

# PRORAČUN POPREČNE ADMITANCIJE 400 KV DALEKOVODA

---

Jović, Aleksandar

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*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:200:788722>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*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**

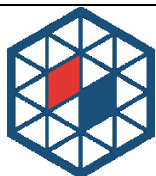
**Sveučilišni studij**

**PRORAČUN POPREČNE ADMITANCIJE 400 KV**  
**DALEKOVODA**

**Završni rad**

**Aleksandar Jović**

**Osijek, 2022.**

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

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

Osijek, 12.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Aleksandar Jović
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4684, 22.07.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	97715704280
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Proračun poprečne admitancije 400 kV dalekovoda
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Na primjeru različitih konfiguracija 400 kV dalekovoda, izvršiti proračun poprečne admitancije (vodljivost i kapacitet) direktnog, inverznog i nultog slijeda. Usporediti i komentirati rezultate. Sumentorica sa FERITa: Ružica Kljajić
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	12.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 21.09.2022.

Ime i prezime studenta:	Aleksandar Jović
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4684, 22.07.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Proračun poprečne admitancije 400 kV dalekovoda**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. 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:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada.....	2
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME.....</b>	<b>3</b>
<b>3. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI .....</b>	<b>5</b>
3.1. Karakteristične veličine voda .....	6
3.2. Kapacitet voda.....	8
3.2.1. Utjecaj zemlje na kapacitet .....	8
3.2.2. Opći izraz za napon.....	9
3.3. Odvod voda .....	10
3.3.1. Odvod zbog kliznih struja.....	11
3.3.2. Odvod zbog korone.....	12
3.4. Kritični napon.....	13
3.5. Gubici korone.....	14
<b>4. POSTUPAK PRORAČUNA POPREČNE ADMITANCIJE.....</b>	<b>16</b>
4.1. Prikupljanje ulaznih podataka .....	16
4.2. Raspored vodiča .....	17
4.3. Matrica potencijalnih koeficijenata .....	18
4.4. Matrica kapacitivnih koeficijenata .....	20
4.5. Matrica simetričnih komponenata .....	21
<b>5. PRIMJER PRORAČUNA POPREČNE ADMITANCIJE ZA 400 kV DALEKOVODE .....</b>	<b>23</b>
5.1. Podaci voda .....	23
5.2. Prva grupa proračuna.....	24
5.2.1. Proračun poprečne admitancije prema zadanim parametrima .....	24
5.2.2. Proračun poprečne admitancije – smanjeni razmaci između faza.....	29
5.2.3. Proračun poprečne admitancije – povećani razmaci između faza.....	32
5.3. Druga grupa proračuna.....	35
5.3.1. Proračun poprečne admitancije – umanjene visine faza .....	35
5.3.2. Proračun poprečne admitancije – uvećane visine faza.....	37
5.4. Usporedba rezultata.....	39
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>41</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>42</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>44</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>45</b>

# 1. UVOD

Prijenosna mreža je dio električne mreže u koji podrazumijevamo vodove i postrojenja nazivnog napona 110 kV ili više. Elektroenergetski vodovi se mogu podijeliti na: nadzemne vodove i kabele. Nadzemni vodovi se na nazivnoj frekvenciji mogu prikazati nadomjesnom  $\pi$ -shemom, koja se sastoji od serijskog spoja djelatnog otpora (R) i induktiviteta voda (L) na uzdužnoj grani (impedancija), a na poprečnoj grani se nalaze paralelno spojeni jedinični odvod (G) i kapacitet voda (C) (admitancija). U završnom radu pozornost će biti usmjerena na kapacitet voda (C), dakle jedinični odvod će biti zanemaren. Naime, u završnome radu napravljeno je pet proračuna poprečne admitancije. Proračuni se razlikuju u koordinatama faza. Prvi proračun je napravljen prema zadanim podacima voda, a zatim u ostalim proračunima se mijenja horizontalna i vertikalna udaljenost faza. Završni rad se sastoji od 6 poglavlja. U drugom poglavlju navedena je i opisana literatura vezano za nadzemne elektroenergetske vodove. U trećem poglavlju su opisani potrebni materijali za izradu završnog rada, a postupak proračuna poprečne admitancije u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju su napravljeni proračuni i izvršena je diskusija na temelju dobivenih rezultata. Šesto poglavlje je posvećeno zaključku.

Autor u literaturi [1] je napravio proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda koristeći kodove u MATLAB-u. Autor u literaturi [2] je napravio proračun jediničnog induktiviteta dalekovoda pomoću računala, također koristeći kodove u MATLAB-u. Autor u literaturi [3] je izvršio proračune elemenata voda za više nadomjesnih modela vodova. Autor u literaturi [4] je koristio metodu nadomjesne  $\pi$ -sheme i metodu prijenosnih jednadžbi kako bi utvrdio koja je bolja. Autor u literaturi [5] je izvršio proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina. Autori u literaturi [6] govore o problemu koji se javlja kod prijenosnih vodova u prijenosnom stanju. Autor u literaturi [7] je izvršio proračun podešenja distantne zaštite 400 kV dalekovoda Ernestinovo – Pecs. Autor u literaturi [8] govori o algoritmima za računanje parametara prijenosnog voda. Autor u literaturi [9] je usporedio svojstva nadzemnog dalekovoda i podzemnog kabela za 110 kV prijenosnu mrežu. Autor u literaturi [10] je opravdao zanemarenje kapaciteta vodova u distributivnim mrežama.

## **1.1. Zadatak završnog rada**

Potrebno je na primjeru različitih konfiguracija 400 kV dalekovoda, izvršiti proračun poprečne admitancije (vodljivost (G) i kapacitet (C)) direktnog, inverznog i nultog slijeda. Usporediti i komentirati rezultate.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Proračuni parametara nadzemnih vodova obrađeni su u brojnim završnim i diplomskim i znanstvenim radovima. Neki od tih radova su navedeni zbog povezanosti s ovim završnim radom.

Autor u literaturi [1] je izvršio proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda pomoću računala na programskom paketu MATLAB. Koristio je metodu srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU) za izračun kapaciteta 110, 220 i 400 kV dalekovoda, a zatim rezultate provjerio putem MATLABA. Zaključio je da pogonski kapacitet nadzemnog voda ovisi o naponskom nivou tog voda i broju vodiča u snopu.

Autor u literaturi [2] je izvršio proračun jediničnog induktiviteta dalekovoda pomoću računala na programskom paketu MATLAB. Proračun je napravljen za 735 i 345 kV dalekovod. Došao je do zaključka da jedinični induktiviteta ne opada značajno u odnosu 220 kV i 400 kV nadzemnih vodova.

Autor u literaturi [3] je napravio primjere proračuna kod vrlo visokog napona, visokog napona i srednjeg napona pomoću približnog i točnog  $\pi$  modela, te je zaključio da na 400 kV vodu zadane induktivne i kapacitivne prividne snage na kraju voda, ako se počinje čistim radnim teretom djelatne snage, te se postepeno povećava jalovi dio prividne snage, uočavaju se smanjenje gubitaka faznog napona, a zatim lagano povećanje. Također se gubici prividne snage smanjuju, pa polako povećavaju, sve dok se ne dobije čista jalova snaga.

Autor u literaturi [4] je testirao upotrebu nadomjesne  $\pi$ -sheme voda za različite duljine prijenosnih vodova 110, 220 i 400 kV vodova.. Korištene su dvije metode: metoda nadomjesne  $\pi$ -sheme i metoda prijenosnih jednadžbi. Na temelju primjera zaključeno je da se nadomjesna  $\pi$ -shema ne bi trebala koristiti na udaljenostima većim od 200 kilometara.

Autor u literaturi [5] je izvršio proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina te je došao do zaključka da kod metode jediničnih vrijednosti su veličine bez dimenzijske i zbog toga je izrazito pogodna za proračune na računalu, a kod metode apsolutnih vrijednosti se mora izvršiti reduciranje gdje se problem javlja kod većih sustava jer je potrebno izvršiti više redukcija.



Autori u literaturi [6] govore o problemu koji se javlja kod prijenosnih vodova u prijenosnom stanju. Naime, parametri modela prijenosnog voda nisu dovoljno precizni, pa je potreban novi model. Pronašli su tri bitne točke na koje treba obratiti pažnju pri konstrukciji modela da bi se dobila optimalna točnost konstrukcije. U obzir treba uzeti vrijeme prijenosa napona i strujnih valova u dalekovodu.

Autor u literaturi [7] je izvršio proračun podešenja distantne zaštite 400 kV dalekovoda Ernestinovo – Pecs. Simulaciju kvarova na šticećenim dalekovodima napravio je na Digsilent – u. Uz proračun distantne zaštite izvršio je i proračun kratkog spoja da bi se mogli izračunati faktori međunapajanja. Zaključio je da distantna zaštita ima mnoge prednosti i univerzalna je. Za ispravno podešavanje uređaja distantne zaštite zahtjeva detaljnu pripremu i pribavljanje podataka o električnim parametrima šticećenog voda.

Autor u literaturi [8] govori o algoritmima za računanje parametara prijenosnog voda. Koristio je serijsku liniju, mrežu pozitivnog niza sustava tijekom normalnog rada, te paralelnu liniju. Tehnika temeljena na najmanjim kvadratima se smatra najnaprednijom tehnikom.

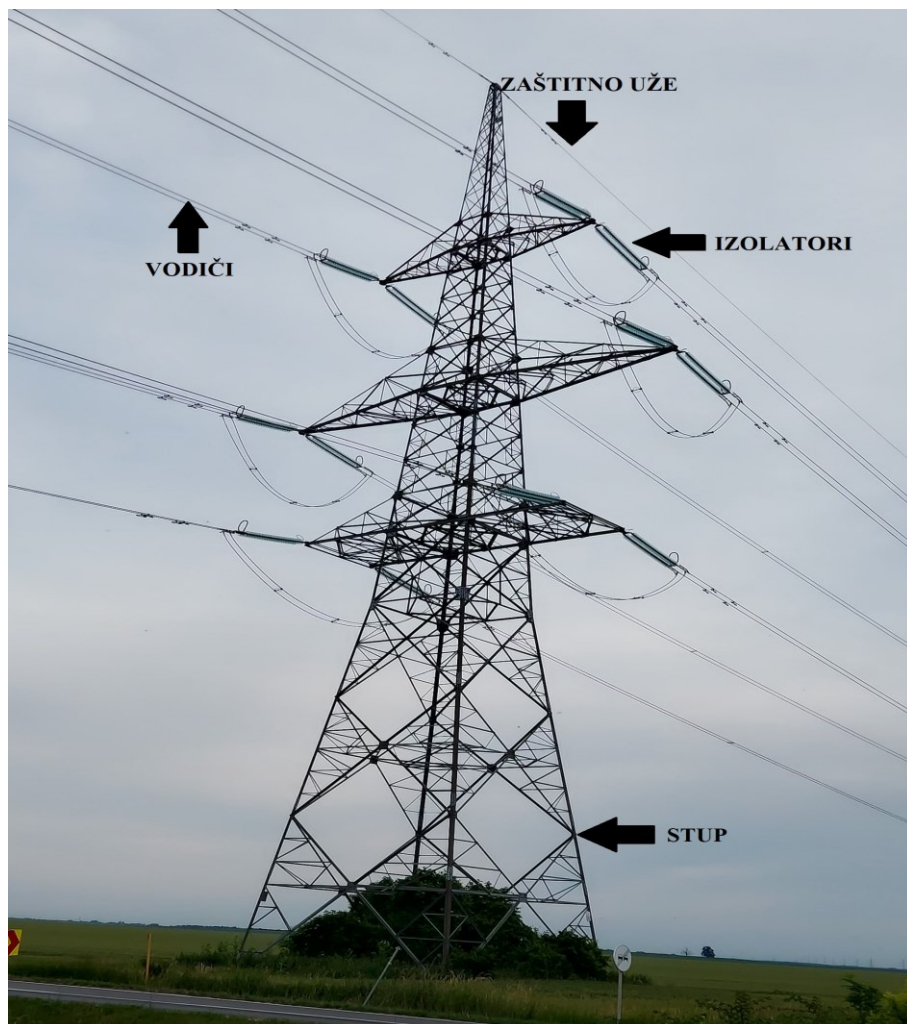
Autor u literaturi [9] je usporedio svojstva nadzemnog dalekovoda i podzemnog kabela za 110 kV prijenosnu mrežu. Opisana je  $\pi$ -shema pomoću koje je obavljen proračun prijenosa električne energije- Kod dalekovoda dominira induktivitet, a kod podzemnog kabela kapacitet. Gubitci radne snage su manji kod podzemnog kabela jer struja koja protječe kabelom i otpor kabela su manje nego kod dalekovoda.

Autor u literaturi [10] je opravdao zanemarenja kapaciteta vodova u distributivnim mrežama. Proračun je izvršen na naponskim razinama od 10 kV te 35 kV. Došao je do zaključka da se kapaciteti kod 10 kV dalekovoda mogu zanemariti, te nema razlike u rezultatima, dok kod 35 kV dalekovoda se može očitati znatno odstupanje kod struje na početku voda.

### 3. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

Autor u literaturi [11] navodi: „nadzemni elektroenergetski vod sadrži zračne neizolirane vodiče obješene na stupove, tj. jedina izolacija između aktivnog vodiča kojim teče struja i okoline je zrak.“ Nadzemni elektroenergetski vod prikazana je na slici 3.1.

