

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**NADOMJESNI MODELI ELEKTROENEGRETSKIH VODOVA S  
KONCENTRIRANIM PARAMETRIMA**

Rijeka, srpanj 2016.

Toni Diklić

0069058855

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**NADOMJESNI MODELI ELEKTROENEGRETSKIH VODOVA S  
KONCENTRIRANIM PARAMETRIMA**

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, srpanj 2016.

Toni Diklić

0069058855

**TEHNIČKI FAKULET**

Povjerenstvo za završne ispite  
prediplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-04/16-14/37  
Rijeka, 14.03.2016.

# Z A D A T A K

## za završni rad

Pristupnik: Toni Diklić

Matični broj : 0069058855  
Lokalni matični broj: 12800016

Naziv zadatka:

**NADOMJESNI MODELI ELEKTROENERGETSKIH  
VODOVA S KONCENTRIRANIM PARAMETRIMA**Title (*English*):**EQUIVALENT MODELS OF OVERHEAD POWER LINES  
WITH CONCENTRATED PARAMETERS**Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika  
Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

Konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova. Prijenosne jednadžbe. Točan i približan  $\Pi$  nadomjesni model elektroenergetskog voda. Točan i približan T nadomjesni model elektroenergetskog voda. Usporedba vrijednosti uzdužnih impedancija i poprečnih admitancija približnih  $\Pi$  i T modela za različite duljine vodova.

Mentor:



---

V. pred. mr. sc. Marijana Živić Đurović,  
dipl.ing.

Predsjednica Povjerenstva:



---

Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:



---

Toni Diklić

*Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.*

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno članku 10. "Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija" Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku za završni rad pod brojem 602-04//16-14/37 (nadmjesni modeli elektroenergetskih vodova s koncentriranim parametrima) uz konzultiranje s mentorom.

Toni Diklić

Rijeka, srpanj 2016.

---

0069058855

# SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	4
1. UVOD.....	1
2. ELEKTROENERGETSKI VODOVI .....	3
2.1. Vodič .....	5
2.2. Izolatori .....	6
2.3. Pribor.....	6
2.4. Stupovi .....	7
2.5. Temelj.....	9
2.6. Uzemljenje .....	10
3. KONSTANTE VODA.....	12
4. PRIJENOSNE JEDNAŽBE .....	16
4.1. Telegrafske jednažbe.....	16
4.2. Opće rješenje prijenosnih jednažbi.....	17
4.3. Prvi oblik prijenosnih jednažbi.....	18
4.4. Drugi oblik prijenosnih jednažbi.....	19
4.5. Treći oblik prijenosnih jednažbi.....	20
5. TOČAN I PRIBLIŽAN $\pi$ i T NADOMJESNI MODEL ELEKTROENERGETSKOG VODA .....	21
5.1. Točan $\pi$ model voda .....	21
5.2. Točan T model voda.....	23
5.3. Korekcijski faktor $\pi$ i T modela voda.....	24
5.4. Proračun prijenosa pomoću $\pi$ -sheme .....	26
5.5. Proračun prijenosa pomoću T-sheme .....	29
6. USPOREDBA PRIBLIŽNIH I TOČNIH VRIJEDNOSTI UZDUŽNIH IMPEDANCIJA I POPREČNIH ADMITANCIJA $\pi$ I T MODELA ZA RAZLIČITE DULJINE VODOVA.....	32
6.1. Izračun i grafički prikaz približne i točne uzdužne impedancije i poprečne admitancije kod nadomjesnog $\pi$ modela voda na vrlo visokom naponu (400 kV).....	35
6.2. Izračun i grafički prikaz približne i točne uzdužne impedancije i poprečne admitancije kod nadomjesnog T modela voda na vrlo visokom naponu (400 kV).....	40

6.3. Izračun i tablični prikaz napona i struja na kraju i na početku nadomjesnog $\pi$ modela voda sa približnim i stvarnim vrijednostima na vrlo visokom naponu (400 kV) .....	46
6.4. Izračun i tablični prikaz napona i struja na kraju i na početku nadomjesnog T modela voda sa približnim i stvarnim vrijednostima na vrlo visokom naponu (400 kV) .....	52
7. ZAKLJUČAK.....	58
8. POPIS LITERATURE.....	59
9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	61

# 1. UVOD

Elektroenergetski sustavi su tehničko-tehnološki sustavi koji obuhvaćaju proizvodnju, prijenos, raspodjelu i potrošnju električne energije neke zemlje ili nekog određenog područja. Elektroenergetski sustav čine elektrane, transformatorske stanice, vodovi za prijenos i raspodjelu te uređaji za potrošnju električne energije. Složenost sustava proizlazi iz toga što je električnu energiju nemoguće skladištiti pa se razina proizvodnje mora neprekidno izjednačivati s potrebama potrošnje. Ta je zadaća dodatno otežana nepredvidljivim promjenama potrošnje. Potrošači električnu energiju troše u doba kada im odgovara. Razina potrošnje mijenja se tijekom dana, a može se predočiti dnevnim dijagramom opterećenja: potrošnja je električne energije je najmanja u kasnim noćnim satima, veća u prijepodnevnim satima i najveća u popodnevnim i ranim večernjim satima. Osim dnevnih promjena, postoje i tjedne promjene opterećenja (npr. nedjeljni dijagram opterećenja znatno se razlikuje od dijagrama radnog dana). Potrošnja ovisi i o godišnjem dobu (uporaba električne energije za grijanje ili hlađenje ovisi o vanjskoj temperaturi, uporaba rasvjete ovisi o duljini dana),[1],[5].

U elektroenergetskim sustavima osim proračuna snaga, napona i struja proizvodnje, transformacije i potrošnje električne energije, uzimaju se u obzir i proračuni prijenosa.

U drugom poglavlju opisani su osnovni dijelovi nadzemnih vodova. Oni služe za prijenos električne energije od elektrane do transformatora, od transformatora do transformatora i transformatora do potrošača. Elektroenergetski vodovi su cjelina koja se sastoji od više dijelova. Osnovni dijelovi nadzemnih vodova su: temelj, stup, izolator, vodič, spojni element i zaštitna užad.

U trećem poglavlju opisane su konstante voda. Konstante voda su električna svojstva nadzemnih vodova pomoću kojih se definiraju električne prilike na određenom pogonskom slučaju. One su potrebne kako bi se moglo izračunati određene karakteristične jednadžbe za proračun voda i najčešće su zadane po kilometru. Konstante voda su: R - jedinični djelatni otpor (Ohm/km), L - jedinični induktivitet (H/km), C - jedinični kapacitet (F/km), G - jedinični odvod (S/km).

U četvrtom poglavlju opisane su prijenosne jednadžbe. S njima se koristimo kako bi se izračunale početne ili krajnje vrijednosti struje ili napona na vodu. Temelj za određivanje prijenosnih jednadžbi je korištenje: telegrafске jednadžbe, opća rješenja prijenosnih jednadžbi, te prijenosne jednadžbe.

U petom poglavlju opisani su točan i približan  $\pi$  i T nadomjesni model elektroenergetskog voda. Nadomjesne modele vodova prikazuju se pomoću uzdužnih impedancija i poprečnih admitancija voda. Njihov položaj između sabirnica na početku i sabirnica na kraju definira vrstu modela Pi ili T, ili Gama ili lanac četveropola. Na nadomjesnim modelima može se prikazati napone i struje pomoću prvog i drugog Kirchoffovog zakona na taj način izračunati traženu nepoznanicu.

U šestom poglavlju obrađen je primjer izračunavanja parametara voda. Proračun se sastoji od dva dijela. U prvom dijelu zadatka su prikazane razlike između točnih i približnih vrijednosti uzdužnih impedancija te poprečnih admitancija nadomjesnog  $\pi$  i T modela. Drugi dio zadatka temelji se na izračunanim vrijednostima na početku voda, ukoliko postoje zadane vrijednosti na kraju voda. Za taj dio izračunate su približne i točne vrijednosti te je prikazana pogreška kod  $\pi$  i T modela voda.



## 2. ELEKTROENERGETSKI VODOVI

Elektroenergetski vodovi su dio postrojenja koji služe za prijenos električne energije od izvora (generatora) do potrošača (kućanstva, tvornica). U postrojenjima postoje dvije vrste elektroenergetskih vodova: podzemni elektroenergetski vodovi (kabeli) i nadzemni elektroenergetski vodovi (nadzemni vodovi slobodni, zračni). Nadzemni elektroenergetski vodovi su jeftiniji jer nema potrebe za dodatnim zaštitama i izolacijama, dok su kabeli skuplji jer imaju potrebu za raznim zaštitama i izolacijama. Kabeli se postavljaju ondje gdje to zahtijevaju tehnički uvjeti (povezivanje otoka s kopnom) [1], [2], [3].



*Slika 2.1. Prikaz nadzemnih vodova (dalekovoda)*



*Slika 2.2. Podzemni kabeli upostrojenju kod TS Melina*

Kod samog popravka kabla puno je zahtjevniji zahvat, nego kod nadzemnih vodova. Popravak kablova može trajati 3 - 30 dana ovisno o izvedbi, dok kod nadzemnog voda cijela procedura od pronalaska kvara, prijevoza ljudi (tehničara) na mjesto kvara i otklona kvara traje jedan dan, [1], [3].

Nadzemni vodovi dijele se na više izvedbi koje određuju projektanti:

- nazivni napon voda
- broj strujnih krugova na vodu
- materijal i konstrukcija vodiča
- materijal i konstrukcija stupa

Osnovni elementi koji se koriste na nadzemnim vodovima su:

- temelji gdje se učvršćuje stup
- stupovi
- izolatori
- vodiči
- spojni, ovjesni i zaštitni materijal
- uzemljenje i zaštitna užad

## 2.1. Vodič

Vodiči su jedini elementi električnog voda čija je zadaća provoditi električnu struju. Od njih se zahtjeva dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost protiv oštećenja i slično. Kao takav materijal najbolje se pokazao aluminij i aluminijeve slitine, stoga se one uglavnom i koriste. Iako bakar ima najbolja električna svojstva, ne upotrebljava se jer ima dosta nedostataka kao što su: velika težina, loša mehanička svojstva, loša otpornost na klimatske uvjete te cijena. Za prijenos velikih snaga i velikih napona koriste se vodiči u obliku užadi. Budući da aluminij nije dovoljno čvrst koristi se kombinacija aluminija i čelika čime čelik daje potrebnu čvrstoću, a aluminij provodi struju, [3], [4], [5].



*Slika 2.1. Al/Če kabel*

## 2.2. Izolatori

Na stupu dalekovoda nalaze se izolatori čija je uloga da daju vodu mehaničku čvrstoću te električki odvajaju vodič od stupova i njihovih uzemljenih dijelova. Materijali od kojih se izrađuju su porculan i posebno kaljeno staklo. Danas se uglavnom prelazi na staklene izolatore. Iako porculanski imaju bolja izolatorska svojstva i dulji vijek trajanja, stakleni izolatori imaju bitnu prednost, a to je njihova jednostavnost, brzina njihove izrade i što je najbitnije lako pronalaženje mjesta kvara te brzo otklanjanje. Postoje dvije vrste izolatora, potporni izolatori prikazani na slici 2.3 a), oni se koriste kod niskog napona, i ovjesni izolatori prikazani na slici 2.3 b), oni se koriste kod srednjeg i visokog napona, [3], [4], [5].



Slika 2.2. a) potporni izolator, b) ovjesni izolator

## 2.3. Pribor

U dalekovodnim stupovima upotrebljava se pribor koji se može podijeliti u spojni, ovjesni te zaštitni pribor.

- Spojni pribor- ima funkciju da omogući prolaz električne struje
  - koristi se za međusobno spajanje aluminijskih i bakrenih vodiča pri čemu se koriste posebne stezaljke i spojnice kako ne bi došlo do korozije
  - koriste se kako bi zaštitno uže također bilo prikladno postavljeno na vrh stupa sa pouzdano ostvarenom galvanskom vezom prema stupu.
- Ovjesni pribor- koristi se kako bi držao ovjesne elemente sa zavješanjem na stup s jedne i vodiča sa druge strane
- Zaštitni pribor- ima ulogu da štiti dalekovod od:
  - električnog luka- pomoću rogova i prstenova (oni udaljavaju električni luk od blizine izolatora)

- mehaničkog utjecaja - pomoću prigušivača vibracija (sprječava se zamor materijala)
- raspore vodova - pomoću utega (sprječava se njihanje vodova te mogućnost njihovog međusobnog dodirivanja),[3],[4],[5].



*Slika 2.3. Prikaz roga za udaljavanje električnog luka*

## 2.4. Stupovi

Elementi koji osiguravaju odgovarajuću visinu vodiča iznad tla su stupovi. Osim toga oni na sebi sadrže sav popratni pribor ( izolatore, pribor, zaštitno uže i slično). Za njihov pravilan odabir potrebno je poznavati sve sile koje će djelovati na njega, što je jako bitno kako ne bi došlo do njegovog urušavanja,[3],[4]. Sile koje djeluju na stup su:

- vertikalne sile- na njih djeluje težina užeta, njegova sama težina te težina dodatnog tereta
- horizontalne sile u smjeru trase voda- na njih djeluju sile horizontalnog zatezanja vodiča
- horizontalne sile u smjeru okomite na trasu voda - na njih djeluje vjetar i slično

Prema položaju u trasi stupovi se dijele na:

- linijske- osi se postavljaju na ravnom dijelu voda
- kutne- oni se postavljaju na mjestima loma

Prema načinu nošenja vodiča dijele se na:

- nosne- oni isključivo služe kako vi držali vodič na određenoj visini
- zatezne- njihova uloga je i da nose vodiče i da ih zatežu





a)



b)

*Slika 2.3. a) zatezni stupovi, b) nosni stupovi*

Također, postoje još i posebne vrste stupova kao što su: krajnji stup, preponski stup, međustup, križišni stup te prepleteni stup, [5].

Materijali koji se koriste za izradu stupa mogu biti: drvo, čelik i armirani beton. U ovisnosti o materijalu izvedbe svaki stup ima svoje prednosti u odnosu na ostale:

- Drvo (drveni stupovi)- ima jako malu težinu, najjeftiniji su, te ih je vrlo lako montirati. U Hrvatskoj se danas drveni stupovi uglavnom zamjenjuju betonskima pošto imaju kratak životni vijek u odnosu na ostale.
- Armirani beton (armirani stupovi) - stupovi od armiranog betona su najteži stupovi, ali njihova glavna prednost je ta što ne zahtijevaju nikakvo održavanje. Oni se koriste samo na srednjem i niskom naponu jer za visoki napon nije moguće proizvesti toliko veliki, a pritom i kvalitetan stup.
- Čelik (čelični stupovi)- oni dominiraju u gradnji dalekovodnih stupova. Njihova glavna prednost je ta što nisu toliko teški u odnosu na betonske, rade se u dijelovima pa ih je samo potrebno spojiti, a jedina mana im je ta što nisu otporni na koroziju.

## 2.5. Temelj

Dio koji se jednim dijelom nalazi u tlu, a drugim izvan njega naziva se temelj. Njegova glavna uloga je da sve sile koje djeluju na stup prenosi u tlo. Ukoliko je riječ o drvenim ili nekim lakšim betonskim stupovima, tada je temelj sam stup koji je ukopan jednim dijelom u tlo, a ukoliko je riječ o velikim čeličnim stupovima, tada se za njih posebno izrađuje temelj od armiranog betona, [4]. Postoje dvije vrste temelja:

- jedan temelj za cijeli stup
- jedan temelj za svaku nogu stupa



*Slika 2.5. Prikaz temelja za svaku nogu po jedan*

## 2.6. Uzemljenje

Uzemljivač ima zadatak da uspostavi galvansku vezu sa svim vodljivim dijelovima na stupu prema zemlji uz neki neizbježan prijelazni otpor. Uzemljenje ima jako bitnu ulogu, a to je da pruža sigurnost pogona te sigurnost ljudi koji se nalaze u neposrednoj blizini stupa. Stoga je bitno prilikom izgradnje na pravilan način izvesti uzemljenje kako bi ono moglo pravilno izvršavati svoju funkciju, [4], [5]. Postoje tri vrste uzemljivača:

- cijevni uzemljivači- cijevi se vertikalno postavljaju u zemlju na nekoliko metara dubine
- pločasti uzemljivači- ploče se vertikalno postavljaju u zemlju
- trakasti uzemljivači- žice, uže ili traka, a one se samo ukopavaju u zemlju

Kako se oni nalaze ispod zemlje, moraju biti otporni na djelovanje korozije, što se postiže odabirom bakra ili pocinčanog čelika.



*Slika 2.6. Prikaz trakastog uzemljenja na stupu*

Kada je potrebno izvoditi popravke ili radove na trasi voda koristi se mehanički uzemljivač. Njegova uloga je da štiti radnike od iznenadnog udara struje koji rade na mjestu



kvara ili mjestu gdje se izvršavaju radovi. Na slici 2.7. prikazana je mehanička ručka koju po potrebi radnik prebaci u položaj gdje uzemljuje određenu trasu voda, [4].



