

3. TELEKOMUNIKACIJSKI VODOVI

3.1. Prijenos električnih signala po vodu

Prijenos električnih signala po TK vodu moguć je na dva osnovna načina - *analogni i digitalni*. Pri analognom načinu, veličina električnog signala neprekidno slijedi promjene veličine, koja predstavlja informaciju (npr. prijenos govora u niskofrekventnoj telefoniji). Pri digitalnom načinu informacije se pretvaraju u diskontinuirani niz različitih električnih signala, pri čemu je za svaku vrstu informacije usvojena određena kombinacija tih signala tj. kôd. Obično se koriste dvije vrste signala: sa strujom i bez nje, ili, izraženo brojčano: 1 i 0. S obzirom na to da se koriste dva broja, takav način kodiranja naziva se binarni, a sam prijenos informacije pomoću kombinacije brojeva - digitalni.

Električne karakteristike vodova, koje definiraju njihove prijenosne mogućnosti, nazivaju se parametri prijenosa. Razlikuju se primarni i sekundarni parametri prijenosa.

3.1.1. Primarni parametri prijenosa po žičnim vodovima

Primarni parametri prijenosa po žičnim vodovima glavne su električne karakteristike koje definiraju prijenos. Oni ne ovise o naponu ni o struji, nego su određeni jedino konstrukcijom voda, upotrijebljenim materijalom i frekvencijom električnog signala koji se prenosi po vodu.

Vlastiti otpor R

Vlastiti otpor R svojstvo je vodiča da se odupire prolaženju električne struje. Ovisi o vrsti materijala (specifični otpor uvjetovan oblikom atomske rešetke i brojem slobodnih elektrona), duljini i presjeku vodiča, temperaturi okoline i o frekvenciji prenošenog električnog signala. Jedinica je Ohm (Ω).

Otpor vodiča na istosmjernu struju izračunava se pomoću izraza:

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega]$$

gdje su:

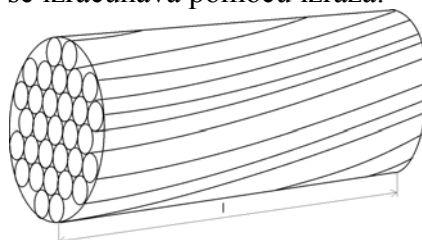
ρ – specifični otpor vodiča [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

l – duljina vodiča [m]

$S = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$ – površina presjeka vodiča [mm^2]

d – promjer vodiča [mm]

Ako se vodič sastoji od više tanjih vodiča od istog materijala, zajedno upredenih (pletunica) (sl. 3.1.), otpor se izračunava pomoću izraza:



Slika 3.1. Višežilna pletunica

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot S_0} [\Omega]$$

gdje su:

- ρ – specifični otpor vodiča [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
 l – duljina pletenice [m]
 n – broj vodiča u pletenici

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} - \text{površina presjeka pojedinih vodiča u pletenici} [\text{mm}^2]$$

d_0 – promjer pojedinih vodiča [mm]

Ispravak vrijednosti otpora vodiča s obzirom na temperaturu obavlja se pomoću izraza:

$$R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ)] [\Omega]$$

gdje su:

- R_t – otpor vodiča na temperaturi t [Ω]
 R_{20} – otpor vodiča na temperaturi 20°C [Ω]
 α – temperaturni koeficijent vodiča
 t – temperatura na kojoj se nalazi vodič [$^\circ\text{C}$]

Otpor vodiča za izmjeničnu struju u području niskih frekvencija (do 5 KHz) izračunava se pomoću izraza:

$$R = R_0 \cdot [1 + F(x)] [\Omega]$$

U području visokih frekvencija (više od 5 KHz) na povećanje otpora osim skin efekta djeluje i efekt blizine vodiča, pa se otpor izračunava pomoću izraza:

$$R = R_0 \cdot \left[1 + F(x) + \frac{k_u \cdot G(x) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(x) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2} \right] [\Omega]$$

gdje su:

- R_0 – otpor vodiča za istosmjernu struju [Ω]
 $F(x)$ – koeficijent povećanja otpora zbog gubitaka od vrtložnih struja nastalih djelovanjem unutarnjega magnetskog polja (skin efekt)
 $G(x)$ – koeficijent povećanja otpora zbog gubitaka od vrtložnih struja nastalih zbog efekta blizine u dolaznom vodiču
 $H(x)$ – koeficijent povećanja otpora uslijed gubitaka od vrtložnih struja nastalih zbog efekta blizine u odlaznom vodiču

k_u – koeficijent upredanja (postoji dijagram k_u za razne veličine odnosa $\frac{a}{d}$,

a u funkciji od vrste elementa upredanja)

- d – promjer vodiča [mm]
 a – razmak između središta vodiča [mm]

$$x = r \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \cdot f}{\rho \cdot 10^7}}$$

- r – polumjer vodiča [mm]
 f – frekvencija prenošene struje [Hz]
 μ_r – relativna permeabilnost vodiča
 ρ – specifični otpor vodiča [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

$$x = 0,0105 \cdot d \cdot \sqrt{f} - \text{za bakreni vodič}$$

$$x = 0,082 \cdot d \cdot \sqrt{f} - \text{za aluminijski vodič}$$

Vlastiti induktivitet L

Vlastiti induktivitet L svojstvo je vodiča da se odupire promjenama strujnog stanja induciranjem elektromotorne sile samoindukcije, što izaziva fazni pomak (struja kasni za naponom), a to se pri prijenosu osjeća kao prividni otpor. Ovisi o vrsti materijala (permeabilnosti), dimenzijama i razmaku vodiča te frekvenciji prenošenog signala. Jedinica je Henry (H).

