

# Ovisnost induktiviteta nadzemnih vodova o položaju vodiča na stupu

---

Šahinović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:165701>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**OVISNOST INDUKTIVITETA NADZEMNIH VODOVA O  
POLOŽAJU VODIČA NA STUPU**

Rijeka, rujan 2023.

Ivan Šahinović

0069081822

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**OVISNOST INDUKTIVITETA NADZEMNIH VODOVA O  
POLOŽAJU VODIČA NA STUPU**

Mentorica: Mr. sc. Marijana Živci Đurović, v.pred.

Rijeka, rujan 2023.

Ivan Šahinović

0069081822

Rijeka, 15. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električne energetske mreže**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivan Šahinović (0069081822)**  
Studij: **Preddiplomski stručni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Ovisnost induktiviteta nadzemnih vodova o položaju vodiča na stupu /  
Dependance of the inductance of overhead lines on the position of the  
conductor on the pole**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati jedinični induktivitet kao konstantu voda. Usporediti vrijednosti induktiviteta kod prepletenog i neprepletenog voda u ovisnosti o položaju vodiča na stupu za različite duljine vodova. Analizirati kako ta promjena vrijednosti induktiviteta utječe na pad napona na vodu te gubitke snage.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:

Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

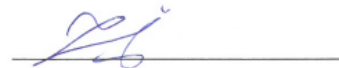
Prof. dr. sc. Saša Vlahinić

## **Izjava o samostalnoj izradbi rada**

U skladu s odredbama članka 7, stavka 1, Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih prijediplomskih studija, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad naziva "OVISNOST INDUKTIVITETA NADZEMNIH VODOVA O POLOŽAJU VODIČA NA STUPU" pod vodstvom mentorice Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred. primjenjujući znanja stečena tokom studija.

Rijeka, spranj 2023.

Ivan Šahinović

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'IŠ', is written over a horizontal line.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	6
2. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI .....	7
2.1 Podjela vodova i njihovi elementi .....	7
2.1.1. Vodiči .....	8
2.1.2. Izvedba vodiča.....	9
2.1.3. Izolatori .....	11
2.1.4. Pribor .....	13
2.1.5. Stupovi .....	15
2.1.6. Temelji .....	18
2.1.7. Uzemljenje .....	19
2.1.9. Pogonska problematika nadzemnih vodova.....	21
2.2. Parametri elektroenergetskih vodova .....	22
2.2.1. Osnovne konstante voda.....	22
2.2.2. Nadomjesni modeli elektroenergetskih vodova s koncentriranim parametrima	23
3. MATRICE JEDINIČNIH KONSTANTI VODA .....	23
3.1. Induktivitet.....	23
3.2. Ulančeni tok punog cilindričnog vodiča.....	24
3.2.1. Opća formula za ulančeni tok.....	25
3.3. Postupak srednjih geometrijskih udaljenosti (metoda SGU).....	26
3.4. Preplet.....	31
3.5. Induktivitet kabela .....	33
4. USPOREDBA VRIJEDNOSTI INDUKTIVITETA KOD PREPLETENOG I NEPREPLETENOG VODA .....	34
4.1. Induktivitet voda.....	34
4.2. Pad napona i jalova snaga.....	40
4.4. Padovi napona i gubici snage kod promjene vrijednosti induktiviteta .....	43
5. ANALIZA PROMJENE VRIJEDNOSTI VODA .....	49
5.1. Sredstva i mjere za smanjenje pada napona .....	49
5.2. Smanjenje reaktancije.....	49
5.3. Smanjenje jalove snage u mreži .....	50
6. ZAKLJUČAK .....	53
7. LITERATURA.....	55
8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLJESKOM JEZIKU .....	57

9. POPIS SLIKA .....	58
10. POPIS TABLICA.....	59

## 1. UVOD

Jedan od tehnički najsloženijih i najvećih sustava na zemlji je elektroenergetska mreža. Funkcija sustava je sigurna, kvalitetna, pouzdana i ekonomična opskrba potrošača električnom energijom. Četiri glavna dijela elektroenergetskog sustava su: proizvođači električne energije, prijenos, razdjela i potrošači.

Cilj rada je opisati ovisnost induktiviteta nadzemnih vodova o položaju vodiča na stupu. Pri tome je potrebno opisati jedinični induktivitet kao konstantu voda. Usporediti određene vrijednosti induktiviteta kod prepletenog i neprepletenog voda u ovisnosti o položaju vodiča na stupu za različite duljine vodova. a nakon toga provesti analizu kako promjena vrijednosti induktiviteta utječe na pad napona i gubitke snage. Induktivitet ima svojstvo električnog vodiča, a to je opiranje promjeni jakosti električne struje. U nastavku rada upoznat će se pojam induktiviteta voda i njegova funkcija u elektroenergetskom sustavu. Uz to proći će se osnovne elemente nadzemnih elektroenergetskih vodova, pri čemu će se opisati svaki element zasebno. Položaj i duljina voda uveliko utječe na vrijednost induktiviteta u mreži. Putem proračuna vrijednosti induktiviteta prepletenog i neprepletenog voda, analizirat će se utjecaj promjene induktiviteta na pad napona i gubitak snage na vodu. U radu će se opisati parametri elektroenergetskih vodova, prepleti, metoda srednjih geometrijskih udaljenosti, proračun pada napona i gubitaka snaga, te će sve biti potkrijepljeno računskim primjerima. Ukratko će se analizirati mogućnosti smanjenja pada napona te jalove snage u mreži .



## 2. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

### 2.1 Podjela vodova i njihovi elementi

Prilikom prijenosa električne energije na veće udaljenosti koriste se kabeli ili nadzemni vodovi. Financijski su kabeli skuplji od nadzemnih vodova, pa se kabeli koriste onda kada je to potrebno ovisno o urbanističkim ili tehničkim razlozima. Popravak očiglednog kvara (proboj izolacije) kod kabela traje duže nego od nadzemnog voda. Ako je organizacija dobra popravak kabela bit će precizan i efikasan. Popravak masnih kabela niskog i srednjeg napona traje u prosjeku 3 dana, kod visokonaponskih uljnih kabela traje otprilike 12 dana, a kod visokonaponskih plinskih kabela popravak može trajati čak do 30 dana. Kod nadzemnih vodova trajanje popravka je kraće nego kod kabela tako da popravak traje minimalno jedan dan. Pod trajanje popravaka misli se na vrijeme potrebno za pripremu, organizaciju, prijevoz radnika, utvrđivanje mjesta kvara, materijala i alata, za otkop kabela i na kraju za sam popravak. [1]

Nadzemne vodovi mogu se podijeliti prema:

- nazivnom naponu voda,
- broju strujnih krugova (trojki),
- materijalima i konstrukcijama vodiča,
- materijalima i konstrukcijama stupova, itd.

Glavni elementi nadzemnog voda su:

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

### 2.1.1. Vodiči

Glavni element električnog voda je vodič čija je funkcija voditi električnu struju. Pri izradi električnih vodiča nadzemnih vodova uzimaju se različite vrste materijala. Prilikom odabira materijala traži se prihvatljiva cijena, otpornost protiv oštećenja, velika mehanička čvrstoća, dobra električna vodljivost, dobra mogućnost obrade te otpornost na starenje i koroziju. Nije moguće pronaći sva svojstva vodiča u jednom materijalu pa je potrebno kombinirati različite materijale.

Bakar po svojim karakteristikama gledajući sa ekonomskog stajališta ima najbolja električna svojstva. Kod nadzemnih vodova izbjegava se njegova upotreba osim u određenim slučajevima (npr. kod kontaktne mreže za električnu vuču). Bakar se također koristi i u drugim granama industrije zbog svojih dobrih karakteristika.

Aluminij dominira kod materijala za izradu vodiča za nadzemne vodove.

Konstanta materijala  $\alpha$  za bakar i aluminij, gdje je  $\alpha$  omjer specifične mase i specifične vodljivosti iznosi:

$$\alpha_{cu} = \frac{8.9 \times 10^3}{56 \times 10^6} = 150 \times 10^{-6} \frac{\Omega kg}{m^2} \quad (2.1)$$
$$\alpha_{al} = \frac{2.7 \times 10^3}{34.8 \times 10^6} = 77 \times 10^{-6} \frac{\Omega kg}{m^2}$$

Bakar je upola teži od aluminija tj. pola kilograma aluminija odgovara otprilike kilogramu bakra. Omjer cijene po jedinici mase otprilike je 1:2, 1:2,5 u korist aluminija te je iz tog razloga aluminij prisutniji nego bakar u izgradnji nadzemnih vodova, ali u obliku kombiniranih vodiča i slitina.

Čelik ima odlična mehanička svojstva, ali ima relativno loša električna svojstva. Zbog magnetskog zasićenja i magnetske permabilnosti, omski je otpor čeličnih vodiča nelinearan i zbog toga raste naglo sa strujnim opterećenjem. Čelik se koristi za fazne vodiče (npr. za savladavanje velikih raspona), pri čemu se daje prednost kombinaciji aluminija i čelika. Vodiči od čelika se koriste kao zaštitna užad, ali opet prednost imaju vodiči s boljom vodljivošću. Čelik se najčešće koristi u kombinaciji sa nekim drugim materijalom zbog svojih mehaničkih karakteristika. U slučaju korozije čelični vodiči se štite pocinčavanjem.

Bronca je općenito bakrena slitina koja sadržava više od 60% bakra uz dodatak jednog ili više legiranih elemenata (kositar, silicij, fosfor, aluminij ili cink). Svojstvena im je velika čvrstoća i tvrdoća u odnosu na bakar, kao i otpornost na koroziju.

Alučel (Al/Č) je vodič s jezgrom od čelične žice ili užeta i perifernim žicama od aluminija. Uloga čelika je izdržati mehanička opterećenja, dok aluminij ima zadatak električnog vodiča. Koriste se različiti omjeri presjeka aluminij-čelika ovisno o potrebi. [1]

Postoji još mnogo vrsta materijala koji se koriste za vodiče nadzemnih vodova, ali nisu toliko prisutni u upotrebi. [6]

### 2.1.2. Izvedba vodiča

Homogena ili nehomogena žica kao vodič koristi se za vodove niskog napona radi malih raspona i presjeka. Maksimalni dopušteni presjek bakrene žice je  $16 \text{ mm}^2$  za raspone do  $80 \text{ m}$ . Užeta su standardni oblik za vodiče nadzemnih vodova. Gibljivost užeta ima prednost naspram žice istog presjeka. Normalno ili standardno izvedeno uže čini ono uže kojemu su sve žice istog presjeka. U svakom sloju ima točno određeni broj žica, a ukupni broj žica  $n$  iznosi:

$$n = 3 \times a^2 - 3 \times a + 1 \quad (2.2)$$

gdje  $a$  predstavlja broj slojeva, zbrajajući središnju žicu kao još jedan sloj.

Duljina žice je za 2% do 3% veća od duljine užeta radi spiralnog sukanja. Faktor punjenja iznosi od 75% do 78%. Presjeci užeta su normirani nizom: 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240,  $300 \text{ mm}^2$  itd. Presjeci se dijele na nazivne i stvarne. Navedeni presjeci normirani nizom odnose se samo na presjek aluminijskog plašta, ali se redovno navodi i presjek čelične jezgre. Ovisno o omjeru svaki je presjek normiran. Kod omjera Al/Če 6:1 žice ne mogu biti istog promjera. Iz tog se razloga užeta prave od različitih promjera žice za čelik, a posebni promjeri za aluminij. [1]

Zaštitno uže je uzemljeno uže koje prati fazne vodiče, a postavljeno je iznad njih. Zaštitno uže ima zadatak da prvenstveno zaštiti od izravnog udara groma u fazne vodiče dalekovoda. Drugi zadatak zaštitnog užeta je omogućiti dovoljno nisku

impedanciju voda radi pravilnog rada zaštite od jednopolnih kvarova. Zaštitno uže je potrebno povezati sa uzemljivačima na svakom stupu, bilo to preko samog stupa, bilo to putem odgovarajućeg podzemnog voda uzduž stupa. Preporučljivo je da zaštitno uže bude napravljeno s pomoću vodiča razmjerno dobre vodljivosti. S obzirom na to da je za elektroenergetsku mrežu potreban vrlo razvijeni informacijski sustav, radi uspješnog rada postavlja se pitanje kako ga dodatno unaprijediti. Stoga se u zaštitnu užad svojedobno počelo ugrađivati žični telekomunikacijski kabeli radi povećanja telekomunikacijskih veza. Žičane veze ukomponirane u zaštitno uže podložne su raznim elektroenergetskim utjecajima i zbog toga nisu postigle očekivane rezultate. U novije vrijeme u zaštitnu užad ugrađuju se optički telekomunikacijski kabeli, otporni su na elektromagnetske utjecaje, a s gotovo neograničenim brojem telekomunikacijskih veza.

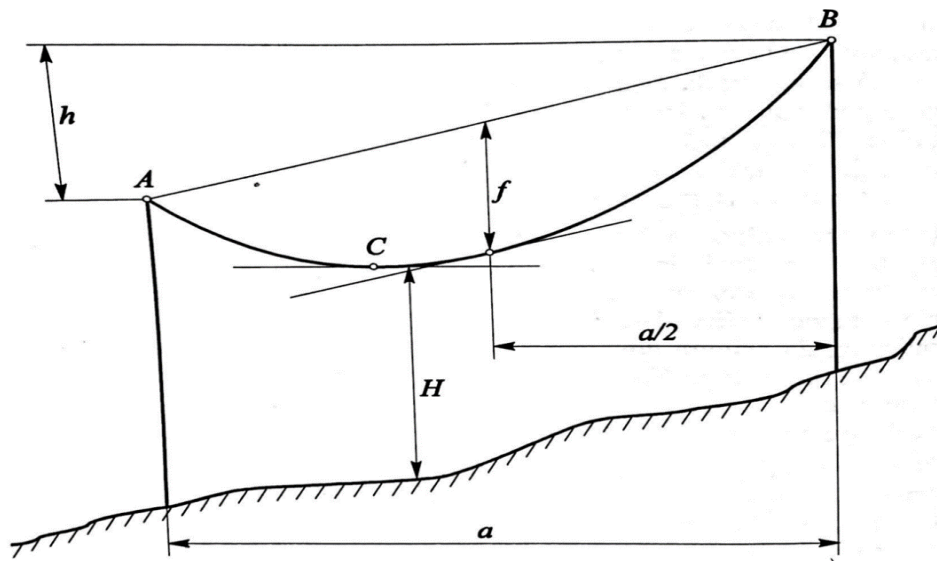
Promjer vodiča svake faze kod visokih napona prividno će se povećati korištenjem snopa od dva, tri i četiri užeta, čime raste prijenosna moć voda te se smanjuje utjecaj korone, posebno kod visokih napona. Korona je svjetleće izbijanje koje se pojavljuje na površini vodiča. Kada jakost električnog polja oko vodiča prijeđe vrijednost električne čvrstoće zraka dolazi do gubitaka energije, električnog izbijanja i povećanja odvoda. Korona uzrokuje gubitke u električnoj mreži i djeluje korozivno.

Prednost vodiča od bakra naspram aluminijskog jest ta da ima manja horizontalna opterećenja stupova u okomitom smjeru na trasu voda, uz jednakovrijednu vodljivost. Aluminijski ima bolje karakteristike od bakra u sljedećim svojstvima vodiča, a to su: manje pojave korone, manji provjesi i manje vertikalne sile. Kod vodova se vrši ekonomičan izbor presjeka, kojem je cilj da ukupni trošak prijenosa bude minimalan.

