

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**ODREĐIVANJE UZDUŽNE IMPEDANCIJE NADZEMNOG
VODA**

Rijeka, srpanj 2016.

Dino Perhoč
0069059324

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**ODREĐIVANJE UZDUŽNE IMPEDANCIJE NADZEMNOG
VODA**

v.pred.mr. sc. Marijana Živić Đurović

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike

Br.: 602-04/16-14/31

Rijeka, 14.03.2016.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Dino Perhoč

Matični broj: : 0069059324

Lokalni matični broj: 12800030

Naziv zadatka: **ODREĐIVANJE UZDUŽNE IMPEDANCIJE NADZEMNOG VODA**

Title (*English*): **CALCULATING THE LONGITUDINAL IMPEDANCE OF
OVERHEAD POWER LINES**

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika

Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

Konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova. Djelatni otpor voda. Utjecaj skin efekta. Induktivitet voda. Određivanje induktiviteta homogenog cilindričnog vodiča. Induktivitet sustava od n paralelnih vodiča. Metoda srednjih geometrijskih udaljenosti. Preplet voda. Proračun induktiviteta s utjecajem zemlje. Matrica impedancije vodiča. Određivanje pogonske impedancije nadzemnog voda.

Mentor:



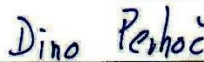
V. pred. mr. sc. Marijana Živić Đurović,
dipl.ing.

Predsjednica Povjerenstva:



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

Student:



Dino Perhoč

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

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. PRAVILNIKA o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Određivanje uzdužne impedancije nadzemnog voda“, prema zadatku br. 602-04/16-14/31, uz konzultacije s mentorom mr. sc. Marijanom Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, rujan 2016.

Dino Perhoč

0069059324

Dino Perhoč

Sadržaj

UVOD	1
KONSTANTE (PARAMETRI) NADZEMNIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA	2
Izvedene konstante (jedinичne) voda	3
DJELATNI OTPOR VODA	5
Skin-efekt.....	7
INDUKTIVITET VODA	10
Određivanje induktivitet homogenog cilindričnog vodiča	10
Induktivitet sustava od n paralelnih vodiča	14
METODA SREDNJIH GEOMETRIJSKIH UDALJENOSTI (METODA SGU).....	16
PREPLET	21
ODREĐIVANJE POGONSKE IMPEDANCIJE.....	26
MATRICA UZDUŽNIH IMPEDANCIJA	28
KONSTRUKCIJSKI PROJEKT (ODREĐIVANJE UZDUŽNE IMPEDANCIJE NADZEMNOG VODA).....	30
ZAKLJUČAK	41
LITERATURA.....	42
SAŽETAK.....	43

UVOD

Tijekom dosadašnjeg studija elektrotehnike, zainteresirao sam se područje nadzemnih vodova i odlučio sam upravo o toj temi pisati u svom završnom radu. Iz navedenog je razloga dublje proanalizirano to područje.

Cilj rada je odrediti uzdužnu impedanciju nadzemnog voda. U samom početku definiran je pojam konstante nadzemnih elektroenergetskih vodova te je objašnjeno o čemu su one ovisne. Nadalje, opisan je djelatni otpor voda, skin-efekt i njegova ovisnosti o frekvenciji izmjenične struje. Sve je popraćeno formulama i objašnjenjem istih.

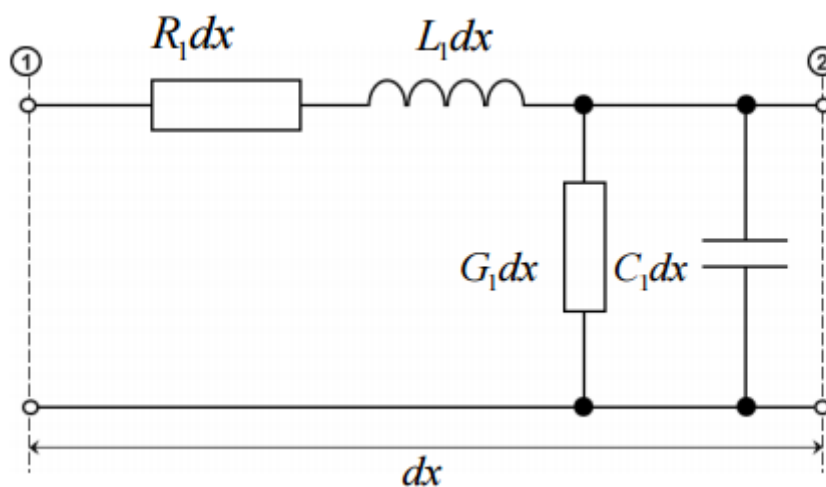
Budući da je rad povezan sa induktivitetom voda, objašnjeno je što je induktivitet, ali je i detaljnije dotaknuto područje induktiviteta sustava od n paralelnih vodiča i određivanja induktiviteta homogenog cilindričnog vodiča. U radu se govori i o metodi srednjih geometrijskih udaljenosti, prepletu, određivanju pogonske impedancije, matrici uzdužnih impedancija te je sve zaključeno konstrukcijskim projektom.

KONSTANTE (PARAMETRI) NADZEMNIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA

Konstante voda su osnovna električna svojstva nadzemnog voda kojima se opisuju sve električni prilike u svakom pogonskom stanju. Razlikujemo dvije vrste parametara voda: vremenski promjenjivi parametri i vremenski nepromjenjivi parametri (konstante) voda. U vremenski promjenjivi se ubrajaju: napon, struju i frekvenciju, a u vremenski nepromjenjive: djelatni otpor voda, induktivitet voda, kapacitet voda i odvod voda.

Konstante voda su ovisne: o svojstvima materijala od kojeg je vod izveden, o geometrijskim svojstvima voda i o okolnim prilikama. Definiraju se po jedinici duljine, najčešće po kilometru.

Kod trofaznih sustava konstante voda se zadaju po fazi, dakle za jedan fazni vodič, ali s time da se kao povratni dio uzme zamišljeni neutralni vodič. Realni elektroenergetski vod je vod sa svim vrijednostima konstante različiti od nule.



Slika 2.1. Položaj konstanti voda na dijelu (dx)

Gdje je:

R_1 jedinični djelatni otpor voda [Ω/km]

L_1 jedinični induktivitet voda [H/km]

G_1 jedinični odvod voda [S/km]

C_1 jedinični kapacitet voda [F/km]

U najviše slučajeva koriste se jednofazni modeli elemenata mreže. Na (slici 2.1) vidi se da u uzdužno granu pripadaju jedinični djelatni otpor R_1 i jedinični induktivitet voda L_1 , a u poprečnu granu odvod voda G_1 i jedinični kapacitet voda C_1 na udaljenosti dx . Na jako kratkom dijelu voda zanemaruje se pad napona kod prolaza struje, zbog čega možemo računati da je taj dio voda na istom potencijalu po cijeloj dužini. Također se može zanemariti odvajanje struje vodiča za dovoljno kratki dio voda.

Zbog prethodna dva svojstva postoji mogućnost da uzdužne konstante računamo kao da nema poprečnih i obratno. I uzdužne i poprečne konstante zajedno ulaze u račun kroz lanac četveropola.

2.1 Izvedene konstante (jedinične) voda

Simboličke konstante su ovisne o frekvenciji:

- Jedinična reaktancija (jedinični uzdužni induktivni otpor)

$$X_1 = \omega L_1 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (2.1)$$

- Jedinična susceptancija (jedinična poprečna kapacitivna vodljivost)

$$B_1 = \omega C_1 \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (2.2)$$

Uvrštavanjem konstanti u formulu dobivaju se kompleksne simboličke vrijednosti:

- Jedinična impedancija (jedinični uzdužni prividni otpor)

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (2.3)$$

- Jedinična admitancija (jedinična poprečna prividna vodljivost)

$$\bar{Y}_1 = G_1 + jB_1 \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (2.4)$$

Duljina l je važna kod konkretnog voda, izvedene karakteristične veličine su:

- Valna konstanta (konstanta prodiranja)

$$\gamma = \sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_1} \quad [\text{l/km}] \quad (2.5)$$

- Karakteristična impedancija

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Y}_1}} \quad [\Omega] \quad (2.6)$$

- Ako se duljina voda l pomnoži sa jediničnim konstantama voda dobiju se apsolutne konstante elektroenergetskog voda

$$R = R_1 * l \quad [\Omega] \quad \text{Rezistencija (djelatni otpor voda)} \quad (2.7)$$

$$X = X_1 * l \quad [\Omega] \quad \text{Reaktancija (induktivni otpor voda)} \quad (2.8)$$

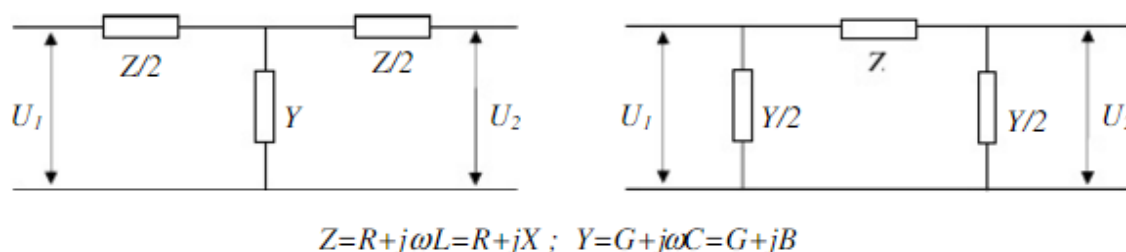
$$G = G_1 * l \quad [\text{S}] \quad \text{Konduktancija (djelatni odvod voda)} \quad (2.9)$$

$$B = B_1 * l \quad [\text{S}] \quad \text{Susceptancija (kapacitivna vodljivost voda)} \quad (2.10)$$

$$\bar{Z} = R + jX \quad [\Omega] \quad \text{Impedancija (prividni otpor voda)} \quad (2.11)$$

$$\bar{Y} = G + jB \quad [\text{S}] \quad \text{Admitancija (prividna vodljivost voda)} \quad (2.12)$$

Kod izračuna električnih mreža praktični pristup polazi od nadomještanja vodova prikladnim shemama (slika 2.2.) u kojima se pojavljuju gore navedeni parametri R , X , G , B . Navedeni parametri ne primjenjuju se uvijek na isti način. Za standardne izračune lokalnih mreža poznavati je dovoljno samo djelatni i induktivni otpor, a dok kod dalekovoda treba uračunati utjecaj kapacitivne i djelatne vodljivosti. [4]



Slika 2.2. Nadomjesne shema voda

DJELATNI OTPOR VODA

Djelatni otpor voda određen je padom napona ili gubitkom snage dok vodičem teče istosmjerna struja od 1A. Ovisi o presjeku, duljini i materijalu vodiča (vodljivosti κ ili specifičnom otporu ρ). [3]

$$R_0 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{\rho}{q} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (3.1)$$

Gdje je:

R_0 [Ω/m]- djelatni otpor voda kod istosmjerne struje

ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]- specifični otpor vodiča kod 20°C

q [m^2]- presjek vodiča

	ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$] pri 20°C	κ [$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$] pri 20°C
bakar	17,86	56
aluminij	28	35

Tablica 3.1. Specifični otpor i vodljivost bakra i aluminijsa

Vodljivost i specifični otpor ovise o tehnologiji izrade vodiča, ali se mijenjaju i s promjenom temperature u odnosu na mjernih 20°C, pa se kod novih temperatura ϑ specifični otpor treba korigirati po relaciji: [4]

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20} * [1 + \alpha * (\vartheta - 20)] \quad (3.2)$$

Gdje je:

α - temperaturni koeficijent

Temperaturni koeficijent približno je jednak za aluminij i bakar a iznosi oko 0,0037.

