

## 4.1. Parametri kabla

### 4.1.1. Otpornost petlje

Pod otpornošću petlje  $R_{AB}$  se podrazumeva električna otpornost parice kratko spojene na suprotnom kraju. Otpornost parice predstavlja ukupna termogena otpornost koji provodnici parice pružaju prolasku jednosmerne i naizmenične struje. Ako su otpornosti žila A i B u parici  $R_A$  i  $R_B$ , tada je

$$R_{AB} = R_A + R_B \quad (4.1.1)$$

Jasno je da je otpornost parice jednaka zbiru otpornosti pojedinačnih provodnika. Termin otpornost provodnika je potrebno istaći zbog toga što se javlja u okviru nekih drugih parametara kabla, kod opisa lociranja mesta smetnji i zato što neki instrumenti (Minibridž, KMK 70) u okviru interpretacije rezultata daju podatke o dužini i/ili otpornosti za pojedinačni provodnik.

Vrednost otpornosti petlje u  $\Omega$  podeljena sa dužinom kabla izraženom u km daje podužnu otpornost izraženu u  $\Omega/\text{km}$ . **Podužna otpornost** predstavlja **primarni parametar** voda.

Podužna otpornost za jednosmernu struju zavisi od materijala provodnika, upredanja, geometrijskih osobina (površine poprečnog preseka, tj., prečnika provodnika), temperature provodnika i kvaliteta spojeva (nastavaka) provodnika parice (voda).

Zavisnost podužne otpornosti od materijala provodnika se izražava preko specifične otpornosti  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ), odnosno recipročne vrednosti specifične provodnosti  $\sigma$  ( $\text{S}/\text{m}$ ) koja iznosi  $1/\rho$  ( $\text{m}/\text{S}$ ). U pristupnoj mreži su uglavnom primjenjeni provodnici od elektrotehničkog bakra. Udeo kalajisanih bakarnih provodnika sa aspekta električnih merenja je zanemarljiv te se neće razmatrati.

Specifična otpornost bakra je  $\rho = 0,017544 \Omega\text{m}$ , odnosno njegova specifična provodnost

$$\sigma = 57 \frac{\text{S}}{\text{m}} \quad (4.1.2)$$

Zavisnost podužne otpornosti od upredanja je definisana povećanjem dužine parice kao posledice upredanja. To što je podužna otpornost definisana za dužinu kabla od 1 km ne znači da je i dužina provodnika 1 km. Tehnološki proces proizvodnje kablova podrazumeva upredanje izolovanih provodnika u parice i/ili četvorke, ovih u slojeve i/ili sektore i sve to u jezgro kabla. U takvim uslovima provodnici parice i/ili četvorke opisuju helikoidu čija dužina zavisi od koraka upredanja i prečnika elementa upredanja i veća je od dužine kabla.

Odnos ukupne dužine provodnika i ukupne dužine kabla je definisan empirijskim korekcionim koeficijentom  $\lambda$  čije su vrednosti za kabel použen u slojeve date u sledećoj tabeli (tabela 4.1.1).

## 4.1. Parametri kabla

---

Tabela 4.1.1. Vrednost empirijskog koeficijenta  $\lambda$  u zavisnosti od prečnika žice

Prečnik jezgra u mm	Koeficijent $\lambda$
< 30	1,010
30 – 40	1,016
40 – 50	1,025
50 – 60	1,037
60 - 70	1,050
70 - 80	1,070

Podužna otpornost je obrnuto srazmerna kvadratu prečnika provodnika. To znači da je za dvostruko veći prečnik provodnika podužna otpornost četverostruko manja. Za primenu u pristupnoj mreži su standardizovani sledeći prečnici provodnika: 0,32 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm. Ređe su u izvesnim slučajevima iskorišćeni kablovi sa prečnikom provodnika 0,5 mm, 0,9 mm, 1,2 mm i 1,4 mm. Sa praktične strane dovoljno je poznavati podužnu otpornost parice za jedan prečnik provodnika i na jednostavan način sa zadovoljavajućom tačnošću izračunati podužnu otpornost parice bilo kog prečnika provodnika koristeći obrnutu srazmernost kvadrata prečnika provodnika. Ovo je izraženo formulom:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (4.1.3)$$

Odnosno

$$R_2 = R_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (4.1.4)$$

### Primer

Poznato je da propisana vrednost podužne otpornosti parice prečnika provodnika  $d_1 = 0,6$  mm, iznosi  $R_1 = 128 \Omega/\text{km}$  na temperaturi od  $20^\circ\text{C}$ , a potreban je podatak o podužnoj otpornosti  $R_2$  parice prečnika provodnika  $d_2 = 0,8$  mm. Kvadrat odnosa prečnika  $(d_1/d_2)^2$  je  $(0,6/0,8)^2 = 0,5625$ , koji pomnožen sa  $128 \Omega/\text{km}$  daje  $0,5625 \cdot 128 = 72 \Omega/\text{km}$ . Greška koja se pri tom čini je posledica različitih dužina helikoide parica navedenih prečnika provodnika za isti položaj u kablu.

□

Ovo razmatranje se može primeniti na svođenje heterogenih kablovskih deonica realizovanih sa kablovima različitih prečnika provodnika na ekvivalentnu kablovsku deonicu sa jedinstvenim prečnikom provodnika. Uslov koji pri tom mora biti zadovoljen je da ukupna otpornost petlje ostane nepromenjen.

Ne obazirući se na propisano pravilo da je na kablovskoj deonici dozvoljena samo jedna promena prečnika provodnika, pretpostavićemo da se kablovska deonica dužine i sastoji iz dve ili više kablovskih dužina  $l_{d1}, l_{d2}, l_{d3} \dots l_{dn}$ , prečnika provodnika  $d_1, d_2, d_3 \dots d_n$ , respektivno, odnosno:

$$l_d = l_{d1} + l_{d2} + l_{d3} + \dots + l_{dn} \quad (4.1.5)$$

## 4.1. Parametri kabla

---

Ukupna dužina  $l_{d1}'$  svedena na dužinu prečnika provodnika  $d_1$  će biti:

$$l_{d1}' = l_{d1} + \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 l_{d2} + \left( \frac{d_3}{d_1} \right)^2 l_{d3} + \dots + \left( \frac{d_n}{d_1} \right)^2 l_{dn} \quad (4.1.6)$$

### Primer

Neka je kablovska deonica realizovana sa po 100 m kabla prečnika provodnika 0,4 mm, 0,6 mm, i 0,8 mm. Ekvivalentna deonica svedena na prečnik provodnika 0,4 mm će imati dužinu:

$$l_{d1}' = 100 \text{ m} + \left( \frac{0,6}{0,4} \right)^2 \cdot 100 \text{ m} + \left( \frac{0,8}{0,4} \right)^2 \cdot 100 \text{ m} = 725 \text{ m} \quad (4.1.7)$$

□

Uticaj temperature na podužnu otpornost parice se izražava preko temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  koji je za bakar pozitivan i iznosi 0,00393. Njegov uticaj na podužnu otpornost je dat formulom:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (4.1.8)$$

gde je  $R_t$  – podužna otpornost parice na temperaturi  $t$ ;  $R_{20}$  – podužna otpornost parice na temperaturi  $t = 20^\circ\text{C}$  i  $\alpha$  – temperaturni koeficijent ( $1/\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Važećim propisima su određene maksimalne vrednosti podužne otpornosti parica za dati prečnik provodnika i temperaturu  $20^\circ\text{C}$ . Ovo je prikazano u tabeli 4.1.2.

Tabela 4.1.2. Maksimalne podužne otpornosti parica na temperaturi od  $20^\circ\text{C}$  za dati prečnik provodnika

Prečnik provodnika (mm)	Podužna otpornost ( $\Omega/\text{km}$ )
0,32	$\leq 450$
0,4	$\leq 300$
0,6	$\leq 130$
0,8	$\leq 73,0$
0,9	$\leq 56,6$
1,2	$\leq 31,8$
1,4	$\leq 23,4$

Navedene vrednosti podužne otpornosti neznatno variraju zavisno od tipa kabla.

Uticaj kvaliteta spojeva provodnika parice na podužnu otpornost se javlja kao posledica loše izvedenih montažnih radova i/ili spoljnih uticaja (vlaga) i značajniji je u slučaju analize izmerenih vrednosti nego kao parametar kablovske parice o čemu će kasnije biti više reči. Može se napomenuti da je prema važećoj regulativi dozvoljeno nastavljanje provodnika tokom proizvodnje kablova samo u izuzetnim slučajevima.

#### 4.1. Parametri kabla

---

Podužna otpornost za naizmeničnu struju se izražava kao povećanje efektivne podužne otpornosti parice u odnosu na podužnu otpornost za jednosmernu struju, što se može predstaviti formulom:

$$R' = \lambda R_0' (1 + k) \quad (4.1.9)$$

gde je  $R'$  – ukupna podužna otpornost;  $\lambda$  – koeficijent koji pokazuje koliko puta je veća dužina parice od dužine kabla kao što je ranije opisano;  $R_0'$  – podužna otpornost za jednosmernu struju i  $k$  – koeficijent koji karakteriše posebne efekte pri prolasku naizmenične struje i njihov uticaj na povećanje ukupne podužne otpornosti.

Povećanje ukupne podužne otpornosti pri prolasku naizmenične struje je posledica delovanja tri efekta, a to su: skin efekat, efekat bliskosti i efekat ekrana (zaklona).

Povećanje podužne otpornosti usled skin efekta se ogleda u tome što je na visokim učestanostima iskorišćen samo deo poprečnog preseka provodnika udaljeniji od ose provodnika. Dubina prodiranja (debljina skina) se može izračunati po obrascu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_r \mu_0}} \quad (4.1.10)$$

gde je  $\omega$  - kružna učestanost;  $\sigma$  - provodnost;  $\mu_r$  – relativna permitivnost i  $\mu_0$  – permitivnost vakuuma.

Efekat bliskosti i efekat ekrana se sastoji u tome što zbog malog međusobnog rastojanja između samih provodnika i provodnika i metalnog omotača dolazi do pojave Fukooovih struja što rezultuje nejednakom raspodelom gustine struje u poprečnom preseku provodnika imajući za posledicu povećanje podužne otpornosti sa porastom učestanosti.

Na višim učestanostima se temperaturni koeficijent smanjuje težeći polovini svoje vrednosti za jednosmernu struju. Ovo se objašnjava time što se povećanjem temperature povećava efektivna površina poprečnog preseka provodnika (povećanje efektivne površine poprečnog preseka ne treba mešati sa fizičkim povećanjem površine poprečnog preseka usled povećanja temperatura). U tabeli 4.1.3 je data tipična zavisnost podužne otpornosti od učestanosti za prečnik provodnika 0,4 mm i temperaturu 20 °C.

Tabela 4.1.3. zavisnost podužne otpornosti od učestanosti za prečnik provodnika 0,4 mm i temperaturu 20 °C

$f$ (Hz)	$R'$ ( $\Omega/km$ )
5 k	286,2
10 k	286,3
20 k	286,8
50 k	290,0
100 k	300,8
1 M	626,8
10 M	1960,6
30 M	3395,5

## 4.1. Parametri kabla

---

Postupci za određivanje otpornosti petlje dati su u poglavlju u kome su opisane mostne metode.

### 4.1.2. Razlika otpornosti

Sve metode za predlociranje smetnji zasnivaju se na pretpostavci o homogenom kablu (konstantni poduzni parametri). Asimetrije ili odstupanja od ove pretpostavke dovode do greške. Mostne metode posebno su osjetljive na odstupanja u otpornostima žila a i b unutar iste parice. Da bi se greške merenja uzrokovane razlikama ovih otpornosti (sistemske greške) moglo otkloniti nije dovoljno znati samo otpornost petlje, već i pojedinačne otpornosti  $R_A$  i  $R_B$ . Merenje razlike otpornosti može se izvesti merenjem otpornosti u pojedinačnim žilama i izračunavanjem razlike. Međutim greška koja bi se pri tome unela u korekcije rezultata predlociranja može biti veća od greške koja bi se učinila zanemarivanjem razlike otpornosti. Znatno manja greška merenja ostvaruje se direktnim merenjem razlike otpornosti upotrebom savremenog namenskog mernog mosta koji je sastavni deo univerzalnog kablovskog mernog mosta.

Razlika otpornosti definisana je kao razlika otpornosti žile B i otpornosti žile A (izraz 4.1.11)

$$\Delta R = R_B - R_A \quad (4.1.11)$$

Pravilan redosled otpornosti  $R_A$  i  $R_B$  u izrazu 4.1.11 je bitan zbog kasnije interpretacije dobijenog rezultata. Ako je poznata (izmerena) razlika otpornosti, tada se kasnije dobijeni rezultati merenja mogu korigovati kako bi se ovaj tip nehomogenosti uzeo u obzir i dobio tačniji rezultat predlociranja smetnje.

Razlika otpornosti žila javlja se kao posledica loše izvedenih montažnih radova i/ili spoljnih uticaja (vlaga). Razlika otpornosti kao posledica nesavršenosti u proizvodnji se u praksi može zanemariti.

Nekvalitetni spojevi provodnika po pravilu rezultiraju razlikom otpornosti jer verovatnoća da pojedinačni spojevi na oba provodnika iste parice budu podjednako loši je praktično zanemarljiva. Osnovne negativne posledice su:

- Povećanje nivoa neželjenog šuma;
- Smanjenje nivoa korisnog signala. Ovo se naročito nepovoljno manifestuje u slučaju prenosa malih signala gde često dolazi do smetnji počev od povremenih ispada koji su neprijatniji za lociranje, pa sve do trajnih prekida i
- Povećanje greške merenja kod lociranja mesta smetnji mostnim metodama.

Važećom regulativom u pogledu maksimalno dozvoljenih vrednosti razlike otpornosti su obuhvaćeni samo kablovi za mesne mreže i mrežne grupe (Tehnički uslovi). Maksimalno dozvoljene vrednosti su u opsegu do  $0,6 \Omega$  za fabričku dužinu od 426 m, dok se za veće dužine izračunava korigovana vrednost. U slučaju provere kvaliteta izgrađene kablovske

## 4.1. Parametri kabla

---

deonice predviđeno je izračunavanje razlike otpornosti kao procenat ukupne otpornosti petlje a maksimalno dopuštene vrednosti su definisane formulom

$$(0,4 \Omega \div 1,0 \Omega) \cdot \sqrt{\frac{L(\text{km})}{30 \text{ km}}} \quad (4.1.12)$$

Norme kvaliteta za preplatničke kablove nisu predviđene. Neka iskustva pokazuju da se za dužine kablova do 1 km, u slučaju vrednosti razlike otpornosti manje od  $1 \Omega$  u perspektivi ne očekuje degradacija kvaliteta prenosa a ukoliko je vrednost razlike otpornosti veća od  $2 \Omega$  postoji realna mogućnost degradacije kvaliteta prenosa, naročito malih signala.

Metode merenja razike otpornosti date su u poglavljiju o mostnim metodama.

### 4.1.3. Otpornost izolacije

Merenje otpornosti izolacije predstavlja najmasovniji oblik merenja radi utvrđivanja stanja kabla bilo da je u pitanju lociranje mesta smetnje, preventivni zahvat ili provera kvaliteta. Razlog leži u činjenici da su u pristupnoj mreži u velikoj meri zastupljeni kablovi sa vazdušno papirnom izolacijom koji u slučaju prodora vlage u kabel mnogo brže ispadaju nego kablovi sa termoplastičnom izolacijom i omotačem a zastupljenost gasne kontrole koja bi minimizirala ovaj problem je simbolična. Ovome treba dodati da se uticaj vlage na otpornost izolacije kablova sa termoplastičnom izolacijom i omotačem usled difuzije može praktično zanemariti zbog toga što su ovi kablovi položeni u zemlju ili cevi kablovske kanalizacije po previlu punjeni i imaju metalni ekran koji isključuje uticaj difuzije tako da su ugroženi samo kablovi tipa TK 33U, a s obzirom na sporost procesa difuzije ne očekuje se bitan negativni uticaj osim na širokopojasni prenos.

Otpornost izolacije je obrnuto je сразмерna dužini kabla (za dvostruko veću dužinu kabla, otpornost izolacije je dvostruko manja itd.). Meri se jednosmernom strujom i najčešće se izražava u  $\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$  i  $\text{G}\Omega = 10^9 \Omega$ ). Podužna vrednost se, sledstveno, izražava u  $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$  i  $\text{G}\Omega \cdot \text{km}$ .

