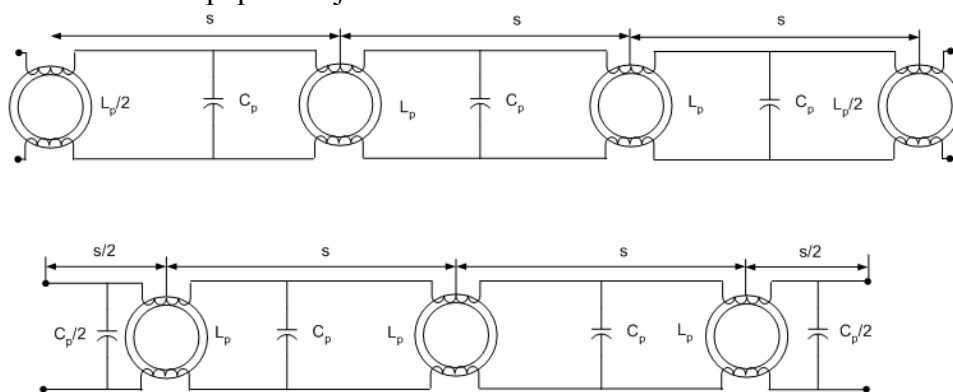


8. PUPINIZACIJA VODOVA

Pupinizacija je postupak kod kojeg se povećava prosječan uzdužni induktivitet /kabelskog/ voda ubacivanjem specijalnih svitaka, i time smanjuje prigušenje kabelskog voda u određenom frekvencijskom području. Pupinizacija se danas primjenjuje samo kod niskofrekventnog prijenosa po kabelima za specijalne službe kao što je željeznica.

Vod se pupinizira homogeno, tj. svici istih induktiviteta postavljaju se na jednakim udaljenostima u serijskom spoju s vodom. Udaljenosti između svitaka nazivaju se "koraci pupinizacije". Uz shematski prikazan pupinizirani vod na slici 8.1. vidi se njegova ekvivalentna T - i Π -shema, u ovisnosti o tome da li se jedna "ćelija" voda promatra između polovica dva susjedna pupinska svitka ili između dvije polovice kabelskih koraka pupinizacije.



Slika 8.1. Pupinizirani kabel i njegove ekvivalentne sheme

Kao što se vidi, u ekvivalentnoj shemi su raspodijeljeni primarni parametri kabela, a to su otpor i kapacitet predstavljeni koncentrirano (otpor izolacije je zanemaren). To je za kapacitet dozvoljeno u potpunosti, tj. vrijednost koncentriranog kapaciteta jednaka je ukupnom kapacitetu kabela na odgovarajućoj dužini koraka pupinizacije S

$$C_p = S \cdot c$$

dok je za otpor situacija složenija. Teorija koja je u svezi s tim razvijena pokazala je kako ukupan ekvivalentni koncentrirani otpor jednog koraka pupinizacije treba računati iz formule:

$$R_p = R_L + \left(1 - \frac{2 \cdot f^2}{3 \cdot f_g^2}\right) \cdot r \cdot S$$

gdje je R_L otpor Pupinskog svitka, a f_g granična frakvencija pupiniziranog voda. Naime, sa slike 2.7 vidi se da je jedna sekcija pupinizacije ekvivalentna jednoj ćeliji filtera propusta niskih frekvencija k-tipa s otpornim gubicima. Zbog toga pupinizirani kabel ima graničnu frekvenciju kao i svaki drugi filter prikazanu jednadžbom:

$$f_g = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L_p \cdot C_p}}$$

iznad koje prigušenje počinje naglo rasti. Ovde je L_p ukupan induktivitet koraka pupinizacije, tj. $L_p = L + sS \cong L$, pri čemu je ukupan induktivitet praktički svodi na induktivitet Pupinskog svitka.

Jednadžba za ukupan koncentrirani otpor jednog koraka pupinizacije važi praktički, do frekvencije otprilike $0,7 f_g$. Treba imati na umu da uzdužni otpor kabela r i sam raste s frekvencijom, a isto tako i R_L , što treba uzimati u obzir pri izračunavanju kod primjene jednadžbe.