*Slika 2.7. Prikaz mehaničke ručke ugrađene na stupu*

Materijali za izradu vodova moraju zadovoljavati tehničke uvjete. Materijali koji se koriste primarno moraju biti dobri vodiči električne energije. Kada se radi na odabiru vodiča treba uzeti u obzir određene uvjete kao što su električna vodljivost, čvrstoća, otpornost na koroziju i cijenu. Kako u tom slučaju ne postoji materijal koji je moguće pronaći da sadržava sve te karakteristike, kombinira se više materijala u jedan, [5].

### 3. KONSTANTE VODA

Konstante voda su električna svojstva nadzemnih vodova pomoću kojih se definiraju električne prilike na vodu u svim pogonskim slučajevima.

Brojčane vrijednosti konstanti voda ovise o raznim svojstvima kao što su:

- svojstva materijala od kojih su načinjeni
- svojstva okoline u kojima se nalaze (npr. temperatura i kiša)
- geometrijskom odnosu dijelova voda međusobno i prema okolini ( npr. dimenzije vodiča, udaljenost i raspored među vodičima)

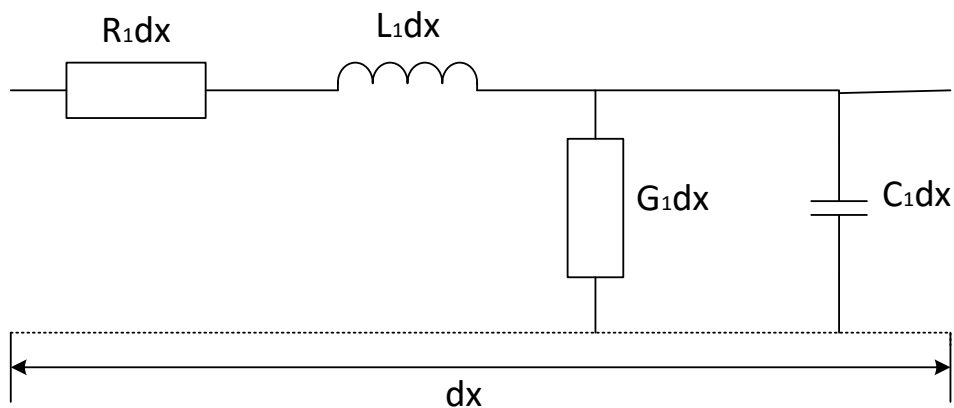
Konstante voda se računaju po kilometru i po jednoj fazi, ukoliko drugačije nije naglašeno.

Konstante voda su:

- 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]

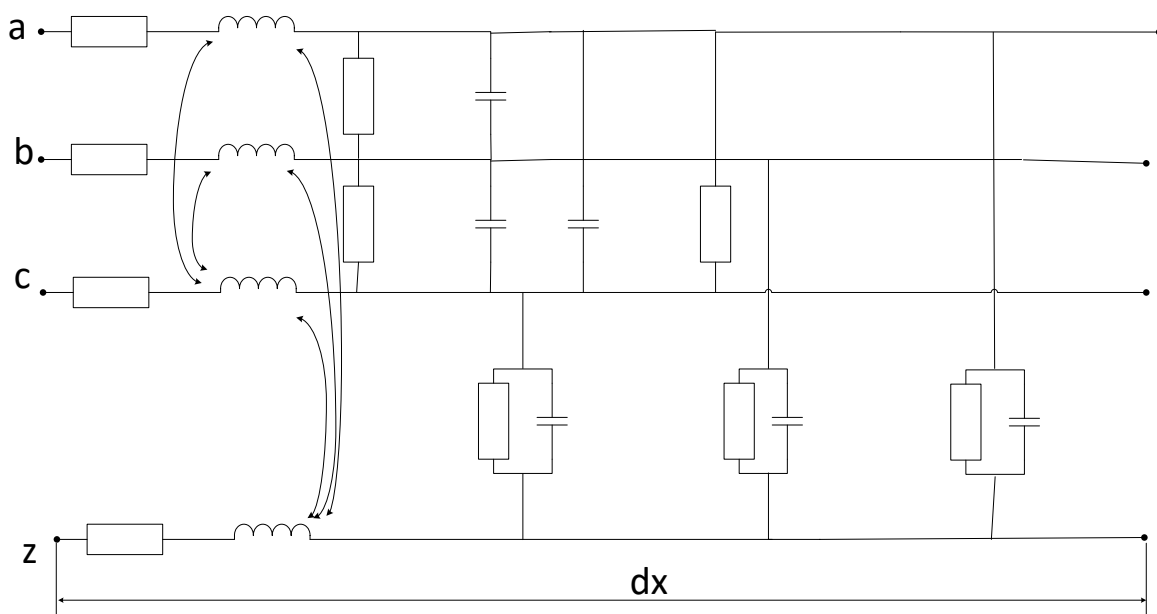
U slučaju kada na vodu postoji sljedeća situacija:  $R_1 \neq 0$ ,  $L_1 \neq 0$ ,  $C_1 \neq 0$ ,  $G_1 \neq 0$ , zna se da se radi o realnom elektroenergetskom vodu. Konstante voda služe za određivanje gubitaka na vodu i utjecaj određenih parametara na početak i kraj voda. Njihova vrijednost je uvijek ista neovisno o pogonskom stanju dalekovoda, [6].

Prilikom prolaska struje kroz otpor i odvod javlja se toplinska energija koja izaziva toplinske gubitke na vodu pa se konstante dijele na tople i hladne. Kao što možemo vidjeti na slici 3.1. u uzdužnoj grani nalazi se serijski spoj djelatnog otpora i induktivitet voda, a u poprečnoj grani nalazi se paralelno spojeni jedinični odvod i kapacitet voda. Sve se to odvija na nekoj zadanoj dužini  $dx$ , [7].



Slika 3.1 Položaj konstanti voda na dužini  $dx$

Samo ako je vod simetričan (sve tri faze imaju jednake električne karakteristike) i pogonski slučaj simetričan (po iznosu jednak, a po fazi  $120^\circ$  zakrenuti naponi i struje) onda se vod može grafički prikazati kao jednofazni vod kao što se vidi na slici 3.1. Ukoliko vod nije simetričan i/ili pogonski slučaj simetričan onda je potreban trofazni grafički prikaz prikazan na slici 3.2. Tada fizički postoji povratni vodič u vidu zemlje i obostrano uzemljenog vodiča, a ima i impedanciju određenog iznosa, [6], [7].



Slika 3.2 Trofazni model voda dužine  $dx$

Na slici 3.2. su prikazane sve konstante koje se mogu pojaviti uključujući međusobne utjecaje na dužini  $dx$ . Impedancija povratnog vodiča u ovom slučaju služi nam za određivanje nulte impedancije voda s konstantama  $R, L, G$  i  $C$ , koja ulazi u nulti sustav, [2].

U simboličkom računu hladne konstante se javljaju u ovisnosti o frekvenciji kao:

- jedinični uzdužni induktivitet tj. jedinična reaktancija

$$X_1 = \omega \cdot L_1 \left| \frac{\Omega}{km} \right| \quad (3.1)$$

- jedinična poprečna kapacitivna vodljivost tj. jedinična susceptancija

$$B_1 = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1 \left| \frac{S}{km} \right| \quad (3.2)$$

Ukoliko se kompleksne simboličke vrijednosti sastave u konstante tada se dobiva:

- jedinični uzdužni prividni otpor tj. jediničnu impedanciju

$$\vec{Z}_1 = R_1 + jX_1 \left| \frac{\Omega}{km} \right| \quad (3.3)$$

- jedinična poprečna prividna vodljivost tj. jedinična impedancija

$$\vec{Y}_1 = G_1 + jB_1 \left| \frac{S}{km} \right| \quad (3.4)$$

Ako se radi sa konkretnim vodom tada je i njegova duljina l bitna.

U prijenosnim jednadžba javljaju se još i izvedbene karakteristične veličine:

- konstanta prodiranja tj. valna konstanta

$$\gamma = \sqrt{\vec{Z}_1 \cdot \vec{Y}_1} \left| \frac{1}{km} \right| \quad (3.5)$$

- karakteristična impedancija

$$\vec{Z}_C = \sqrt{\frac{\vec{Z}_1}{\vec{Y}_1}} |\Omega| \quad (3.6)$$

Konstanta prodiranja sastavljena je od zbroja realnog i imaginarnog dijela:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1) \cdot (G_1 + j\omega C_1)} \quad (3.7)$$

Pri čemu je:

$\alpha$  – konstanta gušenja

$\beta$  – fazna konstanta

Napiše li se karakterističnu jednadžbu kao omjer jedinične impedancije i jedinične admitancije tada se dobiva:

$$\vec{Z}_C = \sqrt{\frac{(R_1 + j\omega L_1)}{(G_1 + j\omega C_1)}} = \frac{\vec{Z}_1}{\gamma} = \frac{\gamma}{\vec{Y}_1} |\Omega| \quad (3.8)$$

Ukoliko trebaju jednadžbe za konkretni vod, tada je potrebno svaku jediničnu konstantu voda pomnožiti s duljinom voda te se dobiva:

- prividni otpor voda tj. impedanciju

$$\vec{Z} = R + jX |\Omega| \quad (3.9)$$

- prividnu vodljivost voda tj. admitanciju

$$\vec{Y} = G + jB |S| \quad (3.10)$$

Pošto nije prikladno računati sa dimenzijama tada se koristi izraz:

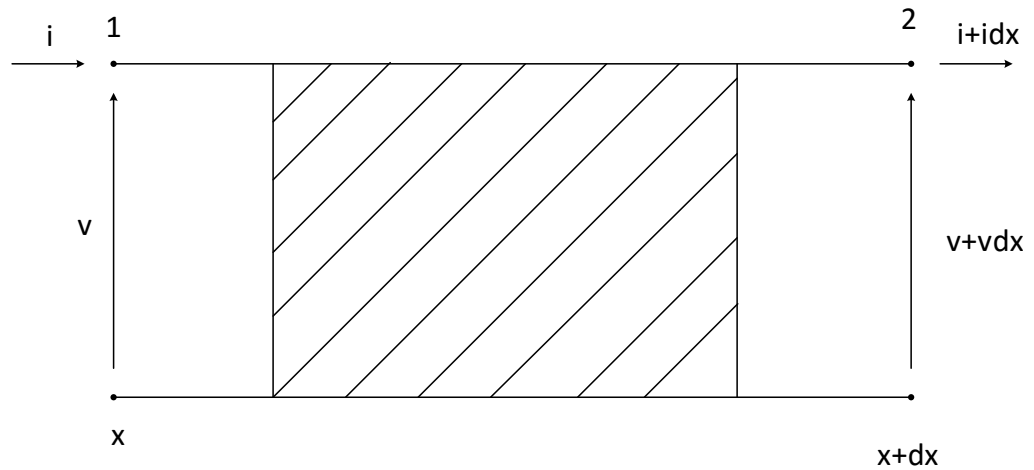
$$\theta = \gamma \cdot l = \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} \quad (3.11)$$

## 4. PRIJENOSNE JEDNAŽBE

### 4.1 Telegrafске једнадџбе

Uzduž voda i tokom vremena mijenja se iznos napona i struje na vodu. Kako bi se razjasnilo, promatra se zbivanje na kratkom odsječku dužine  $dx$ , [2], na dva načina:

#### 1. analitički



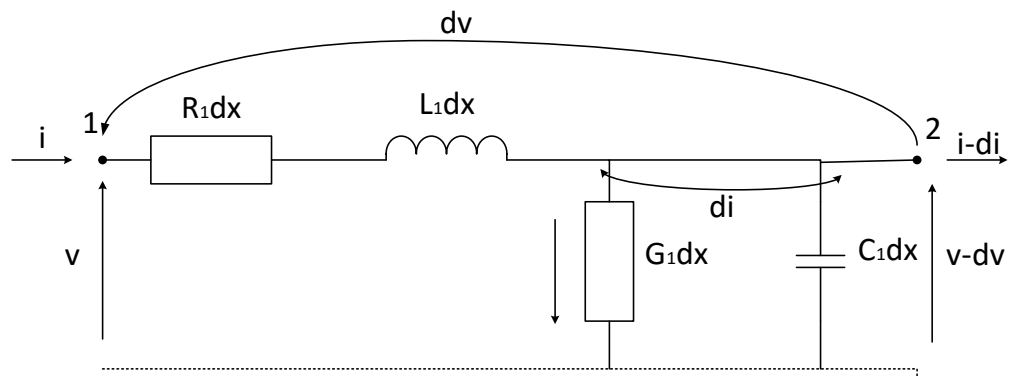
Slika 4.1. Analitička promjena struje i napona na vodu dužine  $dx$

Gdje su:

$v$ - momentalne vrijednosti napona

$i$ - momentalne vrijednosti struje

#### 2. fizikalno



Slika 4.2. Fizikalni prikaz struje i napona na vodu dužine  $dx$

Telegrafске једнадџбе dobivene sa slike 4.2.:

$$dv = iR_1 dx + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} dx \quad (4.1)$$

$$di = vG_1 dx + C_1 \frac{\partial v}{\partial t} dx \quad (4.2)$$

Izjednačavanjem analognog i fizikalnog napona i struje dobiva se:

$$v + \frac{\partial v}{\partial x} dx = v - dv = v - iR_1 dx - L_1 \frac{\partial i}{\partial t} dx \quad (4.3)$$

$$i + \frac{\partial i}{\partial x} dx = i - di = i - vG_1 dx + C_1 \frac{\partial v}{\partial t} dx \quad (4.4)$$

nakon sređivanja jednadžbi (4.3) i (4.4) dobiva se:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (4.5)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 v + C_1 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4.6)$$

Dobivene jednadžbe su telegrafске jednadžbe, a njihovo rješenje je prijenosna jednadžba.

Ukoliko se želi dobiti simbolički prikaz tada se jednadžbe transformiraju u oblik:

$$-\frac{d\vec{v}}{dx} = R_1 \vec{I} + j\omega L_1 \vec{I} = \vec{Z}_1 \vec{I} \quad (4.7)$$

$$-\frac{d\vec{I}}{dx} = G_1 \vec{V} + j\omega C_1 \vec{V} = \vec{Y}_1 \vec{V} \quad (4.8)$$

#### 4.2. Opće rješenje prijenosnih jednadžbi

Krenuvši od telegrafskih jednadžbi (4.7) i (4.8):

$$\frac{d\vec{v}}{dx} = -\vec{Z}_1 \vec{I} \frac{d\vec{I}}{dx} = -\vec{Y}_1 \vec{V} \quad (4.9)$$

i derivacijom po x, dobije se:

$$\frac{d^2\vec{v}}{dx^2} = -\vec{Z}_1 \frac{d\vec{I}}{dx} = \vec{Z}_1 \vec{Y}_1 \vec{V} = \gamma^2 \vec{V} \quad (4.10)$$

$$\frac{d^2\vec{I}}{dx^2} = -\vec{Y}_1 \frac{d\vec{v}}{dx} = \vec{Y}_1 \vec{Z}_1 \vec{V} = \gamma^2 \vec{I} \quad (4.11)$$

dobije se opće rješenje koje glasi:

$$\vec{V} = \vec{A}_1 e^{-\gamma x} + \vec{A}_2 e^{\gamma x} = \vec{A}_1 e^{-(\alpha+j\beta)x} + \vec{A}_2 e^{(\alpha+j\beta)x} \quad (4.12)$$

$$\vec{I} = \vec{B}_1 e^{-\gamma x} + \vec{B}_2 e^{\gamma x} = \vec{B}_1 e^{-(\alpha+j\beta)x} + \vec{B}_2 e^{(\alpha+j\beta)x} \quad (4.13)$$

Ovo rješenje pokazuje da struja i napon na vodu nastaju superpozicijom dvaju valova koji se gibaju u suprotnom smjeru. Brzina gibanja voda brzinom svjetlosti u realnom vodu, a brzina gibanja kabela ta brzina je duplo manja, [2], [8], [9].