Do povećanja otpora dolazi kada vodom protječe izmjenična struja. Gubici nastaju prolazom struje vodiča i inducirane struja koje nastaju uslijed protjecanja struja susjednih vodiča. U vodljivim konstrukcijskim elementima (armature, plaševi kabela) također nastaju gubici. [1]

Pa relacija za djelatni otpor kada teče izmjenična struja glasi:

$$R_1 = k_R * R_0 \quad (3.3)$$

Gdje je:

k_R - koeficijent otpora, a izračunava se prema slijedećoj formuli:

$$k_R = k_s + k_b + k_k \quad (3.4)$$

Gdje je:

k_s – koeficijent skin-efekta

k_b - koeficijent blizinskog učinka

k_k - koeficijent konstrukcijskih elemenata

Navedeni koeficijenti su međusobno neovisni i njihovo ukupno djelovanje zato izračunavamo gore navedenom formulom. Iznosi navedenih koeficijenata su ovisni: o frekvenciji, materijalu, obliku voda i o obliku vodiča. Skin-efekt se može opisati kao pojava koja dolazi zbog nejednolike raspodjele struje po presjeku vodiča i ona se može zanemariti ako je vodič izveden od čelika. Analogno skin-efektu dolazi i efekt-blizine koji se pojavljuje ako imamo više paralelnih vodiča i opet se radi o nejednolikoj raspodjeli struje po presjeku vodiča, ali od polja proizvedenog od drugih vodiča, a kao krajnji rezultat efekta-blizine je mehanička sila između vodiča. [4] Efekt-blizine direktno je razmjernan promjeru vodiča, a indirektno razmaku između vodiča. Pri frekvencijama od 50Hz i normalnim razmacima vodiča zračnih vodova koeficijent k_R je zanemariv ($k_R=1$).

Kako se povećava temperatura tako se i povećava otpor voda, povećanje je linearno i u priručnicima je definiran djelatni otpor za određenu temperaturu. Za bakar i aluminij se uzima da se otpor povećava za 10%, ako se temperatura vodiča poveća za 25° C. [1]

$$\Theta_0 \dots \dots \dots R_0$$

$$\Theta_0 + 25^\circ \text{C} \dots \dots \dots 1,1 R_0$$

Također znatni utjecaj na djelatni otpor ima i izvedba vodiča tako da u proračune umjesto nazivnih presjeka treba uzimati stvarni, jer je nazivni presjek samo zaokružena vrijednost stvarnog. Vodiči koji su kombinirani s čelikom, čelik se obično ne uzima u proračun za vođenje struje. [1]

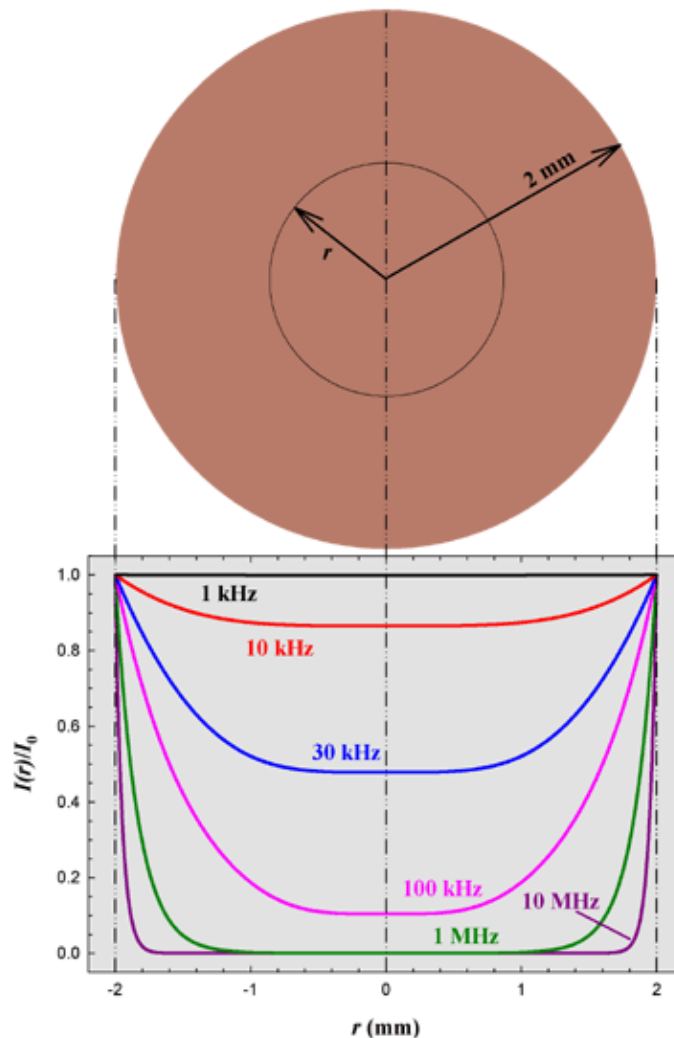
Npr. kod alučelika koji ima nazivni presjek $240/40\text{mm}^2$ uzima se stvarni presjek aluminijske žice 236mm^2 .

Utjecaj na veličinu otpora ima i dužina žice prema dužini užeta zbog lošijih vodljivih slojeva koji se zbog oksidacije stvore na površini žice, koji pojedine žice međusobno izolira. Kod užeta od alučela povećanje otpora nastaje uslijed toka struje oko čelične jezgre. Naime, u jezgri dolazi do gubitaka, a naročito kod užeta koje je izvedeno s jednim slojem aluminijske žice.

Preporučljivo je podatke pojedinih vodiča o otporu uzeti iz priručnika. [1]

Skin-efekt

Ranije je dana definicija da je skin-efekt nejednolika raspodjela struje po presjeku vodiča zbog čega dolazi do povećanja djelatnog otpora vodiča, a samim time se povećavaju i gubici. Dakle, gustoća struje u nekom homogenom vodiču jednaka je na svakom mjestu presjeka samo onda kada tim vodičem teče istosmjerna struja ili niskofrekventna izmjenična struja (vrijedi kod tanjih vodiča). [6] Ali s porastom frekvencije i debljine vodiča dolazi do potiskivanja struje prema površini vodiča. Zaključak je da je skin-efekt ovisan o frekvenciji izmjenične struje i to tako da povećanjem frekvencije struja u središtu vodiča postaje sve manja i manja, a na površini vodiča veća. Još ovisi o polumjeru vodiča, vodljivosti materijala od kojeg je vodič izrađen i o permeabilnosti vodiča i to tako da njihovim povećanjem dolazi do sve veće razlike u gustoći struje na površini i osi vodiča. Skin-efekt nastaje kao posljedica elektromagnetske indukcije. Uzima se da se gustoća struje eksponencijalno smanjuje tj. Jakost struje eksponencijalno pada što se više udaljavamo od ruba vodiča. [5] Na primjeru se vidi bakrena žica promjera 2mm i kružnog presjeka. (slika 3.1). Promatrajući sliku, vidljivo je u kakvom su odnosu vrijednost struje i udaljenost od ishodišta r .



Slika 3.1. Ovisnost vrijednosti struje $I_{(r)}/I_0$ o udaljenosti od ishodišta r [5]

Gdje je:

$I_{(r)}$ – gustoća struje na udaljenosti r od središta žice

I_0 - vrijednost struje bez skin-efekta (kad je frekvencija jako mala)

r - promjer u (mm)

Iz slike se vidi da kod frekvencije od 1 kHz presjekom vodiča struja teče ravnomjerno, a dok povećanjem frekvencije središnjim dijelom teče sve manja struja. Za 1 MHz središnjim dijelom žice i to na polumjeru od 1mm struja uopće ni ne teče, dok je kod 10 MHz tok struje ograničen na 0,2-0,3 mm uz sam rub žice.

Besselovom diferencijalnom jednačbom računa se gustoća struje za okrugli vodič:

$$\frac{d^2 J}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dJ}{dr} = j\omega\mu\rho J \quad I = J * ds \quad (3.5)$$

Gdje je:

J - gustoća struje

ω – kružna frekvencija

μ – permeabilnost

ρ – specifični otpor materijala

Besselovim krivuljama nultog reda dana je gustoća struje u okruglom vodiču:

$$J(r) = J_s \frac{J_0\left(\frac{\sqrt{-2j}r}{d}\right)}{J_0\left(\frac{\sqrt{-2j}R}{d}\right)} \quad d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (3.6)$$

Gdje je:

J_s – gustoća struje na površini vodiča

R – polumjer vodiča

d – dubina prodiranja

Integriranjem jednadžbe (3.6) dobije se struja koja teče kroz vodič:

$$I = - \frac{2\pi R d J_s}{\sqrt{-2j}} \frac{J_0'\left(\frac{\sqrt{-2j}R}{d}\right)}{J_0\left(\frac{\sqrt{-2j}R}{d}\right)} \quad (3.7)$$

Zbog skin-efekta, u konačnici se dobiva koeficijent povećanja otpora

$$R = R_e \left[\frac{1}{\sqrt{-2j\rho d\pi}} \frac{J_0\left(\frac{\sqrt{-2j}R}{d}\right)}{J_0'\left(\frac{\sqrt{-2j}R}{d}\right)} \right] \quad (3.8)$$

Kod masivnih vodiča skin-efekt je izražajni u odnosu na višežične, a ovisi o njihovim promjerima i broju žica. Ako imamo višežične vodiče i frekvenciju od 50 Hz skin-efekt iznosi 0,1% za 16mm², 0,5% za 150 mm², pa do skoro 2% za presjeke od 300 mm². [3]

INDUKTIVITET VODA

Svojstvo neke petlje da se opire svakoj promjeni struje naziva se induktivitet. Svaka promjena struje izaziva i promjenu obuhvatnog toka, koja u petlji inducira napon suprotnog smjera (predznaka). Mjerna jedinica za induktivitet je 1 henri (H). Induktivitet od 1 H ima ona petlja u kojem se inducira napon 1 V (volt), ako se struja jednoliko mijenja za 1 A (amper) u 1 s (sekundi). [1]

$$1H = 1 \frac{V}{A/s} = 1 \frac{Vs}{A} \quad (4.1)$$

Kako je frekvencija u stacionarnom pogonu nepromjenjiva, a induktivitet definiran omjerom ulančanog magnetskog toka i struje vodiča, jasno se može zaključiti da će razmak između vodiča znatno utjecati na veličinu induktivnog otpora. Zato će kod zračnih vodova sa većim razmakom između njih induktivni otpor imati više utjecaja na rad.[4] Također će induktivni otpori zračnih vodova biti puno veći od induktivnih otpora kabelskih vodova za jednaki napon i snagu.

