

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

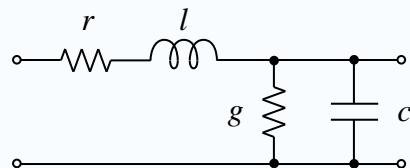
S obzirom da je električnom polju u provodniku potrebno konačno vreme da bi se uspostavilo, u slučajevima da je dužina provodnika takva da za određenu učestanost ona predstavlja značajan deo prostornog ciklusa talasa, za posmatranje i analizu pojava mora se koristiti tzv. talasni koncept kretanja. Ovaj uslov stoga se može definisati kao

$$d > \frac{v}{f}$$

gde je d - dužina transmisione linije, v - brzina prostiranja talasa (brzina uspostavljanja električnog polja), a f - učestanost električnog signala.

Matematička analiza ponašanja električnih transmisionih linija kao talasovoda potekla je iz radova Džejmsa Maksvela (James Maxwell), Lorda Kelvina (Lord Kelvin) i Olivera Hevisajda (Oliver Heaviside). 1855. godine Lord Kelvin je formulisao difuzioni model struje u podmorskim kablovima. Njegov model uspešno je predviđao loše performanse transatlantskog podmorskog telegraфа postavljenog 1858. godine. Hevisajd je 1885. godine objavio prvi rad koji opisuje analizu propagacije signala u kablovima i dao je moderan oblik tzv. telegrafske jednačine.

Prilikom kretanja signala kroz transmisionu liniju deo energije prevodi se u gubitke kao posledica konačne otpornosti linije. Ovaj efekat poznat je pod nazivom omski ili rezistivni gubici. Na višim učestanostima postaju izraženi i dielektrični gubici, koji se javljaju kao posledica kapacitivnog ponašanja linije. Dielektrični gubici se javljaju kada izolacioni materijal apsorbuje energiju za naizmeničnu polarizaciju svojih molekula pri čemu se, trenjem, deo energije pretvara u toplotu. Ukupni gubici prenosne linije izražavaju se u decibelima po metru (poduzno slabljenje) i zavise od učestanosti signala koji se prenosi.



Slika 4.4.1. Modelovanje prenosne linije kao dvopristupne mreže

Električne prenosne linije mogu se modelovati kao dvopristupne mreže (četvorokrajni elementi). Kao najjednostavniji slučaj usvaja se da je mreža linearna i simetrična, odnosno da je kompleksni napon na njenim pristupima, proporcionalan kompleksnoj struji koja u njih ulazi kada nisu prisutne refleksije, kao i da se dva pristupa mogu zameniti prilikom povezivanja mreže sa drugim komponentama u kolu (slika 4.4.1.). Ukoliko je prenosna linija homogena celom svojom dužinom, onda se njen ponašanje u najvećoj meri može opisati parametrom Z_c zvanim karakteristična impedansa. Karakteristična impedansa predstavlja odnos kompleksnog napona i kompleksne struje u prinudnom prostoperiodičnom režimu u bilo kojoj tački duž linije. Tipične vrednosti karakteristične impedanse za bakarne provodnike iznose 50Ω ili 75Ω za

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

koaksijalne kablove, oko 100Ω za bakarne parice i oko 300Ω za neupletene bakarne provodnike.

Kada se električnim signalom šalje energija duž transmisione linije, poželjno je da ona bude u potpunosti apsorbovana od strane potrošača (prijemnika) i da nema refleksije nazad ka predajnoj strani. Ovo se može obezbediti ako izvor i potrošač imaju impedansu koja je jednaka karakterističnoj impedansi Z_C kabla korišćenog za prenos. U tom slučaju kaže se da je prenosna linija **uparena**. U protivnom, deo energije biće, na mestu potrošača, vraćen nazad u prenosnu liniju i propagacija signala će se nastaviti u neželjenom smeru. Ovi reflektovani delovi energije mogu se, u zavisnosti od nehomogenosti i podužnog slabljenja linije, višestruko prostirati kroz provodnike i uzrokovati pojavu neželjenih (parazitnih) signala na mestima predaje i prijema, odnosno greške u interpretaciji komunikacionog procesa.

4.4.1. Formiranje stojećih talasa u bakarnim provodnicima u prostoperiodičnom režimu i telegrafska jednačina

Oliver Hevisjad razvio je model prenosne linije poznat kao telegrafske jednačine. Ove jednačine opisuju promene napona i struje duž električnog provodnika i predstavljaju specijalan (uprošćen) slučaj Maksvelovih jednačina. Jednačine se sastoje iz dve diferencijalne jednačine po vremenskoj i prostornoj promenljivoj: jedna za naponski signal $V(x, t)$ i jedna za strujni $I(x, t)$. Model pokazuje da se električna struja u provodniku može reflektovati i da se duž prenosne linije uspostavlja električni talas.

Model provodnika svodi se na beskonačnu rednu vezu dvopristupnih elemenata, od kojih svaki predstavlja infinitezimalno mali segment identičan modelu transmisione linije sa slike 4.4.1. Svaki ovaj segment sastoji se od:

- distribuirane otpornost provodnika (u Ω/m) označene rednim otpornikom $r = R / d$,
- distribuirane induktivnost (u H/m) označene rednim kalmom $l = L / d$,
- distribuirane kapacitivnost (u F/m) označene kapacitivnim šantom $c = C / d$, i
- distribuirane odvodnost¹ (u S/m) označene rezistivnim odvodom $g = G / d$.

gde je d - dužina transmisione linije. Parametar

$$Z_C = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$$

po fizičkoj dimenziji odgovara impedansi i naziva se karakteristična impedansa voda. Veličina

$$\underline{\gamma} = \sqrt{r + j\omega l \quad g + j\omega c}$$

naziva se koeficijent prostiranja i njen realni deo $\alpha = \operatorname{Re} \underline{\gamma}$ opisuje podužno slabljenje talasa, dok njen $\beta = \operatorname{Im} \underline{\gamma}$ imaginarni deo opisuje fazne promene talasa duž linije.

¹ Pojam odvodnost (engl. *drain*) ovde se koristi da bi se izbegla zabuna sa eventualnom upotrebot pojma provodnosti (engl. *conductivity*) koji predstavlja recipročnu vrednost parametra R .

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Ako su elementi r i g veoma mali, njihov uticaj može se zanemariti i transmisiona linija se posmatra kao idealizovana struktura bez gubitaka. Tada opisani model zavisi samo od elemenata l i c i svodi se na par parcijalnih diferencijalnih jednačina prvog reda u funkciji pozicije i vremena:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} V(x, t) &= -l \frac{\partial}{\partial t} I(x, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} I(x, t) &= -c \frac{\partial}{\partial t} V(x, t)\end{aligned}$$

Ove jednačine mogu se transformisati u diferencijalne jednačine drugog reda:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial t^2} V(x, t) &= \frac{1}{lc} \frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x, t) \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} I(x, t) &= \frac{1}{lc} \frac{\partial^2}{\partial x^2} I(x, t)\end{aligned}$$

i predstavljaju poznate telegrafske jednačine prenosnih linija.

U zavisnosti od graničnih uslova određenih prirodom pobude i prijemnika kojima je vod zatvoren, mogu se dobiti različita rešenja koja će biti razmotrena u narednim poglavljima. Ukoliko linija ima konačnu dužinu i terminirana je karakterističnom impedansom, ove jednačine ukazuju na prisustvo stojećeg talasa koji se kroz provodnik uspostavlja brzinom

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}}$$

Ova brzina uspostavljanja (propagacije) talasa nema nikave veze sa fenomenom drifta elektrona u provodniku. Za koaksijalni kabel napravljen od superprovodnih žica i sa vakuumom kao izolatorom između njih, može se pokazati da je ova brzina jednak brzini svetlosti c u vakuumu.

Telegrafske jednačine u svim ostalim slučajevima terminirajućih impedansi daju dva rešenja za putujući talas. Jedno rešenje koje se prostire od izvora ka potrošaču i drugo koje se prostire u suprotnom smeru.

$$V(x, t) = V_1 \omega t - \gamma x + V_2 \omega t + \gamma x$$

Kako je struja proporcionalna naponu dobijaju se i dva rešenja za strujni talas:

$$I(x, t) = \frac{V_1 \omega t - \gamma x}{Z_c} + \frac{V_2 \omega t + \gamma x}{Z_c}$$

Minus u drugom članu potiče od konstitutivne relacije terminirajuće impedanse na kraju voda koja se ponaša kao **izvor** reflektovanog talasa. Ako se u razmatranje uključe konačna otpornost r i odvodnost g linije, tada telegrafske jednačine poprimaju oblik

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x,t) = -l \frac{\partial}{\partial t} I(x,t) - rI(x,t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} I(x,t) = -c \frac{\partial}{\partial t} V(x,t) - gV(x,t)$$

Diferencirajući prvu jednačinu po x i drugu po t , uz malo algebarskih manipulacija, dobija se par hiperboličnih parcijalnih diferencijalnih jednačina, svaka samo po jednoj nepoznatoj.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x,t) = lc \frac{\partial^2}{\partial t^2} V(x,t) + (rc + gl) \frac{\partial}{\partial t} V(x,t) + grV(x,t)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} I(x,t) = lc \frac{\partial^2}{\partial t^2} I(x,t) + (rc + gl) \frac{\partial}{\partial t} I(x,t) + grI(x,t)$$

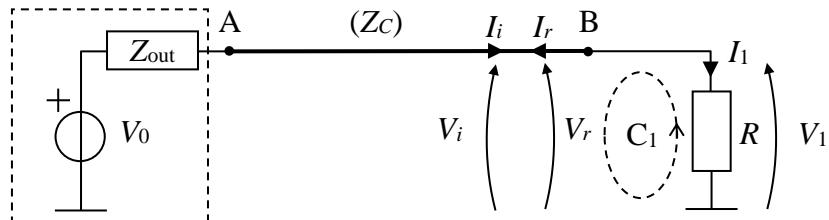
Ove jednačine su slične kao i homogene jednačine dobijene za uparene impedanse, s tim što se u njima pojavljuje po jedan dodatan član $I(x,t)$ i $V(x,t)$ i po jedan njihov prvi izvod po vremenu. Ovi dodatni članovi uzrokuju slabljenje signala duž linije i pojavu ekponencijalnih anvelopa u rešenjima za direktni i povratni talas.

4.4.2. Koeficijenti refleksije i transmisije

Prethodna analiza poslužila je za egzaktno objašnjenje pojave talasa i refleksija na linijama za prenos. U telekomunikacijama su, međutim, retke situacije da se duž prenosnih linija prostiru prostoperiodični ili složenoperiodični signali. Razvijanjem ovih signala u red i potom primenom principa superpozicije, analiza bi postala veoma složena i nepregledna, a zaključivanje o ponašanju sistema gotovo nemoguće. Stoga će se u nastavku, umesto rešavanjem odgovarajućih skupova diferencijalnih jednačina, analiza sprovesti primenom Kirhofovih zakona uz poštovanje prethodno donetih zaključaka o prostiranju talasa i pojavi refleksija.

Refleksije na zatvorenom kraju voda

Posmatrajmo sistem prikazan na slici 4.4.2.



Slika 4.4.2. Linija terminirana otpornikom

Na osnovu prethodnog razmatranja, sledi da će se u vodu karakteristične impedanse Z_c javiti, u opštem slučaju, dva talasa: jedan direktni (V_i i I_i) i drugi reflektovan (V_r i I_r). Na samoj terminirajućoj otpornosti postoji napon V_1 i struja I_1 koji su povezani konstitutivnom relacijom otpornika

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$V_1 = RI_1$$

Ako se za konturu C_1 napiše naponski Kirhofov zakon, a za snop oko tačke B srujni Kirhofov zakon dobijaju se sledeće relacije

$$\begin{aligned} -V_i - V_r + V_1 &= 0 \\ I_i - I_r - I_1 &= 0 \end{aligned}$$

Incidentni i reflektovani talas moraju zadovoljiti konstitutivnu relaciju voda, pa važi

$$\begin{aligned} V_i &= Z_C I_i \\ V_r &= Z_C I_r \end{aligned}$$

Kombinovanjem prethodih pet relacija, dobija se da je

$$V_r = V_i \frac{R - Z_C}{R + Z_C}$$

Na ovaj način može se izračunati amplituda reflektovanog talasa u zavisnosti od vrednosti terminirajuće otpornosti R i amplitude incidentnog talasa V_i . Količnik

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{R - Z_C}{R + Z_C}$$

naziva se koeficijent refleksije i predstavlja osnovni parametar kojim se karakteriše uparenost prenosne linije i terminirajuće impedanse. U telekomunikacijama idealna vrednost koeficijenta refleksije je 0, odnosno idelana vrednost terminirajuće impedanse je $R = Z_C$. Maksimalna (njepovoljnija) vrednost koeficijenta refleksije dobija se za slučaj da je vod kratko spojen ili ostavljen otvoren. Tada je

$$|\rho|_{\max} = \lim_{\substack{R \rightarrow 0 \\ R \rightarrow \infty}} \left| \frac{R - Z_C}{R + Z_C} \right| = |\pm 1| = 1$$

Razdeljivanje napona na početku voda

Na početku voda (tačka A na slici 4.4.2), u zavisnosti od vrednosti izlazne impedanse izvora, dolazi do razdeljivanja signala koji od celog kola "vidi" samo karakterističnu impedansu voda. Stoga je amplituda incidentnog talasa određena koeficijentom razdeljivanja napona:

$$k = \frac{V_i}{V_0} = \frac{Z_C}{Z_{out} - Z_C} \leq 1$$

Iz gornje jednakosti bi se brzopleto moglo zaključiti da je idealna vrednost izlazne impedanse izvora $Z_{out} = 0 \Omega$, ali je ovo, zapravo, najgora moguća vrednost, kao što ćemo pokazati u narednom razmatranju.

Višestruke refleksije

Ako terminirajuća otpornost nije uparena sa karakterističnom impedansom voda u tački B (slika 4.4.2) doći će do formiranja reflektovanog talasa (V_r i I_r) nazad ka tački A, odnosno ka izvoru. Prilikom nailaska ovog reflektovanog talasa na izvor, ukoliko njegova impedansa nije uparena sa impedansom voda, javiće se nova, sekundarna refleksija V_{r1} i I_{r1} koja će se superponirati na incidentni talas i prostirati dalje ka tački B zajedno da njim. Posmatrač u tački B neće više moći razlikovati ova dva talasa i može detektovati samo njihovu zbirnu vrednost. U tački B ponovo će doći do refleksije i formiranja novog reflektovanog talasa V_{r2} i I_{r2} koji će se superponirati sa V_r i I_r . Sukcesivne refleksije će se nastaviti sve dok, usled postojanja podužnog slabljenja, prostirući talasi ne oslabe toliko da se više ne mogu razlikovati od nivoa šuma u sistemu, tj. dok ne opadnu na dovoljno malu vrednost da ih možemo smatrati iščezlim. Sve oscilacije u nivou napona i struje uzrokovane ovim sekundarnim talasima nazivaju se zajedničkim imenom "višestruke refleksije" ili "echo" i smatraju se izuzetno nepovoljnim u telekomunikacionim sistemima jer mogu postaviti zahtev za dugim pauzama u komunikaciji dok partneri čekaju da se oscilacije na liniji primire između slanja dva uzastopna signala.

Ukoliko liniju smatramo idelanom (bez gubitaka) zaključujemo da će se ovi dodatni talasi u nedogled superponirati na incidentni i prvi reflektovani talas sve dok ne dostignu graničnu vrednost određenu koeficijentima refleksije u tačkama A i B. Granična vrednost talasa koji se prostire od tačke B ka tački A iznosi

$$\hat{V}_r = V_i \rho_B + V_i \rho_B^2 \rho_A + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_B V_i \underbrace{\rho_B \rho_A}_{<1}^n = \rho_B k V_0 \sum_{n=0}^{\infty} \underbrace{\rho_B \rho_A}_{<1}^n = \rho_B \frac{k V_0}{1 - \rho_B \rho_A}$$

Granična vrednost talasa koji se prostire od tačke A ka tački B iznosi

$$\hat{V}_i = V_i + V_i \rho_B \rho_A + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} V_i \underbrace{\rho_B \rho_A}_{<1}^n = k V_0 \sum_{n=0}^{\infty} \underbrace{\rho_B \rho_A}_{<1}^n = \frac{k V_0}{1 - \rho_B \rho_A}$$

Nakon dovoljno dugo vremena u sistemu će, praktično, postojati samo dva talasa jedan incidentan i jedan reflektovan, pri čemu je njihova applituda zavisna od koeficijenata refleksije u tačkama A i B, a odnos međusobnih amplituda određen samo koeficijentom refleksije u tački B, baš kao i da u sistemu nije došlo do višestrukih refleksija, već da se kroz vod prostiru samo (\hat{V}_i i \hat{V}_r).

S obzirom da koeficijenti ρ_A i ρ_B mogu biti i pozitivni negativni, nije moguće u opštem slučaju odrediti da li će višestruke refleksije oslabiti ili pojačati neki od prostirućih talasa.

Ukoliko se u obzir uzme da posmatrani vod dužine $d = [AB]$ ima konačno podužno slabljenje α , tada se pri svakom prolasku kroz vod talas oslabi za faktor

$$e^{\frac{\alpha d}{2}}$$

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Time se gornji izrazi modifikuju dodavanjem umnoška koji određuje ekvivalentan uticaj slabljenja na amplitude prostirućih talasa:

$$\hat{V}_r = \rho_B V_i = \rho_B \frac{kV_0}{1 - \rho_B \rho_A e^{\frac{\alpha d}{2}}}$$

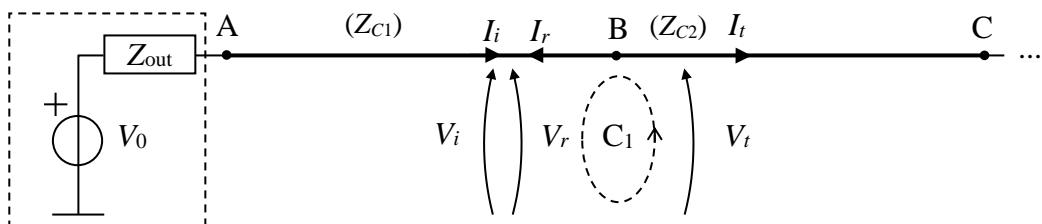
Zbog veoma složenog, a često i nepredvidljivog uticaja refleksija na ponašanje sistema, čak i u slučaju ovako jednostavne konfiguracije voda, višestruke refleksije se uvek moraju sprečiti. To se najčešće postiže prilagođavanjem krajnjih (terminirajućih) impedansi karakterisitčnoj impedansi voda Z_C , bilo na stani bližoj izvoru ili bližoj prijemniku, čime se postiže da je bar jedan od koeficijenata ρ_A ili ρ_B veoma blizak nuli.