### 4.3. Prvi oblik prijenosnih jednadžbi

Da bi odredili konstante  $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{B}_1$  i  $\vec{B}_2$  iz prethodne jednadžbe, moraju se poznavati početni ili krajnji uvjeti voda. Kako vod nema početak i kraj, pošto ima dva ravnopravna kraja tada možemo zanemariti početak ili kraj jednadžbe, [8], [9]. pa se dobiva rješenje iz jednadžbe (4.12) i (4.13):

$$\vec{V} = \vec{A}_1 e^{-\gamma x} + \vec{A}_2 e^{\gamma x} \quad (4.14)$$

$$\vec{I} = \vec{B}_1 e^{-\gamma x} + \vec{B}_2 e^{\gamma x} \quad (4.15)$$

derivira ih se po x (4.14) i (4.15), dobije se:

$$\frac{d\vec{V}}{dx} = -\gamma \vec{A}_1 e^{-\gamma x} + \gamma \vec{A}_2 e^{\gamma x} = -\vec{Z}_1 \vec{I} \quad (4.16)$$

$$\frac{d\vec{I}}{dx} = -\gamma \vec{B}_1 e^{-\gamma x} + \gamma \vec{B}_2 e^{\gamma x} = -\vec{Y}_1 \vec{V} \quad (4.17)$$

Uvrštavanjem  $x=0$ ,  $\vec{V} = \vec{V}_1$ ,  $\vec{I} = \vec{I}_1$ , jednadžbe (4.12), (4.13), (4.14) i (4.15), uzevši u obzir (3.8) dobiva se:

$$\vec{A}_1 + \vec{A}_2 = \vec{V}_1 \quad \vec{A}_1 - \vec{A}_2 = \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1 \quad (4.18)$$

$$\vec{B}_1 + \vec{B}_2 = \vec{I}_1 \quad \vec{B}_1 - \vec{B}_2 = \frac{1}{\vec{Z}_C} \cdot \vec{V}_1 \quad (4.19)$$

Nakon sređivanja i izlučivanja nepoznanica  $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{B}_1$  i  $\vec{B}_2$ , dobiva se:

$$\vec{A}_1 = \frac{1}{2} (\vec{V}_1 + \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1) \quad \vec{B}_1 = \frac{1}{2} \left( \vec{I}_1 + \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C} \right) \quad (4.20)$$

$$\vec{A}_2 = \frac{1}{2} (\vec{V}_1 - \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1) \quad \vec{B}_2 = \frac{1}{2} \left( \vec{I}_1 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C} \right) \quad (4.21)$$

Kako bi se dobio Ia oblik potrebno je jednadžbe (4.20) i (4.21) uvrstiti u jednadžbu (4.13) i tada se dobiva:

$$\vec{V} = \frac{1}{2} (\vec{V}_1 + \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} (\vec{V}_1 - \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1) e^{\gamma x} \quad (4.22)$$

$$\vec{I} = \frac{1}{2} \left( \vec{I}_1 + \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C} \right) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} \left( \vec{I}_1 - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C} \right) e^{\gamma x} \quad (4.23)$$



Ukoliko su poznate vrijednosti na kraju voda, može se odmah napisat jednadžbu za Ib oblik iz jednadžbi (4.22) i (4.23) i tada se dobiva:

$$\vec{V} = \frac{1}{2}(\vec{V}_2 + \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_2)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\vec{V}_2 - \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_2)e^{\gamma x} \quad (4.24)$$

$$\vec{I} = \frac{1}{2}\left(\vec{I}_2 + \frac{\vec{V}_2}{\vec{Z}_C}\right)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}\left(\vec{I}_2 - \frac{\vec{V}_2}{\vec{Z}_C}\right)e^{\gamma x} \quad (4.25)$$

#### 4.4. Drugi oblik prijenosnih jednadžbi

Da bi se dobio drugi oblik prijenosnih jednadžbi potrebno je iz jednadžbe (4.22) izlučiti  $\vec{V}_1$  i  $\vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1$  te iz jednadžbe (4.23) izlučiti  $\vec{I}_1$  i  $\frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C}$ , [2], tada se primjenom Eulerovih formula dobivaju:

$$\vec{V} = \frac{1}{2}\vec{V}_1(e^{-\gamma x} + e^{\gamma x}) + \frac{1}{2}\vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1(e^{-\gamma x} + e^{\gamma x}) \quad (4.26)$$

$$\vec{I} = \frac{1}{2}\vec{I}_1(e^{-\gamma x} + e^{\gamma x}) + \frac{1}{2}\frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C}(e^{-\gamma x} + e^{\gamma x}) \quad (4.27)$$

Uvrštavanjem poznatog matematičkog oblika danog jednadžbom:

$$\frac{e^{+\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} = ch\gamma x \quad \frac{e^{+\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} = sh\gamma x \quad (4.28)$$

Prilikom uvrštavanja matematičkog oblika (4.28) u jednadžbe (4.26) i (4.27) dobiva se ulazna IIa prijenosna jednadžba oblika:

$$\vec{V} = \vec{V}_1 \cdot ch\gamma x - \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_1 sh\gamma x \quad (4.29)$$

$$\vec{I} = \vec{I}_1 \cdot ch\gamma x - \frac{\vec{V}_1}{\vec{Z}_C} \cdot sh\gamma x \quad (4.30)$$

Analogno tome dobiva se izlazna IIb prijenosna jednadžba oblika:

$$\vec{V} = \vec{V}_2 \cdot ch\gamma x + \vec{Z}_C \cdot \vec{I}_2 sh\gamma x \quad (4.31)$$

$$\vec{I} = \vec{I}_2 \cdot ch\gamma x + \frac{\vec{V}_2}{\vec{Z}_C} \cdot sh\gamma x \quad (4.32)$$

#### 4.5. Treći oblik prijenosnih jednadžbi

Ukoliko su poznate prilike na početku i kraju voda, tada koristeći treće prijenosne jednadžbe može se izračunati prilike na kraju ili početku voda, u ovisnosti šta je na početku zadano, [2],[9].. Da bi se mogle izračunati vrijednosti potrebno je napisati  $x=l$  te koristeći jednadžbu (3.11) dobiva se:

$$\vec{Z}_c = \sqrt{\frac{\vec{Z}_1}{\vec{Y}_1}} = \frac{\vec{Z}_1}{\gamma} = \frac{\gamma}{\vec{Y}_1} = \frac{\vec{Z}}{\theta} = \frac{\theta}{\vec{Y}} \quad (4.33)$$

Prilikom uvrštavanja matematičkog oblika (4.31) u jednadžbe (4.29) i (4.30) dobiva se ulazna IIIa prijenosna jednadžba oblika:

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_1 \cdot ch\theta - \vec{I}_1 \cdot \vec{Z} \frac{sh\theta}{\theta} \quad (4.34)$$

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_1 \cdot ch\theta + \vec{V}_1 \cdot \vec{Y} \frac{sh\theta}{\theta} \quad (4.35)$$

Analogno tome dobiva se izlazna IIIb prijenosna jednadžba oblika:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 \cdot ch\theta - \vec{I}_2 \cdot \vec{Z} \frac{sh\theta}{\theta} \quad (4.36)$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 \cdot ch\theta + \vec{V}_2 \cdot \vec{Y} \frac{sh\theta}{\theta} \quad (4.37)$$

## 5. TOČAN I PRIBLIŽAN $\pi$ i T NADOMJESNI MODEL ELEKTROENERGETSKOG VODA

Za izračunavanje pogonske jedinične impedancije i pogonske poprečne admitancije, potrebna je primjena simetričnih komponenti na simetričan vod bez međusobnog utjecaja, [1], [2]. Za njihov izračun potrebno je izraditi matrice jediničnih konstanti :

$$[\vec{Z}_1^{012}] = \begin{bmatrix} \vec{Z}_1^{00} & 0 & 0 \\ 0 & \vec{Z}_1^{11} & 0 \\ 0 & 0 & \vec{Z}_1^{22} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$[\vec{Y}_1^{012}] = \begin{bmatrix} \vec{Y}_1^{00} & 0 & 0 \\ 0 & \vec{Y}_1^{11} & 0 \\ 0 & 0 & \vec{Y}_1^{22} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

gdje je potrebno definirati:

$$\vec{Z}_1^{11} = \vec{Z}_1^{22} = \vec{Z}_1 \quad \vec{Y}_1^{11} = \vec{Y}_1^{22} = \vec{Y}_1 \quad (5.3)$$

pri čemu je:

$\vec{Z}_1$ - jedinična uzdužna pogonska impedancija

$\vec{Y}_1$ - jedinična uzdužna pogonska admitancija

Ukoliko je vod određene dužine i određene konstante tada ih se može prikazati nadomjesnim četveropolom za direktni i nadomjesnim četveropolom za nulti sustav. U praksi se ti elementi raspoređuju po  $\pi$  i T nadomjesnoj shemi, koje služe za računsko i eksperimentalno određivanje prilika na krajevima voda, [2].

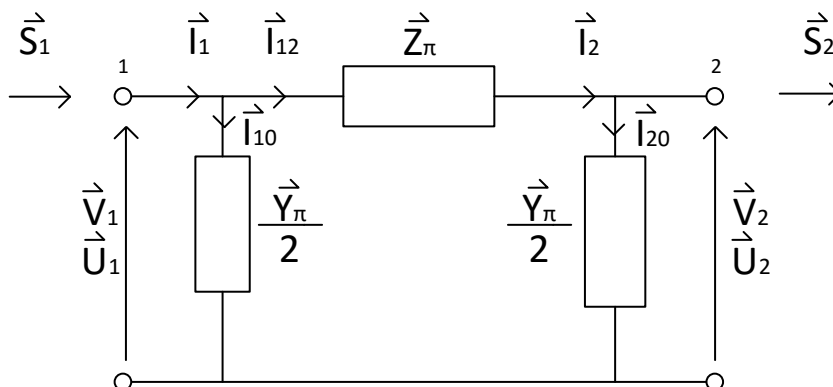
### 5.1. Točan $\pi$ model voda

Točan  $\pi$  model se koristi kod vodova vrlo visokog napona te na velikim udaljenostima kako bi se što preciznije i točnije napravili proračuni. Kako to računanje zahtjeva velik broj izračuna, danas se to isključivo radi u nekom od računalnih programa koji uvelike olakšavaju te ubrzavaju računanje. Kako je razlika između približnog i točnog  $\pi$ modela tek vidljiva na trećoj decimali, puno je pogodnije koristiti računalne programe jer su daleko precizniji, a i prikazuju velik broj decimala pa se može uočiti pogreška.

Ukoliko se pretpostavi da su struja  $\vec{I}_2$  i napon  $\vec{V}_2$  zadani, tada je potrebno odrediti prilike na početku voda, [1], [2]. Prema prijenosnim jednadžbama (4.31) i (4.32), uz  $x=l$  napon na početku voda iznosi:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 \cdot ch\gamma l + \vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_c \cdot sh\gamma l \quad (5.4)$$

Računa li se ulazni napon i struja preko prethodne jednadžbe ili pomoću četveropola prema slici 5.1. mora se dobiti ista vrijednost kako napona tako i struje.



Slika 5.1. Jednofazna  $\pi$ -shema voda

pri čemu je:

$\vec{Z}_\pi$  – impedancija uzdužne grane

$\vec{Y}_\pi$  – impedancija poprečne grane

Iz slike 5.1. mogu se očitati jednadžbe četveropola za struju  $\vec{I}_{12}$  i napon  $\vec{V}_1$ :

$$\vec{I}_{20} = \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}_\pi}{2} \quad (5.5)$$

$$\vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{I}_{20} = \vec{I}_2 + \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}_\pi}{2} \quad (5.6)$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + (\vec{I}_{12} \cdot \vec{Z}_\pi) = \vec{V}_2 + \left( \vec{I}_2 + \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}_\pi}{2} \right) \cdot \vec{Z}_\pi = \vec{V}_2 \cdot \left( 1 + \frac{\vec{Y}_\pi}{2} \cdot \vec{Z}_\pi \right) + \vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_\pi \quad (5.7)$$

Usporedbom prijenosnih jednadžbi i jednadžbi četveropola dobiva se:

$$\vec{Z}_\pi = \vec{Z}_c \cdot sh\gamma l \quad (5.8)$$

$$1 + \frac{\overline{Y\pi}}{2} \cdot \vec{Z}\pi = 1 + \frac{\overline{Y\pi}}{2} \cdot \vec{Z}_c \cdot ch\gamma l = ch\gamma l \quad (5.9)$$

nakon sređivanja gornjih jednađbi dolazi se do željenih veličina iz sheme:

$$\vec{Z}\pi = \vec{Z}_c \cdot sh\gamma l \quad (5.10)$$

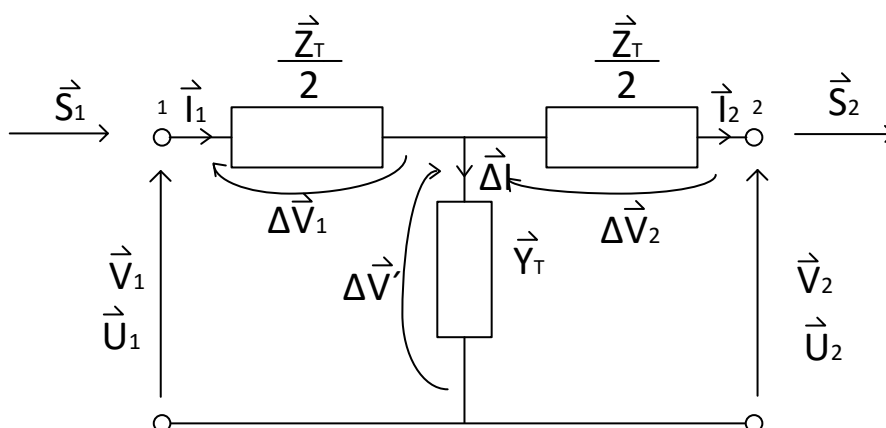
$$\frac{\overline{Y\pi}}{2} = \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot \frac{ch\gamma l - 1}{sh\gamma l} \quad (5.11)$$

## 5.2. Točan T model voda

Za računanje točnog T modela potrebno je postaviti da su zadane prilike na kraju voda kako bi mogli odrediti prilike na početku voda, [1], [2]. Koristeći prijenosne jednađbe (3.7) uz  $x=l$ , dobiva se jednađba za izračun struje na početku voda:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 \cdot ch\gamma l + \vec{V}_2 \cdot \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot sh\gamma l \quad (5.12)$$

Računa li se struja preko prethodne jednađbe ili pomoću četveropola prema slici 5.2. mora se dobiti ista vrijednost.



Slika 5.2. Jednopolna T-shema

pri čemu je:

$\vec{Z}_T$  – impedancija uzdužne grane

$\vec{Y}_T$  – impedancija poprečne grane

Iz slike 5.2. mogu se očitati jednađbe četveropola za struju  $\vec{I}_1$ :

$$\vec{V}' = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}_T}{2} \quad (5.13)$$

$$\Delta \vec{I} = \vec{V}' \cdot \vec{Y}_T = \left( \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}_T}{2} \right) \cdot \vec{Y}_T \quad (5.14)$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \Delta \vec{I} = \vec{I}_2 + \vec{V}_2 \cdot \vec{Y}_T + \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}_T}{2} \cdot \vec{Y}_T = \vec{I}_2 \cdot \left( 1 + \frac{\vec{Z}_T}{2} \cdot \vec{Y}_T \right) + \vec{V}_2 \cdot \vec{Y}_T \quad (5.15)$$

Usporede li se sada prijenosne jednadžbe i jednadžbe četveropola dobiva se:

$$\vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot sh\gamma l \quad (5.16)$$

$$1 + \frac{\vec{Z}_T}{2} \cdot \vec{Y}_T = 1 + \frac{\vec{Z}_T}{2} \cdot \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot sh\gamma l = ch\gamma l \quad (5.17)$$

nakon sređivanja gornjih jednadžbi dolazi se do željenih veličina iz sheme:

$$\vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot ch\gamma l \quad (5.18)$$

$$\frac{\vec{Z}_T}{2} = \vec{Z}_c \frac{ch\gamma l - 1}{sh\gamma l} \quad (5.19)$$

### 5.3. Korekcijski faktor $\pi$ i T modela voda

Prilikom računanja točnih  $\pi$  i T modela voda nisu uzeti u obzir korekcijski faktori nego su uzete samo točne vrijednosti, [1], [2]. Kako bi se dobile korekcijske jednadžbe potrebno je uzeti u obzir:

$$\vec{Z}_c = \sqrt{\frac{\vec{Z}}{\vec{Y}}} = \frac{\vec{Z}}{\theta} = \frac{\vec{Z}/2}{\theta/2} \quad \vec{Z} = \vec{Z}_1 l \quad (5.20)$$

$$\frac{1}{\vec{Z}_c} = \frac{\vec{Y}}{\theta} = \frac{\vec{Y}/2}{\theta/2} \quad \vec{Y} = \vec{Y}_1 l \quad (5.21)$$

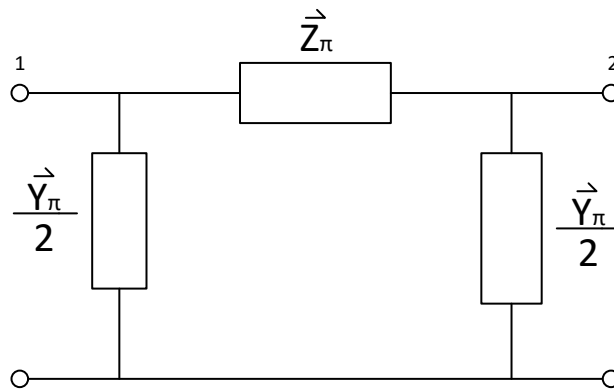
$$\frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = th \frac{\theta}{2} \quad \theta = \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} \quad (5.22)$$

Uvrsti li se izraz (5.20) u jednadžbu (5.10) i (5.11) dobiva se elementi točne  $\pi$ -sheme:

$$\vec{Z}_\pi = \vec{Z}_c \cdot sh\gamma l = \vec{Z} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} \quad (5.23)$$

$$\frac{\vec{Y}_\pi}{2} = \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot \frac{ch\gamma l - 1}{sh\gamma l} = \frac{\vec{Y}/2}{\theta/2} \cdot \frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = \frac{\vec{Y}}{2} \cdot \frac{th\theta/2}{\theta/2} \quad (5.24)$$

Dobivenim jednadžbama, po kojima se računa korekcijski  $\pi$  faktor može se nacrtati nadomjesna shema voda s koncentriranim parametrima.