Kod vodova za prijenos električne energije pretpostavlja se da je permeabilnost materijala konstantna, tj. jakost magnetskog polja i magnetska indukcija međusobno su proporcionalni.[1] Zbog toga se ukupni magnetski tok računa kao suma magnetskih tokova

μ je permeabilitet materijala u H/m. Permeabilitet vakuuma iznosi:

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} H/m$$

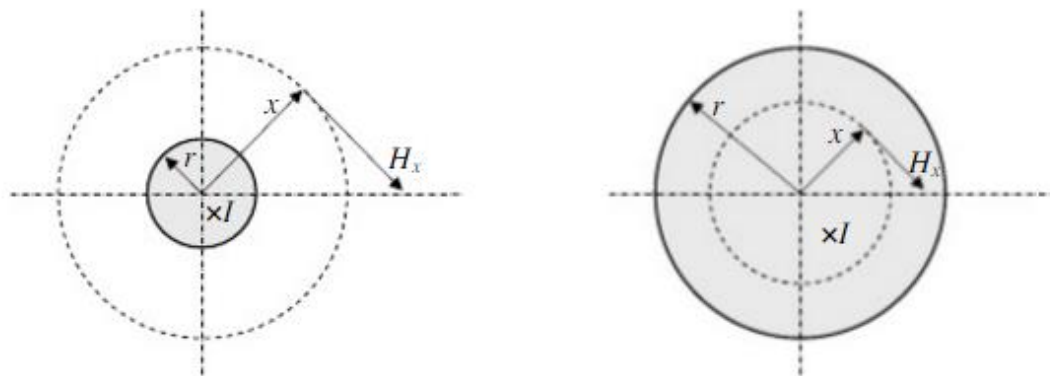
Isto vrijedi i za zrak.

4.1 Određivanje induktivitet homogenog cilindričnog vodiča

Ulančani tok homogenog cilindričnog vodiča se sastoji od: ulančanog toka unutar vodiča i ulančanog toka izvan vodiča. Proračun će se pojednostaviti ako pretpostavimo da je:

- Oko vodiča vakuum
- Vodič je od okrugle homogene žice
- Struja u vodiču jednako raspodjeljena
- Nema odvajanje struje

Na slici (4.1.) vidljiv je primjer vodiča kružnog presjeka sa jednako raspodijeljenom strujom po presjeku.



Slika 4.1. Magnetsko polje izvan (lijevo) i unutar vodiča (desno)[4]

Prvo se računa ulančani magnetski tok izvan vodiča, gdje na udaljenosti x od središta vodiča jakost polja iznosi:

$$\vec{H}_x = \frac{\vec{I}}{2\pi x} \quad (4.1)$$

Indukcija u toj isto točki iznosi:

$$\vec{B}_x = \mu \vec{H}_x = 4\pi * 10^{-7} \frac{\vec{I}}{2\pi x} = 2 * 10^{-7} \frac{\vec{I}}{x} \quad (4.2)$$

Magnetski tok koji prolazi kroz malu okolinu te točke iznosi:

$$d\vec{\Psi} = d\vec{\Phi} = \vec{B}_x * l * dx = 2 * 10^{-7} \vec{I} \frac{dx}{x} \quad (4.3)$$

Magnetski tok jednak je obuhvatnom toku jer obuhvaća cijelu struju \vec{I} . Ukupni obuhvatni tok za cijelo područje izvan vodiča po udaljenosti x iznosi:

$$\vec{\Psi}_v = \int_r^x d\vec{\Psi} = 2 * 10^{-7} \vec{I} \int_r^x \frac{dx}{x} = 2 * 10^{-7} \vec{I} \ln\left(\frac{x}{r}\right) \quad (4.4)$$

Sada slijedi računanje obuhvatnog toka unutar vodiča, uz jednake uvjete. Gustoća struje je konstantna. Iz čega slijedi omjer između ukupne i obuhvaćene struje.

$$\frac{\vec{I}_x}{\vec{I}} = \frac{x^2 \pi}{r^2 \pi} = \frac{x^2}{r^2} \quad (4.5)$$

$$\vec{I}_x = \vec{I} \frac{x^2}{r^2} \quad (4.6)$$

\vec{I}_x = struja kroz presjek polumjera x

Jakost magnetskog polja na odaljenosti x od središta vodiča sada iznosi:

$$\vec{H}_x = \frac{\vec{I}_x}{2\pi x} = \frac{\vec{I} * x}{2\pi r^2} \quad (4.7)$$

Pošto je $\mu = \mu_0 * \mu_r$, magnetska indukcija iznosi:

$$\vec{B}_x = 4\pi 10^{-7} \mu_r \frac{\vec{I}}{2\pi r^2} x = 2 * 10^{-7} \mu_r \frac{\vec{I}}{r^2} x \quad (4.8)$$

Magnetski tok koji prolazi kroz malu okolinu te točke iznosi:

$$d\vec{\Phi} = \vec{B}_x * l * dx = 2 * 10^{-7} \mu_r \frac{\vec{I}}{r^2} x dx \quad (4.9)$$

$d\vec{\Phi}$ obuhvaća samo dio struje, i to struju \vec{I}_x . Pa je zato obuhvatni tok struje \vec{I} iznosi:

$$d\vec{\Psi} = d\vec{\Phi} \frac{x^2}{r^2} \quad (4.10)$$

Ukupni obuhvatni magnetski tok unutar vodiča iznosi:

$$\vec{\Psi}_u = \int_0^r d\vec{\Psi} = 2 * 10^{-7} \mu_r \frac{\vec{I}}{r^4} \int_0^r x^3 dx = 2 * 10^{-7} \mu_r \frac{\vec{I}}{4} \quad (4.11)$$

Ukupni obuhvatni magnetski tok vodiča jednak je zbroju tokova izvan i unutar vodiča:

$$\vec{\Psi} = \vec{\Psi}_v + \vec{\Psi}_u = 2 * 10^{-7} \vec{I} \left(\ln \frac{x}{r} + \frac{\mu_r}{4} \right) \quad (4.12)$$

$\mu_r = 1$ (ne magnetski materijali):

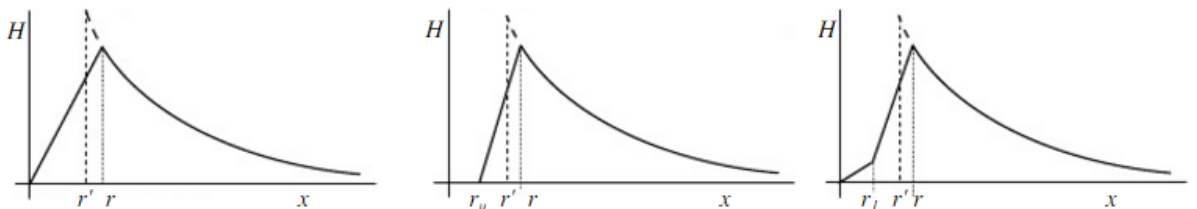
$$\bar{\Psi} = 2 * 10^{-7} \vec{I} \left(\ln \frac{x}{r} + \frac{1}{4} \right) =$$

$$2 * 10^{-7} \vec{I} \left(\ln \frac{x}{r} + \ln e^{\frac{1}{4}} \right) =$$

$$\bar{\Psi} = 2 * 10^{-7} \vec{I} \left(\ln x - \ln \left(r * e^{-\frac{1}{4}} \right) \right) = 2 * 10^{-7} \vec{I} * \ln \left(\frac{x}{r'} \right) \quad (4.13)$$

r' - reducirana polumjer

r' iznosi 0,7788 r i vidi se da je pomoću njega ukupni obuhvatni tok izražen jednako kao i vanjski (4.4), a isto je prikazano i na slici (4.2. lijevo). Na istoj slici u sredini je promjena polja u slučaju šupljeg vodiča, a desno je prikazano nehomogeno uže polumjera jezgre r_1 . [1]



Slika 4.2. Magnetska polja vodiča raznih presjeka

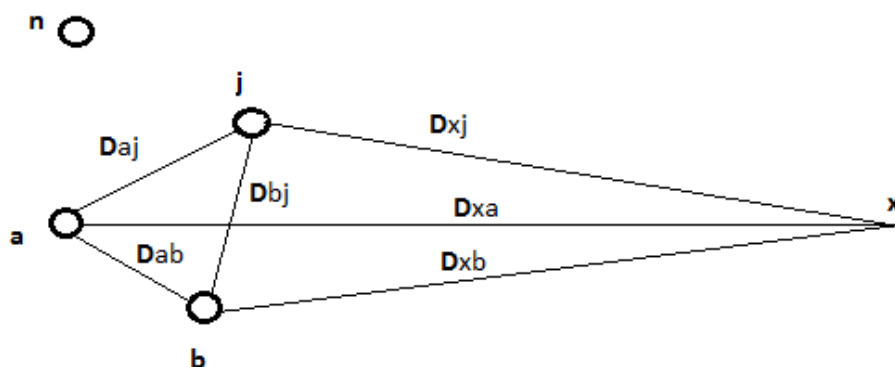
4.2. Induktivitet sustava od n paralelnih vodiča

Ako grupa od n vodiča pripada istom strujnom krugu u svakom trenutku vrijedi:

$$\sum_j I_j = 0, \quad j = a, b \dots n \quad (4.14)$$

Posljedice izraza (4.14) jesu da je magnetsko polje dovoljno daleko od tako definirane grupe vodiča jednako nuli. Ukupni ulančani tok jednog vodiča proizveden je strujama kroz sve vodiče, uključujući i promatrani vodič. Ako na određenoj udaljenosti smjestimo točku x (slika 4.3.) može se izračunati obuhvatni tok vodiča (a) uslijed struje u svim vodičima grupe tako da ih zbrojimo: [4]

$$\vec{\Psi} = 2 * 10^{-7} \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{D_{xj}}{D_{aj}} = 2 * 10^{-7} \left(\sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln D_{xj} + \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{aj}} \right) \quad (4.15)$$



Slika 4.3. Grupa vodiča istog strujnog kruga

Zbog dovoljno velike udaljenosti točke x u odnosu na međusobne udaljenosti vodiča, vrijedi:

$$D_{xa} = D_{xb} = \dots D_{xj} = \dots D_{xn} \quad (4.16)$$

Pa ulančani magnetski tok iznosi:

$$\vec{\Psi}_a = 2 * 10^{-7} \left(\ln D_{xj} \sum_{j=a}^n \vec{I}_j + \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{aj}} \right) \quad (4.17)$$

Prvi član u zagradi je zbog (4.14) jednak nuli, pa (4.17) prelazi u izraz:

$$\vec{\Psi}_a = 2 * 10^{-7} \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{aj}} \quad (4.18)$$

I analogno za ostale vodiče:

$$\vec{\Psi}_b = 2 * 10^{-7} \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{bj}} \quad (4.19)$$

.....

$$\vec{\Psi}_n = 2 * 10^{-7} \sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{nj}} \quad (4.20)$$