U troškove se ubraja kapital, održavanje i gubitke. Obično se odstupa od idealnog ekonomičnog presjeka zbog standardizacije. Sljedeći korak je kontrola pada napona i maksimalnih strujnih opterećenja. [1]

Potrebno je poznavati geodetski profil trase dalekovoda. Profil mora biti jasno naznačen uključujući sve objekte na trasi ili u njegovoj blizini. Na temelju profila izvode se privremeni rasporedi stupova, koji se mogu naknadno mijenjati na projektu. Krajnji položaj ovjesišta vodiča definira se po pravilima propisane udaljenosti vodiča od zemlje ili drugih objekata, i to kada mu je provjes maksimalan. Promatra se najniži

vodič, a položaj ostalih vodiča u prostoru određen je oblikom glave stupa, koji se provjerava električnim proračunom voda. [1]



Slika 2.1. Vodič u rasponu

a - raspon (razmak projekcija ovjesišta A i B na horizontalnu)

f - provjes (maksimalna udaljenost vodiča od spojnice od ovjesišta  $\overline{AB}$ ; nalazi se u sredini raspona)

H – minimalna udaljenost vodiča od zemlje (mjera za sigurnost radi okoline)

C – najniža točka vodiča (na mjestu dodira s horizontalnom tangentom)

h – visinska razlika (denivelacija) ovjesišta A i B

A,B – ovjesišta (mjesto gdje su vodiči učvršćeni tj. ovješeni)

### 2.1.3. Izolatori

Izolatori imaju dva zadatka: izolirati električni vodič od stupa i mehanički držati u zadanom mjestu. Mogu biti mehanički, električki i termički opterećeni (pojava električnog luka). Izolacija nadzemnog voda u pravilu je zrak, ali je nužno izolirati izolatorom vodič na mjestima gdje je vodič ovješten na stup. Izolatori pružaju vodu električnu čvrstoću i električki razdvajaju vodič od stupova i njihovih uzemljenih dijelova. Izolatori također imaju bitnu mehaničku ulogu tako da težinu vodiča i dodatnih tereta s vodiča prenose na stup. Osim izolacijskih svojstava izolatori trebaju imati i potrebnu mehaničku čvrstoću. Uz ove dvije osnovne karakteristike izolatora bitno je istaknuti važnost otpornosti na atmosferske i kemijske utjecaje, pri čemu ne

smiju brzo stariti u pogonu i moraju biti ekonomični. Porculan je tipičan materijal za izolatore, a još se koriste steatiti i staklo. Porculan se dobiva pečenjem mješavine kaolina (50%), glinenca (25%) i kvarca (25%). Ovisno o postotku elementa u izolatoru svojstva će biti različita. Svojstva porculana su:

$$\text{čvrstoća na pritisak} \rightarrow 4000 - 4500 \frac{daN}{cm^2}$$

$$\text{čvrstoća na vlak} \rightarrow 300 - 500 \frac{daN}{cm^2}$$

$$\text{probojna čvrstoća} \rightarrow 34 - 38 \frac{kV}{mm}$$

Glaziranjem poroznog tijela porculana štiti se vanjska površina izolatora od vode i raznih vanjskih utjecaja. Staklo nije toliko korišteno kao porculan, tek tamo nakon Drugog svjetskog rata se našlo u primjeni u telegrafskim linijama pa čak i u vodovima većih napona. Prednosti kaljenog stakla naspram porculana jest to da je moguće vidljivo prepoznati oštećenje, dok kod porculanskih izolatora oni mogu biti loši, ali vidljivo neoštećeni. Izolatori se sastoje od izolacijskih tijela i od metalnih dijelova. Mogu nositi vodič na dva načina: potporno i ovjesno. Potporni izolatori se koriste za napone od 10 kV, a za 35 kV već dijele mjesto s ovjesnim izolatorima. Potporni izolatori primijenjeni su kod nižih stupova. Od ovjesnih izolatora najčešće su korišteni kapasti izolatori. Kapasti je izolator konstruiran tako da je iznad porculana zacementirana kapa, a ispod je ugrađen batić zaliven olovnom slitinom ili cementom, pri čemu je porculan napregnut na pritisak. Kod masenih izolatora keramički dio je napregnut na vlak, pa se za njihovu konstrukciju koristi porculan i steatiti koji su skuplji i kvalitetniji. Neophodna električna čvrstoća ostvarena je redanjem odgovarajućeg broja članaka, a mehanička čvrstoća paralelnim brojem lanaca. Štapni izolator se nalazi na starijim vodovima. Također je napregnut na vlak. Štapni izolator je nešto kraći od ostalih tipova izolatora te su iz tog razloga potrebni niži stupovi. Prijelom masivnih i štapnih izolatora će dovesti do neizbježnog pada vodiča na tlo. Prilikom prijeloma vodiča ovjesni izolator će se kod nosnih stupova nagnuti i time djelomično rasteretiti stup.

#### 2.1.4. Pribor

Pribor možemo podijeliti na ovjesni, spojni i zaštitni. Pribor i spojni materijal se koristi za osiguravanje kontinuiranog prolaza struje tamo gdje se vodiči nastavljaju jedan na drugoga. Osnovna funkcija spojnog materijala je osigurati tok električne struje, ovjesni materijal ima mehaničku funkciju, a zaštitni materijal zaštitne funkcije. Određeni elementi pribora imaju višestruke funkcije. Stezaljke i spojnice mogu imati električnu ili mehaničku funkciju, ali mogu imati i kombiniranu funkciju. Stezaljke i spojnice prema izvedbi mogu biti: zakovične, vijčane, kompresijske i zarezne. Ovisno o tipu spojnica potrebni su specijalni alati, a kod vijčanih nisu potrebni. Uz pomoć vezanja bakrene žice možemo izvršiti spajanje bakrenih vodiča na niskonaponskim vodovima malih presjeka. Na visokonaponskim vodovima pretežno se koriste kompresijske spojnice i stezaljke radi visoke pouzdanosti i kvalitete. Nedostatak im je taj da se ne mogu razmontirati. Za međusobno spajanje aluminijskih i bakrenih vodiča razvijen je niz posebnih bimetalnih stezaljki i spojnica, koje sprečavaju koroziju aluminijskih zbog postojanja galvanske sprege. Zaštitno uže se mora pričvrstiti na vrh stupa, ali time mora biti ostvarena pravilna galvanska veza. Za fiksiranje potpornih izolatora na stupu upotrebljavaju se ravne i krive podupore. Izolatori se na njih navijaju uz pomoć impregnirane kudjelje (niski naponi) ili se već isporučuju zajedno sa zacementiranim izolatorom (srednji napon). Pri sastavljanju izolatorskih članaka u funkcionalan lanac zajedno s ovjesnim elementima sa zavješanjem na stup s jedne i na vodič s druge strane postoji širok izbor ovjesnog pribora, kojemu je prilagođen i zaštitni pribor. Prilikom postavljanja nadzemnog voda projektant vrši proračun osnovnih parametara, a to su:

- nazivni napon voda
- izolacija koja je dimenzionirana prema propisima
- sile koje se prenose s vodiča na stup
- mehanička sigurnost prema propisima
- materijal, izvedba i dimenzija vodiča
- je li izolacijski lanac jednostruki ili višestruki
- je li lanac nosni ili zatezni
- je li vodič po fazi jednostruki ili u snopu
- određeni zahtjevi investitora u vezi standardizacije materijala
- određeni zahtjevi u pogledu radio smetnje itd.

Jedan od problema izolatora i izolatorskih lanaca je njihovo onečišćenje. Prvotno rješenje je bilo oblikovanjem takozvanih maglenih izolatora, a poslije aerodinamičkih izolatora. Važan faktor otklanjanja opasnosti od onečišćenja izolatora ima upravo kiša. Pogonskim iskustvima je pokazano da je u tom pogledu značajan i položaj članaka u prostoru. Koso položeni zatezni lanci bolje će se očistiti od prljavštine nego viseći nosni lanci. Iz tog razloga su češće upotrebljavani nosni lanci sastavljeni od dva lanca u obliku slova V. Lanac u obliku slova V se ne otklanja prilikom naleta vjetra, što donosi značajne pogodnosti u konstrukciji dalekovoda. Najugroženiji dio ovjesnog izolatorskog lanca je nosna i otponska stezaljka, gdje se nalazi vodič. Stezaljka, kao zadebljanje vodiča predstavlja čvorište svih vibracija i savijanja, pa u tom mjestu prvo dolazi do preloma vodiča uslijed zamora materijala. Najpovoljniji oblici otponskih i nosnih stezaljki podosta umanjuju opasnost za vodiče. Nosne stezaljke su često gibljivo ovješene na izolatorski lanac. Klasični elementi dvostrukih i višestrukih izolatorskih lanaca su odstojnici. U slučaju kada bi došlo do potrebe za geometrijskim produženjem izolatorskih lanaca, onda će se primjenjivati produžnici.

Osnovni dijelovi pribora za zaštitu su rogovi i prstenovi. Funkcija roga je omogućiti otklanjanje električnog luka iz neposredne blizine izolatora, dok prstenovi djeluju na oblikovanje električnog polja. Primjenjuju se kod viših nazivnih napona, a s porastom napona njihova izvedba je složenija. Za mehanički zaštitni pribor koriste se prigušivači vibracija, a oni služe tome da zaustave starenje materijala vodiča u stezaljkama. Kod vodiča u snopu treba i uzduž raspona u određenim razmacima osigurati njihovu međusobnu udaljenost. Također u pribor spadaju i utezi kojima se dodatno opterećuje nosni izolacijski lanac. Svrha toga je smanjiti otklon prilikom bočnog udara vjetra.

Ovjesni pribor i materijal proizvodi se od kovanog čelika i lijevanog aluminija, odnosno aluminijskih slitina. Rijetko se susreće nehrđajući čelik i lijevana bronca. Razdvajanje članaka sprečavaju zatici koji su obično u tzv. M ili I obliku. Popravak zračnih vodova izvodi se bez isklopa iz pogona. Odgovarajućim postupkom obavlja se popravak pod naponom, a dva su osnovna postupka: popravak na potencijalu zemlje (američki-švedski) i popravak na potencijalu vodiča (ruski). Neovisno o primijenjenom radnom postupku najbitnija stvar jest ta da se izolatorski lanac može lako sastavljati i rastavljati, pri čemu će se postaviti novi zahtjevi za pribor, a tim se zahtjevima može prilagoditi na dva načina: izvedbom posebnih sustava za pribor



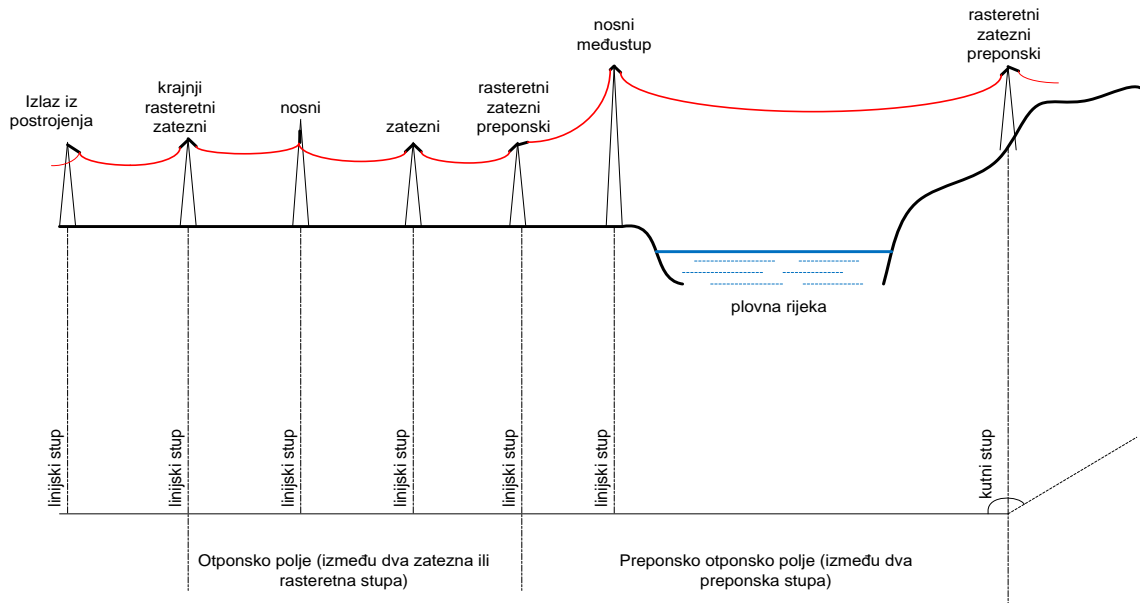
prilagođeni radu pod naponom ili preciznim održavanjem dimenzija i obrađivosti metalnih dijelova. [1]

### 2.1.5. Stupovi

Stupovi osiguravaju vodičima adekvatnu visinu nad tlom. Smjerovi djelovanja sila dijele se na:

- Vertikalno prema dolje djeluje težina vodiča, težina dodatnog tereta i težina izolatorskih lanaca.
- Horizontalno u smjeru trase voda djeluju sile horizontalnog zatezanja vodiča. Kod nosnih stupova sile će se poništiti, a kod drugih stupova potpuno ili djelomično. U poremećenom stanju dolazi do horizontalnog dodatnog naprežanja u smjeru trase.
- Horizontalno u smjeru okomito na trasu voda djelovat će nalet vjetra na vodiče.

Funkcija stupova prikazana je na slici 2.3:



Slika 2.2. Stupovi u trasi za dalekovod

Podjela stupova po položaju u trasi:

- Linijski položaj: nalazi se u ravnom dijelu vertikalne projekcije trase
- Kutni položaj: nalazi se na mjestima loma vertikalne projekcije trase

Podjela stupova po načinu ovješnje vodiča:

- Nosni vodič (nosni izolatori i izolatorski lanci)
- Zatezni vodič (zatezni izolatori i izolatorski lanci)

U neporemećenom stanju se horizontalne sile u smjeru trase kod nosnih stupova uvijek poništavaju, dok kod zateznih samo ponekad se poništavaju.

U poremećenom stanju uvijek dolazi do jednostranih horizontalnih opterećenja u smjeru trase, ali su ona kod zateznih stupova poprilično velika. Kod rasteretnih stupova postoji strogi uvjet koji mora ostvariti jednostrani prekid svih vodiča.

Kutni stupovi mogu biti zatezni ili rasteretni. Nosni stup može biti kutni samo ako je lom zanemariv. Ovisno o funkcijama mogu se još navesti sljedeće podjele stupova:

Krajnji stup je posljednji stup na oba kraja voda prije njegovog spoja na rasklopno postrojenje. Uobičajeno je rasteretni.

Preponski stup je stup koji nije jednako nategnut s obje strane zbog promjene presjeka, ili promjene maksimalno dozvoljenog naprezanja vodiča. On je obično rasteretni.

Međustup je nosni stup ubačen u preponsko otponsko polje, da bi vodiči dobili određenu visinu, jer je to uglavnom jeftinije nego graditi jako opterećeni visoki preponski stup.

Križišni stup je prilagođen križanju s nekim drugim vodom.

Prepletni stup je stup na kojem se vrši preplitanje vodiča radi postizanja električne simetrije voda.