Prema literaturi [11]: „Služe za prijenos električne energije na određenu udaljenost. Prijenos se može izvršiti i kabelima, ali se rjeđe koriste zbog njihove visoke cijene. Nadzemne vodovi se mogu podijeliti prema sljedećim kriterijima: nazivni napon voda, broj strujnih krugova, materijal i konstrukcija vodiča, te materijal i konstrukcija stupova. Osnovni elementi su: temelji, stupovi, izolatori, vodiči, spojni, ovjesni i zaštitni materijal, uzemljenje i zaštitna užad.“



Slika 3.1. Dalekovod s njegovim osnovnim elementima

Naš elektroenergetski sustav je povezan sa susjednim državama preko mreže dalekovoda nazivnog napona 400 kV. Prema podacima iz literature [12] napravljena je tablica 3.1. Na području RH u pogonu je 15 dalekovoda nazivnog napona 400 kV, ukupne duljine 1247 km. Raspoloživost tih dalekovoda je bitna za funkcioniranje elektroenergetskog sustava u cjelini [12].

Tablica 3.1. Dalekovodi u Hrvatskoj

PRIJENOSNO PODRUČJE	DULJINA (km)
Osijek	289,76
Rijeka	259,24
Split	169,40
Zagreb	528,00
Ukupno	1246,40

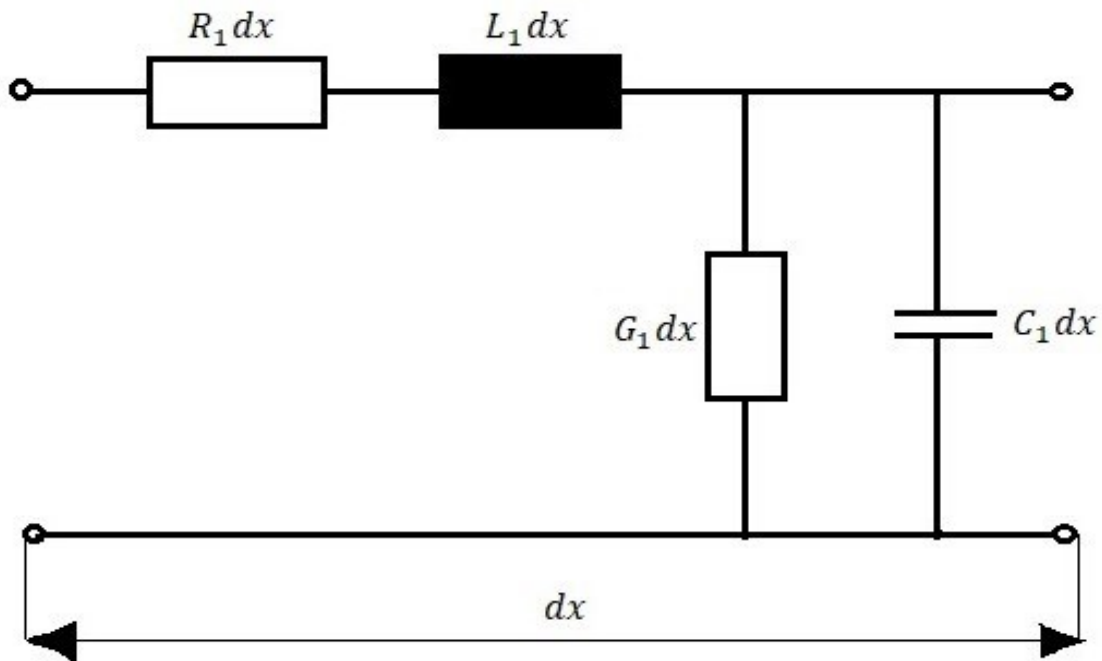
### 3.1. Karakteristične veličine voda

Autor u literaturi [13] navodi: „Konstante voda su karakteristične veličine kojima se definiraju električne prilike na vodu u svim pogonskim slučajevima. Brojčane vrijednosti konstanti voda ovise o svojstvima materijala od kojih su konstruirani, o svojstvima sredine koja ih okružuje, o geometrijskom odnosu dijelova voda međusobno i prema okolini. Uslijed promjene temperature, vlažnosti i sl. konstante voda se navode po jedinici dužine voda, obično po kilometru i po jednoj fazi. Ako nije drukčije naglašeno, radi se o konstantama za direktni sustav simetriranog voda. Konstante voda jesu:

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

Vod kojemu su sve četiri konstante različite od nule naziva se realni vod. Prolaz struje kroz otpor i odvod izaziva toplinske gubitke, pa su konstante podijeljene na tople i hladne. Sve četiri konstante su raspoređene kontinuirano uzduž voda. Položaj pojedinih konstanti je prikazan na

infinitesimalnom dijelu jedne faze simetričnog trofaznog voda. Zbog svog položaja u elementu voda djelatni otpor i induktivitet nazivaju se uzdužnim, a odvod i kapacitet poprijječnim konstantama.“ Te konstante prikazane su na slici 3.2.



Slika 3.2 Položaj konstanti voda na dužini dx [13]

Djelatni otpor voda je jednak padu napona ( $\Delta U$ ) ili gubitku snage ( $\Delta P$ ) po dužini voda, ako vodičem teče istosmjerna struja ( $I$ ) od 1 ampera kako je prikazano u formuli (3-1) [13].

$$R_1 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{\rho}{q} \left[ \frac{\Omega}{m} \right] \quad (3-1)$$

Djelatni otpor se može prikazati i pomoću specifičnog otpora vodiča ( $\rho$ ) i presjeka vodiča ( $q$ ) [13].

Autor u literaturi [13] navodi: „Induktivitet je svojstvo petlje da se opire promjeni struje, jer svaka promjena struje izaziva promjenu obuhvatnog toka, koja inducira u petlji napon suprotnog smjera.“

## 3.2. Kapacitet voda

Za vodiče prijenosnih vodova autor u literaturi [14] navodi da: „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. Kapacitet  $C$  je omjer naboja  $q$  i napona  $U$ .“ Taj omjer je prikazan u jednadžbi (3-2):

$$C = \frac{Q}{U} [F] \quad (3 - 2)$$

Kapacitet je koristan jer daje odnos između količine naboja na vodiču i visine napona tog vodiča. Mjerna jedinica za kapacitet je farad (F). Prema (3-3) kapacitet od 1F ima vodič koji pri povećanju napona od 1V poveća i naboj za 1 As [13].

$$1 F = 1 \left[ \frac{As}{V} \right] \quad (3 - 3)$$

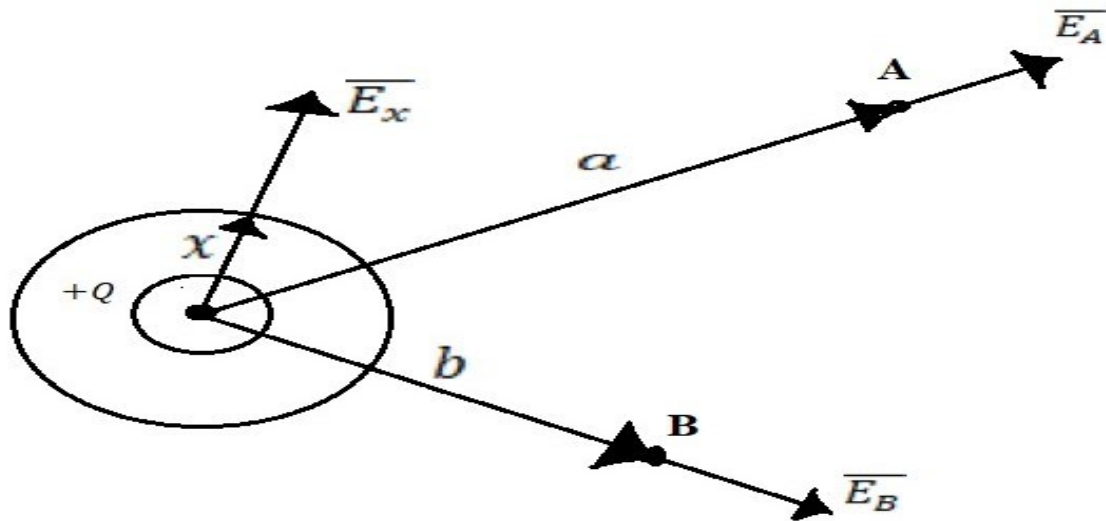
### 3.2.1. Utjecaj zemlje na kapacitet

Autor u literaturi [14] za izolirani nabijeni vodič navodi da: „ima radialne i ortogonalne silnice električnog toka prema cilindričnim ekvipotencijalnim površinama.“

Prema literaturi [14]: „Prisutnost zemlje će promijeniti raspodjelu silnica i ekvipotencijalnih ploha električnog toka, što će uzrokovati promjenu efektivnog kapaciteta voda. Razina zemlje je ekvipotencijalna ploha, zato su silnice toka prisiljene sjeći plohu zemlje ortogonalno. Posljedica prisutnosti zemlje je odgovorna za metodu prividnih naboja koju je predstavio Kelvin. Pri crtanju ove metode, potrebno je uzeti u obzir vodič sa nabojem  $q$  kulona po metru na visini  $H$  iznad zemlje. Potrebno je zamisliti naboj  $-q$  postavljen na dubinu  $H$  ispod zemljine plohe. Ova konfiguracija bez prisutnosti zemlje će stvoriti jednaku raspodjelu kao jedan naboj i zemljina ploha. Prema tome, zemlja može biti zamijenjena za proračun električnog polja sa fiktivnim nabijenim vodičem suprotnog predznaka koji se nalazi na jednakoj dubini zemlje kao i pravi što je pravi vodič iznad zemlje. Taj zamišljeni vodič se naziva slikom pravog vodiča. Utjecaj zemlje je da povećava vodljivost.“

### 3.2.2. Opći izraz za napon

Na homogenom cilindričnom vodiču (sl. 3.3) se nalazi naboj  $Q$  koji stvara električno polje oko tog vodiča. Pretpostavljeno je da na dužini od 1 m nema pada napona, te da je oko vodiča vakuum s dielektričnom konstantom ( $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  F/m) [15].



Slika 3.3. Napon između dviju točaka u polju cilindričnog vodiča [15]

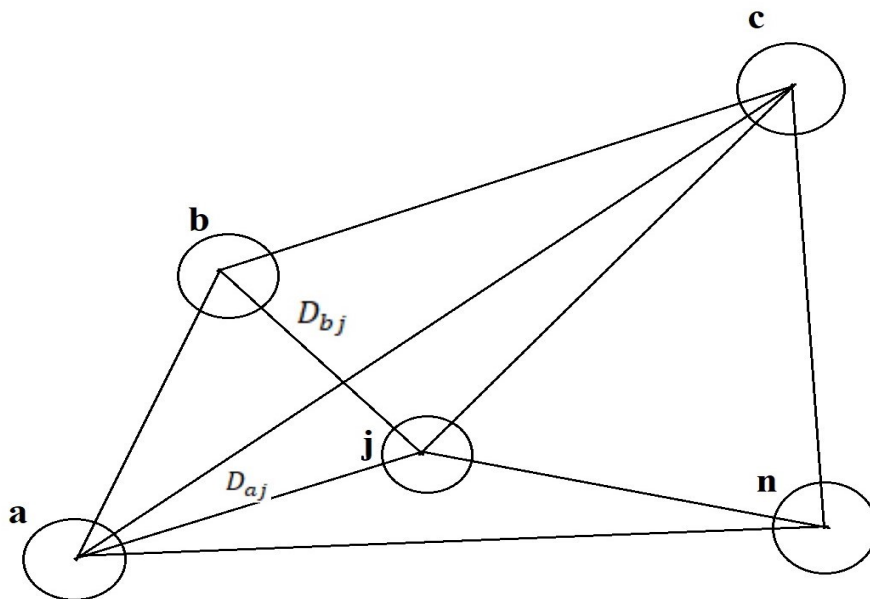
Jakost električnog polja je izražena pomoću udaljenosti  $x$  (u metrima) od osi vodiča s nabojem  $Q$  (u ampersekundama) (3-4).

$$E_x = \frac{Q}{2\pi x \epsilon_0} = \frac{Q}{2\pi x} \cdot 36\pi \cdot 10^9 = 18 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{x} \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (3-4)$$

Napon između točaka A i B se može izraziti formulom (3-5).

$$U_{AB} = \int_a^b E_x dx = 18 \cdot 10^9 \cdot Q \int_a^b \frac{dx}{x} = 18 \cdot 10^9 \cdot Q \ln \frac{b}{a} [V] \quad (3-5)$$

Za primjer je uzet sustav od više vodiča, n vodiča koji pripadaju istom strujnom krugu (sl. 3.4.).



Slika 3.4. Sustav od n vodiča [15]

Ako se pretpostavi da u okolini sustava vodiča nema drugih vodljivih tijela ( $\sum_{j=a}^n Q_j = 0$ ), onda na temelju (3-5) se može zapisati novi izraz za napon između vodiča a i b (3-6).

$$U_{(ab)j} = 18 \cdot 10^9 \cdot Q_j \ln \frac{D_{bj}}{D_{aj}} [V] \quad (3-6)$$

Naboj svakog j vodiča djeluje nabojem pa je ukupan napon izražen formulom (3-7) [15].

$$U_{ab} = 18 \cdot 10^9 \cdot \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{bj}}{D_{aj}} [V] \quad (3-7)$$

### 3.3. Odvod voda

Nadzemni vod prema literaturi [15]: „možemo zamisliti kao nesavršeni kondenzator s vodičima ovješanim na izolatorima.“

Ti vodiči su između ovješanje i zemlje izolirani jedino zrakom. Tamo se stvaraju gubitci koji nisu ovisni o opterećenju. Postoje dvije vrste tih gubitaka, a to su: prouzrokovani kliznim strujama i gubici prouzrokovani koronom. Klizne struje nastaju pod djelovanjem napona voda i teku prema uzemljenim konzolama stupova. [15]

Autor u literaturi [15] navodi kako je: „korona je pojava tinjavih izbijanja na površini vodiča ako jakost električnog polja premaši vrijednost električne čvrstoće zraka.“

Odvod voda  $G_1$  prema literaturi [15] definiran je 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].“ Prethodno spomenuti omjer prikazan je jednadžbom (3-8).

$$G_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \left[ \frac{S}{m} \right] \quad (3 - 8)$$

U praksi se dužine nadzemnih vodova mjere u kilometrima i odvod se najčešće izražava u [S/km]. Odvod ima ekonomsko značenje zbog gubitaka koje prouzrokuje, a također ima i utjecaj na okoliš zbog visokofrekventnih smetnji uslijed korone [15].