Općenito:

$$L = k_u \cdot \left(4 \ln \frac{2a-d}{d} + Q(x) \cdot 10^{-4} \right) [\text{H/km}]$$

gdje su:

k_u – koeficijent upredanja

$Q(x)$ – koeficijent koji uzima u obzir utjecaj skinefekta

Vlastiti kapacitet C

Kapacitet C svojstvo je vodiča da može na sebe preuzeti određenu količinu elektriciteta ako na njega djeluje napon. Pritom dolazi do stvaranja faznog pomaka (napon kasni za strujom), a to se pri prijenosu osjeća kao prividni otpor. Ovisi o dimenzijama i vrsti materijala vodiča (dielektričnosti $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$) te o razmaku između vodiča. Jedinica je Farad (F).

Približno:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} [\text{F}]$$

gdje su:

ε – dielektričnost izolacije [F/m]

S – površina presjeka vodiča [m^2]

d – razmak između vodiča [m]

Općenito:

$$C = \frac{k_u \cdot \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \cdot \ln \frac{2a}{d} \cdot \psi} [\text{F}]$$

gdje su:

k_u – koeficijent upredanja

ψ – koeficijent utjecaja uzemljenoga kovinskog plašta

Vodljivost izolacije G

Vodljivost izolacije G svojstvo je izolacije da “upija” odnosno propušta jedan dio struje koja teče kroz vodič. Vodljivost izolacije ovisi o otporu izolacijskog materijala, kapacitetu voda, frekvenciji prenošenog signala i dielektričnim gubicima u izolacijskom materijalu. Jedinica je Siemens (S).

Vodljivost izolacije izračunava se pomoću izraza:

$$G = G_0 + G_{\omega} [\text{S/km}]$$

gdje su:

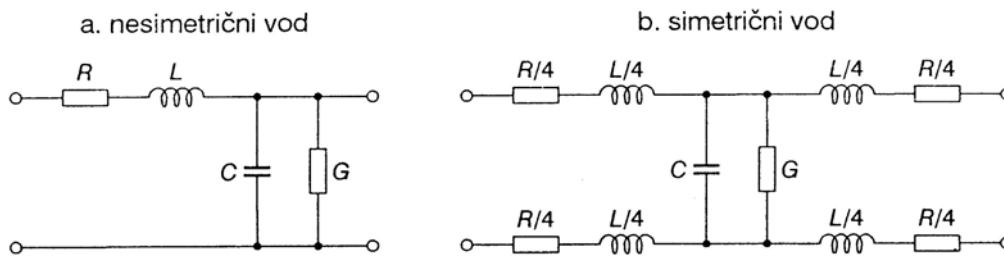
$$G_0 = \frac{1}{R_i} - \text{vodljivost izolacije za istosmjernu struju} [\text{S/km}]$$

$$G_{\omega} = \omega C \text{tg} \delta - \text{vodljivost izolacije za izmjeničnu struju} [\text{S/km}]$$

R_i – otpor izolacije [Ωkm]

- C – kapacitet voda [F/km]
 $\text{tg } \delta$ – dielektrični gubici u izolaciji
 $\omega = 2\pi f$ – kružna frekvencija signala [Hz]
 f – frekvencija signala [Hz]

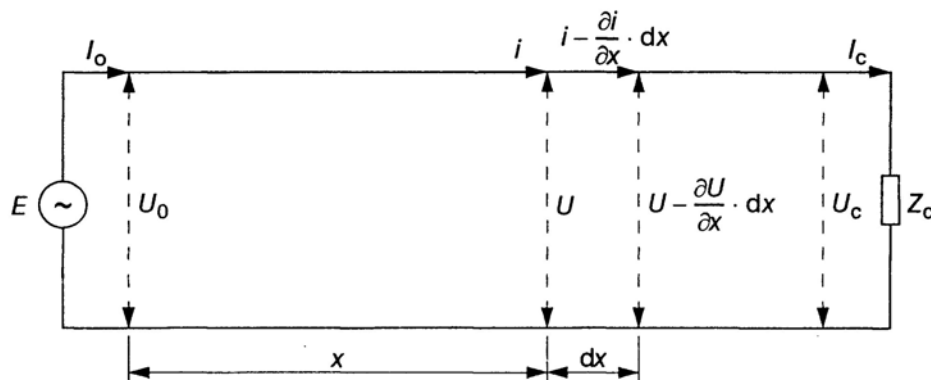
Na stvarnom TKvodu navedeni su primarni parametri prijenosa (R , L , C i G), raspoređeni jednoliko po cijeloj duljini voda, pa se i izražavaju po jedinici duljine. Ako se međutim TKvod želi prikazati pomoću nadomjesne električne sheme, onda se u toj shemi primarni parametri prijenosa prikazuju koncentrirano (sl. 3.2).



Slika 3.2. Nadomjesna shema telekomunikacijskog voda

3.1.2. Sekundarni parametri prijenosa po žičnim vodovima

Sekundarni parametri prijenosa po žičnim vodovima električne su karakteristike, koje pobliže definiraju prijenos, a ovise o primarnim parametrima prijenosa. Da bi se sekundarni parametri prijenosa mogli izvesti računski, mora se pretpostaviti da je TKvod homogen, tj. da je po čitavoj duljini iste konstrukcije i da ima iste električne karakteristike, pa ga se može zamisliti kao konačan broj elementarnih isječaka i analizirati naponske i strujne razmjere na nadomjesnoj shemi elementarnog isječka voda duljine dx na udaljenosti x od izvora (sl. 3.3.).



Slika 3.3. Nadomjesna shema isječka iz TK voda

Napon i struja na bilo kojemu mjestu voda su funkcije duljine i vremena odnosno

$$U = U_0(x, t)$$

$$I = I_0(x, t)$$

S obzirom na duljinu voda x , dolazi do određenog pada napona du , te smanjenja struje di :

$$-du = r \cdot dx \cdot i + l \cdot dx \cdot \frac{di}{dt}$$

$$-di = g \cdot dx \cdot u + c \cdot dx \cdot \frac{du}{dt}$$

Te jednadžbe dovode se u diferencijalni oblik tako da ih se podijeli s dx i dobivaju se opće (parcijalne) diferencijalne jednadžbe voda:

$$-\frac{du}{dx} = r \cdot i + l \cdot \frac{di}{dt}$$

$$-\frac{di}{dx} = g \cdot u + c \cdot \frac{du}{dt}$$

pri čemu je $u = u(x, t)$ napon, a $i = i(x, t)$ struja na mjestu x voda, te u vremenu t .