Dio voda između dva zatezna (ili rasteretna) stupa naziva se otponsko polje. Nastoji se da otponsko polje bude minimalno 3 kilometra ako nema nikakvih prirodnih prepreka. Kod teških kvarova oštećenja se ne prenose na susjedna otponska polja što je ujedno i prednost kraćih otponskih polja.

Za konstrukciju stupova koristi se: čelik, armirani beton i drvo.

Drvo se primjenjuje za napone do 220 kV, ali najčešće se koristi kod vodova manjeg napona. U Hrvatskoj se drvo primjenjuje za niske napone i 10 kV vodove, a slabije za 20 kV vodove, a u određenim situacijama za 35 kV vodove. Prednost drveta jest brza montaža i mala težina. Određeni drveni stupovi iziskuju velike iskope. Jeftini su za gradnju, ali zbog relativno male trajnosti skupi su za pogon. Vrste drveta koje se

najčešće koriste za izradu stupova su: bor, pitomi kesten, jela, smreka i u pojedinim slučajevima hrast. Vijek drveta se može produžiti impregnacijom. Najveći faktor za trajnost stupa ovisi o lokalnim prilikama.

Čelik prevladava u izgradnji dalekovodnih stupova. Konstrukcija im je najčešće rešetkasta, osim cijevnih stupova za 10 kV i za niske napone. Stup ima 3 ili 4 kutna štapa koji nose glavni dio tereta, a ukrućeni su dijagonalnim štapovima. Kao sirovina za izradu čeličnih stupova koristi se kutno željezo, a izuzetno posebni profili. Koriste se i cijevi, koje su u mehaničkom smislu vrlo ekonomične i povoljne, ali iziskuju složenu konstrukciju čvorova rešetke. Cijevi se mogu ispuniti betonom i tako se dobiva jedna verzija armiranog betona koja ujedno sprječava koroziju unutar cijevi. Spajanje čeličnih rešetki vrši se najčešće pomoću vijaka, a manji dijelovi rešetkastog stupa mogu se još u radionici spojiti zavarivanjem ili zakivanjem. Nedostatak čeličnih stupova jest to da su podložni koroziji, kao i ostale čelične konstrukcije. Zaštita od korozije može se realizirati korištenjem legiranih čelika koji ne hrđaju, pri tome se podrazumijeva da će čelik sačuvati svoja mehanička svojstva. Jedna vrsta zaštite od korozije je nanošenje zaštitnog sloja. Tipična zaštita sastoji se od bojanja površine stupa, a pri tome je važno imati kvalitetnu boju i dobru pripremu. Trajnost zaštitnog sloja nije vječna stoga se treba s vremena na vrijeme obnavljati. Drugi način zaštite od korozije je vruće pocinčavanje. Vruće pocinčavanje je tehnološki proces koji se sastoji od čišćenja čelika u kiselini, zatim ispiranja vodom te uranjanja u kupku s rastopljenim cinkom. Uspjeh pocinčavanja znatno ovisi o vještini i iskustvu, a nakon pocinčavanja metalni dijelovi se ne smiju zavarivati ili obrađivati.

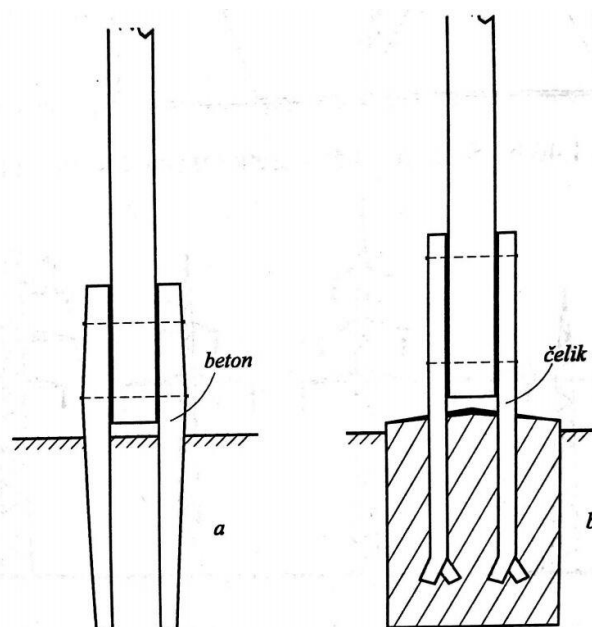
Armirani beton koristi se kod izgradnje dalekovodnih stupova, ali manje u usporedbi sa čelikom. Težina stupa je veća, ali zato je količina čelika upola manja nego kod čeličnih stupova. Betonski stupovi okarakterizirani su tako da nema potrebe za održavanjem radi svoje trajnosti, ali samo ako su pravilno izrađeni. Za vodove niskog i srednjeg napona stupovi se mogu proizvesti u tvornicama sa zadovoljavajućom kvalitetom i gotove ih transportirati. Kod većih stupova mora se lijevati na mjestu postavljanja, pri čemu uvjeti moraju biti čisti. Bitna je kompaktnost površinskog sloja, koji štiti željeznu armaturu od korozije. Betonski stupovi se mogu graditi kao armiranobetonske rešetkaste konstrukcije, također lijevanjem na mjestu postavljanja. Centrifugirani stupovi se proizvode u tvornicama posebnim rotacijskim postupkom, koji osigurava homogenost betona i tvrdnu površinu.

Danas se u većini konstrukcija koriste isti materijali, ali postoje različite kombinacije kao što su beton-čelik ili drvo-čelik. [1]

#### 2.1.6. Temelji

Temelji omogućuju statičku stabilnost cijelog objekta. Prenose sile sa stupova u zemlju, a mogu biti različitih izvedbi. Funkcija temelja je poslati sve sile sa stupa u zemlju. Temelji mogu biti napregnuti vertikalno prema dolje (na pritisak ili tlak), na izvlačenje i na prevrtanje. Veličina i oblik temelja zavise od vrste i veličine naprežanja, te o svojstvima zemlje. Potrebno je voditi računa o mogućnosti prisutnosti podzemnih voda, koja može smanjiti težinu temelja. Prilikom projektiranja temelja stupova potrebno je poznavati sve navedene elemente.

Drveni i lakši tipovi tvorničkih proizvedenih betonskih stupova ukopavaju se neposredno u tlo bez ikakvih posebnih temelja. Stabilnost stupa ostvarit će se konstrukcijom njegovog dijela koji se ukopava. Kako bi se zaštili drveni stupovi od raspadanja u tlu, katkad se temelji izgrađuju s pomoću betonskih nogara (slika 2.4). Ugrađivanje drvenog stupa neposredno u betonski temelj pridonosi naglom raspadanju drveta.



Slika 2.3. Temeljenje drvenog stupa s pomoću betonskih nogara (a) i betonskog temelja (b)

Betonski ili čelično rešetkasti stupovi imaju temelje od armiranog ili nearniranog betona. Stupovi s više nogu mogu imati jedan temelj za cijeli stup, ili ovisno o broju nogu - svaka noga može imati poseban temelj. Oblik samog temelja može biti složen ili jednostavan.

Raščlanjeni temelji betonskih stupova sa 4 noge mogu imati dvojaku orijentaciju, a ovisi od izvedbi stupa. Smješteni su u vrhove pravokutnika ili kvadrata. Također postoje konstrukcije stupova s 3 noge.

Betonski temelji se ovisno o potrebi armiraju betonskim željezom. Mjesto ulaza pojasnika u temelj, mora biti čisto i suho. To se postiže tako da vrh temelja viri cca 20 cm iznad tla, a gornja mu površina mora biti ukošena u vidu krova i ožbukana, a katkad i obojana impregnacijskom bojom. Svi do sada opisani betonski temelji betoniraju se na mjestu postavljanja, uz odgovarajući prethodni iskop. Kako bi se dobio čisti oblik temelja potrebno je potrošiti dovoljne količine betona, a betoniranje se izvodi u oplati. Kod standardnih temelja oplata može biti limena, za dužu upotrebu. Često se pripremaju temelji na industrijski način radi postizanja uštede uz povećanu kvalitetu, ali to će se postići ako su povoljni terenski uvjeti i ako je dobra mehanizacija. Također postoje posebne izvedbe temelja. Kod monolitnog kamenog terena mora se koristiti posebno svrdlo za bušenje rupe odgovarajuće dimenzije za temeljni dio stupa, pa je trošak betona minimalan i koristi se samo za povezivanje stupa sa stijenom. Kod močvarnog terena uz primjenu posebne mehanizacije proizvodi se vertikalni valjkasti temelj (promjera oko 1m), koji dopire desetak i više metara u dubinu. Na isti se princip su rađeni temelji i stupovi kod poplavnih područja i korita rijeka.

#### 2.1.7. Uzemljenje

Zadatak uzemljenja je osigurati dijelove voda koji nisu pod naponom od pojave nedopuštenog potencijala na njima i tako čuvati okolinu od opasnosti od napona. Uzemljenje je vrlo bitan element za električnu pogonsku sigurnost voda. Zaštitno uže ili gromobransko uže, je uzemljeno uže koje prati fazne vodiče, položene iznad njih te definira glavni dio zaštitnog sustava uzemljenja voda. Uzemljenje nadzemnog voda pokriva cjelokupni sustav kojemu pripadaju zaštitno uže, sam uzemljivač, te međusobni galvanski spojevi metalnih dijelova koji nisu pod naponom. Uloga uzemljivača je ta da ostvari galvansku vezu sa zemljom uz neki beskonačni otpor. Prilikom projektiranja uzemljenja potrebno je pratiti propise. Uz pomoć propisa

možemo odrediti prijelazni otpor, minimalni presjeke, vrstu spojnih vodova, načine spajanja itd.

Uzemljivači trebaju biti otporni na koroziju, a to će se postići izborom materijala ili prikladnom zaštitom. Kod uzemljenja dalekovodnih stupova primjenjuju se obično trakasto uzemljenje, konstruirano kao prstenasto ili zrakasto, a često i kombinirano. Uz poznati specifični otpor tla vrši se i proračun uzemljenja, a nakon izvedbe uzemljivača vrši se kontrola mjerenjem i po potrebi dodatno proširenje uzemljivača. Postoji poseban slučaj trakastog uzemljivača, a to je protutežno uže koje je položeno u tlo kontinuirano od stupa do stupa uzduž trase voda. [7]

#### 2.1.8. Projektiranje nadzemnih vodova

Nakon određivanja osnovnih parametara voda, sljedeći korak poslova je:

- Izabrati trasu prema više kriterija, koji su međusobno kontradiktorne. Prilikom odabiranja puta trase nije poželjno da bude u blizini kuća i naselja, ali je poželjno da bude u blizini cesta (radi lakšeg pristupačnosti kod popravka i transporta). Izbjegavaju se trase gdje može doći do poljoprivredne i šumske odštete, zaobilaze se paralelno približavanje telefonskim linijama, te se izbjegava križanje sa autoputom, željezničkim prugama itd. Preporučuje se da broj kutnih stupova bude minimalan.
- Izbor glave stupa i tipa stupa u cjelini može utjecati na cijenu voda, pazeći pri tome na račun o konfiguraciji terena uzduž trase. Na visinu stupa još utječe i izbor izolacije.
- Sljedeći korak je geodetsko snimanje trase koje mora biti precizno, radi određivanja razmještaja stupova. Izvodi se proračun sila na stup.
- Statički proračun stupova izvodi se na temelju prošlih informacija: cilja se prema što manjem broju tipova stupova, zbog jeftinije i jednostavnije serijske proizvodnje.
- Potrebno je odrediti geološki sastav tla za određivanje njegove nosivosti, kako bi se izvršio proračun temelja.
- U projektu potrebno je napraviti troškovnik za objekt i potrebni materijal.
- Kao posebni dijelovi projekta prave se elaborati za križanja voda s telefonskim linijama, autoputovima, željezničkim prugama itd. [1]

### 2.1.9. Pogonska problematika nadzemnih vodova

Vod je u pogonu izložen mogućnostima oštećenja i kvarova. Izolacija je izložena prenaponima i električnom luku, a i mehaničkim oštećenjima od kamenja i drva. Dodatno opterećenje i zamor materijala može dovesti do prekida vodiča i spojne opreme. Vod je potrebno pregledavati, kako bi se izvršila vizualna kontrola tehničke ispravnosti. Potrebno je obraćati pažnju na stanje vodiča i izolatora, te na moguću pojavu korozije. Mora se pripaziti na olabavljenost vijaka rešetkaste konstrukcije, te na vidljive spojeve s uzemljenjem. Kod vodova od 110 kV i više, na kojima su montirani porculanski izolatori, stanje izolacije se može odrediti mjerenjem parcijalnih napona na pojedinim izolatorskim člancima dok je vod u pogonu. Takvim načinom ispitivanja otkrivaju se greške u izolaciji koje se vizualno ne vide. Održavanje voda svodi se prvenstveno na periodične remonte koji imaju zadatak otkloniti sva prethodno uočena oštećenja na važnim dijelovima voda. Remont je ujedno prilika da se vod još jednom detaljno pregleda i dovede u skladu s propisima zbog promjena uz trasu. Na vodovima visokog napona koriste se lokatori grešaka, koji slično kao distantna zaštita iz impedancije strujnog kruga zaključuju na udaljenost greške, neovisno o tome je li trajala manje od sekunde. Trajni kvarovi mogu se locirati promatranjem reflektiranih impulsa na ekranu. Druga mogućnost otkrivanja mjesta kvara jest vizualnim pregledom voda, koji je uobičajan način pregleda vodova niskog i srednjeg napona.

Onečišćenje izolacije je također veliki problem kod nadzemnih vodova. Uzrok tome mogu biti razna industrijska zagađenja atmosfere, a u primorskim krajevima čak i sol, koju vjetar nanosi s morske površine. Na ugroženim mjestima primjenjuju se tzv. magleni izolatori s produženom kliznom stazom. Premazivanjem izolatora posebnim mastima na bazi silikona, zatim mastima dobivenim od nafte, koje apsorbiraju i obavijanjem neutraliziraju nečistoću, pa izolacijska čvrstoća voda ostaje ista. Sloj masti potrebno je periodično obnavljati. Treba voditi statistiku o svim događanjima i radovima, te raditi usporedbe i koristiti informacije za nove vodove. [1]

## 2.2. Parametri elektroenergetskih vodova

Parametri voda su karakteristične električne veličine kojima se opisuju električne prilike na vodu u svakom pogonskom stanju.