Autor u literaturi [13] navodi: „Odvod voda nastaje uslijed nesavršenosti izolacije. Sastavljen je od dva dijela.

$$G_1 = G_0 + G_d \quad (3 - 9)$$

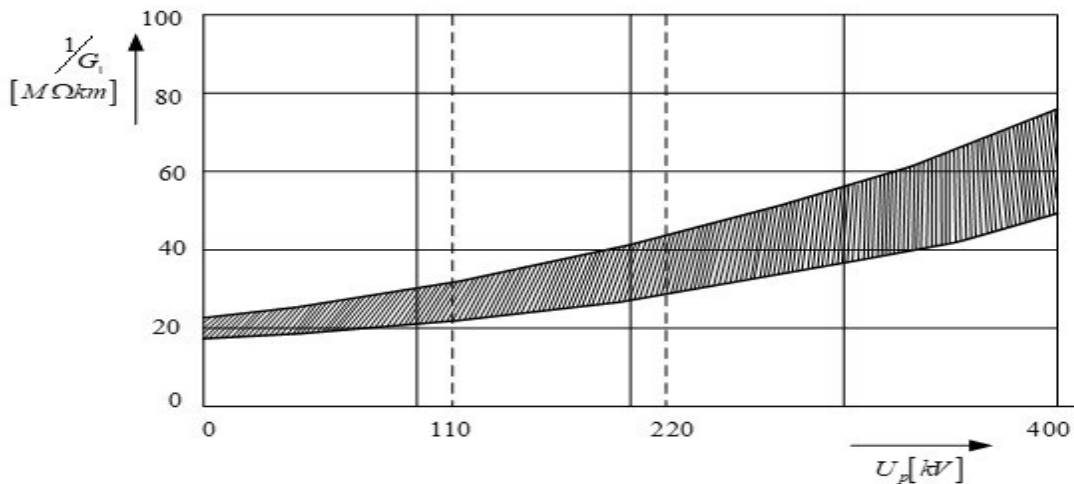
Odvod  $G_0$  pokazuje koliko je strujno vođenje izolacije, a odvod  $G_d$  nastaje zbog gubitaka u izolaciji pri izmjeničnoj polarizaciji.“ U normalnim uvjetima možemo za  $G_1$  uzeti da iznosi [13]:

$$G_1 = 0,1 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{S}{km} \right] \quad (3 - 10)$$

### 3.3.1. Odvod zbog kliznih struja

Odvod zbog kliznih struja najviše ovisi o čistoći površine izolatora, ali i o klimatskim uvjetima [15]. Pogodnim oblikom i kvalitetom površine izolatora utječe se na čistoću, odnosno teže će doći do onečišćenja izolatora. Na klizne struje, kao i na odvod općenito, u velikoj mjeri djeluju atmosferske prilike: na suhom zraku je odvod neznatan i neovisan, ali pri vlažnom zraku, magli i sitnoj kiši dolazi do povećanja odvoda jer se onečišćenja ovlaže [15]. Također, odvod ovisi i o pogonskom naponu. Iz tog razloga zaključeno je da se odvod mijenja unutar širokih granica, te da se ne može analitički proračunati [15]. Ipak, to ne predstavlja problem jer se odvod pri normalnim proračunima prijenosa ne uzima u obzir [15]. Ako je potrebno računati s odvodom onda se koristi slika 3.5. [15].





Slika 3.5. Ovisnost recipročne vrijednosti odvoda vodiča ili snopa po jedinici dužine voda ( $1/G_1$ ) o pogonskom naponu ( $U_p$ ) [15]

Prema slici 3.5. poznavajući pogonski napon mogu se pronaći granice recipročne vrijednosti odvoda vodiča, a iz recipročne vrijednosti lako se dolazi do odvoda vodiča.

### 3.3.2. Odvod zbog korone

Zrak izolira vodiče nadzemnih vodova po cijeloj njihovoj dužini, te da je on savršeni izolator po lijepom vremenu. Ali, u slučaju lošeg vremena, djelovanjem električnog polja, dolazi do ionizacije (korona). Zbog te ionizacije, javljaju se gubici na vodu, smetnje na radijskim i televizijskim uređajima, kao i zvučni efekti. Dakle, te pojave se trebaju izbjeći u normalnom pogonu, odnosno ne smiju prelaziti određenu razinu. Ali iz ekonomskih razloga nije moguće izbjeći sve te pojave. Npr. ako je jakost električnog polja mala onda treba veliki promjer vodiča. U zraku se nalaze ioni i slobodni elektroni koji nastaju djelovanjem sunčevog i kozmičkog zračenja. Zatim ako se u zraku pri normalnom atmosferskom tlaku između katode i anode stvori homogeno električno polje, onda će kroz zračni sloj teći neznatna struja koju održavaju elektroni i ioni generirani vanjskim uzrocima. Ukoliko dođe do probojne čvrstoće zraka, ioni između dva sudara stječu kinetičku energiju potrebnu za udarnu ionizaciju (proboj). A zbog homogenosti jakost polja u cijelom zračnom sloju postiže istovremeno kritičnu vrijednost, tako da će istovremeno doći i do sloma izolacijske sposobnosti u svim točka. Oko vodiča za prijenos električne energije se nalazi nehomogeno električno polje. Zbog te nehomogenosti ionizacija će se desiti u samo jednom dijelu polja. Zbog ionizacije će vodič povući čestice sa suprotnim

nabojem, a odbiti čestice s istim nabojem. U jednom trenutku vodič će se nalaziti u oblaku istoimenih naboja, a između vodiča i vanjskog ruba oblaka će električno polje oslabiti, a polje izvan oblaka će se povećati. Zbog ovoga se čini kao da se promjer vodiča povećao. Mogu se očekivati nejednaki efekti pri pozitivnom i negativnom naboju na vodiču jer ponašanje iona i elektrona u nehomogenom polju nije identično. Zbog izmjeničnog napona na vodu, prostorni naboj se dijelom akumulira, a dijelom poništava. Električno polje možemo izraziti formulom (3-11) [15].

$$E(x) = \frac{V}{x \ln \frac{D}{r}} \quad (3 - 11)$$

$V$  – efektivna vrijednost faznog napona voda [kV]

$x$  – udaljenost mjerenja od osi vodiča [m]

$E(x)$  – jakost električnog polja na udaljenosti  $x$  od osi vodiča [kV/m]

$D$  – fazna udaljenost [m]

$r$  – polumjer vodiča [m]

### 3.4. Kritični napon

Kritični napon definiramo kao pogonski napon pri kojemu jakost električnog polja dostiže vrijednost električne čvrstoće zraka. Jakost električnog polja može biti kontrolirana na površni vodiča, jer tamo ima najveću vrijednost. Jednadžbom (3-12) prikazano je da je fazna udaljenost ( $D$ ) jednaka omjeru naboja ( $Q$ ) u osi vodiča i površine tog vodiča [13].

$$D = \frac{Q}{2\pi r} \left[ \frac{C}{m^2} \right] \quad (3 - 12)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (3-12) u izraz za električno polje dobiven je novi izraz (3-13).

$$E = \frac{D}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{2\pi r \varepsilon_0} = \frac{Q}{2\pi r} 36 \cdot \pi \cdot 10^9 = 18 \cdot 10^9 \frac{Q}{r} = 18 \cdot 10^9 \frac{VC}{r} \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (3 - 13)$$

$\varepsilon_0$  – permeabilnost zraka

$C$  - kapacitet

Uveden je linijski kritični napon  $U_{KR}$  (3-14).

$$\sqrt{3 \frac{30}{\sqrt{2}}} = 18 \cdot 10^9 \frac{U_{KR} \cdot C}{r} \quad (r \text{ u cm}) \quad (3-14)$$

Preformuliranjem jednadžbe (3-14) dobivena je jednadžba (3-15).

$$U_{KR} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21,1 \cdot r}{18 \cdot 10^9 C} = \frac{36,5 \cdot r}{18 \cdot 10^9 C} [kV] \quad (3-15)$$

Kritični napon za trofazni simetrični vod (3-16).

$$U_{KR} = \frac{36,5 \cdot r}{18 \cdot 10^9 C} 18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r} = 36,5 r \ln \frac{D}{r} [kV] \quad (3-16)$$

Pretpostavka o glatkom vodiču, temperaturi i tlaku neće biti uvijek ispunjena, pa je izraz za kritični napon korigiran faktorom hrapavosti vodiča ( $m$ ) i relativnom gustoćom zraka ( $\rho$ ) (3-17) [13].

$$U_{KR} = \frac{36,5 \cdot r}{18 \cdot 10^9} \rho m [kV] \quad (3-17)$$

Odnosno za trofazni simetrični vod (3-18):

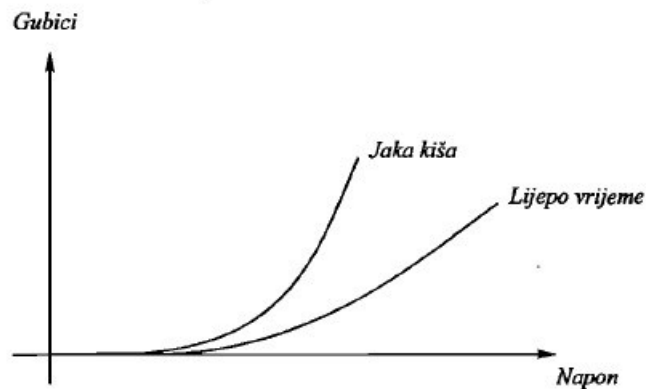
$$U_{KR} = 36,5 \cdot r \cdot \rho m \ln \frac{D}{r} [kV] \quad (3-18)$$

### 3.5 Gubici korone

Autor u literaturi [14] navodi: „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 normalnih 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 prašinom i naslagama kemikalija koje

manjuju 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.“ Slika 3.6. prikazuje ovisnost gubitaka zbog korone u odnosu na klimatske uvjete.

Gubici energije kod korone se obično određuju eksperimentalnim putem. Mnogi autori pokušali su na temelju ispitivanja dati formule za izračunavanje gubitaka [13].



Slika 3.6. Gubici na vodu [13]

Najučinkovitije sredstvo za sprečavanje korone je povećanje vanjskog promjera vodiča, zbog čega je došlo do primjene šupljih vodiča. Danas se sve više primjenjuje izvedba vodiča u snopu. Više vodiča zajedno glume jedan vodič većeg promjera [13].

## **4. POSTUPAK PRORAČUNA POPREČNE ADMITANCIJE**

Proračun poprečne admitancije se sastoji od 5 koraka. U prvom koraku proračuna potrebno je znati podatke o vodičima. Dakle, važno je znati tip dalekovoda, vodiča, te dimenzije. U drugom koraku definirane su udaljenosti i zrcaljenje. U trećem koraku se računa matrica potencijalnih koeficijenata kojom se prikazuje veza napona i naboja vodiča. U četvrtom koraku se vrši redukcija zaštitnih užeta i snopova vodiča. Pomoću matrice potencijalnih koeficijenata dobivena je matrica kapacitivnih koeficijenata. U zadnjem koraku računamo simetrične komponente sustava.

### **4.1. Prikupljanje ulaznih podataka**

U prvom koraku, kako je već navedeno, potrebno je imati određene podatke o dalekovodu i njegovim vodičima. Podaci koji su potrebni su: frekvencija, materijal vodiča, presjek vodiča, broj vodiča u snopu, razmak vodiča u snopu, najveći provjes vodiča, broj trojki, izolatorski lanac, materijal zaštitnih užeta, presjek zaštitnih užeta, broj zaštitnih užeta, najveći provjes zaštitnih užeta, otpor tla, koordinate ovjesišta izolatorskih lanaca, koordinate pričvršćenja zaštitnih užeta. Brojem trojki određen je broj vodiča. Zatim su iz tablice sa podacima o izvedbi vodiča koji se mogu pronaći u literaturi [16] uzeti sljedeći podaci: vanjski radijus vodiča, stvarni presjek vodiča (bez čelične jezgre), radijus čelične jezgre. Također su uzeti i podaci za zaštitno uže (vanjski radijus vodiča, broj žica, stvarni presjek vodiča).

## 4.2. Raspored vodiča

U drugom koraku važno je znati koordinate ovjesišta izolatorskih lanaca i pričvršćenja ovjesišta kako bi se mogla nacrtati skica.