Spoj dva voda različitih karakterisitčnih impedansi

Na slici 4.4.3. prikazana je veoma česta situacija koja nasaje spajanjem dva duga provodnika različitih karakterisitčnih impedansi. Situacija se, zapravo, svodi na prethodno razmatran slučaj, jer vod sa karakterisitčnom impedansom Z_{C1} "vidi" na svom kraju samo drugi vod karakteristične impedanse Z_{C2} koji za njega predstavlja terminirajući impedans i završetak linije. Stoga se koeficijent refleksije u tački B može dobiti na isti način kao i u prethodnom slučaju, odnosno iznosi

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{C2} - Z_{C1}}{Z_{C2} + Z_{C1}}$$

Međutim u vodu karakteristične impedanse Z_{C2} će se indukovati i treći talas koji nastavlja prostiranje ka tački C. Da bi se odredila amplitudu ovog talasa, potrebno je napisati Kirhofove zakone za konturu C_1 i snop oko tačke B, baš kao i u prethodnom slučaju.



Slika 4.4.3. Linija koja se sastoji od dva voda različitih karakterističnih impedansi

$$\begin{aligned} -V_i - V_r + V_t &= 0 \\ I_i - I_r - I_t &= 0 \end{aligned}$$

Incidentni i reflektovani talasi moraju zadovoljiti konstitutivnu relaciju prvog voda, a transmitovani talas mora zadovoljiti konstitutivnu relaciju drugog voda.

$$\begin{aligned} V_i &= Z_{C1} I_i \\ V_r &= Z_{C1} I_r \\ V_t &= Z_{C2} I_t \end{aligned}$$

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Kombinovanjem prethodih relacija, dobija se da je

$$V_t = V_i + V_i \frac{Z_{C2} - Z_{C1}}{Z_{C2} + Z_{C1}} = V_i(1 + \rho)$$

Konstanta

$$\tau = \frac{V_t}{V_i} = 1 + \rho$$

naziva se koeficijent transmisije. U opštem slučaju koeficijent transmisije može biti i veći od jedinice, jer ρ može biti pozitivno.

Ako bi se posmatrao obrnut slučaj, tj. nailazak talasa amplitude V_1 iz tačke C ka tački B, tada bi se nazad u vod karakterisitečne impedanse Z_{C2} reflektovao talas amplitude

$$V'_r = V'_i \cdot \frac{Z_{C1} - Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}} = \rho' \cdot V' = -\rho \cdot V'$$

gde je sa ρ' označen koeficijent refleksije u tački B, ali za talase koji nailaze iz suprotnog smera. Koeficijent transmisije ka tački A dat je tada kao

$$\tau' = 1 + \rho'$$

Prethodni rezultat ne treba nipošto uopštavati i zaključiti kako će u svim konfiguracijama vodova koeficijenti refleksije iz različitih pravaca ka jednoj istoj tački biti suprotnog znaka. U primeru prikazanom na slici 4.4.4 koeficijent refleksije za talase koji ka tački A idu iz take X iznosi

$$\rho = \frac{Z_2 \parallel Z_3 - Z_1}{Z_2 \parallel Z_3 + Z_1}$$

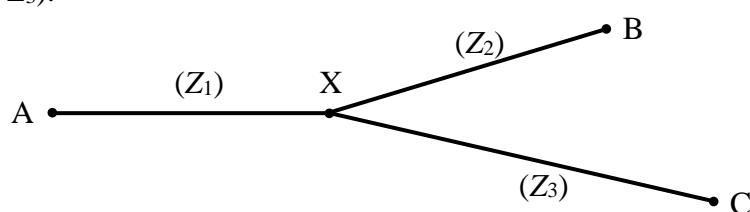
za talase koji se prostiru od tačke B

$$\rho' = \frac{Z_1 \parallel Z_3 - Z_2}{Z_1 \parallel Z_3 + Z_2}$$

i za talase od tačke C

$$\rho'' = \frac{Z_1 \parallel Z_2 - Z_3}{Z_1 \parallel Z_2 + Z_3}$$

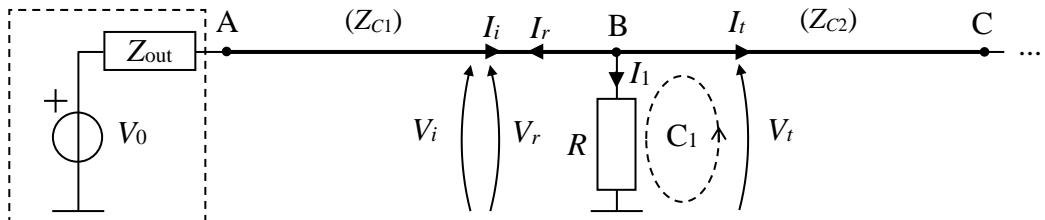
pri čemu se mogu konstruisati primeri kod kojih bi svi koeficijenti refleksije bili istog znaka (npr. za $Z_1 = Z_2 = Z_3$).



Slika 4.4.4. Grananje voda sa segmentima različitih karakterističnih impedansi

Kaskadne linije

Nešto složeniji slučaj javlja se u situacijama kada je na vodu prisutan kratak odvod konačne otpornosti R iza koga se nastavlja drugi vod (slika 4.4.5). Ovakva situacija često se sreće u praksi kada izolacija između provodnih žila voda počinje da popušta i opadne znanto ispod nominalne vrednosti (koja je reda $G\Omega$).



Slika 4.4.5. Kaskadna linija

Po istom principu kao i u ranijim konfiguracijama, zaključujemo da će se u vodu karakteristične impedanse Z_{C1} , pored incidentnog, javiti i reflektovani talas, a da će se kroz vod karakteristične impedanse Z_{C2} početi prostirati transmitovani talas. Suštinska razlika ogleda se u prisustvu otpornosti R koja pravi strujne gubitke i predstavlja element sa koncentrisanim parametrima za koji se ne mogu primeniti talasne jednačine.

Kirhofovi zakoni i konstitutivne relacije za sistem sa slike 4.4.5 glase

$$\begin{aligned} -V_i - V_r + V_t &= 0 \\ I_i - I_r - I_1 - I_t &= 0 \\ V_i &= Z_{C1}I_i \\ V_r &= Z_{C1}I_r \\ V_t &= Z_{C2}I_r = RI_1 \end{aligned}$$

Rešavanjem ovog sistema jednačina po V_r i V_t dobija se da su koeficijenti refleksije i transmisije

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{C2} \| R - Z_{C1}}{Z_{C2} \| R + Z_{C1}} \\ \tau &= \frac{V_t}{V_i} = 1 + \rho \end{aligned}$$

Sa stanovišta prostiranja talasa u vodu karakteristične impedanse Z_{C1} , sistem se, dakle, ponaša kao da "vidi" paralelnu vezu otpornosti R i impedanse Z_{C2} .

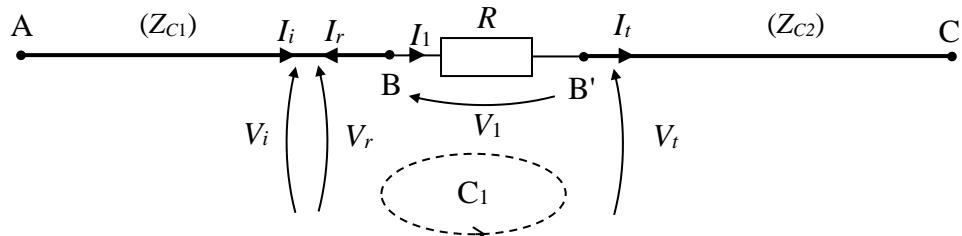
Redna otpornost na vodu (prekid)

Ukoliko se na vodu javi redna otpornost sa koncentrisanim parametrima, tada se talas na njoj razdeljuje kao i na svakom drugom naponskom razdelniku s tim da vod iz koga talas nailazi "vidi" rednu vezu ove impedanse i karakteristične impedanse narednog voda. Ovo će biti

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

pokazano i formalno, sastavljanjem odgovorajućeg sistema jednačina za konfiguraciju prikazanu na slici 4.4.6.

S obzirom na redni pad napona



Slika 4.4.6. Redna otpornost na vodu.

$$-V_i - V_r + V_t + V_1 = 0$$

$$I_i - I_r - I_1 = 0$$

$$I_1 - I_t = 0$$

$$V_i = Z_{C1} I_i$$

$$V_r = Z_{C1} I_r$$

$$V_1 = R I_1$$

$$V_t = Z_{C2} I_r$$

Rešavanjem po V_r i V_t , dobijaju se jednakosti

$$V_r = V_i \frac{(R + Z_{C2}) - Z_{C1}}{(R + Z_{C2}) + Z_{C1}}$$

$$V_t = \frac{Z_{C2}}{R + Z_{C2}} (V_i + V_r)$$

Što se refleksija tiče, zaključak je da se iz prostiruće sredine ovakva konfiguracija ponaša kao redna veza otpornosti R i impedanse Z_{C2} . Za razliku od toga, amplituda transmitovanog talasa koji će se prostirati ka tački C, dobija se preko naponskog razdelnika R i Z_{C2} , s tim da se tačka B-B' ponaša kao "izvor" ovog talasa sa nultom (idealnom) impedansom.

Odgovarajući koeficijenti refleksije i transmisije dati su izrazima

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{(R + Z_{C2}) - Z_{C1}}{(R + Z_{C2}) + Z_{C1}}$$

$$\tau = \frac{V_t}{V_i} = \frac{Z_{C2}}{R + Z_{C2}} (1 + \rho)$$

4.4.3. Analiza refleksija u nesinusoidalnom (impulsnom) režimu

Posmatranje prostiranja i refleksija talasa na vodovima u prostoperiodičnom režimu nije od značaja za telekomunikacije s obzirom na veoma širok frekvencijski spektar korišćenih signala. Osim toga karakteristična impedansa linearne prenosne linije nije konstantna. Ukoliko se ne zanemare otpornost i odvodnost linije, sledi da sa promenama učestanosti signala, linija može pokazati potpuno drugačije ponašanje u pogledu prostiranja i refleksije talasa. Kada je učestanost signala mala, tada u karakterističnoj impedansi voda dominiraju aktivne komponente, pa je

$$\lim_{\omega=0} Z_C = \lim_{\omega=0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

Sa druge strane, za velike učestanosti, u karakterističnoj impedansi dominiraju reaktivne komponente i dobija se da je

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_C = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

Prema tome, u impulsnom režimu postoje bar dve suštinski različite karakteristične impedanse za svaku liniju. Kako je g najčešće veoma malo, niskofrekventna impedansa je velika, dok je visokofrekventna impedansa mala. Prevojne tačke na grafiku karakterisitčne impedanse su

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{g}{c} \\ \omega_2 &= \frac{r}{l}\end{aligned}$$

Ako je $r/g \gg l/c$ jasno je da je $\omega_2 \gg \omega_1$. Između ove dve učestanosti grafik karakteristične impedanse se menja veoma blago. Ovim je primena principa superpozicije bitno zakomplikovana i u nastavku će se od nje u potpunosti odustati.

Umesto toga, koristiće se sledeći rezon. Postoje tri tipa signala koja su od značaja za telekomunikacije:

1. - Hevisajdov impuls (odskočna funkcija), koji se koristi u merenjima na bakarnim provodnicima radi karakterizacije linije
2. - usamljeni pravougaoni impuls trajanja T , koji predstavlja idealizovanu sliku telekomunikacionog signala
3. - usamljen Gausov impuls, koji predstavlja realnu sliku telekomunikacionog signala ograničenog spektra. Ovo je funkcija oblika \cos^2 ili \sin^2 .

U prvom slučaju analiza se može svesti na posmatranje tri intervala: $t < 0$, $t \rightarrow 0^+$ i $t > 0$. Za ova tri intervala važe sledeći zaključci:

$$\lim_{t \rightarrow 0^-} Z_C = \lim_{\omega=0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} Z_C = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

$$\lim_{t > 0} Z_C = \lim_{\omega=0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

Ovakva analiza je ispravna ako se ima na umu da vod nema memoriju i, stoga, njegovo ponašanje u pojedinim trenucima ne zavisi od stanja ili pobude u prethodnim trenucima. Rezultati ovog pristupa, koji će kasnije biti prikazani, poklapaju se sa rezultatima merenja spektra u uočenim intervalima i ispravno opisuju i predviđaju sve pojave na vodovima.

U slučaju usamljenog pravougaonog impulsa trajanja T , princip je veoma sličan, s tim da se sada uočava pet podintervala $t < 0$, $t \rightarrow 0^+$, $0 < t < T$, $t \rightarrow T^+$ i $t > T$.

Za Gausov impuls mora se primeniti nešto složenija analiza koja bi npr. uključila sledeće intervale

$$\lim_{t \ll 0} Z_C = \lim_{\omega=0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

$$\lim_{\text{na početku}} Z_C = \lim_{\omega_1 < \omega < \omega_2} Z_C = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \Rightarrow \text{superpozicija sa konačno mnogo komponenti}$$

$$\lim_{\substack{\text{na najstrmijem} \\ \text{delu krive}}} Z_C = \lim_{\omega \gg \omega_2} Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

$$\lim_{\substack{\text{pre maksimuma} \\ \text{neposredno posle} \\ \text{maksimuma}}} Z_C = \lim_{\omega_1 < \omega < \omega_2} Z_C = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \Rightarrow \text{superpozicija sa konačno mnogo komponenti}$$

$$\lim_{\substack{\text{oko} \\ \text{maksimuma}}} Z_C = \lim_{\omega < \omega_1} Z_C = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

$$\lim_{\substack{\text{na najstrmijem} \\ \text{delu krive}}} Z_C = \lim_{\omega \gg \omega_2} Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

$$\lim_{\substack{\text{na završetku}}} Z_C = \lim_{\omega_1 < \omega < \omega_2} Z_C = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \Rightarrow \text{superpozicija sa konačno mnogo komponenti}$$

$$\lim_{t \gg 0} Z_C = \lim_{\omega=0} \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

Kako je i ovakva analiza veoma složena, Gausovi impulsi se najčešće tretiraju kao usamljeni pravougaoni impulsi sa pet karakterističnih oblasti nakon čega se kriva dobijena snimanjem reflektovanih impulsa "smekša" ublažavanjem oštine rastućih i opadajućih ivica². Mada se u

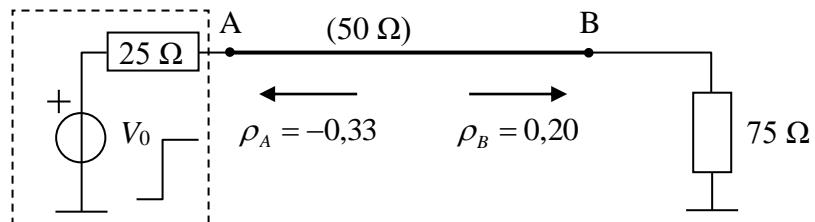
² Ovo je neka vrsta niskopropusnog filtriranja sa mnogo umetničke slobode

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

praksi Gausovi impulsi veoma često koriste, u narednoj analizi izlaganje će, zbog jednostavnosti, biti ograničeno samo na prva dva idealizovana slučaja.

Kao prvi alat koji je neophodan za analizu vodova u impulsnom režimu uvešće se tzv. Bevljevi (*Bewley*) dijagrami. Zbog specifičnog izgleda koji podseća na rešetkastu strukturu drvenih podupirača za ruže, ovi dijagrami su dobili i popularan naziv *lattice*³ dijagrami. *Lattice* dijagrami su vremensko-prostorni prikazi prostirućih talasa kod kojih je vreme najčešće prikazano na vertikalnoj, a rastojanje na horizontalnoj osi. *Lattice* dijagram pregledno prikazuje pravac kretanja svakog incidentnog, reflektovanog i transmitovanog talasa na liniji u svim vremenskim trenucima. Primenom *lattice* dijagrama znatno se pojednostavljuje praćenje višestrukih refleksija na vodovima.

Kako je *lattice* dijagram najlakše objašnjavati na konkretnom primeru, posmatraće se konfiguracija sa slike 4.4.7 i za nju će se konstruisati *lattice* dijagram propagacije Hevisajdovog impulsa amplitude $V_0 = 5 \text{ V}$ kroz vod. S obzirom da se, zbog neuparenosti impedansi na oba kraja voda očekuju višestruke refleksije u neograničenom vremenskom intervalu, analiza će se ograničiti uvođenjem jedne opravdane i veoma realne pretpostavke. Nakon dovoljnog broja odbijanja, energija signala će oslabiti toliko da ga više nećemo moći izmeriti nikakvim instrumentom, odnosno nećemo ga moći razlikovati od šuma u kanalu. Ako je očekivani nivo šuma npr. $\pm 10 \text{ mV}$, tada je opravданo zanemariti sve refleksije čija je amplituda manja od ove vrednosti, a greška koja se pri tome čini istog je reda veličine kao i slučajna greška merenja signala u tački B, bez obzira na preciznost upotrebljenog instrumenta.



Slika 4.4.7. Primer voda sa višestrukim refleksijama

Asimptotska analiza daje da će, nakon dovoljno dugo vremena, i u tački A i u tački B biti uspostavljen signal amplitude

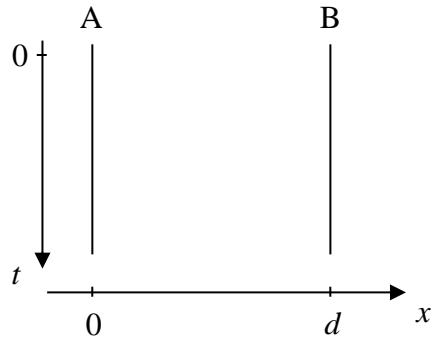
$$\frac{kV_0}{1-\rho_B\rho_A} \cdot \frac{2}{1+\rho_B} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 5 \text{ V}}{1+0,2 \cdot \frac{1}{3}} = 3,750 \text{ V}$$

Lattice dijagram za kontinualnu analizu u vremenu formira se tako što se za svaku krajnju tačku svih elemenata sa raspodeljenim parametrima povuče jedna vertikalna linija. Razmak između linija odgovara rastojanju na x-osi između uočenih tačaka. U primeru sa slike 4.4.7 postoje

³ Lattice - struktura od ukrštenih drvenih ili metalnih traka obično postavljena tako da se između tih traka formiraju okna u dijagonalnoj romboidnoj šari. (Random House Unabridged Webster's Dictionary, izdanje na CD-u, u slobodnom prevodu autora)

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

samo dve tačke A i B koje se nalaze na rastojanju d , gde je d dužina voda. Početni izgled *lattice* dijagrama dat je na slici 4.4.8.