Otpornost izolacije dielektrika je dvostrukе prirode i može biti: **zapreminska i površinska**. U okviru jedne kablovske linije zapreminska otpornost izolacije je dominantna u kablu, dok je površinska dominantna na opremi za završavanje kablova (kablovske glave i dr.) i najčešće je prouzrokovana nečistoćom, vlagom i sl. Zavisno od toga koja otpornost izolacije (zapreminska ili površinska) je dominantna u kompletnoj kablovskoj liniji, imaćemo različite rezultate merenja. Čest slučaj u praksi je da, ako je dominantna zapreminska otpornost izolacije, onda otpornost izolacije između žila bude približno jednak zbiru otpornosti izolacija između pojedinih žila i zemlje, a ako je otpornost izolacije između žila znatno manja od zbiru otpornosti izolacije između pojedinih žila i zemlje (često približno jednaka otpornosti izolacije između pojedinačnih žila i zemlje), onda je dominantna površinska otpornost izolacije. Podrazumeva se da se u okviru merenja prema zemlji meri otpornost izolacije prema zemlji i drugoj žili (druga žila spojena sa zemljom). Ovo se može korisno primeniti na analizu rezultata merenja kod redovnog održavanja.

## 4.1. Parametri kabla

---

Temperaturna zavisnost otpornosti izolacije pri jednosmernoj struji izračunava se na osnovu sledeće formule:

$$R_t = R_{20} e^{-\alpha(t-20)} \quad (4.1.13)$$

koji se može aproksimirati izrazom:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (4.1.14)$$

gde je  $R_t$  – otpornost izolacije na temperaturi  $t$ ;  $R_{20}$  – otpornost izolacije na temperaturi  $20^{\circ}\text{C}$  i  $\alpha$  – temperaturni koeficijent.

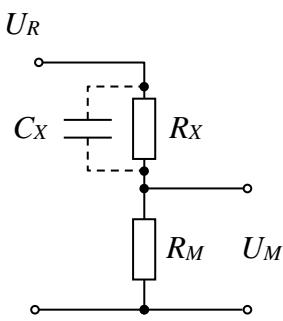
Temperaturni koeficijent za dielektrike je negativan što znači da sa povećanjem temperature otpornost izolacije pada i za vazdušno-papirnu izolaciju iznosi  $-0,07$ , tako da konačna formula za vazdušno-papirnu izolaciju glasi:

$$R_t = R_{20} [1 - 0,07(t - 20)] \quad (4.1.15)$$

Voda ima polarne molekule. Iz tog razloga će se u slučaju prodora vlage u kabel formirati napon te je potrebno, da bi se smanjila greška, izvršiti merenje u obrnutom smeru (sa drugog kraja kabla) a zatim izračunati srednju vrednost kao što će biti pokazano kod merenja otpornosti petlje. Obrnuto, iz saznanja o bitno različitim rezultatima u suprotnim smerovima merenja izvlači se zaključak o najverovatnijem prodoru vlage u kabel.

### Merenje otpornosti izolacije

Merila otpornosti izolacije (megaommetri, megometri) najčešće koriste UI metodu, a ređe most. Postoji više varijanti UI metode zavisno od toga da li se meri napon ili struja. Jedna od varijanti se sastoji u merenju pada napona na poznatom otporniku vezanim na red sa nepoznatim koji se napajaju iz generatora konstantnog napona. Principska uprošćena šema data je na slici 4.1.1.



Slika 4.1.1. Merenje otpornosti izolacije naponskim razdelnikom

Napon  $U_M$ , sa naponskog razdelnika je:

$$U_M = U_R \frac{R_M}{R_X + R_M} \quad (4.1.16)$$

#### 4.1. Parametri kabla

---

a kako je  $R_X \gg R_M$ , nepoznata otpornost se može naći kao količnik  $U_R$  i  $U_M$  pomnožen konstantom. Greška učinjena zanemarivanjem  $R_M$  u odnosu na  $R_X$  je zanemarljiva.

Sledeća greška koja se može pojaviti u ovom slučaju je sadržana u veličini ulazne otpornosti voltmetra koji meri napon  $U_M$ , a koja mora biti što je moguće veća. Ovo se kod savremenih merila otpornosti izolacije postiže primenom operacionih pojačavača sa FET-ovima na ulazu, koji mogu biti konfigurisani kao pretvarači napona u napon, struje u napon (MOM 4/5) ili napona u struju (MIU 01).

Važno je napomenuti da rezultat merenja otpornosti izolacije zavisi od primjenjenog mernog napona. Generalno, povećanjem mernog napona rezultat merenja otpornosti izolacije pada sve dok merni napon dostigne probojni napon za dati materijal izolacije. Za merenje otpornosti izolacije u pristupnoj mreži je predviđeno da merni napon bude najmanje 100 V. Inače, za merenje otpornosti izolacije važi pravilo da merni napon mora biti viši od radnog.

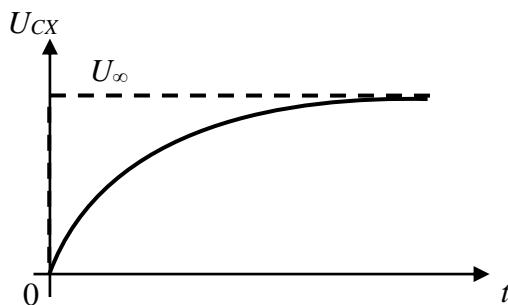
Merenje otpornosti izolacije spada u kategoriju merenja velikih otpornosti. U skladu s tim i merni otpornik  $R_M$  na šematskom prikazu UI metode merenja ima srazmerno veliku vrednost. Uključenjem referentnog napona  $U_R$  nastaje prelazni režim u kome se prvo kondenzator  $C_X$  puni preko otpornika  $R_M$  prema 4.1.17.

$$U_{CX} \approx U_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.1.17)$$

gde je  $\tau = R_M C_X$  vremenska konstanta punjenja voda, a  $U_\infty$  napon na kondenzatoru u ustaljenom stanju. To znači da na početku prelaznog režima kroz otpornik  $R_M$  protekne jača struja stvarajući na njemu veći pad napona što, s obzirom na obrnutu srazmernost, prouzrokuje prikaz niže vrednosti otpornosti izolacije, sve dok se kondenzator  $C_X$  ne napuni na vrednost napona približnu  $U_R$  umanjenu za pad napona na  $R_M$ . Teoretski, prema gornjem obrascu, ovo vreme je beskonačno. Praktično, da bi  $U_{CX}$  dostigao vrednost napona od 63 V, koja odgovara nivou

$$U_\infty \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \quad (4.1.18)$$

za vrednosti  $U_R = 100$  V,  $R_M = 10$  MΩ i  $C_X = 100$  nF ( $< 3$  km kabla, opseg merenja reda GΩ) potrebno je  $t = 1$  s. Za  $U_{CX} = 86$  V,  $t = 2$  s, itd. Ovo je predstavljeno na slici 4.1.2.



Slika 4.1.2. Eksponencijalni rast napona na razdelniku

#### 4.1. Parametri kabla

Važeća regulativa predviđa sledeće donje granične vrednosti otpornosti izolacije za neke slučajeve primene (tabela 4.1.4).

Tabela 4.1.4. Donje granične vrednosti otpornosti izolacije

Kablovi za mesne mreže i mrežne grupe ( $M\Omega \cdot km$ )	Izgrađena međumesna kablovska deonica ( $M\Omega \cdot km$ )	Glavni, distributivni i razvodni kablovi ( $M\Omega \cdot km$ )	Instalacioni kablovi – dvožilni ( $M\Omega \cdot km$ )	Instalacioni kablovi – višežilni ( $M\Omega \cdot km$ )	Završni kablovi ( $M\Omega \cdot km$ )	Unutrašnja telefonska instalacija – između provodnika ( $M\Omega \cdot km$ )
10000	13500	5000	200	220	200	20

#### 4.1.4. Dielektrična čvrstoća izolacije

Pri dovođenju napona na krajeve čvrstog dielektrika kao što su PVC ili polietilen, u njemu se formira slabo električno polje i dipoli u dielektriku se blago zakreću u pravcu tog polja. Mehaničke i hemijske veze u materijalu dielektrika ne dozovljavaju veliku slobodu kretanja ovih dipola, pa ne dolazi do ekifasnog uspostavljanja polja kroz deilektrik i ugao zakretanja je sve manji što se dublje ide u materijal. Zbog toga dielektrični materijali slabo provode struju, odnosno imaju veliku električnu otpornost. Što je napon na krajevima dielektrika veći to je polje u njemu snažnije i ugao zakretanja molekula je veći. Veće zakretanje dipola stvara mehanička naprezanja u materijalu i uzrokuje zagrevanje usled trenja. Kada spoljašnji napon pređe neku kritičnu vrednost, u dielektriku će doći do kidanja mehaničkih i hemijskih veza između dipolnih molekula, koji postaju slobodni, dobijaju značajno ubrzanje i počinju efikasno da provode električno polje. Brzo kretanje ovih masivnih molekula dodatno povećava temperaturu i oslobađa veliku količinu energije topeći dielektrik i menjajući trajno njegova električna i hemijska svojstva. Ova pojava, nazvana "proboj dielektrika" ili "proboj izolacije" praćena je svetlosnim i zvučnim efektima poznatim pod nazivom "varničenje". Varničenje se javlja kao posledica promene agregatnog stanja okolnog vazduha koji postaje jako jonizovana sredina ili plazma. Vazduh je, stoga, kao dielektrik takođe doživeo proboj, s obzirom da se, po pravilu, proboj vazduha dešava na znatno nižim naponima od probaja PVC-a ili polietilena. Međutim, za razliku od čvrstih i tečnih dielektrika, vazduh ne menja svoja svojstva trajno i ima veoma kratko vreme oporavka od probaja, nakon kojeg ponovo ima ista dielektrična svojstva.

Meru dielektrične čvrstoće izolacionih materijala ili izdržljivosti materijala da ne dozvole proboj dielektrika, predstavlja napon pri kome dolazi do probaja i izražava se u  $kV/mm$ . Ispitivanje dielektrične čvrstoće kablova i opreme u pristupnim mrežama podrazumeva proveru da li će u zadatom vremenskom intervalu (najčešće 2 min) doći do probaja materijala ili preskoka varnice kada se na merni objekat priključi neki ispitni napon, koji je nešto manji od napona probaja (kako ne bi došlo do oštećenja izolacije). Da bi se instalacija proglašila ispravnom, s obzirom da je napon manji od probognog, do probaja dielektrika ne sme doći. Merenje se izvodi naizmeničnom i/ili jednosmernom strujom namenskim instrumentima – visokonaponskim ispitnim generatorima. Pri merenju naizmeničnom strujom učestanosti 50 Hz, tipične vrednosti obuhvaćene važećom regulativom za kablove tipa TK iznose 500 V

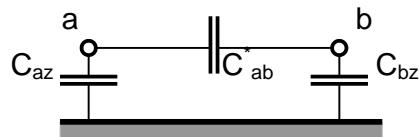
## 4.1. Parametri kabla

(efektivno) između bilo koja dva provodnika i 2000 V (efektivno) između provodnika i omotača (ekrana). Za merenja jednosmernom strujom ove vrednosti su 700 V (amplituda) između bilo koja dva provodnika i 2800 V (amplituda)<sup>1</sup> između provodnika i omotača. Provera dielektrične čvrstoće se obavlja u okviru kontrole kvaliteta pri preuzimanju kablova, kontrole kvaliteta izgrađene kablovske deonice kao i u nekim slučajevima kada su kablovi u zoni uticaja visokonaponskih postrojenja ili postrojenja elektrovuče.

Visokonaponski ispitni generatori se takođe mogu koristiti za proveru statičkog napona paljenja odgovarajućih prenaponskih zaštitnih elemenata kao i u nekim slučajevima lociranja mesta visokoomskih odvoda ukoliko su visokonaponski generatori realizovani sa izvorima jednosmerne struje.

### 4.1.5. Kapacitivnost voda

Kapacitivnost parice (voda) se može predstaviti kao kapacitivnost između provodnika parice i provodnika i metalnog omotača (ekrana) kabla, kao što je predstavljeno na slici 4.1.3.



Slika 4.1.3: Kapacitivnosti između metalnih delova kabla

Kapacitivnost parice  $C_{ab}$ , često nazvana radna kapacitivnost, predstavlja inherentnu kapacitivnost parice, data je izrazom 4.1.19 i reda je nanofarada (nF).

$$C_{ab} = C_{ab}^{\wedge} + \frac{C_{az} C_{bz}}{C_{az} + C_{bz}} \quad (4.1.19)$$

Pod inherentnom kapacitivnošću (engl. *mutual*) podrazumevamo ekvivalentnu kapacitivnost svih parcijalnih kapacitivnosti pojedinih žila kabla prema ostalima i omotaču (ekranu) kabla. Kapacitivnost parice podeljena sa dužinom kabla predstavlja podužnu kapacitivnost i izražava se u nF/km. Podužna kapacitivnost predstavlja **primarni parametar voda**.

Uticaj upredanja se valorizuje preko koeficijenta  $\lambda$  koji predstavlja odnos dužine parice i dužine kabla kao što je opisano u okviru teme otpornost petlje.

Najznačajniji je uticaj relativne dielektrične konstante  $\epsilon_r$  koja izražava osobine materijala primenjenih za izolaciju žila. Kako je izolacija žila uglavnom složenog sastava (na primer: vazdušno-papirna izolacija, penasti polietilen sa pokožicom od punog polietilena, međuprostor u kablu ispunjen vazduhom ili petrolatom itd.), ekvivalentna relativna dielektrična konstanta  $\epsilon_{re}$  se izračunava po obrascu:

<sup>1</sup> To znači da su i u jednosmernom i u naizmeničnom režimu amplitude ispitnih napona iste jer je veza amplitude i efektivne vrednosti data množenjem sa konstantom  $\sqrt{2}$ .

#### 4.1. Parametri kabla

---

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_{r1}S_1 + \varepsilon_{r2}S_2 + \varepsilon_{r3}S_3 + \dots + \varepsilon_m S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n} \quad (4.1.20)$$

gde su  $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}, \dots, \varepsilon_m$  – relativne dielektrične konstante sastavnih dielektrika i  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$  – površine poprečnih preseka sastavnih dielektrika. Orijentacione vrednosti relativne dielektrične konstante uobičajenih vrsta izolacije su date u tabeli tabeli 4.1.5.

Tabela 4.1.5. Vrednosti relativne dielektrične konstante uobičajenih vrsta izolacije

Vrsta izolacije	Vazduh	Papir	Vazduh-papir	Puni polietilen	Penasti polietilen	PVC	Petrolat	Voda
$\varepsilon_r$	1	1,6 – 1,7	1,5 – 1,6	2,3	1,7	3,6	$\leq 2,3$	80

Uticaj geometrijskih osobina elemenata použavanja je takav da podužna kapacitivnost:

- opada sa povećanjem rastojanja između osa provodnika;
- opada sa povećanjem odnosa prečnika žile i provodnika, odnosno opada sa smanjenjem gustine pakovanja i
- raste sa povećanjem prečnika provodnika.

Uticaj temperature i učestanosti se objašnjava činjenicom da temperaturni koeficijent kapaciteta raste sa porastom učestanosti, ali kapacitivnost opada zbog smanjenja vrednosti relativne dielektrične konstante sa porastom temperature. Uopšteno se može reći da je kapacitivnost parice praktično nezavisna od učestanosti, ukoliko dielektrična konstanta ostaje u uskim granicama promene.

Važećim propisima su određene maksimalne vrednosti podužne kapacitivnosti simetričnih parica kablova tipa TK za dati prečnik provodnika, vrstu izolacije, za učestanost od 800 Hz i na temperaturi od 20 °C. Ovo je prikazano u tabeli 4.1.6.