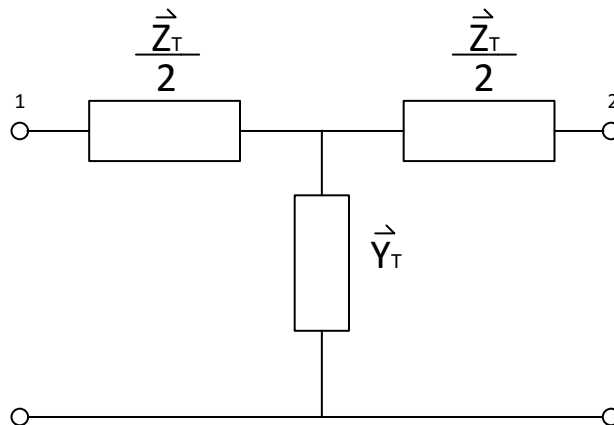
Slika 5.3. Točna nadomjesna shema  $\pi$  voda

Uvrsti li se izraz (5.20) u jednažbu (5.18) i (5.19) dobiva se elementi točne T-sheme:

$$\vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_c} \cdot ch\gamma l = \vec{Y} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} \quad (5.25)$$

$$\frac{\vec{Z}_T}{2} = \vec{Z}_c \cdot \frac{ch\gamma l - 1}{sh\gamma l} = \frac{\vec{Z}/2}{\theta/2} \cdot \frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = \frac{\vec{Z}}{2} \cdot \frac{th\theta/2}{\theta/2} \quad (5.26)$$

Dobivenim jednažbama, po kojima se računa korekcijski T faktor može se nacrtati nadomjesna shema voda s koncentriranim parametrima.

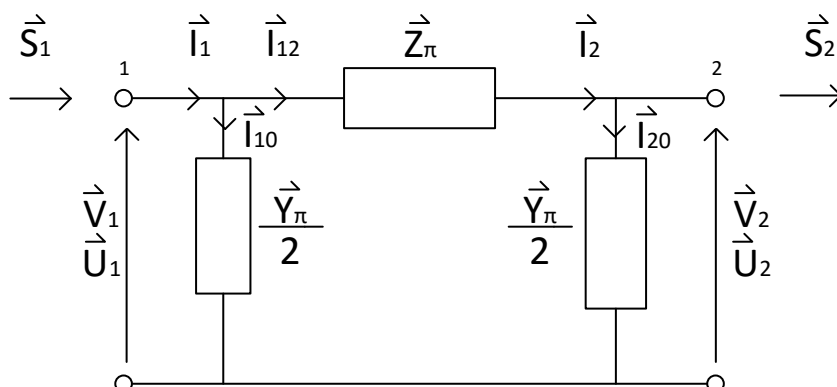


Slika 5.4. Točna nadomjesna shema T voda

Vrijednosti korekcijskog faktora mogu se ručno očitati iz Woodruffovih dijagrama, ali to se danas radi pomoću računalnog programa kako bi proračun bio točan.

## 5.4. Proračun prijenosa pomoću $\pi$ -sheme

U proračunu kod prijenosa pomoću  $\pi$  sheme promatrat će se prilike za slučaj na početku i na kraju voda pomoću slike 5.5.



Slika 5.5. Struje i naponi  $\pi$ -sheme

Ako su zadane prilike na kraju voda tada postoje poznate vrijednosti linijskog napona  $U_2$ , trofazne radne snage  $P_2$  i trofazne jalove snage  $Q_2$ . Kako se proračun odnosi samo na jednu fazu, potrebno je izračunati fazni napon koji se dobiva dijeljenjem linijskog napona sa  $\sqrt{3}$ , [1], [2].

$$\vec{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 3 \cdot \vec{V}_2 \cdot \vec{I}_2^* \rightarrow \vec{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{3V_2} \quad (5.27)$$

Kako bi se izračunala ulazna struja potrebno ju je izračunati na način:

$$\vec{I}_{20} = \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}}{2} \quad (5.28)$$

$$\vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{I}_{20} \quad (5.29)$$

$$\Delta \vec{V} = \vec{I}_{12} \cdot \vec{Z} \quad (5.30)$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + \Delta \vec{V} = \vec{V}_2 + \vec{I}_{12} \cdot \vec{Z} \quad (5.31)$$

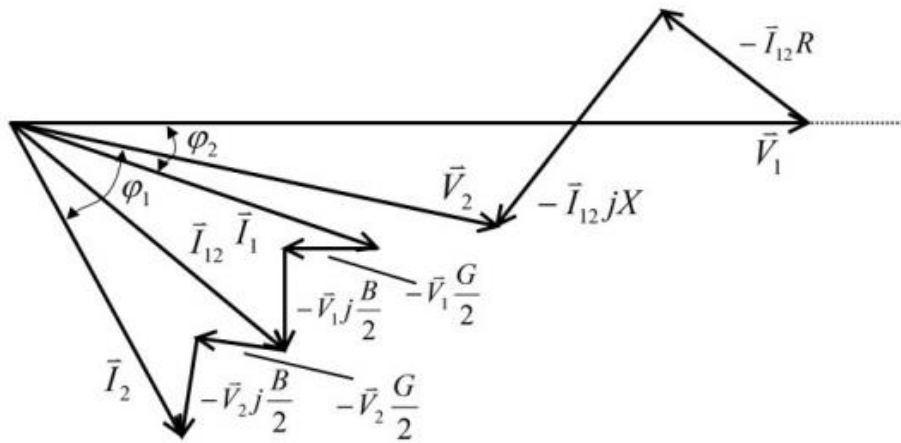
$$\vec{I}_{10} = \vec{V}_1 \cdot \frac{\vec{Y}}{2} \quad (5.32)$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{12} + \vec{I}_{10} \quad (5.33)$$

Ukoliko se pretpostavi da se radi o induktivnoj snazi  $Q_2$ , tada se može nacrtati vektorski dijagram prikazan na slici 5.6. pri čemu su vrijednosti rezistencije  $R$  i konduktancije  $G$  namjerno uvećane radi bolje preglednosti, [2].



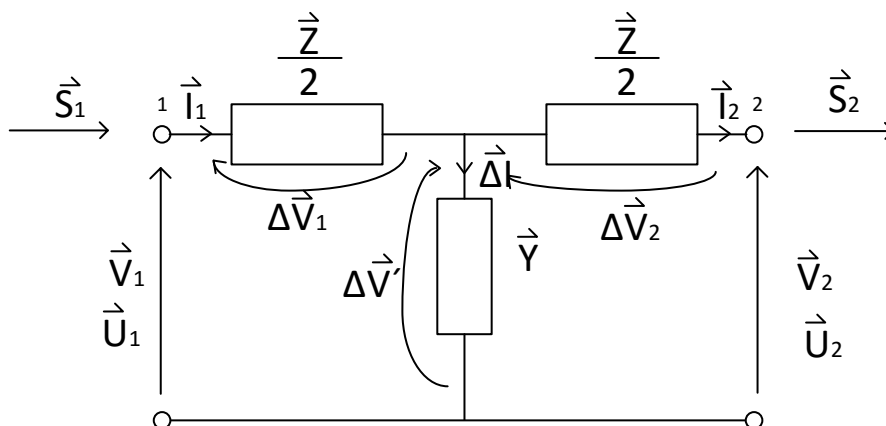




Slika 5.7. Vektorski dijagram za zadane prilike na početku voda

## 5.5. Proračun prijenosa pomoću T-scheme

U proračunu kod prijenosa pomoću T sheme promatrat će se prilike za slučaj na početku i na kraju voda pomoću slike 5.7.



Slika 5.7. Struje i naponi T-scheme

Ako su zadane prilike na kraju voda tada postoje poznate vrijednosti linijskog napona  $U_2$ , trofazne radne snage  $P_2$  i trofazne jalove snage  $Q_2$ . Kako se proračun odnosi samo na jednu fazu, potrebno je izračunati fazni napon koji se dobiva dijeljenjem linijskog napona sa  $\sqrt{3}$ , [1], [2].

$$\vec{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 3 \cdot \vec{V}_2 \cdot \vec{I}_2^* \rightarrow \vec{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{3V_2} \quad (5.41)$$

Kako bi se izračunala ulazna strujai napon potrebno ju je izračunati na način:

$$\Delta \vec{V}_2 = \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.42)$$

$$\vec{V}' = \vec{V}_2 + \Delta \vec{V}_2 = \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.43)$$

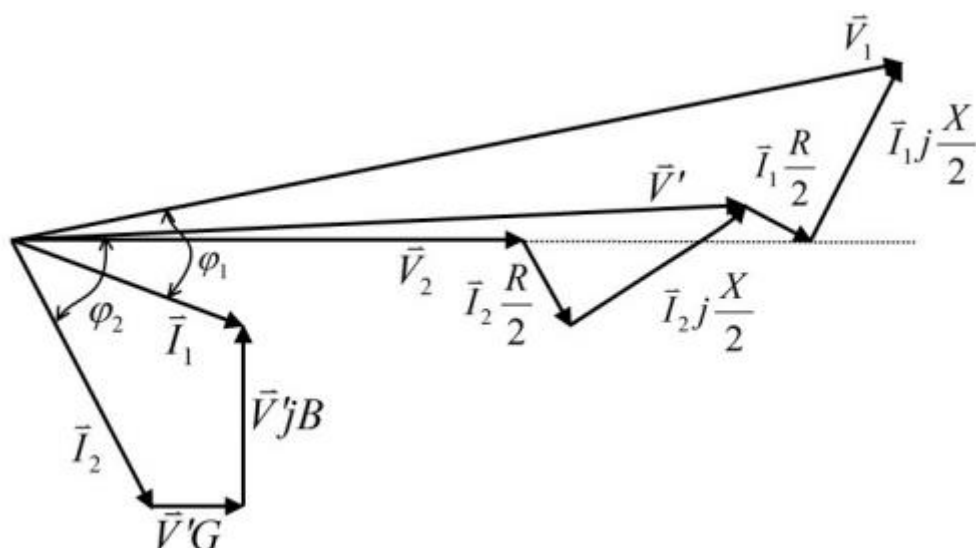
$$\Delta \vec{I} = \vec{V}' \cdot \vec{Y} \quad (5.44)$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \Delta \vec{I} \quad (5.45)$$

$$\Delta \vec{V}_1 = \vec{I}_1 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.46)$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}' + \Delta \vec{V}_1 = \vec{V}' + \vec{I}_1 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.47)$$

Pretpostavka je da se radi o induktivnoj jalovoj snazi na kraju voda  $Q_2$ , [2]. Vektorski dijagram prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8. Vektorski dijagram na kraju voda za zadane prilike

Druga prilika je prilika na početku voda tada postoje poznate vrijednosti linijskog napona  $U_1$ , trofazne radne snage  $P_1$  i trofazne jalove snage  $Q_1$ . Kako se proračun odnosi samo na jednu fazu, potrebno je izračunati fazni napon koji se dobiva dijeljenjem linijskog napona sa  $\sqrt{3}$ , [1], [2].

$$\vec{S}_1 = P_1 + jQ_1 = 3 \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{I}_1^* \rightarrow \vec{I}_1 = \frac{P_1 - jQ_1}{3V_1} \quad (5.48)$$

Kako bi se izračunala izlazna struja potrebno ju je izračunati na način:

$$\Delta \vec{V}_1 = \vec{I}_1 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.49)$$

$$\vec{V}' = \vec{V}_1 + \Delta \vec{V}_1 = \vec{V}_1 + \vec{I}_1 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.50)$$

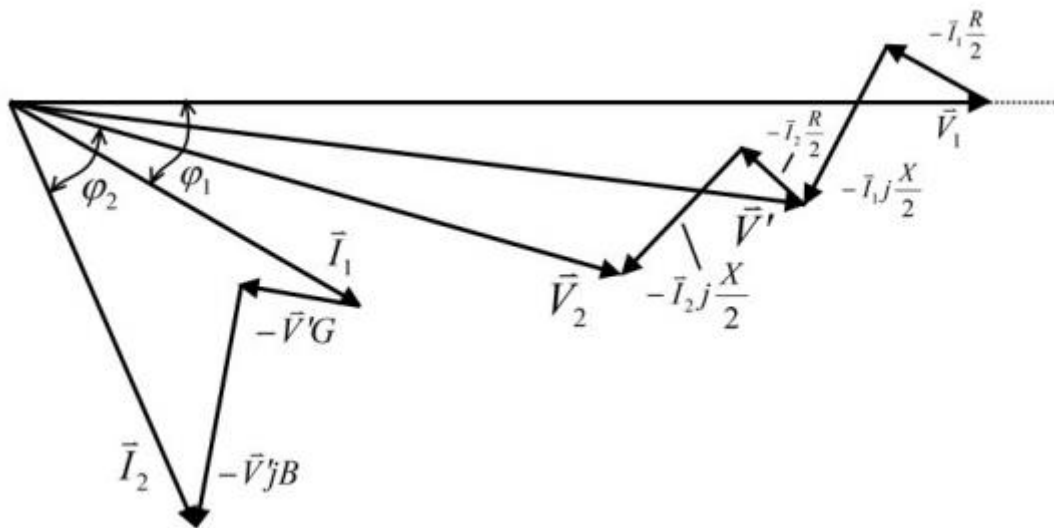
$$\Delta \vec{I} = \vec{V}' \cdot \vec{Y} \quad (5.51)$$

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_1 + \Delta \vec{I} \quad (5.52)$$

$$\Delta \vec{V}_2 = \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.53)$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}' + \Delta \vec{V}_2 = \vec{V}' + \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} \quad (5.54)$$

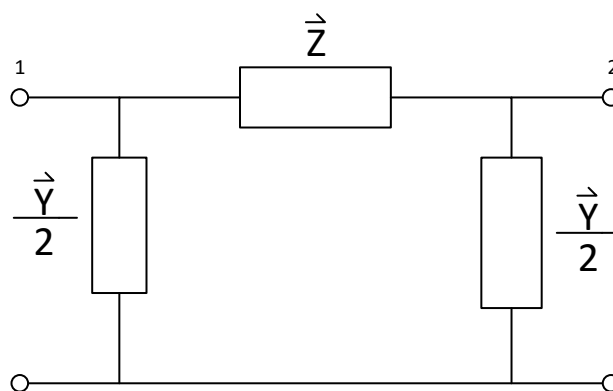
Pretpostavka je da se radi o induktivnoj jalovoj snazi na početku voda  $Q_1$ . Vektorski dijagram prikazan je na slici 5.9.



Slika 5.9. Vektorski dijagram na početku voda za zadane prilike

## 6. USPOREDBA PRIBLIŽNIH I TOČNIH VRIJEDNOSTI UZDUŽNIH IMPEDANCIJA I POPREČNIH ADMITANCIJA $\pi$ I T MODELA ZA RAZLIČITE DULJINE VODOVA

U sljedećem poglavlju detaljnije će biti dokazana, pomoću grafičkih prikaza i izračuna, razlika između približnih i točnih vrijednosti uzdužnih impedancija i poprečnih admitancija. Kako su impedancije i admitancije zapisane u kompleksnom obliku, kao dokaz da je imaginarni dio puno veći od realnog usporedit će se imaginarni i apsolutni zapis te vidjeti da dolazimo do neznatne razlike.

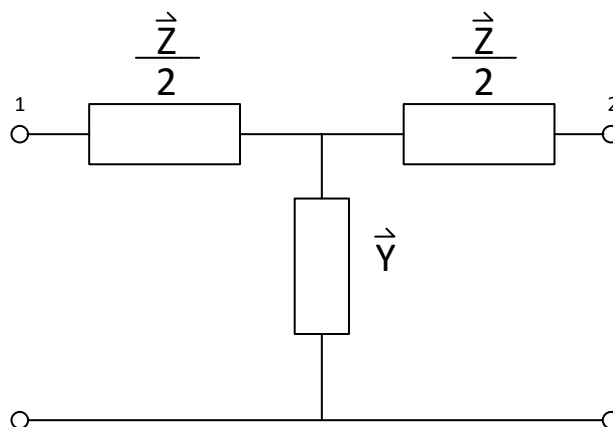


Slika 6.1. Približni  $\pi$  model voda

Iz slike 6.1 za približan  $\pi$  model dobivaju se sljedeći izrazi:

$$Z = R + jX = R + j\omega L = R + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (6.1)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{G}{2} + j\frac{B}{2} = \frac{G}{2} + j\frac{\omega \cdot C}{2} = \frac{G}{2} + j\frac{2 \cdot \omega \cdot f \cdot C}{2} \quad (6.2)$$



Slika 6.2. Približni T model voda

Iz slike 6.2 za približan T model, dobivaju se sljedeći izrazi:

$$\frac{Z}{2} = \frac{R}{2} + j\frac{X}{2} = \frac{R}{2} + j\frac{\omega \cdot L}{2} = \frac{R}{2} + j\frac{2 \cdot \omega \cdot f \cdot L}{2} \quad (6.3)$$

$$Y = G + jB = G + j\omega C = G + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (6.4)$$

Pri čemu je:

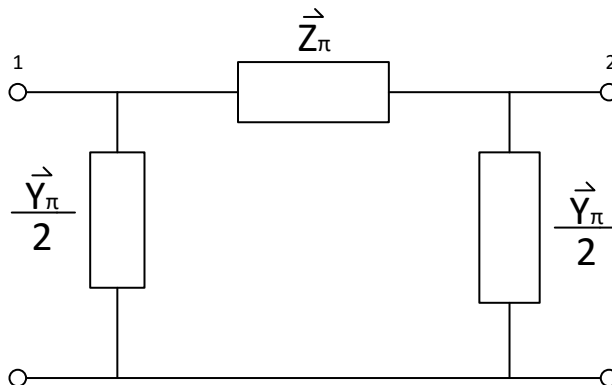
- Z – impedancija (uzdužni prividni otpor)
- Y – admitancija (poprečna prividna vodljivost)
- X – reaktancija (uzdužni induktivni otpor)
- G – konduktancija (odvod voda)
- B susceptancija (poprečna kapacitivna vodljivost)

Da bi dobili grafičko rješenje u ovisnosti o duljini, potrebn je izračunati modul impedancije  $|Z|$  za  $\pi$  i T model te modul admitancije  $|Y|$  za  $\pi$  i T model.