- Vremenski ovisni parametri voda: struja, napon i frekvencija
- Vremenski neovisni parametri voda: konstante voda
  - djelatni otpor voda
  - induktivitet voda
  - kapacitet voda
  - odvod voda

### 2.2.1. Osnovne konstante voda

- Jedinični djelatni otpor voda –  $R_1[\frac{\Omega}{km}]$ 
  - pri protjecanju struje kroz vodič nastaju gubici snage
  - učinak djelatnog otpora voda je postojanje pada napona na vodiču jedinične duljine:  $V_R(t) = R_i \times i(t)$

(2.3)

- Jedinični induktivitet voda –  $L_1[\frac{H}{km}]$ 
  - pri protjecanju struje kroz vodič, u vodičima i oko njih formira se magnetsko polje
  - učinak induktiviteta voda je postojanje pada napona na vodiču jedinične duljine:  $V_L(t) = L_1 \frac{\partial i(t)}{\partial t}$

(2.4)

- Jedinični kapacitet voda –  $C_1[\frac{F}{km}]$ 
  - pri protjecanju struje kroz vodič oko vodiča se formira vremenski promjenjivo električno polje
  - učinak kapaciteta voda je postojanje poprečne struje iznosa:  
 $i_C(t) = C_1 \frac{\partial v(t)}{\partial t}$

(2.5)

- Jedinični odvod voda –  $G_1[\frac{S}{km}]$ 
  - definiran kao odnos gubitaka po jedinici duljine prema kvadratu napona ili kao odnos djelatne poprečne komponente struje po jedinici napona
  - iznos struje koja prolazi kroz izolaciju prikazana je izrazom:  
 $i_G(t) = G_1 \times v(t)$

(2.6)

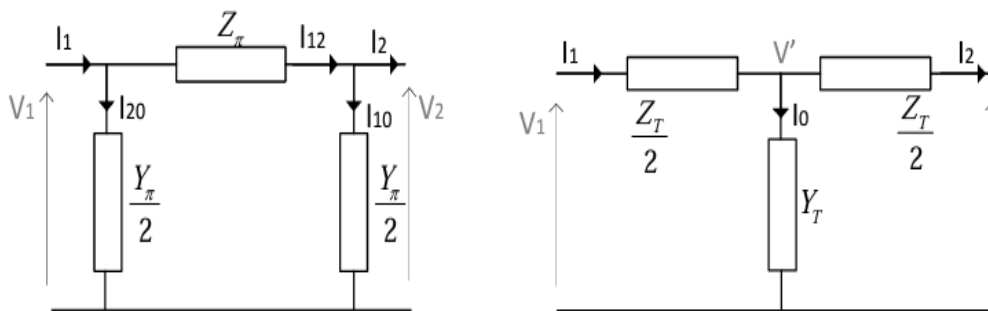
Vod koji sadrži ova četiri parametara, a pritom su različiti od nule zovemo realni vod. Idealni vod je vod kojem su parametri otpora i odvoda jednaki nuli to jest vod bez gubitaka. Prema položaju voda možemo ih dijeliti na: poprečne i uzdužne. U poprečne spadaju odvodi i kapaciteti, dok u uzdužne spadaju otpori i induktiviteti. Otpor, kapacitet, induktivitet i odvod možemo još dijeliti na tople i hladne parametre. U tople parametre svrstavamo otpor i odvod, dok u hladne ubrajamo induktivitet i kapacitet. Hladni parametri se javljaju ovisno o



frekvenciji. Prolaskom struje kroz vod odvod i otpor izazivaju toplinske gubitke.

### 2.2.2. Nadomjesni modeli elektroenergetskih vodova s koncentriranim parametrima

Elektroenergetski vod određenih konstanti i određene dužine nadomješta se nadomjesnim četveropolom za direktni sustav [8]



Slika 2.4. Model  $\pi$  i  $T$

Točan  $\pi$  model voda koristi se za vodove visokog napona na velikim udaljenostima za točnije i preciznije proračune. Za ove proračune koristimo računalne programe koji nam olakšavaju rad kako bi došli do točnog izračuna. Pri čemu se vidi razlika između približnog i točnog  $\pi$  modela elektroenergetskih vodova. Proračun dobivamo iz osnovnih izraza za uzdužnu impedanciju  $Z$  i poprečnu admittanciju  $Y$  svih faznih vodiča.

Za nadzemne vodove duljine do 200 km koristimo približni model jer imaju približnu grešku oko 1%, ali zato za vodove veće duljine od 200 km neophodno je uzeti točne modele vodova radi električne konstante vodova koje nisu koncentrirane na jednom mjestu, već su distribuirane duž čitavog voda.

## 3. MATRICE JEDINIČNIH KONSTANTI VODA

### 3.1. Induktivitet

Induktivitet je svojstvo petlje da se opire promjeni struje, jer svaka promjena struje stvara promjenu obuhvatnog toka, koja u petlji inducira napon suprotnog smjera.

Faradayev – Lenzov zakon elektromagnetske indukcije je osnovni zakon elektromagnetizma, a izraz glasi:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (3.1)$$

Faradejev zakon indukcije je zakon elektromagnetizma prema kojemu se na krajevima zatvorene petlje kroz koju ide promjenjivi magnetski tok inducira napon koji je razmjern brzini promjene toka.

Lenzov zakon ili Lenzovo pravilo je pravilo koje tvrdi da inducirani napon uvijek daje struju čiji je magnetski tok suprotan izvornoj promjeni magnetskog toka.

Mjerna jedinica induktivnosti je 1H (henri). Induktivitet 1H ima strujni krug u kojemu se inducira napon 1V, ako se struja ravnomjerno izmjenjuje za 1A (amper) u 1s (sekundi):

$$1H = 1 \frac{V}{\frac{A}{s}} = 1 \frac{Vs}{A} \quad (3.2)$$

Prepostavlja se da je permeabilitet konstantan i zbog te prepostavke može se reći da je magnetska indukcija proporcionalna sa jakosti magnetskog polja. Onda se cjelokupni magnetski tok može izračunati kao zbroj magnetskih tokova proizvedenih raznim dijelovima strujnog kruga. [1]

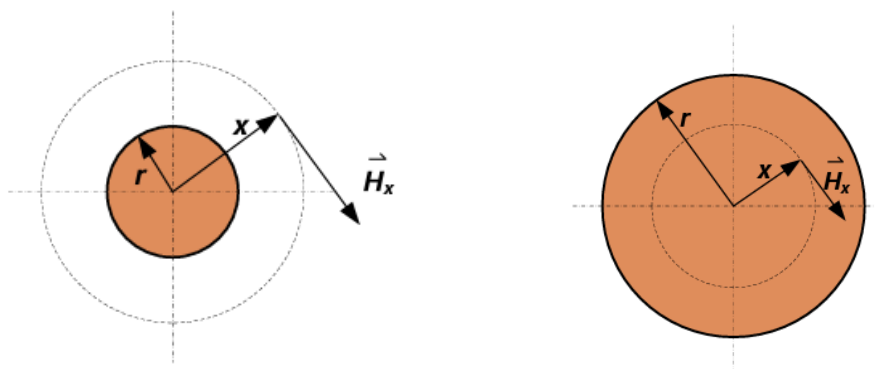
$\mu$  je permeabilitet okoline ili materijala u H/m. Permeabilnost u vakuum iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi \times \frac{10^{-7}H}{m} \text{ ili } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-4} \frac{H}{km} \quad (3.3)$$

### 3.2. Ulančeni tok punog cilindričnog vodiča

Proračun će se pojednostaviti ako se pretpostavi da je vodič od okrugle homogene žice, oko vodiča vakuum, struja u vodiču jednoliko raspodijeljena i da nema odvajanja struje.

Obuhvatni tok izvan vodiča računa se prema slici 3.1.



Slika 3.1. Magnetsko polje izvan i unutar vodiča

Uz istu struju  $I$  formirat će se u slučaju punog homogenog vodiča polumjera  $r$  isti obuhvatni tok, kao i u slučaju šupljeg vodiča beskonačno tanke stijenke, ali polumjera  $r' < r$ . [ 1]

### 3.2.1. Opća formula za ulančeni tok

Pripadnost određenog broja vodiča istom strujnom krugu definirana je izrazom:

$$\sum \bar{I} = 0 \quad (3.4)$$

Posljedica izraza (3.4) jest da dovoljno daleko od tako definirane grupe vodiča nema magnetskog toka. Područje integracije jakosti polja u svrhu dobivanja obuhvatnog toka je konačno. Ukupni ulančeni tok jednog vodiča proizveden je strujama kroz sve vodiče, uključujući i promatrani vodič [1]:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_a \\ \bar{\Psi}_b \\ \bar{\Psi}_n \end{bmatrix} = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{D_{aa}} & \ln \frac{1}{D_{ab}} & \dots & \ln \frac{1}{D_{an}} \\ \ln \frac{1}{D_{ba}} & \ln \frac{1}{D_{bb}} & \dots & \ln \frac{1}{D_{bn}} \\ \ln \frac{1}{D_{na}} & \ln \frac{1}{D_{nb}} & \dots & \ln \frac{1}{D_{nn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$D_{aa}, D_{bb}, \dots, D_{nn}$  jesu reducirani polumjeri vodiča  $a, b, \dots, n$ .

Matrica je simetrična jer je  $D_{ab} = D_{ba}, D_{ac} = D_{ca} \dots$  itd.

Jednadžbu se može još pisati ovako:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_a \\ \bar{\Psi}_b \\ \bar{\Psi}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & \dots & L_{an} \\ L_{ba} & L_{bb} & \dots & L_{bn} \\ L_{na} & L_{nb} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ili

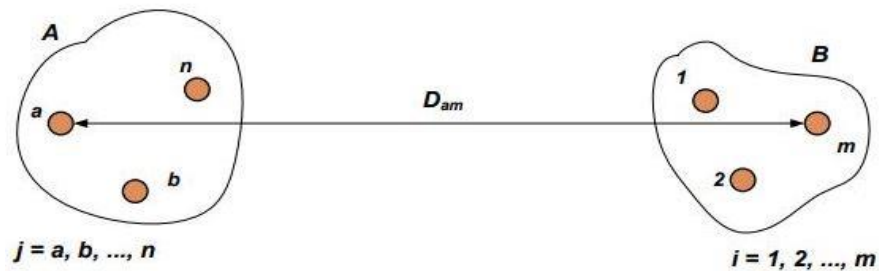
$$[\bar{\Psi}] = [L] \times [\bar{I}]$$

Matrica  $[L]$  je matrica parcijalnih induktiviteta. Dijagonalni članovi su vlastiti induktiviteti, a izvan dijagonalni su međusobni induktiviteti. Matrica  $[L]$  ostvaruje vezu između ulančenog toka svakog određenog vodiča i struja kroz svaki vodič cjelokupnog strujnog kruga. Može se reći da je to induktivitet zamke. Kod

jednofaznog prikaza sustava potrebno je ubaciti pojam induktiviteta jedne faze, odnosno kod voda, induktivitet jednog vodiča gdje je to moguće. Induktivitet samo jednog vodiča može se računati kod voda od dva vodiča i kod voda od tri vodiča koji su postavljeni u vrhovima jednakostraničnog trokuta. To se naziva pogonskim induktivitetom, to jest induktivitetom direktnog sustava.

### 3.3. Postupak srednjih geometrijskih udaljenosti (metoda SGU)

Uvjet  $\sum \bar{I} = 0$  omogućuje da se sve vodiče voda neovisno o broju koliko ih ima razdijeli u dvije grupe i tako formira petlju. Primjenom postupka srednjih geometrijskih udaljenosti na tako formiranu petlju može se izračunati induktivitet jedne grupe vodiča, također može se odrediti i reducirani polumjer vodiča različitih presjeka, užeta i vodiča u snopu. Postupak također pomaže pri određivanju pogonskih induktiviteta trofaznih prepletenih (preplitanjem simetriranih) vodova. Na slici 3.3. vodiči su raspoređeni u dvije grupe: grupa A od  $n$  vodiča kojom prolazi ukupna struja  $+\bar{I}$ , i na grupu B od  $m$  vodiča kojom prolazi ukupna struja  $-\bar{I}$



Slika 3.2. Podjela vodiča na grupu A i B

Za grupe vrijedi izraz (3.7): 
$$\sum_{j=a}^n \bar{I}_j = \bar{I} \qquad \sum_{j=1}^m \bar{I}_{j'} = -\bar{I} \qquad (3.7)$$

također vrijedi i ovaj izraz (3.8): 
$$\bar{I}_j = \frac{\bar{I}}{n} \qquad \bar{I}_{j'} = -\frac{\bar{I}}{m} \qquad (3.8)$$

Izrazi (3.7) i (3.8) su polazni za postupak SGU. Dok su izrazi (3.7) egzaktni bez obzira na način podjele vodiča na grupe, izraz (3.8) su samo pretpostavke, i to na prvi pogled izrazito grube i proizvoljne. Rezultati postupka su točni ako se ispravno koriste u primjerima u kojima je to moguće, pri čemu se trebaju pravilno interpretirati. Parametri konačnih formula su neke srednje (geometrijske) vrijednosti pa tako i rezultati predstavljaju neke srednje vrijednosti. Korištenjem postupka srednjih geometrijskih

udaljenosti kako bi neki snop (grupu) vodiča promjenili drugim nadomjesnim vodičem smanjenog polumjera kojim prolazi zbroj struja prvobitne grupe, neovisno o tome je li ta struja bila raspodijeljena na pojedinačne vodove, tako da se može uvažiti i drugi izraz. Postupak srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU) pruža i induktivitet nadomjesnog vodiča, ali ne i induktivitet svakog vodiča prvobitnog snopa zasebno. Kod sređenih grupa od  $n$  vodiča može se, u najboljem slučaju uzeti, da je induktivitet  $n$ -ti dio jednog vodiča srednjeg induktiviteta. Greška će biti neznatna ako su grupe sređene, to jest ako su vodiči navedene grupe u koncentriranom snopu udaljeni od ostalih vodiča onoliko koliko je potrebno, i ako su sličnog ili istog presjeka. Postupak srednjih geometrijskih udaljenosti kod trofaznih vodova daje rezultate kao da je vod simetričan, bio on to stvarno ili ne.

Za vlastite srednje geometrijske udaljenosti (SGU) još se može naći naziv udaljenosti vodiča od samog sebe.

Izračun obuhvatnog toka grupe vodiča A slika 3.2:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_a &= 2 \times 10^{-7} \left( \frac{\bar{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{aj}} - \frac{\bar{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{aj'}} \right) \\ \bar{\Psi}_b &= 2 \times 10^{-7} \left( \frac{\bar{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{bj}} - \frac{\bar{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{bj'}} \right) \\ \bar{\Psi}_n &= 2 \times 10^{-7} \left( \frac{\bar{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{nj}} - \frac{\bar{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{nj'}} \right)\end{aligned}\tag{3.9}$$

Ukupni tok ulančan sa svim vodičima grupe A iznosi:

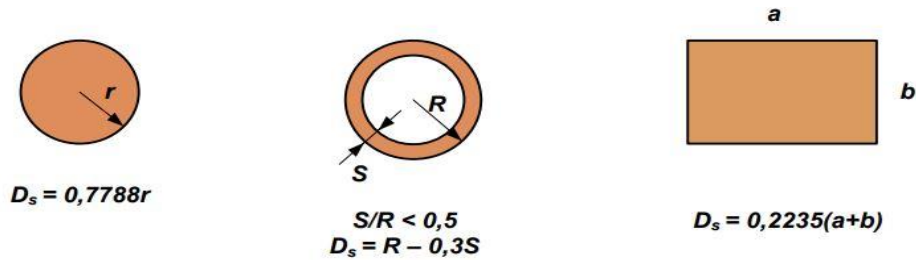
$$L_A = \frac{\bar{\Psi}}{\bar{I}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \left| \frac{H}{m} \right|\tag{3.10}$$

Gdje je:

Vlastita SGU ( $D_s$ ) – srednja geometrijska vrijednost svih međusobnih udaljenosti polaznog skupa.

Međusobna SGU ( $D_m$ ) – srednja geometrijska udaljenost vodiča od ostalih vodiča

Na slici 3.3 prikazani su različiti oblici vodiča po kojima se računa vlastita srednja geometrijska vrijednost (SGU).