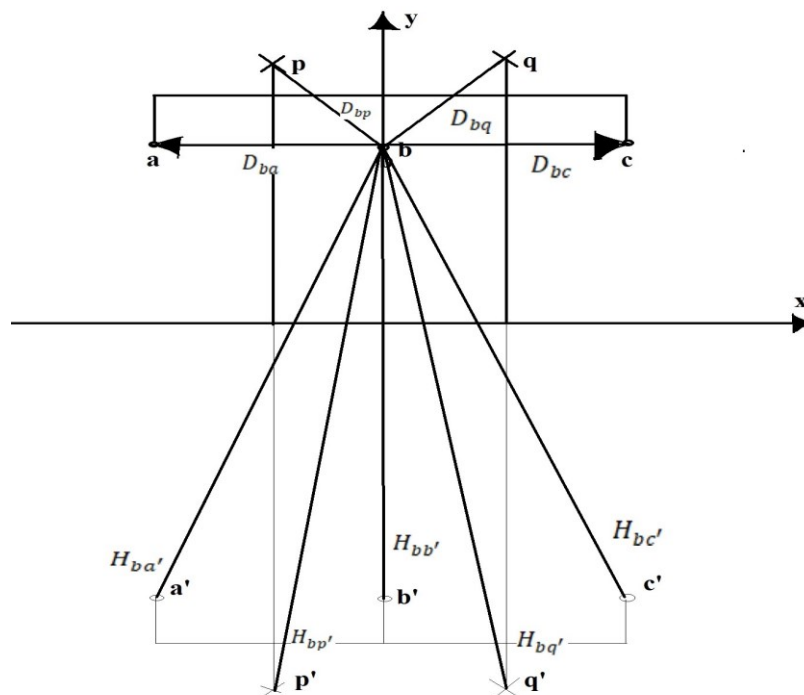
U daljnjim proračunima važan nam je utjecaj zemlje, i visina vodiča iznad tla. Uzeta je prosječna visina koja se dobije računskim putem tako da od visine ovjesišta na stupu se odbije  $\frac{7}{10}$  najvećeg provjesa vodiča (4-1).

$$h = H - 0.7f_{max} \quad (4 - 1)$$

Ali duljina izolatora i nosača vodova ne smije biti zanemarena. Duljina izolatora određena je poznavajući dimenzije jednog članka. Za primjer je uzet broj članaka i tip izolatora 12 K 170/280 kojem je visina jednog članka 0.17 m. A nosač voda je 0.3 m. Prema tome se računa visina vodiča a (4-2).

$$h_a = y_a - (0.7 \cdot f_{max} + 12 \cdot 0.17 + 0.3) \quad (4 - 2)$$

Prosječna visina užeta izračunata je na identičan način, samo se izostavlja duljina izolatora. U sljedećem koraku određene su koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užeta u zemlji (sl. 4.1.), a zatim su izračunate međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta (4-3) (4-4). Te



Slika 4.1. Zrcalna slika vodiča i zaštitnih užeta

udaljenosti su važne za proračun kapaciteta, odnosno susceptancije, a računaju se prema Pitagorinom teoremu.

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4 - 3)$$

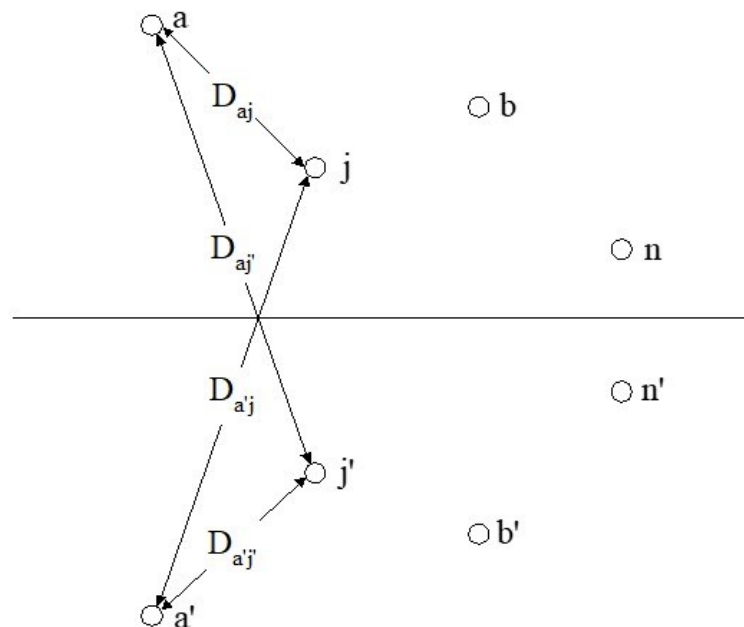
$$H_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4 - 4)$$

$i, j = a, b, c, p, q$ .

Udaljenosti označene sa  $D$  predstavljaju udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta u proračunu induktiviteta, a to nije bitno za ovaj proračun. Bitne udaljenosti su označene sa  $H$ , to su udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta prema njihovim zrcalnim slikama.

### 4.3. Matrica potencijalnih koeficijenata

U trećem koraku korištena je metoda zrcaljenja (sl. 4.2.), te na taj način je izračunata matrica potencijalnih koeficijenata. Kako je već spomenuto u poglavlju 3, ako postoji sustav od  $n$  vodiča i u okolini sustava vodiča nema drugih vodljivih tijela, može se izračunati napon između dva vodiča.



Slika 4.2. Geometrijski odnosi pri primjeni metode zrcaljenja [15]

Promotrivši sliku došlo je do sljedećih zaključaka:

$$Q_{j'} = -Q_j \quad (4-5)$$

$$D_{a'j'} = D_{aj} \quad (4-6)$$

$$D_{a'j} = D_{aj'} \quad (4-7)$$

Pomoću (3-7) i uzimajući u obzir da je napon između vodiča a i njegove zrcalne slike a' jednak dvostrukoj vrijednosti potencijala vodiča a prema zemlji dobijena je jednačba (4-8).

$$\begin{aligned} U_{aa'} &= 2 \cdot V_a = 18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{a'j}}{D_{aj}} + \sum_{j'=a'}^{n'} Q_{j'} \ln \frac{D_{a'j'}}{D_{aj'}} \right] = \\ &= 18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{aj'}}{D_{aj}} - \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{aj}}{D_{aj'}} \right] = \\ &= 18 \cdot 10^9 \cdot \left[ \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{aj'}}{D_{aj}} + \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{aj'}}{D_{aj}} \right] = \\ &= 18 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{aj'}}{D_{aj}} \quad [V] \end{aligned} \quad (4-8)$$

A potencijali vodiča prema zemlji su pokazani jednačbom (4-9).

$$V_n = 18 \cdot 10^9 \cdot \sum_{j=a}^n Q_j \ln \frac{D_{nj'}}{D_{nj}} \quad [V] \quad (4-9)$$

Jednačba (4-9) prikazana u matričnom obliku (4-10):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = 18 \cdot 10^9 \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{D_{aa'}}{D_{aa}} & \ln \frac{D_{ab'}}{D_{ab}} & \dots & \ln \frac{D_{an'}}{D_{an}} \\ \ln \frac{D_{ba'}}{D_{ba}} & \ln \frac{D_{bb'}}{D_{bb}} & \dots & \ln \frac{D_{bn'}}{D_{bn}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{na'}}{D_{na}} & \ln \frac{D_{nb'}}{D_{nb}} & \dots & \ln \frac{D_{nn'}}{D_{nn}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (4-10)$$



Opći oblike te matrice jednadžbe (4-11).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{aa} & p_{ab} & \dots & p_{an} \\ p_{ba} & p_{bb} & \dots & p_{bn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{na} & p_{nb} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Kompaktnija forma (4-12).

$$V = P \cdot Q \quad (4-12)$$

Matrica P je matrica potencijalnih koeficijenata kojom je prikazan veza između napona i naboja vodiča. Elementi na glavnoj dijagonali matrice P izračunati su na sljedeći način (4-13):

$$p_{ii} = 18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{D_{ii'}}{D_{ii}} = 18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{2h_i}{r} \left[ \frac{Vm}{As} \right] \quad (4-13)$$

Udaljenosti  $D_{ii}$  predstavljaju udaljenosti vodiča od vlastitih naboja koji se nalaze na njihovim površinama. Geometrijski radijus je označen sa „r“ i pretpostavlja se da su jednake površine presjeka vodiča. Udaljenosti  $D_{ii'}$  predstavljaju udaljenosti između vodiča i njihovih zrcalnih slika isto kao i  $2h_i$ . A izvandijagonalni elementi se računaju prema jednadžbi (4-14).

$$p_{ik} = 18 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{D_{ik'}}{D_{ik}} \left[ \frac{Vm}{As} \right] \quad (4-14)$$

Udaljenosti  $D_{ik}$  i  $D_{ik'}$  su udaljenosti između vodiča i zrcalnih slika, pod uvjetom da je  $i \neq i'$  [15].

#### 4.4. Matrica kapacitivnih koeficijenata

U četvrtom koraku se računa matrica kapacitivnih koeficijenata. Matrica se računa prema jednadžbama od (4-15) do (4-20).

Množenjem jednadžbe (4-12) s matricom  $P^{-1}$  dobije se jednadžba (4-15).

$$P^{-1} \cdot V = P^{-1} \cdot P \cdot Q \quad (4-15)$$

Uvodimo novu oznaku  $P^{-1} = K$ , time je dobivena nova jednadžba (4-16).

$$Q = P^{-1} \cdot V = K \cdot V \quad (4-16)$$

Matrica  $\mathbf{K}$  je matrica kapacitivnih koeficijenata koja prikazuje vezu naboja po jedinici dužine vodiča i njihovih potencijala prema zemlji i dobije se invertiranjem matrice  $\mathbf{P}$ . Jednadžba (4-16) se može prikazati u matričnom obliku (4-17).

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_a \\ \overline{Q}_b \\ \vdots \\ \overline{Q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{aa} & -k_{ab} & \dots & -k_{an} \\ -k_{ba} & k_{bb} & \dots & -k_{bn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{na} & -k_{nb} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \vdots \\ \overline{V}_n \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

Svi elementi na glavnoj dijagonali su pozitivni, a elementi izvan glavne dijagonale su negativni [15]. Množenjem jednadžbe (4-16) sa  $j\omega$  dobije se (4-18).

$$[\overline{I}] = j[B][\overline{V}] \quad (4-18)$$

Matrica  $[B]$  se naziva matrica kapacitivnih susceptancija (4-19).

$$[B] = \omega[K] \quad (4-19)$$

A njezin inverz se može zapisati kao što je prikazano jednadžbom (4-20).

$$[B]^{-1} = \frac{1}{\omega}[P] \quad (4-20)$$

Susceptancija nije potrebna, jer je tražena matrica admitancija, iz tog razloga se dijeli matrica potencijalnih koeficijenata sa  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  i tako je dobijena inverzna matrica kapacitivnih susceptancija. Kada se postupkom blok-transformacije eliminiira zaštitna užad ostane inverzna matrica ekvivalentnih faznih susceptancija oblika. Invertiranjem te matrice rezultat je matrica vlastitih i međusobnih susceptancija ekvivalentnih faznih vodiča.

#### 4.5. Matrica simetričnih komponenata

U petom koraku se računa matrica simetričnih komponenata. Rezultat koji je potreban u ovom proračunu je (4-28) i (4-29).

Autor u literaturi [15] navodi: „Svi elektroenergetski sustavi rade kao trofazni simetrični sustavi.

U normalnom se pogonu mreža sastoji od uglavnom jednakih elemenata u svim fazama, pa ako su i opterećenja simetrična može se uzeti u obzir da su naponi i struje međusobno pomaknuti za  $120^\circ$ , odnosno  $2\pi/3$ . No, ako se opterećenje razlikuje (po iznosu ili faznom kutu) govori se o nesimetričnom trofaznom sustavu. Do nesimetričnih prilika dolazi najčešće kod jednofaznih ili dvofaznih opterećenja i nesimetričnih kvarova. Svaki sustav vektora napona, odnosno struja

može se zamijeniti trima simetričnim sustavima za koje se račun lakše izvodi. Nakon izračuna rezultati se vraćaju u originalni (fazni) sustav.“ Takva metoda se naziva metodom simetričnih komponenti. Matricu simetričnih komponenti možemo izračunati pomoću jednadžbe (4-21).

$$[B_1^{012}] = [A]^{-1}[B_1^{123}][A] \quad (4-21)$$

Matrica  $[B_1^{123}]$  predstavlja matricu ekvivalentnih faznih susceptancija prepletenog voda a računa prema (4-22).

$$[B_1^{123}] = \begin{bmatrix} B_s & B_m & B_m \\ B_m & B_s & B_m \\ B_m & B_m & B_s \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Srednje vrijednosti za vlastite i međusobne susceptancije prepletenog voda su  $B_s$  i  $B_m$ , a računaju se prema (4-23) i (4-24).

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) \quad (4-23)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \quad (4-24)$$

Matricu simetričnih komponenti se jednostavnije može prikazati jednadžbom (4-25).

$$[B_1^{012}] = \begin{bmatrix} B_0 & 0 & 0 \\ 0 & B_d & 0 \\ 0 & 0 & B_i \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

Time je račun pojednostavljen i potrebno je izračunati samo jediničnu nultu susceptanciju ( $B_0$ ) i direktnu koja je jednaka inverznoj susceptanciji jer nema rotacionih dijelova. Izražene su u S/km, a računaju su prema (4-26) i (4-27).

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m \quad (4-26)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m \quad (4-27)$$

Nakon toga je izračunat nulti kapacitet (4-28), te direktni i inverzni (4-29).