Kao što je naprijed pokazano, pupinizacija se primijenjuje zbog smanjenja prigušenja u opsegu prijenosa, dakle za frekvencije u pojasu od $0 \leq f \leq 0,7 f_g$. Teoretski postupak se temelji na približavanju takozvanom Heavisideovom uvjetu prijenosa, koji se izražava relacijom:

$$\frac{r}{g} = \frac{s}{c}$$

Ako je ovaj uvjet ispunjen, tada je vlastito prigušenje na vodu minimalno. Ovaj uvjet lako se može izvesti iz izraza za prigušenje:

$$\alpha \approx \frac{r}{2} \sqrt{\frac{c}{s}} + \frac{g}{2} \sqrt{\frac{s}{c}}$$

ako se potraži njegov minimum pri konstantnoj vrijednosti odnosa s/c . Kod svih vodova međutim, važi relacija:

$$\frac{r}{g} > \frac{s}{c}$$

pa je jedina praktična mogućnost približavanja Heavisideovom uvjetu povećanje prosječnog induktiviteta voda, što se i postiže pupinizacijom. Treba naglasiti da se čak ni primjenom najvećih svitaka koji se upotrebljavaju za pupinizaciju ni izdaleka ne ispunjava uvjet $\frac{r}{g} = \frac{s}{c}$ kod kablskih vodova, ali se postiže ipak znatno smanjenje prigušenja u opsegu prijenosa.

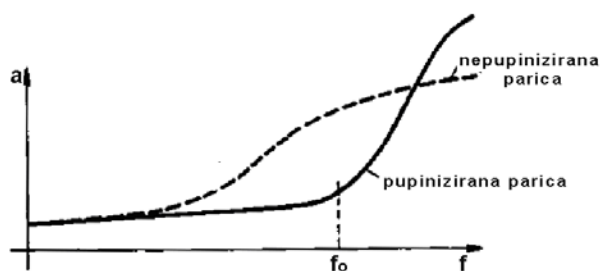
Prigušenje pupiniziranog kablskog voda izračunava se u opsegu prijenosa po formuli:

$$a_s = \frac{a_0}{1 - \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}$$

gdje je:

$$a_0 = \frac{R_p}{2} \sqrt{\frac{C_p}{L_p}} + \frac{G_p}{2} \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \approx \frac{R_p}{2} \sqrt{\frac{C_p}{L_p}}$$

Iz toga se izračunava prigušenje jednog koraka pupinizacije. Prosječno (vlastito) prigušenje dobiva se onda dijeljenjem ove veličine s dužinom jednog koraka pupinizacije s . Izračunavanje prigušenja u području povećanog prigušenja nije interesantno, jer se taj opseg ionako ne koristi za prijenos, pa se svi izrazi praktično koriste samo do frekvencije $0,7 f_g$. Na sl. 8.2. prikazano je, radi usporedbe, prigušenje istog voda sa i bez pupinizacije. Vidi se da je prigušenje pupinizirog voda ravnomjernije i manje u opsegu prijenosa, što je i bio cilj pupinizacije.



Slika 8.2. Prigušenje pupiniziranog voda

Pupinizacija se nekada univerzalno koristila kao sredstvo za smanjenje prigušenja na vodovima, bez uporabe pojačala. Međutim, sve veće uvođenje višekanalnih prijenosnih sustava na vodovima i odgovarajuće širenje frekvencijskog opsega prijenosa zahtjevalo je odgovarajuće pomicanje granične frekvencije prijenosa ka višim frekvencijama, a time i smanjenje induktiviteta Pupinskih svitaka. S druge strane razvijena su relativno jednostavna i jeftina elektronička linijska pojačala, pa je otpala potreba za smanjenjem prigušenja uporabom pupinizacije na dužim relacijama, na kojima se i kod pupiniziranih vodova moraju koristiti pojačala. Ako bi se na primer kod prijenosa dvanaestokanalnog sustava pokušala pupinizacija, vidjelo bi se da je veličina svitka već toliko mala, zbog vrlo visoke granične frekvencije, da je prosječno povećanje induktiviteta na vodu u odnosu na vlastiti induktivitet vrlo malo, pa se gubi i efekat smanjenja prigušenja zbog kojeg je uvedena pupinizacija. Pupinizirani kabeli nalaze se danas na željeznici samo u najnižim mrežnim skupinama, za veze na glavnim (rajonskim) centralama ili nekim kraćim međumjesnim linijama, na primer kod kraćih veza krajnjih i čvornih centrala, a na dugačkim linijama u zatvorenim mrežama kao što je na primer željeznička pružna telefonija i sl. Prijenos je niskofrekventan, tj. prenose se frekvencije do 4 kHz. U svezi s tim najčešće se koristi korak pupinizacije je od 1,7 – 1,8 km sa svicima induktiviteta 80 mH za parice bez korištenja fantomskog voda ili 80/40 mH za parice gdje se rabi fantomska veza..