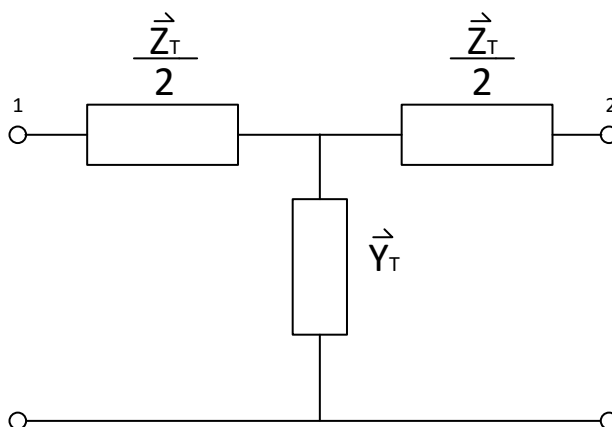
$$R = R_1 \cdot l, X_1 = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1, X = X_1 \cdot l, |Z| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} \quad (6.5)$$

$$G = G_1 \cdot l, B_1 = \omega \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1, B = B_1 \cdot l, |Y| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} \quad (6.6)$$

Na Slici 6.1. nalazi se  $\pi$  model voda koji je zapisan tako da se računaju samo približne vrijednosti voda. Na Slici 6.2. nalazi se T model voda na kojem su također označene samo približne vrijednosti voda. Za izračun točnih vrijednosti voda  $\pi$  ili T modela, u indeks ispred slova Z i Y dodaje se  $\pi$  ili T, kao što pokazuju Slika 6.3. i Slika 6.4..



Slika 6.3. Točan  $\pi$  model voda



Slika 6.1. Točan T model voda

U prvom slučaju prilikom računanja približne vrijednosti, računaju se bez korekcijskih faktora  $\frac{sh\theta}{\theta}$  i  $\frac{th \theta/2}{\theta/2}$ , dok već kod računanja točnih vrijednosti  $l > 200km$  uzima se korekcijski faktor u obzir i na taj način se dobivaju točne vrijednosti određenog modela.



### 6.1. Izračun i grafički prikaz približne i točne uzdužne impedancije i poprečne admitancije kod nadomjesnog $\pi$ modela voda na vrlo visokom naponu (400 kV)

Za izračun vrijednosti uzdužne impedancije i poprečne admitancije voda koriste se jednačbe (6.1), (6.2), (6.5), (6.6) uz sljedeće vrijednosti:

$$R_1 = 0,08 \frac{\Omega}{km} \text{ (jedinični otpor voda)}$$

$$L_1 = 1,34 \frac{mH}{km} \text{ (jedinični induktivitet voda)}$$

$$C_1 = 9 \frac{nF}{km} \text{ (jedinični kapacitet voda)}$$

$$G_1 = 85 \frac{nS}{km} \text{ (jedinični odvod voda)}$$

Zadatak u računanju vrijednosti je izračun na različitim duljinama, u ovom primjeru biti će zadana samo jedna duljina, dok će u tablici biti sva rješenja za sve zadane duljine prikazana apsolutnim vrijednostima.

Izračun sa duljinom  $l = 400km$  i frekvencijom  $f = 50Hz$ :

$$R = R_1 \cdot l = 0.08 \frac{\Omega}{km} \cdot 400km = 32\Omega,$$

$$X_{L1} = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 1.34 \cdot 10^{-3} \frac{H}{km} = 0.4210 \frac{\Omega}{km},$$

$$X = X_{L1} \cdot l = 0.4210 \frac{\Omega}{km} \cdot 400km = 168.3\Omega$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 9 \cdot 10^{-9} \frac{F}{km}} = 353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{km},$$

$$B_1 = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{km}} = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{S}{km},$$

$$B = B_1 \cdot l = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{S}{km} \cdot 400km = 113.0977 \cdot 10^{-5}S ,$$

$$G = G_1 \cdot l = 85 \cdot 10^{-9} \frac{S}{km} \cdot 400km = 3.4 \cdot 10^{-5}S ,$$

Nakon što su izračunate sve potrebne vrijednosti, uvrštavaju se u jednačbe impedancije i admitancije:

$$\vec{Z} = R_1 + jX = 32 + j168.389 \Omega,$$

$$\vec{Y} = G + jB = 3.4 \cdot 10^{-5} S + j113.0977 \cdot 10^{-5} S,$$

$$\frac{\vec{Y}}{2} = \frac{3.4 \cdot 10^{-5} S + j113.0977 \cdot 10^{-5} S}{2} = 1.7000 \cdot 10^{-5} S + j56.5486 \cdot 10^{-5} S$$

Za crtanje grafova potrebne su apsolutne vrijednosti kako bi bio točan prikaz. Stoga se računaju apsolutne vrijednosti impedancije i admitancije:

$$|Z| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(32)^2 + (168.389)^2} \Omega = 171.4029 \Omega$$

$$|Y| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(3.4 \cdot 10^{-5})^2 + (113.0965 \cdot 10^{-5})^2} S = 131.1476 \cdot 10^{-5} S$$

$$|Z| = \mathbf{171,4030 \Omega}$$

$$\left| \frac{Y}{2} \right| = \mathbf{56.5742 \cdot 10^{-5} S}$$

Nakon što su izračunate približne vrijednosti nadomjesnog  $\pi$  modela koji su skicirani na Slici 6.1., pomoću korekcijskog faktora  $\frac{sh\theta}{\theta}$  i  $\frac{th \theta/2}{\theta/2}$  izračunat će se i točne vrijednosti pomoću izraza (3.11), (5.23), (5.24):

$$\begin{aligned} \theta &= \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} = \sqrt{32 + j168.389 \Omega \cdot (3.4 \cdot 10^{-5} + j113.0965 \cdot 10^{-5}) S} \\ &= \mathbf{0.04788 + j0.4377} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{Z}_\pi &= \vec{Z} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} = 32 + j168.389 \Omega \cdot \frac{sh(0.04788 + j0.4377)}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 32 + j168.389 \Omega \cdot \frac{0.0434 + j0.4243}{0.04788 + j0.4377} = 30.548 + j164.9923 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{Y}_\pi}{2} &= \frac{\vec{Y}}{2} \cdot \frac{th \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = 1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S \cdot \frac{th \left( \frac{0.04788 + j0.4377}{2} \right)}{\frac{0.04788 + j0.4377}{2}} \\ &= 1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S \cdot \frac{0.0251 + j0.2223}{0.0239 + j0.2189} \\ &= 1.8551 \cdot 10^{-5} + 57.1528 \cdot 10^{-5} S \end{aligned}$$

$$|Z_\pi| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(30.548)^2 + (164.9923)^2} \Omega = 171.3456 \Omega$$

$$\left| \frac{Y_\pi}{2} \right| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(1.8551 \cdot 10^{-5})^2 + (57.1528 \cdot 10^{-5})^2} S = 60.64976 \cdot 10^{-5} S$$

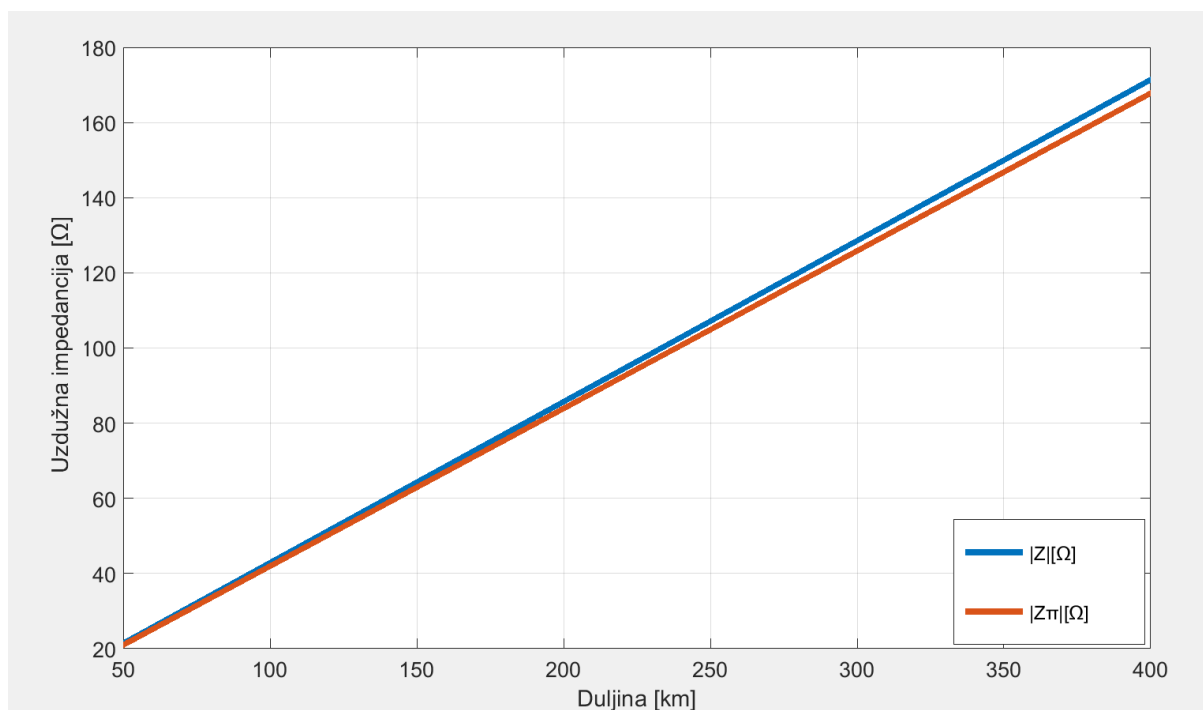
$$|Z_\pi| = \mathbf{167,7964 \Omega}$$

$$\left| \frac{Y_\pi}{2} \right| = \mathbf{57.1829 \cdot 10^{-5} S}$$

U prethodnom zadatku su izračunate apsolutne vrijednosti uzdužne impedancije i poprečne admitancije  $\pi$  modela na 400 kV vodu za duljinu od  $l=400\text{km}$ . Drugi podaci kojima je popunjena tablici 6.1. izračunati su pomoću programa „Matlab“ i uvršteni, isto kao i grafovi koji su napravljeni pomoću operacije „plot“ u istom programu.

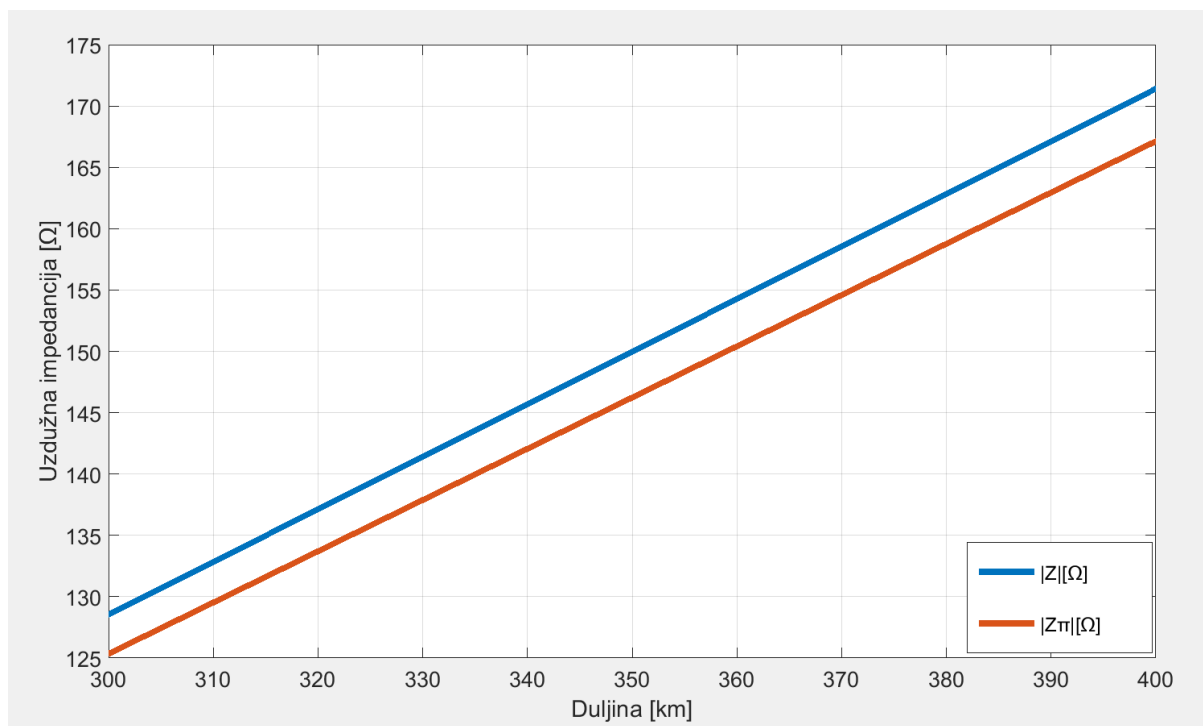
Tablica 6.1. Prikaz rezultat stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV

Duljina[km]	$ Z [\Omega]$ ( <i>približna</i> )	$ Z_{\pi} [\Omega]$ ( <i>stvarna</i> )
50	21,4253714452026	20,9745488972663
100	42,8507428904051	41,9490977945325
150	64,2761143356077	62,9236466917988
200	85,7014857808102	83,8981955890651
250	107,126857226013	104,872744486331
300	128,552228671215	125,847293383598
350	149,977600116418	146,821842280864
400	171,402971561621	167,796391178130



Graf 6.1. Grafički prikaz rezultat stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV

Radi boljeg predočenja razlike na grafičkom prikazu uzdužnih impedancija prikazan će biti najveći dio promjene, koji se događa u razmaku 300-400km.

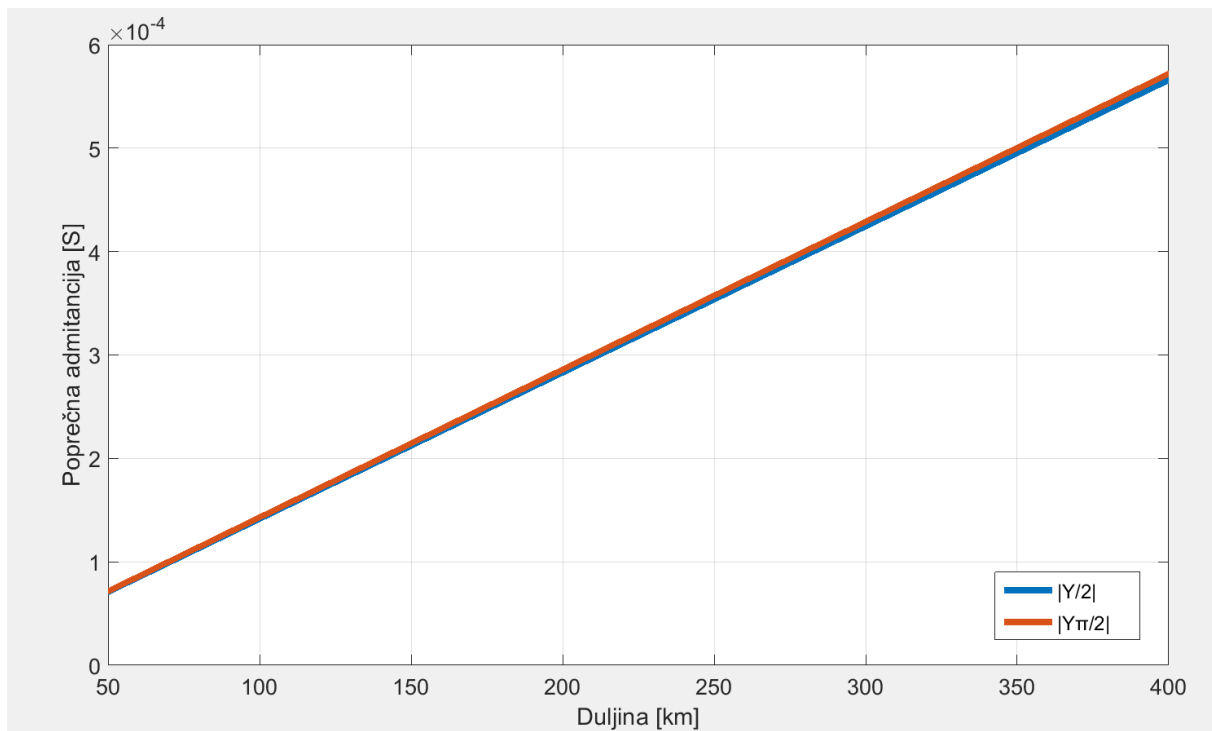


Graf 6.2. Grafički prikaz rezultata stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV na duljini voda između 300-400km

Nakon što je napravljen prikaz uzdužne impedancije, radi se prikaz i za poprečnu admitanciju koja je izračunata u prethodnom postupku za 400kV vod. U tablicu su uzete apsolutne vrijednosti.