Dobije se sustav od n jednažbi s n nepoznanica. Jednažbe se mogu preglednije napisati u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \vec{\Psi}_a \\ \vec{\Psi}_b \\ \vec{\Psi}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{D_{aa}} & \ln \frac{1}{D_{ab}} & \dots \frac{1}{D_{an}} \\ \frac{1}{D_{ba}} & \frac{1}{D_{bb}} & \dots \frac{1}{D_{bn}} \\ \frac{1}{D_{na}} & \frac{1}{D_{nb}} & \dots \frac{1}{D_{nn}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \\ \vec{I}_n \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$D_{aa}, D_{bb}, \dots, D_{nn}$ jesu reducirani polumjeri vodiča a, b, ...n.. Matrica je simetrična jer je $D_{ab} = D_{ba}, D_{ac} = D_{ca} \dots$ itd. Jednažbu (4.21) možemo pisati i na ovaj način:

$$[\vec{\Psi}] = [L] * [\vec{I}] \quad (4.22)$$

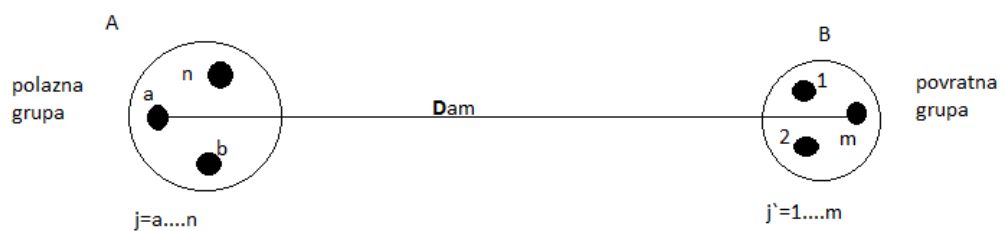
Matrica [L] je matrica parcijalnih induktiviteta. Dijagonalni članovi su vlastiti induktiviteti, a izvandijagonalni su međusobni induktiviteti. Daje nam vezu između ulančanog toka svakog pojedinog vodiča i struje kroz svaki vodič cijelog strujnog kruga. [1]

Fizikalno ispravno može se govoriti o induktivitetu zamke. Jednofazni prikaz sustava prisiljava nas da uvedemo pojam induktiviteta jedne faze, odnosno induktivitet jednog vodiča. Induktivitet jednog vodiča možemo izračunati kod voda od 2 vodiča i kod voda od 3 vodiča koji su smješteni u vrhovima jednakostraničnog trokuta i koji se tada zove pogonski induktivitet.

METODA SREDNJIH GEOMETRIJSKIH UDALJENOSTI (METODA SGU)

Uvjet $\sum \vec{I} = 0$ (zbroy svih struja vodiča jedna je nuli) omogućuje da sve vodiče voda, bez obzira koliko ih ima podijelimo na dvije grupe: grupu polaznih i grupu povratnih vodiča i tako se formira petlja. Primjenom ove metoda na tako definiranu petlju izračunava se induktivitet jedne grupe vodiča. Također se u okviru ove metoda može odrediti i reducirani polumjer vodiča raznih presjeka, užeta i vodiča u snopu. Ovom metodom može se također odrediti pogonski induktivitet trofaznih prepletenih vodova.[4]

Na slici 5.1. vodiči su podijeljeni u dvije grupe: grupa A od n vodiča i kojom teče ukupna struja $+\vec{I}$ i grupu B od m vodiča kojom teče ukupna struja $-\vec{I}$.



Slika 5.1. Podjela vodiča na grupu A i B

Za takve dvije grupe vrijede izrazi:

$$\sum_{j=a}^n \vec{I}_j = \vec{I} \quad ; \quad \sum_{j=1}^m \vec{I}_{j'} = -\vec{I} \quad (5.1a)$$

$$\vec{I}_j = \frac{\vec{I}}{n} \quad ; \quad \vec{I}_{j'} = -\frac{\vec{I}}{m} \quad (5.1b)$$

Izrazi 5.1a i 5.1b su polazni izrazi za metodu SGU. Izrazi 5.1b su samo proizvoljne pretpostavke. Rezultati postupaka ipak su ispravni, ako se pravilno primjenjuju na slučajeve gdje je to moguće (vodiči od istog materijala, istog presjeka, prepleteni...) [1]

Parametri konačnih formula su neke srednje vrijednosti, pa tako su i rezultati neke srednje vrijednosti. Ako se koristi metodu SGU da bi snop vodiča zamijenili jednim nadomjesnim vodičem reduciranog polumjera kojim teče zbroj struja prvobitne grupe, bez obzira kako je ta struja bila raspoređena na pojedine vodove, može se prihvatiti i pretpostavku navedena

u 5.1b. SGU daje i induktivitet nadomjesnog vodiča, ali ne i induktivitet svakog vodiča prvobitnog snopa posebno. Kod sređenih grupa od n vodiča može se u najboljem slučaju uzeti da je induktivitet jednog vodiča n-ti dio induktiviteta, dakle srednji induktivitet. Graška će biti neznatna ako su vodiči promatrane grupe u koncentriranom snopu dovoljno daleko od ostalih vodiča i ako su istog ili sličnog presjeka. Kod trofaznih vodova postupak SGU daje rezultate kao da je vod simetričan, bio on to stvarno ili ne. [1]

Izračunat će se obuhvatni tok grupe vodiča A (slika 5.1.). Za vodič (a) može se postaviti jednačba analogno (4.18). Kad imamo dvije grupe vodiča, uzima se utjecaj svake struje na vodič (a). Pa je njegov ulančani tok:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_a &= 2 * 10^{-7} \left(\sum_{j=a}^n \vec{I}_j \ln \frac{1}{D_{aj}} + \sum_{j'=1}^m \vec{I}_{j'} \ln \frac{1}{D_{aj'}} \right) = \\ &= 2 * 10^{-7} \left(\frac{\vec{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{aj}} - \frac{\vec{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{aj'}} \right)\end{aligned}\quad (5.2)$$

Za ostale vodiče iz grupe A slijedi:

$$\bar{\Psi}_b = 2 * 10^{-7} \left(\frac{\vec{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{bj}} - \frac{\vec{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{bj'}} \right)$$

..... (5.3)

$$\bar{\Psi}_n = 2 * 10^{-7} \left(\frac{\vec{I}}{n} \sum_{j=a}^n \ln \frac{1}{D_{nj}} - \frac{\vec{I}}{m} \sum_{j'=1}^m \ln \frac{1}{D_{nj'}} \right)$$

Ukupni ulančani tok sa svim vodičima grupe A iznosi:

$$\bar{\Psi}_A = \frac{1}{n} (\Psi_a + \Psi_b + \dots + \Psi_n) \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_A &= 2 * 10^{-7} * \left(\frac{\vec{I}}{n} \right) * \sum_{i=a}^n \left(\frac{1}{n} * \ln \frac{1}{\prod_{j=a}^n D_{ij}} - \frac{1}{m} * \ln \frac{1}{\prod_{j'=1}^m D_{ij'}} \right) = \\ &= 2 * 10^{-7} * \vec{I} \ln \frac{D_m}{D_s}\end{aligned}\quad (5.5)$$

Induktivitet grupe A iznosi:

$$L_A = \frac{\bar{\Psi}}{I} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (5.6)$$

Gdje je:

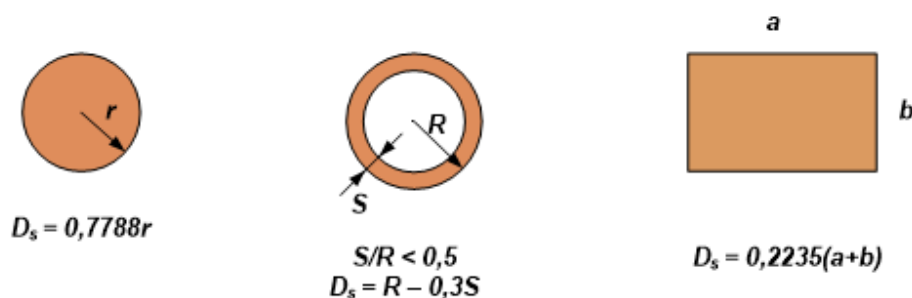
D_m – međusobni SGU (srednja geometrijska udaljenost vodiča od stalih vodiča)

D_s – reducirani vlastiti SGU (r')

Grupa A je grupa n paralelnih vodiča, pa je induktivitet jednog vodiča skupine A n -puta veći:

$$L_j = n * L_A = 2 * 10^{-7} * n * \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (5.7)$$

Neke vrijednosti za D_s prikazane su na slici 5.2.



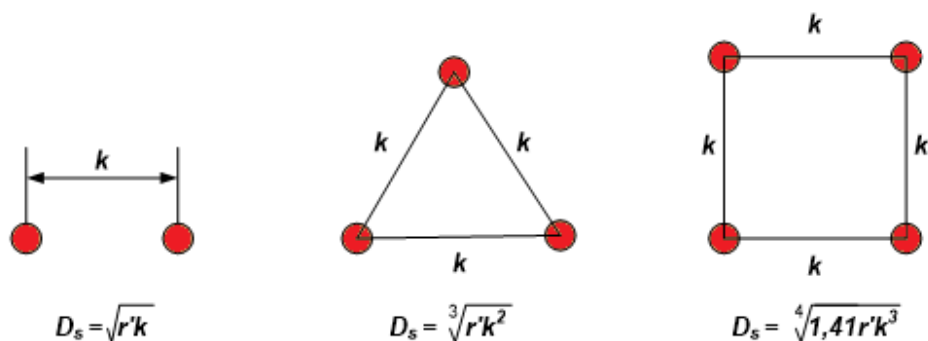
Slika 5.2. D_s raznih vodiča [2]

Za uže od n vanjskih žica i vanjskog promjera R reducirani vlastiti SGU iznosi:

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

Tablica 5.1. Reducirani vlastiti SGU za uže od n vanjskih žica

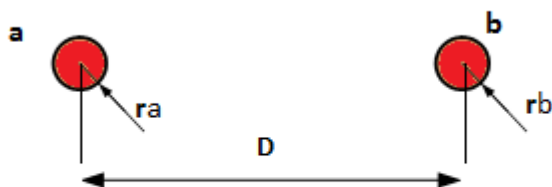
Vodiče snopa razmještene na međusobnoj udaljenosti k mogu se zamijeniti jednim vodičem. Reducirani vlastiti SGU za tipične snopove prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3. Reducirani vlastiti SGU snopa

Jedan jednostavan primjer bit će riješen bez metode SGU i sa metodom SGU:

Treba izračunati induktivitet voda od dva vodiča prema slici 5.4. (presjeci različiti).



Slika 5.4. Vod od dva vodiča

Račun bez metoda SGU teče ovako:

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

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

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

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

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

$$L_1 = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D^2}{r'_a r'_b}$$

Do istog rezultata dolazimo postupkom SGU:

$$m = 1 \quad Dm = D$$

$$n = 1 \quad Dsa = r'_a \quad Dsb = r'_b$$

$$L_a = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_a}$$

$$L_b = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D}{r'_b}$$

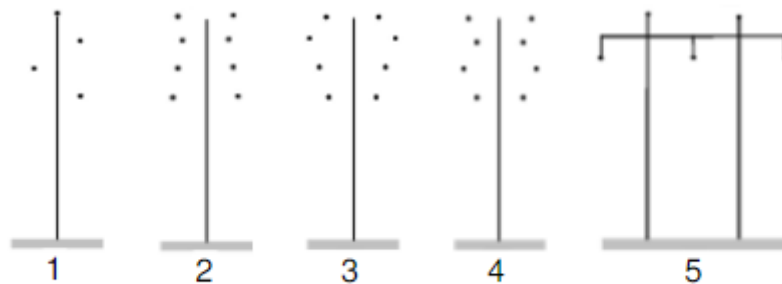
$$L_1 = L_{1a} + L_{1b} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D^2}{r'_a r'_b}$$

Iz primjera se vidi da je metodom SGU rješavanje problema znatno brže i jednostavnije.