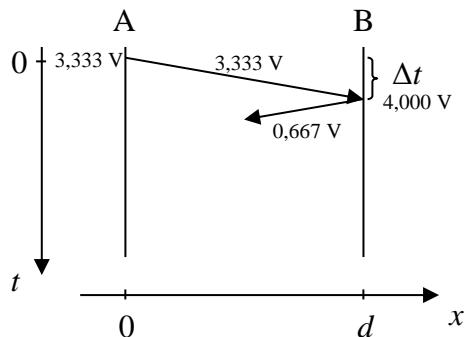


Slika 4.4.8. Početni izgled *lattice* dijagrama

U trenutku $t = 0$ s, u vod se imituje signal amplitude

$$kV_0 = \frac{2}{3} \cdot 5 \text{ V} = 3,333 \text{ V}$$

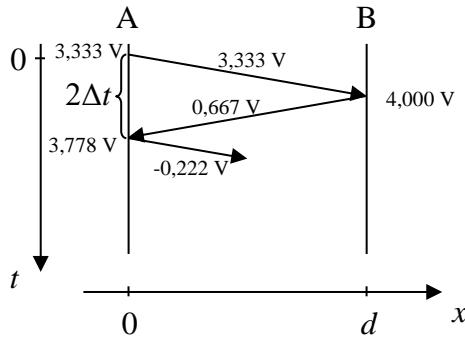
U vodu AB počinje da se uspostavlja talas brzinom koja je određena parametrima voda, odnosno njegovim kašnjenjem Δt . Nakon intervala Δt u tačku B pristiže signal koji se, zbog neuparenosti impedanse u ovoj tački, delimično reflektuje nazad ka tački A. Ovo je prikazano na slici 4.4.9.



Slika 4.4.9. Izgled dijagrama nakon prve refleksije signala u tački B

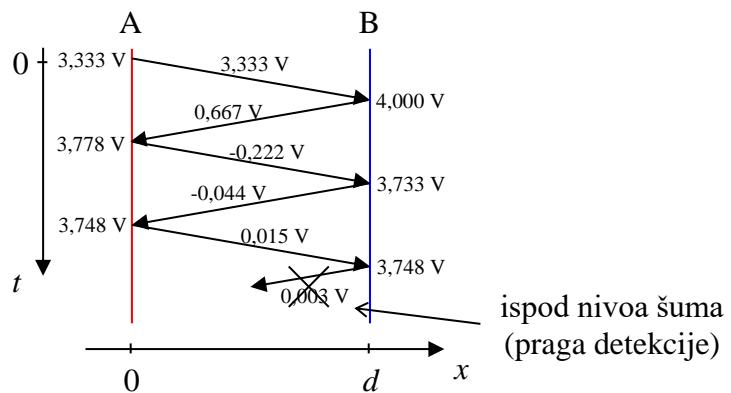
Od tog trenutka napon u tački B predstavlja sumu dva signala: jednog incidentnog od 3,333 V i jednog reflektovanog od 0,667 V, što ukupno daje 4,000 V. Reflektovani signal, koji je superponiran na incidentni Hevisjadov impuls neograničenog trajanja nastavlja da se propagira ka tački A, i takođe ima neograničeno trajanje. U tački A, će se nakon vremena $2\Delta t$ ovaj signal ponovo reflektovati i deo energije vratiti ka tački B. Od tog trenutka napon u tački A predstavljaće sumu amplituda tri prostiruća talasa: jednog incidentnog od 3,333 V, jednog reflektovanog od 0,667 V i jednog reflektovanog od -0,222 V, što ukupno daje 3,778 V (slika 4.4.10).

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



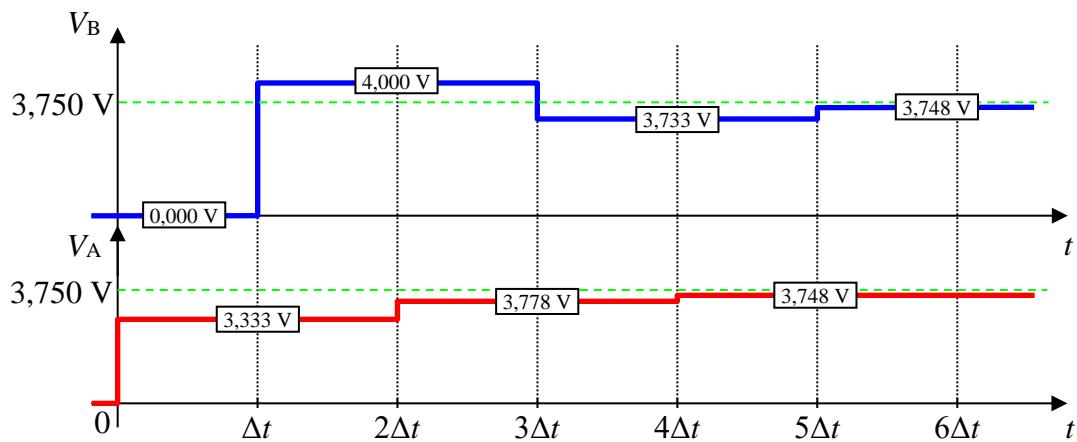
Slika 4.4.10. Izgled lattice dijagrama nakon druge refleksije

Postupak se nastavlja sve dok amplituda nekog od reflektovanih talasa ne padne ispod nivoa šuma od ± 10 V. Ovo je prikazano na slici 4.4.11 na kojoj je dat konačan izgled lattice dijagrama.



Slika 4.4.11. Konačan izgled lattice dijagarma za konfiguraciju sa slike 4.4.7

Vidi se da se konačno stanje u vodu dobijeno pomoću lattice dijagrama razlikuje od asimptotske vrednosti za iznos koji je manji ili jednak nivou šuma u kanalu. Međutim, za razliku od skalarne vrednosti dobijene asimptotskom formulom, lattice dijagram se može iskoristiti za efikasno crtanje signala u tačkama A i B u celom prelaznom režimu, što je prikazano na slici 4.4.12.



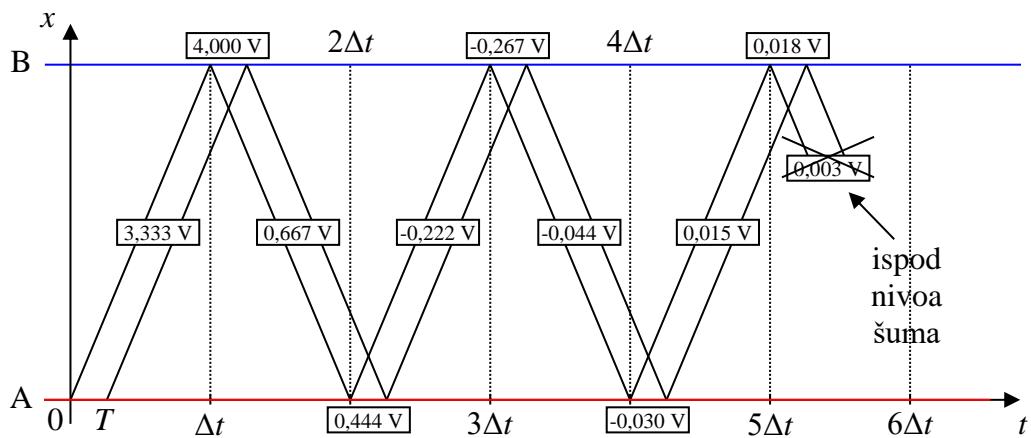
Slika 4.4.12. Naponski signali u tačkama A i B

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

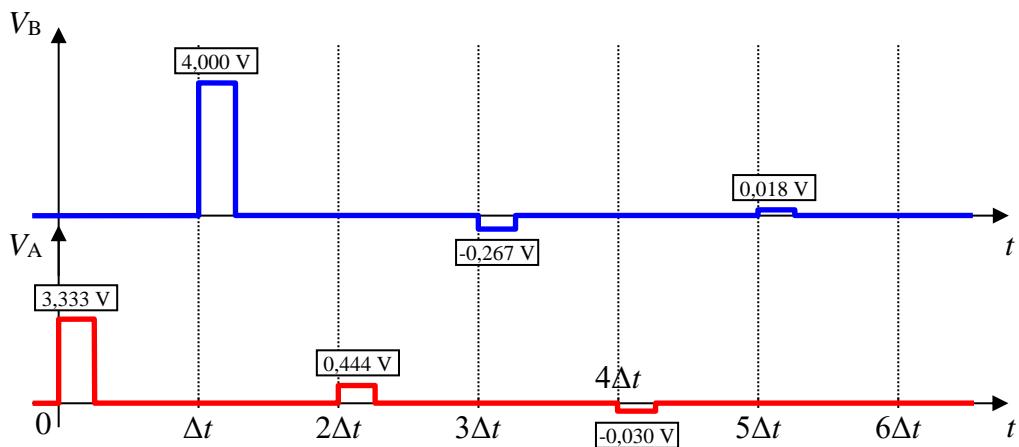
Kao drugi primer razmotriće se prostiranje usamljenog pravougaonog impulsa u istoj ovoj konfiguraciji. Neka je trajanje impulsa T , kraće od kašnjenja linije Δt . Ukoliko ovo ne bi bilo tačno, slučaj bi se, u najvećoj meri, svodio na prethodnu analizu.

Osnovna razlika, u odnosu na slučaj odskočne pobude, je u tome što sada pobuda prestaje pre nego što nađe reflektovani talas, pa nema superpozicije putujućih talasa, osim u kratkom vremenskom intervalu u tačkama u kojima postoje nelinearnosti (na samim krajevima voda).

U narednom primeru, *lattice* dijagram će namerno biti zarotiran, tako da x -osa bude vertikalna, a vremenska osa horizontalna, kako bi se lakše nacrtali vremenski dijagrami signala u tačkama od interesa.



Slika 4.4.13. *Lattice* dijagram propagacije usamljenog pravougaonog impulsa

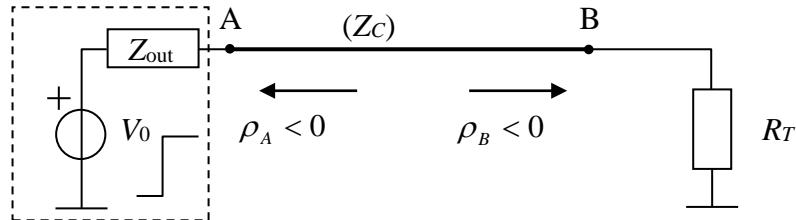


Slika 4.4.14. Naponski signali u tačkama A i B

Za razliku od slučaja sa odskočnom pobudom amplitude V_0 , kada je opseg superponiranih napona na liniji mogao biti između 0 i $2V_0$ (dakle istog predznaka kao i pobuda), u slučaju usamljenog impulsa, postoji mogućnost pojave impulsa suprotnog predznaka, odnosno signali na liniji mogu se kretati u opsegu od $-V_0$ do V_0 .

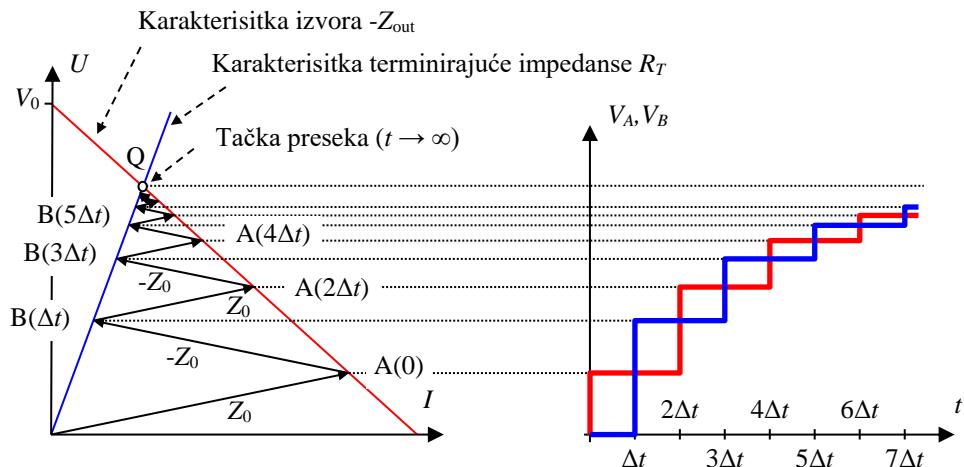
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Pored *lattice* dijagrama, za jednostavnije konfiguracije vodova, mogu se koristiti i tzv. Beržeronovi (*Bergeron*) dijagrami. Ovi dijagrami određuju vrednosti signala na osnovu preseka U-I karakteristik voda i elemenata na njegovim krajevima.



Slika 4.4.15. Primer jednostavne konfiguracije voda

Za primer konfiguracije date na slici 4.4.15, na slici 4.4.16 prikazan je izgled Beržeronovog dijagrama i način dobijanja signala u tačkama A i B.



Slika 4.4.16. Izgled Beržeronovog dijagrama

Crtanje dijagrama započinje skiciranjem U-I karakteristika izvora ($-Z_{out}$) i terminirajuće impedanse u tačkama A i B (R_T). Potom se iz koordinatnog početka sa nagibom od $+Z_C$ (karakteristika voda) traži presek sa karakteristikom izvora. Ovim je određena vrednost napona u tački A u trenutku $t = 0$ označenoj kao $A(0)$. Nakon toga se iz tačke $A(0)$ povlači prava pod nagibom $-Z_C$ do karakteristike terminirajuće otpornosti. Time se dobija vrednost napona u tački B nakon vremena Δt . Negativan nagib karakteristike posledica je činjenice da se u tački B vod ponaša kao izvor novog (reflektovanog) talasa. Potom se, ponovo, pod nagibom Z_C , povlači prava do karakteristike izvora i postupak se ponavlja sve dok se ne stigne do tačke preseka označene sa Q. Vrednosti napona u tačkama $A(0), A(2\Delta t), A(4\Delta t)\dots$ i tačkama $B(\Delta t), B(3\Delta t), B(5\Delta t)\dots$ preslikavaju se na paralelni U-t dijagram, na kome se istovremeno dobija izgled signala u tačkama A i B u funkciji vremena.

I pored toga što se Beržeronovi dijagrami mogu korisiti za brzo skiciranje signala na vodu, oni su praktično primeljni samo u malom broju jednostavnih situacija. Kada je konfiguracija voda iole složenija od one prikazane na slici 4.4.15, npr. kaskadne linije ili višestruki odvodi, Beržeronov dijagram postaje pretrpan i nepregledan. Osim toga, kod Beržeronovih dijagrama ne vodi se računa o zavisnosti signala od prostorne koordinate, pa je moguće dobiti samo signale

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

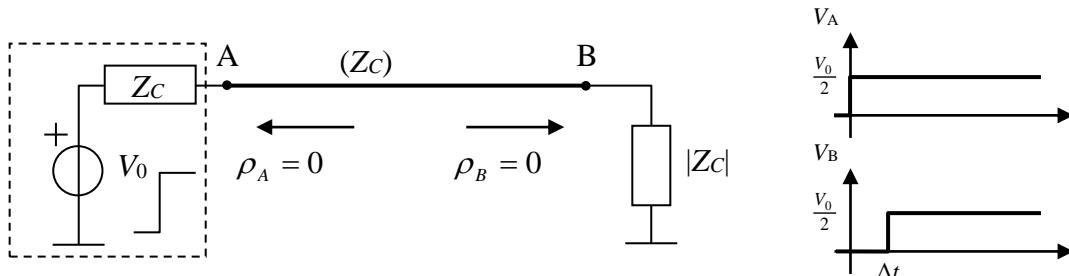
u krajnjim tačkama voda (A i B). Za razliku od njih, *lattice* dijagrami omogućavaju dobijanje vremenskog signala u bilo kojoj tački na vodu. Ukoliko je neki od koeficijenata refleksije u tačkama A ili B pozitivan, tj. ako postoje prebačaji napona, Beržeronov dijagram se znatno teže konstruiše. Kako je određivanje signala pomoću Beržeronovih dijagrama u osnovi geometrijska metoda, postoje brojni subjektivni izvori kumulativnih grešaka, koji imaju znatan uticaj na krajnji rezultat. Poseban problem javlja se u razmatranju realnijih modela vodova koji uključuju i poduzno slabljenje. S obzirom na ignorisanje zavisnosti signala od rastojanja, Beržeronovi dijagrami, za razliku od *lattice* dijagrama, nikako ne mogu uzeti u obzir efekat slabljenja prostirućih talasa duž voda. Poslednje i najvažnije ograničenje Beržeronovih dijagrama je mogućnost primene samo u slučajevima odskočne pobude, što znači da se pomoću njih ne mogu opisati sve pojave i oblici signala koji postoje u telekomunikacionim sistemima.

4.4.4. Specijalni slučajevi terminirajućih impedansi

U nastavku će biti razmotreno nekoliko karakterističnih vrednosti terminirajućih impedansi i oblika vremenskih signala koji se na njima javljaju.

$$Z_T = |Z_C|$$

Kao prvi primer razmotrimo situaciju kada je vod zatvoren terminirajućom otpornošću koja je uparena sa karakterističnom impedansom voda (slika 4.4.17).



Slika 4.4.17. Terminirajuća otpornost prilagođena vodu

Koeficijent refleksije u tački B iznosi

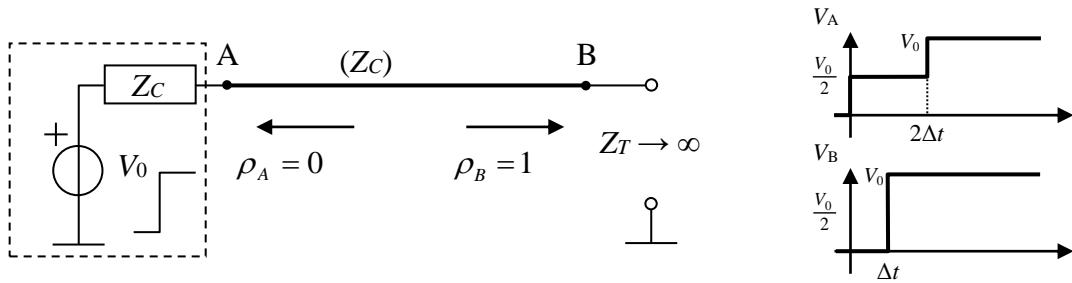
$$\rho_B = \frac{Z_C - Z_C}{Z_C + Z_C} = 0$$

To znači da nema refleksija i da je napon u tački B, zapravo zakasneli napon iz tačke A.

$$Z_T \rightarrow \infty$$

Sledeći primer odnosi se na situaciju kada je terminirajuća otpornost (ulazna otpornost prijemnika) veoma velika. (slika 4.4.18).