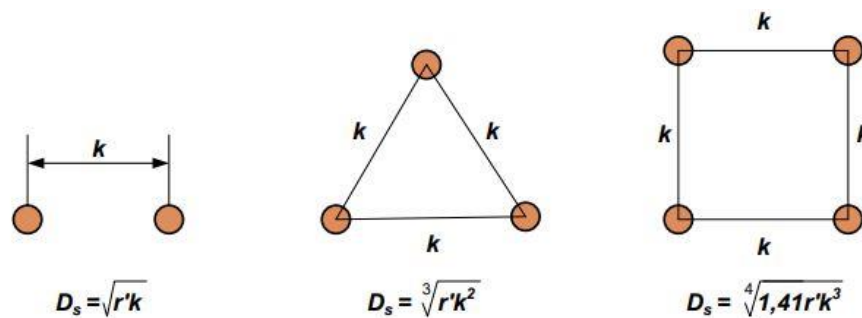
Slika 3.3.  $D_s$  raznih vodiča

Za uže od  $n$  vanjskih žica i vanjskog promjera  $R$  reducirana vlastita SGU iznosi [1]:

Slika 3.4. *Vlastita SGU (srednja geometrijska udaljenost)*

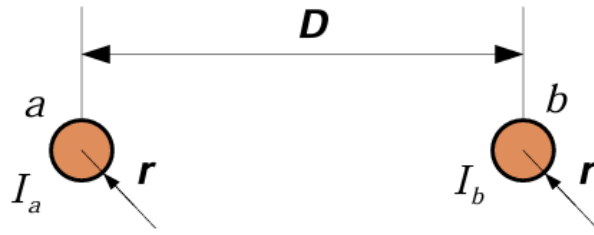
$n = 3$	$D_s = 0,677R$
$n = 7$	$D_s = 0,726R$
$n = 19$	$D_s = 0,758R$
$n = 37$	$D_s = 0,768R$
$n > 61$	$D_s = 0,7788R$

Vodiče snopa raspoređene na međusobnoj udaljenosti  $k$  može se zamijeniti jednim vodičem. Reducirani vlastiti SGU za tipične snopove prikazan je na slici 3.5. [1]



Slika 3.5. Reducirani vlastiti SGU za vodiče u snopu

Primjer prikazuje dva vodiča koji će biti riješeni sa i bez SGU metode. Potrebno je odrediti induktivitet voda od dva vodiča prikazan na slici 3.6 (različiti presjeci).



Slika 3.6. Raspored voda od dva vodiča

Izračun bez SGU metode:

Računa se ulančani magnetski tok vodiča A:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_a &= 2 \times 10^{-7} \sum_{j=a}^n I_j \times \ln \frac{1}{D_{aj}} = 2 \times 10^{-7} \left( \vec{I}_a \ln \frac{1}{D_{aa}} + \vec{I}_b \ln \frac{1}{D_{ab}} \right) = 2 \times \\ &10^{-7} \left( \vec{I}_a \ln \frac{1}{r'_a} - \vec{I}_a \ln \frac{1}{D} \right) = 2 \times 10^{-7} \vec{I}_a \ln \frac{D}{r'_a} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Iz izraza (3.11) dobiva se induktivitet vodiča A:

$$L_{1a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_a}$$

Isti postupak koristimo za računanje vodiča B:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_b &= 2 \times 10^{-7} \sum_{j=a}^n I_j \times \ln \frac{1}{D_{bj}} = 2 \times 10^{-7} \left( \vec{I}_a \ln \frac{1}{D_{ba}} + \vec{I}_b \ln \frac{1}{D_{bb}} \right) = \\ &2 \times 10^{-7} \left( -\vec{I}_b \ln \frac{1}{D} + \vec{I}_b \ln \frac{1}{r'_b} \right) = 2 \times 10^{-7} \vec{I}_b \ln \frac{D}{r'_b} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Iz izraza (3.12) dobiva se induktivitet vodiča B:

$$L_{1b} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_b}$$

Induktivitet voda:  $L_1 = L_{1a} + L_{1b}$

Ukupni induktivitet voda:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D^2}{r'_a r'_b} \quad (3.13)$$

Izračun sa SGU metodom:

$$m = 1 \quad D_m = D$$

$$n = 1 \quad D_{sa} = r'_a \quad D_{sb} = r'_b$$

Induktiviteti za A i B vodiče:

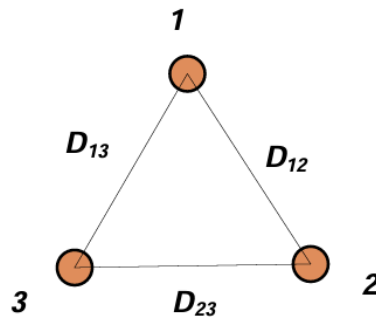
$$\begin{aligned} L_a &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_a} \\ L_b &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_b} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Sveukupni induktivitet voda:

$$L_1 = L_{1a} + L_{1b} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D^2}{r'_a r'_b} \quad (3.15)$$

Prilikom rješavanja SGU metodom može se lakše i brže doći do rješenja. To se posebno primjećuje kod zahtjevnijih i složenijih zadataka. Na slici 3.6 prikazan je izračun za dva vodiča.

Primjenom SGU metode prikazat će se slučaj kod tri vodiča u vrhovima jednakostraničnog trokuta.



Slika 3.7. Raspored voda od tri vodiča

Izračun SGU metodom:

$$n = 1 \quad m = 2 \quad D_s = r' = 0,7788 \times r$$

Izrazom (3.19) dobiva se srednja geometrijska udaljenost od ostalih vodiča:

$$D_m = \sqrt{D \times D} = D \quad (3.16)$$

Korisiti se izraz (3.17) kako bi se izračunao induktivitet:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

S obzirom da se radi o jednakostraničnom trokutu induktivitet će biti isti u sva tri slučaja.

$$L_1 = L_2 = L_3$$

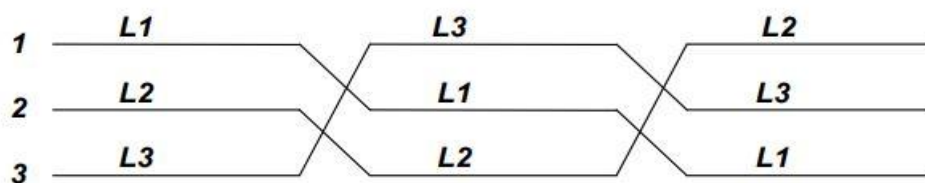




Slika 3.8. Stup sa vrhovima jednakostraničnog trokuta

### 3.4. Preplet

Vod će biti simetričan ako su osi triju vodiča trofaznog voda smještene u vrhovima jednakostraničnog trokuta, pri tome moraju imati isti presjek i induktivitet. Nažalost simetrija vodova se rijetko postiže. Pojedini vodiči istoimenog voda imaju različite induktivitete, pa zbog toga i različite reaktancije. Zbog različitih padova napona u određenim fazama u pogonu dolazi do deformacije zvijezde napona i do pogonskih problema. Kako bi se riješio problem, konstrukcijski se osigurava električna simetrija vodova koji su geometrijski nesimetrični, cikličkom promjenom mjesta vodiča na stupu, odnosno preplitanjem slika 3.9. [1]



1, 2, 3 - položaj vodiča na stupu  
L1, L2, L3 - faze

Slika 3.9. Preplet voda

U izrazu (3.20) izračunat je induktivitet faze vodiča ovisno o položaju na slici 3.9. Izraz (3.21) prikazuje induktivitet jedne faze vodiča:

$$L_{L11} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{13}}}{r'} \quad (3.17)$$

$$L_{L12} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'}$$

$$L_{L13} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'}$$

$$L_{L1} = \frac{1}{3} \times (L_{L11} + L_{L12} + L_{L13}) = L_{L2} = L_{L3} \quad (3.18)$$

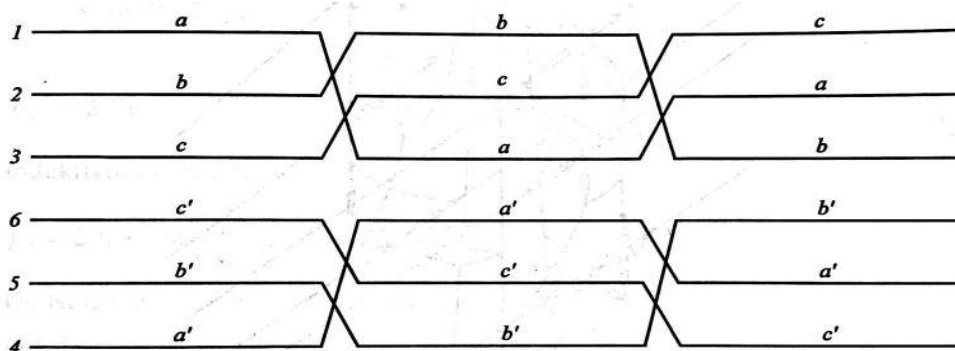
$$L_{L1} = \frac{1}{3} \times 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{13}}}{r'} + \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'} + \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'} \right)$$

$$L_{L1} = \frac{1}{3} \times 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{\sqrt{D_{12}^2 D_{13}^2 D_{23}^2}}{(r')^3} = 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}}{r'}$$

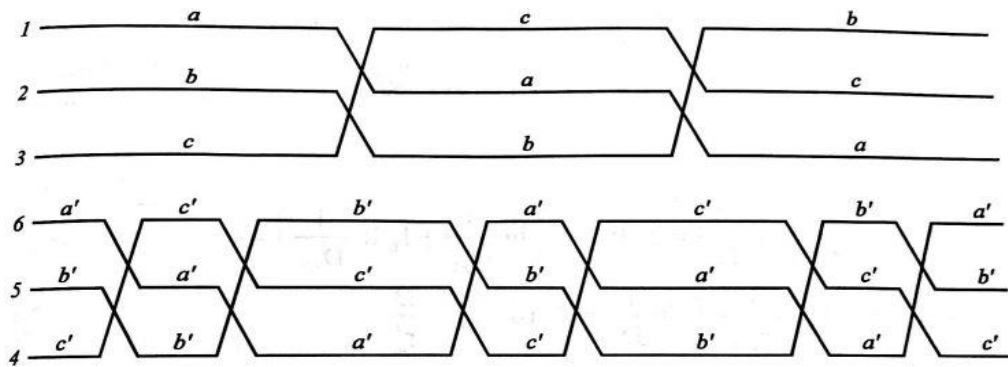
Međusobna SGU za trofazni prepleteni vod:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} \quad (3.19)$$

Dužina voda se dijeli se na tri dijela. Nužna su dva preplitanja da bi svaki vodič zauzeo sve moguće položaje. Kod dvostrukih vodova razlikuje se djelomični preplet slika 3.10 i potpuni preplet slika 3.11. Kod djelomičnog prepleta međusobni induktiviteti između vodova nisu jednaki i premda su vodovi svaki za sebe potpuno simetralni, simetrija nije postignuta. Kratki vodovi se ne prepliću. [1]



Slika 3.10. Djelomični preplet dvostrukog voda



Slika 3.11. Potpuni preplet dvostrukog voda

### 3.5. Induktivitet kabela

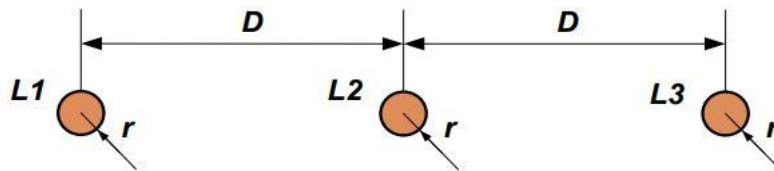
Električni kabel sastoji se od dva ili više vodiča koji su povezani zajedno čineći jedan sklop tj. električni vod. Vodiči su od dobro vodljivog materijala, električki izolirani te pozicionirani u zajednički vanjski omotač za zaštitu od vanjskih utjecaja. Kabeli se koriste za različite svrhe pri tome moraju biti prilagođeni određenom cilju. Kao što je na primjer napajanje elektroničkih uređaja i signalnih krugova. U kabelu se nalaze vodiči koji su smješteni jedan blizu drugom, pri čemu je induktivitet relativno malen i zanemariv posebno za kraće dužine kabela. Karakteristična impedancija zavisi od odnosa induktiviteta i kapaciteta te o frekvenciji struje koja se prenosi. Prilikom proračuna induktiviteta kabela može se koristiti isti postupak kao i za proračun nadzemnih vodova. Za magnetsku permeabilnost izolacije uzima se permeabilnost vakuumu. Uobičajeno je da u metalnom plaštu kabela teče neka struja. Kod trožilnih kabela u normalnom pogonu plašt nije ulančen magnetskim tokom i ne utječe na pogonski induktivitet. Kod tri jednožilna kabela inducira se napon u plaštevima. Kada su plaštevni spojeni međusobno kroz njih teče struja što utječe na induktivitet, pa se induktivitet smanjuje za 5% do 10%. Plašt svakog od tri jednožilna kabela može se podijeliti izolacijskim umetcima na tri dijela. Kod kabela se uobičajeno računa s izmjerenim vrijednostima ili prema tvorničkim podacima, a približne vrijednosti za različite izvedbe mogu se naći i u priručnicima. [9]

## 4. USPOREDBA VRIJEDNOSTI INDUKTIVITETA KOD PREPLETENOG I NEPREPLETENOG VODA

### 4.1. Induktivitet voda

Uz pomoć primjera horizontalnog i jela raspored usporediti će se vrijednosti induktiviteta, pri čemu će se objasniti utjecaj preplitanja vodova i kako se odnosi na induktivitet. Proračun koji će se koristiti je za SN mrežu. Potrebno je definirati vrijednosti induktiviteta kod duljina voda od: 5, 10, 15 i 20 km.

Jednostavnim primjerom horizontalnog raspona izračunat će se vrijednosti induktiviteta kod prepletenog i neprepletenog voda. Vodovi su horizontalno raspoređeni kao na slici 4.1. Međusobna udaljenost vodiča je  $D = 3,5 \text{ m}$ , a vodiči su izrađeni od 7 žica vanjskog promjera  $15,3 \text{ mm}$ .



Slika 4.1. Horizontalni raspored vodiča

a) Neprepleteni vod:

Reducirani vlastiti SGU određuje se prema tablici 3.1:

$$D_s = 0,726 \times R = 0,726 \times 0,0153 = 11,11 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Potrebno je izračunati međusobnu udaljenost između vodiča izrazom (3.16):

$$D_m = \sqrt{D_{12} \times D_{13}} = \sqrt{D \times 2D} = D\sqrt{2}$$

$$D_m = \sqrt{D_{21} \times D_{23}} = \sqrt{D \times D} = D$$

$$D_m = \sqrt{D_{31} \times D_{32}} = \sqrt{D \times 2D} = D\sqrt{2}$$

Izračun induktiviteta za svaki vodič primjenom izraza (3.10):

$$L_{L1} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,2199 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$L_{L2} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,1506 \frac{mH}{km}$$

$$L_{L3} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,2199 \frac{mH}{km}$$

Srednja vrijednost induktiviteta koristi se kod neprepletenog voda zbog izbjegavanja pogreške u odnosu na prosječnu vrijednost induktiviteta.