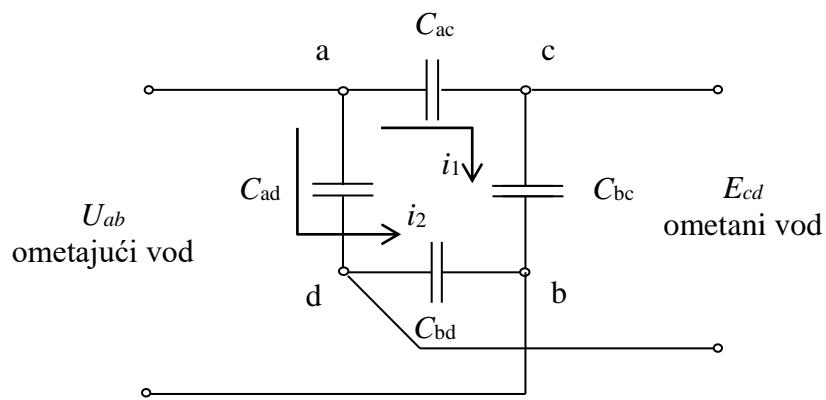
Tabela 4.1.6. Maksimalne vrednosti podužne kapacitivnosti simetričnih parica kablova tipa TK

Izolacija	Vazdušno papirna			Puni polietilen			Penasti polietilen		
$d$ (mm)	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
$C'$ (nF/km)	36	42	42	50	52	55	38	42	42

Merenje kapacitivnosti voda detaljno je opisano u poglavlju o primeni mostnih metoda.

#### 4.1.6. Kapacitivne sprege u kablu

U idealnom slučaju se očekuje potpuna međusobna simetrija provodnika u okviru parice, četvorke i celog kabla, kao i prema metalnom omotaču (ekranu) kabla što u praksi nije moguće ostvariti. Nesavršenost geometrije žila, parica i četvorki, materijala izolacije i koraka upredanja nastalih u proizvodnji kablova, narušena geometrija kao posledica neprimerene manipulacije kablovima kao i montažne greške narušavaju ovu simetriju što za posledicu ima neželjen prelaz elektromagnetne energije iz jednog u drugi vod kao i manju imunost na spoljne uticaje. Parametri koji karakterišu ovu nesimetriju su kapacitivne i magnetne sprege. U oblasti govornih učestanosti dominiraju kapacitivne sprege. Radi jasnijeg objašnjenja uticaja kapacitivnih sprega biće predstavljen primer preslušavanja u okviru jedne četvorke (o samom preslušavanju će više biti reči u okviru teme PRESLUŠAVANJE). Poslužićemo se šematskim prikazom sprege između osnovnih kola u četvorci (slika 4.1.5).



Slika 4.1.4. Sprege između osnovnih kola u četvorci

Kapacitivnosti  $C_{ac}$ ,  $C_{bc}$ ,  $C_{ad}$  i  $C_{bd}$  su prikazane kao grane Vitstonovog mosta. Pod uticajem napona  $U_{ab}$  kroz grane sa  $C_{ac}$  i  $C_{bc}$  teče struja  $i_1$  a kroz grane sa  $C_{ad}$  i  $C_{bd}$  struja  $i_2$ :

$$i_1 = U_{ab} \frac{j\omega C_{ab} \cdot C_{bc}}{C_{ac} + C_{bc}} \quad (4.1.21)$$

$$i_2 = U_{ab} \frac{j\omega C_{ad} \cdot C_{bd}}{C_{ad} + C_{bd}} \quad (4.1.22)$$

Veličina  $E_{cd}$  se dobija rešavanjem kola metodom superpozicije i nakon sređivanja se dobija:

$$E_{cd} = \frac{U_{ab}}{2} \left( \frac{C_{ac} - C_{bc}}{C_{ac} + C_{bc}} + \frac{C_{bd} - C_{ad}}{C_{bd} + C_{ad}} \right) \quad (4.1.23)$$

$$\frac{C_{ac} - C_{bc}}{C_{ac} + C_{bc}} + \frac{C_{bd} - C_{ad}}{C_{bd} + C_{ad}} = 0 \quad (4.1.24)$$

$$C_{ac} - C_{bc} + C_{bd} - C_{ad} = 0 \text{ nF} \quad (4.1.25)$$

## 4.1. Parametri kabla

---

$$K_1 = (C_{ac} + C_{bd}) - (C_{bc} + C_{ad}) \quad (4.1.26)$$

Kapacitivne sprege između osnovnih kola jedne i osnovnih kola druge četvorke, kao i između osnovnih i fantomnih kola kola ( $K_2 - K_{12}$ ) nemaju praktičan značaj te neće biti razmatrane.

Osim kapacitivnih sprega između kola, definisane su i kapacitivne sprege prema zemlji (u odnosu na omotač kabla) i to:

$$e_1 = C_{az} - C_{bz}, \quad (4.1.27)$$

$$e_2 = C_{cz} - C_{dz} \quad (4.1.28)$$

$$e_3 = (C_{az} + C_{bz}) - (C_{cz} + C_{dz}) \quad (4.1.29)$$

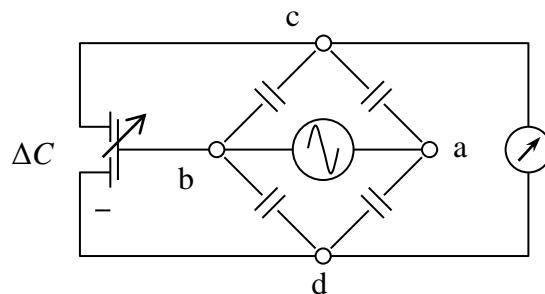
gde su  $C_{az}$ ,  $C_{bz}$ ,  $C_{cz}$  i  $C_{dz}$  kapacitivnosti žila prema zemlji.

Uobičajeno je da se kapacitivne sprege izražavaju u pF ( $10^{-12}$  F).

U pristupnoj mreži su za razmatranje značajnije kapacitivne sprege  $K_1$ ,  $e_1$  i  $e_2$ . Važeća regulativa predviđa gornje granične vrednosti kapacitivnih sprega  $K_1$ ,  $e_1$  i  $e_2$  za NF pretplatničke kablove sa vazdušno-papirnom izolacijom, punjene NF pretplatničke kablove sa polietilenskom izolacijom i za pretplatničke kablove sa izolacijom od penastog polietilena i slojevitim polietilenskim omotačem od 800 pF u 100 % slučajeva, dok za dužinu kabla od 300 m u 98 % slučajeva  $K_1$  ne može biti veće od 400 pF.

### Merenje kapacitivnih sprega

Ranije varijante merila kapacitivnih sprega su podrazumevale primenu mosta za čije uravnoveženje je korišćen promenljivi kondenzator sa tri izvoda kao što je prikazano na primeru merenja sprega  $K_1$  na slici 4.1.6.



Slika 4.1.5. Merni most sa promenljivim kondenzatorom sa tri izvoda

Savremenije metode podrazumevaju primenu neuravnoveženog mosta gde se signal sa izlaza pojačava i vodi na fazno osetljivi detektor i na taj način dobija signal proporcionalan merenoj kapacitivnoj sprezi (digitalno merilo sprega KM-5).

Ukoliko je zahtevani obim merenja kapacitivnih sprega mali (jedna, dve ili tri četvorke, na primer) merenje kapacitivnih sprega je moguće izvesti merenjem pojedinačnih kapacitivnosti i izračunavanjem vrednosti sprega.

### Izjednačenje kapacitivnih sprega (simetriranje linije)

Ova operacija se izvodi uglavnom u okviru radova na izgradnji, vrlo retko tokom eksploatacije. Predstavlja postupak neutralisanja neželjenih sprega i njihovo svođenje na vrednosti takve da budu zadovoljene norme slabljenja preslušavanja.

U opštem slučaju, sprege su kompleksne prirode s tim što u oblasti govornih učestanosti dominiraju kapacitivne sprege. Izjednačenje kompleksnih sprega u opsegu viših učestanosti namenjenih za rad analognih sistema prenosa po simetričnim paricama gubi na značaju zbog napuštanja ovih sistema prenosa.

Izjednačenje u opsegu frekvencija za širokopojasne digitalne sisteme u pristupnoj mreži takođe nema smisla zbog toga što su ovi sistemi koncipirani prema karakteristikama parica namenjenih za prenos govora.

Imajući ovo u vidu, zaključuje se da jedino izjednačenje kapacitivnih sprega u opsegu govornih učestanosti ima smisla. Ovo se slikovito može obrazložiti sledećim primerom. Pretpostavimo da se najudaljeniji izvod nalazi na 1500 m od glavnog razdelnika što predstavlja ekvivalent od 5 dužina kabla od po 300 m. Kako je važećom regulativom za dužinu od 300 m predviđena gornja granica kapacitivne sprege  $K_1$  od 400 pF, proizilazi da u najnepovoljnijem slučaju za dužinu od 1500 m  $K_1$  može biti do 2 nF.

Simetriranje se obavlja u okviru četvorke. Kao što je već napomenuto, u pristupnoj mreži su značajne kapacitivne sprege  $K_1$ ,  $e_1$  i  $e_2$ , te će biti razmatrano izjednačenje samo ovih sprega. Postoje dva osnovna postupka za izjednačenje kapacitivnih sprega (simetriranje) i to:

- Simetriranje pomoću kondenzatora i
- Simetriranje ukrštanjem.

Za oba postupka simetriranja (pomoću kondenzatora i ukrštanjem) je vrlo važno pravilno određivanje dužine deonice simetriranja. Za oticanje preslušavanja na bližem kraju dužina simetriranja ne sme biti veća od jedne četvrtine talasne dužine, tj:

$$L \leq \frac{\lambda}{4} = \frac{\frac{2\pi}{\beta}}{\frac{4}{1}} = \frac{\pi}{2\beta} \quad (4.1.30)$$

gde je  $\beta$  fazna konstanta (rad/km).

Suština zahteva za pravilnim određivanjem dužine deonice simetriranja je u tome što se neželjene sprege poništavaju (minimiziraju) protivspregama suprotnog znaka bilo da se radi o postupku simetriranja pomoću kondenzatora, bilo putem ukrštanja, što znači fazno pomerenim za  $\pi$  radijana. Idealan slučaj bi bio kada bi protivspregi delovala na mestu nastanka preslušanog signala što je u praksi nemoguće te se, imajući u vidu jednačine prostiranja, javlja manje ili veće odstupanje od zahtevanog faznog pomeraja što za posledicu

## 4.1. Parametri kabla

---

ima vektorsko a ne algebarsko sabiranje tako da u najnepovoljnijem slučaju umesto smanjenja možemo imati povećanje rezultujuće sprege.

S tim u vezi je interesantna analiza obrasca za određivanje dužine deonice simetriranja  $L$  ukrštanjem:

$$L = \frac{1}{\beta \sqrt{(n^2 - 1)} + \alpha} \quad (4.1.31)$$

gde je  $\beta$  – fazna konstanta (rad/km);  $n$  – broj koji pokazuje za koliko je puta potrebno smanjiti sprege u okviru deonice simetriranja i  $\alpha$  – konstanta slabljenja (Np/km).

Iz obrnute srazmernosti dužine sa  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $n$  proizilazi da, što su  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $n$  veći, to je dopuštena dužina deonice simetriranja manja što je i suština prethodnog izlaganja.

### *Simetriranje pomoću kondenzatora*

Ovaj način simetriranja se naziva još i koncentrisana metoda simetriranja. Ona podrazumeva dodavanje kondenzatora između odgovarajućih žila četvorke tako da rezultujuće vrednosti sprege iz obrazaca za  $K_1$ ,  $e_1$  i  $e_2$  teže nuli, odnosno da budu takve da se zadovolje norme slabljenja preslušavanja. Uočava se da se ovaj zahtev može ispuniti dodavanjem samo jednog kondenzatora, međutim, na taj način će se pokvariti ostale sprege i dodatno narušiti homogenost kabla. Iz tog razloga se stavljuju dva jednakaka kondenzatora čiji je zbir kapacitivnosti jednak potreboj vrednosti. U tabeli 4.1.7 je prikazan primer izjednačenja kapacitivne sprege  $K_1$ .

Tabela 4.1.7. Primer izjednačenja kapacitivne sprege

Sprega	Vrednost sprege	Kondenzator koji treba ugraditi			
		a-c	b-d	b-c	a-d
$K_1 = (C_{ac} + C_{bd}) - (C_{bc} + C_{ad})$	$> 0$	-	-	$K_1/2$	$K_1/2$
	$< 0$	$-K_1/2$	$-K_1/2$	-	-

**Napomena:** u slučaju izjednačenja  $e$  sprege potrebno je nakon obavljenog izjednačenja  $e$  sprege izmeriti  $K_1$  i izvršiti izjednačenje  $K_1$ , s obzirom na uticaj kapacitivnosti prema zemlji na vrednost kapacitivnosti između provodnika kao što je opisano na početku teme kapacitivnost.

Ovaj način simetriranja treba izbegavati zbog narušavanja homogenosti kabla. Izuzetno se koristi u srednjem nastavku deonice simetriranja ukoliko se ukrštanjem ne može postići zadovoljavajuće izjednačenje.

### *Simetriranje ukrštanjem*

Kod simetriranja ukrštanjem važno je imati na umu dve stvari:

- Rezultujuća kapacitivna sprege nakon spajanja četvorki susednih kablovske dužina je jednaka algebarskom zbiru pojedinačnih kapacitivnih sprega, što znači da će doći do oduzimanja ukoliko su suprotnog znaka.

#### 4.1. Parametri kabla

---

- Ukrštanjem a i b ili c i d žile doći će do promene znaka  $K_1$  sprege.

Ovo je očigledno iz sledećeg primera. Zamenom a i b žile  $K_1$  se transformiše na sledeći način:

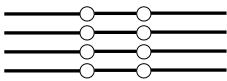
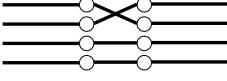
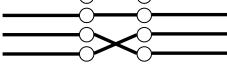
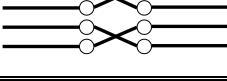
$$K_1 = (C_{ac} + C_{bd}) - (C_{bc} + C_{ad}). \quad (4.1.32)$$

$$K_1' = (C_{bc} + C_{ad}) - (C_{ac} + C_{bd}) = -[(C_{ac} + C_{bd}) - (C_{bc} + C_{ad})] = -K_1. \quad (4.1.33)$$

Isti efekat se postiže i kod e sprega.

Postoji ukupno 8 tipova ukrštanja. Četiri tipa ukrštanja interesantna za primenu u pristupnoj mreži su prikazana u tabeli 4.1.8.

Tabela 4.1.8. Tipovi ukrštanja žila u četvorci

Šema ukrštanja		Rezultujuće sprege	Rezultujuće sprege	Rezultujuće sprege
Strana A	Strana B	$K_1$	$e_1$	$e_2$
		$K_{1A} + K_{1B}$	$e_{1A} + e_{1B}$	$e_{2A} + e_{2B}$
		$K_{1A} - K_{1B}$	$e_{1A} - e_{1B}$	$e_{2A} + e_{2B}$
		$K_{1A} - K_{1B}$	$e_{1A} + e_{1B}$	$e_{2A} - e_{2B}$
		$K_{1A} + K_{1B}$	$e_{1A} - e_{1B}$	$e_{2A} - e_{2B}$

Diskutabilno je svođenje rezultujućih sprega na nulu kombinovanjem različitih četvorki susednih dužina kabla zato što se na taj način otežava rad kod izrade plana simetriranja, izrade simetričnog nastavka, dokumentacije izvedenog stanja i redovnog održavanja, a sve to, na primer, da bi slabljenje preslušavanja bilo bolje od 80 dB na  $600 \Omega$  pri učestanosti od 1020 Hz za slučaj da rezultujuća  $K_1$  ostane 100 pF.

Ovo se može korisno primeniti na neke slučajeve brzog rešavanja smetnji u pristupnoj mreži. Naime, u slučaju smetnje preslušavanja nastale kao posledica rasparenja, najčešće dvostrukog, učinjenog tokom izgradnje ili redovnog održavanja, može se privremeno otkloniti ukoliko je rasparena dužina bliska glavnom razdelniku ili izvodu, simetrijanjem pomoću kondenzatora na razdelniku ili izvodu, dok se ne steknu uslovi za definitivno otklanjanje. Ovo sve ima smisla ako se zna da je otklanjanje smetnje preslušavanja složenije od otklanjanja klasičnih smetnji jer se zahteva intervencija na dva nastavka, često na kablovima velikog kapaciteta.