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.18. Beskonačna terminirajuća otpornost

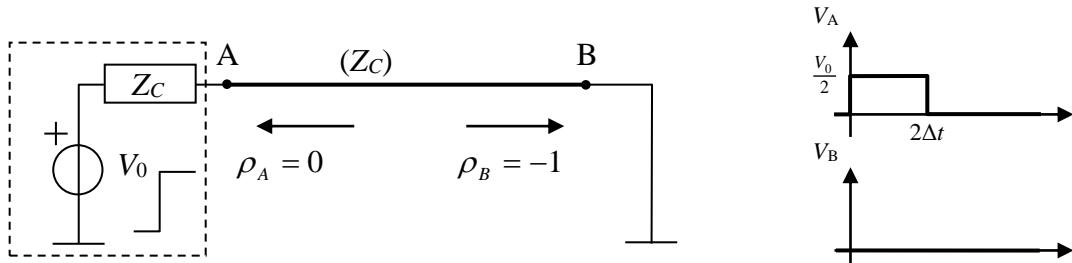
Koeficijent refleksije u tački B iznosi

$$\rho_B = \lim_{Z_T \rightarrow \infty} \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} = 1$$

Amplituda reflektovanog talasa ista je kao i amplituda incidentnog talasa, pa se u tački B napon dvostruko povećava. Nakon povratka reflektovanog signala u tačku A, i napon u tački A postaje V_0 .

$Z_T = 0 \Omega$

Kada je vod zatvoren kratkom vezom, napon u tački B je konstantan (0 V), ali kroz vod se ipak propagiraju refleksije. Ovo je ilustrovano na slici 4.4.19.



Slika 4.4.19. Vod zatvoren kratkom vezom

Koeficijent refleksije u tački B je

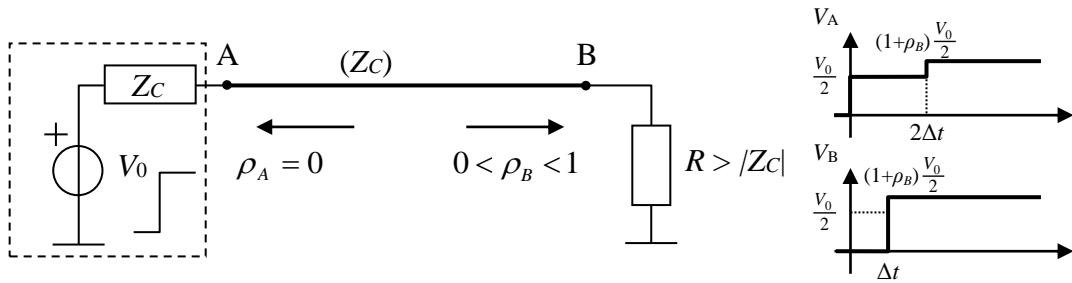
$$\rho_B = \frac{0 \Omega - Z_C}{0 \Omega + Z_C} = -1$$

Amplituda reflektovanog talasa je ista je kao i amplituda incidentnog talasa, ali je suprotnog znaka. Kada reflektovani talas stigne u tačku A, napon u ovoj tački takođe pada na nulu.

$Z_T = R > |Z_C|$

Čisto aktivna impedansa veća od karakteristične impedanse voda, daće koeficijent refleksije koji je veći od nule, što znači da će rezultantni napon u vodu, nakon refleksije, po amplitudi biti veći od incidentnog napona (slika 4.4.20).

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



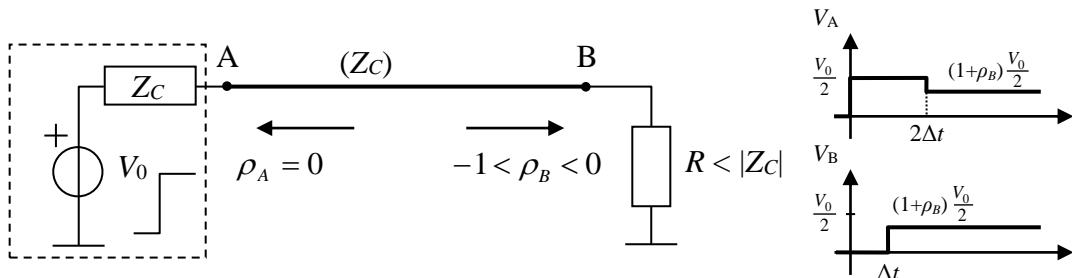
Slika 4.4.20. Terminirajuća otpornost veća od karakteristične impedanse voda

Koeficijent refleksije u tački B je

$$\rho_B = \frac{R - Z_C}{R + Z_C} > 0$$

$$Z_T = R < |Z_C|$$

Impedansa manja od karakteristične impedanse voda, daće koeficijent refleksije manji od nule. Zbog toga će reflektovani napon biti suprotnog znaka od incidentnog napona. Kada se ova negativna refleksija vrati u tačku A, spustiće napon na manju vrednost (slika 4.4.21).



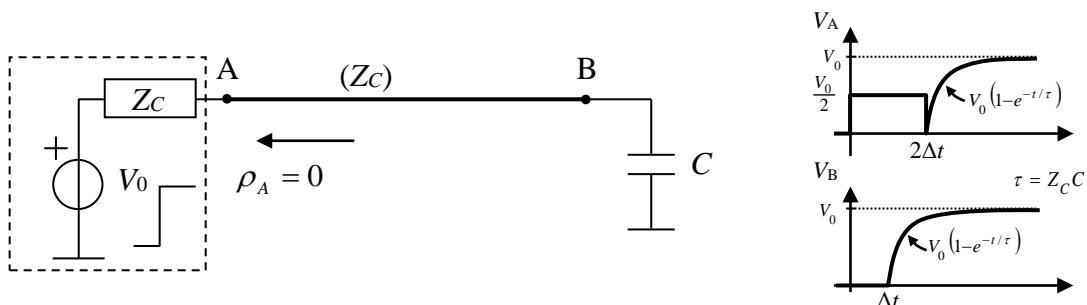
Slika 4.4.21. Terminirajuća otpornost manja od karakteristične impedanse voda

Koeficijent refleksije u tački B je

$$\rho_B = \frac{R - Z_C}{R + Z_C} < 0$$

$$Z_T = 1/j\omega C$$

Razmotrimo slučaj voda zatvorenog kapacitivnim elementom. Na slici 4.4.22 prikazani su signali u slučaju odskočne pobude i voda zatvorenog kondenzatorom.



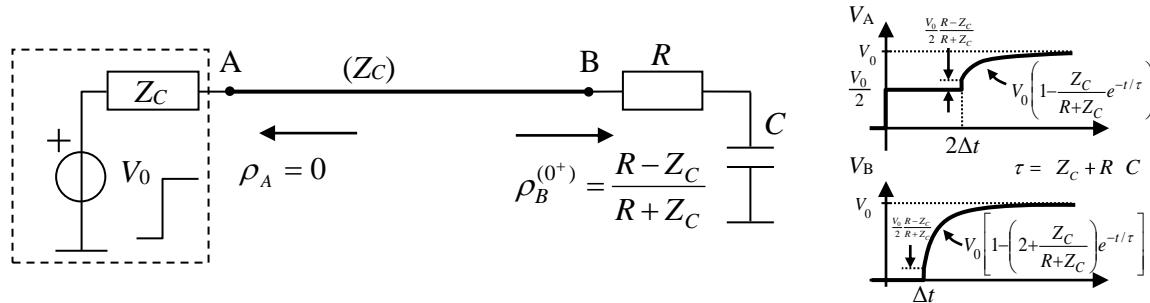
Slika 4.4.22. Vod zatvoren kapacitivnim elementom

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

U trenutku nailaska strme ivice, kapacitivnost C se vidi kao kratak spoj koga protiče veoma velika struja. Zbog toga se, u prvi mah, nazada ka tački A reflektuje signal $-V_0/2$, odnosno doći će do potpune refleksije sa koeficijentom -1. Kako se kondenzator puni, struja kroz njega opada, sve dok potpuno ne prestane teći. Teoretski to će se dogoditi tek nakon neograničeno dugo vremena, jer struja opada eksponencijalno. Istovremeno, napon na kondenzatoru raste (reflektovani napon raste) i to se preko voda Z_C , preslikava u tačku A. Na kraju će kondenzator za konstantan naponski nivo predstavljati otvorenu vezu i aismptotsko stanje odgovara potpunoj refleksiji sa koeficijentom +1. Vreme punjenja kondenzatora određeno je vremenskom konstantom

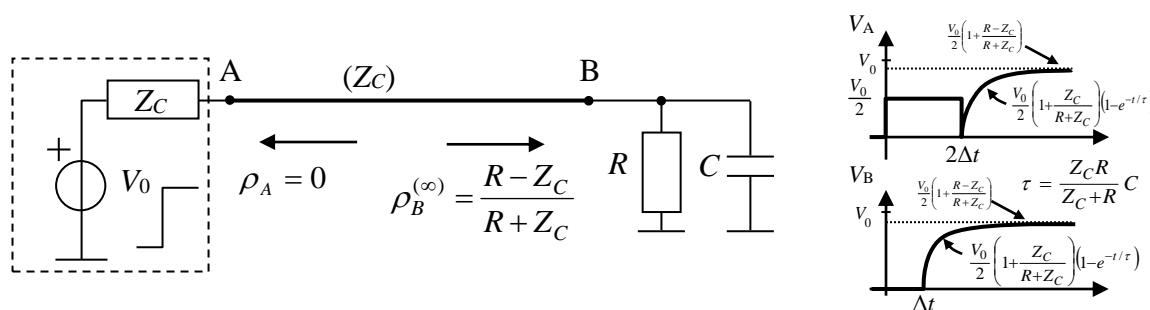
$$\tau = Z_C C$$

Da je redno na kondenzator bio prikačen otpornik, tada bi se u tački B omogućio trenutan skok napona određen koeficijentom refleksije, kao na slici 4.4.23. Nakon dovoljno dugo vremena i punjenja kondenzatora C , koeficijent refleksije bi težio ka +1, jer bi kondenzator bio napunjen, kroz njega ne bi mogla više teći struja, pa bi ga konstantan nivo "video" kao otvorenu vezu. Dakle, aismptotska vrednost je ista, samo je početna refleksija drugačija. Vremenska konstanta punjenja kondenzatora određena je rednom vezom otpornosti R i karakterisitčne impedanse Z_C .



Slika 4.4.23. Vod zatvoren kapacitivnim elementom i rednom otpornošću

Kada je kondenzator nesavršen ili se u paralelu sa njim veže otpornik, tada će se dobiti nešto niža aismptotska vrednost što je prikazano na slici 4.4.24. U trenutku $t = 0^+$, kondenzator predstavlja kratak spoj, pa otpornik R ne utiče na refleksije, odnosno početna situacija identična je sa onom na slici 4.4.22. Kako se kondenzator počinje puniti tako se struja kroz njega smanjuje, a kroz otpornik R povećava. U ustaljenom stanju, kondenzator će predstavljati otvorenu vezu, dok će aismptotski napon sada biti manji od V_0 . Vremenska konstanta punjenja kondenzatora data je paralelnom vezom otpornosti R i impedanse Z_C .

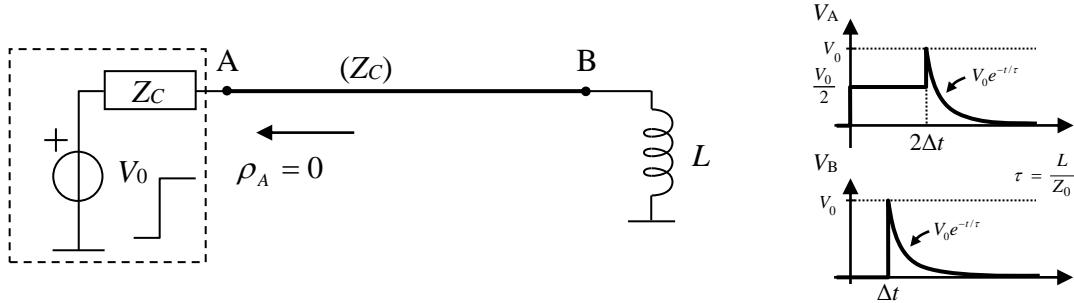


Slika 4.4.24. Vod zatvoren kapacitivnim elementom i paralelnom otpornošću

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$Z_T = j\omega L$$

Na slici 4.4.25 prikazan je vod zatvoren induktivnim elementom.

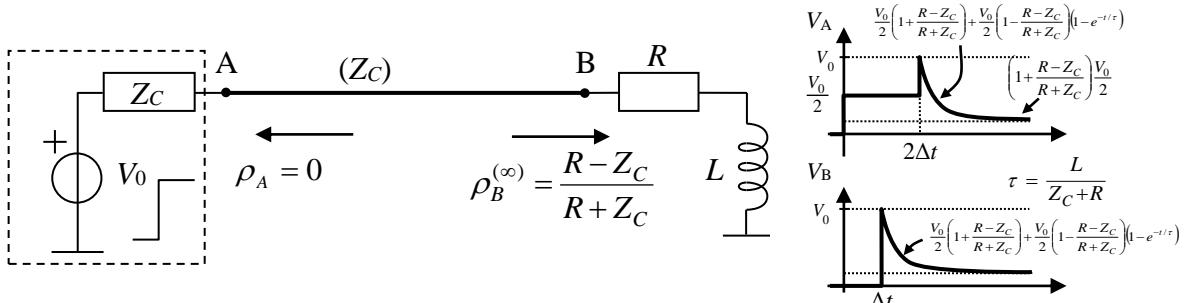


Slika 4.4.25. Vod zatvoren induktivnim elementom

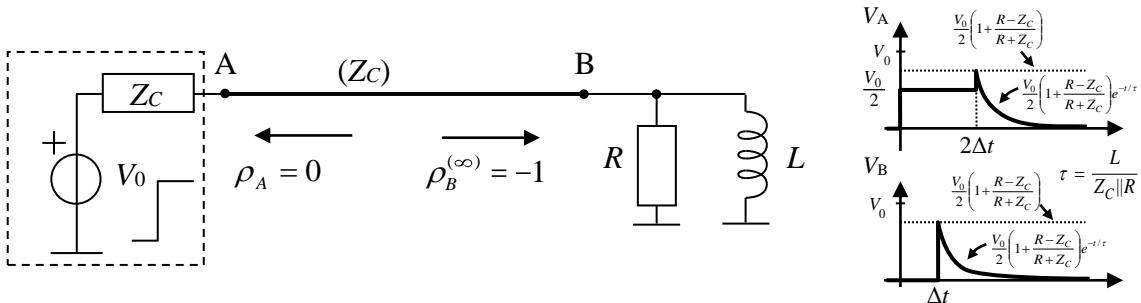
U trenutku nailaska strme ivice induktivnost se ponaša kao otvorena veza, jer se kroz kalem ne može trenutno uspostaviti električna struja. Zato je refleksija ka tački A u ovom trenutku potpuna, tj. sa koeficijentom +1. Kako se magnetsko polje u kalemu uspostavlja, kroz njega protiče sve veća sruja, a napon opada. U asymptotskom stanju, u režimu konstatnog naponskog nivoa kalem će predstavljati kratak spoj i signal će opasti do nule. Vremenska konstanta punjenja kalema iznosi

$$\tau = \frac{L}{Z_0}$$

Slično kao i u slučaju kapacitivne terminacije mogu se analizirati situacije kada se redno ili paralelno uz terminirajuću induktivnost veže otpornik R . Ove konfiguracije i signali u tačkama A i B koji im odgovaraju dati su na slikama 4.4.26 i 4.4.27.



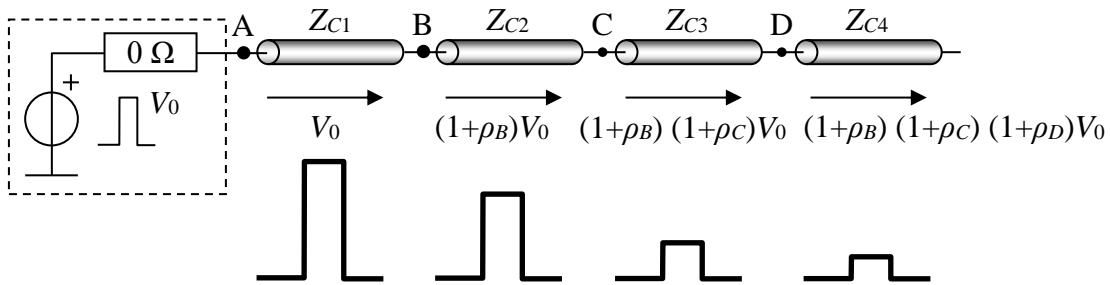
Slika 4.4.26. Vod zatvoren induktivnim elementom i rednom otpornošću



Slika 4.4.27. Vod zatvoren induktivnim elementom i paralelnom otpornošću

4.4.5. Uticaj refleksija na ponašanje telekomunikacionog sistema

Iz prethodne analize može se zaključiti da refleksije utiču na performanse telekomunikacionih sistema na nekoliko načina. Kao prvo, signali usled refleksija slabe i, ukoliko se na putu od predajnika do prijemnika nađe više kaskadnih nelineranih sredina (slika 4.4.28) signal koji pristigne do odredišta može biti značajno oslabljen.



Slika 4.4.28. Slabljenje direktnog signala usled refleksija kada su koeficijenti refleksije manji od nule

Čak i kada je situacija krajnje jednostavna, sa samo jednim linearnim vodom, pogrešno terminiranje na kraju voda može uzrokovati negativnu refleksiju koja se superponira na poslati signal i smanjuje njegovu vrednost (slike 4.4.19 i 4.4.21). Ako je ova vrednost ispod praga detekcije za dati logički nivo, doći će do greške u prenosu.