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} \quad (4-28)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} \quad (4-29)$$

## 5. PRIMJER PRORAČUNA POPREČNE ADMITANCIJE ZA 400 kV DALEKОВОDE

### 5.1. Podaci voda

U ovom poglavlju su određeni proračuni poprečnih admitancija prema postupku iz četvrtog poglavlja. Određeno je šest različitih proračuna. Proračuni su podijeljeni u dvije grupe. U prvoj grupi je izračunata admitancija za zadane parametre, a zatim su napravljena dva dodatna proračuna koja se razlikuju u razmaku između faza. U drugoj grupi je izračunata admitancija za zadane parametre, a druga dva proračuna se razlikuju u visini između faza. Izračunate se samo kapacitivne susceptancije, a vodljivost se zanemaruje. Podaci voda koji su korišteni u ovom proračunu su:

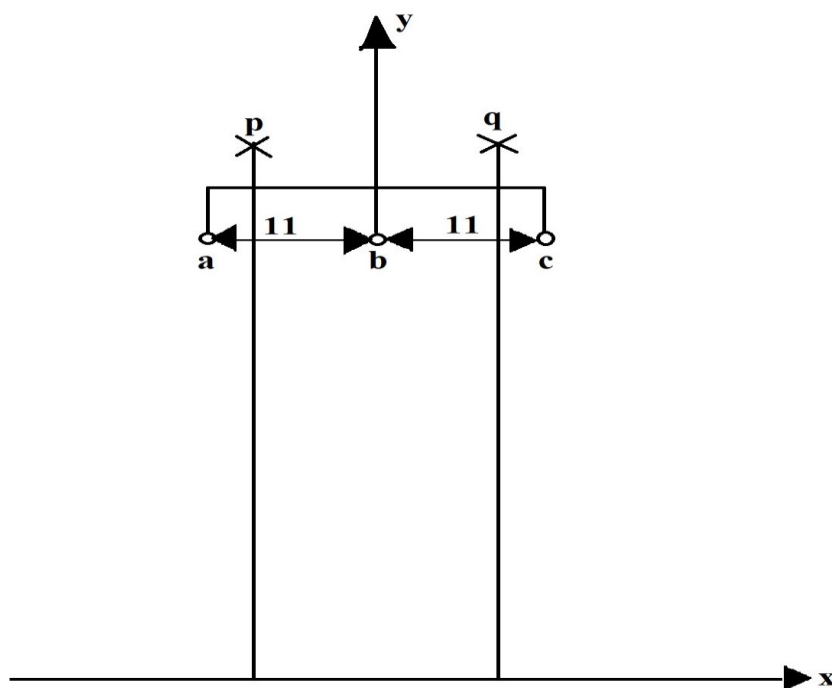
- Frekvencija – 50 Hz
- Nazivni napon – 400 kV
- Materijal vodiča – alučel
- Presjek vodiča –  $325/86 \text{ mm}^2$
- Broj vodiča u snopu – 2
- Razmak vodiča u snopu - 370 mm
- Najveći provjes vodiča – 20 m
- Broj trojki – 1
- Izolatorski lanac -16 K170/280
- Materijal zaštitnih užeta – čelik
- Presjek zaštitnih užeta –  $70 \text{ mm}^2$
- Broj zaštitnih užeta – 2
- Najveći provjes zaštitnih užeta – 12 m
- Koordinate ovjesišta izolatorskih lanaca – (-11.0 40.0), (0.0 40.0), (11.0 40.0)
- Koordinate pričvršćenja zaštitnih užeta – (-8 48.0), (8 48.0)

- Otpornost tla  $80 \Omega m$

## 5.2. Prva grupa proračuna

### 5.2.1. Proračun poprečne admitancije prema zadanim parametrima

Napravljen je proračun poprečne admitancije prema podacima iz poglavlja 5.1. Skica na kojoj se prikazuje raspored vodiča prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. Skica rasporeda vodiča

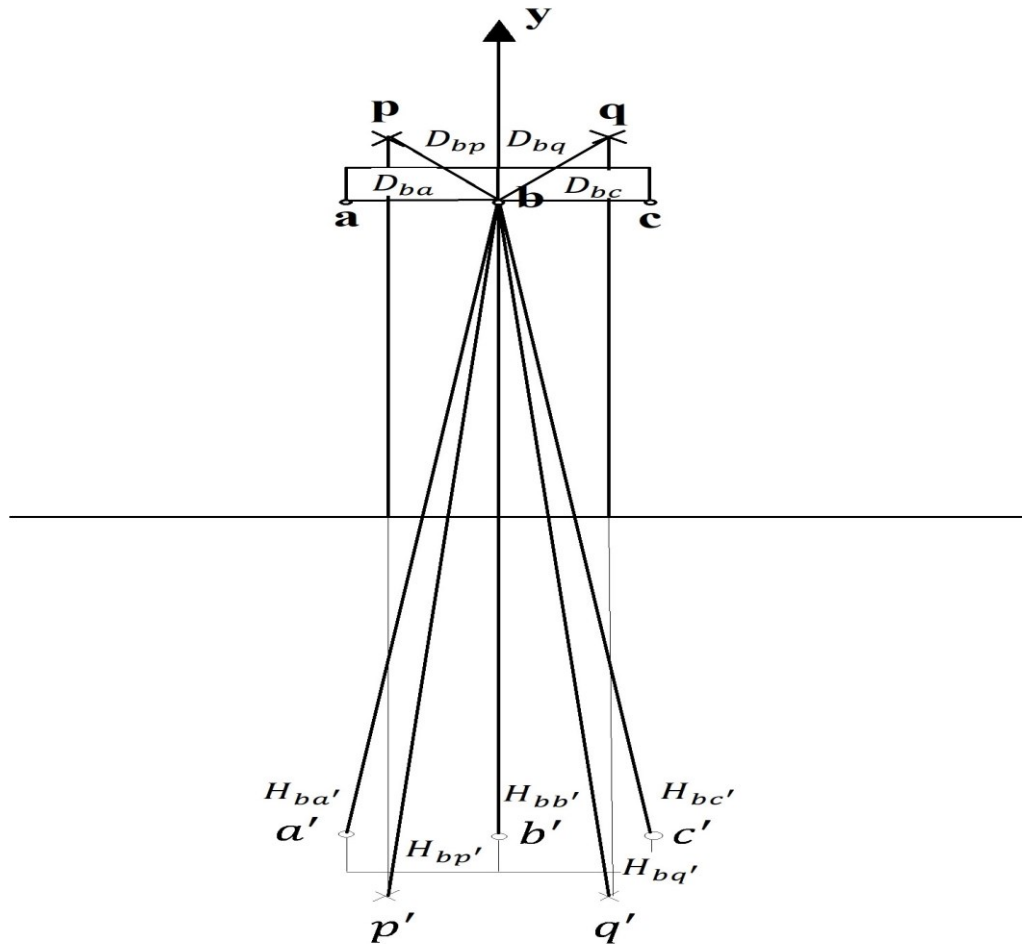
Pomoću broja trojki određen je broj vodiča  $n=3$ . Pomoću tablice iz priloga određen je vanjski polumjer vodiča  $r_1=13.2 \text{ mm}$ , a zatim i stvarni presjek vodiča (bez čelične jezgre)  $A_{Al} = 325.720 \text{ mm}^2$ , te polumjer čelične jezgre  $r_2= 3.6 \text{ mm}$ . A pomoću tablice iz literature [16] određene su vrijednosti zaštitnih užeta: vanjski polumjer vodiča  $r_g= 5.25 \text{ mm}$ , broj žica – 19, stvarni presjek vodiča  $A_{\check{c}e}=65.809 \text{ mm}^2$ .

Zadan je tip članaka i tip izolatora 16 K 170/280. Pomoću izmijenjene formule (4-2) izračunate su prosječne visine vodiča jedne trojke iznad tla. Formula je izmijenjena kako bi odgovarala zadanom izolatorskom lancu (5-1).

$$h_a = h_b = h_c = y - (0.7 \cdot f_{max} + 16 \cdot 0.17 + 0.3) = 22.98 \text{ m} \quad (5 - 1)$$

Na isti način su izračunate prosječne visine zaštitnih užeta, samo su izostavljene duljine izolatora (5-2).

$$h_p = h_q = y - (0.7 \cdot f_{gmax} + 0.3) = 39.3 \text{ m} \quad (5 - 2)$$



Slika 5.2. Zrcalna slika

Na osnovu slike 5.1. napravljena je njena zrcalna slika 5.2. Koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užadi:  $a'(-11.0, -40.0)$ ,  $b'(0.0, -40.0)$ ,  $c'(11.0, -40.0)$ ,  $p'(-8.0, -48.0)$ ,  $q'(8.0, -48.0)$ .

Udaljenosti *D* i *H* su izračunate pomoću već spomenutih formula (4-3) i (4-4).

Udaljenosti između faza *D*:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a	0.000	11.000	22.000	8.544	20.616
b	11.000	0.000	11.000	11.314	11.314
c	22.000	11.000	0.000	20.616	8.544
p	8.544	11.314	20.616	0.000	16.000
q	20.615	11.314	8.544	16.000	0.000

Udaljenosti *H*:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a'	80.0000	80.7527	82.9699	88.0511	90.0278
b'	80.7527	80.0000	80.7527	88.3629	88.3629
c'	82.9699	80.7527	80.0000	90.0278	88.0511
p'	88.0511	88.3629	90.0278	96.0000	97.3242
q'	90.0278	88.3629	88.0511	97.3242	96.0000

Nakon toga je izračunata matrica potencijalnih koeficijenata. Da bi se izračunala matrica potencijalnih koeficijenata prvo je potrebno odrediti SGU vodiča (5-3).

$$D_{sc} = \sqrt[3]{r_1 \cdot D_{snop}^2} = \sqrt[3]{13.2 \cdot 370^2} = 121.803 \text{ mm} \quad (5 - 3)$$

Kod proračuna za zaštitno uže korišten je vanjski radijus vodiča  $D_{gc} = r_g = 5.25 \text{ mm}$ . Dijagonalni članovi matrice su izračunati prema (5-4), a za zaštitnu užad (5-5).

$$P_{ii} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{H_{ii}}{D_{sc}} \left[ \frac{\text{km}}{\text{F}} \right] \quad (5 - 4)$$

$$P_{ii} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{H_{ii}}{D_{gc}} \left[ \frac{\text{km}}{\text{F}} \right] \quad (5 - 5)$$

Vandijagonalni članovi su određeni izrazom (5-6).

$$P_{ij} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \left[ \frac{km}{F} \right] \quad (5 - 6)$$

Dobivena matrica [P]:

	a	b	c	p	q
a	1.1677e+08	3.5883e+07	2.3894e+07	4.1988e+07	2.6533e+07
b	3.5883e+07	1.1677e+08	3.5883e+07	3.6998e+07	3.6998e+07
c	2.3894e+07	3.5883e+07	1.1677e+08	2.6533e+07	4.1988e+07
p	4.1988e+07	3.6998e+07	2.6533e+07	1.7665e+08	3.2498e+07
q	2.6533e+07	3.6998e+07	4.1988e+07	3.2498e+07	1.7665e+08

Napravljen je inverz matrice [P] pomoću programskog paketa MATLAB te je tako dobivena matrica kapacitivnih koeficijenata [K]:

1.014e-08	-2.140e-09	-8.200e-10	-1.740e-09	-5.600e-10
-2.140e-09	1.062e-08	-2.140e-09	-1.180e-09	-1.180e-09
-8.200e-10	-2.140e-09	1.014e-08	-5.600e-10	-1.740e-09
-1.740e-09	-1.180e-09	-5.600e-10	6.510e-09	-5.600e-10
-5.600e-10	-1.180e-09	-1.740e-09	-5.600e-10	6.510e-09

Matrica kapacitivnih koeficijenata [K] pomnožena sa kružnom frekvencijom  $\omega$  daje matricu kapacitivnih susceptancija [B], a zatim pomoću blok-transformacije eliminirana su zaštitna užad, a faze su označene A, B i C:

	A	B	C
A	3.186e-06	-6.710e-07	-2.580e-07
B	-6.710e-07	3.338e-06	-6.710e-07
C	-2.580e-07	-6.710e-07	3.186e-06



Prema (4-23) i (4-24) izračunati su elementi matrice ekvivalentnih faznih susceptancija, a to je prikazano na (5-7) i (5-8).

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.2367 \cdot 10^{-6} S \quad (5-7)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) = -5.333 \cdot 10^{-7} S \quad (5-8)$$

Pomoću toga izračunate su jedinična nulta, direktna i inverzna susceptancija (5-9) i (5-10).