#### 4.1.7. Odvodnost

Odvodnost  $G'$ , izražena u mS ( $10^{-3}$  S), kao parametar kabla u opsegu govornih učestanosti nije od značaja. Međutim, sve većim prodom širokopojasnog prenosa u pristupnoj mreži, postaje neophodno poznavati i njegovu ulogu. Odvodnost parice podeljena dužinom kabla predstavlja podužnu odvodnost  $G'$  i izražava se u mS/km ( $10^{-3}$  S/km). Podužna odvodnost je primarni parametar voda. Obrazac za izračunavanje odvodnosti glasi:

$$G' = [G_0' + \omega C' \operatorname{tg}(\delta)] \quad (4.1.34)$$

gde je  $G_0'$  – odvodnost pri jednosmernoj struji jednak recipročnoj vrednosti otpornosti izolacije;  $\omega$  – kružna učestanost;  $C'$  – podužna kapacitivnost i  $\operatorname{tg}\delta$  – tangens ugla gubitaka u dielektriku.

Tangens ugla gubitaka predstavlja karakteristiku materijala izolacije. Kako je u realnim uslovima izolacija žila uglavnom složenog sastava (na primer: vazdušno-papirna izolacija, ili penasti polietilen sa pokožicom od punog polietilena, međuprostor u kablu ispunjen vazduhom ili petrolatom itd.), ekvivalentni tangens ugla gubitaka se izračunava po obrascu:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon_{r1}S_1\operatorname{tg}(\delta_1) + \varepsilon_{r2}S_2\operatorname{tg}(\delta_2) + \dots + \varepsilon_mS_n}{\varepsilon_{r1}S_1 + \varepsilon_{r2}S_2 + \dots + \varepsilon_mS_n} \quad (4.1.35)$$

Orijentacione vrednosti tangensa ugla gubitaka nekih izolacionih materijala su date u tabeli 4.1.9.

Tabela 4.1.9. Tangens ugla gubitaka

Vrsta izolacije	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ na 10 kHz	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ na 100 kHz	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ na 250 kHz	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ na 550 kHz
Vazdušno-papirna	55	113	160	280
Puni polietilen	$2 \div 3$	$6 \div 8$	$8 \div 12$	$12 \div 20$

Vrednost  $G_0'$  se u praksi može zanemariti. U tom slučaju, a naročito za više učestanosti, navedeni obrazac za  $G'$  degeneriše u

$$G' \approx \omega C' \operatorname{tg}\delta. \quad (4.1.36)$$

Iz navedenog se zaključuje da, s obzirom na uticaj odvodnosti na slabljenje i faznu konstantu (očemu će kasnije biti reči), otpornost izolacije ne utiče bitno na širokopojasni prenos (niske vrednosti otpornosti izolacije sugerisu mogućnost povećane kapacitivnosti, ali to više nije uticaj otpornosti izolacije).

U tabeli 4.1.10 su date orijentacione vrednosti podužne odvodnosti parice kabla sa termoplastičnom izolacijom žila prečnika provodnika 0,4 mm na temperaturi 20 °C.

#### 4.1. Parametri kabla

---

Tabela 4.1.10. Podužne odvodnosti parice kabla sa termoplastičnom izolacijom žila prečnika provodnika 0,4 mm na temperaturi 20 °C

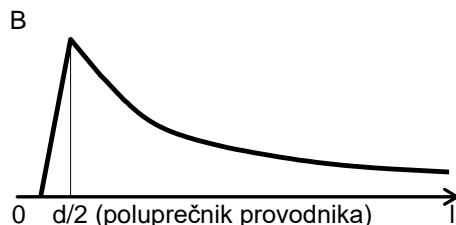
$f$ (Hz)	$G'$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
5 k	16,7
10 k	27,1
20 k	27,1
50 k	83,7
100 k	136,0
1 M	681,5
10 M	3415,6
30 M	7369,8

Merenje odvodnosti u pristupnoj mreži nije uobičajeno. Informativno se može pomenuti KKM 10, most za merenje kompleksnih sprega, firme F&G.

#### 4.1.8. Induktivnost

Induktivnost  $L$  parice (voda) izražava se u henrijima (H) i sastoji se od dve komponente:

- $L_s$  – spoljašnja induktivnost koja karakteriše uticaj polja van provodnika i zavisi od geometrijskih dimenzija parice i
- $L_U$  – unutrašnja induktivnost koja karakteriše polje u provodniku i menja se zavisno od učestanosti. Zbog skin efekta ideo ove komponente se smanjuje sa porastom učestanosti i pri visokim učestanostima je zanemarljiv.



Slika 4.1.6. Gustina magnetskog fluksa u funkciji rastojanja od centra provodnika  
Na slici 4.1.6. data je zavisnost gustine magnetskog fluksa  $B$  od rastojanja od centra provodnika.

Induktivnost se izražava u  $\mu\text{H}$  ( $10^{-6}$  H). Ukupna induktivnost parice  $L$  podeljena sa dužinom kabla predstavlja podužnu induktivnost  $L'$  i izražava se u  $\mu\text{H}/\text{km}$  ( $10^{-6}$  H/km).

Podužna induktivnost je primarni parametar voda i zavisi od:

- koeficijenta  $\lambda$  koji pokazuje koliko puta je veća dužina parice od dužine kabla. Koeficijent  $\lambda$  je opisan u okviru teme otpornost petlje;
- relativnog magnetnog permeabiliteta  $\mu_R$  i raste sa porastom  $\mu_R$ ;

#### 4.1. Parametri kabla

---

- učestanosti. Sa porastom učestanosti induktivnost opada;
- geometrijskih osobina parica/četvorki izraženih kao  $4 \ln \frac{2a-d}{d}$ , gde je  $a$  – rastojanje između osa provodnika i  $d$  – prečnik provodnika.
- podužne otpornosti za jednosmernu struju. Sa porastom otpornosti induktivnost opada.

Što se tiče uticaja temperature na podužnu induktivnost, ispitivanja su pokazala da se on praktično može zanemariti.

Tipične vrednosti podužne induktivnosti kablova primenjenih u pristupnoj mreži su približno 700  $\mu\text{H}/\text{km}$ .

U tabeli 4.1.11 su date orijentacione vrednosti podužne induktivnosti parice kabla sa termoplastičnom izolacijom žila prečnika provodnika 0,4 mm.

Tabela 4.1.11. Podužne induktivnosti parice kabla sa termoplastičnom izolacijom žila prečnika provodnika 0,4 mm

$f$ (Hz)	$L'$ ( $\mu\text{H}/\text{km}$ )
5 k	673,7
10 k	672,3
20 k	669,6
50 k	662,3
100 k	651,9
1 M	572,9
10 M	505,3
30 M	495,2

Merenje induktivnosti u pristupnoj mreži nije uobičajeno. Za merenje induktivnosti se može iskoristiti bilo koji iz mnoštva mostova za merenje induktivnosti o kojima čitalac može da se informiše iz priručnika za opšta električna merenja.

#### 4.1.9. Magnetske sprege

Analogno kapacitivnim spregama, i magnetske sprege se javljaju kao posledica poremećene geometrije u okviru četvorke. Između kapacitivne sprege  $K_1$  i magnetske sprege  $m_1$ , u okviru iste četvorke, postoji sledeći odnos:

$$\frac{K_1}{C} = \frac{m_1}{L} \quad (4.1.37)$$

Ovaj odnos se primenjuje na sprege koje su izazvane geometrijskom nesimetrijom, a ne razlikom dielektrika.

## 4.1. Parametri kabla

---

Slabljenje preslušavanja koje odgovara magnetskoj spregi  $m_1$  jednako je

$$a_{m1} = \ln \frac{2z}{\omega m_1} \text{ (Np).} \quad (4.1.38)$$

Za razliku od kapacitivnih sprega koje su dominantne u opsegu govornih učestanosti, delovanje magnetskih sprega počinje od učestanosti reda desetina kHz.

Za merenje magnetskih sprega ne postoji namenski instrument, međutim, one se mogu izračunati iz rezultata merenja dobijenih merilom admitansi KM6, pomenutim u okviru teme "Odvodnost".

### 4.1.10. Karakteristična impedansa

Impedansa  $Z$  ( $\Omega$ ) se generalno definiše kao ukupna otpornost koju električno kolo ili neki njegov deo pružaju prolasku naizmenične struje  $i$ , u slučaju parice kabla u pristupnoj mreži predstavlja važan parametar kako samo parice, tako i uopšte. Opšta važnost impedanse kao parametra proizilazi iz činjenica da se „aktivne“ parice završavaju nekim terminalnim uređajima koji takođe imaju neku impedansu, da smetnje odvoda nisu samo slaba izolacija itd.

Impedansa je kompleksna veličina i zavisi od otpornosti  $R$ , kapacitivnosti  $C$ , odvodnosti  $G$ , induktivnosti  $L$  i kružne učestanosti  $\omega = 2\pi f$ . Pojedinačno, ova zavisnost se predstavlja kao  $Z_R = R$ ,  $Z_C = 1/j\omega C$ ,  $Z_G = 1/G$  i  $Z_L = j\omega L$ , respektivno. Kao što se vidi,  $R$  i  $1/G$  su realne (aktivne), a  $1/j\omega C$  i  $j\omega L$  imaginarne (reaktivne) komponente. Kod aktivnih komponenti su napon i struja u fazi, dok su kod reaktivnih fazno pomereni. Stoga se kod primene omovog zakona na impedansu mora imati u vidu kompleksna priroda impedanse, napona i struje:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (4.1.39)$$

Recipročna vrednost impedanse predstavlja admitansu  $Y$  ( $S$ ) voda i ona je data izrazima  $Y_R = 1/R$ ,  $Y_C = j\omega C$ ,  $Y_G = G$ , i  $Y_L = 1/j\omega L$ .

Impedansa otvorenog voda je

$$Z_\infty = \frac{1}{G + j\omega C} \quad (4.1.40)$$

Otvoren vod je praktičnije okarakterisati putem admitanse

$$Y = G + j\omega C \quad (4.1.41)$$

Impedansa zatvorenog voda je

$$Z_0 = R + j\omega L. \quad (4.1.42)$$

#### 4.1. Parametri kabla

---

Impedansa voda zatvorenog nekom impedansom  $Z_p$  je definisana kao paralelna veza impedanse otvorenog voda i impedanse  $Z$

$$\frac{Z_\infty Z_p}{Z_\infty + Z_p} \quad (4.1.43)$$

i predstavlja ulaznu impedansu za dati slučaj.

Impedansa podeljena sa dužinom kabla predstavlja podužnu impedansu.

Odnos napona i struje u bilo kojoj tački beskonačnog homogenog voda je konstantan i predstavlja **karakterističnu impedansu voda  $\underline{Z}_c(\Omega)$** . Karakteristična impedansa voda se može definisati i kao impedansa kojom treba završiti vod da bi ulazna impedansa voda bila jednaka njoj samoj.

Karakteristična impedansa je sekundarni parametar voda i takođe se definiše kao geometrijska sredina impedansi pri zatvorenom i otvorenom vodu.

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Z}_\infty} \quad (4.1.44)$$

Kao što je ranije pomenuto,  $\underline{Z}_0 = R + j\omega L$  a umesto  $\underline{Z}_\infty$  praktičnije je koristiti  $\underline{Y} = G + j\omega C$ , pa se dobija

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (4.1.45)$$

Sređivanjem izraza se dobija moduo karakteristične impedanse

$$|\underline{Z}_c| = \sqrt[4]{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}} \quad (4.1.46)$$

te se karakteristična impedansa može izraziti u eksponencijalnom obliku kao

$$\underline{Z}_c = \sqrt[4]{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}} e^{j\varphi_z} \quad (4.1.47)$$

gde je argument

$$\varphi_z = \operatorname{arctg} \frac{\omega L G - \omega R C}{R G + \omega^2 L C} \quad (4.1.48)$$

Orijentacione vrednosti modula karakteristične impedanse i njenog argumenta za kable sa vazdušno papirnom izolacijom (VPI) i izolacijom od polietilena (PET) za prečnike provodnika 0,4 mm i 0,6 mm u opsegu do 1100 kHz su date u tabeli 4.1.12.

#### 4.1. Parametri kabla

Tabela 4.1.12. Vrednosti modula karakteristične impedanse i njenog argumenta

$f$ (kHz)	$ Z_c $ ( $\Omega$ ) VPI 0,4 mm	$ Z_c $ ( $\Omega$ ) VPI 0,6 mm	$ Z_c $ ( $\Omega$ ) PET 0,4 mm	$ Z_c $ ( $\Omega$ ) PET 0,6 mm	$-\varphi$ (rad) VPI 0,4 mm	$-\varphi$ (rad) VPI 0,6 mm	$-\varphi$ (rad) PET 0,4 mm	$-\varphi$ (rad) PET 0,6 mm
0,0	$(R_0/G_0)^{1/2}$	$(R_0/G_0)^{1/2}$	$(R_0/G_0)^{1/2}$	$(R_0/G_0)^{1/2}$	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	531,3	519,9	458,5	315,6	0,167	0,416	0,086	0,255
10,0	359,9	194,8	218,8	213,2	0,697	0,170	0,708	0,616
20,0	215,5	177,4	188,2	162,5	0,243	0,475	0,193	0,483
30,0	183,2	157,8	162,3	145,1	0,087	0,383	0,023	0,390
40,0	193,1	148,7	172,5	137,0	0,510	0,319	0,510	0,327
50,0	178,5	143,6	160,1	132,5	0,461	0,276	0,460	0,283
100,0	150,8	133,9	136,9	124,2	0,303	0,178	0,302	0,187
150,0	142,8	130,1	130,5	120,9	0,229	0,144	0,229	0,153
200,0	138,7	127,7	127,4	119,0	0,185	0,127	0,187	0,136
250,0	136,5	125,9	125,7	117,4	0,164	0,112	0,167	0,122
300,0	134,7	124,6	124,3	116,3	0,149	0,103	0,151	0,113
350,0	133,2	123,5	123,2	115,4	0,136	0,095	0,139	0,106
400,0	132,0	122,7	122,3	114,7	0,127	0,089	0,131	0,100
450,0	130,9	121,9	121,6	114,1	0,119	0,084	0,124	0,095
500,0	130,0	121,3	120,9	113,6	0,113	0,080	0,118	0,090
550,0	129,2	120,8	120,3	113,1	0,108	0,076	0,113	0,087
600,0	128,5	120,4	119,8	112,7	0,104	0,072	0,108	0,083
650,0	127,9	120,0	119,3	112,4	0,100	0,069	0,105	0,080
700,0	127,3	119,6	118,9	112,1	0,096	0,066	0,101	0,077
750,0	126,8	119,3	118,5	111,8	0,093	0,064	0,098	0,075
800,0	126,3	119,0	118,1	111,6	0,090	0,061	0,096	0,073
850,0	125,9	118,7	117,8	111,3	0,087	0,059	0,093	0,071
900,0	125,5	118,5	117,5	111,1	0,085	0,057	0,091	0,069
950,0	125,1	118,3	117,2	110,9	0,083	0,056	0,089	0,067
1000,0	124,7	118,1	116,9	110,8	0,081	0,054	0,087	0,066
1050,0	124,4	117,9	116,7	110,6	0,079	0,052	0,085	0,064
1100,0	124,1	117,7	116,5	110,5	0,077	0,051	0,083	0,063

Ove vrednosti su preuzete iz priloga Pravilniku o kontroli kvaliteta višekanalnih digitalnih sistema prenosa za primenu u pristupnoj telekomunikacionoj mreži, izdavača ZJPTT, Beograd, 2004. godine i nisu obavezujuće za ispitivanje parica.

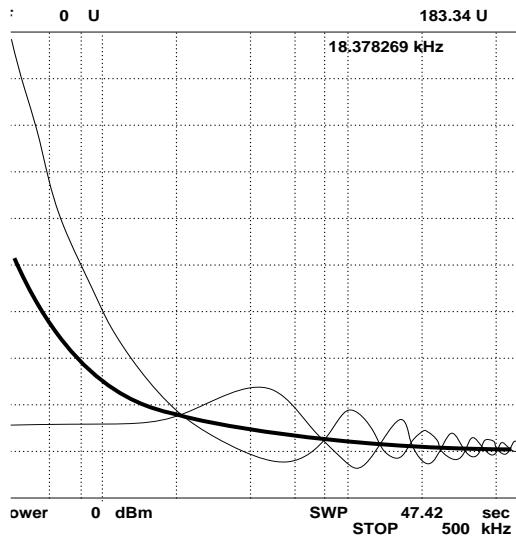
U originalu su kompleksne vrednosti karakteristične impedanse predstavljene u algebarskom obliku. Vrednosti modula karakteristične impedanse u prikazanoj tabeli su izračunate po Pitagorinoj teoremi a argument kao arctg odnosa imaginarnog i realnog dela.