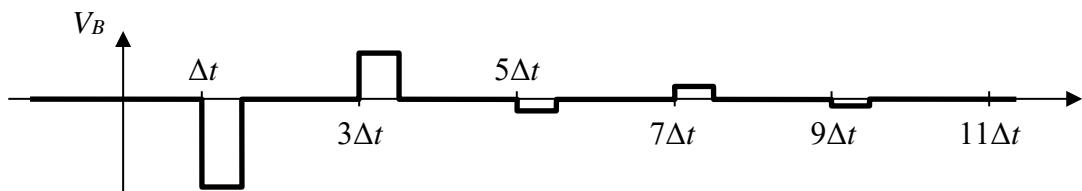
Smanjivanje naponskih nivoa u odnosu na njihove nominalne vrednosti bitno smanjuje otpornost sistema na aditivni šum. Sužavanje marge šuma mora se kompenzovati promenom donjih i gornjih pragova detekcije za logičke nivoe, što je često neprihvatljivo ili neekonomično. U telekomunikacionim sistemima ovakva intervencija bila bi ekvivalentna izmeni standarda na 1. OSI sloju, što nikako nije u nadležnosti projektanata instalacija ili operatera u mreži.

Ako je koeficijent refleksije pozitivan i blizak jedinici (velika terminirajuća otpornost), tada će se na mestu prijema signala javiti prebačaji napona i/ili struja (slike 4.4.20 i 4.4.22). Ovi prebačaji mogu preći tolerancije elektronskih kola na ulazu prijemnika i izazavati oštećenja.

Višestruke refleksije mogu uzrokovati detekciju "fantomske" impulsa u nekoliko narednih taktova i dovesti do veoma ozbiljnog porasta bitske verovatnoće greške. Čak i ako su svi reflektovani impulsi manji od praga detekcije, oni se mogu superponirati sa kasnije poslatim impulsima uzrokujući intersimbolsku interferenciju i nepredviđena slabljenja i pojačanja signala čije vrednosti zavise od konkretne binarne sekvene. Ovim se u kanalu generiše nelinearni šum sa memorijom što je izuzetno nepovoljno, jer je većina zaštitnih statističkih kodova konstruisana za linearne sisteme bez memorije. Da bi se izbegle smetnje uzrokovane višestrukim refleksijama, predajnik mora čekati sa slanjem narednog impulsa onoliko vremena koliko je liniji potrebno da priguši oscilacije. S obzirom da se vodovi projektuju tako da imaju malo poduzno slabljenje, prigušenje oscilacija će biti sporo. Koeficijenti refleksije bliski jedinici po absolutnoj vrednosti izazivaju dugotrajanu propagaciju reflektovanih impulsa kroz vod, čime se znatno produžava pauza između pojedinih impulsa u signalizaciji i smanjuje propusni opseg kanala.

4.4.6. Kompenzacija refleksija na krajevima komunikacionih linija

Na slici 4.4.29 prikazan je signal na prijemu koji je posledica samo jednog poslatog impulsa i višestrukih refleksija, odnosno eha. Za ovakav sistem, kod koga refleksije nisu kompenzovane, bilo bi neophodno sačekati bar $10\Delta t$ pre slanja sledećeg impulsa, gde je Δt vreme potrebno signalu da pređe rastojanje od predajnika do prijemnika. Prilikom projektovanja komunikacione opreme nije moguće unapred znati dužine svih linija i predvideti kašnjenja uzrokovana refleksijama, pa je bilo kakva standardizacija u tom smislu nemoguća. Zato je borba protiv refleksija uvek u rukama operatera koji postavljuju instalacije.

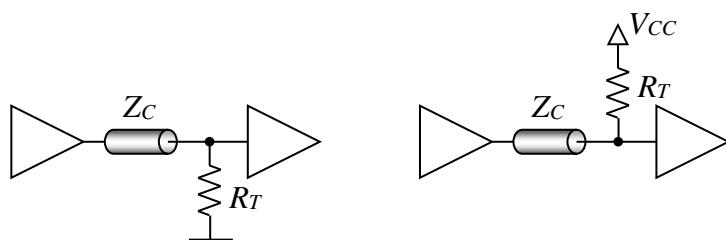


Slika 4.4.29. Sporo smirivanje linije usled koeficijenata refleksije bliskih jedinici

Najčešće su za eliminaciju štetnog uticaja refleksija koristi tehnika terminiranja linije određenim pasivnim ili aktivnim elementima. U toku razvoja komunikacionih sistema razvijene su i različite strategije za terminiranje linije u cilju sprečavanja štetnog dejstva refleksija. Međutim, nijedna od strategija nije savršena i svaka se zasniva na nekom kompromisu. Ovde će biti izloženi najčešće sretani slučajevi u praksi i njihove dobre i loše strane.

Paralelna terminacija

Kako je u najvećem broju slučajeva ulazna impedansa prijemnika veoma velika (veća od Z_C), paralelna terminacija predstavlja prirodno rešenje za eliminaciju refleksija. Vod se na mestu završetka terminira otpornošću čija je vrednost najčešće jednak karakterističnoj impedansi voda $R_T = |Z_C|$ i koja je paralelno vezana sa prijemnikom. Ovo je prikazano na slici 4.4.30. Paralelnu terminaciju moguće je realizovati vezivanjem otpornosti ka masi ili ka napajanju, u zavisnosti od toga da li je linija u neaktivnom stanju bliže visokom naponskom nivou ili masi.



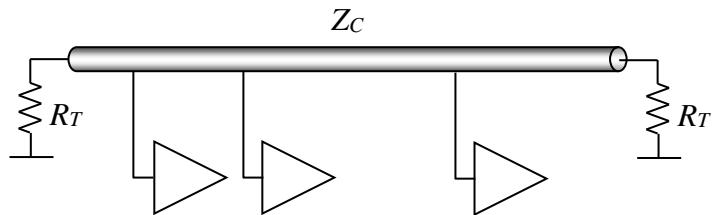
Slika 4.4.30. Dve varijante paralelnog terminiranja linije

Pozitivne strane ovakvog terminiranja linije su:

- potreba za samo jednom komponentom,
- lako određivanje vrednost terminirajuće otpornosti,
- jednostavno povezivanje na liniju,

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

- dobro ponašanje sistema kod raspodeljenog opterećenja kao kod magistrala gde se terminiraju samo krajevi voda (slika 4.4.31).

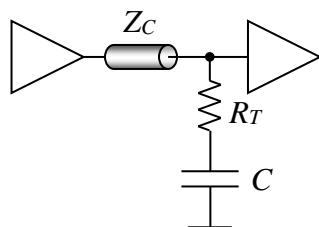


Slika 4.4.31. Pravilno terminiranje magistrale

Jedina ozbiljna negativna strana paralelne terminacije je stalna disipacija jednosmerne struje (tzv. DC disipacija) kroz terminirajuće otpornike. Ovaj problem nije od značaja za pojedinačan vod, ali ako se istog izvora napaja velik broj vodova, kao npr. u komutacionom razdelniku telefonskih centrala, tada ukupna snaga disipacije na hiljadama ovakvih otpornika može predstavljati ozbiljan problem.

Terminiranje linije RC elementom

Kada DC disipacija postane neprihvatljivo velika, prirodan pristup terminiranju linija sastoji se u dodavanju blokirajućeg rednog kondenzatora. Ovakav način terminiranja prikazan je na slici 4.4.32 i naziva se još i AC terminacija, s obzirom na nepostojanje jednosmerne struje u ustaljenom režimu.



Slika 4.4.32. AC terminacija linije

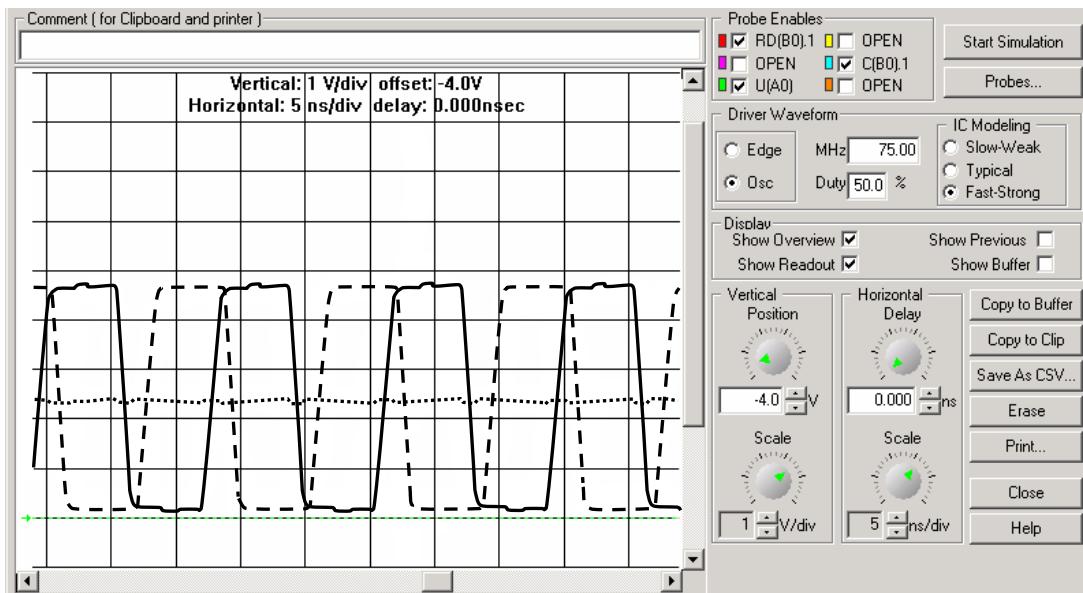
Terminirajući otpornik bira se tako da bude identičan karakterističnoj impedansi voda, kao i u slučaju paralelne terminacije, kako bi u prelaznom režimu (kada kondenzator predstavlja kratak spoj) refleksije bile prigušene. Redno sa terminirajućim otpornikom vezuje se kondenzator koji ima osnovnu funkciju da spreči stalan tok jednomerne struje i time smanji potrošnju energije.

Na prvi pogled čini se da ovo rešenje ima sve prednosti paralelne terminacije samo bez negativnih efekata u vidu disipacije jednosmerne struje. Međutim, postoji i nekoliko veoma ozbiljnih poteškoća vezanih za optimalan izbor vrednosti kondenzatora C .

Osnovni problem javlja se u niskopropusnom filtriranju strmih ivica signala čime se produžavaju vremena porasta i opadanja signala na liniji. Ako se, zbog eventualnog smanjenja vremenske konstante punjenja kondenzatora, usvoji premala vrednost za C , javiće se prebačaji napona. Ovi prebačaji dodatno remete vremena porasta i opadanja signala jer povećavaju naponski opseg koji je asimptotski potrebno dostići.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Slika 4.4.33 ilustruje talasne oblike koji potiču od relativno velikog kondenzatora. Slika je dobijena na HyperLynx simulatoru za liniju karakteristične impedanse od 50Ω , kašnjenja 5 ns terminirane otpornikom od 50Ω na red sa kondenzatorom od 2000 pF. Isprekidana linija prikazuje napon predajnika na ulazu u vod, puna linija prikazuje napon na kraju voda koji je zakašnjen za 5 ns, dok tačkasta linija predstavlja napon na kondenzatoru. Kao što se može uočiti, talasni oblici su dosta "čisti".



Slika 4.4.33. Potiskivanje refleksija upotrebom velikog blokirajućeg kondenzatora



Slika 4.4.34. Potiskivanje refleksija upotrebom malog blokirajućeg kondenzatora

Za deset puta manji blokirajući kondenzator (200 pF), u istom simulatoru dobija se slika 4.4.34. Sada je primetno prisustvo prebačaja i podbačaja u prijemnom signalu. Svaki impuls primljen je sa 5 ns zakašnjenja i istom amplitudom kao i poslati impuls. Međutim, nakon toga napon na

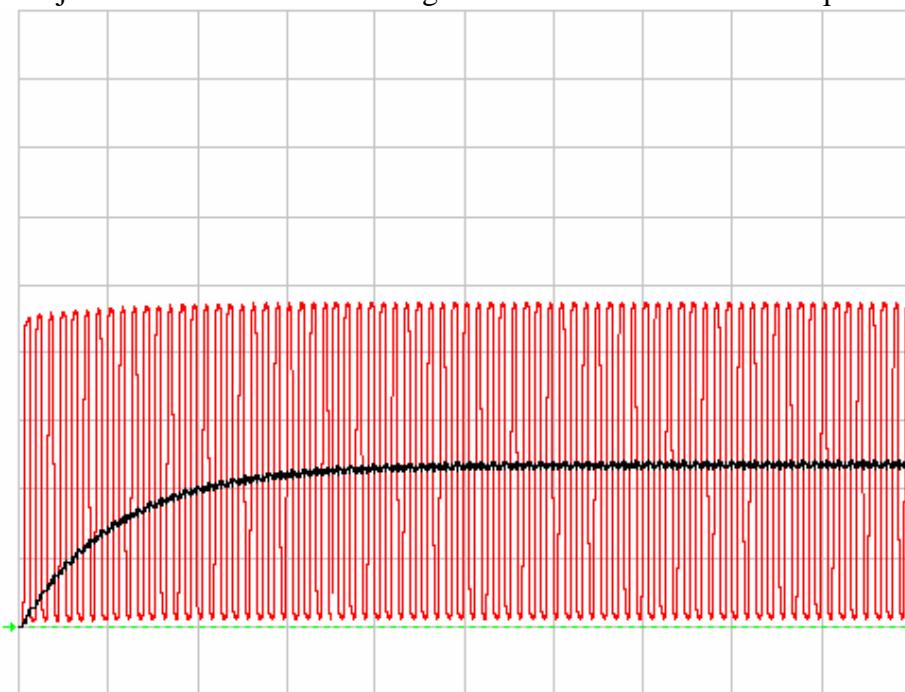
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

kondenzatoru nastavlja da raste (ili opada) dok se kondenzator puni i prazni na jednosmernom nivou, ponašajući se, u kombinaciji sa terminirajućom otpornošću kao integrator. Ova pojava je prisutna i kod velikog kondenzatora, ali je zbog velike vremenske konstante punjenja, daleko manje izražena i teže uočljiva nego kod brzih, malih kondenzatora.

Kada su ovi prebačaji i podbačaji dovoljno veliki, lako može doći do greške u detekciji poslatih logičkih nula i jedinica. Bitno je napomenuti da ovi premašaji nikako nisu posledica refleksija, već pomeraja napona usled akumulacije nanelektrisanja na oblogama kondenzatora.

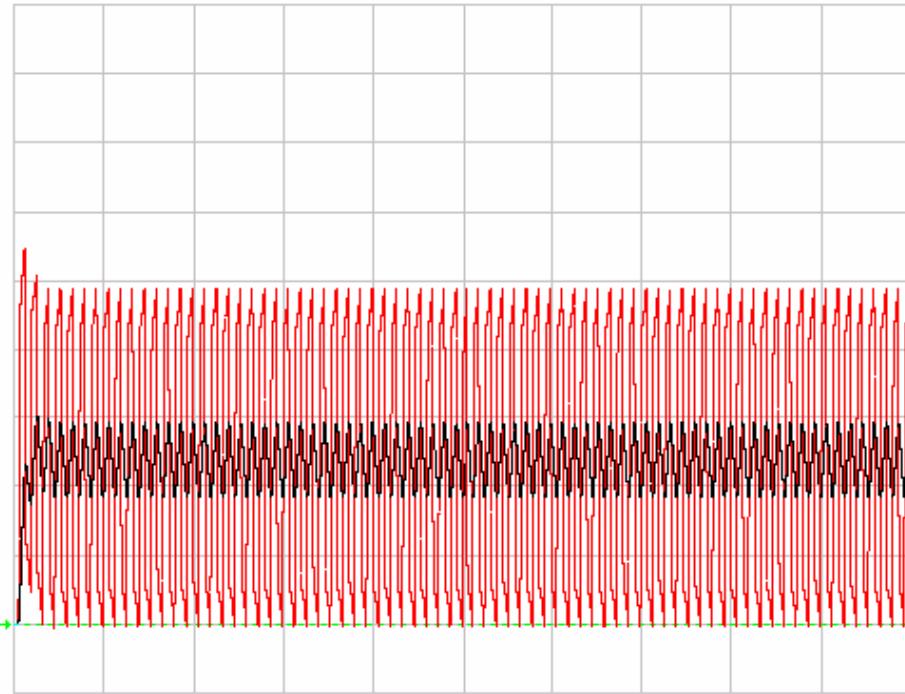
Nešto suptilniji uticaj vrednosti kapacitivnosti uočava se kada se povećava dužina transmisione linije. U karakterističnoj impedansi sadržana su podužna kapacitivnost c i podužna induktivnost l . Kako dužina linije raste, raste i ukupna vrednost kapacitivnosti i induktivnosti linije, bez obzira što karakteristična impedansa ostaje nepromenjena. Nakon određene kritične dužine voda, vrednosti ovih parametara će postati dovoljno velike da omoguće efikasnu razmenu energije između voda i blokirajućeg kondenzatora. Linija tada može prooscilovati (*ringing*) i vreme smirivanja uzrokovano ovim oscilacijama može značajno premašiti vreme smirivanja uzrokovano refleksijama. Ovo je ilustrovano na slikama 4.2.35 do 4.4.37.

Slika 4.4.35 ilustruje liniju kašnjenja 5 ns, terminiranu velikim blokirajućim kondenzatorom od 2000 pF. Napon na blokirajućem kondenzatoru (deblja linija male amplitude oscilacija u sredini) raste kontrolisano do polovine napona na prijemniku (tanja linija veće amplitude). Slika 4.4.33 predstavlja zumiranu sliku sa sredine grafika 4.4.35 nakon završetka prelaznog procesa.