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.1701 \cdot 10^{-6} S \quad (5-9)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.77 \cdot 10^{-6} S \quad (5-10)$$

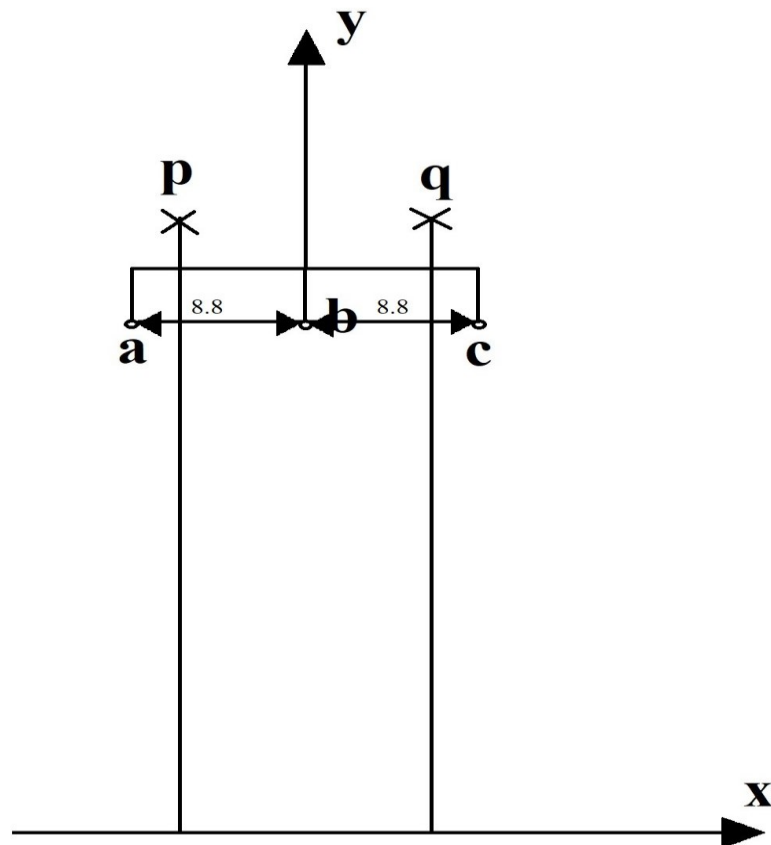
Nulti kapacitet (5-11), te direktni i inverzni (5-12):

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} = 2.3 nF \quad (5-11)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} = 12 nF \quad (5-12)$$

### 5.2.2. Proračun poprečne admitancije – smanjeni razmaci između faza

U ovom proračunu su smanjeni razmaci između faza za 20%. Nove koordinate umanjene za 20% su:  $a(-8.8, 40.0)$ ,  $b(0.0, 40.0)$ ,  $c(8.8, 40.0)$ . Nove koordinate vide se na slici 5.3.



Slika 5.3. Raspored vodiča – umanjen razmak između faza

Na isti način kao u prošlom primjeru su određene koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užadi:  $a'(-8.8, -40.0)$ ,  $b'(0.0, -40.0)$ ,  $c'(8.8, -40.0)$ ,  $p'(-8.0, -48.0)$ ,  $q'(8.0, -48.0)$ . Udaljenosti  $D$  za ovaj primjer iznose:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a	0.0000	8.8000	17.6000	8.0399	18.6075
b	8.8000	0.0000	8.8000	11.3137	11.3137
c	17.6000	8.8000	0.0000	18.6075	8.0399
p	8.0399	11.3137	18.6075	0.0000	16.0000
q	18.6075	11.3137	8.0399	16.0000	0.0000

Udaljnosti  $H$  za ovaj primjer iznose:

	a	b	c	p	q
a'	80.0000	80.4825	81.9131	88.0036	89.5893
b'	80.4825	80.0000	80.4825	88.3629	88.3629
c'	81.9131	80.4825	80.0000	89.5893	88.0036
p'	88.0036	88.3629	89.5893	96.0000	97.3242
q'	89.5893	88.3629	88.0036	97.3242	96.0000

Matrica potencijalnih koeficijenata izračunata je na isti način kao u prethodnom primjeru, SGU vodiča se ne mijenja. Koristeći izraze (5-4), (5-5) i (5-6) dobivena je sljedeća matrica:

	a	b	c	p	q
a	1.1677e+08	3.9839e+07	2.7680e+07	4.3073e+07	2.8290e+07
b	3.9839e+07	1.1677e+08	3.9839e+07	3.6998e+07	3.6998e+07
c	2.7680e+07	3.9839e+07	1.1677e+08	2.8290e+07	4.3073e+07
p	4.3073e+07	3.6998e+07	2.8290e+07	1.7665e+08	3.2498e+07
q	2.8290e+07	3.6998e+07	4.3073e+07	3.2498e+07	1.7665e+08

Inverz matrice:

1.043e-08	-2.480e-09	-9.800e-10	-1.760e-09	-5.900e-10
-2.480e-09	1.095e-08	-2.480e-09	-1.090e-09	-1.090e-09
-9.800e-10	-2.480e-09	1.043e-08	-5.900e-10	-1.760e-09
-1.760e-09	-1.090e-09	-5.900e-10	6.510e-09	-5.400e-10
-5.900e-10	-1.090e-09	-1.760e-09	-5.400e-10	6.510e-09

Pomnožena sa kružnom frekvencijom  $\omega$ :

	A	B	C
A	3.278e-06	-7.790e-07	-3.090e-07
B	-7.790e-07	3.439e-06	-7.790e-07
C	-3.090e-07	-7.790e-07	3.278e-06

Koristeći formule (5-7) i (5-8) iz prethodnog primjera izračunati su elementi matrice ekvivalentnih faznih susceptancija (5-13) i (5-14).

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.3317 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 13)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) = -6.2233 \cdot 10^{-7} S \quad (5 - 14)$$

Nadalje, nulta, direktna i inverzna susceptancija (5-15) i (5-16).

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.08704 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 15)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.95403 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 16)$$

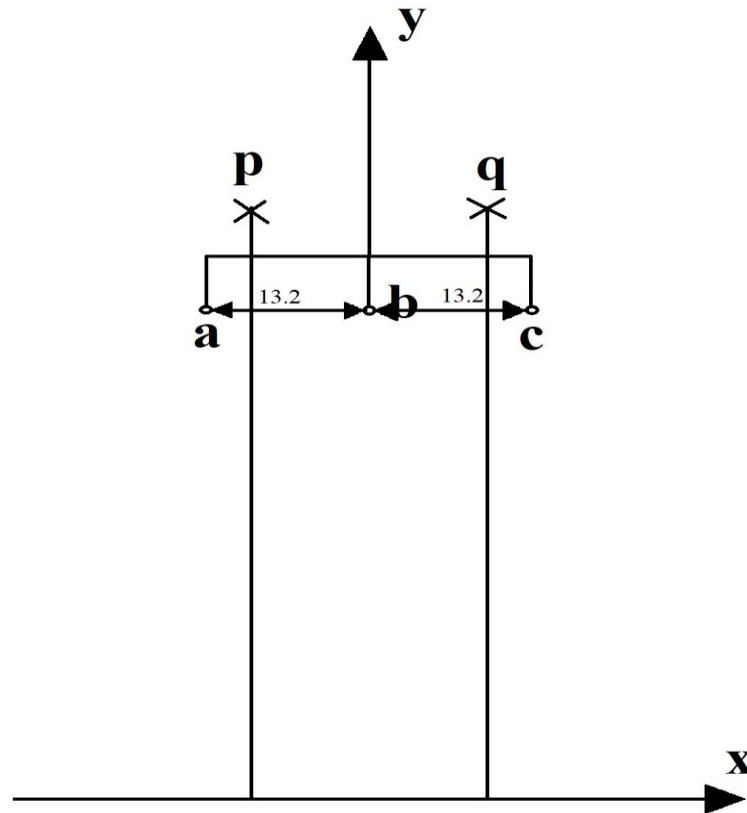
Rješenja ovog primjera (5-17) i (5-18):

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} = 2.214 nF \quad (5 - 17)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} = 12.586 nF \quad (5 - 18)$$

### 5.2.3. Proračun poprečne admitancije – povećani razmaci između faza

U ovom proračunu su povećani razmaci između faza za 20%. Nove koordinate uvećane za 20% su:  $a(-13.2, 40.0)$ ,  $b(0.0, 40.0)$ ,  $c(13.2, 40.0)$ . Nove koordinate vide se na slici 5.4.



Slika 5.4. Raspored vodiča – povećan razmak između faza

Koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užadi:  $a'(-13.2, -40.0)$ ,  $b'(0.0, -40.0)$ ,  $c'(13.2, -40.0)$ ,  $p'(-8.0, -48.0)$ ,  $q'(8.0, -48.0)$ .

Udaljenosti  $D$  izražene u metrima:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a	0.0000	13.2000	26.4000	9.5415	22.6592
b	13.2000	0.0000	13.2000	11.3137	11.3137
c	26.4000	13.2000	0.0000	22.6592	9.5415
p	9.5415	11.3137	22.6592	0.0000	16.0000
q	22.6592	11.3137	9.5415	16.0000	0.0000

Udaljenosti  $H$  izražene u metrima:

	a	b	c	p	q
a'	80.0000	81.0817	84.2435	88.1535	90.5176
b'	81.0817	80.0000	81.0817	88.3629	88.3629
c'	84.2435	81.0817	80.0000	90.5176	88.1535
p'	88.1535	88.3629	90.5176	96.0000	97.3242
q'	90.5176	88.3629	88.1535	97.3242	96.0000

Matrica potencijalnih koeficijenata [P]:

	a	b	c	p	q
a	1.1677e+08	3.2674e+07	2.0886e+07	4.0022e+07	2.4930e+07
b	3.2674e+07	1.1677e+08	3.2674e+07	3.6998e+07	3.6998e+07
c	2.0886e+07	3.2674e+07	1.1677e+08	2.4930e+07	4.0022e+07
p	4.0022e+07	3.6998e+07	2.4930e+07	1.7665e+08	3.2498e+07
q	2.4930e+07	3.6998e+07	4.0022e+07	3.2498e+07	1.7665e+08

Matrica kapacitivnih koeficijenata [K]:

9.90e-09	-1.88e-09	-7.10e-10	-1.65e-09	-5.40e-10
-1.88e-09	1.04e-08	-1.88e-09	-1.26e-09	-1.26e-09
-7.10e-10	-1.88e-09	9.90e-09	-5.40e-10	-1.65e-09
-1.65e-09	-1.26e-09	-5.40e-10	6.48e-09	-5.70e-10
-5.40e-10	-1.26e-09	-1.65e-09	-5.70e-10	6.48e-09

Matrica kapacitivnih susceptancija [B]:

	A	B	C
A	3.109e-06	-5.900e-07	-2.220e-07
B	-5.900e-07	3.271e-06	-5.900e-07
C	-2.220e-07	-5.900e-07	3.109e-06

Elementi matrice ekvivalentnih faznih susceptancija (5-19) i (5-20):

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.163 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 19)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) = -4.6733 \cdot 10^{-7} S \quad (5 - 20)$$

Nulta, direktna i inverzna susceptancija (5-21) i (5-22):

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.22834 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 21)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.63033 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 22)$$

Nulti, direktni i inverzni kapacitet (5-23) i (5-24):

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} = 2.3643 nF \quad (5 - 23)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} = 11.5557 nF \quad (5 - 24)$$

### 5.3. Druga grupa proračuna

Prvi proračun u drugoj grupi je isti kao i u prvoj grupi, odnosno proračun prema zadanim parametrima. Iz tog razloga se taj proračun ne ponavlja, nego su napravljena druga dva proračuna u kojima se mijenja visina faza.

#### 5.3.1. Proračun poprečne admitancije – umanjene visine faza

U ovom proračunu su smanjene visine faza za 20%. Nove koordinate smanjene za 20% su:  $a(-11.0, 32.0)$ ,  $b(0.0, 32.0)$ ,  $c(11.0, 32.0)$ . Koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užadi:  $a'(-11.0, -32.0)$ ,  $b'(0.0, -32.0)$ ,  $c'(11.0, -32.0)$ ,  $p'(-8.0, -48.0)$ ,  $q'(8.0, -48.0)$ .

Udaljenosti  $D$  za ovaj primjer iznose:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a	0.0000	11.0000	22.0000	16.2788	24.8395
b	11.0000	0.0000	11.0000	17.8885	17.8850
c	22.0000	11.0000	0.0000	24.8395	16.2788
p	16.2788	17.8885	24.8395	0.0000	16.0000
q	24.8395	17.8885	16.2788	16.0000	0.0000

Udaljenosti  $H$  za ovaj primjer iznose:

	a	b	c	p	q
a'	64.0000	64.9384	67.6757	80.0562	82.2253
b'	64.9384	64.0000	64.9384	80.3990	80.3990
c'	67.6757	64.9384	64.0000	82.2253	80.0562
p'	80.0562	80.3990	82.2253	96.0000	97.3242
q'	82.2253	80.3990	80.0562	97.3242	96.0000



Matrica potencijalnih koeficijenata [P]:

	a	b	c	p	q
a	1.1276e+08	3.1960e+07	2.0226e+07	2.8672e+07	2.1547e+07
b	3.1960e+07	1.1276e+08	3.1960e+07	2.7051e+07	2.7051e+07
c	2.0226e+07	3.1960e+07	1.1276e+08	2.1547e+07	2.8672e+07
p	2.8672e+07	2.7051e+07	2.1547e+07	1.7665e+08	3.2498e+07
q	2.1547e+07	2.7051e+07	2.8672e+07	3.2498e+07	1.7665e+08

Matrica kapacitivnih koeficijenata [K]:

1.003e-08	-2.220e-09	-8.200e-10	-1.090e-09	-5.500e-10
2.220e-09	1.052e-08	-2.220e-09	-8.300e-10	-8.300e-10
-8.200e-10	-2.220e-09	1.003e-08	-5.500e-10	-1.090e-09
-1.090e-09	-8.300e-10	-5.500e-10	6.180e-09	-7.900e-10
-5.500e-10	-8.300e-10	-1.090e-09	-7.900e-10	6.180e-09

Matrica kapacitivnih susceptancija [B]:

	A	B	C
A	3.15e-06	-6.96e-07	-2.58e-07
B	-6.96e-07	3.31e-06	-6.96e-07
C	-2.58e-07	-6.96e-07	3.15e-06

Elementi matrice ekvivalentnih faznih susceptancija (5-25) i (5-26):

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.202 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 25)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) = -5.5 \cdot 10^{-7} S \quad (5 - 26)$$

Nulta, direktna i inverzna susceptancija (5-27) i (5-28):

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.102 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 27)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.752 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 28)$$

Nulti, direktni i inverzni kapacitet (5-29) i (5-30):

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} = 2.2303 nF \quad (5 - 29)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} = 11.943 nF \quad (5 - 30)$$

### 5.3.2. Proračun poprečne admitancije – uvećane visine faza

U ovom proračunu su uvećane visine faza za 20%. Nove koordinate uvećane za 20% su: a(-11.0, 48.0), b(0.0, 48.0), c(11.0, 48.0). Koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užadi: a'(-11.0, -48.0), b'(0.0, -48.0), c'(11.0, -48.0), p'(-8.0, -48.0), q'(8.0, -48.0).