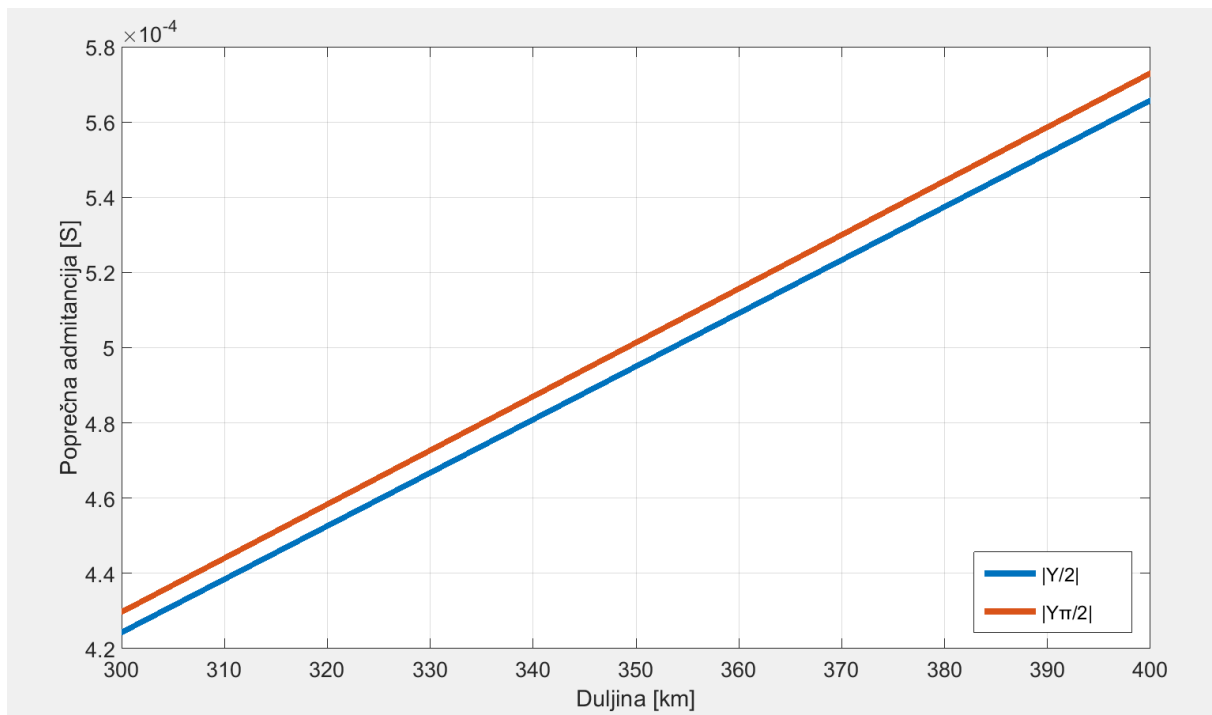
Tablica 6.2. Prikaz rezultat stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV

Duljina[km]	$\left \frac{Y}{2}\right $ [mS]( <i>približna</i> )	$\left \frac{Y_{\pi}}{2}\right $ [mS]( <i>stvarna</i> )
50	0,070717769005049	0,071478631252819
100	0,141435538010098	0,142957262505640
150	0,212153307015147	0,214435893758460
200	0,282871076020197	0,285914525011280
250	0,353588845025246	0,357393156264100
300	0,424306614030295	0,428871787516919
350	0,495024383035344	0,500350418769739
400	0,565742152040393	0,571829050022559



Graf 6.3. Grafički prikaz rezultat stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV

Radi boljeg predočenja razlike na grafičkom prikazu poprečnih admitancija prikazan će biti najveći dio promjene, koji se dešava u razmaku 300-400km.



Graf 6.4. Grafički prikaz rezultata stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog  $\pi$  modela na 400kV na duljini voda između 300-400km

## 6.2. Izračun i grafički prikaz približne i točne uzdužne impedancije i poprečne admitancije kod nadomjesnog T modela voda na vrlo visokom naponu (400 kV)

Kako su u prijašnjem zadatku za  $\pi$  model izračunate sve vrijednosti, u ovom dijelu te se vrijednosti transformiraju i koriste za T model izračuna pomoću jednanžbi (6.3), (6.4), (6.5), (6.6).

$$\vec{Z} = R_1 + jX = 32 + j168.3894 \Omega$$

$$\frac{\vec{Z}}{2} = \frac{32 + j168.3894 \Omega}{2} = 16 + j84.1947 \Omega$$

$$\vec{Y} = G + jB = 3.4 \cdot 10^{-5} S + j113.0973 \cdot 10^{-5} S$$

Nakon što su izračunate kompleksne vrijednosti, izračunaju se i apsolutne.

$$\left| \frac{Z}{2} \right| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(16)^2 + (84.1947)^2} \Omega = 85.7015 \Omega$$

$$|Y| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(3.4 \cdot 10^{-5})^2 + (113.0973 \cdot 10^{-5})^2} S = 131.1484 \cdot 10^{-5} S$$

$$\left| \frac{Z}{2} \right| = 85.7015 \Omega$$

$$|Y| = 131.1484 \cdot 10^{-5} S$$

Nakon što sudobivene apsolutne vrijednosti koje služe za crtanje grafova, računa se korekcijski faktor prema izrazu (3.11).

$$\begin{aligned}\theta &= \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} = \sqrt{32 + j168.389 \Omega \cdot (3.4 \cdot 10^{-5} + j113.0965 \cdot 10^{-5})S} \\ &= \mathbf{0.04788 + j0.4377}\end{aligned}$$

Za izračun pravih vrijednosti na vodu potrebno je koristiti korekcijski faktor pomoću formula (5.25), (5.26):

$$\begin{aligned}\frac{\vec{Z}_\pi}{2} &= \frac{\vec{Z}}{2} \cdot \frac{th \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = 16 + j84.1947\Omega \cdot \frac{th\left(\frac{0.04788 + j0.4377}{2}\right)}{\frac{0.04788 + j0.4377}{2}} \\ &= 16 + j84.1947\Omega \cdot \frac{0.0251 + j0.2223}{0.0239 + j0.2189} = 16.3758 + j85.0616\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{Y}_\pi &= \vec{Y} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} = 3.4 \cdot 10^{-5}S + j113.0973 \cdot 10^{-5}S \cdot \frac{sh(0.04788 + j0.4377)}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 3.4 \cdot 10^{-5}S + j113.0973 \cdot 10^{-5}S \cdot \frac{0.0434 + j0.4243}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 2.8055 \cdot 10^{-5}S + j110.7320 \cdot 10^{-5}S\end{aligned}$$

$$\left| \frac{Z_\pi}{2} \right| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(16.3758)^2 + (85.0616)^2}S = 86.6236\Omega$$

$$|Y_\pi| = \sqrt{(Re)^2 + (Im)^2} = \sqrt{(2.8055 \cdot 10^{-5})^2 + (110.7320 \cdot 10^{-5})^2}S = 110.7676 \cdot 10^{-5}S$$

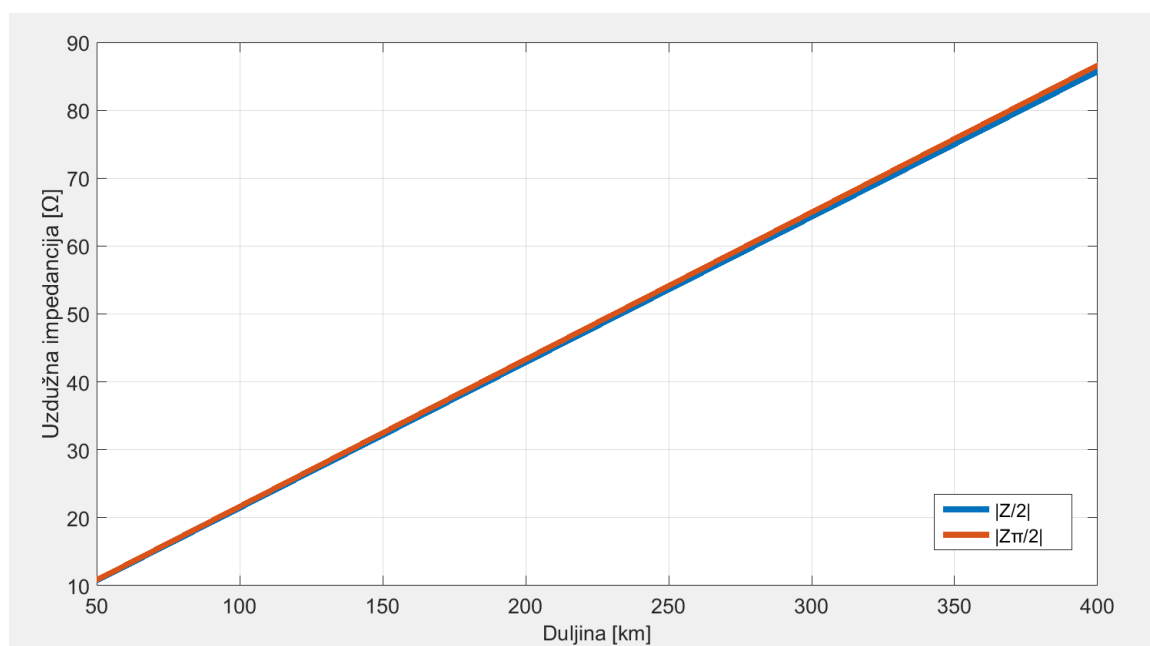
$$\left| \frac{Z_\pi}{2} \right| = \mathbf{86.6236\Omega}$$

$$|Y_\pi| = \mathbf{110.7676 \cdot 10^{-5}S}$$

Apsolutnim vrijednostima zaključen je izračun za T model voda. U nastavku će se grafički prikazati razlika stvarne i približne uzdužne impedancije te poprečne admitancije.

Tablica 6.3. Prikaz rezultat stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog T modela na 400kV

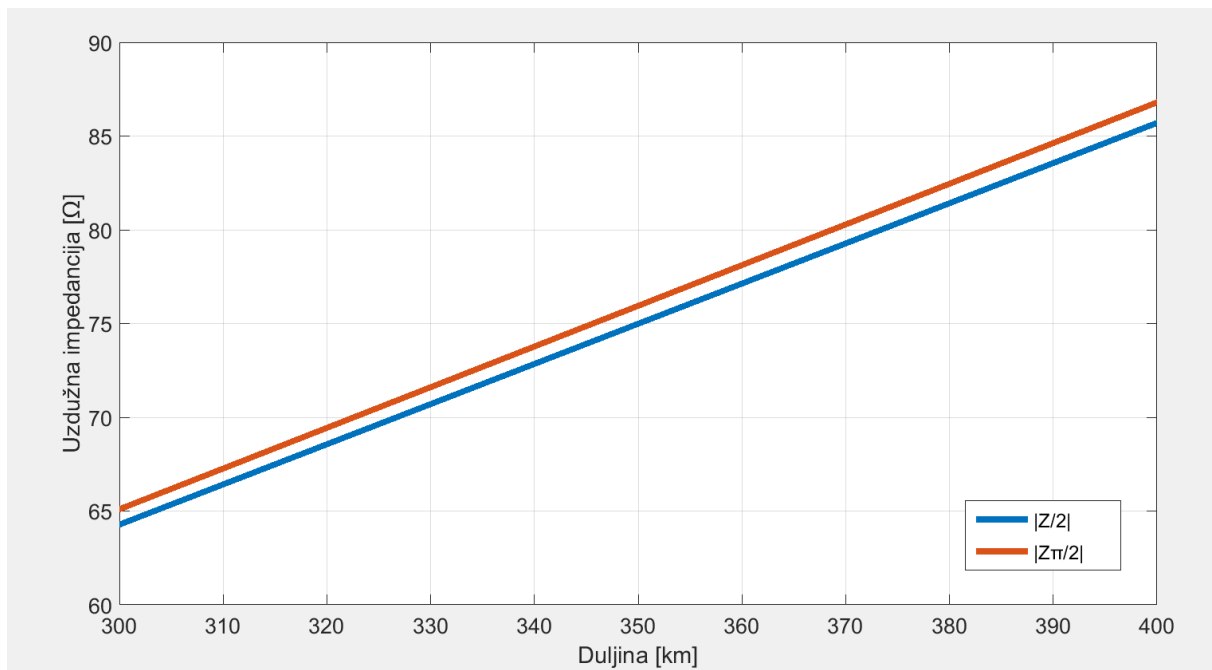
Duljina[km]	$\left \frac{Z}{2}\right $ [Ω] ( <i>približna</i> )	$\left \frac{Z_{\pi}}{2}\right $ [Ω] ( <i>stvarna</i> )
50	10,7126857226013	10,8279449884582
100	21,4253714452026	21,6558899769164
150	32,1380571678038	32,4838349653746
200	42,8507428904051	43,3117799538328
250	53,5634286130064	54,1397249422909
300	64,2761143356077	64,9676699307491
350	74,9888000582090	75,7956149192073
400	85,7014857808102	86,6235599076655



Graf 6.6. Grafički prikaz rezultat stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog T modela na 400kV

Radi boljeg predočjenja razlike na grafičkom prikazu poprečnih admitancija prikazat će se najveći dio promjene, koji se dešava u razmaku 300-400km.



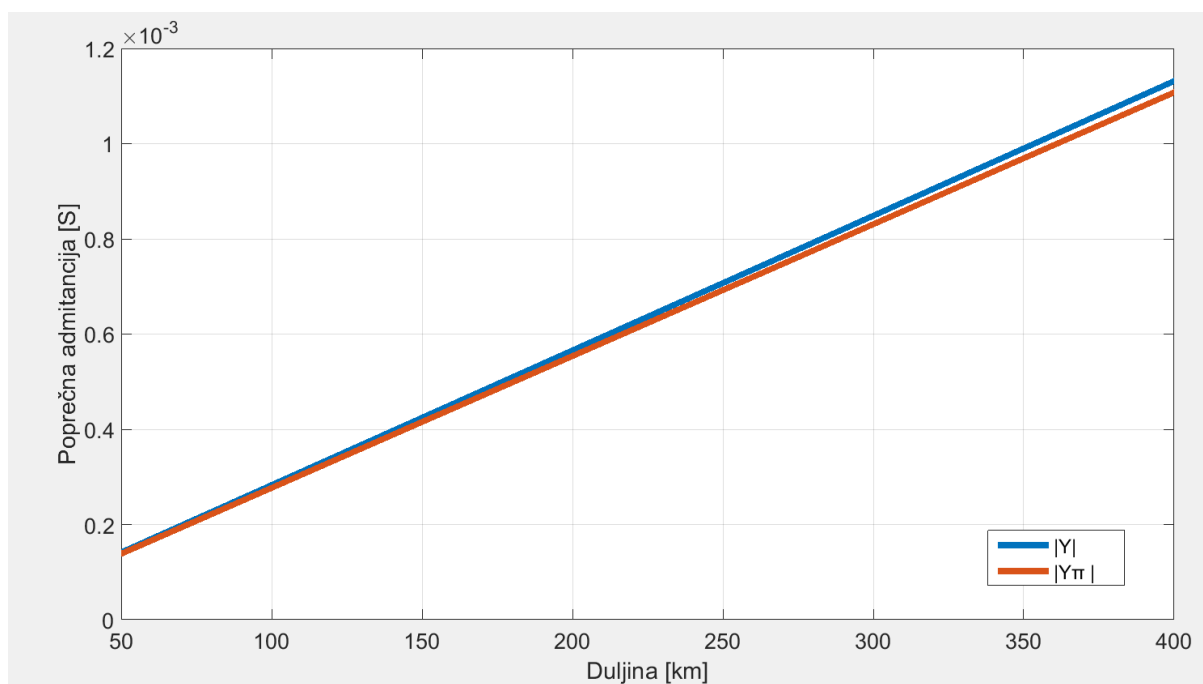


Graf 6.7. Grafički prikaz rezultata stvarne i približne uzdužne impedancije nadomjesnog T modela na 400kV između 300-400km duljine voda

Sada nakon što je napravljen prikaz uzdužne impedancije, radi se prikaz isto tako i za poprečnu admitanciju koja je izračunata u prethodnom postupku za 400kV vod. U tablicu se uzimaju apsolutne vrijednosti.