Ako se radi o utitranom stanju uz sinusnu pobudu, onda se račun pojednostavnjuje, jer se može operirati samo s kompleksnim vrijednostima napona i struje. Uvođenjem:

$$u = \operatorname{Re}[U(x) \cdot e^{j\omega t}]$$

$$i = \operatorname{Re}[I(x) \cdot e^{j\omega t}]$$

dobivaju se iz sustava općih (parcijalnih) jednadžbi - jednadžbe voda za stacionarno stanje:

$$\frac{d(U \cdot e^{j\omega t})}{dx} = R \cdot I \cdot e^{j\omega t} + L \cdot \frac{d(I \cdot e^{j\omega t})}{dt}$$

$$\frac{d(I \cdot e^{j\omega t})}{dx} = G \cdot U \cdot e^{j\omega t} + C \cdot \frac{d(U \cdot e^{j\omega t})}{dt}$$

$e^{j\omega t}$ ne ovisi o udaljenosti x , a $\frac{de^{j\omega t}}{dt} = j\omega e^{j\omega t}$, pa kako svi članovi jednadžbi imaju

faktor $e^{j\omega t}$, on se može brisati te ostaje:

$$-\frac{dU}{dx} = I \cdot (R + j\omega L)$$

$$-\frac{dI}{dx} = U \cdot (G + j\omega C)$$

Ponovnim diferenciranjem jednadžbi po x i zamjenom i s njihovim značenjima dobiva se:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = (R + j\omega L) \cdot \frac{dI}{dx} = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot U = \gamma^2 \cdot U$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = (G + j\omega C) \cdot \frac{dU}{dx} = (G + j\omega C) \cdot (R + j\omega L) \cdot I = \gamma^2 \cdot I$$

Konstanta prostiranja signala po vodu γ

Izraz $\sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}$ naziva se konstanta prostiranja. Ona definira promjenu električnog signala duž voda po amplitudi (prigušenje α) i po fazi (fazni pomak β). Konstanta prostiranja raste s frekvencijom, jer rastu i prigušenje i fazni pomak.

Konstanta promjene amplitude signala (prigušenje) α

Konstanta prigušenja α predstavlja realni dio konstante prostiranja γ i definira promjenu amplitude električnog signala duž voda, tj. pokazuje za koliko se smanji amplituda signala na jedan kilometar duljine voda. Opći izraz za konstantu prigušenja je:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \right]}$$

gdje su:

R – otpor voda [Ω/km]

C – kapacitet voda [F/km]

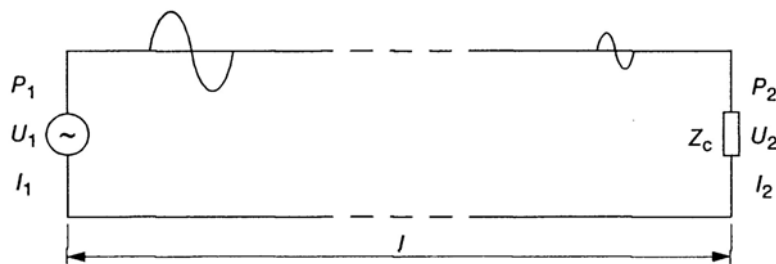
L – induktivitet voda [H/km]
 G – vodljivost izolacije voda [S/km]
 $\omega=2\pi f$ – kružna frekvencija signala [Hz]

Jedinica za konstantu prigušenja, izračunanu po ovoj jednadžbi, je Neper/km (1 Np/km).

Ukupno prigušenje voda računa se po izrazu

$$a=\alpha l \text{ [Np]}$$

Jedinica za ukupno prigušenje je Neper (Np) i on predstavlja prirodni logaritam odnosa napona ili struja na početku i na kraju voda (sl. 3.4.).



Slika 3.4. Prigušenje telekomunikacijskog voda

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2} = \ln \frac{I_1}{I_2} \text{ [Np]}$$

Prigušenje se međutim često iskazuje i kao dekadski logaritam odnosa snaga na početku i na kraju voda:

$$a = \log n \frac{P_1}{P_2}$$

U tom slučaju je jedinica Bell (B), odnosno obično se koristi deset puta manja jedinica - decibel (dB).

I neper i decibel su slične jedinice, jer obje pokazuju logaritamski odnos napona, struja ili snaga, s tim što je neper definiran pomoću prirodnog logaritma odnosa napona odnosno struja, a decibel pomoću dekadnog logaritma odnosa snaga. U žičnim vezama korištene su podjednako obje jedinice, i neper i decibel, s tim što je u većem dijelu Europe korišten neper, dok je u SAD i u nekim europskim zemljama (Velika Britanija, Belgija i Nizozemska) korišten decibel. U bežičnim vezama sve su zemlje koristile decibel. Na IV. zasjedanju CCITT u Mar del Plati 1968. godine preporučeno je da se za prigušenje koristi samo decibel. Time su se otklonile mnoge poteškoće pri eksploataciji kombiniranih prijenosnih sustava (dijelom žičnih, dijelom bežičnih), omogućuje se unifikacija mjernih uređaja te olakšava međusobno sporazumijevanje specijaliziranog osoblja. Da bi se olakšala pretvorba pojedinih izraza za prigušenje, daju se njihovi opći oblici izraženi i u neperima i u decibelima:

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2} \text{ [Np]} = 2 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} \text{ [B]} = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} \text{ [dB]}$$

$$a = \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [B]} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]} = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} \text{ [Np]}$$

Za izravno preračunavanje nepera u decibele i obrnuto koriste slijedeći odnosi:

$$1 \text{ Np} = 0,868589 \text{ B} = 8,685889 \text{ dB}$$

$$1 \text{ B} = 10 \text{ dB} = 1.151293 \text{ Np}$$

$$1 \text{ dB} = 0,1 \text{ B} = 0,115129 \text{ Np}$$

Konstanta promjene faze signala (fazni pomak) β

Konstanta promjene faze β predstavlja imaginarni dio konstante prostiranja γ i definira promjenu faze električnog signala duž voda, tj. pokazuje za koliko se

promijeni faza signala na jedan kilometar duljine voda. Opći izraz za određivanje fazne konstante je

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \right]}$$

Jedinica za konstantu promjene faze je radijan/kilometar (rad/km). Inače je 1 radijan jednak $\frac{360}{2\pi} = 57 [^\circ]$.