**Napomena:** Karakteristična impedansa parica kod kablova sa upredanjem u parice i kablova sa upredanjem u četvorke se unekoliko razlikuju.

Grafički prikaz frekvencijske zavisnosti modula karakteristične impedanse i impedansi pri otvorenom i zatvorenom vodu je dat na dijagramu na slici 4.1.7.

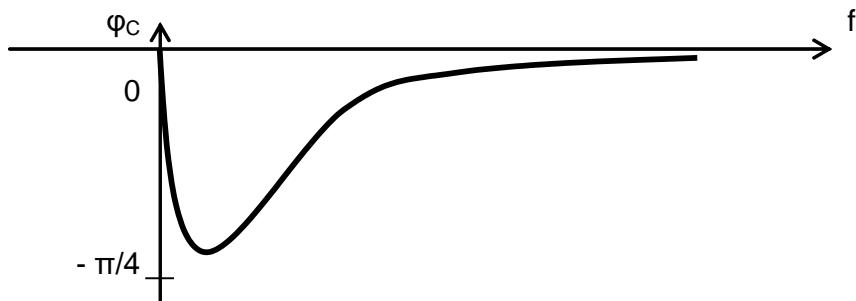
#### 4.1. Parametri kabla

---



Slika 4.1.7. Frekvencijska zavisnost modula karakteristične impedanse

Tipičan izgled frekvencijske zavisnosti argumenta karakteristične impedanse je dat na slici 4.1.8.



Slika 4.1.8. Frekvencijska zavisnost argumenta karakteristične impedanse

Sa prikazanog dijagrama i iz prethodne tabele je očigledno da sa porastom učestanosti  $\phi_C$  teži nuli te se zaključuje da je karakteristična impedansa za visoke učestanosti praktično realna veličina. U tom smislu se za visoke učestanosti može učiniti pretpostavka da je  $\omega L \gg R$  i  $\omega C \gg G$  pri kojoj obrazac za karakterističnu impedansu postaje

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1.49)$$

Isto važi i za vod bez gubitaka ( $R = 0 \Omega$  i  $G = 0 S$ ). Međutim, ovo su ipak proizvoljne aproksimacije zato što sa porastom učestanosti rastu i  $R$  i  $G$ , mada sporije. Takođe, ma koliko u stvarnosti mala bila dužina kabla u pristupnoj mreži, gubici se ne mogu zanemariti.

Što se tiče ponašanja karakteristične impedanse u oblasti niskih učestanosti (ispod 800 Hz), približni obrasci su:

#### 4.1. Parametri kabla

---

$$\underline{Z}_c \approx \sqrt{\frac{R' + \omega L'}{2\omega C'} - j \frac{R' - \omega L'}{2\omega C'}} \quad (4.1.50)$$

a moduo i argument:

$$|\underline{Z}_c| \approx \sqrt{\frac{R'}{\omega C'}} \quad (4.1.51)$$

$$\varphi_c = \arctg \frac{R' - \omega L'}{R' + \omega L'} \quad (4.1.52)$$

Za  $\omega L \ll R$ , dobija se da je  $\operatorname{tg} \varphi_c = -1$ , pa je

$$\varphi_c = -\frac{\pi}{4} \quad (4.1.53)$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{R}{\omega C}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (4.1.54)$$

Po bakarnim paricama rade sistemi u razlicitim spektrima ucestanosti. Kako terminalni uređaji ne mogu obezbediti prilagođenje u celom spektru, to su za određene tipove signala uvedeni pojmovi referentne ucestanosti i definisane nominalne vrednosti karakteristične impedanse koje predstavljaju impedansu sistema  $Z_s$ . Ovo je predstavljeno u tabeli 4.1.13.

Tabela 4.1.13. Nominalne vrednosti karakteristične impedanse

Tip signala	NF analogni po pupinovanom vodu	NF analogni po nepupinovanom vodu	VF analogni	HDSL-2B1Q	E1-HDB3	ADSL-DMT
$Z_s(\Omega)$	1200	600	150	135	120	100

Karakteristična impedansa meri se istim postupcima za merenje impedanse, opisanim u nastavku ovog poglavlja, s tim što se karakteristična impedansa izračunava kao geometrijska sredina impedansi pri otvorenom i zatvorenom vodu osim metode mrežne analize. Metoda mrežne analize primenjena kod analizatora linije TN-10 se može iskoristiti za merenje karakteristične impedanse tako što bi se vod završio promenljivom otpornošću i izvršilo merenje impedanse. Izmerena vrednost impedanse pri maksimalnom slabljenju refleksije (navedeni instrument „meri“ oba parametra istovremeno) predstavlja karakterističnu impedansu. Ovaj pristup se može primeniti reflektometrom, ali je rezolucija (nepreciznost) neprihvatljivo velika.

## 4.1. Parametri kabla

---

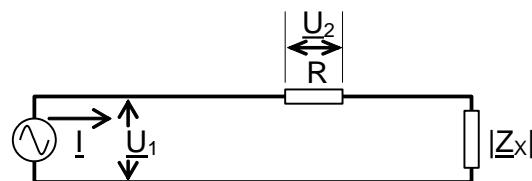
### Merenje impedanse

Postoji pet metoda merenja impedanse a to su:

- mostna metoda
- UI metoda
- metoda mrežne analize
- samobalansirajući most i
- rezonantna metoda

Mostna metoda, kao i metoda samobalansirajućeg mosta za merenje nepoznate impedanse, biće objašnjene u poglavlju posvećenom mostnim metodama

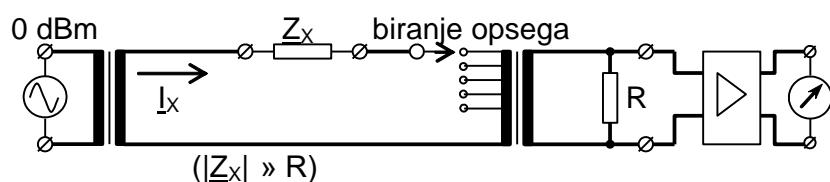
UI metoda podrazumeva izračunavanje nepoznate impedanse koristeći merni napon i pad napona na otporniku male vrednosti (slika 4.1.9). Radi smanjenja greške merenja se u praksi umesto otpornika R koristi transformator niskih gubitaka.



Slika 4.1.9. Šema merenja UI metodom

$$|Z_x| = \left| \frac{U_1}{I} \right| = R \left| \frac{U_1}{U_2} \right| \quad (4.1.55)$$

Modifikovana varijanta primene UI metode koju predstavlja Simensov merni pribor B 2005 namenjen za merenje impedanse itd, u opsegu  $0,2 \div 1600$  kHz, prikazana je na slici 4.1.10.



Slika 4.1.10. Simensov merni pribor B 2005

Metoda mrežne analize primenjena kod analizatora linije TN-10, proizvođača W&G, se zasniva na merenju slabljenja refleksije (o čemu će kasnije biti više reči), i iz obrasca za koeficijent refleksije se izračunava impedansa koju treba izmeriti. Njena ograničenja su uži frekvencijski opseg primene i zahtev da merena impedansa bude bliska nominalnoj.

Rezonantna metoda se zasniva na direktnom merenju faktora dobrote  $Q$  oscilatornog kola u čiji sastav ulazi nepoznata impedansa u uslovima rezonancije i nema značaja za merenja u pristupnoj mreži.

#### 4.1.11. Prilagođenje voda i refleksije

Pod prilagođenjem se uopšteno podrazumeva usaglašenost impedansi. Usaglašenost impedansi je potrebna da bi se na prijemni uređaj prenela maksimalna snaga predajnika. Ovo podrazumeva usaglašenost impedansi predajnika i voda, voda i prijemnika kao i različitih sekcija voda ukoliko nije homogen. U opštem slučaju, prilagođenje se postiže ukoliko su impedanse  $Z_A$  i  $Z_B$  konjugovano kompleksne, to jest  $\operatorname{Re}\{Z_A\} + j\operatorname{Im}\{Z_A\} = \operatorname{Re}\{Z_B\} - j\operatorname{Im}\{Z_B\}$ . Kako u oblasti viših učestanosti imaginarni deo impedanse teži nuli, to se smatra da je prilagođenje postignuto ako su izjednačeni realni delovi.

Prilikom merenja slabljenja preslušavanja, nivoa šuma i drugih parametara vezanih za slabljenje i snagu, potrebno je suprotan kraj voda u odnosu na predajnik i/ili prijemnik završiti karakterističnom impedansom. Samo tako se dobijaju realni rezultati i izbegava se greška merenja koju uzrokuju refleksije. U vezi s tim neka iskustva pokazuju da, ako je sopstveno slabljenje voda:

- do 3 dB, mora se za svaku učestanost u spektru voditi računa o karakterističnoj impedansi, odnosno terminirajuća impedansa treba da je kompleksna i promenljiva u celom opsegu učestanosti;
- od 3 do 6 dB, završna impedansa se može karakterisati samo modulom, odnosno može biti realna (otpornik), ali je i dalje promenljive vrednosti za svaku učestanost;
- 6 dB do 20 dB, dovojno je imati samo jednu fiksnu vrednost modula impedanse (fiksni otpornik) u celom opsegu učestanosti, i
- preko 20 dB, završna impedansa se može izostaviti, jer je slabljenje voda tokliko veliko da se vod ponaša kao da je beskonačan.

Međutim, pitanje je da li je za merenja od interesa da se traže slabljenja za sve ove slučajeve ili je bitnije odrediti slabljenje samo za realan slučaj terminirajuće impedanse koju će imati komunikacioni uređaji. Naravno, situacija da terminacije ne utiču na rezultate merenja ako je slabljenje veće od 20 dB je najinteresantnija jer omogućava da se pri masovnim merenjima uštedi vreme koje bi bilo potrebno da se krajevi terminiraju.

Neusaglašenost impedansi, kao i bilo koja nehomogenost na vodu, prouzrokuju refleksiju dela signala što predstavlja gubitak korisne snage. Meru refleksije predstavlja koeficijent refleksije  $\rho$ . Koeficijent refleksije za napon ( $\underline{\rho}_U$ ) na mestu prijemnika impedanse  $\underline{Z}_P$  jednak je odnosu kompleksnih predstavnika reflektovanih ( $\underline{U}_R$ ) i direktnih ( $\underline{U}_D$ ) talasa:

$$\underline{\rho}_U = \frac{\underline{U}_R}{\underline{U}_D} = \frac{\underline{Z}_P - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_P + \underline{Z}_C} \quad (4.1.56)$$

Koeficijent refleksije za struju ima istu vrednost, samo je suprotnog znaka. Vrednost koeficijenta refleksije za napon se kreće od -1 za kratko spojen, do +1 za otvoren vod.

Logaritam inverznog odnosa reflektovane i pobudne snage predstavlja slabljenje refleksije i izračunava se po obrascu:

$$a_r = 10 \log \left| \frac{1}{\underline{\rho}} \right|^2. \quad (4.1.57)$$

Posle zamene izraza 4.1.56 u 4.1.57 dobija se

$$a_r = 20 \log \left| \frac{\underline{Z} + \underline{Z}_c}{\underline{Z} - \underline{Z}_c} \right|. \quad (4.1.58)$$

#### 4.1.12. Konstanta prenosa

Konstanta prenosa  $\gamma$  je sekundarni parametar voda i karakteriše prirodu ponašanja signala duž voda u pogledu slabljenja i faznog pomeraja napona ili struje i data je izrazom:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\frac{\underline{Z}'_0}{\underline{Z}'_\infty}} = \sqrt{\underline{Z}'_0 \cdot \underline{\gamma}'} = \sqrt{(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')}. \quad (4.1.59)$$

Sređivanjem izraza se dobija moduo konstante prenosa:

$$\underline{\gamma} = \sqrt[4]{(R'^2 + \omega^2 L'^2)(G'^2 + \omega^2 C'^2)} \quad (4.1.60)$$

i argument

$$\varphi_\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\omega L' G' + \omega R' C'}{R' G' - \omega^2 L' C'} \quad (4.1.61)$$

Kao što se vidi, konstanta prenosa zavisi od učestanosti i primarnih parametara voda (podužne otpornosti, kapacitivnosti, odvodnosti i induktivnosti).

Odnos kompleksnih napona na početku ( $\underline{U}_1$ ) i na kraju ( $\underline{U}_2$ ) voda dužine  $l$ , napisanih u eksponencijalnom obliku je

$$\frac{|\underline{U}_1| e^{j\varphi_1}}{|\underline{U}_2| e^{j\varphi_2}} = \frac{|\underline{U}_1|}{|\underline{U}_2|} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (4.1.62)$$

Ovde je:

$$\frac{|\underline{U}_1|}{|\underline{U}_2|} = e^{\alpha l} \quad (4.1.63)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \beta l, \quad (4.1.64)$$

pa izraz 4.1.63 dobija oblik 4.1.65.

## 4.1. Parametri kabla

---

$$\frac{|\underline{U}_1| e^{j\varphi_1}}{|\underline{U}_2| e^{j\varphi_2}} = e^{\alpha l} e^{j\beta l} = e^{(\alpha + j\beta)l} = e^{l\underline{\gamma}}, \quad (4.1.65)$$

Odatle je

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta, \quad (4.1.66)$$

gde su  $\alpha$  – konstanta slabljenja (Np/km) i  $\beta$  – fazna konstanta (rad/km), data sa

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.1.67)$$

pri čemu je  $\lambda$  – talasna dužina.

Konstanta slabljenja voda na višim učestanostima ( $> 5$  kHz) je:

$$\alpha \approx \left[ \frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L'}} + \frac{G'}{2} \sqrt{\frac{L'}{C'}} \right] \cdot 8,686 \text{ (dB)} \quad (4.1.68)$$

a fazna konstanta:

$$\beta \approx \omega \sqrt{L' C'} \left( \frac{\text{rad}}{\text{km}} \right) \quad (4.1.69)$$

Množenjem konstante prenosa sa dužinom dobija se:

$$\underline{\gamma}l = \alpha l + j\beta l \quad (4.1.70)$$

tj.

$$\underline{g} = a + jb \quad (4.1.71)$$

gde je  $\underline{g} = \underline{\gamma}l$  – prenosna funkcija voda dužine  $l$ ;  $a = \alpha l$  – sopstveno slabljenje voda dužine  $l$  i  $b = \beta l$  – faza voda dužine  $l$ .

### 4.1.13. Sopstveno slabljenje

Prilikom prolaska signala kroz vod njihova snaga slabi. To u određenim situacijama može prouzrokovati probleme u rekonstrukciji signala na prijemu, a u ekstremnim i na razlikovanju signala od šuma. Sopstveno slabljenje linije predstavlja parametar koji treba brojno da opiše iznos za koji će opisati snagu signala koji prolazi kroz dati vod.

Iz izraza

$$\frac{|\underline{U}_1|}{|\underline{U}_2|} = e^{\alpha l} \quad (4.1.72)$$

napisanog u obliku

$$\frac{U_1}{U_2} = e^a \quad (4.1.73)$$

može se izraziti sopstveno slabljenje kao

#### 4.1. Parametri kabla

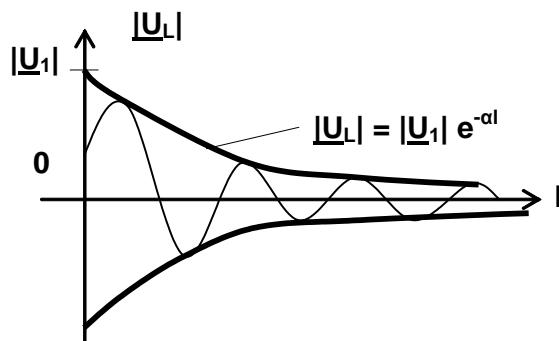
---

$$a = \left( \ln \frac{U_1}{U_2} \right) \cdot 8,686 \text{ (dB)} \quad (4.1.74)$$

ili rečima: sopstveno slabljenje voda izraženo u neperima predstavlja prirodni logaritam odnosa napona na početku i na kraju voda. Izraz 4.1.74 se može predstaviti kao napon u funkciji dužine voda  $l$

$$|U_L| = |U_1| e^{-\alpha l} \quad (4.1.75)$$

Ova zavisnost predstavlja envelopu amplitude sinusoide prostirućeg talasa. Grafička predstava ove zavisnosti je data na slici 4.1.11.