To posebno dolazi do izražaja kod zahtjevnijih i težih primjera.

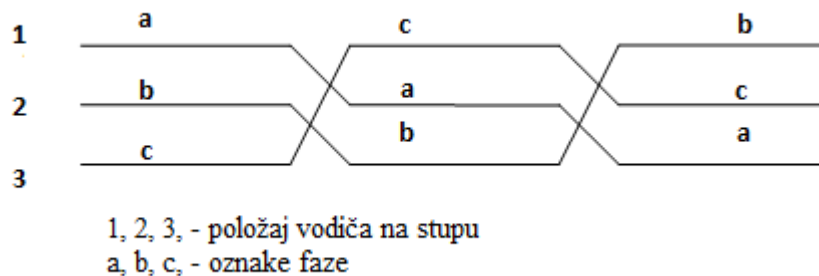
PREPLET

Ako su osi triju vodiča trofaznog voda smještene u vrhovima istostraničnog trokuta (slika 6.1. primjer 1), kažemo da je vod simetričan, te će sva tri vodiča, ako im je presjek isti, imati isti induktivitet.[1] Međutim, konstrukcijom vodova se ta simetrija rijetko postiže. Sa slike je vidljivo da na ostalim primjerima položaji vodiča nisu jednaki, pa tako ni induktiviteti i ulančani tokovi.



Slika 6.1. Primjeri rasporeda vodiča u zračnom vodu [4]

Različiti padovi napona u pojedinim fazama dovode u pogonu do izobličenja zvijezde napona i do pogonskih poteškoća, kod duljih vodova to posebno dolazi do izražaja. [4] Zbog toga se konstrukcijski osigurava električna simetrija vodova (induktiviteti faza se ujednačavaju), koji su geometrijski nesimetrični, cikličkom zamjenom položaja vodiča na stupu, odnosno tzv. Preplitanjem (slika 6.2.)



Slika 6.2. Preplet voda

Vod se podijeli na 3 dijela po dužini i da bi svaki vodič bio na svim mogućim položajima potrebna su dva preplitanja.

$$L_{a1} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{13}}}{r'} \quad (6.1)$$

$$L_{a2} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'} \quad (6.2)$$

$$L_{a3} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{D_{13}D_{23}}}{r'} \quad (6.3)$$

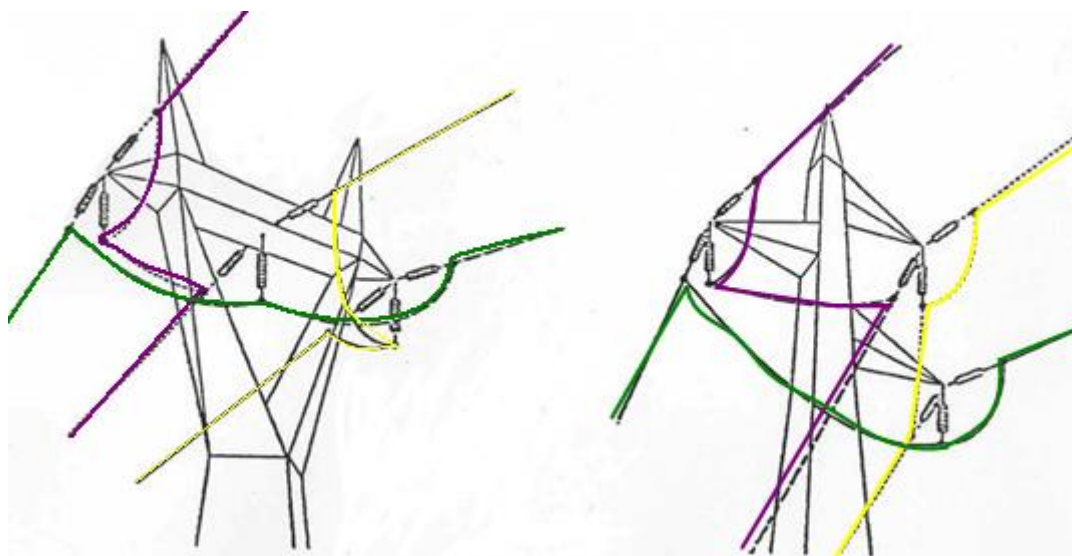
$$L_a = \frac{1}{3} (L_{a1}L_{a2}L_{a3}) = L_b = L_c \quad (6.4)$$

$$L_a = \frac{1}{3} * 2 * 10^{-7} \left(\ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{13}}}{r'} + \ln \frac{\sqrt{D_{12}D_{23}}}{r'} + \ln \frac{\sqrt{D_{13}D_{23}}}{r'} \right) \quad (6.5)$$

$$L_a = \frac{1}{3} * 2 * 10^{-7} * \ln \frac{\sqrt{D_{12}^2 D_{13}^2 D_{23}^2}}{(r')^3} = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}}{r'} \quad (6.6)$$

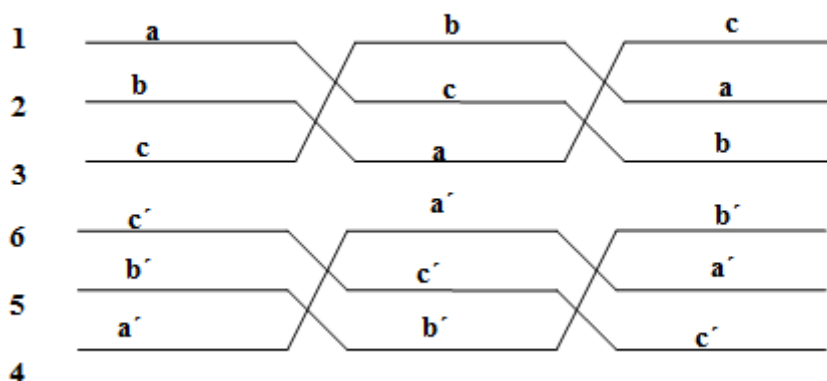
Međusobni SGU za trofazni prepleteni vod iznosi:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} \quad (6.7)$$

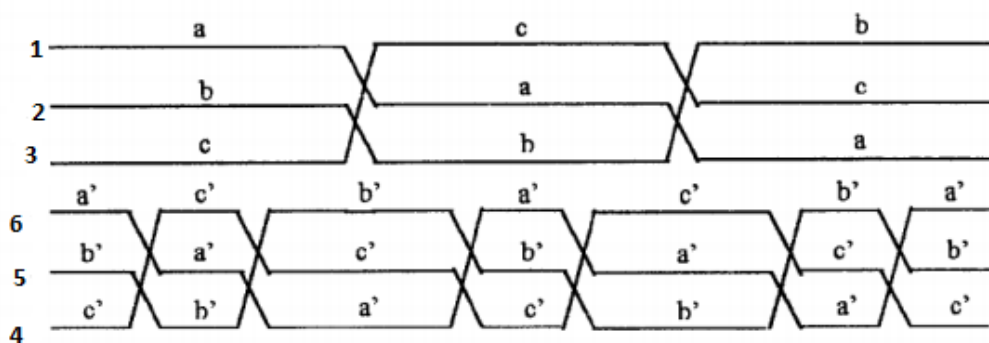


Slika 6.3. Preplitanje kod nekih jednostavnih vodova [1]

Kod dvostrukih vodova razlikuju se djelomični (slika 6.4) i potpuni preplet (slika 6.5). Preplitanje dvostrukog voda je nešto složenije, ali se ispunjavaju jednaki zahtjevi. [1]

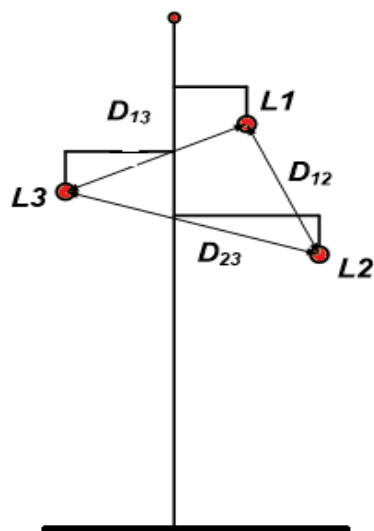


Slika 6.4. Djelomični preplet dvostrukog voda



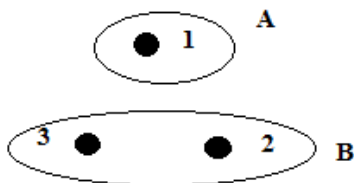
Slika 6.5. Potpuni preplet dvostrukog voda

Na jednom jednostavnom primjeru vidi se kakav utjecaj ima preplitanje voda i kakav to utjecaj ima na induktivitet. Dakle, potrebno je izračunati pogonski induktivitet trofaznog voda sa rasporedom vodiča prema slici 6.6 za slučaj prepletenog i ne prepletenog voda. Međusobne udaljenosti vodiča $D_{12}= 2,4$ m, $D_{13}= 4,2$ m, $D_{23}= 5,1$ m. Vodiči su izrađeni u obliku užeta od 19 žica, vanjskog polumjera $R= 72,6$ mm.



Slika 6.6. Raspored vodiča za rješavanje primjera

a) Prvo se računa za ne prepleteni vod:



1) Slučaj:

A) $n=1$

B) $m=2$

$$D_m = \sqrt{D_{13} * D_{12}} = \sqrt{4,2 * 2,4} = 3,175 \text{ m}$$

Reducirani vlastiti SGU odredit će se prema podacima iz tablice 5.1:

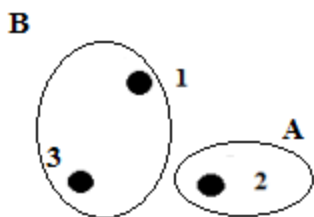
$$D_s = 0,758R = 0,758 * 0,0726 = 55,03 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_{L1} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 0,811 \text{ mH/km}$$

2) Slučaj:

$$L_{L2} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{2,4 * 5,1}}{0,758R} =$$

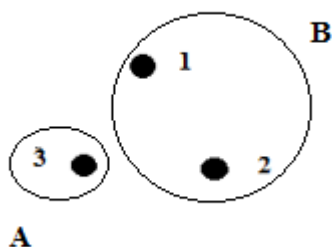
$$= L_{L2} = 0,83 \text{ mH/km}$$



3) Slučaj:

$$L_{L3} = 2 * 10^{-7} \ln \frac{\sqrt{4,2 * 5,1}}{0,758R} =$$

$$0,8864 \text{ mH/km}$$



Srednja vrijednost induktiviteta vodiča iznosi:

$$L_{SR} = \frac{L_{L1} + L_{L2} + L_{L3}}{3} = 0,84246 \text{ mH/km}$$

b) Prepleteni vod:

$$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} * D_{13} * D_{23}}}{0,758 * R} =$$

$$= L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = 0,84262537 \text{ mH/km}$$

Rezultati su približno identični, što znači da se u slučaju ne prepletenog voda računalo kao da je vod prepleten. Ove grube ne točnosti toleriraju se često u analizama mreže u kojoj ima kratkih ne prepletenih vodova.