Srednja vrijednost induktiviteta prikazana je izrazom (4.1):

$$L_{sr} = \frac{L_{L1} + L_{L2} + L_{L3}}{3} = 1,1968 \frac{mH}{km} \quad (4.1)$$

b) Prepleteni vod:

Reducirani vlastiti SGU određuje se prema tablici 3.1:

$$D_s = 0,726 \times R = 0,726 \times 0,0153 = 11,11 \times 10^{-3} m$$

Međusobna srednja geometrijska udaljenost za trofazni prepleteni vod prikazan je izrazom (3.19) :

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{13} \times D_{23}} = \sqrt[3]{D \times 2D \times D} = D \sqrt[3]{2}$$

Izrazom (3.10) izračunavamo induktivitet:

$$L_{prepleteni} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,196784 \frac{mH}{km}$$

Izračun induktiviteta ovisno o duljini voda prikazana izrazom (4.2):

$$L = 1,196784 \frac{mH}{km} \times 5 km = 5,984 mH \quad (4.2)$$

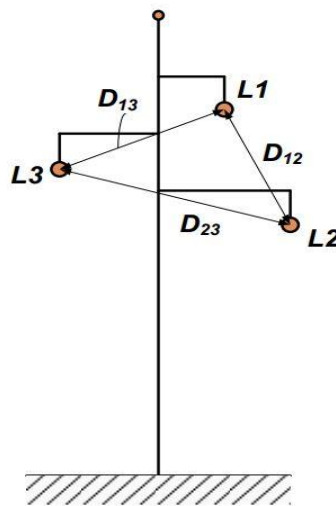
#### 4.1. Tablica vrijednosti induktiviteta horizontalnog raspona za neprepleteni i prepleteni vod

Duljina [l]	Induktivitet prepletenog voda [L]	Induktivitet neprepletenog voda [L]	
		Faza $L_{L1}$ i $L_{L3}$	Faza $L_{L2}$
5km	5,984 mH	6,0995 mH	5,753 mH
10km	11,968 mH	12,199 mH	11,506 mH
15km	17,952 mH	18,2985 mH	17,259 mH
20km	23,936 mH	24,398 mH	23,012 mH

$L_{L1}$  i  $L_{L3}$  – imaju isti induktivitet kod horizontalnog raspona zbog jednake međusobne udaljenosti

Primjećuje se kod faza  $L_{L1}$  i  $L_{L3}$  da je induktivitet veći u odnosu na fazu  $L_{L2}$  radi većeg međusobnog razmaka vodiča. Razlika između induktiviteta prepletenog i neprepletenog voda nisu velika zbog malih udaljenosti voda.

U proračunu se traži pogonski induktivitet voda sa rasporedom vodiča sa slike 4.2. za slučaj neprepletenog i prepletenog voda. Međusobne udaljenosti vodiča  $D_{12} = 1,7 m$ ,  $D_{13} = 2,3 m$ ,  $D_{23} = 3,8 m$ . Vodiči su napravljeni u obliku užeta od 7 žica, vanjskog promjera  $R = 16,3 mm$ . Proračun je za SN mrežu, a duljine voda koje je potrebno izračunati su: 5, 10, 15 i 20 km.



Slika 4.2. Jela raspored vodiča

a) Neprepleteni vod:

Reducirani vlastiti SGU određuje se prema tablici 3.1:

$$D_s = 0,726R = 0,726 \times 0,0163 = 11,83 \times 10^{-3} m$$

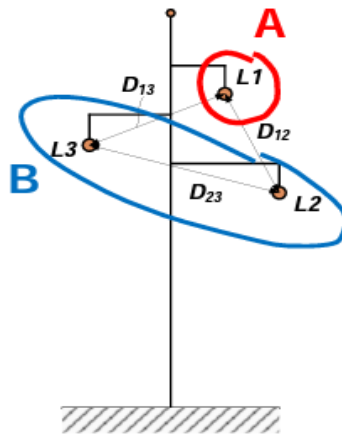
Koristeći izraz (3.16) dolazi se do rezultata:

$$D_m = \sqrt{D_{12} \times D_{13}} = \sqrt{1,7 \times 2,3} = 1,9774 m$$

1. Slučaj (jela):

Primjenom izraza (3.10) izračunava se induktivitet vodiča:

$$L_{L1} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,0238 \frac{mH}{km}$$



Slika 4.3. Prvi slučaj jela

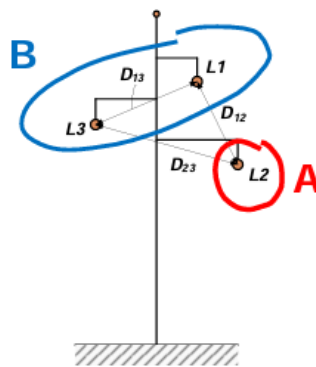
2. Slučaj (jela):

Koristi se izraz (3.16) kako bi odredili SGU vodiča od ostalih vodiča:

$$D_m = \sqrt{D_{21} \times D_{23}} = \sqrt{1,7 \times 3,8} = 2,5417 \text{ m}$$

Za izračun induktiviteta koristi se izraz (3.10):

$$L_{L2} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,0739 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$



Slika 4.4. Drugi slučaj jela

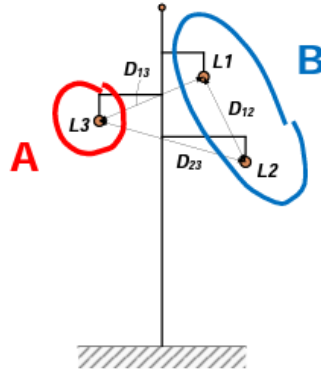
3. Slučaj (jela):

Iz izraza (3.16) dobiva se rezultat:

$$D_m = \sqrt{D_{31} \times D_{32}} = \sqrt{2,3 \times 3,8} = 2,9563 \text{ m}$$

Preko izraza (3.10) dobiva se induktivitet:

$$L_{L3} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,1042 \frac{mH}{km}$$



Slika 4.5. Treći slučaj jela

Srednja vrijednost induktiviteta vodiča iznosi prema izrazu (4.1):

$$L_{sr} = \frac{L_{L1} + L_{L2} + L_{L3}}{3} = 1,0673 \frac{mH}{km}$$

b) Prepleteni vod:

Reducirani vlastiti SGU određuje se prema tablici 3.1:

$$D_s = 0,726 \times R = 0,726 \times 0,0163 = 11,83 \times 10^{-3} m$$

Međusobna SGU za trofazni prepleteni vod prikazan je izrazom (3.19):

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{13} \times D_{23}} = \sqrt[3]{1,7 \times 2,3 \times 3,8} = 2,4584 \frac{mH}{km}$$

Izrazom (3.10) izračunava se induktivitet vodiča:

$$L_{prepleteni} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,067325 \frac{mH}{km}$$

Izračun induktiviteta za određenu duljinu voda iznosi:

$$L = 1,067325 \frac{mH}{km} \times 5 km = 5,3366 mH$$



4.2. Tablica vrijednosti induktiviteta jela rasporeda za neprepleteni i prepleteni vod

Duljina [l]	Induktivitet prepletenog voda [L]	Induktivitet neprepletenog voda [L]		
		Faza $L_{L1}$	Faza $L_{L2}$	Faza $L_{L3}$
5km	5,3366 mH	5,119 mH	5,3695 mH	5,521 mH
10km	10,673 mH	10,238 mH	10,739 mH	11,042 mH
15km	16,0098 mH	15,357 mH	16,1085 mH	16,563 mH
20km	21,346 mH	20,476 mH	21,478 mH	22,084 mH

Neovisno radilo se o horizontalnom ili jeli rasporedu, može se primjeti da induktivitet voda kod malih udaljenosti nema velikih odskakanja ako je u pitanju prepleteni ili neprepleteni vod. Kod malih udaljenosti nije potrebno računati vod da je prepleten s obzirom da su vrijednosti neprepletenog voda približno isti.

4.3. Tablica usporedbe srednje vrijednosti induktivitete voda kod horizontalnog i jela rasporeda

Duljina [l]	Induktivitet vodova horizontalnog rasporeda	Induktivitet vodova jela rasporeda
5 km	5,984 mH	5,3366 mH
10 km	11,968 mH	10,673 mH
15 km	17,952 mH	16,0098 mH
20 km	23,936 mH	21,346 mH

Tablica 4.4. Tablica usporedbe faza neprepletenog voda kod horizontalnog i jela rasporeda

Faze	Induktivitet vodova horizontalnog rasporeda	Induktivitet vodova jela rasporeda
$L_{L1}$	1,2199 mH	1,0238 mH
$L_{L2}$	1,1506 mH	1,0739 mH
$L_{L3}$	1,2199 mH	1,1042 mH

Iz tablice 4.3. i 4.4. može se primijetiti da je induktivitet kod horizontalnog rasporeda veći od induktiviteta jela rasporeda radi većih razmaka između vodiča. Ako je razmak veći, induktivitet će također biti veći, a što je razmak manji induktivitet je manji. Uz to potrebno je paziti na razmak i broja vodiča u vodu.

## 4.2. Pad napona i jalova snaga

Prolazak struje odnosno snage uzrokuje padove napona na uzdužnim impedancijama elemenata mreže. Slika 4.6 prikazuje uzdužnu granu voda kojemu su definirane prilike na kraju voda i induktivno opterećenje na kraju voda. Struja na kraju voda i fazni napon su jednaki izrazima:

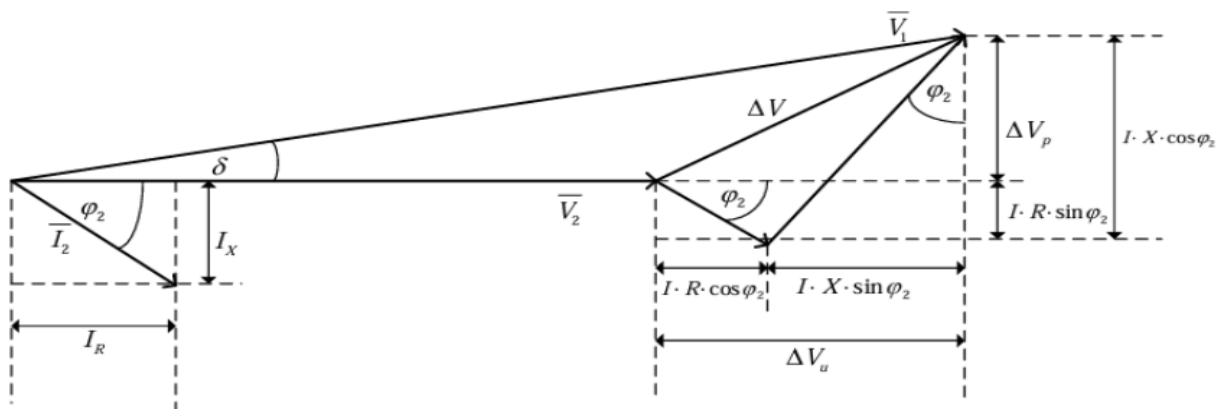
$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{\sqrt{3} \times U_2} = I_{2R} - j \times I_{21} = I_2 \angle -\varphi_2 \text{ ind.} \quad (4.4)$$



Slika 4.6. Uzdužna grana voda

Pomoću slike 4.6 opisat će se proračun pada napona.



Slika 4.7. Pad linijskog napona na serijskoj grani voda

Iz vektorskog dijagrama vidi se kako vektorski pad napona  $\Delta V$  sadrži poprečnu komponentu  $\Delta V_p$  i uzdužnu komponentu  $\Delta V_u$ . Iz geometrije vektorskog dijagrama proizlazi kako za uzdužni pad napona vrijedi:

$$\Delta V_u = I_2 \times R \times \cos\varphi_2 + I_2 \times X \times \sin\varphi_2 \quad (4.5)$$

dok za poprečni pad napona vrijedi:

$$\Delta V_p = I_2 \times X \times \cos\varphi_2 - I_2 \times R \times \sin\varphi_2 \quad (4.6)$$

Za napon na početku voda vrijedi izraz:

$$V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_u)^2 + \Delta V_p^2} \quad (4.7)$$

Vektorska razlika  $\Delta V = |V_1 - V_2|$  zove se pad napona, a razlika iznosa napona na početku i na kraju voda naziva se gubitak napona  $|V_1| - |V_2|$ .

Pad napona na vodu, gubitak napona i uzdužni napon definirani su na sljedeći način:

Pad napona  $\Delta V >$  Gubitak napona  $|V_1| - |V_2| >$  Uzdužni pad napona  $\Delta V_u$

Množenjem izraza (4.7) s  $\sqrt{3}$  dobiva se izraz za linijske napone:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_u)^2 + \Delta U_p^2} \quad (4.8)$$

Veličina  $\Delta U = \sqrt{3} \times \Delta V$  naziva se linijski pad napona.

Pad napona može se iskazati preko snaga u trofaznom sustavu:

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I \times Z = \sqrt{3} \times \frac{S_2^*}{\sqrt{3} \times U_2^*} \times Z = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2} (R + jX) = \frac{P_2 \times R + Q_2 \times X}{U_2} + j \frac{P_2 \times X - Q_2 \times R}{U_2} \quad (4.9)$$

Uzdužni i poprečni padovi napona prikazani su preko snage pri čemu su oni jednaki izrazima:

$$\Delta U_u = \frac{P_2}{U_2} \times R + \frac{Q_2}{U_2} \times X \quad (4.10)$$

$$\Delta U_p = \frac{P_2}{U_2} \times X - \frac{Q_2}{U_2} \times R \quad (4.11)$$

Napon na početku voda iznosi:

$$U_1 = \sqrt{\left[ U_2 + \left( \frac{P_2}{U_2} \times R + \frac{Q_2}{U_2} \times X \right) \right]^2 + \left( \frac{P_2}{U_2} \times X - \frac{Q_2}{U_2} \times R \right)^2} \quad (4.12)$$

Poprečna grana se inače zanemaruje, tako da izraz napona na početku voda iznosi:

$$U_1 = U_2 + \left( \frac{P_2}{U_2} \times R + \frac{Q_2}{U_2} \times X \right) \quad (4.13)$$

Pad napona na impedanciji (npr. na vodu) lakše će se zapaziti uz neka zanemarivanja, koja kod kraćih vodova ne dovode do pretjeranih velikih grešaka. [2]

Uzima se da je:  $U_1 = U_2 = U$

$$P_1 = P_2 = P$$

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

Relativni uzdužni pad napona (razlika apsolutne vrijednosti napona) iznosi:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (4.14)$$

a relativni poprečni pad napona može se definirati kutom fazne razlike:

$$\delta = \sin \delta = \frac{XP - RQ}{U^2} \quad (4.15)$$

U distribucijskoj mreži X i R će biti veličine istog reda, a jednako tako P i Q, također se bez velike greške može uzeti da je faktor snage ( $\cos \varphi$ ) skupine distribucijskih potrošača oko 0,7. Zbog toga će kut  $\delta$  u mrežama biti jednak 0, ili zanemarivo malen, a u padu napona prisustvovat će pojedinačno P i Q. [2]

U visokonaponskoj mreži je R vodova malen, ako se još uzme da struja prolazi i kroz transformator kojima je R praktički 0, vrijede izrazi:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{XQ}{U^2} \quad (4.16)$$

$$\delta = \frac{XP}{U^2} \text{ rad} \quad (4.17)$$

Bez obzira na zanemarivanja i pretpostavke, zaključuje se sljedeće:

- a) Tokovi jalovih snaga izazivaju padove napona u mreži tj. promjene jalovih snaga uzrokuje oscilacije napona.
- b) Tokovi djelatnih snaga izazivaju fazne razlike napona u mreži tj. promjene djelatnih snaga uzrokuju oscilacije faznih kutova

Problem kod visokonaponskih mreža je održavanje urednih naponskih prilika koje se može svesti na problem tokova i regulacije jalovih snaga. [2]

### 4.3. Proračun gubitaka snage

Potrebno je izračunati gubitke snage na uzdužnoj grani voda sa slike 4.6.