Udaljenosti  $D$  za ovaj primjer iznose:

Udaljenost	a	b	c	p	q
a	0	11	22	3	19
b	11	0	11	8	8
c	22	11	0	19	3
p	3	8	19	0	16
q	19	8	3	16	0

Udaljenosti  $H$  za ovaj primjer iznose:

	a	b	c	p	q
a'	96.0000	96.6282	98.4886	96.0469	97.8621
b'	96.6282	96.0000	96.6282	96.3328	96.3328
c'	98.4886	96.6282	96.0000	97.8621	96.0469
p'	96.0469	96.3328	97.8621	96.0000	97.3242
q'	97.8621	96.3328	96.0469	97.3242	96.0000

Matrica potencijalnih koeficijenata [P]:

	a	b	c	p	q
a	1.2005e+08	3.9114e+07	2.6980e+07	6.2392e+07	2.9504e+07
b	3.9114e+07	1.2005e+08	3.9114e+07	4.4791e+07	4.4791e+07
c	2.6980e+07	3.9114e+07	1.2005e+08	2.9504e+07	6.2392e+07
p	6.2392e+07	4.4791e+07	2.9504e+07	1.7665e+08	3.2498e+07
q	2.9504e+07	4.4791e+07	6.2392e+07	3.2498e+07	1.7665e+08

Matrica kapacitivnih koeficijenata [K]:

1.089e-08	-1.940e-09	-8.000e-10	-3.130e-09	-4.700e-10
-1.940e-09	1.066e-08	-1.940e-09	-1.430e-09	-1.430e-09
-8.000e-10	-1.940e-09	1.089e-08	-4.700e-10	-3.130e-09
-3.130e-09	-1.430e-09	-4.700e-10	7.260e-09	-2.900e-10
-4.700e-10	-1.430e-09	-3.130e-09	-2.900e-10	7.260e-09

Matrica kapacitivnih susceptancija [B]:

	A	B	C
A	3.420e-06	-6.100e-07	-2.520e-07
B	-6.100e-07	3.350e-06	-6.100e-07
C	-2.520e-07	-6.100e-07	3.420e-06

Elementi matrice ekvivalentnih faznih susceptancija (5-31) i (5-32):

$$B_s = \frac{1}{3}(B_{aa} + B_{bb} + B_{cc}) = 3.3967 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 31)$$

$$B_m = \frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) = -4.9067 \cdot 10^{-7} S \quad (5 - 32)$$

Nulta, direktna i inverzna susceptancija (5-33) i (5-34):

$$B_0 = B_s + 2 \cdot B_m = 2.41536 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 33)$$

$$B_d = B_i = B_s - B_m = 3.88737 \cdot 10^{-6} S \quad (5 - 34)$$

Nulti, direktni i inverzni kapacitet (5-35) i (5-36):

$$C_0 = \frac{B_0}{(3 \cdot \omega)} = 2.56278 \text{ nF} \quad (5 - 35)$$

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} = 12.37388 \text{ nF} \quad (5 - 36)$$

## 5.4. Usporedba rezultata

Ovdje su uspoređeni rezultati proračuna u kojem su korišteni različiti razmaci vodiča i različite visine vodiča sa proračunom u kojem su korišteni zadani podaci dalekovoda. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Rezultati proračuna

Kapacitet	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5
Direktni	12.0000 nF	12.5860 nF	11.5557 nF	11.9430 nF	12.37388 nF
Inverzni	12.0000 nF	12.5860 nF	11.5557 nF	11.9430 nF	12.37388 nF
Nulti	2.3.0000 nF	2.2140 nF	2.3643 nF	2.2303 nF	2.56278 nF

Ukoliko vodiči imaju manji razmak za 20% onda je nulti kapacitet manji za 3.74%, te direktni i inverzni kapacitet veći za 4.88%. Ukoliko vodiči imaju veći razmak za 20% onda je nulti kapacitet veći za 2.8%, te direktni i inverzni kapacitet manji za 3.7%. Ako se visine smanje nulti kapacitet će se također smanjiti za 3.03%, a direktni i inverzni kapacitet će se smanjiti za 0.475%. Ako se visine povećaju nulti kapacitet će se povećati za 11.43%, a direktni i inverzni će se povećati za 3.16%. Postotna razlika u odnosu na prvi slučaj prikazana je u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Postotna razlika u odnosu na slučaj 1

Kapacitet	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5
Direktni	4.88%	3.7%	0.475%	3.16%
Inverzni	4.88%	3.7%	0.475%	3.16%
Nulti	3.74%	2.8%	3.03%	11.43%

Slučaj pet ima najveću postotnu razliku nultog kapaciteta u odnosu na prvi slučaj. A i vidljivo je da se mijenjanjem visine mijenja nulti kapacitet više od direktnog i inverznog. Razlog tome je što na nulti kapacitet glavni utjecaj imaju zemlja i zaštitno uže.

## 6. ZAKLJUČAK

U završnom radu napravljen je proračun poprečne admitancije, opisane su karakteristične veličine voda jedna po jedna, a veća pažnja posvećena je kapacitetu i odvodu voda. Opisan je postupak proračuna poprečne admitancije koji se sastoji od pet koraka. Pomoću tih pet koraka napravljeno je šest različitih primjera proračuna koji su podijeljeni u dvije grupe. U prvoj grupi napravljen je proračun prema zadanim parametrima, te još dva proračuna u kojima su mijenjani razmaci između faza. Na taj način je zaključeno kako se mijenja iznos admitancije odnosno susceptancije jer je konduktancija zanemarena. Zaključak prve grupe proračuna je sljedeći: ukoliko se razmak između faza smanji, onda se smanjuje nulti kapacitet, te povećava direktni i inverzni, a ukoliko se razmak između faza poveća onda se povećava nulti kapacitet i smanjuje direktni i inverzni. U drugoj grupi napravljen je proračun prema zadanim parametrima, te još dva proračuna u kojima se mijenjane visine faza. Nakon izvršenog proračuna druge grupe zaključeno je: ukoliko se smanjuju visine faza onda se smanjuje nulti, direktni i inverzni kapacitet, a ukoliko se visine faza povećavaju, onda se povećava nulti, direktni i inverzni kapacitet. Dakle, pri modeliranju ukoliko treba sva tri kapaciteta povećati ili smanjiti, to se može napraviti mijenjanjem visine, a zatim mijenjanjem razmaka između faza svaki se kapacitet posebno korigira.

## LITERATURA

- [1] Bijelić, D.: Proračun jediničnog kapaciteta dalekovoda pomoću računala, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.
- [2] Jesenović, V.: Proračun jediničnog induktiviteta dalekovoda pomoću računala, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.
- [3] Šaina, G.: Nadomjesni modeli vodova, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2015.
- [4] Mamić, K.: Opravdanost upotrebe nadomjesne pi sheme voda za različite duljine prijenosnih vodova, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2021.
- [5] Horvatić, B.: Proračun elektroenergetskih mreža sa više naponskih razina, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [6] Luo, J., Zhang, K., Chen, T., Zhao, G., Wang, P., Feng, S.: Distributed parameter circuit model for transmission line, Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, 2011.
- [7] Benović, K.: Distantna zaštita 400 kV dalekovoda, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.
- [8] Liao, Y.: Some Algorithms for Transmission Line Parameter Estimation, University of Tennessee Space Institute, Tullahoma, 2009.
- [9] Čošković, B.: Usporedba svojstava nadzemnog dalekovoda i podzemnog kabela za 100 kV prijenosnu mrežu, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [10] Dubravac, I.: Opravdanost zanemarenja kapaciteta vodova u distributivnim mrežama, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2021.

- [11] Brkić, N.: Mehanički proračun vodiča, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2015.
- [12] Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS), <https://www.hops.hr/dalekovodi>
- [13] Ožegović, M., Ožegović, K.: Električne energetske mreže I. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Split, 1996.
- [14] Saadat, H.: Power System Analysis. WCB McGraw-Hill, New York, 1999.
- [15] Jozsa, L.: Parametri nadzemnih vodova, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2006.
- [16] Končar: Tehnički priručnik, 5. Izdanje, Končar elektroindustrija, Zagreb, 1991.



## SAŽETAK

U ovome završnom radu je bilo potrebno izvesti proračun poprečne admitancije, te zaključiti kako promjena razmaka između faza i visina faza utječu na nju. Proračun je izveden za 400 kV dalekovod. U teorijskom dijelu rada je ukratko napisano o nadzemnim vodovima i karakterističnim veličinama, te je još dodatno opisan kapacitet i odvod, a s njima kritični napon i gubici korone. U drugom dijelu rada obrađeno je nekoliko primjera za izračun admitancije.

**Ključne riječi:** nadzemni vodovi, parametri nadzemnih vodova, dalekovod, poprečna admitancija

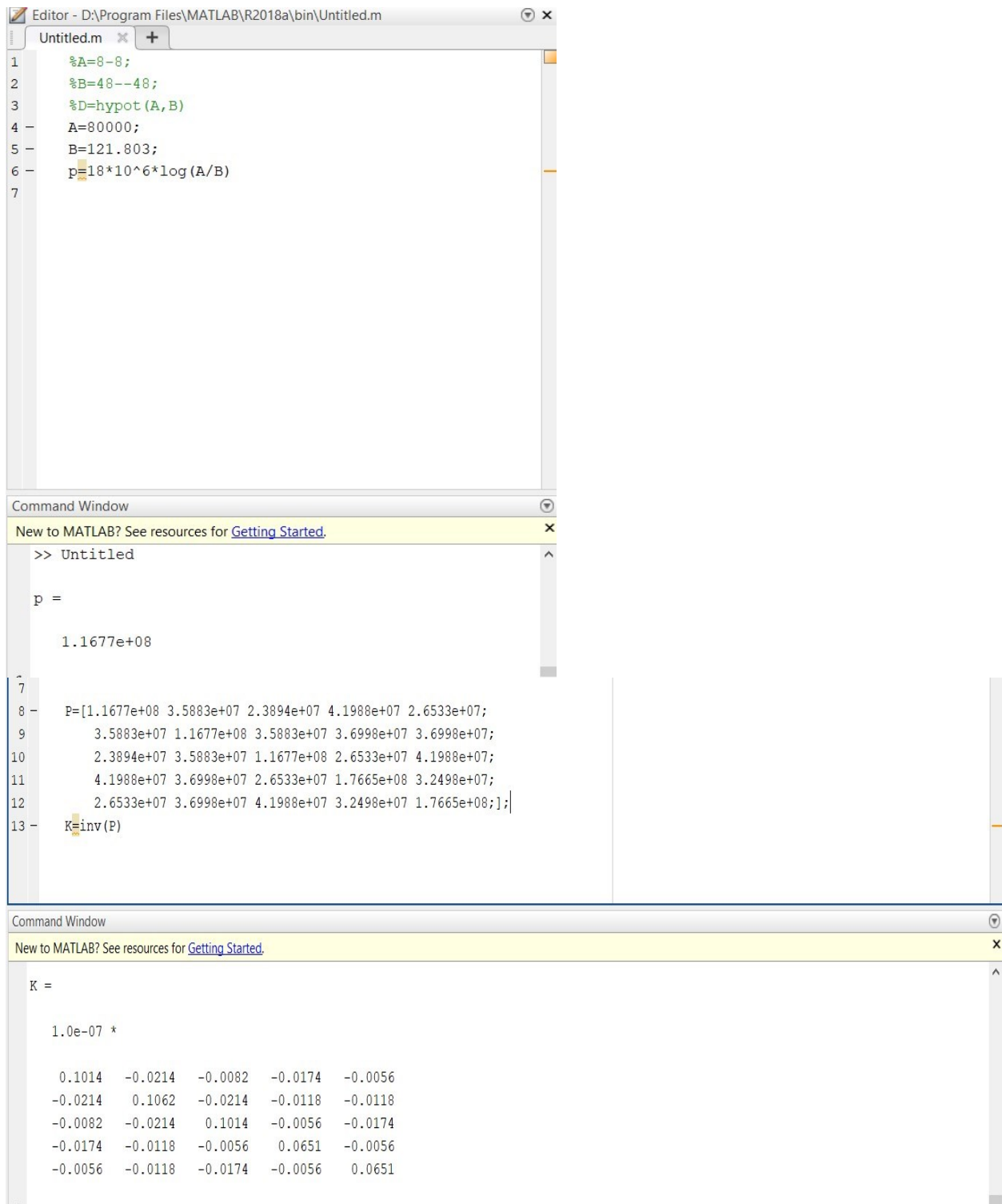
## ABSTRACT

In this final paper, it was necessary to do the calculation of transverse admittance, and conclude how can the change in distance between the phases affects it. The calculation was performed for a 400 kV transmission line. In the theoretical part of the paper, it is shortly written about overhead lines and characteristic sizes, and the capacity and drain are additionally described and also the critical voltage and corona losses. In the second part of the paper, several examples of calculations of transverse admittance have been made.