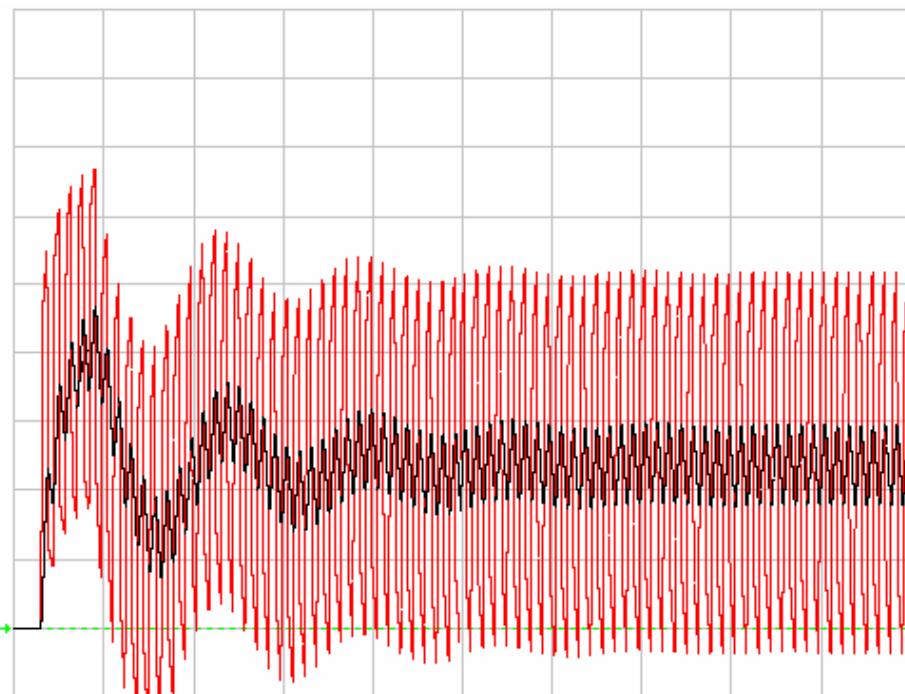


Slika 4.4.35. Signali na vodu kašnjenja 5 ns za slučaj velikog blokirajućeg kondenzatora
Slika 4.4.36 prikazuje istu liniju sa kašnjenjem od 5 ns samo za deset puta manji blokirajući kondenzator (200 pF). Vreme smirivanja linije je znatno kraće i slika 4.4.34 dobijena je sa zumiranjem u deo ovog grafika nakon prelaznog procesa.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.36. Signali na vodu kašnjenja 5 ns za slučaj malog blokirajućeg kondenzatora



Slika 4.4.37. Signali na vodu kašnjenja 30 ns za slučaj malog blokirajućeg kondenzatora

Slika 4.4.37 prikazuje liniju terminiranu malim blokirajućim kondenzatorom od 200 pF, ali sa znatno većim kašnjenjem od 30 ns. Kako je količina energije akumulirana u vodu istog reda veličine kao i energija koja se akumulira u blokirajućem kondenzatoru, omogućena je efikasna

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

razmena energije između ova dva segmenta kola i započinju oscilacije. Ove oscilacije će se prigušiti jer kolo nije u rezonanciji, ali će za to biti potrebno određeno vreme.

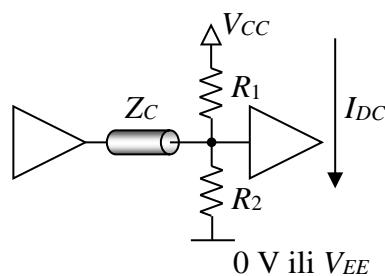
Svi prikazani grafici dobijeni su pomoću HyperLynx simulatora.

Na sličan način, simulacijom se može pokazati da faktor ispune nema bitnijeg uticaja na izbor blokirajućeg kondenzatora. Bez obzira da li je faktor ispune 50 % ili 85 %, signali su podjednako "čisti" u slučaju velike blokirajuće kapacitivnosti.

Zaključak je da AC terminacija može biti efikasna samo ako je blokirajući kondenzator dovoljno velik. Sa druge strane, ako je njegova vrednost prevelika, mogu se značajno poremetiti vremena porasta i opadanja signala. Takođe, kod dugih prenosnih linija moguća je pojava oscilacija kada se u komunikaciji javi duga sekvenca naizmeničnih prelaza sa visokog na nizak naponski nivo i obrnuto (velik broj naizmeničnih nula i jedinica). To znači da ne postoji univerzalna vrednost za C , već je optimizaciju potrebno izvršiti prema konkretnoj dužini linije i zahtevima za malom disipacijom bilo u DC režimu, bilo u režimu brzih promena signala.

Tevenenova terminacija

Posebna varijanta paralelne terminacije je tzv. Tevenenova terminacija prikazana na slici 4.4.38.



Slika 4.4.38. Tevenenova terminacija

Ova strategija zasniva se na upotrebi dva otpornika, jednog vezanog na masu, a drugog na napon napajanja. Ovaj par otpornika pored terminacije linije obezbeđuje i *pull-up/pull-down* funkciju, odnosno obezbeđuje dodatnu struju iz izvora napajanja potrebnu prijemniku radi detekcije signala. Time je obezbeđena znatno veća otpornost na šum i veoma dobro ponašanje kod raspodeljenih opterećenja na vodu.

Vrednosti otpornika treba birati tako da im je paralelna veza jednaka karakterističnoj impedansi voda.

$$R_1 \parallel R_2 = Z_C$$

Iako se na prvi pogled čini da je ovakav izbor otpornika veoma direkstan, postoji zapravo jedan stepen slobode u izboru bar jedne od vrednosti R_1 ili R_2 i stoga joj prethodi veoma ozbiljna analiza za optimizaciju disipacije. Etiradžan i Nemek [1] su pokazali da optimalne vrednosti za R_1 i R_2 zavise od karakteristika predajnika i prijemnika i da je njihovo određivanje veoma složeno. Pre svega mora se voditi računa o tome da Tevenenov napon odgovara naponskim nivoima upotrebljene familije logičkih kola. Tevenenov napon dat je izrazom

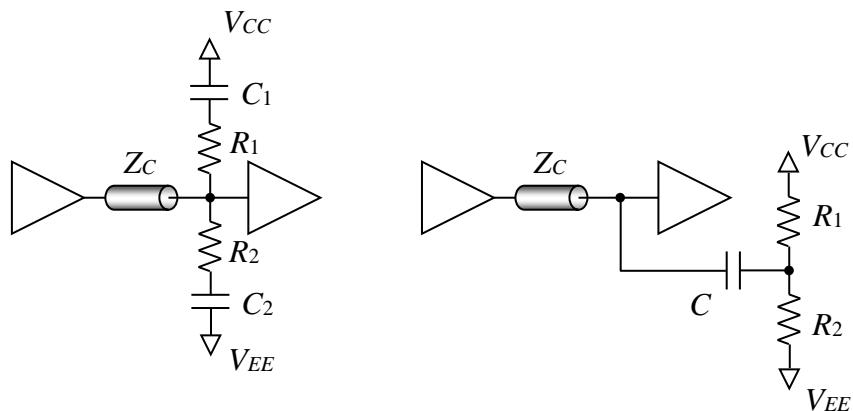
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$V_T = \frac{R_1 V_{CC} + R_2 V_{EE}}{R_1 + R_2}$$

Osim složenosti određivanja konkretnih otpornosti, nepovoljne strane Tevenenove terminacije su još i uključivanje dodatne komponente za terminaciju (dva otpornika umesto jednog), nemogućnost kompenzacije refleksija kod tri-state logičkih kola koja imaju stanje visoke impedanse, kao i stalni tok jednosmerne struje I_{DC} (slika 4.4.32) kroz Tevenenove otpornike koja iznosi

$$I_{DC} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_1 + R_2}$$

Za sprečavanje toka jednosmerne komponente može se ubaciti redni blokirajući kondenzator, ali, kao što je već rečeno, on može uticati na *slew rate* signala. Ovaj kondenzator takođe omogućava prevazilaženje problema sa elektromagnetskom indukcijom u konturama kroz koje se zatvaraju ove jednosmerne struje. Elektromagnetska indukcija se javlja zbog toga što, za različita logička stanja na liniji, kroz R_1 i R_2 teku struje različitih intenziteta, ali je njihova promena u vremenu (di/dt) ista i to u tempu u kome se menjaju logička stanja (vreme porasta i opadanja signala). Ova promena struja u vremenu indukuje magnetsko polje u konturama kroz koje se te struje zatvaraju. U tom smislu, ova dva otpornika ponašaju se identično kao i prekidačko kolo i nekada se moraju razdvojiti rednim (*by-pass*) kondenzatorom radi smanjenja neželjene elektromagnetske emisije. Dve varijante vezivanja blokirajućeg, tj. *by-pass* kondenzatora kod Tevenenove terminacije date su na slici 4.4.39.



Slika 4.4.39. Vezivanje blokirajućih kondenzatora radi smanjenja disipacije i magnetske emisije

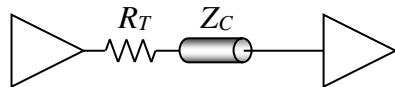
Tipična Tevenenova terminacija za nekoliko tipova magistrala data je u tabeli 4.4.1.

Tabela 4.4.1. Poređenje vrednosti otpornika u Tevenenovoj terminaciji za tri tipa magistrale

Magistrala	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	Napomena
SCSI	220	330	Bez blokirajućeg kondenzatora
VME	330	470	Bez blokirajućeg kondenzatora
GPIB	3k	6,2k	Bez blokirajućeg kondenzatora

Redna terminacija

Kod rednog terminiranja, na liniju se vezuje otpornik redno sa vodom i to na strani bližoj predajniku kao što je prikazano na slici 4.4.40.



Slika 4.4.40. Redno terminiranje linije

Redna terminacija je veoma popularna u savremenom dizajnu brzih elektronskih kola. Odlikuju je dve dobre osobine:

- potreba za samo jednom komponentom i
- nepostojanje jednosmerne dissipacije kod paralelne terminacije.

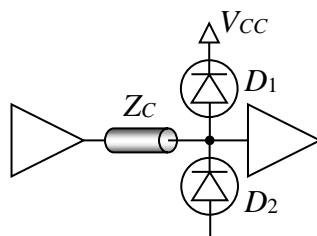
Međutim terminirajući otpornik smešta se na početak linije, a ne na njen kraj, čime nije sprečena refleksija na mestu prijemnika. Zapravo, redna terminacija sprečava samo višestruke refleksije, što znači da se kroz vod uvek prostiru bar dva stojeća talasa.

Vrednost redne otpornosti bira se tako da u zbiru sa izlaznom impedansom predajnika daje vrednost jednaku karakterističnoj impedansi voda. To znači da je potrebno poznavati izlaznu impedansu prijemnika. Samo poznavanje impedanse nije problem, tim pre što većina proizvođača opreme ovo jasno navodi u kataloškim podacima. Komplikacija potiče od činjenice da izlazna impedansa zavisi od logičke vrednosti (naponskog nivoa) koji se šalje. Ovo znači da nije moguće istovremeno optimizovati vrednost terminirajuće otpornosti za rastuću i opadajuću ivicu signala.

Drugi problem, koji se u literaturi retko razmatra, je činjenica da R_T stvara redni pad napona o čemu projektanti komunikacione opreme ne mogu unapred voditi računa. S obzirom na prisustvo povratne refleksije u vodu, ovaj tip terminacije se loše ponaša kod vodova sa distribuiranim optrećenjem i od značaja je samo za vezu 1 na 1.

Diodna terminacija

Ova strategija terminiranja linije je zapravo samo strategija limitiranja. Refleksije se ne pokušavaju apsorbovati ili sprečiti, već samo ograničiti na vrednosti visokog i niskog logičkog nivoa (slika 4.4.41). Kad god napon na vodu (incidentni plus reflektovani signal) premaši vrednost gornjeg napona napajanja V_{CC} , dioda D_1 provede i limitira vrednost ovog napona na $V_{CC} + V_d$ gde je V_d napon vođenja diode.



Slika 4.4.41. Diodna terminacija

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Ako napon, usled refleksija, podbaci ispod vrednosti donjeg napona napajanja (u ovom primeru 0 V), provešće dioda D_2 i napon će biti limitiran na vrednost $-V_d$.

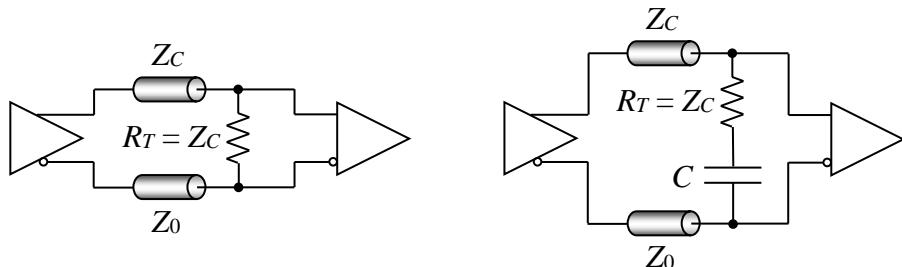
Dobre osobine ovog pristupa su u tome što izbor komponenti nije diktiran karakterisitčnom impedansom voda, a disipacija je veoma mala. U principu, diode mogu biti postavljene bilo gde duž prenosne linije, ali ih ima najviše smisla postaviti na kraju voda kako bi se prijemnik zaštitio od prenapona.

Problem je što kod diodne terminacije refleksije ipak postoje, čak i višestruke, pa se može desiti greška u prenosu uzrokovana fantomskim impulsima, odnosno ehom. Upotrebljene diode moraju biti veoma brze kako ne bi doprinele *slew rate*-u signala, i sa malim naponom vođenja kako bi limitiranje bilo što bliže naponima napajanja.

Terminiranje diferencijalnih linija

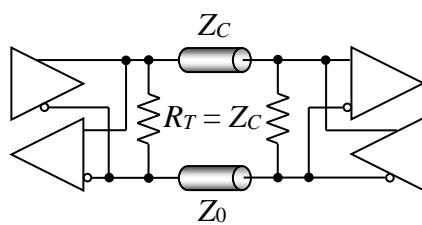
Kod linija koje koriste diferencijalnu signalizaciju strategija terminiranja je bliska već opisanoj strategiji kod linija koje komuniciraju u odnosu na zajedničku masu.

Ukoliko je prenos *full-duplex* tada se terminiraju obe linije za prenos i to samo na kraju bližem prijemniku. Najčešće se primenjuje paralelna terminacija, a ređe AC terminacija sa blokirajućim kondenzatorom (slika 4.4.42).



Slika 4.4.42. Paralelna i AC terminacija *full-duplex* diferencijalne linije

Kod *half-duplex* prenosa moraju se terminirati oba kraja voda, pa je, za vezu 1 na 1, paralelna terminacija prikazna na slici 4.4.43.



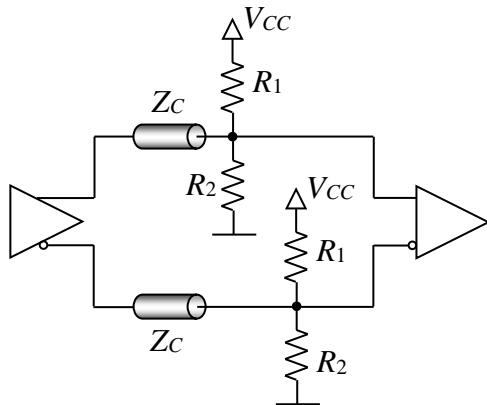
Slika 4.4.43. Paralelna terminacija *half-duplex* diferencijalne linije

Ukoliko je broj komunikacionih partnera veći, tada se koristi magistrala koja se terminira samo u krajnjim tačkama (a ne kod svakog pojedinačnog transivera) kao što je već objašnjeno kod signalizacije u odnosu na zajedničku masu i prikazano na slici 4.4.31.

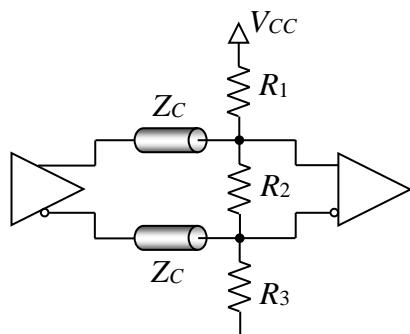
I kod diferencijalnih linija može se primeniti Tevenenova terminacija. Na raspolaganju su dva pristupa:

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

- da se obe žice na prenosnoj liniji terminiraju zasebno u odnosu na masu prijemnika, kao na slici 4.4.44
- da se pomoću tri otpornika terminiranje sproveđe istovremeno između napajanja, mase i obe žice prenosne linije, kao na slici 4.4.45.



Slika 4.4.44. Tevenenova terminacija pojedinačnih žica



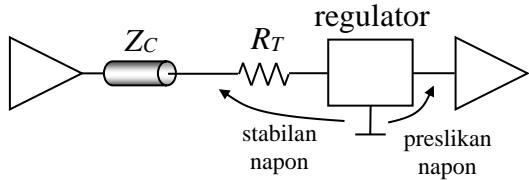
Slika 4.4.45. Tevenenova terminacija pomoću tri otpornika

Ovaj poslednji slučaj posebno je komplikovan za optimizaciju, ali je bar intuitivno jasno da otpornici R_1 i R_3 treba da imaju identične vrednosti zbog simetrije logičkih nivoa kod diferencijalnog prenosa.

Svi ostali zaključci, uključujući disipaciju i uvođenje blokirajućeg kondenzatora, identični su kao i kod signalizacije u odnosu na zajedničku masu.

Aktivna terminacija

Kada i najmanji parazitni impuls koji se javlja kao posledica refleksija mogu poremetiti rad logičkih kola (kao npr. dvostruko taktovanje na "Strobe" liniji kod SCSI sistema), upotreba pasivnih komponenti ne može dati zadovoljavajuće rezultate, pa se koriste specijalna aktivna uobličavačka kola koja u potpunosti eliminišu refleksije i odvajaju pojedine stepene na prenosnoj liniji na mestima gde se javljaju diskontinuiteti u impedansi (kaskadne linije, i krajevi vodova). Slika 4.4.46 pokaže vod terminiran aktivnim kolom koje čini da impedansa prijemnika bude "nevidljiva" za vod.

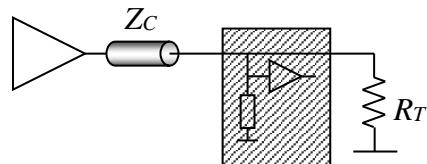


Slika 4.4.46. Aktivna terminacija linije

Broj uobičavačkih kola za potiskivanje refleksija koja se danas mogu naći na tržištu veoma je velik, a razvijene strategije za potiskivanje refleksija raznovrsne. Međutim, primena im je ograničena specifičnostima sistema za koje su razvijana. Zajedničko im je da obezbeđuju veoma stabilan napon na terminirajućem otporniku sa strane voda i da primljeni incidentni impuls bez izobličenja preslikavaju na svoj izlaz i prosleđuju prijemniku često uz odgovarajuće pojačanje i potiskivanje šuma.

Fly-by terminiranje linija

Kod brzih elektronskih kola koja imaju velike dimenzije (npr. FPGA čipovi koji mogu biti široki i do 2,5 cm) koristi se tzv. *fly-by*⁴ tehnika terminacije. S obzirom na velike dimenzije kola, u njemu postoje uslovi za nastavak propagacije talasa (i pojavu refleksija), pa se pravilno mesto terminacije nalazi iza čipa, a ne ispred njega (slika 4.4.47).