Karakteristična impedancija pupiniziranog kabela povezana je u odnosu na karakterističnu impedanciju istog nepupiniziranog voda, zbog povećane uzdužnog induktiviteta, jer je za sve frekvencije iznad 300 Hz:

$$Z_c = \sqrt{\frac{S}{c}}$$

Funkcionalni oblik karakteristične impedancije ovisi o tome, promatra li se ulaz koraka pupinizacije koji počinje polovicom svitka ili polovicom dužine kabela. U prvom slučaju prema analogiji s filterskom k-ćelijom imamo T-impedanciju, a u drugom Π -impedanciju, tj. karakterističnu impedanciju oblika:

$$Z_{cT} = \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}$$

odnosno:

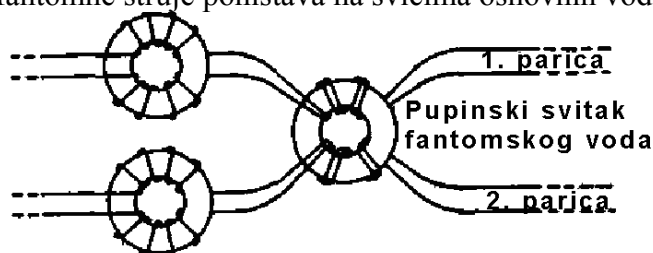
$$Z_{c\pi} = \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}}$$

I ovi izrazi mogu se koristiti do frekvencija $0,7 f_g$. Veličina $\sqrt{\frac{L_p}{C_p}}$ je nominalna karakteristična impedancija pupiniziranog voda i kod kabela ona je reda veličine oko 1200 Ω , dakle, znatno više nego kod nepupiniziranog kabela (600 Ω).

Kabeli koji se pupiniziraju često se konstruiraju na temelju DM četvorki, ukoliko se kod eksploatacije koriste fantomni vodovi. Naime, zbog konstrukcije

čtvorki DM, uzdužni kapacitet fantomne veze manji je nego kod zvjezda-čtvorki istog presjeka, pa je prigušenje fantomnih veza kod takvih kabela manji nego kod kabela sa zvjezda-čtvorkama. Prikazati će se sada postupak fantomiziranja pupiniziranih kabela.

Na slici 8.3 prikazana je jedna pupinizirana četvorka u kojoj je korištena i fantomna veza, također pupinizirana. Svitak pupinizacije za fantomni vod mora se tako ubaciti da ne smeta osnovnoj konstrukciji voda. To se postiže tako što se tokovi struja osnovnih krugova poništavaju na Pupinskom svitku fantomnog voda, a tok fantomne struje poništava na svicima osnovnih vodova.



Slika 8.3 Pupinizacija fantomizirane četvorke

Zbog toga je važno obratiti pažnju na smjerove namatanja svitaka na odgovarajućim jezgrama, tako da se induktivitet svitka fantomnog kola ne pojavljuje u stvarnom kolu i obrnuto (bifilarno motanje).

Ako želimo dobiti jednako prigušenje u osnovnom i fantomnom vodu, onda mora biti zadovoljen uvjet:

$$\frac{R_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} = \frac{R_f}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}$$

gde se indeksi o i f odnose na osnovni i fantomni vod. Kako je zbog dvostrukog vodiča fantomnog voda $R \cong 2 R_f$, to ova jednačba daje:

$$\frac{C_0}{L_0} = \frac{C_f}{4 \cdot L_f}$$

Kod kabela s DM četvorkama odnos C_f/C_0 ima vrijednost otprilike 1,63, pa gornja jednačba daje vrijednost $L_f = 0,41 L_0$ za induktivitet pupinskog svitka fantomnog kola, pri uvjetu jednakog prigušenja osnovnog i fantomnog voda. Ako se sada na bazi ovih vrijednosti nađu granične frekvencije osnovnog i fantomnog voda, onda imamo odnos:

$$f_{gf} = 1,24 f_{go}$$

tj. fantomni vod ima nešto širi propusni opseg od osnovnog voda pri istom prigušenju. Međutim, ako se ista analiza obavi kod zvjezda-čtvorki, kod kojih je odnos $C_f/C_0 = 2,8$, onda se nalazi da je propusni opseg fantomnog voda smanjen na 70% propusnog opsega osnovnog voda. To je i razlog što su se za pupiniziranje fantomnih veza koristile najčešće DM četvorke.

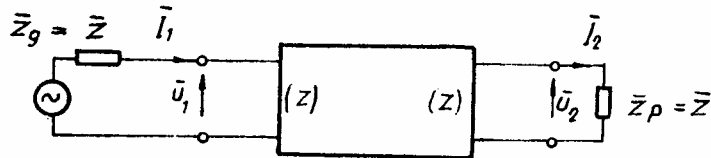
Na Hrvatskim željeznicama, a u glavnom i u cijeloj Evropi koriste se pupinski svici induktiviteta 80 mH za osnovni vod, 40 mH za fantomni vod. Pri tome standardni korak pupinizacije iznosi 1,7 km dužine. Pupiniziranjem kabela čije se parice sastoje od vodiča presjeka 0,9 mm dobiva se prijenosni opseg od 3,4 kHz, dakle, širine jednog normalnog telefonskog kanala. Za pretplatničke i mjesne spojne vodove, na kraćim udaljenostima, uzima se $L = 15,5$ mH i $s = 1800$ m (1400-2000). Na postojećoj telekomunikacijakoj kabelskoj mreži Hrvatskih željeznica koriste se

isključivo zvijezda-četvorke, a fantomni vodovi se koriste vrlo rijetko (vidi karakteristike STA i STKA kabela).