**Keywords:** overhead lines, parameters of overhead lines, transmission line, transverse admittance

## PRILOZI

U prilogu su stavljeni screenshot-ovi kodova korišteni u MATLAB-u kao pomoć pri izračunu udaljenosti D i H, elemenata matrice potencijalnih koeficijenata [P], inverza matrice [P], te množenja tog inverza sa kružnom frekvencijom.



```
Editor - D:\Program Files\MATLAB\R2018a\bin\Untitled.m
Untitled.m
1 %A=8-8;
2 %B=48--48;
3 %D=hypot(A,B)
4 A=80000;
5 B=121.803;
6 p=18*10^6*log(A/B)
7

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> Untitled

p =

    1.1677e+08

7
8 P=[1.1677e+08 3.5883e+07 2.3894e+07 4.1988e+07 2.6533e+07;
9     3.5883e+07 1.1677e+08 3.5883e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10    2.3894e+07 3.5883e+07 1.1677e+08 2.6533e+07 4.1988e+07;
11    4.1988e+07 3.6998e+07 2.6533e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12    2.6533e+07 3.6998e+07 4.1988e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 K=inv(P)

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

K =

    1.0e-07 *

    0.1014  -0.0214  -0.0082  -0.0174  -0.0056
   -0.0214   0.1062  -0.0214  -0.0118  -0.0118
   -0.0082  -0.0214   0.1014  -0.0056  -0.0174
   -0.0174  -0.0118  -0.0056   0.0651  -0.0056
   -0.0056  -0.0118  -0.0174  -0.0056   0.0651
```

```

8 - P=[1.1677e+08 3.5883e+07 2.3894e+07 4.1988e+07 2.6533e+07;
9     3.5883e+07 1.1677e+08 3.5883e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10    2.3894e+07 3.5883e+07 1.1677e+08 2.6533e+07 4.1988e+07;
11    4.1988e+07 3.6998e+07 2.6533e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12    2.6533e+07 3.6998e+07 4.1988e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 - K=inv(P);
14 - w=2*pi*50;
15 - B=w*K
16
17

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

```

B =

1.0e-05 *

    0.3186   -0.0671   -0.0258   -0.0545   -0.0176
 -0.0671    0.3338   -0.0671   -0.0371   -0.0371
 -0.0258   -0.0671    0.3186   -0.0176   -0.0545
 -0.0545   -0.0371   -0.0176    0.2044   -0.0175
 -0.0176   -0.0371   -0.0545   -0.0175    0.2044

```

Editor - D:\Program Files\MATLAB\R2018a\bin\Untitled.m

```

Untitled.m x +
1     %A=-8-8;
2     %B=48--48;
3     %D=hypot(A,B)
4 -   A=88.3629 ;
5 -   B=11.3137 ;
6 -   p=18*10^6*log(A/B)
7
8     %P=[1.1677e+08 3.5883e+07 2.3894e+07 4.1988e+07 2.6533e+
9     %   3.5883e+07 1.1677e+08 3.5883e+07 3.6998e+07 3.6998e
10    %   2.3894e+07 3.5883e+07 1.1677e+08 2.6533e+07 4.1988e
11    %   4.1988e+07 3.6998e+07 2.6533e+07 1.7665e+08 3.2498e
12    %   2.6533e+07 3.6998e+07 4.1988e+07 3.2498e+07 1.7665e
13    %K=inv(P);
14    %w=2*pi*50;
15    %B=w*K

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

```

p =

    3.9839e+07

>> Untitled

p =

    3.6998e+07

```

```

1 %A=-8-8;
2 %B=48--48;
3 %D=hypot(A,B)
4 %A=97.3242 ;
5 %B=16 ;
6 %p=18*10^6*log(A/B)
7
8 P=[1.1677e+08 3.9839e+07 2.7680e+07 4.3073e+07 2.8290e+0
9 3.9839e+07 1.1677e+08 3.9839e+07 3.6998e+07 3.6998e+
10 2.7680e+07 3.9839e+07 1.1720e+08 2.8290e+07 4.3073e+0
11 4.3073e+07 3.6998e+07 2.8290e+07 1.7665e+08 3.2498e+
12 2.8290e+07 3.6998e+07 4.3073e+07 3.2498e+07 1.7665e+
13 K=inv(P)
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

```

K =
1.0e-07 *
0.1043 -0.0248 -0.0098 -0.0176 -0.0059
-0.0248 0.1094 -0.0247 -0.0109 -0.0109
-0.0098 -0.0247 0.1039 -0.0059 -0.0175
-0.0176 -0.0109 -0.0059 0.0651 -0.0055
-0.0059 -0.0109 -0.0175 -0.0055 0.0651

```

```

8 P=[1.1677e+08 3.9839e+07 2.7680e+07 4.3073e+07 2.8290e+07;
9 3.9839e+07 1.1677e+08 3.9839e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10 2.7680e+07 3.9839e+07 1.1720e+08 2.8290e+07 4.3073e+07;
11 4.3073e+07 3.6998e+07 2.8290e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12 2.8290e+07 3.6998e+07 4.3073e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 K=inv(P);
14 w=2*pi*50;
15 B=w*K

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

```

B =
1.0e-05 *
0.3278 -0.0780 -0.0308 -0.0553 -0.0185
-0.0780 0.3438 -0.0776 -0.0343 -0.0343
-0.0308 -0.0776 0.3264 -0.0184 -0.0550
-0.0553 -0.0343 -0.0184 0.2046 -0.0171
-0.0185 -0.0343 -0.0550 -0.0171 0.2046

```

```

4 - A=90.5176 ;
5 - B=22.6592 ;
6 - p=18*10^6*log(A/B)
7
8 %P=[1.1677e+08 3.9839e+07 2.7680e+07 4.3073e+07 2.8290e
9 % 3.9839e+07 1.1677e+08 3.9839e+07 3.6998e+07 3.6998
10 % 2.7680e+07 3.9839e+07 1.1677e+08 2.8290e+07 4.3073
11 % 4.3073e+07 3.6998e+07 2.8290e+07 1.7665e+08 3.2498
12 % 2.8290e+07 3.6998e+07 4.3073e+07 3.2498e+07 1.7665
13 %K=inv(P);
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K
16 <

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

p =
    3.6998e+07

>> Untitled

p =
    2.4930e+07

7
8 - P=[1.1677e+08 3.2674e+07 2.0886e+07 4.0022e+07 2.4930e+07;
9     3.2674e+07 1.1677e+08 3.2674e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10    2.0886e+07 3.2674e+07 1.1677e+08 2.4930e+07 4.0022e+07;
11    4.0022e+07 3.6998e+07 2.4930e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12    2.4930e+07 3.6998e+07 4.0022e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 - K=inv(P)
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K
16
17 >

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

K =

    1.0e-07 *

    0.0990    -0.0188    -0.0071    -0.0165    -0.0054
   -0.0188     0.1041    -0.0188    -0.0126    -0.0126
   -0.0071    -0.0188     0.0990    -0.0054    -0.0165
   -0.0165    -0.0126    -0.0054     0.0648    -0.0057
   -0.0054    -0.0126    -0.0165    -0.0057     0.0648

```

```

7
8 - P=[1.1677e+08 3.2674e+07 2.0886e+07 4.0022e+07 2.4930e+07;
9     3.2674e+07 1.1677e+08 3.2674e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10    2.0886e+07 3.2674e+07 1.1677e+08 2.4930e+07 4.0022e+07;
11    4.0022e+07 3.6998e+07 2.4930e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12    2.4930e+07 3.6998e+07 4.0022e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 - K=inv(P);
14 - w=2*pi*50;
15 - B=w*K
16
17

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

B =

```

1.0e-05 *

    0.3109    -0.0590    -0.0222    -0.0518    -0.0170
   -0.0590     0.3271    -0.0590    -0.0395    -0.0395
   -0.0222    -0.0590     0.3109    -0.0170    -0.0518
   -0.0518    -0.0395    -0.0170     0.2036    -0.0180
   -0.0170    -0.0395    -0.0518    -0.0180     0.2036

```

```

4 - A=64.9384 ;
5 - B=11 ;
6 - p=18*10^6*log(A/B)
7
8 %P=[1.1677e+08 3.2674e+07 2.0886e+07 4.0022e+07 2.4930e+07;
9 %   3.2674e+07 1.1677e+08 3.2674e+07 3.6998e+07 3.6998e+07;
10 %   2.0886e+07 3.2674e+07 1.1677e+08 2.4930e+07 4.0022e+07;
11 %   4.0022e+07 3.6998e+07 2.4930e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12 %   2.4930e+07 3.6998e+07 4.0022e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 %K=inv(P);
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

p =

```
1.7665e+08
```

>> Untitled

p =

```
3.1960e+07
```

```

7
8 - P=[1.1276e+08 3.1960e+07 2.0226e+07 2.8672e+07 2.1547e+07;
9       3.1960e+07 1.1276e+08 3.1960e+07 2.7051e+07 2.7051e+07;
10      2.0226e+07 3.1960e+07 1.1276e+08 2.1547e+07 2.8672e+07;
11      2.8672e+07 2.7051e+07 2.1547e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12      2.1547e+07 2.7051e+07 2.8672e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 - K=inv(P)
14   %w=2*pi*50;
15   %B=w*K

```

Command Window  
 New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

K =

1.0e-07 *

    0.1003   -0.0222   -0.0082   -0.0109   -0.0055
   -0.0222    0.1052   -0.0222   -0.0083   -0.0083
   -0.0082   -0.0222    0.1003   -0.0055   -0.0109
   -0.0109   -0.0083   -0.0055    0.0618   -0.0079
   -0.0055   -0.0083   -0.0109   -0.0079    0.0618

```

```

8 - P=[1.1276e+08 3.1960e+07 2.0226e+07 2.8672e+07 2.1547e+07;
9       3.1960e+07 1.1276e+08 3.1960e+07 2.7051e+07 2.7051e+07;
10      2.0226e+07 3.1960e+07 1.1276e+08 2.1547e+07 2.8672e+07;
11      2.8672e+07 2.7051e+07 2.1547e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12      2.1547e+07 2.7051e+07 2.8672e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];
13 - K=inv(P);
14 - w=2*pi*50;
15 - B=w*K

```

Command Window  
 New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

B =

1.0e-05 *

    0.3150   -0.0696   -0.0258   -0.0341   -0.0173
   -0.0696    0.3306   -0.0696   -0.0260   -0.0260
   -0.0258   -0.0696    0.3150   -0.0173   -0.0341
   -0.0341   -0.0260   -0.0173    0.1940   -0.0247
   -0.0173   -0.0260   -0.0341   -0.0247    0.1940

```

```

1 %A=11-8;
2 %B=48--48;
3 %D=hypot(A,B)
4 A=97.3242 ;
5 B=16 ;
6 p=18*10^6*log(A/B)
7
8 %P=[1.1276e+08 3.1960e+07 2.0226e+07 2.8672e+07 2.1547e+07;
9 % 3.1960e+07 1.1276e+08 3.1960e+07 2.7051e+07 2.7051e+07;
10 % 2.0226e+07 3.1960e+07 1.1276e+08 2.1547e+07 2.8672e+07;
11 % 2.8672e+07 2.7051e+07 2.1547e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12 % 2.1547e+07 2.7051e+07 2.8672e+07 3.2498e+07 1.7665e+08;];
13 %K=inv(P);
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K

```

Command Window  
 New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

p =
    6.2392e+07
|
>> Untitled

p =
    3.2498e+07
,
8 P=[1.2005e+08 3.9114e+07 2.6980e+07 6.2392e+07 2.9504e+07;
9 3.9114e+07 1.2005e+08 3.9114e+07 4.4791e+07 4.4791e+07;
10 2.6980e+07 3.9114e+07 1.2005e+08 2.9504e+07 6.2392e+07;
11 6.2392e+07 4.4791e+07 2.9504e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;
12 2.9504e+07 4.4791e+07 6.2392e+07 3.2498e+07 1.7665e+08;];
13 K=inv(P)
14 %w=2*pi*50;
15 %B=w*K

```

Command Window  
 New to MATLAB? See resources for [Getting Started.](#)

```

K =

    1.0e-07 *

    0.1089    -0.0194    -0.0080    -0.0313    -0.0047
   -0.0194     0.1066    -0.0194    -0.0143    -0.0143
   -0.0080    -0.0194     0.1089    -0.0047    -0.0313
   -0.0313    -0.0143    -0.0047     0.0726    -0.0029
   -0.0047    -0.0143    -0.0313    -0.0029     0.0726

```



```
8 - P=[1.2005e+08 3.9114e+07 2.6980e+07 6.2392e+07 2.9504e+07;  
9     3.9114e+07 1.2005e+08 3.9114e+07 4.4791e+07 4.4791e+07;  
10    2.6980e+07 3.9114e+07 1.2005e+08 2.9504e+07 6.2392e+07;  
11    6.2392e+07 4.4791e+07 2.9504e+07 1.7665e+08 3.2498e+07;  
12    2.9504e+07 4.4791e+07 6.2392e+07 3.2498e+07 1.7665e+08];  
13 - K=inv(P);  
14 - w=2*pi*50;  
15 - B=w*K  
16  
17  
< >
```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

B =

1.0e-05 \*

0.3420	-0.0610	-0.0252	-0.0984	-0.0146
-0.0610	0.3350	-0.0610	-0.0449	-0.0449
-0.0252	-0.0610	0.3420	-0.0146	-0.0984
-0.0984	-0.0449	-0.0146	0.2281	-0.0090
-0.0146	-0.0449	-0.0984	-0.0090	0.2281