Brzina prijenosa signala po vodu v

Brzina prijenosa signala po vodu v pokazuje brzinu kojom se signal širi po vodu. Određuje se izrazom:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta}$$

Jedinica za brzinu prijenosa je kilometar/sekunda (km/s).

Prethodne diferencijalne jednačbe za $\frac{d^2 U}{dx^2}$ i $\frac{d^2 I}{dx^2}$ harmoničnog su tipa, pa njihovo

opće rješenje glasi:

$$U = A \cdot e^{\gamma x} + B \cdot e^{-\gamma x}$$

$$I = C \cdot e^{\gamma x} + D \cdot e^{-\gamma x}$$

gdje su A, B, C i D konstante integriranja koje se mogu odrediti iz graničnih uvjeta.

Ako napon i struja na početku voda imaju vrijednosti U_0 i I_0 , pri $x = 0$ jednačbe općeg rješenja dobivaju oblik:

$$U_0 = A + B$$

$$I_0 = C + D$$

Uvrštenjem u diferencijalne jednačbe dobiva se

$$-\gamma A + \gamma B = I_0 \cdot (R + j\omega L) = (C + D) \cdot (R + j\omega L)$$

$$-\gamma C + \gamma D = U_0 \cdot (G + j\omega C) = (A + B) \cdot (G + j\omega C)$$

Rješavajući te jednačbe, dobivaju se sljedeće vrijednosti konstanti integriranja:

$$A = \frac{U_0 - I_0 \cdot Z_c}{2}$$

$$B = \frac{U_0 + I_0 \cdot Z_c}{2}$$

$$C = \frac{U_0 - I_0 \cdot Z_c}{2}$$

$$D = \frac{U_0 + I_0 \cdot Z_c}{2}$$

Ako se te konstante uvrste u prethodne jednačbe, dobiva se

$$U = \frac{U_0 - I_0 \cdot Z_c}{2} \cdot e^{\gamma x} + \frac{U_0 + I_0 \cdot Z_c}{2} \cdot e^{-\gamma x}$$

$$I = \frac{U_0 - I_0 \cdot Z_c}{2} \cdot e^{\gamma x} + \frac{U_0 + I_0 \cdot Z_c}{2} \cdot e^{-\gamma x}$$

Druge komponente u tim jednačbama predstavljaju upadne valove napona i struje, a prve komponente - odbijene valove. Na beskonačno dugom vodu nema refleksije, pa jednačbe dobivaju oblik:

$$U = U_0 \cdot e^{-\gamma x}$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\gamma x}$$

Valni ili karakteristični otpor Z_k

Veličina Z_k predstavlja odnos između napona i struje u bilo kojoj točki voda.

Određuje se pomoću izraza:

$$\overline{Z}_k = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \frac{u}{i}$$

$$Z_k = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}}$$

Jedinica za karakteristični otpor je Ohm (Ω).

Ako električni signal na svom putu po vodu nailazi na promjene karakterističnog otpora, dolazi do njegova djelomičnog ili potpunog odboja. Veličinu tog odboja ili refleksije pokazuje tzv. *faktor refleksije* p , koji se određuje pomoću izraza:

$$p = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Pritom može nastati više slučajeva:

$Z_1 = Z_2$, $p = 0$ prilagođivanje, bez refleksije

$Z_2 = 0$, $p = 1$, kratko spojeni vod | puna refleksija

$Z_2 = \infty$, $p = -1$, otvoren vod

$Z_2 < Z_1$, $0 < p < 1$ | neprilagođenje, djelomična

$Z_2 > Z_1$, $-1 < p < 0$ | refleksija

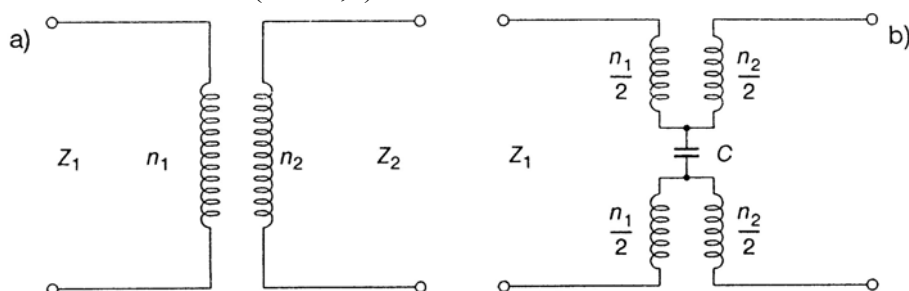
Povećanje prigušenja zbog refleksije može se odrediti pomoću izraza:

$$a' = \ln \frac{Z_1 + Z_2}{2 \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}}$$

U telekomunikacijama se uglavnom radi s malim naponima i strujama, pa je vrlo važno da postoji dobro prilagođenje i između različitih vrsta vodova i između vodova i uređaja. Prilagođenje se najčešće izvodi pomoću prilagodnih transformatora - translatora (sl. 3.5.a), u kojih postoji sljedeći odnos između brojeva navoja i impedancija:

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Ako se prilagođenje obavlja transformatorom, a pritom se ne smije prekinuti galvanski kontinuitet voda (npr. pri napajanju istosmjernom strujom), treba translator premostiti kondenzatorom (sl. 3.5,b).