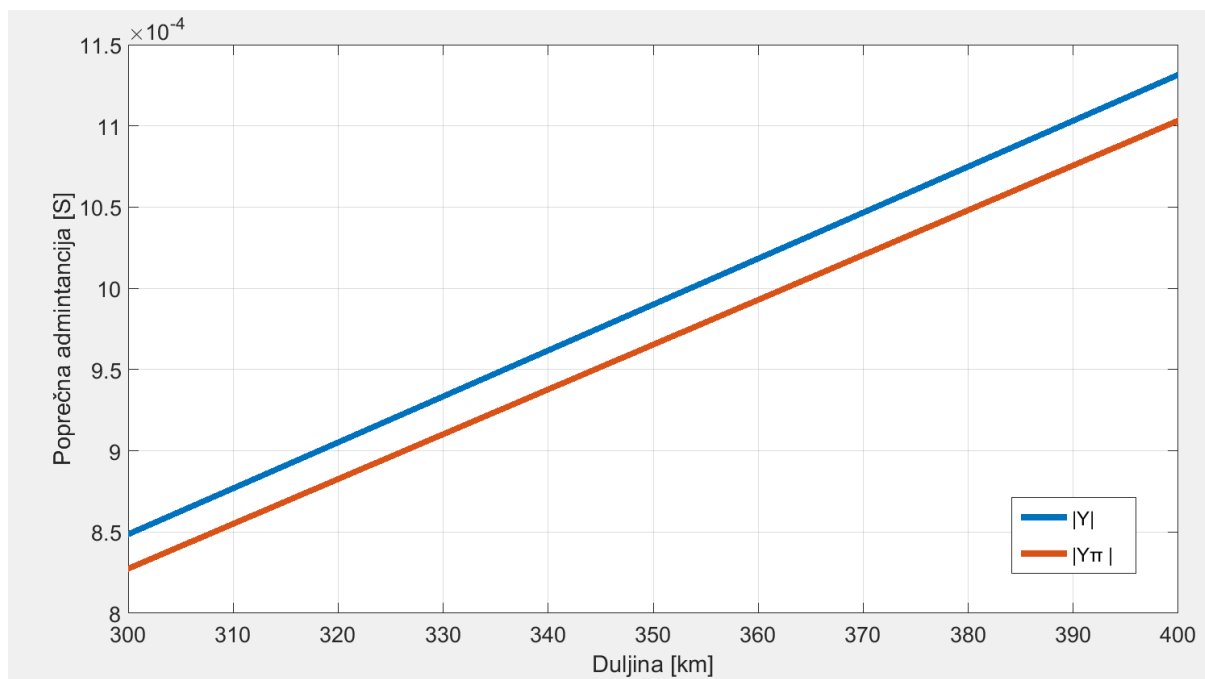
Tablica 6.4. Prikaz rezultat stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog T modela na 400kV

Duljina[km]	$ Y $ [mS]( <i>približna</i> )	$ Y_{\pi} $ [mS]( <i>stvarna</i> )
50	0,141435538010098	0,138459518211444
100	0,282871076020197	0,276919036422887
150	0,424306614030295	0,415378554634331
200	0,565742152040393	0,553838072845774
250	0,707177690050491	0,692297591057218
300	0,848613228060590	0,830757109268661
350	0,990048766070688	0,969216627480105
400	1,131484304080460	1,107676145691380



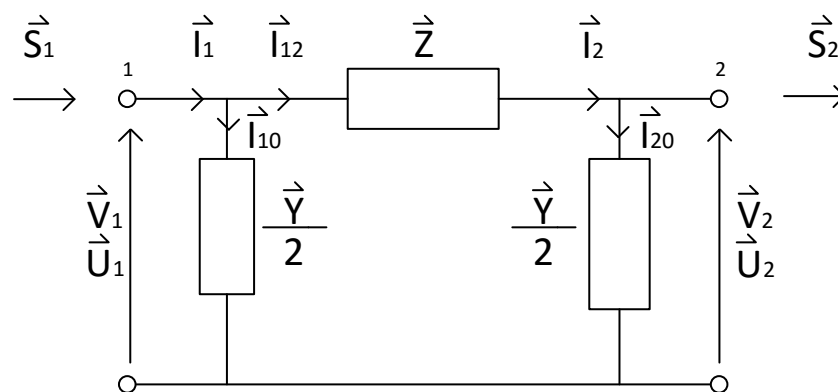
Graf 6.8. Grafički prikaz rezultat stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog T modela na 400kV

Radi boljeg predočenja razlike na grafičkom prikazu poprečnih admitancija prikazat će se najveći dio promjene, koji se dešava u razmaku 300 - 400km.

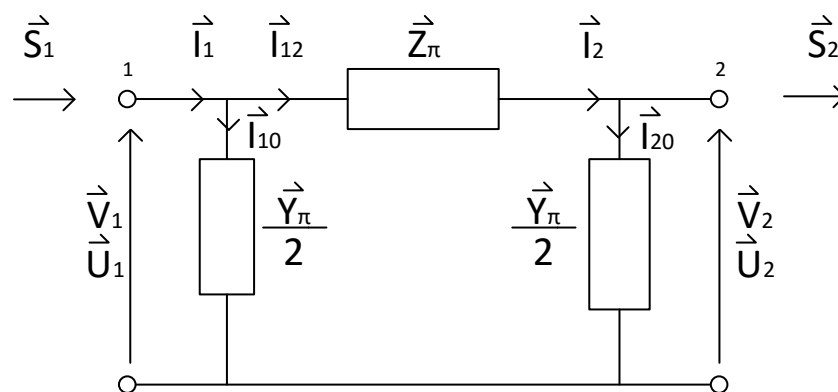


Graf 6.9. Grafički prikaz rezultata stvarne i približne poprečne admitancije nadomjesnog T modela na 400kV na duljini voda između 300-400km

**6.3. Izračun i tablični prikaz napona i struja na kraju i na početku nadomjesnog  $\pi$  modela voda sa približnim i stvarnim vrijednostima na vrlo visokom naponu (400 kV)**



Slika 6.5. Prikaz napona, struja i snaga na približnom  $\pi$  modelu voda



Slika 6.6. Prikaz napona, struja i snaga na točnom  $\pi$  modelu voda

Za izračun vrijednosti uzdužne impedancije i poprečne admitancije voda koriste se jednačbe (6.1), (6.2), (6.5), (6.6) uz sljedeće vrijednosti:

$$R_1 = 0,08 \frac{\Omega}{km} \text{ (jedinični otpor voda)}$$

$$L_1 = 1,34 \frac{mH}{km} \text{ (jedinični induktivitet voda)}$$

$$C_1 = 9 \frac{nF}{km} \text{ (jedinični kapacitet voda)}$$

$$G_1 = 85 \frac{nS}{km} \text{ (jedinični odvod voda)}$$

Zadatak u računanju vrijednosti je izračun na različitim duljinama. U ovom primjeru bit će zadana samo jedna duljina, dok će u tablici biti sva rješenja za sve zadane duljine prikazana apsolutnim vrijednostima.

Računa se s duljinom  $l = 400km$  i frekvencijom  $f = 50Hz$ :

$$R = R_1 \cdot l = 0.08 \frac{\Omega}{km} \cdot 400km = 32\Omega,$$

$$X_{L1} = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 1.34 \cdot 10^{-3} \frac{H}{km} = 0.4210 \frac{\Omega}{km},$$

$$X = X_{L1} \cdot l = 0.4210 \frac{\Omega}{km} \cdot 400km = 168.3\Omega$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 9 \cdot 10^{-9} \frac{F}{km}} = 353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{km},$$

$$B_1 = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{km}} = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{S}{km},$$

$$B = B_1 \cdot l = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{S}{km} \cdot 400km = 113.0977 \cdot 10^{-5} S ,$$

$$G = G_1 \cdot l = 85 \cdot 10^{-9} \frac{S}{km} \cdot 400km = 3.4 \cdot 10^{-5} S ,$$

Sada kada su izračunate sve potrebne vrijednosti uvrštava ih se u jednadžbe impedancije i admitancije:

$$\vec{Z} = R_1 + jX = 32 + j168.389 \Omega,$$

$$\vec{Y} = G + jB = 3.4 \cdot 10^{-5} S + j113.0977 \cdot 10^{-5} S ,$$

$$\frac{\vec{Y}}{2} = \frac{3.4 \cdot 10^{-5} S + j113.0977 \cdot 10^{-5} S}{2} = 1.7000 \cdot 10^{-5} S + j56.5486 \cdot 10^{-5} S$$

Nakon što su izračunate približne vrijednosti nadomjesnog  $\pi$  modela koji su skicirani na Slici 6.5., pomoću korekcijskog faktora  $\frac{sh\theta}{\theta}$  i  $\frac{th \theta/2}{\theta/2}$  izračunat će se i točne vrijednosti pomoću izraza (3.11), (5.23), (5.24):

$$\begin{aligned} \theta &= \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} = \sqrt{32 + j168.389 \Omega \cdot (3.4 \cdot 10^{-5} + j113.0965 \cdot 10^{-5}) S} \\ &= \mathbf{0.04788 + j0.4377} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{Z}_\pi &= \vec{Z} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} = 32 + j168.389 \Omega \cdot \frac{sh(0.04788 + j0.4377)}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 32 + j168.389 \Omega \cdot \frac{0.0434 + j0.4243}{0.04788 + j0.4377} = 30.548 + j164.9923 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\vec{Y}_\pi}{2} &= \frac{\vec{Y}}{2} \cdot \frac{th \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = 1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S \cdot \frac{th \left( \frac{0.04788 + j0.4377}{2} \right)}{\frac{0.04788 + j0.4377}{2}} \\
&= 1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S \cdot \frac{0.0251 + j0.2223}{0.0239 + j0.2189} \\
&= 1.8551 \cdot 10^{-5} + 57.1528 \cdot 10^{-5} S
\end{aligned}$$

Točne vrijednosti nalaze se na slici 6.6..

Podaci za računanje snaga, struja i napona na početku voda su:

$$U_2 = 400 \text{ kV (nazivni napon)}$$

$$\vec{S}_2 = 200 + j40 \text{ MVA (induktivna snaga na kraju voda)}$$

$$l = 400 \text{ km (duljina voda)}$$

Pomoću izraza (5.5), (5.6), (5.7), (5.30), (5.31), (5.34) računaju se snage, struje i naponi na početku voda ako postoje zadane vrijednosti na kraju voda:

a) računamo približne vrijednosti:

$$\vec{Z} = 32 + j168.389 \Omega \text{ (približna uzdužna impedancija } \pi \text{ modela)}$$

$$\frac{\vec{Y}}{2} = 1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S \text{ (približna poprečna admitancija } \pi \text{ modela)}$$

$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 230.9401 \text{ kV,}$$

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} = \frac{200 - j40 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV}} = 288,67513 - j57.7350 \text{ A}$$

$$\vec{I}_{20} = \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}}{2} = 230.94011 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot (1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5} S)$$

$$= 3.9260 + j130.5934 \text{ A} \vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{I}_{20}$$

$$= (288,67513 - j57.7350) \text{ A} + (3.9260 + j130.5934) \text{ A}$$

$$= 292,6012 + j72,8584 \text{ A}$$

$$\Delta \vec{V} = \vec{I}_{12} \cdot \vec{Z} = (292,6012 + j72,8584) \text{ A} \cdot (32 + j168.389) \Omega$$

$$= -2.9053 + j51.6023 \text{ kV}$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 + (\vec{I}_{12} \cdot \vec{Z}) = 230.9401 \text{ kV} + (-2.9053 + j51.6023 \text{ kV})$$

$$= \mathbf{228.0348 + j51.6023 \text{ kV}}$$

$$\vec{U}_1 = \vec{V}_1 \cdot \sqrt{3} = (228.0348 + j51.6023 \text{ kV}) \cdot \sqrt{3} = \mathbf{394.9678 + j89.3778 \text{ kV}}$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{12} + \vec{V}_1 \cdot \frac{\vec{Y}}{2}$$

$$= (292,6012 + j72,8584)A + (228.0348 + j51.6023)kV \cdot (1.7000 \cdot 10^{-5} + j56.5486 \cdot 10^{-5})S = \mathbf{267.2973 + j202.6861 A}$$

$$\vec{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot (394.9678 + j89.3778)kV \cdot (267.2973 - j202.6861) = \mathbf{214.2365 - j97.2790 \text{ MVA}}$$

$$\Delta \vec{S} = \vec{S}_1 - \vec{S}_2 = (214.2365 - j97.2790)MVA - (200 + j40)MVA = \mathbf{14.2365 - j137.2790 \text{ MVA}}$$

Nakon što su izračunate vrijednosti za približni  $\pi$  model, računaju se napon, struja i snaga za stvarne vrijednosti uzdužne impedancije i poprečne admitancije  $\pi$  modela.

Podaci za računanje snage, struja i napona na početku voda su:

$$U_2 = 400 \text{ kV (nazivni napon)}$$

$$\vec{S}_2 = 200 + j40 \text{ MVA (induktivna snaga na kraju voda)}$$

$$l = 400 \text{ km (duljina voda)}$$

Pomoću izraza (5.5), (5.27), (5.30), (5.31), (5.34), (5.36), računaju se snage, struje i naponi na početku voda ako postoje zadane vrijednosti na kraju voda:

b) računamo točne vrijednosti:

$$\vec{Z}_\pi = 30.548 + j164.9923\Omega (\text{točna uzdužna impedancija } \pi \text{ modela})$$

$$\frac{\vec{Y}_\pi}{2} = 1.8551 \cdot 10^{-5} + j57.1528 \cdot 10^{-5}S (\text{točna poprečna admitancija } \pi \text{ modela})$$

$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 230.9401 \text{ kV},$$

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} = \frac{200 - j40MVA}{\sqrt{3} \cdot 400kV} = 288,67513 - j57.7350 \text{ A}$$

$$\vec{I}_{20} = \vec{V}_2 \cdot \frac{\vec{Y}_\pi}{2} = 230.94011 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot (1.8551 \cdot 10^{-5} + j57.1528 \cdot 10^{-5})S$$

$$\begin{aligned}
&= 4.2842 + j131.9887A\vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{I}_{20} \\
&= (288,67513 - j57.7350)A + (4.2842 + j131.9887)A \\
&= 292.9593 + j74.2537 A
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\vec{V} = \vec{I}_{12} \cdot \vec{Z}_{\pi} &= (292,6012 + j72,8584)A \cdot (30.548 + j164.9923)\Omega \\
&= -3.3020 + j50.6043 kV
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{V}_{1\pi} = \vec{V}_2 + (\vec{I}_{12} \cdot \vec{Z}_{\pi}) &= 230.9401 kV + (-3.3020 + j50.6043 kV) \\
&= \mathbf{227.6381 + 50.6043kV}
\end{aligned}$$

$$\vec{U}_{1\pi} = \vec{V}_1 \cdot \sqrt{3} = (227.6381 + 50.6043kV) \cdot \sqrt{3} = \mathbf{394.2808 + 87.6493 kV}$$

$$\begin{aligned}
\vec{I}_{1\pi} = \vec{I}_{12} + \vec{V}_1 \cdot \frac{\vec{Y}_{\pi}}{2} &= (292.9593 + j74.2537)A + (227.6381 + 50.6043)kV \\
&\cdot (1.8551 \cdot 10^{-5} + j57.1528 \cdot 10^{-5})S = \mathbf{268.2604 + j205,2940 A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{S}_{1\pi} = \sqrt{3} \cdot \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1^* &= \sqrt{3} \cdot (394.2808 + 87.6493)kV \cdot (268.2604 - j205,2940)A \\
&= \mathbf{214.3652 - j99.4728MVA}
\end{aligned}$$

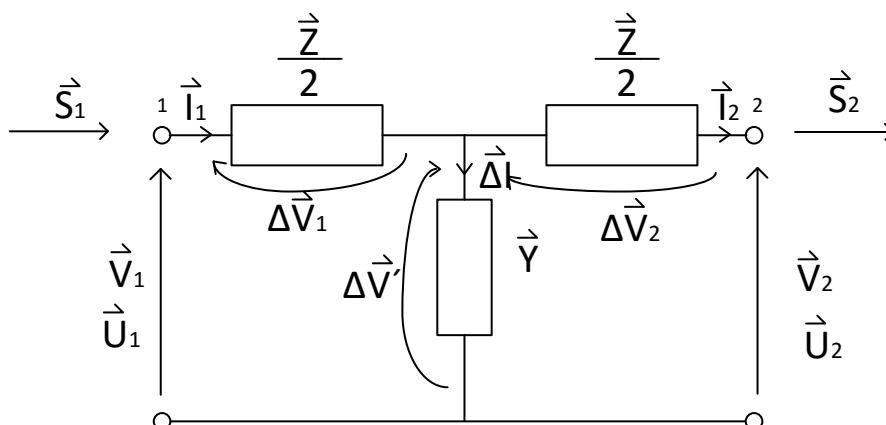
$$\begin{aligned}
\Delta\vec{S}_{\pi} = \vec{S}_{1\pi} - \vec{S}_2 &= (214.3652 - j99.4728)MVA - (200 + j40)MVA \\
&= \mathbf{14.3652 - j139.4728MVA}
\end{aligned}$$