Slika 4.1.11. Slabljenje signala u funkciji rastojanja

Približan obrazac za sopstveno slabljenje voda dužine 1 na višim učestanostima ( $>5 \text{ kHz}$ ) glasi:

$$a \approx \left[ \frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L'}} + \frac{G'}{2} \sqrt{\frac{L'}{C'}} \right] \cdot 8,686 \text{ (dB)} \quad (4.1.76)$$

Na nižim učestanostima se  $\frac{G'}{2} \sqrt{\frac{L'}{C'}}$  može zanemariti (iznosi približno 2 do 8 % prvog člana) te je slabljenje:

$$a \approx \left[ \frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \right] \cdot 8,686 \text{ (dB)} \quad (4.1.77)$$

Telekomunikaciona merna oprema je kalibrirana u naponskim nivoima ili nivoima snage. Termin nivo (napona ili snage) podrazumeva logaritamski odnos napona ili snage u nekoj tački telekomunikacionog sistema prema naponu ili snazi normalnog generatora. Normalan generator predstavlja izvor napona od 774,6 mV koji na opterećenju od  $600 \Omega$  disipira snagu od 1 mW. Nivo normalnog generatora se smatra nultim nivoom napona ili snage.

Mnogobrojni propisi regulišu pitanje (sopstvenog) slabljenja i/ili konstante slabljenja bilo da je u pitanju Generalni plan, Tehnički uslovi, uputstva ili pravilnici. U tabeli 4.1.14 su navedene tipične vrednosti poduznog slabljenja (konstante slabljenja)  $\alpha$  kabova u pristupnoj mreži na učestanosti od 800 Hz.

#### 4.1. Parametri kabla

Tabela 4.1.14. Tipične vrednosti podužnog slabljenja na 800 Hz

Podaci o kablu	Vazdušno-papirna izolacija			Puni polietilen			Penasti polietilen		
	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm
$\alpha$ (dB/km)	1,30	0,91	0,69	1,49	0,99	0,78	1,30	0,91	0,69

Orijentacione vrednosti konstrante slabljenja u dB/km u frekvencijskom opsegu do 1100 kHz za podzemne kablove sa vazdušno papirnom izolacijom i izolacijom od punog polietilena, prečnika provodnika 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm mereno sa završnom otpornošću od  $135 \Omega$  i  $100 \Omega$  su predstavljene u tabeli 4.1.15.

Tabela 4.1.15. Orijentacione vrednosti konstrante slabljenja u dB/km za nekoliko tipova kablova

$f$ (kHz)	$Z = 135 \Omega$						$Z = 100 \Omega$					
	VPI			PET			VPI			PET		
	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm
0	3,7	1,8	1,0	3,7	1,8	1,1	4,7	2,4	1,4	4,7	2,4	1,4
2,5	4,3	2,1	1,6	4,3	2,3	1,5	5,2	2,6	2,0	5,2	2,8	1,8
10	5,5	3,1	2,0	5,7	3,2	2,3	6,2	3,4	2,1	6,4	3,5	2,4
20	6,6	3,7	2,3	7,0	3,9	2,7	7,2	3,9	2,5	7,5	4,0	2,7
30	7,4	4,1	2,6	7,9	4,2	3,0	7,8	4,3	2,7	8,2	4,4	3,0
40	8,0	4,4	2,9	8,5	4,5	3,3	8,4	4,5	3,0	8,8	4,6	3,3
50	8,4	4,6	3,2	8,9	4,8	3,5	8,7	4,8	3,3	9,2	4,8	3,5
100	9,8	6,0	4,6	10,2	6,0	4,9	10,1	6,1	4,6	10,4	6,0	4,9
150	11,0	7,3	5,7	11,2	7,1	6,1	11,2	7,4	5,8	11,3	7,2	6,0
200	11,9	8,6	6,8	11,9	8,3	7,1	12,1	8,7	6,85	12,0	8,4	7,0
250	13,2	9,7	7,7	13,1	9,3	7,9	13,4	9,7	7,8	13,2	9,3	7,8
300	14,4	10,7	8,6	14,1	10,2	8,7	14,6	10,8	8,6	14,2	10,2	8,6
350	15,5	11,7	9,4	15,1	11,0	9,4	15,7	11,8	9,4	15,2	11,0	9,3
400	16,7	12,7	10,2	16,1	11,8	10,1	16,8	12,7	10,2	16,1	11,8	10,0
450	17,8	13,6	10,9	17,0	12,6	10,7	17,9	13,6	10,9	17,1	12,6	10,6
500	18,8	14,4	11,6	17,9	13,3	11,3	19,0	14,5	11,6	18,0	13,2	11,2
550	19,9	15,2	12,3	18,8	13,9	11,8	20,0	15,3	12,3	18,9	13,9	11,7
600	20,9	16,0	12,9	19,7	14,6	12,4	21,0	16,1	12,9	19,7	14,5	12,2
650	21,9	16,8	13,6	20,5	15,2	12,9	22,0	16,8	13,6	20,5	15,1	12,8
700	22,9	17,5	14,2	21,3	15,8	13,4	23,0	17,65	14,2	21,3	15,7	13,2
750	23,8	18,3	14,8	22,1	16,3	13,9	23,9	18,3	14,8	22,1	16,3	13,7
800	24,7	19,0	15,4	22,85	16,9	14,3	24,8	19,0	15,4	22,9	16,8	14,2
850	25,6	19,6	16,0	23,6	17,4	14,8	25,7	19,7	16,0	23,6	17,3	14,6
900	26,5	20,3	16,5	24,3	17,9	15,2	26,6	20,3	16,5	24,3	17,8	15,1
950	27,4	21,0	17,1	25,0	18,4	15,6	27,5	21,0	17,1	25,0	18,3	15,5
1000	28,2	21,6	17,6	25,7	18,9	16,0	28,3	21,6	17,6	25,7	18,8	15,9
1050	29,0	22,3	18,2	26,3	19,4	16,4	29,1	22,3	18,2	26,3	19,3	16,3
1100	29,8	22,9	18,7	27,0	19,8	16,8	29,9	22,9	18,7	27,0	19,8	16,7

## 4.1. Parametri kabla

---

Ove vrednosti su preuzete iz priloga Pravilniku o kontroli kvaliteta višekanalnih digitalnih sistema prenosa za primenu u pristupnoj telekomunikacionoj mreži, izdavača ZJPTT, Beograd, 2004. godine i nisu obavezujuće za ispitivanje parica.

### Merenje sopstvenog slabljenja

Merenje sopstvenog slabljenja se izvodi slanjem signala određenog nivoa i učestanosti putem odgovarajućeg generatora i njegovim merenjem na suprotnom kraju.

Pretpostavimo da na početku voda imamo neki nivo generatora  $n_G$  (dBm), a na kraju nivo prijemnika  $n_P$  (dBm). Sopstveno slabljenje voda će u tom slučaju biti:

$$a = (n_G - n_P) \text{ (dB)}, \quad (4.1.78)$$

dakle, jednako razlici predajnog i prijemnog nivoa.

Ovo važi kada su predajnik i prijemnik prilagođeni na vod. Ukoliko ovaj zahtev nije ispunjen, važe sledeće korekcije.

Stvaran nivo signala generatora je

$$n'_G = n_G + 10 \log \frac{Z_G}{Z_C} = n_G + 10 \log \frac{Z_G}{Z_C} \quad (4.1.79)$$

a stvaran nivo signala na prijemniku je

$$n'_P = n_P + 10 \log \frac{Z_C}{Z_P} \quad (4.1.80)$$

Korigovano sopstveno slabljenje iznosi:

$$a' = n'_G - n'_P = n_G + 10 \log \frac{Z_G}{Z_C} - \left[ n_P + 10 \log \frac{Z_C}{Z_P} \right] \quad (4.1.81)$$

Radi procene uticaja terminirajućih impedansi na merenje sopstvenog slabljenja pretpostavimo da je

$$Z_G = Z_P = Z \quad (4.1.82)$$

Tada će 4.1.82 postati

$$a' = n_G - n_P - 20 \log \frac{Z_C}{Z} = a - 20 \log \frac{Z_C}{Z} \quad (4.1.83)$$

Ovde su  $n_G$  i  $n_P$  – izmereni nivoi generatora i prijemnika (merila);  $Z_G$  i  $Z_P$  – impedanse generatora i prijemnika (merila) i  $Z_C$  – karakteristična impedansa voda.

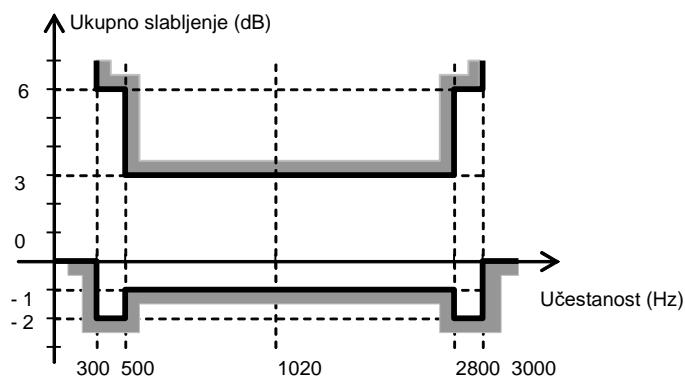
#### 4.1. Parametri kabla

Ovo ne treba mešati sa korekcijom koja se primenjuje kada se izvode merenja na sistemima impedanse različite od  $600 \Omega$  sa instrumentima kalibriranim u naponskim nivoima.

#### Izobličenja slabljenja

Pod izobličenjima slabljenja se podrazumeva razlika slabljenja na nekoj učestanosti u zahtevanom spektru i slabljenja na odgovarajućoj referentnoj učestanosti. Referentna učestanost u govornom opsegu je 1020 Hz, prema ITU-T preporuci O.6. Zavisnost izobličenja slabljenja od učestanosti je direktna, a od primarnih parametara voda indirektna (nehomogenost).

Primer regulative predstavlja maska izobličenja slabljenja za vod za prenos podataka normalnog kvaliteta prema ITU-T preporuci M.1020, predstavljena na slici 4.1.12.



Slika 4.1.12. Izobličenje slabljenja za vod za prenos podataka normalnog kvaliteta prema ITU-T preporuci M 1020

Merenje izobličenja slabljenja se izvodi merenjem sopstvenog slabljenja i izračunavanjem vrednosti izobličenja. Namenski instrumenti za merenje izobličenja slabljenja su obično integrисани sa merilima izobličenja grupnog kašnjenja, međutim, smanjenjem udela analognog prenosa, smanjen je značaj merenja izobličenja slabljenja i grupnog kašnjenja u pristupnoj mreži, a savremeni terminalni uređaji (modemi) obezbeđuju kvalitetnu ekvilizaciju kako nivoa tako i grupnog kašnjenja.

#### 4.1.14. Pupinovanje

U ranijem, isključivo analognom okruženju, potreba da se poveća domet (smanji slabljenje) preplatničkih i spojnih kablova rešavana je pupinovanjem kao najpodesnijim rešenjem. To je podrazumevalo ugradnju Pupinovih kalemova određene induktivnosti i na određenim rastojanjima dobijenim proračunom. Ovo je u sadašnjem trenutku postalo ograničavajući faktor u pružanju usluga širokopojasnog pristupa s obzirom da klasični Pupinovi kalemovi onemogućuju prenos iznad govornog opsega.

Uticaj Pupinovih kalemova na izvođenje merenja u pristupnoj mreži se ogleda u sledećem:

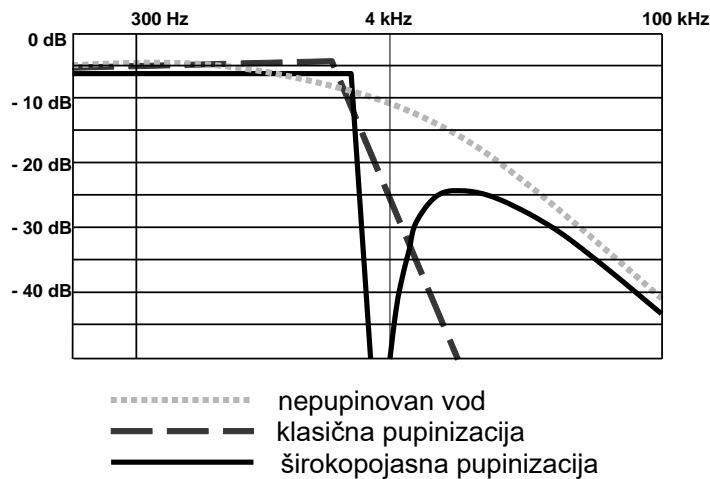
- Korišćenje standardnih reflektometara je ograničeno do prve „pupinke“ zbog širokog spektra učestanosti predajnog impulsa standardnih reflektometara;

## 4.1. Parametri kabla

---

- Dodatno unešena otpornost u obliku otpornosti „pupinke“ se mora uzeti u obzir kod analize rezultata merenja otpornosti petlje i lociranja mesta smetnji mostovskim metodama jednosmernom strujom;
- Kod rada sa mostovima naizmenične struje mogu se primeniti samo vrlo niske učestanosti  $\omega L$  mora biti mnogo manje od  $\frac{1}{\omega C}$  i
- Rezultati merenja slabljenja i impedanse se kod pupinovanih vodova bitno razlikuju od rezultata merenja na nepupinovnim vodovima.

Interesantno je napomenuti da su u skorije vreme u SAD, sa ciljem da se omogući usluga ADSL i preplatnicima udaljenijim od 6 km, razvijeni „pametni“ (smart) kalemovi koji omogućavaju širokopojasni prenos. Na slici 4.1.13 je dat uporedni prikaz frekvencijskih karakteristika nepupinovanih kablova, kablova pupinovanih klasičnim kalemovima i kablova pupinovanih širokopojasnim „pupinkama“.



Slika 4.1.13. Frekvencijske karakteristike nepupinovanih kablova, kablova pupinovanih klasičnim kalemovima i kablova pupinovanih širokopojasnim „pupinkama“

### 4.1.15. Fazna brzina prostiranja

Fazna brzina prostiranja je sekundarni parametar voda i definisana je kao

$$\nu = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.1.84)$$

Zamenom

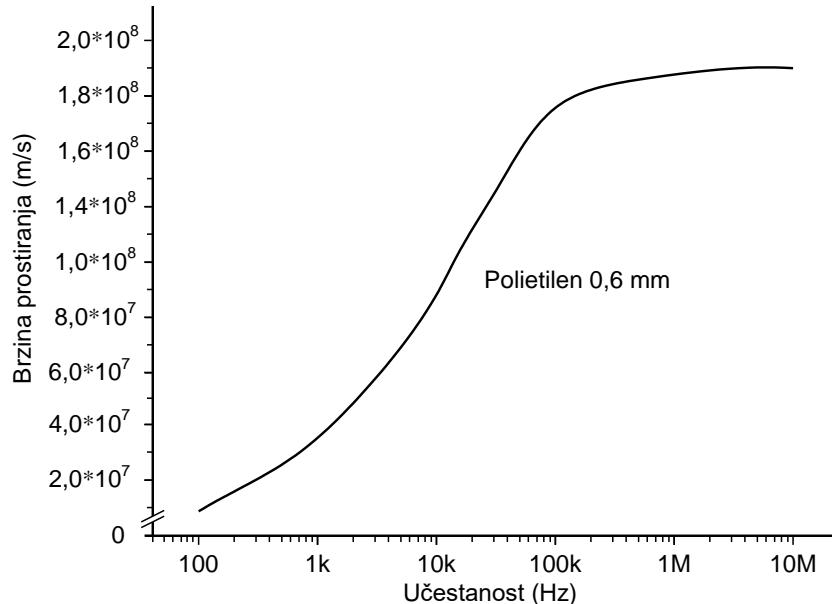
$$\beta \approx \omega \sqrt{L'C'} \quad (4.1.85)$$

za slučaj da su  $R = 0 \Omega$  i  $G = 0 \text{ S}$  dobija se približan obrazac:

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{L'C'}}. \quad (4.1.86)$$

Analizirajući ovaj obrazac pod pretpostavkom da su  $L'$  i  $C'$  nezavisni od učestanosti proizilazi da je brzina prostiranja ista za sve učestanosti. Tada ne bi bilo disperzije signala na vodu, što u praksi nije slučaj.