Slika 3.5. Prilagođenje karakterističnog otpora translatorima

3.1.3. Međusobni utjecaj vodova

Međusobni utjecaj vodova može biti uzrokovan neposrednim prijelaskom struje iz jednog voda u drugi te djelovanjem električnog i magnetskog polja, koje se stvara u prostoru oko vodova.

Galvanski utjecaj tj. prijelaz struje iz jednog voda u drugi nastaje zbog loše izolacije vodova ili pri korištenju zemlje kao povratnog vodiča. Kod dvožičnih izoliranih vodova može se taj oblik utjecaja zanemariti.

Električni utjecaj nastaje djelovanjem električnog polja ometajućeg voda na ometani vod, a što su vodovi bliži i što je napon na ometajućem vodu veći, on je znatniji.

Magnetski utjecaj nastaje djelovanjem magnetskog polja ometajućeg voda na ometani vod, a što po ometajućem vodu teče veća struja, odnosno što su vodovi bliže i što dulje idu paralelno, on je znatniji.

Međusobni utjecaj između vodova može nastati izravnim djelovanjem, zbog refleksije i preko trećih vodova. Može se očitovati u razumljivom preslušavanju, čime je povrijeđena tajnost ili u nerazumljivom preslušavanju (šum), čime je otežana razumljivost.

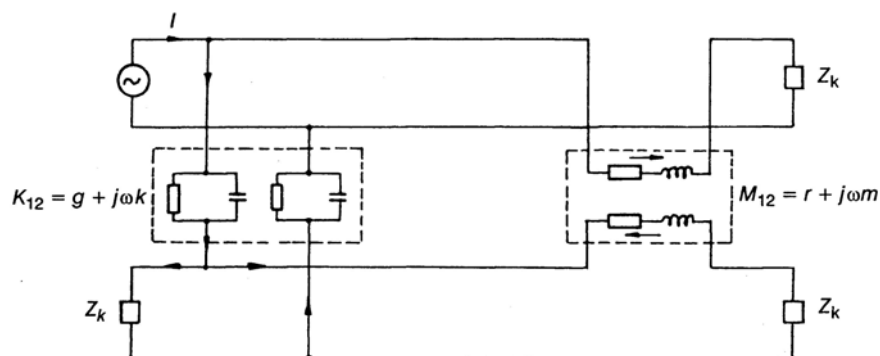
Parametri međusobnog utjecaja

Međusobni utjecaj između vodova definiran je parametrima međusobnog utjecaja. Razlikuju se primarni i sekundarni parametri međusobnog utjecaja.

Primarni parametri međusobnog utjecaja

Utjecaj zbog djelovanja elektromagnetskog polja obilježuje elektromagnetska sprega između ometajućeg i ometanog voda (sl. 3.6).

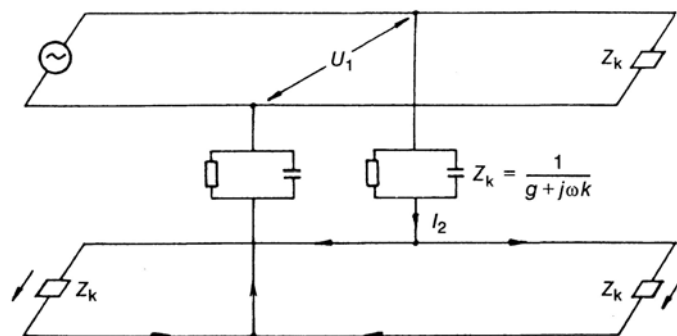
Obično se električna i magnetska komponenta elektromagnetske sprege razmatraju odvojeno.



Slika 3.6. Električna i magnetska sprega među vodovima

Električna sprega K_{12}

Električna sprega K_{12} obilježuje utjecaj električnog polja ometajućeg voda na ometani vod (sl. 3.7.).



Slika 3.7. Nadomjesna shema električne sprege među vodovima

Ta sprega definirana je kao odnos struje I_2 u ometanom vodu i napona U_1 na ometajućem vodu, tj.:

$$K_{12} = \frac{I_2}{U_1} = g_{12} + j\omega k_{12} \quad [\text{S}]$$

gdje su:

g_{12} – aktivna komponenta električne sprege uzrokovana nesimetrijom električnih gubitaka u izolaciji [S]

k_{12} – kapacitivna sprega uzrokovana nesimetrijom dijelnih kapaciteta između ometajućeg i ometanog voda [F]

Magnetska sprega M_{12}

Magnetska sprega M_{12} obilježuje utjecaj magnetskog polja ometajućeg voda na ometani vod (sl. 3.8.).

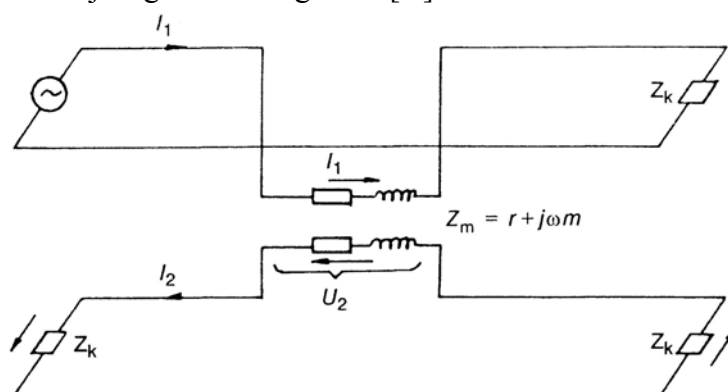
Ta sprega definirana je kao odnos napona U_2 na ometanom vodu i struje I_1 u ometajućem vodu, tj.:

$$M_{12} = \frac{U_2}{I_1} = r_{12} + j\omega m_{12} \quad [\Omega]$$

gdje su:

r_{12} – aktivna komponenta magnetske sprege uzrokovana nesimetrijom gubitaka u kovini - npr. susjedni vodiči, ekran, plašt [Ω]

m_{12} – induktivna sprega uzrokovana nesimetrijom dijelnih induktiviteta između vodiča ometajućeg i ometanog voda [H]



