapacitet

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 2: 8.21

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i 3: 16.42

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 3: 8.21

Međusobna srednja geometrijska udaljenost između vodiča je: 10.34

Unesite rastojanje u metrima vodiča 1 prema zemlji: 34.7756

Unesite rastojanje u metrima vodiča 2 prema zemlji: 26.5756

Unesite rastojanje u metrima vodiča 3 prema zemlji: 18.3756

Srednja geometrijska udaljenost vodiča prema zemlji je: 25.70

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 2 dobivenog zrcaljenjem: 61.35

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 53.16

Unesite rastojanje u metrima između vodiča 2 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: 44.95

Srednje geometrijsko rastojanje vodiča prema odgovarajućim likovima je: 52.73

Unesite broj vodiča u snopu: 2

Unesite polumjer jednog vodiča u metrima: 0.01553

Unesite razmak u metrima između vodiča: 0.4

Srednji geometrijski radijus je: 0.0788

Pogonski kapacitet nadzemnog voda iznosi:

$C=11.4509 \text{ nF/km}$

Iz sva tri riješena primjera je vidljivo da se rezultati u računanju pogonske kapacitivnosti nadzemnog voda poklapaju pri "ručnom" izračunu i izračunu pomoću računalnog programa MATLAB. Izračun u MATLAB-u je vršen pomoću skripte Kapacitet.m koja je se nalazi u Prilogu 1.

#### **4. ZAKLJUČAK**

U ovom završnom radu obrađeni su elektroenergetski vodovi i njihovi karakteristični parametri s posebnim osvrtom na jedinični pogonski kapacitet dalekovoda. Utjecaj jediničnog kapaciteta na dalekovod teoretski je obrađen u više podpoglavljja, gdje se najprije govorilo o utjecaju kapaciteta na jednofazne vodove, a zatim na trofazne vodove. Jedinični pogonski kapacitet se sastoji od međusobnog i dozemnog kapaciteta gdje je u obzir uzet najprije međusobni, a zatim i utjecaj dozemnog kapaciteta na ukupni pogonski kapacitet. Također u radu je obrađen i pojam prepleta nadzemnog voda i njegov utjecaj na izračun nadzemnog voda. Drugi zadatak završnog rada je bio proračun jediničnog kapaciteta na dalekovodu pomoću računalnog programa MATLAB-a. Najprije je riješeno par primjera izračuna kapaciteta, a potom su riješena 3 primjera za proračun jediničnog pogonskog kapaciteta stvarnih dalekovoda koji se koriste u Republici Hrvatskoj različitih naponskih nivoa, iz čega je vidljivo da se rezultati izračuna pogonskog kapaciteta podudaraju u oba načina izračuna i putem računalnog programa i ručnog načina izračuna. Iz obrađenih primjera može se zaključiti da je pogonski kapacitet nadzemnog voda veći ukoliko je naponski nivo nadzemnog voda veći i ako je broj vodiča u snopu veći.

## LITERATURA

- [1] Šaina, G.: Nadomjesni modeli vodova, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2015.
- [2] Ožegović, M., Ožegović, K.: Električne energetske mreže I. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Split, 1996.
- [3] Radović, J., Visokonaponske mreže i vodovi – predavanje (19.07.2016.)
- [4] Brkić, N.: Mehanički proračun vodiča, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2015.
- [5] Jozsa, L.: Parametri nadzemnih vodova, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2006.
- [6] Saadat, H.: Power System Analysis. WCB McGraw-Hill, New York, 1999.
- [7] Slika 3.12. preuzeta sa internet stranice Hrvatskog operatora prijenosnog sustava d.o.o. <http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web> (14.9.2016.)
- [8] Saadat, H.: Solutions Manual. McGraw-Hill, Inc. Milwaukee School of Engineering, Milwaukee, Wisconsin, 2003.

## SAŽETAK

U ovom završnom radu obrađeni su karakteristični parametri nadzemnih vodova, a posebna pozornost usmjerena je na kapacitet i poprečnu admitanciju nadzemnih vodova. Dan je teorijski opis kapaciteta kao i njegova podjela na međusobni i dozemni kapacitet, te njihov utjecaj na ukupni pogonski kapacitet. Najprije su opisani elektroenergetski vodovi te njihova podjela po više kriterija kao i osnovni elementi nadzemnih vodova. Također je opisana i metoda srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU) koja je korištena za izračun kapaciteta. Na kraju rada obrađeno je par primjera za izračun kapaciteta i tri primjera za proračun koja su riješena u računalnom programu MATLAB.