Slika 4.4.47. Fly-by tehnika terminacije.

Kriterijum da li je potrebna *fly-by* tehnika terminacije ili klasična paralelna terminacija ispred prijemnog kola, dat je relacijom

$$L \geq T_{RISE} \frac{v_p}{2}$$

gde je L – dimenzija čipa (prijemnog kola), T_{RISE} - vreme porasta signala i v_p - brzina propagacije signala signala kroz čip⁵. Gornji uslov može se napisati u obliku

$$2T_{PD} = 2 \frac{L}{v_p} \geq T_{RISE}$$

gde je $2T_{PD}$, dvostuko propagaciono kašnjenje tj. vreme koje je potrebno signalu stigne do kraja čipa, reflektuje se i vrati nazad. Ukoliko je gornja nejednakost zadovoljena, i u samom čipu će

⁴ engl. prelet

⁵ Tipično v_p za materijale od kojih se izrađuju štampane ploče i čipovi kreće se od $0,56 \cdot c$ za FR4 do $0,65 \cdot c$ za polimid, gde je c brzina svetlosti u vakuumu.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

doći do uspostavljanja stoećih talasa i pojave refleksija koje mogu omesti ispravnu detekciju signala, pa je zaključak da je tada potrebno koristiti *fly-by* terminaciju.

Za FPGA čipove sa vremenom porasta signala od $T_{RISE} = 0,2$ ns, izrađenih od polimida (brzina propagacije od $0,65 c$) dobija se da je

$$T_{RISE} \frac{v_p}{2} = 1,95 \text{ cm}$$

pa sledi da je za svaki čip dimenzija 2×2 cm ili veći, neophodno koristiti *fly-by* tehniku terminacije.

U praksi se primenjuje i nešto strožiji uslov, jer se pretpostavlja da do refleksija unutar čipa može doći i na rastojanjima koja su manja od njegove ukupne dužine L . Smatra se da je, u proseku, refleksija najverovatnija na rastojanjima koja odgovaraju polovini ove dužine, pa većina proizvođača čipova kao kriterijum za *fly-by* terminaciju koristi uslov

$$4T_{PD} \geq T_{RISE}$$

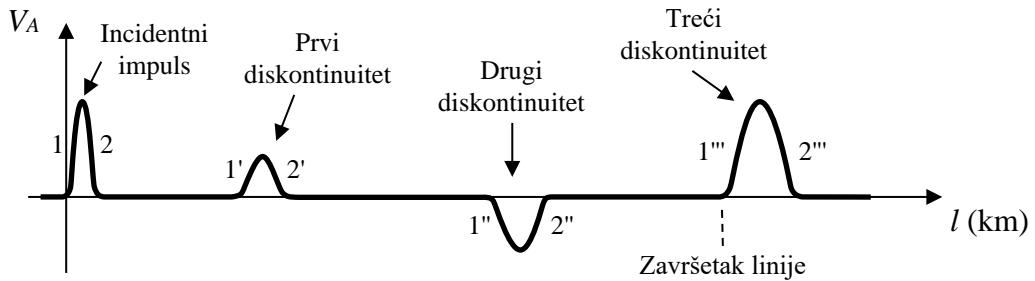
4.4.7. Reflektometrija u vremenskom domenu

Refleksije, koje predstavljaju neželjen (parazitni) efekat na komunikacionim linijama, mogu se, sa druge strane, iskoristiti kao veoma efikasan alat za karakterizaciju linije i lociranje smetnji. Ovaj postupak poznat je pod nazivom **reflektometrija u vremenskom domenu** ili skraćeno TDR (*Time Domain Reflectometry*)⁶. Instrument kojim se obavlja odgovarajuće merenje po ovoj metodi nazive se **reflektometar**. Pored ispitivanja komunikacionih linija, reflektometri su našli široku primenu i u elektroenergetskim sistemima i elektronici, ali su njihova konstrukcija i režimi rada bitno drugačiji od onih koji se koriste u telekomunikacijama.

Za merenja na vodovima (energetskim i komunikacionim), gde su rastojanja velika i test impulsi dugo putuju kroz kontinulane sredine, koriste se, po pravilu, usamljeni Gausovi impulsi koji zahtevaju malu snagu generatora. Događaji na vodovima su dovoljno razmaknuti da opadajuća ivica usamljenog impulsa neće naići na diskontinuitet na koji je prethodno naišla rastuća ivica, pre nego što rastuća ivica stigne do sledećeg diskontinuiteta (slika 4.4.48). Odskočna funkcija, sa stalnim visokim naponskim nivoom, generisala bi velike jednosmerne gubitke i pregrevanje vodova i zahtevala bi izuzetno veliku izlaznu snagu instrumenta. Ovo je nepraktično s obzirom da se u telekomunikacijama i energetici merenja najčešće obavljaju na terenu, pa se instrumenti napajaju iz akumulatorskih izvora ili baterija ograničenih kapaciteta, gde je od velike važnosti duga autonomija rada instrumenta.

⁶ Kod nas se skraćenica TDR koristi isključivo za označavanje instrumenta (reflektometra) kojim se obavlja ovakvo merenje (engl. *Time Domain Reflectometer*), dok se u anglosaksonskoj literaturi češće koristi izraz *TDR Instrument*, a sama skraćenica TDR označava mernu metodu.

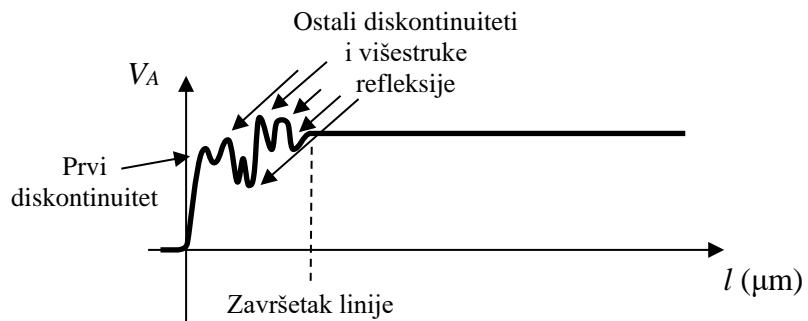
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



- 1 – rastuća ivica test signala
 1', 1'' i 1''' – refleksije koje su posledica nailaska rastuće ivice test signala na promenu impedanse
 2 – opadajuća ivica test signala
 2', 2'' i 2''' – refleksije koje su posledica nailaska opadajuće ivice test signala na promenu impedanse

Slika 4.4.48. Refleksije usamljenog impulsa na dugim vodovima

U mikro- i nanoelektronici, gde su rastojanja između diskontinuiteta veoma mala, ali su učestanosti izuzetno visoke, najčešće se primenjuju reflektometri sa odskočnom pobudom. Odskočna pobuda eliminiše potrebu za generisanjem veoma uzanih test impulsa i sprečava brkanje prostorno bliskih refleksija od rastuće i opadajuće ivice test signala (slika 4.4.49).



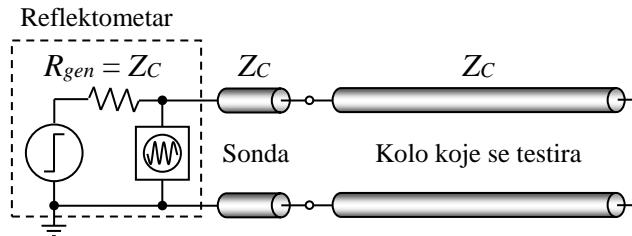
Slika 4.4.49. Refleksije odskočne pobude na kratkim linijama

Osnovni zadatak reflektometrije u vremenskom domenu je karakterizacija impedanse voda i identifikacija svih diskontinuiteta koji postoje na liniji. Na osnovu rezultata ovih merenja, projektanti mogu sprovesti analizu integriteta signala na mestima interkonekcije pojedinih segmenata linije i pouzdano predvideti preformanse digitalnog sistema, a operateri mogu brzo i pouzdano locirati mesta smetnji omogućavajući bolje razumevanje fizičkih uzroka smetnji i njihovo otklanjanje.

Šema i princip rada reflektometra

Reflektometar čine osciloskop veoma širokog propusnog opsega (18-20 GHz) i generator impulsa. Instrument se povezuje na kolo koje se testira pomoću priključnih kablova ili sondi. Kako je osciloskop veoma velikog propusnog opsega i test impulsi generatora imaju veoma strme ivice, moraju se koristiti sonde i kablovi specijalne konstrukcije, s obzirom da oni mogu znatno degradirati performanse reflektometra, produžavajući vreme porasta signala, smanjujući prostornu rezoluciju merenja i preciznost određivanja impedanse. Blok šema reflektometra i način povezivanja na kolo koje se testira dati su na slici 4.4.50.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



4.4.50. Priključivanje reflektometra na ispitivano kolo

Generator reflektometra šalje test impuls ka uređaju ili vodu koji se testira. Test impuls se u testiranom uređaju ili vodu reflektuje od svih diskontinuiteta šaljući povratne impulse nazad ka reflektometru. Osciloskop u instrumentu iscrtava pristigle signale u vremenu i prikazuje ih na ekranu. Na osnovu vremena koje je refleksiji potrebno da se vrati nazad ka instrumentu, određuje se rastojanje do diskontinuiteta, a na osnovu intenziteta reflektovanog talasa određuje se koeficijent refleksije i procenjuje priroda impedanse u posmatranoj tački.

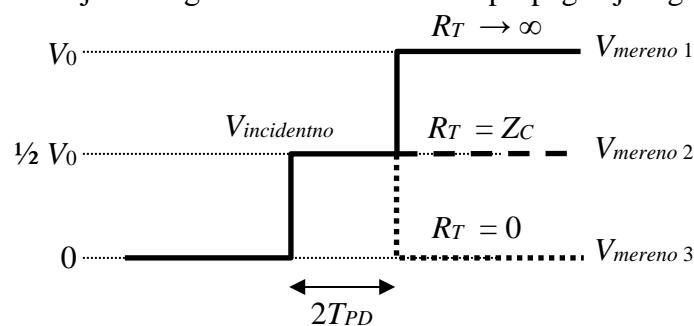
Izlazna otpornost reflektometra i otpornost sonde moraju biti dobro upareni sa ulaznom impedansom uređaja, odnosno karakterističnom impedansom voda koji se ispituju. Impuls koji generiše reflektometar razdeljuje se na izlaznoj impedansi generatora i ulaznoj impedansi kola koje se ispituje sa faktorom $\frac{1}{2}$. Zbog toga se, kod step funkcija, na ekranu osciloskopa odmah uočava napon jednak samo polovini generisane amplitudine V_0 . To dalje znači da je efikasnost predaje energije test kolu svega 50 %, ali je ovo neophodno zbog sprečavanja višestrukih refleksija povratnih (mernih) signala koji stižu nazad ka instrumentu.

U sistemu prikazanom na slici 4.4.50, u zavisnosti od toga da li se šalje usamljeni impuls ili step funkcija i u zavisnosti od vrednosti terminirajuće otpornosti, mogu se dobiti različiti oblici krive povratnog rasejanja na osciloskopu.

Osnovna mana reflektometarskih metoda je što reflektometri imaju ograničenu tačnost, tako da se vrednosti relativne greške kreću u opsegu $1 \div 2 \%$ izmerene vrednosti. Drugi problem javlja se kod merenja visokoomskih vrednosti impedanse što će biti objašnjeno kasnije.

Merenje pomoću odskočne pobude

Da bi se rezultati mernja reflektometrom mogli pravilno interpretirati, poželjno je da vod na daljem kraju bude otvoren ($R_T \rightarrow \infty$). Koeficijent refleksije na ovom mestu biće +1 i nazad ka osciloskopu reflektovaće se povratni impuls V_r iste amplitude kao i incidentni V_i , ali će se on uočiti tek nakon vremena jednakog dvostrukom vremenu propagacije signala kroz kabel.



Slika 4.4.51. Reflektogrami dobijeni za ekstremne vrednosti terminirajuće otpornosti

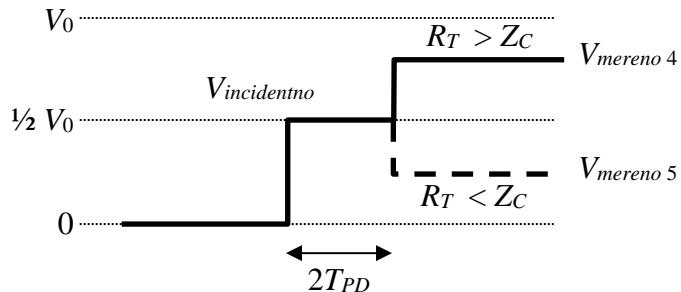
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Signal prikazan punom linijom na slici 4.4.51, označen sa $V_{mereno\ 1}$ predstavlja rezultantu incidentnog i reflektovanog impulsa koju "vidi" osciloskop ($V_{mereno\ 1} = V_i + V_r = V_0$).

Kada je terminirajući otpornik jednak karakterističnoj impedansi voda, nema refleksije i refelktrogram je dat isprekidanim linijom na slici 4.4.51 ($V_{mereno\ 2} = V_i + 0 = V_0 / 2$).

U slučaju da je vod zatvoren kratkom vezom ka masi, koeficijent refleksije je -1 i nazad ka instrumentu se propagira impuls istog intentziteta, ali suprotnog znaka od incidentnog. Ovo je ilustrovano istačkanom linijom na slici 4.4.51 i označeno kao $V_{mereno\ 3} = V_i - V_r = 0\ V$.

Za vrednosti terminirajuće otpornosti između 0 i Z_C dobiće se grafik koji leži između krive dobijene za $R_T = 0\ \Omega$ i $R_T = Z_C$, dok će se za vrednosti terminirajuće otpornosti veće od Z_C dobiti grafik koji leži iznad ove krive ali ne prelazi vrednost koja se dobija za $R_T \rightarrow \infty$. Na slici 4.4.52 prikazane su dve ovakve situacije označene sa $V_{mereno\ 4}$ i $V_{mereno\ 5}$.



Slika 4.4.52. Reflektogrami dobijeni za proizvoljne vrednosti terminirajuće otpornosti

Ako je poznata brzina propagacije signala kroz vod, tada se horizontalna osa može, umesto u jedinicama vremena, izraziti u jedinicama rastojanja voda. Da bi se ova rastojanja pravilno prikazala na ekranu osciloskopa, s obzirom da je impulsu potrebno vreme od $2T_{PD}$ da se vrati do instrumenta, sva izmerena vremena potrebno je podeliti sa 2.

Nakon što povratna refleksija V_r stigne do osciloskopa, ona se u toj tački dodaje na incidentni impuls $V_{incidentno}$ i daje merenu vrednost napona V_{mereno} . Reflektometar tada koristi sledeću jednačinu za izračunavanje vrednosti nepoznate impedanse u tački u kojoj je detektovan diskontinuitet

$$V_{mereno} = V_i + V_r = V_i + \rho V_i = V_i \left(1 + \frac{R_T - Z_C}{R_T + Z_C} \right) = V_i \frac{2R_T}{R_T + Z_C}$$

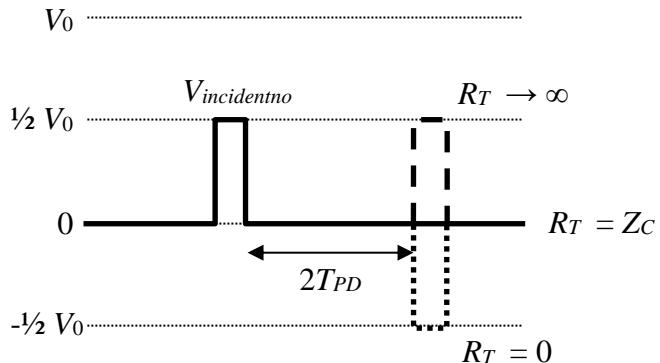
Odavde sledi da se nepoznata terminirajuća impedansa može dobiti kao

$$R_T = Z_C \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = Z_C \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} = Z_C \frac{V_{mereno}}{V_0 - V_{mereno}}$$

gde je ρ – koeficijent refleksije na mestu završetka voda.

Merenje pomoću usamljenog impulsa

U slučaju da je pobuda usamljeni impuls, tada se reflektovani talas ne superponira sa incidentnim zbog trajanja koje je kraće od vremena propagacije signala kroz vod. Tri karakteristične situacije terminiranja linije za $R_T \rightarrow \infty$, $R_T = Z_C$ i $R_T = 0$ prikazane su na slici 4.4.53.



Slika 4.4.53. Odziv linije sa slike 4.4.50 na usamljeni test impuls

Otvorena veza prepoznaje se po velikom povratnom signalu pozitivne amplitudе. Kratkospojen vod daće velik negativan povratni signal, dok u slučaju uparene impedanse nema refleksije.