ODREĐIVANJE POGONSKE IMPEDANCIJE

Za određivanje pogonske impedancije pretpostavi se da su svi vodovi u mreži simetrični, te da je mreža simetrično opterećena, a isto tako da kroz vodove teče simetrična struja. Što znači da struja teče kroz vodiče faza i da kroz dozemnu užad i zemlju nema protoka struje. [1] Zbog tih pretpostavki proračun proveden jednadžbama nadomjesnih faznih vodiča ili jednadžbama vodiča mora dati isti rezultat.

Sustav jednadžbi glasi:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \vec{V}^{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Z}^1 & \vec{Z}^2 \\ \vec{Z}^3 & \vec{Z}^4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \vec{I}^{abc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Što daje:

$$\frac{d}{dx} [\vec{V}^{abc}] = [\vec{Z}^1] * [\vec{I}^{abc}] \quad (7.2)$$

A sustav jednadžbi nadomjesnih faznih vodiča iznosi:

$$\frac{d}{dx} [\vec{V}^{abc}] = [\vec{Z}^{abc}] * [\vec{I}^{abc}] \quad (7.3)$$

Zbog simetričnog voda računa se prosječnim međusobnim impedancijama. Matrica $[\vec{Z}^{abc}]$ iz jednadžbe (7.3) i matrica $[\vec{Z}^1]$ iz jednadžbe (7.2) nisu jednake, ali za ovaj posebni pogonski slučaj moraju dati iste rezultate: [1]

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ a^2 \vec{V}_a \\ a \vec{V}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_s^v & \vec{Z}_m^v & \vec{Z}_m^v \\ \vec{Z}_m^v & \vec{Z}_s^v & \vec{Z}_m^v \\ \vec{Z}_m^v & \vec{Z}_m^v & \vec{Z}_s^v \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ a^2 \vec{I}_a \\ a \vec{I}_a \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

$$\frac{d}{dx} \vec{V}_a = \vec{Z}_s^v \vec{I}_a + a^2 \vec{Z}_m^v \vec{I}_a + a \vec{Z}_m^v \vec{I}_a = (\vec{Z}_s^v - \vec{Z}_m^v) \vec{I}_a \quad (7.5)$$

A jednađba (7.3):

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ a^2 \vec{V}_a \\ a \vec{V}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_s^e & \vec{Z}_m^e & \vec{Z}_m^e \\ \vec{Z}_m^e & \vec{Z}_s^e & \vec{Z}_m^e \\ \vec{Z}_m^e & \vec{Z}_m^e & \vec{Z}_s^e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \vec{I}_a \\ a^2 \vec{I}_a \\ a \vec{I}_a \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

$$\frac{d}{dx} \vec{V}_a = \vec{Z}_s^e \vec{I}_a + a^2 \vec{Z}_m^e \vec{I}_a + a \vec{Z}_m^e \vec{I}_a = (\vec{Z}_s^e - \vec{Z}_m^e) - \vec{I}_a \quad (7.7)$$

Gdje je:

\vec{Z}_s^v, \vec{Z}_m^v – vlastita i međusobna impedancija vodiča

\vec{Z}_s^e, \vec{Z}_m^e – vlastita i međusobna impedancija ekvivalentnih faznih vodiča.

Iz jednakosti struja i napona u jednađbama (7.5) i (7.7) proizlazi jednakost:

$$(\vec{Z}_s^v - \vec{Z}_m^v) = (\vec{Z}_s^e - \vec{Z}_m^e) = \vec{Z}_1 \quad (7.8)$$

\vec{Z}_1 je pogonska impedancija i analogno tome pogonski induktivitet.

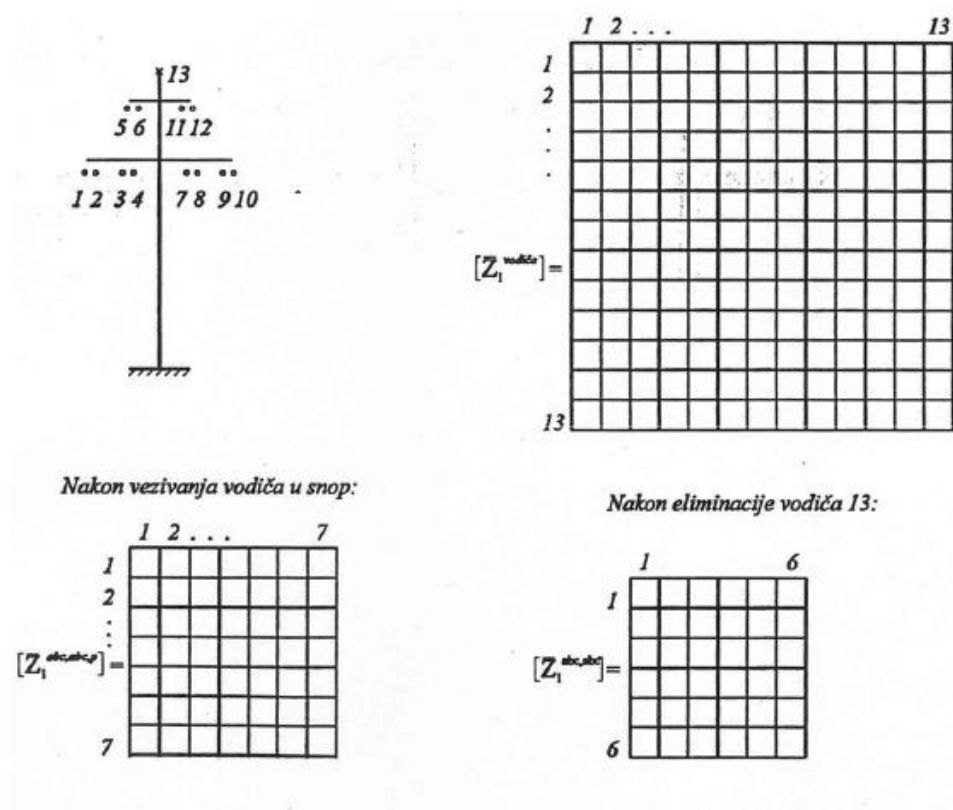
MATRICA UZDUŽNIH IMPEDANCIJA

Kao rezultat proračuna parametara prijenosnog voda dobije se matrica reda broja faznih vodiča. Matrica predstavlja matricu uzdužnih impedancija. Matrica ima onoliko redaka i stupaca koliko vod ima vodiča (dozemna užad, vodiči u snopu), pa je računanje s ovakvim matricama nemoguće. Zato je potrebno da se iz matrice izračuna matrica nadomjesnih faznih vodiča. Transformacijom matrice reducira se broj vodiča. Transformacijom se eliminiraju dozemna užad, a zatim vodiči u snopu. Nakon transformacije ostaju matrice reda broja faznih vodiča. Dosta često se dobivena matrice provode u sustav simetričnih komponenti.

Matrica elektroenergetskog voda sa tri fazna vodiča (a, b, c) i dva zaštitna užeta (q, p) bi izgledala ovako: [3]

$$\vec{Z}_1^{vod} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_{aa} & \vec{Z}_{ab} & \vec{Z}_{ac} & \vec{Z}_{aq} & \vec{Z}_{ap} \\ \vec{Z}_{ba} & \vec{Z}_{bb} & \vec{Z}_{bc} & \vec{Z}_{bq} & \vec{Z}_{bp} \\ \vec{Z}_{ca} & \vec{Z}_{cb} & \vec{Z}_{cc} & \vec{Z}_{cq} & \vec{Z}_{cp} \\ \vec{Z}_{qa} & \vec{Z}_{qb} & \vec{Z}_{qc} & \vec{Z}_{qq} & \vec{Z}_{qp} \\ \vec{Z}_{pa} & \vec{Z}_{pb} & \vec{Z}_{pc} & \vec{Z}_{pq} & \vec{Z}_{pp} \end{bmatrix}$$

Na slici 8.1 prikazan je proces transformacije matrice:



Slika 8.1. Transformacija matrice dvostrukog reda [1]

KONSTRUKCIJSKI PROJEKT (ODREĐIVANJE UZDUŽNE IMPEDANCIJE NADZEMNOG VODA)

Potrebno je odrediti jedinične uzdužne impedancije u D, I i 0 (simetrične komponente) sustavu za 220 kV dalekovod čija je geometrija glave stupa zadana slikom 9.1. Potrebno je odrediti i osnovne jedinične konstante u D, I i 0 sustavu.

Zadano je:

Frekvencija mreže: **50 Hz**

Materijal vodiča: **Alučel**

Presjek vodiča: **360/60**

Broj vodiča u snopu: **2**

Razmak vodiča u snopu: **300 mm**

Provjes vodiča: **17 m**

Broj trojki na istom stupu: **1**

Izolatorski lanac: **12xK170/280**

Materijal zaštitnog užeta: **Alučel**

Presjek zaštitnog užeta: **70/12**

Broj zaštitnih užeta: **1**

Provjes zaštitnog užeta: **13,5 m**

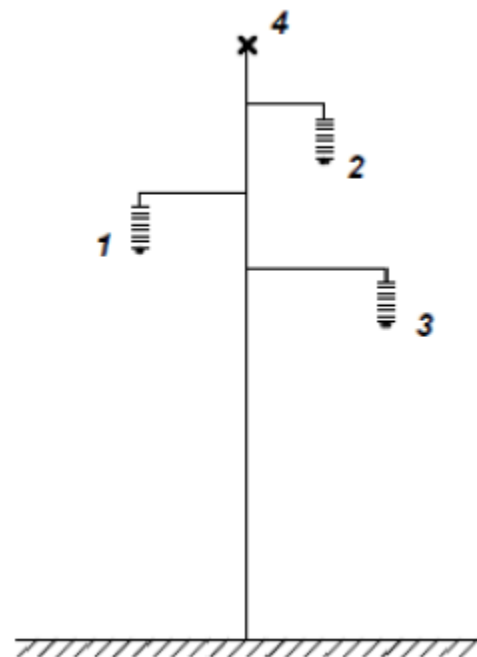
Specifični otpor tla: **200 Ω m**

Koordinate ovjesišta: **faza 1 (7;33,5)**

faza 2 (5;35)

faza 3 (9;31)

zaštitno uže 4 (0;37)



Slika 9.1. Geometrija glave stupa

PRORAČUN:

Iz tablice s podacima o izvedbi faznih vodiča, za jedan vodič izvade se sljedeći podaci:

- Vanjski promjer vodiča: $d_s = 26,6 \text{ mm}$
- Stvarni presjek vodiča (bez čelične jezgre) $A_{Al} = 360,215 \text{ mm}^2$
- Polumjer vodiča (pola promjera) $r_1 = 13,3 \text{ mm}$

Polumjer čelične jezgre računa se iz broja čeličnih žica i njihovog promjera, poznajući pravilo da se u svakom slijedećem sloju homogenog užeta broj žica poveća za šest.