Slika 3.8. Nadomjesna shema magnetske sprege među vodovima

Između induktivnih i kapacitivnih sprege postoji stalni odnos, i to:

$$\frac{m}{k} = Z_k^2$$

gdje je:

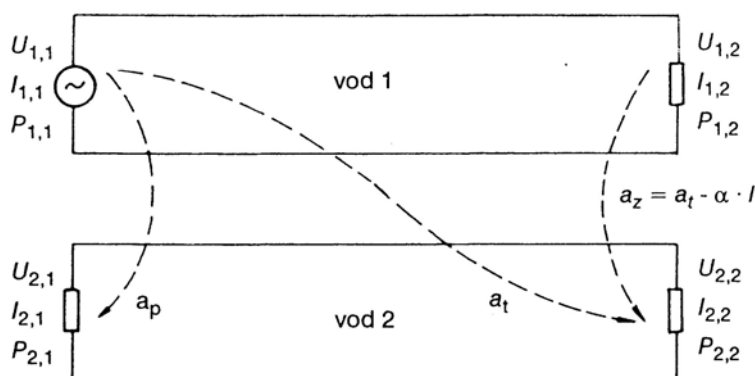
Z_k – karakteristični (valni) otpor [Ω]

Elektromagnetske sprege između vodova, a preko njih i utjecaj između vodova, ovise o uzajamnom položaju vodova, konstrukciji vodova, stupnju konstruktivne homogenosti, kako po duljini tako i po presjeku, o kvaliteti primijenjenih materijala, te o frekvenciji signala koji se prenose.

Sekundarni parametri međusobnog utjecaja

Sekundarni parametri međusobnog utjecaja električne su karakteristike, koje pobliže definiraju međusobni utjecaj između vodova, a ovise o primarnim parametrima međusobnog utjecaja. Za ocjenu međusobnog utjecaja između vodova najviše se koristi tzv. prigušenje preslušavanja (diafonije). Pod tim se razumijeva stupanj

smanjenja struje koja prelazi s jednog voda na drugi. Razlikuju se dva oblika prigušenja preslušavanja: na bližem kraju i na daljem kraju (sl. 3.9.).



Slika 3.9. Izravni utjecaj između vodova

Prigušenje preslušavanja na bližem kraju (paradiafonije) - a_p

Prigušenje preslušavanja na bližem kraju - a_p definirano je kao prirodni logaritam odnosa napona ili struja na početku ometajućeg i na početku ometanog voda. Prema tome:

$$a_p = \ln \frac{U_{11}}{U_{21}} = \ln \frac{I_{11}}{I_{21}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{11}}{P_{21}} \text{ [Np]}$$

ili

$$a_p = 20 \cdot \log \frac{U_{11}}{U_{21}} = 20 \cdot \log \frac{I_{11}}{I_{21}} = 10 \cdot \log \frac{P_{11}}{P_{21}} \text{ [dB]}$$

Prigušenje preslušavanja na daljem kraju (telediafonije) - a_t

Prigušenje preslušavanja na daljem kraju - a_t definirano je kao prirodni logaritam odnosa napona ili struja na početku ometajućeg i na kraju ometanog voda. Prema tome:

$$a_t = \ln \frac{U_{11}}{U_{22}} = \ln \frac{I_{11}}{I_{22}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{11}}{P_{22}} \text{ [Np]}$$

ili

$$a_t = 20 \cdot \log \frac{U_{11}}{U_{22}} = 20 \cdot \log \frac{I_{11}}{I_{22}} = 10 \cdot \log \frac{P_{11}}{P_{22}} \text{ [dB]}$$

Pri malim duljinama vodova prigušenje preslušavanja na bližem i daljem kraju približno je jednako, a pri većim duljinama prigušenje preslušavanja na daljem kraju uvijek je veće.

Zaštićenost - a_z

Osim preslušavanja na bližem i daljem kraju, mnogo se koristi još jedan parametar, tzv. zaštićenost voda. Pod tim se razumijeva razlika razine korisnog signala P_s i smetnji P_n u promatranoj točki voda:

$$a_z = P_s - P_n$$

Definiran je kao logaritamski odnos snaga korisnog signala i smetnji. Prema tome:

$$a_z = 10 \cdot \log \frac{P_s}{P_n} \text{ [dB]}$$

ili

$$a_z = \frac{1}{2} \ln \frac{P_s}{P_n} \text{ [Np]}$$

Za vodove s jednakim parametrima zaštićenost je jednaka razlici između prigušenja preslušavanja na daljem kraju i vlastitog prigušenja voda:

$$a_z = a_t - \alpha \cdot l$$

Na kratkim dionicama voda a_z je praktički jednak a_t , jer je $\alpha \cdot l = 0$:

$$a_{z0} = a_t$$

Na većim duljinama voda:

$$a_z = a_{z0} - \ln \sqrt{n}$$

gdje je:

n – broj tvorničkih duljina kabela

Osim izravnog utjecaja među vodovima postoji i posredni utjecaj preko tzv. trećih vodova, koji se stvaraju, npr., iz fantomskoga kruga, preko zemlje i sl..

3.2. Simetrični zračni vodovi

Simetrični zračni vod pripada u uskopojasne telekomunikacijske vodove. Sastoji se od dva gola ili izolirana kovinska vodiča, koji su postavljeni tako što slobodno vise u zraku. Vodiči su postavljeni simetrično u odnosu na zemlju, zbog čega su im primarni parametri prijenosa jednaki.

Dobre značajke ovih vodova su:

- jednostavna konstrukcija (relativno lako utvrđivanje mjesta kvara i njegovo otklanjanje);
- malo prigušenje i zbog toga velik domet.