Primer zavisnosti brzine prostiranja od učestanosti dat je na slici 4.1.14.



Slika 4.1.14. Primer zavisnosti brzine prostiranja od učestanosti

#### 4.1.16. Grupno kašnjenje

Kašnjenje grupe je mera vremena prostiranja po vodu i definisano kao promena faze sa promenom učestanosti

$$\tau_G = \frac{db}{d\omega} \quad (4.1.87)$$

Primetimo da se kašnjenje grupe može izraziti i kao

$$\tau_G = l \frac{d\beta}{d\omega} \quad (4.1.88)$$

odakle je

$$\tau_G = \frac{l}{v} \quad (4.1.89)$$

gde je  $l$  dužina voda.

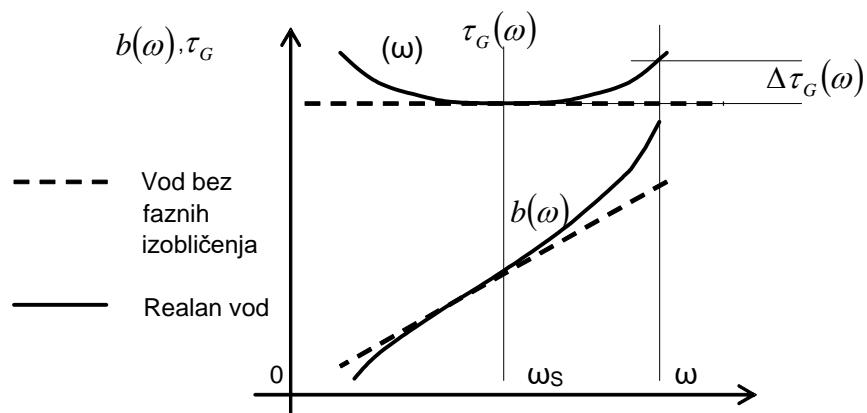
#### 4.1.17. Disperzija (izobličenje grupnog kašnjenja)

Pojedine komponente spektra složenog signala se prostiru duž voda različitom brzinom što se manifestuje izobličenjima grupnog kašnjenja - disperzijom (širenjem) signala. Izobličenja grupnog kašnjenja  $\Delta\tau_G$  predstavljaju odstupanje kašnjenja grupe pojedinih komponenti spektra u odnosu na minimalno kašnjenje grupe.

$$\Delta\tau_G(\omega) = |\tau_G(\omega) - \tau_G(\omega_s)|, \quad (4.1.90)$$

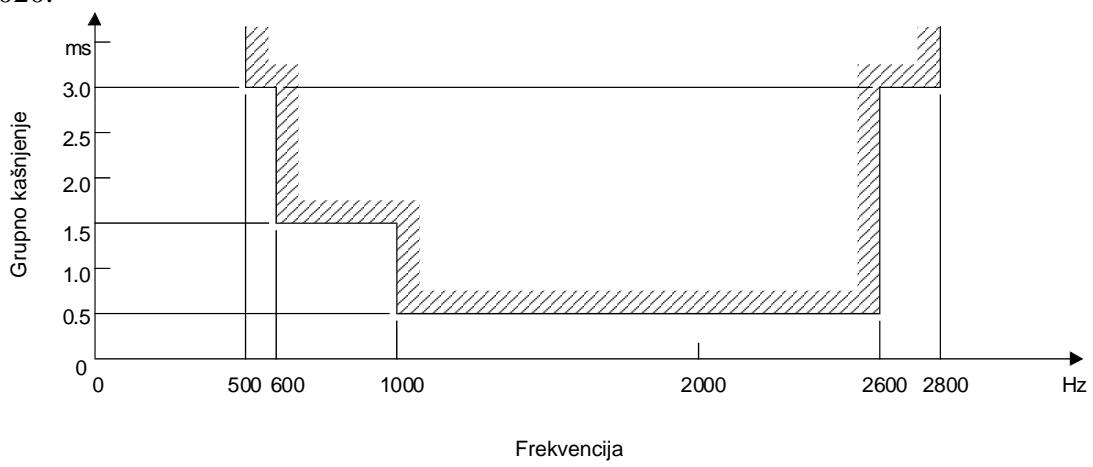
gde je  $\tau_G(\omega)$  - kašnjenje grupe na kružnoj učestanosti  $\omega$  i  $\tau_G(\omega_s)$  - minimalno kašnjenje grupe na odgovarajućoj kružnoj učestanosti  $\omega_s$ .

Grafička predstava faze  $b$  i kašnjenja grupe  $\tau_G$  za realan vod i vod bez izobličenja, kao i prikaz izobličenja grupnog kašnjenja su dati na slici 4.1.15.



Slika 4.1.15. Faza  $b$  i kašnjenje grupe  $\tau_G$

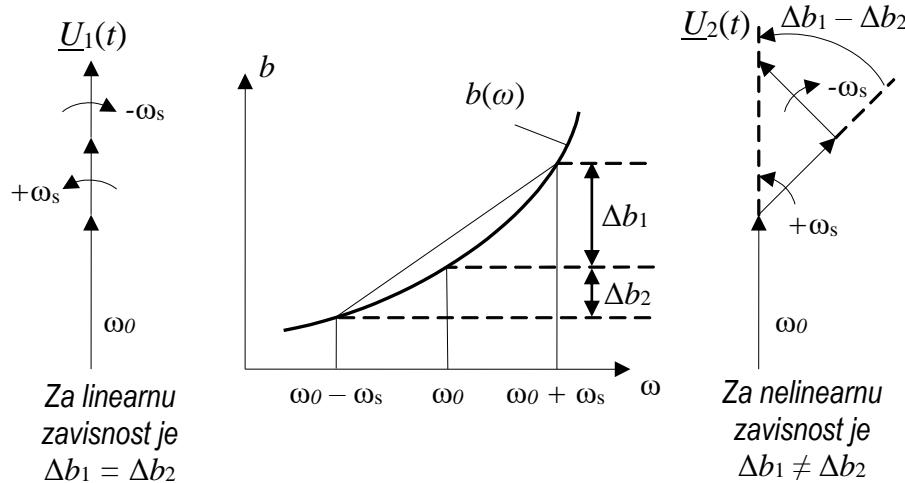
Na slici 4.1.16 je predstavljen primer maske izobličenja grupnog kašnjenja prema ITU-T M.1020.



Slika 4.1.16. Maska izobličenja grupnog kašnjenja prema ITU-T M.1020

### Merenje izobličenja grupnog kašnjenja

Za merenje izobličenja grupnog kašnjenja koristi se Nikvistov metod. Nikvistov metod merenja grupnog kašnjenja zasniva se na merenju faznog pomeraja  $\Delta b$  anvelope amplitudno modulisanog signala kroz liniju koja se testira. Vektorski dijagram na slici 4.1.17 prikazuje princip na kome se zasniva merenje.

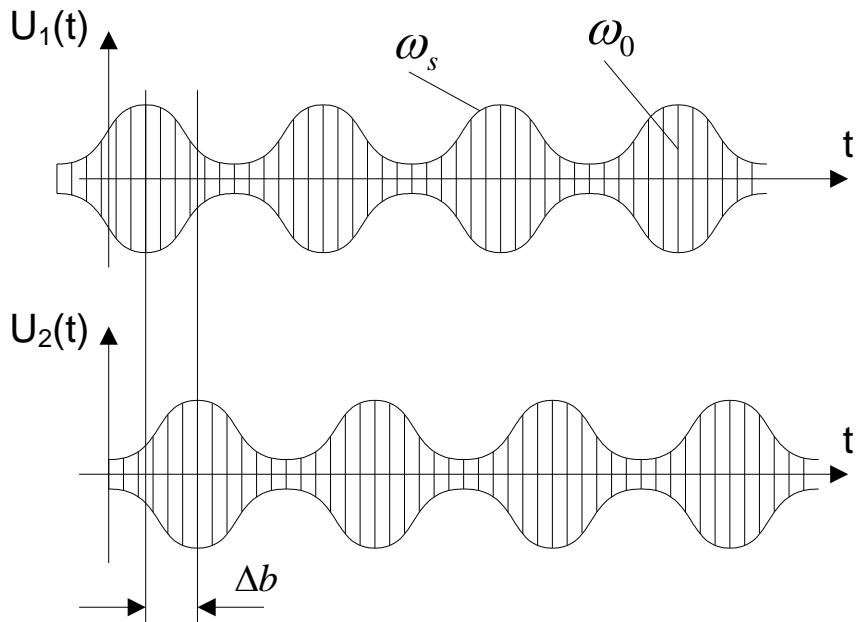


Slika 4.1.17. Vektorski dijagram Nikvistove metode merenja grupnog kašnjenja

Vektori koji odgovaraju oscilacijama na učestanosti  $\omega_0 + \omega_s$  i  $\omega_0 - \omega_s$  imaju različite rotacije. Frekvencija nosioca je  $\omega_0$ , a modulaciona frekvencija je  $\omega_s$ . Suma tri vektora na slici 4.1.17 daje trenutnu vrednost anvelope. Prolaskom kroz testiranu liniju, promena frekvencije rotira za  $\pm\Delta b$  oko noseće učestanosti usled fazne karakteristike. Ovo znači da se maksimum anvelope na izlazu linije javlja nakon vremena  $\tau_d$  u odnosu na pojavu maksimuma anvelope na ulazu linije. Vremenski interval  $\tau_d$  je "srednje" grupno kašnjenje unutar opsega  $\omega_s$  oko merene frekvencije  $\omega_0$ .

$$\tau_d = \frac{\Delta b}{\omega_s} \quad (4.1.91)$$

U vremenskom domenu, veličina  $\Delta b$  prikazana je na vremenskom dijagramu na slici 4.1.18.



Slika 4.1.18. Princip Nikvistove metode merenja grupnog kašnjenja

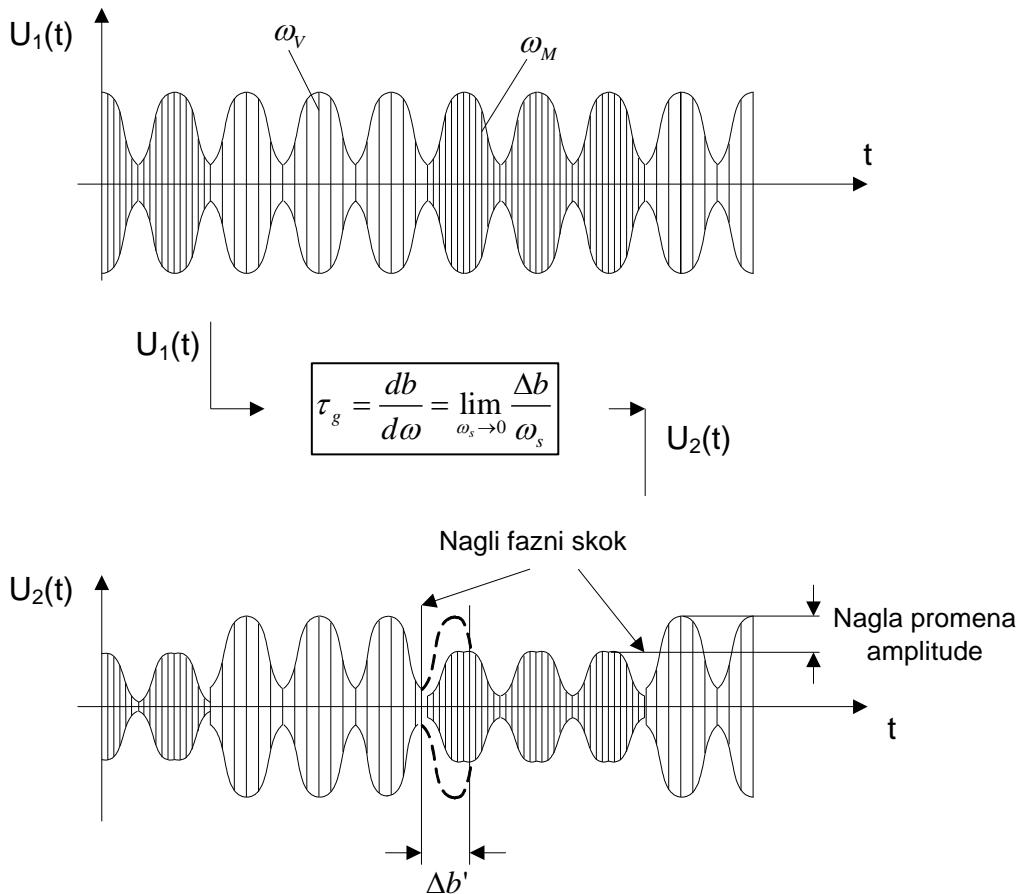
Ukoliko je modulaciona frekvencija  $\omega_s$  dovoljno mala, može se smatrati da će fazna karakteristika  $b(\omega)$  biti praktično linearna u frekvencijskom opsegu  $2\omega_s$  i da će težiti grupnom kašnjenju  $\tau_g$ , datom izrazom 4.1.92

$$\tau_g = \frac{db}{d\omega} = \lim_{\omega_s \rightarrow 0} \frac{\Delta b}{\omega_s}. \quad (4.1.92)$$

Grupno kašnjenje  $\tau_d$  može biti određeno merenjem faznog pomeraja  $\Delta b$  envelope za dovoljno malu modulacionu frekvenciju  $\omega_s$ . Ovakav metod merenja ima nedostatak da nije prikladan za merenja od kraja do kraja, jer su za ovu metodu merenja potrebni istovremeno i ulazni i izlazni signal.

Za merenja od kraja do kraja moraju postojati predajnik i prijemnik na različitim lokacijama. Za tu svrhu koristi se modifikovan Nikvistov metod. Umesto poređenja sa envelopom ulaznog signala, fazno poređenje se radi sa referentnim signalom prenešenim isključivo za svrhu merenja. Referentni signal se prenosi alternativno sa signalom na mernoj učestanosti. Amplituda modulisanog prenešenog signala se naglo menja sa promenom frekvencije između merne učestanosti  $\omega_M$  i učestanosti referentnog signala  $\omega_r$  (slika 4.1.19).

#### 4.1. Parametri kabla



Slika 4.1.19. Princip modifikovane Nikvistove metode po ITU-T O.81 preporuci

Modulisana frekvencija  $\omega_s$  je konstantna i mnogo manja od noseće frekvencije. Ukoliko testirana linija ima nelinearnu faznu karakteristiku  $b(\omega)$ , različito grupno kašnjenje između mernog i referentnog signala će dovesti do skokovite promene faze  $b'$  kod anvelope na izlazu kada se nosilac promeni. Skokovita promena faze je mera grupnog kašnjenja  $\Delta\tau_g$  između referentne i merene frekvencije. Određena je smanjenjem zakriviljenosti anvelope demodulacijom u merilu faze. Merilo faze za referentnu fazu uzima signal iz oscilatora koji radi na modulisanoj frekvenciji  $\omega_s$ . Oscilator je zaključan modulacionom frekvencijom korišćenjem fazno zaključane petlje (PLL) da bi obezbedili fiksnu referencu za fazni signal. Izlazni napon merila faze je u tom slučaju direktno proporcionalan skokovitoj promeni faze  $\Delta b'$  u anvelopi, a samim tim i distorziji grupnog kašnjenja. Važi sledeća relacija:

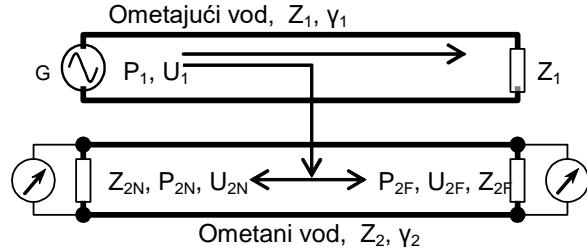
$$\Delta\tau_g(\omega) = \tau_g(\omega_M) - \tau_g(\omega_V) = \frac{\Delta b_M - \Delta b_V}{2\pi f_s} = \frac{\Delta b'}{2\pi f_s} \quad (4.1.93)$$

Opisanom metodom se dakle meri distorzija grupnog kašnjenja, a ne može se meriti apsolutno grupno kašnjenje, što je manje važan parametar za signalnu distorziju.