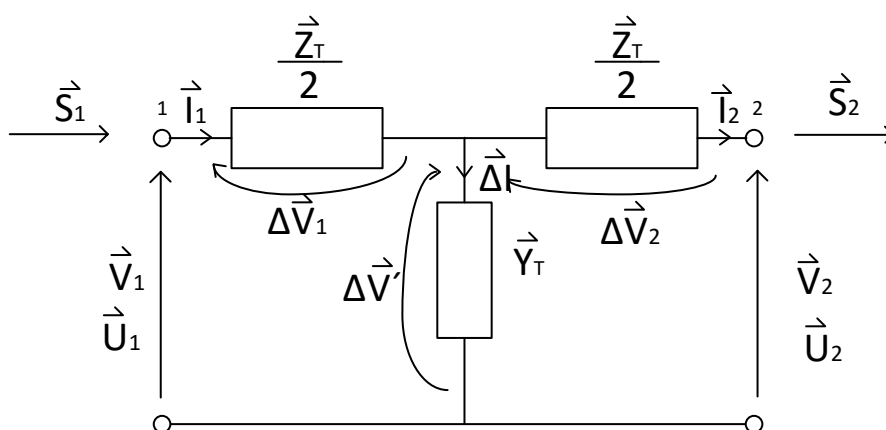
Tablica 6.5. Prikaz za usporedbu rezultat napona, struja i snaga točne i približne vrijednostima početku voda, ako postoje zadane vrijednosti na kraju nadomjesnog  $\pi$  modela voda

	Točne vrijednosti	Približne vrijednosti	Greška[%]
$\vec{V}_1[kV]$	227.6381 + 50.6043	228.0348 + j51.6023	0.2596%
$\vec{U}_1[kV]$	394.2808 + 87.6493	394.9678 + j89.3778	0.2596%
$\vec{I}_1[A]$	268.2604 + j205,2940	267.2973 + j202.6861	0.6695%
$\vec{S}_1[MVA]$	214.3652 – j99.4728	214.2365 – j97.2790	0.4387%
$\vec{P}_1[MW]$	214.3652	214.2365	0.06007%
$\vec{Q}_1[MVAr]$	99.4728	97.2790	2.2552%

**6.4. Izračun i tablični prikaz napona i struja na kraju i na početku nadomjesnog T modela voda sa približnim i stvarnim vrijednostima na vrlo visokom naponu (400 kV)**



Slika 6.7. Prikaz napona, struja i snaga na približnom T modelu voda



Slika 6.8. Prikaz napona, struja i snaga na točnom T modelu voda

Za izračun vrijednosti uzdužne impedancije i poprečne admitancije voda koriste se jednačbe (6.3), (6.4), (6.5), (6.6) uz sljedeće vrijednosti:

$$R_1 = 0,08 \frac{\Omega}{km} \text{ (jedinični otpor voda)}$$

$$L_1 = 1,34 \frac{mH}{km} \text{ (jedinični induktivitet voda)}$$

$$C_1 = 9 \frac{nF}{km} \text{ (jedinični kapacitet voda)}$$

$$G_1 = 85 \frac{nS}{km} \text{ (jedinični odvod voda)}$$

Zadatak u računanju vrijednosti je izračun na različitim duljinama, u ovom primjeru biti će zadana samo jedna duljina, dok će u tablici biti navedena rješenja za sve zadane duljine prikazana apsolutnim vrijednostima.

Računamo s duljinom  $l = 400\text{km}$  i frekvencijom  $f = 50\text{Hz}$ :

$$R = R_1 \cdot l = 0.08 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 400\text{km} = 32\Omega,$$

$$X_{L1} = \omega \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 1.34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}} = 0.4210 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$X = X_{L1} \cdot l = 0.4210 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 400\text{km} = 168.3\Omega$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 9 \cdot 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{km}}} = 353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$B_1 = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{353.68 \cdot 10^3 \frac{\Omega}{\text{km}}} = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}},$$

$$B = B_1 \cdot l = 2.82741 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}} \cdot 400\text{km} = 113.0977 \cdot 10^{-5} \text{S},$$

$$G = G_1 \cdot l = 85 \cdot 10^{-9} \frac{\text{S}}{\text{km}} \cdot 400\text{km} = 3.4 \cdot 10^{-5} \text{S},$$

Sada kada su izračunate sve potrebne vrijednosti, uvrštava ih se u jednadžbe impedancije i admitancije:

$$\vec{Z} = R_1 + jX = 32 + j168.389 \Omega,$$

$$\vec{Y} = G + jB = 3.4 \cdot 10^{-5} \text{S} + j113.0977 \cdot 10^{-5} \text{S},$$

$$\frac{\vec{Z}}{2} = \frac{32 + j168.3894 \Omega}{2} = 16 + j84.1947\Omega$$

Nakon što su izračunate kompleksne vrijednosti, potrebno je izračunati i apsolutne.

Nakon što su izračunate približne vrijednosti nadomjesnog T modela, pomoću korekcijskog faktora  $\frac{\text{sh}\theta}{\theta} \cdot \frac{\text{th}\theta/2}{\theta/2}$  izračunat će se pomoću izraza (3.11), (5.18), (5.19):

$$\begin{aligned} \theta &= \sqrt{\vec{Z} \cdot \vec{Y}} = \sqrt{32 + j168.389 \Omega \cdot (3.4 \cdot 10^{-5} + j113.0965 \cdot 10^{-5}) \text{S}} \\ &= \mathbf{0.04788 + j0.4377} \end{aligned}$$

Za izračun pravih vrijednosti na vodu potrebno je koristiti korekcijski faktor pomoću formula koje slijede u nastavku:

$$\begin{aligned}\frac{\vec{Z}_T}{2} &= \frac{\vec{Z}}{2} \cdot \frac{th \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = 16 + j84.1947\Omega \cdot \frac{th\left(\frac{0.04788 + j0.4377}{2}\right)}{\frac{0.04788 + j0.4377}{2}} \\ &= 16 + j84.1947\Omega \cdot \frac{0.0251 + j0.2223}{0.0239 + j0.2189} = 16.3758 + j85.0616\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{Y}_T &= \vec{Y} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} = 3.4 \cdot 10^{-5}S + j113.0973 \cdot 10^{-5}S \cdot \frac{sh(0.04788 + j0.4377)}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 3.4 \cdot 10^{-5}S + j113.0973 \cdot 10^{-5}S \cdot \frac{0.0434 + j0.4243}{0.04788 + j0.4377} \\ &= 2.8055 \cdot 10^{-5}S + j110.7320 \cdot 10^{-5}S\end{aligned}$$

Podaci za računanje snaga, struja i napona na početku voda su:

$$U_2 = 400 \text{ kV} \text{ (nazivni napon)}$$

$$\vec{S}_2 = 200 + j40 \text{ MVA} \text{ (induktivna snaga na kraju voda)}$$

$$l = 400 \text{ km} \text{ (duljina voda)}$$

Pomoću izraza (5.41), (5.42), (5.43), (5.44), (5.45), (5.47), (5.48) računaju se snaga, struja i naponi na početku voda ako postoje zadane vrijednosti na kraju voda:

a) računanje približne vrijednosti:

$$\vec{Y} = G + jB = 3.4 \cdot 10^{-5}S + j113.0977 \cdot 10^{-5}S$$

(približna poprečna admitancija nadomjesnog T modela voda)

$$\frac{\vec{Z}}{2} = \frac{32 + j168.3894 \Omega}{2} = 16 + j84.1947\Omega$$

(približna uzdužna impedancija nadomjenog T modela voda)

$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 230.9401 \text{ kV},$$

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} = \frac{200 - j40 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV}} = 288.67513 - j57.7350 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{V}_2 &= \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} = (288.67513 - j57.7350) \text{ A} \cdot (16 + j84.1947) \Omega \\ &= 9.4798 + j23.3811 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\vec{V}' = \vec{V}_2 + (\vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}}{2}) = 230.9401 \text{ kV} + (9.4798 + j23.3811) \text{ kV} = 240.4299 + j23.3811 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{I} &= \vec{V}' \cdot \vec{Y} = (240.4299 + 23.3811)kV \cdot (3.4 \cdot 10^{-5} + j113.0977 \cdot 10^{-5})S \\ &= -18,2693 + j272,7043 A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{I}_1 &= \vec{I}_2 + \Delta \vec{I} = (288,67513 - j57.7350)A + (-18,2693 + j272,7043)A \\ &= 270.4059 + j214.9693 A\end{aligned}$$

$$\Delta \vec{V}_1 = \vec{I}_1 \cdot \frac{\vec{Z}}{2} = (270.4059 + j214.9693)A \cdot (16 + j84.1947)\Omega = -13.7728 + j26.2062 kV$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 &= \vec{V}' + \Delta \vec{V}_1 = (240.4299 + 23.3811)kV + (-13.7728 + j26.2062)kV \\ &= 226.6471 + j49.5874 kV\end{aligned}$$

$$\vec{U}_1 = \vec{V}_1 \cdot \sqrt{3} = (226.6471 + j49.5874)kV \cdot \sqrt{3} = 392.5643 + j85.8879 kV$$

$$\begin{aligned}\vec{S}_1 &= \sqrt{3} \cdot \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot (392.5643 + j85.8879)kV \cdot (270.4059 - j214.9693)A \\ &= 215.8394 - j105.9403 MVA\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{S} &= \vec{S}_1 - \vec{S}_2 = (215.8394 - j105.9403)MVA - (200 + j40)MVA \\ &= 15.8394 - j145.9403 MVA\end{aligned}$$

b) računanje točnih vrijednosti:

$$\vec{Y}_T = \vec{Y} \cdot \frac{sh\theta}{\theta} = 2.8055 \cdot 10^{-5}S + j110.7320 \cdot 10^{-5}S$$

(Točna poprečna admitancija nadomjesnog T modela voda)

$$\frac{\vec{Z}_T}{2} = \frac{\vec{Z}}{2} \cdot \frac{th\frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = 16.3758 + j85.0616\Omega$$

(Točna uzdužna impedancija nadomjenog T modela voda)

$$V_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400 kV}{\sqrt{3}} = 230.9401 kV,$$

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} = \frac{200 - j40MVA}{\sqrt{3} \cdot 400kV} = 288,67513 - j57.7350 A$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{V}_{2T} &= \vec{I}_2 \cdot \frac{\vec{Z}_T}{2} = (288.67513 - j57.7350)A \cdot (16.3758 + j85.0616)\Omega \\ &= 9.6383 + j23.6097kV\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{V}'_T &= \vec{V}_2 + (\vec{I}_2 \cdot \frac{\overrightarrow{Z}_\pi}{2}) = 230.9401 \text{ kV} + (9.6383 + j23.6097) \text{ kV} \\ &= 240.5784 + j23.6097 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \overrightarrow{I}_T &= \overrightarrow{V}' \cdot \overrightarrow{Y}_T = (240.5784 + j23.6097) \text{ kV} \cdot (2.8055 \cdot 10^{-5} + j110.7320 \cdot 10^{-5}) \text{ S} \\ &= -19,3941 + j267,0597 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{I}_{1T} &= \vec{I}_2 + \Delta \overrightarrow{I}_T = (288,67513 - j57.7350) \text{ A} + (-19,3941 + j267,0597) \text{ A} = \\ &= 269.2810 + j209.3246 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{V}_{1T} &= \vec{I}_{1T} \cdot \frac{\overrightarrow{Z}_T}{2} = (269.2810 + j209.3246) \text{ A} \cdot (16.3758 + j85.0616) \Omega \\ &= -13.3958 + j26.3333 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_{1T} &= \overrightarrow{V}'_T + \Delta \vec{V}_{1T} = (240.5784 + j23.6097) \text{ kV} + (-13.3958 + 26.3333) \text{ kV} \\ &= 227.1826 + j49.9430 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1T} &= \vec{V}_{1T} \cdot \sqrt{3} = (226.6471 + j49.5874) \text{ kV} \cdot \sqrt{3} \\ &= 393.4918 + j86.5039 \text{ kV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{S}_{1T} &= \sqrt{3} \cdot \vec{U}_{1T} \cdot \vec{I}_{1T}^* = \sqrt{3} \cdot (393.4918 + j86.5039) \text{ kV} \cdot (269.2810 - j209.3246) \text{ A} \\ &= 214.8909 - j102.3186 \text{ MVA}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \vec{S}_T &= \vec{S}_{1T} - \vec{S}_2 = (214.8909 - j102.3186) \text{ MVA} - (200 + j40) \text{ MVA} \\ &= 14.8909 - j142.3186 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Tablica 6.5. Prikaz za usporedbu rezultat napona, struja i snaga točne i približne vrijednostima početku voda, ako postoje zadane vrijednosti na kraju nadomjesnog Tmodela voda

	Točne vrijednosti	Približne vrijednosti	Greška[%]
$\vec{V}_1[kV]$	227.1826 + j49.9430	226.6471 + j49.5874	0.2583%
$\vec{U}_1[kV]$	393.4918 + j86.5039	392.5643 + j85.8879	0.2583%
$\vec{I}_1[A]$	269.2810 + j209.3246	270.4059 + j214.9693	1.2821%
$\vec{S}_1[MVA]$	214.8909 – j102.3186	215.8394 – j105.9403	1.0102%
$\vec{P}_1[MW]$	214.8909	215.8394	0.44139%
$\vec{Q}_1[MVAr]$	102.3186	105.9403	3.5396%

## 7. ZAKLJUČAK

Iz proračuna zadatka može se primijetiti nekoliko značajnih detalja koji mogu utjecati na daljnje proračune kao i mogućnost pojednostavljenja samog proračuna pri vrlo visokom naponu od 400kV. Prilikom računanja i usporedbe približnih i točnih vrijednosti može se doći do zaključka da na duljini manjoj od 200km nije potrebno računati točne vrijednosti. Grafovi isto tako prikazuju da uzdužna impedancija i poprečna admitancija imaju približnu vrijednost i kod točnog i približnog izračuna. Na temelju tog saznanja može se zaključiti da nije potrebno računati korekcijske faktore za vodove duljine manje od 200km što prilično pojednostavljuje proračun. Za vodove dulje od 200km potrebno je računati korekcijske faktore radi dobivanja preciznijih vrijednosti napona i struja.

U dijelu zadatka gdje se računaju prilike na početku voda kada postoje već zadane vrijednosti na kraju voda, izračunate pogreške su u postocima za snagu, struju i napon. Greške su izračunate za vrijednosti između točnog i približnog modela. U proračunu je potrebno obratiti pozornost na radnu snagu. Prema vidljivim dobivenim rezultatima može se vidjeti da je greška manja kod  $\pi$  modela, dok je kod T modela ona znatno veća. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da se za proračune snage preferira koristiti  $\pi$  model radi manje pogreške između točnog i približnog modela.



## 8. POPIS LITERATURE

[1] Ožegović M. i Ožegović K.

ELEKTRIČNE ENERGETSKE MREŽE II

FESB Split

Dalmacija papir Split

1996 godina

[2] Ožegović M. i Ožegović K.

ELEKTRIČNE ENERGETSKE MREŽE I

FESB Split

Dalmacija papir Split

1996 godina

[3] R. Goić, D. Jakus i I. Penović

Distribucija električne energije

2008 godina

[4] VODOVI VISOKOG I NISKOG NAPONA

Elektroindustrijska i obrtnička škola Rijeka

<http://mabacic.eios.hr/oo/vodovi.pdf>

[5] NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

Jadranka Radović, prof.dr

<https://www.scribd.com/doc/104913729/>

[6] PRIJENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Tehnički fakultet sveučilišta u Rijeci

[http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zee/nastava/svel/pee/download/Konstrukcijski\\_1\\_Konstante\\_Upute.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/pee/download/Konstrukcijski_1_Konstante_Upute.pdf)

[7] TELEKOMUNIKACIJSKI VODOVI

Fakultet prometnih znanosti

<http://www.fpz.unizg.hr/ztos/PRSUS/Telvodovi.pdf>

[8] J. Petrić

AUTOMATSKA REGULACIJA: UVOD U ANALIZU I SINTEZU

Fakultet strojarstva i brodogranje, Sveučilište u Zagrebu

2012 godina

[http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf)

[9] PRIJENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE – KONSTRUKCIJSKI RAD

Tehnički fakultet sveučilišta u Rijeci

[http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zee/nastava/svel/pee/download/Konstrukcijski\\_2\\_Prijenos\\_Upute.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/pee/download/Konstrukcijski_2_Prijenos_Upute.pdf)

## 9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Završni rad opisuje elektroenergetske vodove, njegove osnovne dijelove te vrste vodova, konstante voda, princip i modeli po kojim se izračunavaju prijenosne jednadžbe. Detaljno je opisano računanje točnog i približnog  $\pi$  i T nadomjesnog modela elektroenergetskog voda kao i njihovi korekcijski oblici, usporedba približnih i točnih vrijednosti uzdužnih impedancija i proračuna admitancija za  $\pi$  i T model različitih duljina voda. Na kraju su izračunata usporedba približnih i točnih vrijednosti za različite duljine voda te su rezultati prikazani i grafički.

The final work describes power lines, his basic components and types of line, principles and models that helps us to calculate transmission of equation. Calculation of the approximate and precise  $\pi$  and T substitutional model power line is detaily described like their correlated forms, comparison of approximate and precise values of longitudinal impedance and calculation of admittance for  $\pi$  and T modelof different length of cables. In the end of the final work are exposed and calculated approxision and precise values for different cabel lengths. The results are also presented graphic.

Nadomjesni modeli elektroenergetskih vodova - Equivalent models of overhead power lines

Konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova - Constant overhead power lines

Prijenosne jednadžbe elektroenergetskih vodova - Transfer equations power lines

Točan i približan  $\pi$  i T nadomjesnih elektroenergetskih vodova - Exact and approximate  $\pi$  and T equivalent overhead power lines