Loše značajke ovih vodova su:

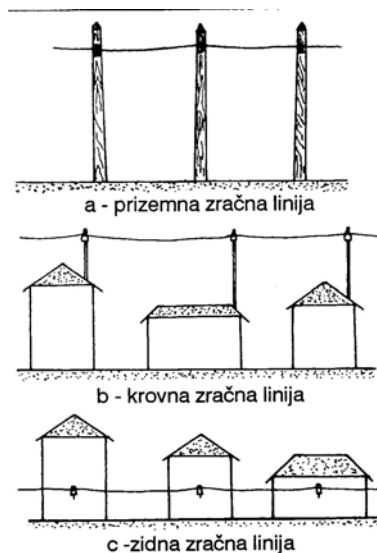
- zauzimaju relativno velik prostor za mali broj vodova;
- dosta su izloženi atmosferskim nepogodama;
- skupo održavanje (zbog čestih kvarova);
- izloženi su utjecaju elektroenergetskih vodova;
- imaju vrlo nestalna električna svojstva;
- nesiguran prijenos (samo analogni);
- uzak frekventni pojas korištenja (do 150 KHz).

Vrste zračnih vodova

Zračne linije sa simetričnim vodovima mogu se dijeliti s obzirom na različite kriterije:

Obzirom na mjesto postavljanja uporišta (sl. 3.10.) zračni vodovi se dijele na:

- prizemne, u kojih su uporišta stupovi (obično drveni) koji se ukopavaju u zemlju. Dobra značajka tih linija je lako održavanje, a loša neestetski izgled (obično izvan naseljenih mjesta);
- zidne, u kojih su uporišta željezni nosači, koji se postavljaju na zidovima zgrada (obično s dvorišne strane). Dobra značajka tih linija je u tome što su prikladne za uske ulice sa zgradama različite visine, a loša - teško i skupo održavanje;
- krovne, u kojih su uporišta željezne cijevi, koje se postavljaju na krovovima zgrada (pričvršćuju se uz krovne konstrukcije). Dobra značajka tih linija je u prikladnosti za neregulirane dijelove grada, a loša - najteže i najskuplje održavanje.



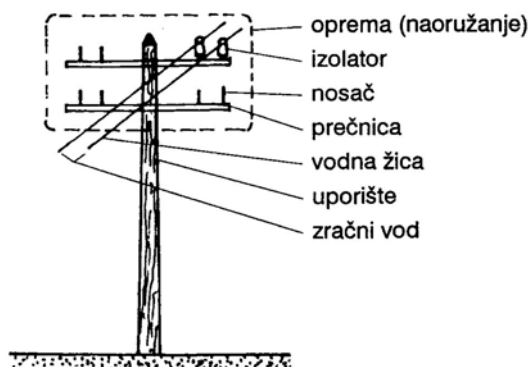
Slika 3.10. Vrste zračnih vodova s obzirom postavljanja uporišta

Obzirom na vrstu prijenosa zračni vodovi se dijele na:

- telefonske, koje služe samo za prijenos telefonskih razgovora. Mogu biti niskofrekventne (svaki vod prenosi samo jedan telefonski razgovor u izvornom frekventnom području 300-3400 Hz) ili visokofrekventne (svaki vod osim jednoga telefonskog razgovora u izvornom frekventnom području prenosi još 1-12 istodobnih telefonskih razgovora pomaknutih frekventno);
- telegrafске, koje služe za prijenos telegrafskih signala;
- mješovite, koje služe za prijenos i telefonskih i telegrafskih signala.

Osnovne konstruktivne značajke

Glavni dijelovi konstrukcije zračne TK linije su žice, izolatori, osloni i uporište (sl. 3.11.).



Slika 3.11. Konstrukcija zračne telekomunikacijske linije

Žice

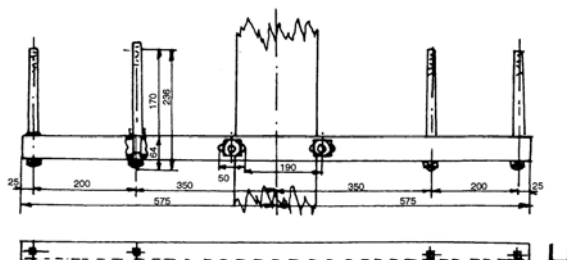
Razlikuju se vodna i vezna žica. Vodna služi za prijenos signala, a vezna za pričvršćenje vodne žice uz izolator. Od vodne žice se traži da ima dobru električnu provodljivost i zadovoljavajuću mehaničku čvrstoću, a od vezne da je dovoljno mekana, da se može lako savijati oko žice odnosno oko izolatora.

Za vodnu žicu u početku upotrebljavamo čisti bakar ($s = 56 \text{ Sm/mm}^2$), ali se uskoro pokazalo da on nema dovoljnu mehaničku čvrstoću. Zatim se upotrebljavala pocinčana čelična žica. Ta žica ima dovoljnu mehaničku čvrstoću, ali nema dobru električnu vodljivost ($s=7 \text{ Sm/mm}^2$). Kasnije se za vodnu žicu počinje upotrebljavati

Radi zaštite od korozije nosači se premazuju bojama na bazi umjetnih smola.

Osloni

Služe za oslanjanje nosača, a pričvršćuju se na uporište. Najviše se koriste tzv. *prečnice* (sl. 3.14), koje se postavljaju poprijeko na uporište. U prvo vrijeme su se upotrebljavale drvene prečnice (u nekim zemljama se još uvijek koriste), ali danas se ipak najviše koriste prečnice od čelika, Č 0300 ili od legiranog aluminija. Imaju "L" ili "U" profil, a tipizirane su tri veličine s obzirom na broj ravnih nosača koje nose (razmak 15-20 cm).