**Ključne riječi:** elektroenergetski vodovi, parametri nadzemnih vodova, kapacitet, metoda srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU), preplet, proračun jediničnog pogonskog kapaciteta

## ABSTRACT

In this final paper characteristic parameters of overhead power lines are processed, and special attention is focused on capacitance and transverse admittance of overhead power lines. The theoretical description of the capacitance is given so as its classification to mutual capacitance and land capacitance, and their influence to the overall operating capacitance. Firstly power lines and their division by several criteria and basic elements of overhead power lines are described. Also, a method of geometric mean distance (GMD) that was used to calculate capacitance is described. At the end of final paper, examples for calculating the capacitance are processed, and three examples of the calculation that have been resolved in a computer program MATLAB.

**Key words:** power lines, parameters of overhead power lines, capacitance, method of geometric mean distance (GMD), bundling, calculating unit operating capacitance

## ŽIVOTOPIS

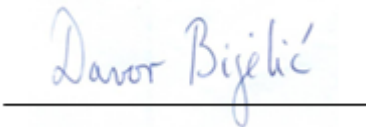
Davor Bijelić rođen je 01. rujna 1994. u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu pohađao je u Orašju u Osnovnoj školi Orašje gdje je završio 8 razreda sa odličnim uspjehom. Nakon završene osnovne škole upisuje Srednju školu fra Martina Nedića u Orašju, smjer opća gimnazija.

Služi se engleskim jezikom, a poznaje i njemački jezik, te se služi računalom i informatički je pismen. Tijekom svog obrazovanja aktivno se bavio tenisom i stolnim tenisom. Poslije završene srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završene prve godine upisuje smjer elektroenergetika, a po završetku prediplomskog studija planira upisati diplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektroenergetski sustavi.

U Osijeku, rujna 2016.

Davor Bijelić

Potpis:



Davor Bijelić

## PRILOZI

Prilog 1. MATLAB scripta Kapacitet.m po kojoj je vršen programski izračun pogonske kapacitivnosti nadzemnih vodova.

```
%Izračun pogonske kapacitivnosti nadzemnog voda sa utjecajem zemlje
%Ulazni podaci
%Izračun MSGU
%Unosite međusobne udaljenosti vodiča
D12=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 2: ');
D23=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 2 i 3: ');
D13=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 1 i 3: ');
MSGU=(D12*D23*D13)^(1/3);
fprintf('Međusobna srednja geometrijska udaljenost između vodiča je: \n %5.2f',MSGU);
%Izračun srednje geometrijske udaljenosti prema zemlji
%Unosite međusobne udaljenosti vodiča prema zemlji
input('\n');
h1=input('Unosite rastojanje u metrima vodiča 1 prema zemlji: ');
h2=input('Unosite rastojanje u metrima vodiča 2 prema zemlji: ');
h3=input('Unosite rastojanje u metrima vodiča 3 prema zemlji: ');
hSR=(h1*h2*h3)^(1/3);
fprintf('Srednja geometrijska udaljenost vodiča prema zemlji je: \n%5.2f',hSR);
%Izračun srednjeg geometrijskog rastojanja između faznih vodiča i odgovarajućih likova
dobivenih metodom zrcaljenja
%Unosite međusobne udaljenosti faznih vodiča i odgovarajućih likova
input('\n');
D122=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 2 dobivenog zrcaljenjem: ');
D133=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 1 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: ');
D233=input('Unosite rastojanje u metrima između vodiča 2 i vodiča 3 dobivenog zrcaljenjem: ');
Xsr=(D122*D133*D233)^(1/3);
fprintf('Srednje geometrijsko rastojanje vodiča prema odgovarajućim likovima je: \n%5.2f',Xsr);
%Izračun srednjeg geometrijskog radijusa vodiča
input('\n');
n=input('Unosite broj vodiča u snopu: ');
input('\n');
```



```

r=input('Unesite polumjer jednog vodiča u metrima: ');
if n==1
    SGR=r;
else
input('\n');
as=input('Unesite razmak u metrima između vodiča: ');
    SGR=sqrt(r*as);
end
fprintf('Srednji geometrijski radijus je: \n%6.4f',SGR);
X=Xsr*SGR;
B=MSGU*2*hSR;
A= B/X;
Z=log(A);
C=55.556/Z;
input('\n');
fprintf('Pogonski kapacitet nadzemnog voda iznosi: \nC=%7.4f nF/km',C);
pause
return

```