$$r_2 = 0,98 + 1,96 + 1,96 = 4,9 \text{ mm}$$

Iz zadanih podataka za zaštitno uže iz tablice se određuju sljedeće vrijednosti:

- vanjski polumjer zaštitnog vodiča $r_g = 5,86 \text{ mm}$
- stvarni presjek zaštitnog vodiča $A_{AlČl} = 81,289 \text{ mm}^2$,

Otpor voda:

Za prosječnu pogonsku temperaturu 20°C računa se otpor voda te će se iz tablice očitati otpor voda R_0 za istosmjernu struju:

$$R_0 = 0,08020 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Otpor zaštitnog užeta R_g :

$$R_g = 0,413 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Djelatni otpor faznog voda kod protjecanja izmjenične struje izračunat će se prema sljedećoj relaciji (u obzir je uzeto i povećanje otpora uslijed skin-efekta):

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 + \frac{\pi^2}{3} * 10^{-8} * \frac{f^2}{R_0} - \frac{4\pi^4}{45} * 10^{-16} * \frac{f^4}{R_0^3} = \\ &= 0,8020 + \frac{\pi^3}{3} * 10^{-8} * \frac{50^2}{0,08020} - \frac{4\pi^4}{45} * 10^{-16} * \frac{50^4}{0,08020^3} = 0,08123 \text{ } \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Djelatni otpor zaštitnog voda kod protjecanja izmjenične iznosi:

$$R_{1g} = R_g + \frac{\pi^2}{3} * 10^{-8} * \frac{f^2}{R_g} - \frac{4\pi^4}{45} * 10^{-16} * \frac{f^4}{R_g^3} =$$

$$= 0,413 + \frac{\pi^3}{3} * 10^{-8} * \frac{50^2}{0,413} - \frac{4\pi^4}{45} * 10^{-16} * \frac{50^4}{0,413^3} = 0,4132 \Omega/km$$

Izračunali smo djelatne otpore za jedan vodič. Ako se faza jedne trojke sastoji od više vodiča koji su vezani u snop, onda treba izračunati djelatni otpor po fazi za čitav vod dijeljenjem otpora s brojem vodiča u snopu (2 vodiča u snopu):

$$R_{1f} = \frac{R_1}{2} = 0,40615 \Omega/km$$

U daljnjim proračunima uzima se u obzir i utjecaj zemlje, također je važna i visina vodiča iznad tla. Pri tome se računa s nekom prosječnom visinom, prema izrazu koji približno vrijedi za lančanicu, koju se dobije ako od visine ovjesišta na stupu odbijemo 7/10 najvećeg provjesa vodiča:

$$h = H - 0,7f_{max}$$

U obzir treba uzeti i duljinu izolatora i nosača vodova. U zadatku je zadan tip izolatora:

12 K 170/280

Poznajući dimenzije jednog članka lako se može odrediti duljina izolatora, za izolator tipa K170/280, 0,17 m iznosi visina jednog članka, pa se na taj način izračunava prosječna visina vodiča jedne trojke.

$$h = y - (0,7 * f_{max} + 12 * 0,17 + 0,3)$$

$$h_1 = 33,5 - (0,7 * 17 + 12 * 0,17 + 0,3) = 19,26 m$$

$$h_2 = 35 - (0,7 * 17 + 12 * 0,17 + 0,3) = 20,76 m$$

$$h_3 = 31 - (0,7 * 17 + 12 * 0,17 + 0,3) = 16,76 m$$

Nosač voda iznosi: 0,3 m.

Prosječna visina zaštitnog užeta iznosi (izostavljamo duljinu izolatora):

$$h_4 = y_4 - (0,7 * f_{gmax} + 0,3)$$

$$h_4 = 37 - (0,7 * 13,5 + 0,3) = 27,25 \text{ m}$$

Na osnovu podataka rasporeda i prosječnih visina vodiča odredit će se koordinate zrcalnih slika vodiča i zaštitnih užeta u zemlji:

za vodič 1' : $x = -7 \text{ m}$ $y = -19,26 \text{ m}$

za vodič 2' : $x = 5 \text{ m}$ $y = -20,76 \text{ m}$

za vodič 3' : $x = 9 \text{ m}$ $y = -16,76 \text{ m}$

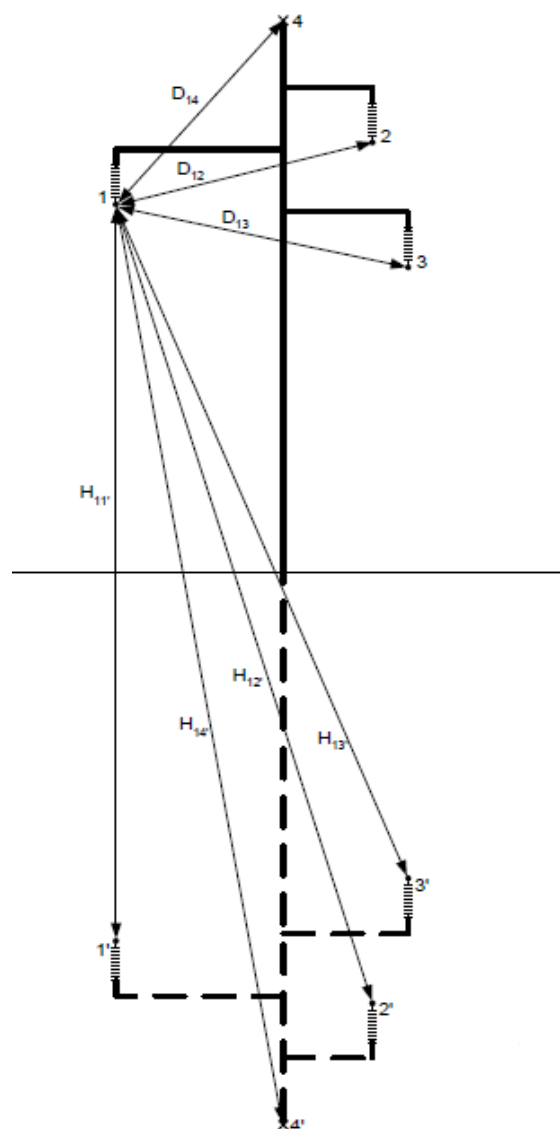
zaštitno uže 4' : $x = 0 \text{ m}$ $y = -27,25 \text{ m}$

Međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnih užeta potrebne za proračun induktiviteta odnosno impedancije računaju se prema Pitagorinom teoremu:

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

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

$$i, j = 1, 2, 3, 4, \dots$$



Slika 9.2. Međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnog užeta

Međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnog užeta u proračunu induktiviteta (vodiči 1, 2 i 3 i zaštitno uže 4):

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 12,093 & 16,194 & 10,623 \\ 12,093 & 0 & 5,657 & 8,193 \\ 16,194 & 5,657 & 0 & 13,822 \\ 10,623 & 8,193 & 13,822 & 0 \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

Međusobne udaljenosti vodiča i zaštitnog užeta prema njihovim zrcalnim slikama (vodiči 1, 2 i 3 pa zaštitno uže 4):

$$H = \begin{bmatrix} 38,52 & 41,78 & 39,41 & 47,03 \\ 41,78 & 41,52 & 37,73 & 48,27 \\ 39,41 & 37,73 & 33,52 & 44,92 \\ 47,03 & 48,27 & 44,92 & 54,5 \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

Matrica uzdužnih impedancija:

Veza između napona i struja u trofaznim sustavima je definirana Ohmovim zakonom u matičnom obliku:

$$[\vec{V}^{vodica}] = [\vec{Z}^{vodica}] * [\vec{I}^{vodica}]$$

Gdje je:

$[\vec{V}^{vodica}]$ – vektor padova napona vodiča

$[\vec{Z}^{vodica}]$ – matrica uzdužnih impedancija vodiča

$[\vec{I}^{vodica}]$ – vektor struje vodiča

Dijagonalni članovi matrice impedancija $\vec{Z}_{ii} = R_{ii} + j\omega L_{ii}$ predstavljaju vlastite impedancije petlji koje tvore vodič, odnosno zaštitno uže i povratna staza kroz zemlju, a vandijagonalni članovi $\vec{Z}_{ij} = R_{ij} + j\omega L_{ij}$ predstavljaju uzdužne međuimpedancije između petlji "i"-ti vodič – zemlja i "j"-ti vodič i zemlja.

Pojedini članovi matrice uzdužnih impedancija se određuju iz sljedećih jednažbi:

$$\vec{Z}_{ii_z} = R_1 + 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93,1\sqrt{\rho}}{D_s} \quad - \text{ za vodiče}$$

$$\vec{Z}_{ii_z} = R_g + 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93,1\sqrt{\rho}}{D_g} \quad - \text{ za zaštitna užad}$$

$$\vec{Z}_{ij_z} = 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93,1\sqrt{\rho}}{D_{ij}} \quad - \text{ za vodiče i zaštitnu užad}$$

Matrica uzdužnih impedancija je reda n+m, gdje su: n – broj vodiča (ne računajući posebno vodiče u snopovima), m – ukupni broj zaštitnih užeta

Metoda SGU:

Za vodič:

- vanjski radijus: $r_1 = 13,3 \text{ mm}$
- -unutarnji radijus: $r_2 = 4,9 \text{ mm}$
- $\frac{r_2}{r_1} = 0,3684$
- iz tablice izvadimo k:

$$k = (0,3684 - 0,36) * \frac{0,8227 - 0,8210}{0,37 - 0,36} + 0,8210$$

$$k = \frac{d_s}{r_1} = 0,8224$$

- $d_s = k * r_1 = 10,938 \text{ mm}$

Za zaštitno uže:

- Vanjski radijus: $r_1 = 5,86 \text{ mm}$
- Unutarnji radijus: $r_2 = \frac{3}{2} * 1,44 = 2,16 \text{ mm}$
- $\frac{r_2}{r_1} = 0,3686$
- Iz tablice izvadimo k:

$$k = (0,3686 - 0,36) * \frac{0,8227 - 0,8210}{0,37 - 0,36} + 0,8210$$

$$k = \frac{d_s}{r_1} = 0,82246$$

- $d_s = k * r_1 = 4,82 \text{ mm}$

Redukcija vodiča u snopu:

Određivanje matrice impedancije kod vodova s vodičima u snopu je najjednostavnije odrediti SGU metodom. Kako se radi o vodičima na maloj međusobnoj udaljenosti, obično se snop zamijeni jednim vodičem odgovarajućeg srednjeg geometrijskog radijusa. Pogreška je zanemariva. Znači potrebno je izračunati vlastitu SGU vodiča. Vodiče snopa razmještene na međusobnoj udaljenosti možemo zamijeniti jednim vodičem.