Slika 3.14. Prečnica

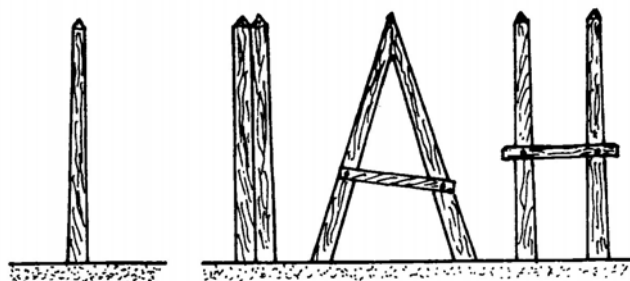
Uporišta

Služe za pričvršćivanje oslona (prečnica) i nosača, kako bi se vodna žica držala na propisnoj udaljenosti od podloge (zemlje, krova, zida). S obzirom na mjesto gdje se postavljaju, postoje tri vrste uporišta:

Za *prizemna uporišta* najviše se upotrebljavaju drveni stupovi (bilo je pokušaja s kovinskim i poliesterskim stupovima, ali se to pokazalo neekonomičnim). Vrsta drveta koje se upotrebljava za uporište ovisi o podneblju područja na kojemu će se rabiti. U našoj zemlji upotrebljava se pretežito drvo četinara (bor, jela i smreka). Duljina stupova je 6-14 m, a promjer 14-18 cm na 30 cm od vrha, s tim da promjena promjera ne smije biti veća od 1 cm na dužni metar. S obzirom na konstrukciju, uporišta izgrađena od drvenih stupova mogu biti (sl. 3.15.):

- jednostavna
- složena (dvojničnik, A, H, trostup, četverostup i piramida).

Za mali broj vodova i male razmake upotrebljavaju se jednostavna uporišta, a za veliki broj vodova i velike razmake složena. Stupovi se ukopavaju u zemlju (normalno 1/5 duljine). Budući da je drvo izloženo truljenju, koje izazivaju česte promjene suho - vlažno, te razne vrste gljiva i kukaca, stupovi se moraju impregnirati, a ako je potrebno mijenjati postojeće uporište, mora ih se montirati na posebna betonska postolja.



Slika 3.15. Drvena uporišta

Za *krovna uporišta* upotrebljavaju se čelične bešavne cijevi duljine 3-7 m, vanjskog promjera 7 cm, te debljine stijenke 5 mm. Cijevi se pričvršćuju uz drvenu krovnu konstrukciju pomoću stremenki i vijaka. Da bi se spriječio prodor vode kroz cijev odnosno uz nju, ona se pokriva posebnom zaštitnom kapom od željeza, odnosno oko

cijevi se postavlja zaštitni lim. Radi zaštite od korozije, cijev se premazuje bojama na bazi umjetnih smola.

Za zidna uporišta upotrebljavaju se različite konstrukcije izrađene u obliku okvira od čeličnih profila, na kojima su montirani ravni nosači. S obzirom na oblik, zidna uporišta mogu biti:

- jednostavna (T, F)
- složena.

Radi zaštite od korozije, zidna uporišta se premazuju bojama na bazi umjetnih smola.

3.2.1. Prijenosna svojstva

Prijenosna svojstva simetričnih zračnih vodova definirana su njihovim parametrima prijenosa, koji su različiti kod niskofrekventnog i visokofrekventnog prijenosa.

Primarni parametri prijenosa

Otpor voda ovisi o vrsti materijala i o promjeru vodiča. Za niskofrekventni prijenos i kraće udaljenosti koriste se tanji brončani te vrlo rijetko željezni vodiči. Za visokofrekventni prijenos i veće udaljenosti koriste se deblji brončani vodiči.

Induktivitet je prilično velik, jer su vodiči zračnog voda dosta razmaknuti (15-20 cm), pogotovu ako su tanji. Zračni vod sa željeznom žicom ima veći induktivitet od voda s brončanom žicom zato što željezo ima veću permeabilnost od bronce.

Povećanjem frekvencije signala smanjuje se induktivitet voda.

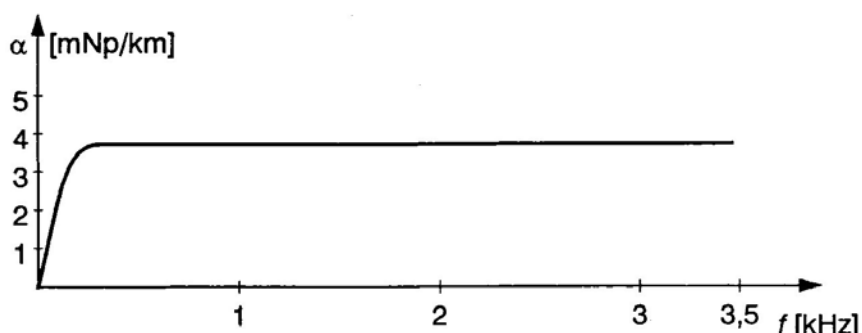
Kapacitet je vrlo mali zbog velikog razmaka vodiča. Inače je razmjernan promjeru vodiča, tj. za deblje je veći, a za tanje manji.

Vodljivost izolacije je relativno velika, pogotovu na visokim frekvencijama, te veoma ovisna o vremenskim prilikama (vlažnost).

Sekundarni parametri prijenosa

Karakteristična impedancija na niskim frekvencijama zavisi uglavnom od odnosa otpora i vodljivosti izolacije (600Ω), a na visokim frekvencijama od odnosa induktiviteta i kapaciteta. Povećanjem frekvencije signala apsolutna vrijednost karakteristične impedancije se smanjuje.

Konstanta prigušenja je relativno mala i frekventno neovisna (sl. 3.16.).



Slika 3.16. Frekvencijska karakteristika prigušenja simetričnih zračnih vodova

Moguć je prijenos signala na velike daljine (nekoliko stotina kilometara) bez pojačala.

Fazna konstanta je mala, te se povećava s povećanjem frekvencije signala.

Brzina prijenosa signala relativno je velika, raste s povećanjem frekvencije signala i bliži se brzini svjetlosti (300 000 km/s).