Gubici snage jednaki su:

$$\Delta S = 3 \times I \times \Delta V = 3 \times I^2 \times (R + jX) = 3 \times (I_R^2 + I_X^2) \times (R + jX) \quad (4.18)$$

gdje su:

$I_R$  – realna komponenta struje

$I_X$  – imaginarna komponenta struje

Raspisom prijašnjeg izraza dolazi se do:

$$\Delta S = 3 \times (I_R^2 \times R + jX \times I_R^2 + I_X^2 \times R + I_X^2 \times jX) = 3 \times [R(I_R^2 + I_X^2) + jX \times (I_R^2 + I_X^2)] \quad (4.19)$$

$$\Delta S = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \times R + jX \times \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \quad (4.20)$$

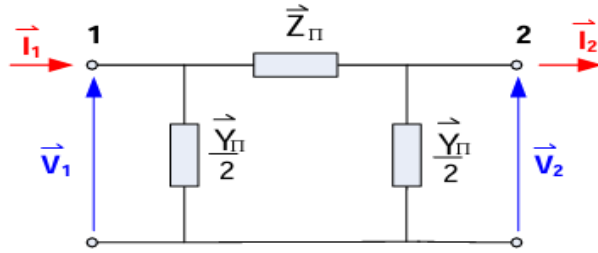
Izrazi za gubitke djelatne i jalove snage su:

$$\Delta P = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \times R \quad (4.21)$$

$$\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \times X \quad (4.22)$$

### 4.4. Padovi napona i gubici snage kod promjene vrijednosti induktiviteta

Primjerom sa slike 4.8. prikazat će se padove napona i gubitke snaga u SN mreži, ali pri tome će se zanemariti poprečna grana  $Y_\pi$  radi lakšeg određivanja napona i snage. Nazivni napon mreže je 10 kV. Snaga na kraju voda iznosi 5 MW, a faktor snage je 0,95 ind. Zadan je otpor  $R = 0,5 \Omega/km$ , a induktivitet je uzet iz prijašnjih primjera horizontalnog i jela rasporeda.



Slika 4.8.  $\pi$  model

Iz prijašnjeg primjera horizontalnog rasporeda poznat nam je induktivitet prepletenog vodiča:

$$L_1 = 1,196784 \frac{mH}{km}$$

Računanje impedancije  $Z$ :

$$\vec{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 0,5 + j0,3760 \frac{\Omega}{km} \quad (4.23)$$

$$\vec{Z} = \vec{Z}_1 \times l = 2,5 + j1,8799 \Omega \quad (4.24)$$

Napon  $V_2$  na kraju voda:

$$V_2 = \frac{\vec{U}_2}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} kV \quad (4.25)$$

Prividna snaga  $S_2$  na kraju voda:

$$\vec{S}_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} \angle \arccos \varphi_2 = 5 + j1,6434 MVA = 5,2632 \angle 18,19^\circ MVA \quad (4.26)$$

Struja  $I_2$  na kraju voda:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \times \vec{U}_2^*} = 0,28868 - j0,09488 kA = 0,30387 \angle -18,19^\circ kA \quad (4.27)$$

Zbog zanemarivanja poprečne grane  $Y_\pi$  struje su iste:

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_1 \quad (4.28)$$

Računanje napona  $V_1$  iznosi:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + \Delta \vec{V} = \vec{V}_2 + \vec{I}_{12} \vec{Z}_\pi = 6,6736 + j0,3055 kV = 6,6805 \angle 2,6208^\circ kV \quad (4.29)$$

Napon  $U_1$  na početku voda:

$$\vec{U}_1 = \sqrt{3} \times \vec{V}_1 = 11,5589 + j0,5291 \text{ kV} = 11,5710 \angle 2,6208^\circ \text{ kV} \quad (4.30)$$

Prividna snaga  $S_1$  na početku voda:

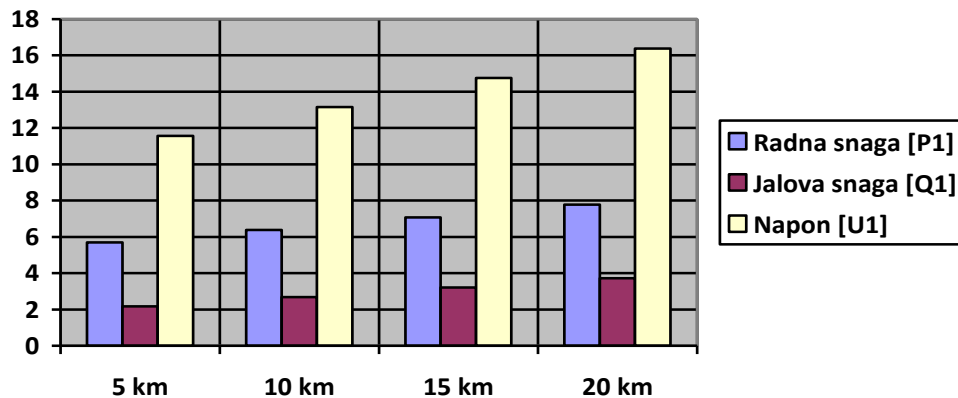
$$\vec{S}_1 = \sqrt{3} \times \vec{U}_1 \times \vec{I}_1^* = 5,6926 + j2,1641 \text{ MVA} = 6,0901 \angle 20,81^\circ \text{ MVA} \quad (4.31)$$

Ukupna snaga  $\Delta S$ :

$$\Delta \vec{S} = \vec{S}_1 - \vec{S}_2 = 0,6926 + j0,5207 \text{ MVA} = 0,8665 \angle 36,94^\circ \text{ MVA} \quad (4.32)$$

#### 4.5. Tablica vrijednosti $\pi$ modela za horizontalni raspon

Duljina [l]	Napon [ $U_1$ ]	Radna snaga [ $P_1$ ]	Jalova snaga [ $Q_1$ ]
5 km	11,5710 $\angle$ 2,6208° kV	5,6926 MW	2,1641 MVAr
10 km	13,1606 $\angle$ 4,6126° kV	6,3850 MW	2,6853 MVAr
15 km	14,7625 $\angle$ 6,1734° kV	7,0775 MW	3,206 MVAr
20 km	16,3733 $\angle$ 7,4278° kV	7,7703 MW	3,7263 MVAr



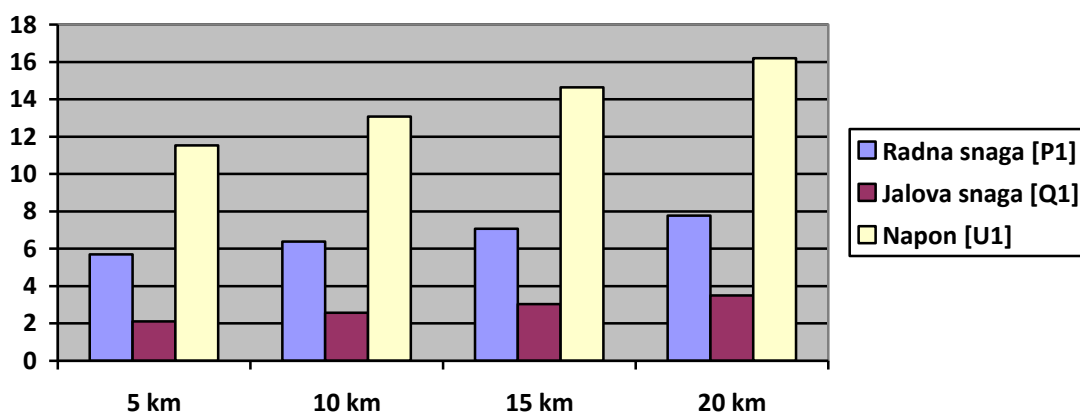
Slika 4.9. Prikaz vrijednosti za horizontalni raspored

Izračun vrijednosti za induktiviteta prepletenog vodiča kod jela rasporeda:

$$L_1 = 1,067325 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

#### 4.6. Tablica vrijednosti $\pi$ modela za jela raspored

Duljina [l]	Napon [ $U_1$ ]	Radna snaga [ $P_1$ ]	Jalova snaga [ $Q_1$ ]
5 km	11,5334 $\angle$ 2,1238° kV	5,6925 MW	2,108 MVar
10 km	13,0790 $\angle$ 3,7475° kV	6,3852 MW	2,5720 MVar
15 km	14,6329 $\angle$ 5,0272° kV	7,0778 MW	3,0364 MVar
20 km	16,1926 $\angle$ 6,0608° kV	7,7705 MW	3,5003 MVar



Slika 4.10. Prikaz vrijednosti za jela raspored

Usporedba vrijednosti horizontalnog i jela rasporeda:

#### 4.7. Tablica usporedbe srednje vrijednosti horizontalnog i jela rasporeda

HORIZONTALNI RASPORED			JELA RASPORED		
NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVar]	NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVar]
11,5710 $\angle$ 2,6208°	5,6926	2,1641	11,5334 $\angle$ 2,1238°	5,6925	2,108
13,1606 $\angle$ 4,6126°	6,3850	2,6853	13,0790 $\angle$ 3,7475°	6,3852	2,5720
14,7625 $\angle$ 6,1734°	7,0775	3,206	14,6329 $\angle$ 5,0272°	7,0778	3,0364
16,3733 $\angle$ 7,4278°	7,7703	3,7263	16,1926 $\angle$ 6,0608°	7,7705	3,5003



Uočava se u tablici 4.7 da horizontalni raspored ima veće padove napona i gubitke snage zbog rasporeda vodiča u vodu slika 4.9, dok jela raspored ima manje gubitke u mreži slika 4.10. Što su vodovi bliži jednom drugome induktivitet će biti manji, a time će padovi napona i gubitci snage biti manji u sustavu. Kod visokih napona su naponska opterećenja veća, pa time i razmak između vodiča što dovodi do većih induktiviteta.

4.8. Tablica usporedbe vrijednosti faze  $L_{L1}$  horizontalnog i jela rasporeda

HORIZONTALNI RASPORED			JELA RASPORED		
Faza $L_{L1}$			Faza $L_{L1}$		
NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVar]	NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVar]
11,5779∠2,71°	5,6928	2,1739	11,5209∠1,96°	5,6926	2,0889
13,1753∠4,76°	6,385	2,705	13,0522∠3,45°	6,3851	2,5345
14,7861∠6,37°	7,0775	3,2359	14,5906∠4,64°	7,0777	2,9795
16,4062∠7,67°	7,7703	3,7664	16,1339∠5,59°	7,7701	3,4254

$L_{L1}$  i  $L_{L3}$  – imaju isti induktivitet kod horizontalnog raspona zbog jednake međusobne udaljenosti

4.9. Tablica usporedbe vrijednosti faze  $L_{L2}$  horizontalnog i jela rasporeda

HORIZONTALNI RASPORED			JELA RASPORED		
Faza $L_{L2}$			Faza $L_{L2}$		
NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVA $r$ ]	NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVA $r$ ]
11,5710 $\angle$ 2,62°	5,6925	2,1442	11,5353 $\angle$ 2,15°	5,6927	2,1103
13,1312 $\angle$ 4,30°	6,3851	2,6448	13,0832 $\angle$ 3,79°	6,385	2,5784
14,7157 $\angle$ 5,76°	7,0778	3,1453	14,6394 $\angle$ 5,09°	7,0777	3,0452
16,3079 $\angle$ 6,94°	7,7701	3,6464	16,2017 $\angle$ 6,13°	7,7699	3,5132

4.10. Tablica usporedbe vrijednosti faze  $L_{L3}$  horizontalnog i jela rasporeda

HORIZONTALNI RASPORED			JELA RASPORED		
Faza $L_{L3}$			Faza $L_{L3}$		
NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVA $r$ ]	NAPON $U_1$ [kV]	RADNA SNAGA $P_1$ [MW]	JALOVA SNAGA $Q_1$ [MVA $r$ ]
11,5779 $\angle$ 2,71°	5,6928	2,1738	11,5441 $\angle$ 2,26°	5,6926	2,1239
13,1753 $\angle$ 4,76°	6,385	2,705	13,1020 $\angle$ 4°	6,3852	2,6044
14,7861 $\angle$ 6,37°	7,0775	3,2359	14,6692 $\angle$ 5,35°	7,0777	3,0848
16,4062 $\angle$ 7,67°	7,7703	3,7664	16,2432 $\angle$ 6,45°	7,7700	3,5656

Radi efikasnijeg i pouzdanijeg proračuna pada napona i gubitaka snaga izračunata je svaka faza njihovih gubitaka. Iz tablice može se uočiti da horizontalni raspon ima veće gubitke i padove napona na svakoj fazi nego jela raspored, a za to je odgovoran međusoban razmak između vodiča.

## 5. ANALIZA PROMJENE VRIJEDNOSTI VODA

### 5.1. Sredstva i mjere za smanjenje pada napona

Izraz neposredno i jasno pokazuje koje su potrebne mjere za smanjenje padova napona u mreži. Na padove napona može se utjecati djelovanjem na tri veličine:

- napon  $U$
- reaktanciju  $X$
- jalovu snagu  $Q$

Kako bi se smanjio pad napona potrebno je: povećati napon  $U$ , smanjiti reaktanciju  $X$ , smanjiti jalovu snagu  $Q$ .

Činjenica je da se navedene mjere ne mogu dosljedno i svakom pogonskom slučaju izvršiti iz raznih ekonomskih i pogonskih razloga. Padove napona može se još umanjiti, ako se dodatno provede kompenzacija padova napona. Neke od mogućih spomenutih mjera su statičke naravi, bez mogućnosti sporijeg ili bržeg prilagođavanja pogonskom stanju (opterećenju, uklopnom stanju), dok druge mjere, korištenjem adekvatnih sredstava, imaju mogućnost prilagođavanja. Sredstva koja imaju odgovarajuće svojstvo za prilagodbu koriste se u sustavu regulacije napona. [4]

### 5.2. Smanjenje reaktancije

Smanjenje reaktancije se može provesti upravo na elementu mreže (npr. voda) gdje postoji ili se očekuje znatan pad napona, ili u mreži kao jedna cjelina.