U našem proračunu imamo 2 vodiča u snopu pa se vlastiti SGU vodiča (reducirani radijus snopa vodiča) računa po izrazu:

$$D_s = \sqrt{d_s * D_{snop}} = \sqrt{10,938 * 300} = 57,284$$

Sada imamo sve potrebne parametre za izračunavanje matrice uzdužnih impedancija $[\vec{Z}^{vodiča}]$:

$$[\vec{Z}^{vodiča}] = \begin{bmatrix} 0,0906 + 0,6307i & 0,0500 + 0,2945i & 0,0500 + 0,2762i & 0,0500 + 0,3027i \\ 0,0500 + 0,2945i & 0,0906 + 0,6307i & 0,0500 + 0,3423i & 0,0500 + 0,3190i \\ 0,0500 + 0,2762i & 0,0500 + 0,3423i & 0,0906 + 0,6307i & 0,0500 + 0,2862i \\ 0,0500 + 0,3027i & 0,0500 + 0,3190i & 0,0500 + 0,2862i & 0,4632 + 0,7861i \end{bmatrix}$$

Redukcija zaštitnih užeta:

Potrebno je iz matrice faznih vodiča eliminirati zaštitnu užad, da se dobije matrica ekvivalentnih faznih vodiča.

Konačno se matrica, koja uzima u obzir osim zemlje još i dozemnu užad, dobiva pomoću sljedećeg izraza i ima onoliko redaka i stupaca, koliko je faznih vodiča:

$$[\vec{Z}^e] = [\vec{Z}^1] - [\vec{Z}^2] * [\vec{Z}^4]^{-1} * [\vec{Z}^3]$$

Matrica $[\vec{Z}^1]$ (obuhvaća samo fazne vodiče):

$$[\vec{Z}^1] = \begin{bmatrix} 0,0906 + 0,6307i & 0,0500 + 0,2945i & 0,0500 + 0,2762i \\ 0,0500 + 0,2945i & 0,0906 + 0,6307i & 0,0500 + 0,3423i \\ 0,0500 + 0,2762i & 0,0500 + 0,3423i & 0,0906 + 0,6307i \end{bmatrix}$$

Matrica $[\vec{Z}^2]$ (obuhvaća utjecaj zaštitnog užeta na fazne vodiče)

$$[\vec{Z}^2] = \begin{bmatrix} 0,0500 + 0,3027i \\ 0,0500 + 0,3190i \\ 0,0500 + 0,2862i \end{bmatrix}$$

Matrica $[\vec{Z}^3]$ (obuhvaća utjecaj zaštitnog užeta na fazne vodiče)

$$[\vec{Z}^3] = [0,0500 + 0,3027i \quad 0,0500 + 0,3190i \quad 0,0500 + 0,2862i]$$

Matrica $[\vec{Z}^4]$ (obuhvaća samo zaštitno uže)

$$[\vec{Z}^4] = [0,4632 + 0,7861i]$$

Matrica ekvivalentnih faznih vodiča izgleda ovako:

$$[\vec{Z}^e] = \begin{bmatrix} 0,116 + 0,5297i & 0,0730 + 0,1884i & 0,0690 + 0,1804i \\ 0,0730 + 0,1884i & 0,1157 + 0,5192i & 0,0708 + 0,2416i \\ 0,0690 + 0,1804i & 0,0708 + 0,2416i & 0,1078 + 0,5398i \end{bmatrix}$$

Primjena simetričnih komponenti

Matrica simetričnih komponenata izlazi iz matrice ekvivalentnih faznih vodiča primjenom linearnih transformacija.. Za prepleteni vod treba matricu ekvivalentnih faznih vodiča simetrirati. Matrica se simetrira na taj način da se uzme srednja vrijednost vandijagonalnih elemenata, umjesto da se računa posebna matrica za svaku dionicu preplitanja, isto tako se računa srednja vrijednost dijagonalnih elemenata. Ako se uzme u obzir da je matrica impedancija ekvivalentnih faznih vodiča simetrična matrica, tj. da je:

$$\vec{Z}_{ab} = \vec{Z}_{ba} \quad \vec{Z}_{ac} = \vec{Z}_{ca} \quad \vec{Z}_{bc} = \vec{Z}_{cb}$$

Dobiju se srednje vrijednosti za vlastite i međusobne impedancije:

$$\vec{Z}_S = \frac{1}{3} * (\vec{Z}_{aa} + \vec{Z}_{bb} + \vec{Z}_{cc}) = 0,1117 + j0,5296 \quad \Omega/km$$

$$\vec{Z}_m = \frac{1}{3} * (\vec{Z}_{ab} + \vec{Z}_{ac} + \vec{Z}_{bc}) = 0,0709 + j0,2035 \quad \Omega/km$$

Matrica ekvivalentnih faznih vodiča za prepleteni vod glasi:

$$[\vec{Z}^{abc}]_{prepl} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_s & \vec{Z}_m & \vec{Z}_m \\ \vec{Z}_m & \vec{Z}_s & \vec{Z}_m \\ \vec{Z}_m & \vec{Z}_m & \vec{Z}_s \end{bmatrix}$$

Matrice transformacije za jednostruke vodove glase:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$a = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$[S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Matricu $[\vec{Z}^{abc}]$ se transformira u simetrične komponente:

$$[\vec{Z}^{012}] = \begin{bmatrix} \vec{Z}_s + 2 * \vec{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \vec{Z}_s - \vec{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \vec{Z}_s - \vec{Z}_m \end{bmatrix}$$

Uzdužna matrica za simetrične komponente izgleda ovako:

$$[\vec{Z}^{012}] = \begin{bmatrix} 0,2536 + 0,9365i & 0 & 0 \\ 0 & 0,0408 + 0,3261i & 0 \\ 0 & 0 & 0,0408 + 0,3261i \end{bmatrix}$$

Dijagonalni elementi matrice su redom direktna, inverzna i nulta impedancija:

Nulta impedancija jedne faze:

$$Z_0 = 0,2536 + j0,9365 \quad \Omega/km$$

Nulta impedancija jednog vodiča je dva puta veća zbog (dva vodiča u snopu) i iznosi:

$$2Z_0 = 0,5071 + j1,8730 \quad \Omega/\text{km}$$

Direktna impedancija jedne faze:

$$Z_1 = 0,0408 + j0,3261 \quad \Omega/\text{km}$$

Direktna impedancija jednog vodiča (dva vodiča u snopu):

$$2Z_1 = 0,815 + j0,6522 \quad \Omega/\text{km}$$

Inverzna impedancija jedne faze:

$$Z_2 = 0,0408 + j0,3261 \quad \Omega/\text{km}$$

Inverzna impedancija jednog vodiča (dva vodiča u snopu):

$$2Z_2 = 0,815 + j0,6522 \quad \Omega/\text{km}$$

Djelatni otpor nultog sustava po vodiču:

$$R_0 = 0,5071 \quad \Omega/\text{km}$$

Induktivitet nultog sustava po vodiču:

$$L = \frac{X}{2 * \pi * f}$$

$$L_0 = 5,962 \quad \text{mH}/\text{km}$$

Direktna impedancija jedne faze:

$$Z_1 = 0,0408 + j0,3261 \quad \Omega/\text{km}$$

Djelatni otpor direktnog sustava po fazi:

$$R_1 = 0,0408 \quad \Omega/\text{km}$$

Induktivitet direktnog sustava po fazi:

$$L_1 = 1,0380 \quad \text{mH}/\text{km}$$

Inverzna impedancija jedne faze:

$$Z_1 = 0,0408 + j0,3261 \quad \Omega/\text{km}$$

Djelatni otpor inverznog sustava po fazi:

$$R_1 = 0,0408 \quad \Omega/\text{km}$$

Induktivitet inverznog sustava po fazi:

$$L_1 = 1,0380 \quad \text{mH}/\text{km}$$

ZAKLJUČAK

Na početku rada rečeno je da je cilj odrediti uzdužnu impedanciju nadzemnog voda. To je i ostvareno proračunom nakon proučavanja teorije. Proučavajući literaturu naišlo se na nekoliko važnih pojmova koji su se pokazali bitnima u pisanju rada. Ti pojmovi su definirani uz primjenu i pojašnjenje pripadajućih formula.

Ovdje su istaknuti nekoliko najvažnijih pojmova: konstante voda, djelatni otpor voda, skin-efekt. Pojam konstante voda definiran je kao osnovno električno svojstvo nadzemnog voda kojima se opisuju sve električne prilike u svakom pogonskom stanju te je ovisan o svojstvima materijala od kojeg je vod izveden, o geometrijskim svojstvima voda i o okolnim prilikama. Dok, djelatni otpor voda ovisi o presjeku, duljini i materijalu vodiča, a određen je padom napona ili gubitkom snage dok vodičem teče istosmjerna struja od 1A. U radu je objašnjen i pojam skin-efekt uz formule i objašnjenja istih. To je nejednolika raspodjela struje po presjeku vodiča zbog čega dolazi do povećanja djelatnog otpora vodiča, a time se povećavaju i gubici.

Na kraju samog rada nalazi se proračun koji je riješen koristeći metodu srednjih geometrijskih udaljenosti.. Iz zadanih podataka, učitavajući iz tablica dobiju se vrijednosti za vanjski promjer vodiča, stvarni presjek vodiča i polumjer vodiča te se danjim postupkom izračunava impedancija nadzemnog voda. Kao rezultat proračuna parametara prijenosnog voda dobije se matrica reda broja faznih vodiča koja predstavlja matricu uzdužnih impedancija, gdje su dijagonalni elementi matrice direktna, inverzna i nulta impedancija.

LITERATURA

[1] Ožegović, Marija.; Ožegović, Karlo.: „Električne energetske mreže I“, Udžbenici Sveučilišta u Splitu, Split, 1996.

[2] Živić-Đurović, Marijana.: Materijali sa predavanja: Električne energetske mreže, Tehnički fakultet Rijeka, 2015.

[3] Komen, Vitomir.: Materijali sa predavanja: Prijenos i Distribucija Električne energije, Tehnički fakultet Rijeka, 2015.

[4] Kemal Hot.: Materijali sa predavanja: Elektroenergetske mreže, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2005.

Internet stranice:

[5] Skin-efekt, http://eskola.hfd.hr/pitanja_odgovori/show_answ.php?pitanje=%2F9%2Fskin.html

[6] Skin-efekt, https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/10.Skin_efekt.pdf

SAŽETAK

Završni rad temelji se na utvrđivanju uzdužne impedancije nadzemnog voda. Opisane su konstante voda, djelatni otpor voda uz pripadajuće formule i analizu istih, skin-efekt, način određivanja induktiviteta homogenog cilindričnog vodiča i induktivitet sustava od n paralelnih vodiča. Objasnjen je način primjene metode srednjih geometrijskih udaljenosti. Uz analizu slika i formula prikazan je djelomični i potpuni preplet kod dvostrukih vodova. Također je prikazan način izračunavanja pogonske impedancije. Na kraju je napravljen proračun određivanja uzdužne impedancije nadzemnog voda.

Master thesis is based on determining the longitudinal impedance of overground line. It describes the constants of power line, effective resistance of power line with associated resistance formul and analysis thereof, skin-effect, a way of determining the inductance of a homogenous cylindrical Guide and inductance of the system of n parallel guide. It is explained how the application of methods of high geometrical distances. With the analysis of the images and the formul shown is a partial and complete interweaving with double lines. It is also shown the way of calculating the drive impedance. At the end of the budget has been made for determining the longitudinal impedance overground line.

Ključne riječi:

Konstante nadzemnih elektroenergetski vodova, skin-efekt, djelatni otpor, impedancija, metoda srednjih geometrijskih udaljenosti.

Constants of overhead power lines, skin-effect, effective resistance, impedance, Method medium geometric distance,