Preslušavanje

Postoje više vrsta prigušenja na kabelima :

1) Vlastito ili karakteristično prigušenje definirano je kao logaritamski odnos između prividne snage P_1 koja se predaje četveropolu i prividne snage P_2 na izlazu četveropola kada je on zaključen svojom karakterističnom impedancijom:

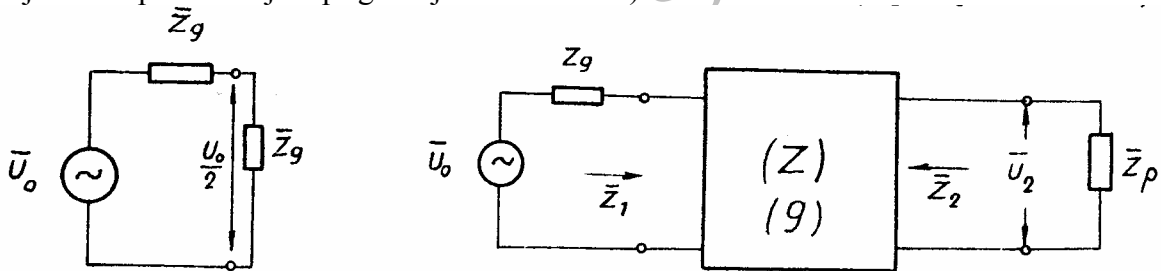


Slika 8.4. Karakteristično prigušenje

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2} = \ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} [Np]$$

$$a = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [dB]$$

2) Pogonsko ili radno prigušenje koje je definirano odnosom maksimalne prividne snage P_0 koju generator može dati na vanjskom otporu jednakom njegovu unutarnjem otporu i prividne snage P_2 koju daje potrošaču impedancije Z_p preko četveropola (mjeri se uspoređivanjem prigušenja sa normalom).



Slika 8.5. Pogonsko prigušenje

Normalna snaga kada je izvor zaključen impedancijom jednakoj impedanciji izvora:

$$P_0 = \frac{U_0^2}{4 \cdot Z_g}$$

a snaga na potrošaču:

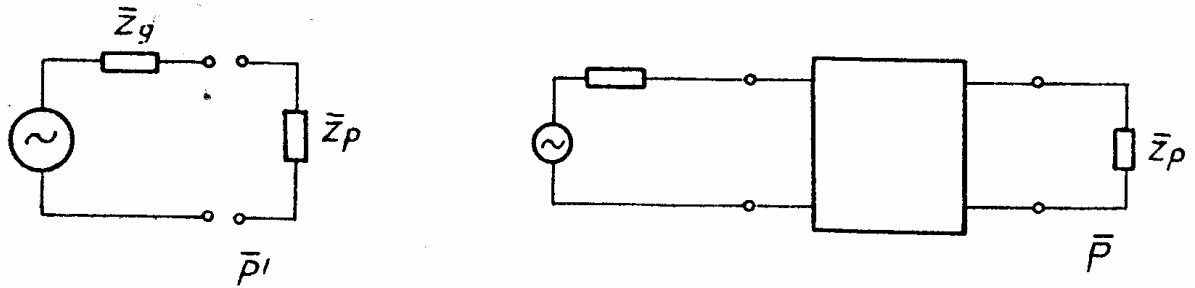
$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_p}$$

Radno prigušenje je tada:

$$a_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_0^2}{4Z_g} \cdot \frac{Z_p}{U_2^2} \right) = \ln \frac{U_0}{2U_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_p}{Z_g} [Np]$$

$$a_p = 20 \log \frac{U_0}{2U_2} + 10 \log \frac{Z_p}{Z_g}$$

3) Unešeno prigušenje je određeno odnosom prividne snage P_1 koju generator unutarnje impedancije Z_g daje neposredno potrošaču Z_p prema prividnoj snazi koju isti potrošač prima od generatora preko uključenog četveropola.



Slika 8.6. Unešeno prigušenje

$$a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{P'}{P} [Np]$$

$$a_u = 10 \log \frac{P'}{P} [dB]$$

Za mjerenje prigušenja voda na kabelu pri raznim frekvencijama uključuje se generator na jednom kraju voda, a indikator za mjerenje razina na suprotnom kraju voda. Pri tome se vrijednost prigušenja voda za pojedine frekvencije (za PCM sustave 1024 kHz) utvrđuje na osnovu razlike otpremljene razine i primljene razine.

Kod ovog mjerenja vod na obje strane treba biti zaključen svojom karakterističnom impedancijom.

Prijenosni sustavi