#### 4.1.18. Slabljenje preslušavanja

Preslušavanje između vodova – parica kablova primenjenih u pristupnoj mreži - predstavlja neželjeni prelaz energije sa ometajućeg na ometani vod. Ovaj prelaz energije se na ometanom vodu manifestuje kao nelinearno (šum) ili linearno (razumljivo) preslušavanje.

Šematski prikaz preslušavanja je dat na slici 4.1.20.



Slika 4.1.20. Šematski prikaz preslušavanja

Generator  $G$  snage  $P_1$  i napona  $U_1$  napaja vod impedanse  $Z_1$  i konstante prostiranja  $\gamma_1$ . Deo energije prelazi na vod impedanse  $Z_2$  i konstante prostiranja  $\gamma_2$ . Ova energija se troši na:

- impedansi  $Z_{2N}$  stvarajući pad napona  $U_{2N}$  i disipirajući snagu  $P_{2N}$ , i
- na impedansi  $Z_{2F}$  stvarajući pad napona  $U_{2F}$  i disipirajući snagu  $P_{2F}$ .

Slučaj a) predstavlja preslušavanje na bližem kraju (NEXT – engl. *near end crosstalk*). Mera preslušavanja na bližem kraju je slabljenje preslušavanja na bližem kraju definisano izrazom 4.1.94.1.

$$a_N = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \log \frac{U_1}{U_{2N}} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4.1.94)$$

Slučaj b) predstavlja preslušavanje na daljem kraju (FEXT – engl. *far end crosstalk*). Mera preslušavanja na daljem kraju je slabljenje preslušavanja na daljem kraju dano izrazom 4.1.95.

$$a_F = 10 \log \frac{P_1}{P_{2F}} = 20 \log \frac{U_1}{U_{2F}} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4.1.95)$$

Slabljenje preslušavanja na daljem kraju predstavljeno na ovaj način ne daje pravu sliku stanja stvari zato što u sebi sadrži i sopstveno slabljenje voda. Zbog toga se uvodi pojam odnos signal / preslušavanje na daljem kraju (ELFEXT – equal level far end crosstalk) - koji predstavlja slabljenje preslušavanja na daljem kraju umanjeno za sopstveno slabljenje voda (koje je ranije opisano).

Slabljenje preslušavanja zavisi od učestanosti i spektra učestanosti signala koji se prenosi, konstruktivnih i drugih osobina kablova koje podrazumevaju:

#### 4.1. Parametri kabla

---

- nehomogenosti žila u pogledu geometrije provodnika i izolacije žila i njihove međusobne simetrije kao i simetrije prema ostalim provodnicima u kablu i metalnom omotaču – ekrana;
- nehomogenosti u pogledu materijala izolacije provodnika, međuprostora u kablu i drugih konstruktivnih elemenata použavanja;
- bliskosti koja zavisi od gustine pakovanja i tipa jezgra (slojevito ili sektorsko);
- načinu upredanja (parice ili četvorke);
- pravilnosti koraka upredanja;
- materijala i debljine metalnog omotača (ekrana) kabla i
- prilagođenja impedansi kablovskih dužina, međusobno i sa terminalnom opremom.

Svakako su montažne greške i greške u manipulaciji kablovima veoma čest uzrok preslušavanju. U oblasti govornih učestanosti dominiraju kapacitivne sprege i to u okviru četvorke ili susednih parica u slučaju paričnog upredanja. U oblasti učestanosti reda desetina kiloherca do par stotina kiloherca sprege su kompleksne takođe dominantno u okviru četvorke ili susednih parica u slučaju paričnog upredanja. U oblasti viših učestanosti (iznad navedenih opsega) sprege su takođe kompleksne, nisu ograničene na četvorku i susedne parice, a sprege preko drugih kola i metalnog omotača (ekrana) postaju vrlo značajne. U oblasti vrlo visokih učestanosti pojačava se uticaj metalnog omotača (ekrana).

Veličina sprege u funkciji rastojanja  $x$  se u slučaju preslušavanja na bližem kraju menja po zakonu

$$e^{-(y_1 + y_2)x} \quad (4.1.96)$$

Iz ovoga se izvlači zaključak da se zamenom mesta ometajućeg i ometanog voda vrednost slabljenja preslušavanja neće promeniti. S druge strane, po pravilu, merenje slabljenja preslušavanja na bližem kraju treba obaviti sa obe strane voda.

U slučaju preslušavanja na daljem kraju, veličina sprege u funkciji rastojanja  $x$  se ponaša po zakonu  $e^{-(y_2 - y_1)x}$ . To znači da će se rezultati merenja slabljenja preslušavanja na daljem kraju razlikovati ukoliko je  $y_2 \neq y_1$ . Ova pojava se naziva efekat zamene i, na osnovu iskustva, rezultati merenja slabljenja preslušavanja na daljem kraju sa zamenom ometajućeg i ometanog voda se mogu razlikovati i do 10 dB.

Kada se zamene mesta ometajućeg i ometanog voda, veličina sprege se menja po zakonu  $e^{-(y_1 - y_2)x}$ .

Merenje slabljenja preslušavanja na daljem kraju nije neophodno izvoditi sa oba kraja voda.

U uslovima moguće spektralne nekompatibilnosti kod širokopojasnog prenosa važno je pomenuti ukupnu snagu (PS - power sum) preslušanog signala (PS NEXT i PS ELFEXT) u okviru odabrane grupe použavanja. To može biti osnovna grupa od 5x4 ili neke druga. Na primeru osnovne grupe od 5x4 imamo situaciju gde je jedan par izložen uticaju preostalih devet, te je nakon merenja potrebno izvršiti sabiranje svih pojedinačnih uticaja da bi se dobila ukupna snaga preslušanog signala.

#### 4.1. Parametri kabla

---

Generalnim planom telefonske mreže, tačka 6.2.5.2., dat je primer određivanja norme za slabljenje preslušavanja na bližem i daljem kraju (slabljenje glasnosti preslušanog signala). Tamo je, uz učinjene pretpostavke, a prema uputstvu za izračunavanje verovatnoće preslušavanja (ITU-T G.105 i P.16) dobijeno da slabljenje glasnosti preslušanog signala u preplatničkom sistemu treba da bude  $L \geq 79$  dB na bližem kraju, odnosno  $L \geq 76$  dB na daljem kraju. Veličina (norma) slabljenja preslušavanja u slučaju širokopojasnog prenosa treba da bude takva da se obezbedi odnos signal/šum bolji od 6 dB da bi stepen greške bita bio bolji od  $10^{-7}$ .

Merenje slabljenja preslušavanja se izvodi prema slici 4.1.20. Treba napomenuti da nepravilno terminiranje voda dovodi do velike greške merenja. Na primer, ukoliko je kod merenja slabljenja preslušavanja na bližem kraju suprotni kraj ometajućeg voda neterminiran karakterističnom impedansom (otvoren) doći će do totalne refleksije sa pozitivnim znakom koeficijenta refleksije, te će reflektovani talas biti u fazi sa direktnim talasom, što će rezultirati udvostručenjem novoga ometajućeg signala. U takvim uslovima će rezultat slabljenja preslušavanja na bližem kraju biti uvećan za 3 dB u slučaju da je ometani vod pravilno terminiran i da su oba voda bez gubitaka.

Zavisnost slabljenja preslušavanja od kapacitivne sprege  $K_1$  data je formulom:

$$a_{K_1} = \ln\left(\frac{8}{\omega K_1 Z}\right)(Np). \quad (4.1.97)$$

#### 4.1.19. Šum

Šum predstavlja svaki nezeljeni signal smetnje koji nastaje električnim putem unutar korisnog opsega učestanosti koji se prenosi. Šumovi su, prema nastanku, podeljeni na sledeće vrste:

- osnovni šum;
- šum od nerazumljivog preslušavanja;
- šum od razumljivog preslušavanja;
- šum kvantizacije;
- šum od interferencije i
- šum od prirodnih zračenja.

Osnovni šum potiče od toplotnog kretanja elektrona u provodnicima kao i od nepravilnosti toka elektrona i šupljina u elektronskim komponentama uređaja, i ne zavisi od opterećenja. Energija osnovnog šuma može biti raspoređena ravnomerno u korisnom opsegu učestanosti ili se povećavati srazmerno sa učestanošću (frekvencijska zavisnost).

Osnovni šum se naziva još i termički ili Džonsonov šum. Efektivna vrednost napona Džonsonovog šuma je:

$$U = \sqrt{4kTBR} \quad (4.1.98)$$

#### 4.1. Parametri kabla

---

gde je  $k$  – Bolcmanova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ , J/K);  $T$  – temperatura u K;  $B$  – širina frekvencijskog opsega u Hz i  $R$  – otpornost u  $\Omega$ .

Pod osnovnim šumom se podrazumeva i najčešća manifestacija šuma u oblasti govornih učestanosti koja se javlja delimično kao posledica omske nehomogenosti i/ili odvoda između pojedinih žila i između pojedinih žila i zemlje. Na ove slučajeve se takođe može primeniti navedeni obrazac s tim što treba imati u vidu da će se napon šuma javiti u longitudinalnoj i/ili transverzalnoj formi, zavisno od toga da li je uzrok omska nehomogenost i/ili odvod.

Kao osnovni šum se često tretira i šum od napajanja koji nastaje usled nedovoljnog filtriranja u ispravljačima za napajanje uređaja.

Šum od nerazumljivog preslušavanja potiče od nelinearnosti karakteristika prenosnog medijuma i zavisi od opterećenja. Karakteriše ga pojava intermodulacije (nelinearna amplitudna i fazna izobličenja).

Šum od razumljivog preslušavanja nastaje usled linearnih sprega (kapacitivnih, induktivnih ili galvanskih).

Šum kvantizacije nastaje usled ograničenog broja uzoraka kod analogno digitalne konverzije. Šum usled interferencije nastaje usled spoljnog elektromagnetskog delovanja (elektroenergetski vodovi, radio predajnici, atmosferski šum i sl.) i

Šum od prirodnih zračenja čiji se izvori nalaze van zemaljske atmosfere (kosmičko zračenje itd.).

Merenje šuma obuhvata merenje frekvencijski ponderisane vrednosti složenog napona šuma ili merenje neponderisane snage šuma u nekom opsegu učestanosti  $B$ .

Frekvencijski ponderisana vrednost napona šuma nazova se psofometrijski napon šuma. Na slici 4.1.21 je predstavljen odziv psofometrijskog filtra u funkciji učestanosti, po ITU-T O.41 preporuci. Postoje dve vrste filtera: C - message u primeni u USA i P-filter (psofometrijski ponderisan), u primeni u Evropi.

Kod merenja neponderisane snage šuma u nekom opsegu učestanosti  $B$ , dobijene vrednosti se, zavisno od prirode prenošenog signala ponderišu na odgovarajući način. Ako je to govorni opseg, faktor ponderacije iznosi

$$2,5 \text{ dB} + 10 \log \frac{B}{3,1} \quad (4.1.99)$$

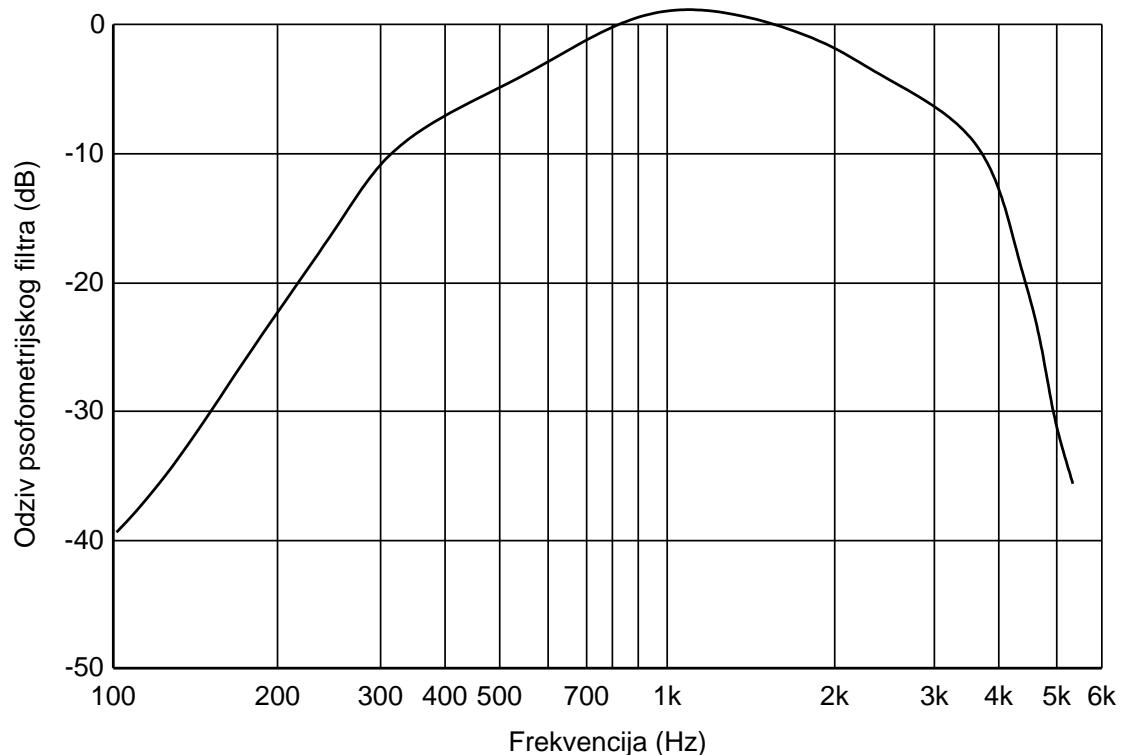
2,5 dB predstavlja razliku izmerene neponderisane i psofometrijske snage za opseg od 3,1 kHz. Faktor  $\frac{B}{3,1}$  predstavlja ovu razliku za opseg  $B$  i opseg od 3,1 kHz.

Ukoliko se zahteva spektralna gustina (neponderisane) snage šuma, tada vrednost snage šuma izmerenu merilom sa ulaznim filtrom širine  $B$ , treba korigovati sa  $-10 \log B$ .

#### 4.1. Parametri kabla

---

Što se regulative tiče, smatra se da je kvalitet prenosa dobar ako stalni napon šuma izmeren psofometrom (ponderisan) ne prelazi 0,5 mV. Povremeni šumovi mogu biti i viših vrednosti.



Slika 4.1.21. Odziv psofometrijskog filtra u funkciji učestanosti po ITU-T O.41 preporuci

Osim opisanih pojmova važno je pomenuti beli šum i impulsni šum.

Beli šum je šum koji ispunjava određeni opseg učestanosti tako da je njegova snaga po hercu konstantna. Generatori belog šuma se najčešće koriste za ispitivanje imunosti uređaja za prenos ili sistema prenosa na šum.

Impulsni šum je nestacionarno preslušavanje kao posledica uticaja kratkotrajnih snažnih elektromagnetskih impulsa u blizini telefonskog voda kao i nekih smetnji na samom vodu. Omske nehomogenosti i odvodi ranije opisani kao delimični uzroci pojave osnovnog šuma, utiču takođe i na pojavu impulsnog šuma imajući u vidu nastanak mikroprkida prouzrokovanih lošim spojevima kao i "mikroproboja" na mestima odvoda. Kako se u praksi impulsni šum najčešće javlja u obliku serije impulsa, to je važećom regulativom predviđeno mrtvo vreme u trajanju od  $125 \mu\text{s}$ . Merenje impulsnog šuma podrazumeva brojanje slučajeva sa nivoom većim od nekog unapred određenog nivoa u zadatom vremenu uvažavajući zahtev u pogledu mrtvog vremena.

Prema Generalnom planu mreže za prenos podataka za vod specijalnog kvaliteta je predviđeno da broj vrhova impulsnog šuma koji prelaze prag -21 dBm0 ne treba da bude veći od 18 u periodu od 15 minuta.