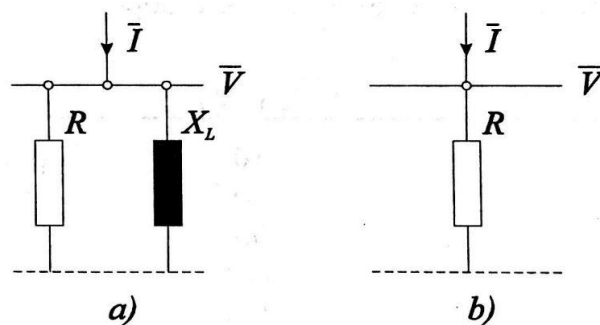
Kod vodova smanjenje reaktancije može se postići:

- a) izgradnjom voda paralelnog postojećem. Ukupna reaktancija te grane će se smanjiti na pola uz povećanje investicije za 100%.
- b) izgradnjom dvostrukog voda umjesto jednostrukog. Ukupna reaktancija te grane će se smanjiti na pola uz povećanje investicije oko 70%.
- c) primjenom vodiča u snopu umjesto s jednostrukim vodičima. Reaktancija će se smanjiti oko 25%, a investicija će se povećati za oko 20%.
- d) postavljanjem kabela umjesto zračnog voda. Smanjenje reaktancije je na četvrtinu, uz povećanje investicije za minimalno 200%.
- e) djelomična ili cjelovita kompenzacija reaktancije  $X$

Mjere pod a), b), i c) zahtijevaju investicijska ulaganja i upotrebljavat će se samo ako postoji opravdani razlog, kao što je npr. povećanje prijenosne moći ili sigurnost pogona. Mjera navedena pod d) se koristi samo ako određeni razlozi izričito zahtijevaju na primjer; dužina kabela visokog napona je ograničena, zbog pogonskog (poprečnog) kapaciteta. Mjera navedena pod e) može, pod stanovitim uvjetima, predstavljati razumnu soluciju, a oslanja se na uporabu serijskih kondenzatora. Koristi se kod vodova najviših napona kod prijenosa na velike udaljenosti. Za određivanje parametra serijskog kondenzatora potrebno je znati nazivnu struju dalekovoda, njegovu kapacitivnu reaktanciju, te stupanj kompenzacije reaktancije. Stupanj izolacije prema zemlji određen je nazivnim naponom voda, a stupanj izolacije samih kondenzatorskih elemenata određen je njihovim nazivnim i očekivanim sklopnim prenaponima. Treba spomenuti da nazivnu struju dalekovoda nije moguće definirati kao kod generatora, transformatora ili motora. Ako sustav ima velike gubitke, nazivna struja dalekovoda će biti veća, a to znači da utjecati na sve ostale elemente u sustavu. Veće strujno opterećenje dalekovoda ograničeno je još sa udaljenošću vodiča od tla pošto veće zagrijavanje vodiča povećava provjes. [2]

### 5.3. Smanjenje jalove snage u mreži

Lako se može ustanoviti da mnoge vrste trošila za svoje pravilno funkcioniranje moraju iz mreže, uz djelatnu snagu uzimati i jalovu snagu. Takvi potrošači će se bez iznimke ponašati kao poprečna grana, kojoj je ekvivalent prikazan na slici 5.1. Kao što je prikazano, paralelno je spojen omski otpor  $R$  i induktivna reaktancija  $X_L$ .



Slika 5.1. Osnovni tipovi trošila

Struja  $\vec{I}$  će kasniti u fazi za (faznim) naponom  $\vec{V}$ . Za tipična manja trošila prirodni faktor snage bez kompenzacije, ovisno o snazi i izvedbi je sljedeći:

Tablica 5.1. Vrijednost faktora snage za određene potrošače

Trošilo	Opterećenje	cos $\varphi$
Univerzalni motor	$P_n$	0,85 – 0,95
Asinkroni motor, jednofazni	$P_n$	0,6 – 0,75
Asinkroni motor, trofazni	$P_n$	0,7 – 0,9
Asinkroni motor, trofazni	0,25 $P_n$	0,3 – 0,6
Fluorescentna svjetiljka		0,45 – 0,55
Živina svjetiljka		0,5 – 0,6
Natrijeva svjetiljka		0,2 – 0,35

Također sami elementi mreže (transformatori, vodovi) doprinose bilanci jalovih snaga, i to u poprečnim granama ovisno o naponu, a u uzdužnim granama ovisno o struji. Tipične trofazne jalove snage u poprečnim granama elemenata mreže su sljedeće:

Tablica 5.2. Vrijednost jalove snage za određene elemente mreže

Element mreže	U (kV)	Jalova snaga
Zračni vod	10	kap. 0,25 kvar/km
	20	1
	35	3,4
	110	33
	220	134
	400	500
Kabel	10	12,5
	20	43
	35	115
Kabel (uljni)	110	950
Transformator		ind. 0,01 – 0,025 $S_n$

Izraz 5.1 prikazuje kompleksnu trofaznu snagu:

$$\vec{S} = 3\vec{V}\vec{I}^* \quad (5.1)$$

iz izraza je ustanovljeno da su za rad trošila i transformatora potrebne znatne zalihe induktivne jalove snage, a vodovi svojim pogonskim kapacitetima generiraju upravo jalovu snagu. Nije moguće samo s time postignuti ravnotežu u mreži. Uz konstantni napon vodovi generiraju konstantnu induktivnu jalovu snagu, a potrošači, u skladu s dnevnim dijagramom opterećenja, troše tijekom vremena vrlo različitu jalovu snagu. Naime, prolaz struje kroz uzdužne induktivne reaktancije vodova također izaziva tijekom vremena promjenjive gubitke induktivne jalove snage:

$$Q_V = 3I^2 X_L = 3I^2 \omega L \quad (5.2)$$

Analogno tome, gubitke induktivne jalove snage uzrokuju i prolaz struje opterećenja kroz transformator. Jalove gubitke može se lakše izračunati po izrazu:

$$Q_{TR} = \frac{e_k}{S_n} S^2 \quad (5.3)$$

Što pri nazivnom opterećenju transformatora daje:

$$Q_{TRn} = e_k \times S_n \quad (5.4)$$

Kod određene struje  $I$  kroz vod induktivna jalova snaga  $Q_V$  je jednaka kapacitivnoj jalovoj snazi  $Q_C$  uslijed pogonskog (poprečnog) kapaciteta:

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C \quad (5.5)$$

Ako se prenosi samo djelatna snaga, slučaj  $Q_V = Q_C$  odgovara prijenosu "prirodne snage". Općenito ako je određeni vod, po definiciji  $Q_V < Q_C$  (manje opterećenje), tada će vod generirati induktivnu snagu (dominantna komponenta je kapacitet), a kod  $Q_V > Q_C$  (veće opterećenje) trošiti će induktivnu snagu (dominantna komponenta je induktivitet). Na temelju ovih razmatranja može se lako zaključiti, da će u mreži u cjelini postojati tijekom vremena promjenjivi nedostatak jalove snage. Nedostatak pokrivaju generatori u elektranama. Generatori određuju smjer kretanja jalove snage od izvora k potrošačima. Tokove jalove snage potrebno je smanjiti na minimum. To će se postići tako da se jalova snaga prikladnim sredstvima ili ti uređajima, neposredno generira u onoj točki mreže gdje je potrebno, i to upravo u adekvatnoj količini i tada bi dobili slučaj potpune kompenzacije jalove snage. Usprkos tome nije moguće ostvariti ovaj idealni pogonski princip, zbog niza razloga ekonomske i tehničke naravi, ali se nastoji ostvariti taj cilj. [2]

## 6. ZAKLJUČAK

U uvodu je određen cilj rada, a to je upoznavanje, razumijevanje i prikaz proračunima ovisnost induktiviteta nadzemnih vodova o položaju vodiča na stupu. U početku rada opisani su nadzemni elektroenergetski vodovi te njihovi osnovni elementi i funkcija rada. Uz to je opisana pogonska problematika nadzemnih vodova i način projektiranja vodova. U nastavku rada prikazuju se mjerne jedinice i potrebne formule za određivanje parametara nadzemnih elektroenergetskih vodova. Matrice jediničnih konstanti voda je širok pojam, iz tog razloga su definirani oni elementi koji se odnose na temu rada, a to su: induktivitet, ulančeni tok punog cilindričnog vodiča, postupak srednje geometrijske udaljenosti, preplet.

Induktivitet ima tendenciju da se suprotstavi promjeni električne struje koja prolazi kroz električni vodič. Faradayev zakon indukcije je osnovni zakon elektromagnetizma koji predviđa kako će magnetsko polje djelovati s električnim krugom i proizvesti elektromotornu silu tzv. elektromagnetsku indukciju. Ulančani tok punog cilindričnog vodiča je ukupan magnetski tok obuhvaćen zavojnicom kojom teče struja te je jednaka umnošku broja zavoja i toka kroz pojedini zavoj. Postupak srednje geometrijske udaljenosti omogućava lakše izračunavanje induktiviteta voda. Na primjeru se prikazuje računanje sa i bez SGU metode pri čemu se primjećuje jednostavnije izračunavanje induktiviteta voda. U radu se također spominje preplet koji je vrlo bitan pri projektiranju nadzemnih vodova.

Pri kraju rada nalaze se proračuni za padove napona i gubitaka snage na vodu. Spomenut je i način smanjivanja pada napona, jalove snage i reaktancije uz pomoć sredstva i mjera. Primjerom su prikazani induktiviteti horizontalnog i jela rasporeda ovisno o duljini voda. Nakon toga, izračunom pada napona i gubitaka snage, tablično prikazali rezultate. Iz dobivenih vrijednosti vidljivo je da jela ima manje gubitke snaga i padove napona nego horizontalni zbog rasporeda i položaja vodiča na stupu. Jela raspored je sličan jednakostraničnom trokutu te su mu zbog toga padovi napona i gubitci snage mali. Što se tiče smanjenja pada napona, potrebno je smanjiti reaktanciju i jalovu snagu, a povećati napon. Povećana impedancija rezultira većim naponom i strujom na početku voda, a to znači veća ulazna snaga. Smanjenje reaktancije može se postići: izgradnjom paralelnog voda postojećem, izgradnjom dvostrukog voda umjesto jednostrukog, postavljanjem kabela umjesto zračnog voda, primjenom vodiča u snopu umjesto s jednostrukim vodičima i cjelovitom ili djelomičnom kompenzacijom reaktancije. Kompenzacijom jalove snage omogućuje se veća sigurnost opskrbe električne energije i naponska stabilnost u prijenosnoj mreži. Distribucijska

mreža može se dijeliti na industrijsku mrežu i komunalnu mrežu. Kompenzacijom jalove snage u industrijskoj mreži žele se smanjiti troškove opskrbe električne energije dok je kod električne komunalne mreže cilj poboljšati električnu energiju i smanjiti troškove distribucije.



## 7. LITERATURA

[1] Ožegović, Marija; Ožegović, Karlo: „Električne energetske mreže I“, FESB Split, OPAL COMPUTING d.o.o. Split 1996.

[2] Ožegović, Marija; Ožegović, Karlo: „Električne energetske mreže IV“, FESB Split, OPAL COMPUTING d.o.o Split 1996.

[3] Mikić, Marinko: „Usporedba svojstva nadzemnog dalekovoda i podzemnog kabela 10 kV distribucijsku mrežu“, sa interneta: 25.08.2021.

[4] Kuzle, Igor: „Zbornik radova; Kompenzacija jalove snage“, FER Zagreb, Hrvatska komora inženjera elektrotehnike Zagreb 2009.

[5] Prehoč, Dino: „Određivanje uzdužne impedancije nadzemnog voda“, sa interneta: 29.08.2021.

[6] „Električni vodovi“, sa interneta:

[https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni\\_vodovi.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni_vodovi.pdf), 20.08.2021.

[7] „Dalekovodi“, sa interneta:

<https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/dalekovodi.pdf>, 20.08.2021.

[8] „Nadomjesni modeli vodova točni i približni  $\pi$  i T modeli, sa interneta:

<https://moodle.srce.hr/2020-2021/course/view.php?id=74009>, 3.10.2021.

[9] „Prijenos i razdjela električne energije – FER, sa interneta:

[https://www.fer.unizg.hr/download/repository/PRIJENOS\\_I\\_RAZDJELA\\_ELEKTRICNE\\_ENERGIJE.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/PRIJENOS_I_RAZDJELA_ELEKTRICNE_ENERGIJE.pdf), 13.12. 2021.

## 8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU

### 8.1. Sažetak na hrvatskom jeziku

Cilj ovog rada je opisati ovisnost induktiviteta nadzemnih vodova o položaju vodiča na stupu. Potrebno je opisati jedinični induktivitet kao konstantu voda. Usporediti vrijednosti induktiviteta kod prepletenog i neprepletenog voda u ovisnosti o položaju vodiča na stup za različite duljine vodova. Provesti analizu kako promjena vrijednosti induktiviteta utječe na padove napona na vodu te gubitke snage. Uz to pokušat ćemo naći najbolje rješenje za smanjenje padova napona na vodu i gubitke snage u mreži. Kao bi uspostavili ravnotežu u elektroenergetskom sustavu.

**Ključne riječi:** induktivitet, padovi napona i gubitci snage.

### 8.2. Sažetak na engleskom jeziku

The purpose of this paper is to describe the dependence of the inductance of overhead on the position of the conductor on the pole. It is necessary to describe the unit inductance as a line constant. Compare the values of inductance in twisted and non-twisted wires depending on the position of the conductor on the pole for different line lengths. Conduct an analysis of how a change in the value of the inductance affects the voltage drops across the line and power losses. In addition, we will try to find the best solution to reduce line voltage drops and power losses in the network. In order to establish a balance in the power system.

**Keywords:** inductance, voltage drops and power losses.

## 9. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Vodič u rasponu .....	11
Slika 2.2. Stupovi u trasi za dalekovod .....	15
Slika 2.3. Temeljenje drvenog stupa s pomoću betonskih nogara (a) i betonskog temelja (b).....	18
Slika 2.4. Model $\pi$ i T .....	23
Slika 3.1. Magnetsko polje unutar i izvan vodiča .....	24
Slika 3.2. Podjela vodiča na grupu A i B .....	26
Slika 3.3. $D_s$ raznih vodiča.....	28
Slika 3.4. Vlastita SGU (srednja geometrijska udaljenost).....	28
Slika 3.5. Reducirani vlastiti SGU za vodiče u snop .....	28
Slika 3.6. Raspored voda od dva vodiča .....	29
Slika 3.7. Raspored voda od tri vodiča.....	30
Slika 3.8. Stup sa vrhovima jednakostraničnog trokuta .....	31
Slika 3.9. Preplet voda.....	31
Slika 3.10. Djelomični preplet dvostrukog voda.....	32
Slika 3.11. Potpuni preplet dvostrukog voda .....	33
Slika 4.1. Horizontalni raspored vodiča .....	34
Slika 4.2. Jela raspored vodiča .....	36
Slika 4.3. Prvi slučaj jela.....	37
Slika 4.4. Drugi slučaj jela .....	37
Slika 4.5. Treći slučaj jela .....	38
Slika 4.6. Uzdužna grana voda.....	40
Slika 4.7. Pad linijskog napona na serijskoj grani voda.....	40
Slika 4.8. $\pi$ model .....	44
Slika 4.9. Prikaz vrijednosti horizontalnog rasporeda.....	45
Slika 4.10. Prikaz vrijednosti jela rasporeda. ....	46
Slika 5.1. Osnovni tipovi trošila.....	50

## 10. POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tablica vrijednosti induktiviteta horizontalnog raspona za neprepleteni i prepleteni vod .....	35
Tablica 4.2. Tablica vrijednosti induktiviteta jela rasporeda za neprepleteni i prepleteni vod .....	39
Tablica 4.3. Tablica usporedbe srednje vrijednosti induktivitete voda kod horizontalnog i jela rasporeda .....	39
Tablica 4.4. Tablica usporedbe neprepletenog voda kod horizontalnog i jela rasporeda .....	39
Tablica 4.5. Tablica vrijednosti $\pi$ modela za horizontalni raspon .....	45
Tablica 4.6. Tablica vrijednosti $\pi$ modela za jela raspon .....	46
Tablica 4.7. Tablica usporedbe srednje vrijednosti horizontalnog i jela rasporeda .....	46
Tablica 4.8. Tablica usporedbe vrijednosti faze $L_{L1}$ horizontalnog i jela rasporeda .....	47
Tablica 4.9. Tablica usporedbe vrijednosti faze $L_{L2}$ horizontalnog i jela rasporeda .....	48
Tablica 4.10. Tablica usporedbe vrijednosti faze $L_{L3}$ horizontalnog i jela rasporeda .....	48
Tablica 5.1. Vrijednosti faktora snage za određene potrošače .....	51
Tablica 5.2. Vrijednosti jalove snage za određene elemente mreže.....	51