U opštem slučaju, za terminirajuće otpornosti koje su manje od karakteristične impedanse voda, koeficijent refleksije je negativan, pa se na osciloskopu dobijaju negativni impulsi. Kada je terminirajuća otpornost veća od Z_C , reflektovani impulsi su pozitivni. Pri tome se na osnovu znaka i amplitude pristigne refleksije procenjuje vrednost koeficijenta refleksije, odnosno nepoznate impedanse. Mereni naponi sada se sastoje samo od reflektovanog impulsa i iznosi

$$V_{mereno} = V_r = \rho V_i = V_i \frac{R_T - Z_C}{R_T + Z_C}$$

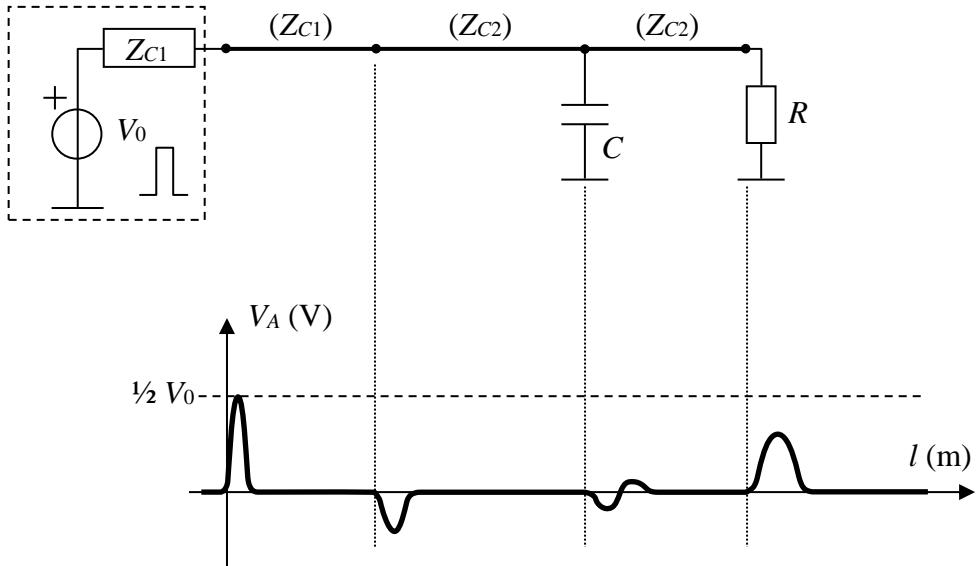
Odavde sledi da se nepoznata terminirajuća impedansa, za slučaj usamljenog impulsa, može dobiti kao

$$R_T = Z_C \frac{1+\rho}{1-\rho} = Z_C \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} = Z_C \frac{V_i + V_{mereno}}{V_i - V_{mereno}} = Z_C \frac{V_0 + 2V_{mereno}}{V_0 - 2V_{mereno}}$$

Korišćenje reflektometra

Reflektometar prikazuje rezultate merenja u vidu krive koja se zove reflektogram. Na vertikalnoj osi ove krive nalazi se amplituda signala izražena u voltima, dok horizontalna osa odgovara vremenskoj dimenziji. Međutim, koristeći podatak o brzini propagacije signala kroz vod (unosi ga operater pre početka merenja), vremenska osa se zamjenjuje osom koja prikazuje rastojanje od instrumenta. Primer jednog složenijeg reflektograma dat je na slici 4.4.54.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.54. Primer konfiguracije voda i odgovarajućeg reflektograma

Uočava se da je svaki diskontinuitet na liniji praćen odgovarajućim reflektovanim impulsom. Prema tome, svaka promena u naponu na reflektogramu ukazuje na prisustvo nekog diskontinuiteta koji se naziva "događaj".

Postoji nekoliko osnovnih izvedbi reflektometara. **Main frame reflektometri** su moćni, kompleksni i skupi instrumenti koji imaju velik broj mernih opcija i uglavnom su predviđeni za upotrebu u laboratorijskim uslovima. Ovi reflektometri imaju ekrane sa katodnom cevi i napajaju se iz mreže 220 V. Osnovna prednost ovih reflektometara je mogućnost zamene ulazno-izlaznih modula koji obezbeđuju jednostavno prilagođavanje uslovima merenja. Zato što se oslanjaju na napajanje iz gradske mreže, ovi reflektometri, pored usamljenih test impulsa, mogu generisati i odskočne pobude, a imaju i veliku stabilnost rada i otpornost na termički šum zahvaljujući upotrebi aktivnih hladnjaka. **Main frame** reflektometri obezbeđuju snimanje prikupljenih podataka na prenosne diskove, štampanje dobijenih talasnih oblika na papir ili imaju priključke kojima se mogu povezati na personalni računar. Danas na tržištu postoji širok izbor TDR instrumenata koji imaju samo neke od funkcija integrisanih u **main frame** reflektometrima, ali su znatno manji, robusniji i lakši za upotrebu. Ovi tzv. **mini reflektometri** imaju baterijsko napajanje, LCD ekrane radi smanjenja dissipacije, znatno su manje težine i često su mehanički zaštićeni od mogućih udaraca, vibracija i niske temperature prilikom terenske upotrebe.

Pre priključenja reflektometra na liniju potrebno je proveriti da li je linija pod naponom. Ukoliko se ustanovi da je linija aktivna, merenje reflektometrom nije moguće i napajanje treba isključiti, da ne bi došlo do oštećenja instrumenta i da se ne bi pravila gruba greška u mernom postupku. Ovo je jedan od najčešćih previda operatera pre početka rada sa reflektometrom.

Sledeći korak je povezivanje instrumenta na ispitnu liniju. Sonde, odnosno kablovi koji se koriste za povezivanje treba da imaju impedansu uparenu sa ulaznim delom ispitivane linije. Za razliku od klasičnih osciloskopa, ovde nije dozvoljena upotreba aktivnih sondi ili otpornih naponskih razdelnika jer bi oni mogli uzrokovati višestruke refleksije i pojavu fantomskega impulsa u vidu eha.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Nakon uključivanja, instrument proverava ispravnost svih svojih segmenata i učitava iz svoje memorije upravljački program. Ukoliko inicijalizacija protekne bez problema, reflektometar se može podešiti za obavljanje merenja. Postupak podešavanja zavisi od konkretne izvedbe instrumenta, pa je neophodno konsulatovati priloženo uputstvo za upotrebu.

Jedno od prvih podešavanja koje je neophodno obaviti je unošenje ispravne vrednosti brzine prostiranja električnih signala kroz sredinu koja će se testirati. Unošenje neispravne vrednosti brzine propagacije signala imaće za posledicu netačno očitavanje rastojanja do događaja. Neki reflektometri, umesto unošenja konkretne vrednosti ove brzine, nude mogućnost izbora nekog od standardnih materijala ili tipova kablova, ali prema ovom "konforu" treba biti obazriv i obavezno je u uputstvu proveriti vrednosti konstanti koje je uneo proizvođač.

Brzina prostiranja signala kroz provodnik može se proceniti na osnovu obrasca

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

pri čemu je c – brzina svetlosti u vakuumu, ϵ_r – relativna dielektrična konstanta a μ_r – relativna permeabilnost materijala provodnika. Za većinu bakarnih provodnika ova brzina iznosi oko $220 \text{ m}/\mu\text{s}$. Stvarna vrednost brzine prostiranja zavisi od mnogo faktora, kao što su proces proizvodnje⁷, starenje kablova, prodiranje vlage, upredanje žica i dr. U ovlaženom kablu dolazi do povećanja vremena za koje impuls prelazi određeno rastojanje, tako da je rastojanje koje se dobije na displeju veće nego ono koje bi se dobilo da je merenje obavljeno na suvom kablu, koristeći iste parametre merenja.

U praksi se sreće još i pojam polubrzine ($v_p / 2$) koja se koristi prilikom izračunavanja rastojanja na krivoj povratnog rasejanja. Približne vrednosti polubrzine za neke tipove kablova date su u tabeli 4.4.2.

Tabela 4.4.2. Vrednosti polubrzina za neke tipove kablova

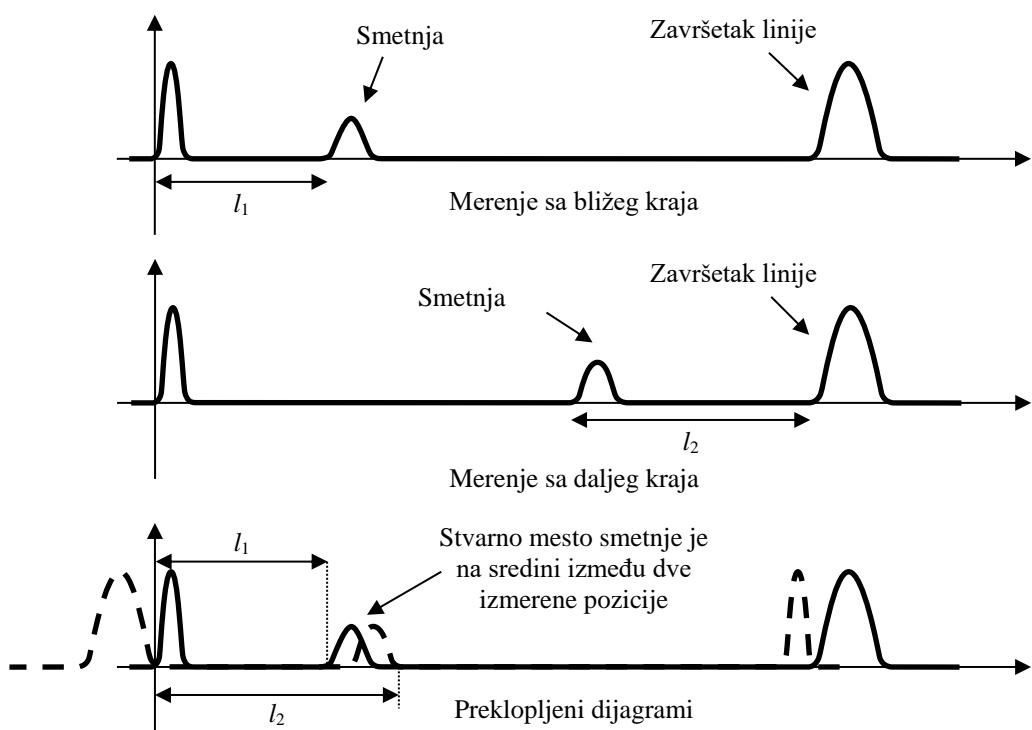
Kabel	Izolacija	Prečnik provodnika (mm)	$v_p / 2$ (m/ μs)
Preplatnički	VPI (bez kordela)	0,4	≈ 110
Preplatnički	VPI (sa kordelom)	0,6	≈ 114
Preplatnički - samonosivi	Puni PET	0,6	≈ 95
Preplatnički	Penasti PET, punjen	0,4	100 – 105
Preplatnički	Penasti PET, punjen	0,6	102 - 110
Instalacioni	PVC	0,6	≈ 87

⁷ Kompaktnost jezgra kabla nije ista kod svih proizvođača kablova a i kod istog proizvođača može da varira od serije do serije. Debljina izolacije žila kabla tipa TK 59M, prečnika provodnika 0,4 i 0,6 prema TU treba da bude 0,25 i 0,30 mm, respektivno. Preko izolacije od penastog polietilena se nanosi tanak sloj punog polietilena da bi se minimiziralo bubrenje penastog polietilena pod uticajem mase za punjenje. U ovakvim uslovima, imajući u vidu malu debljinu izolacije žila, neminovno dolazi do rasipanja vrednosti ekvivalentne relativne dielektrične konstante čime se menja brzina prostiranja polja u provodniku.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Postoje dva načina da se minimizuje greška merenja prouzrokovana nepoznavanjem brzine prostiranja signala:

- Ako je poznata ukupna dužina kabla, a kabel nije u prekidu, onda se brzina može korigovati dok se na krivoj povratnog rasejanja završna refleksija ne pojavi na ovom poznatom rastojanju.
- Merenje sa oba kraja vlakna pri čemu se ova izmerena rastojanja do mesta smetnje moraju poklapati. Ako ovo nije slučaj, stvarno mesto smetnje nalazi se na sredini ovog preklapanja, a brzina prostiranja signala je ona za koju se postiže ovo poklapanje. Ovo je ilustrovano na slici 4.4.55.



Slika 4.4.55. Traženje stvarnog mesta smetnje merenjem sa oba kraja

Kod lociranja mesta smetnje važno je ne pobrkatи dužinu žice koja se očitava na reflektometru, sa dužinom trase. Zbog helikoidalnog motanja (upredanja) bakarnih parica, stvarna dužina instalacije znatno je kraća od one koju prikazuje reflektometar. Ukoliko se rezultat merenja želi dobiti izražen u dužini kablovske instalacije, tada se brzina prostiranja mora korigovati za vrednost koeficijenta kabliranja.

Proizvođači opreme ponekad, umesto brzine i polubrzine prostiranja, koriste alternativne veličine kao što su normalizovana brzina prostiranja (*NVP – Normalized Velocity of Propagation*) koja predstavlja odnos brzine propagacije i brzine svetlosti u vakuumu ($NVP = v_p / c$), zatim koeficijent umanjenja (коэффициент укорочения - karakterističan za rusku literaturu) koji predstavlja recipročnu vrednost normalizovane brzine prostiranja ili $\gamma = c / v_p$, itd.

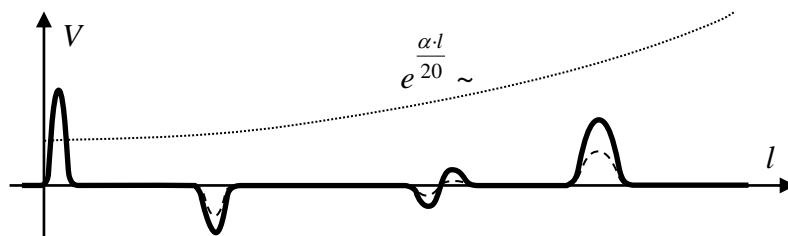
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

U slučaju reflektometara koji generišu usamljene impulse potrebno je podesiti i odgovarajuću vrednost širine i oblika impulsa. Široki impulsi imaju veću snagu i omogućavaju da se njima dosegnu velika rastojanja. Uži impulsi nose manje energije i imaju kraći domet, ali daju bolju prostornu rezoluciju. Početni impuls koji se dobija na krivoj povratnog rasejanja stvara tzv. mrtvu zonu koja sprečava pregledanje dela linije koji se nalazi neposredno iza reflektometra, pa je za ovakve slučajeve povoljnije korišćenje užih impulsa. Maskiranje ove mrtve zone može se obaviti primenom tzv. džamper kabla dužine 5-10 m.

Tipične vrednosti širine predajnog impulsa reflektometara koji se primenjuju npr. u pristupnim mrežama su počev od 2 ns (45 cm), 5 ns (1,1 m), 10 ns (2,2 m), 25 ns (5,6 m) pa sve do 5 μs (1,1 km). Širina sprektra signala koja odgovara ovim širinama impulsa su 250, 100, 50, 20 MHz ... do 100 kHz, respektivno. Većina savremenih reflektometara ima mogućnost automatskog postavljanja širine impulsa u zavisnosti od izabranog opsega merenja (dometa). Problem merenja na velikim dužinama rešava se primenom reflektometara sa predajnim impulsom veće širine i užeg spektra. Takvi impulsi su najčešće oblika \cos^2 ili \sin^2 (Gausovi impulsi). Kada je važno detektovati vrlo slabe refleksije, mogu se primeniti impulsi strmih ivica (pravougaoni impulsi), ali samo na kraćim rastojanjima. zbog prisustva visokofrekventnih komponenti u spektru ovih signala. Frekvencijska zavisnost slabljenja voda, gde više učestanosti u spektru predajnog impulsa trpe veće slabljenje duž voda, prouzrokuje izobličenja koja se ogledaju u disperziji (povećanju širine impulsa), smanjenju nagiba prednje ivice i smanjenju amplitude što za posledicu ima povećanje mrtve zone i povećanje nesigurnosti u pogledu odlučivanja o tačnom položaju pregiba (podnožja) reflektovanog impulsa, odnosno tačnom položaju mesta nehomogenosti.

S obzirom da se impedanse mere i identifikuju merenjem amplituda pristiglih refleksija, slabljenje signala prilikom prolaska kroz liniju može uzrokovati greške u merenju ili izvođenje pogrešnih zaključaka o prirodi impedanse. Zbog toga većina današnjih reflektometara ima mogućnost kompenzacije podužnog slabljenja linije α , pa se na krivoj povratnog rasejanja prikazuju impulsi pojačani za vrednost slabljenja koja odgovara pređenom rastojanju.

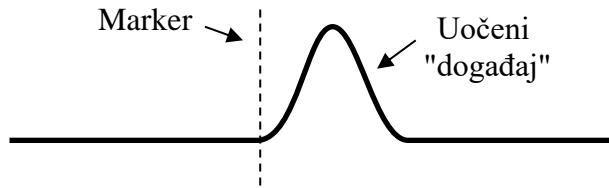
Na slici 4.4.55 istačkanom linijom prikazana je kriva potrebnog pojačanja signala radi kompenzacije podužnog slabljenja, isprekidanom linijom prikazan je kriva koja bi se dobila kada se korekcija ne bi izvršila, dok je punom linijom data korigovan reflektogram sa kojeg se lako mogu izračunati vrednosti svih nepoznatih impedansi. Kako je slabljenje linije logaritamsko, izračunavanje stvarnih vrednosti koeficijenata refleksije i impedansi na liniji bilo bi, bez ove opcije, izuzetno složeno. Unošenje pogrešne vrednosti za podužno slabljenje ima za posledicu netačno skaliranje grafika po vertikali i rezultati merenja tada nisu upotrebljivi.



Slika 4.4.55. Skaliranje krive povratnog rasejanja na osnovu unete vrednosti podužnog slabljenja

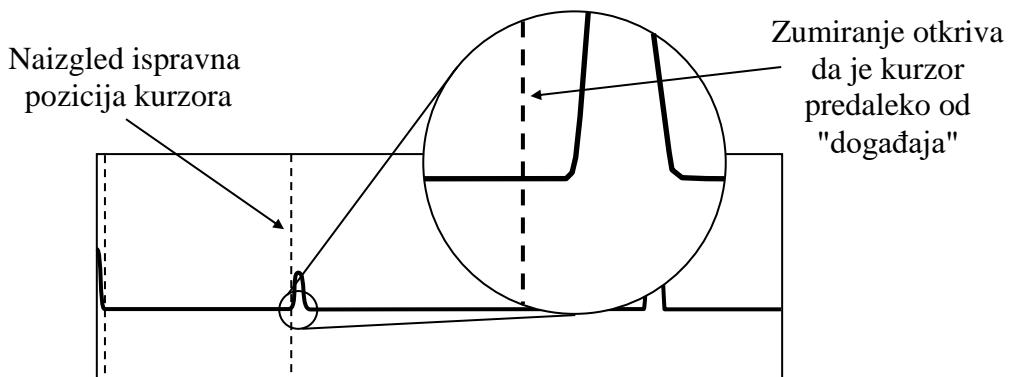
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Prilikom određivanja rastojanja do događaja kritična je pravilna upotreba i postavljanje markera ili kurzora. Svaki reflektometar ima dva kurzora A i B. Ispravno mesto za postavljanje kurzora nalazi se početku događaja neposredno na mestu gde kriva počinje da menja nagib (Slika 4.4.56).



Slika 4.4.56. Pravilno postavljanje markera

Postavljanje kurzora preblizu ili predaleko od početka događaja imaće za posledicu grešku u očitavanju rastojanja. Zbog ovoga je, prilikom pozicioniranja kurzora, važno koristiti opciju zumiranja. Na slici 4.4.57 prikazana je situacija u kojoj je kurzor pre zumiranja postavljen na naizgled ispravnu poziciju. Nakon zumiranja (prikazano u krugu) vidi se da je on, zapravo, predaleko od početka reflektovanog impulsa.



4.4.57. Korišćenje funkcije zumiranja radi preciznijeg postavljanja markera

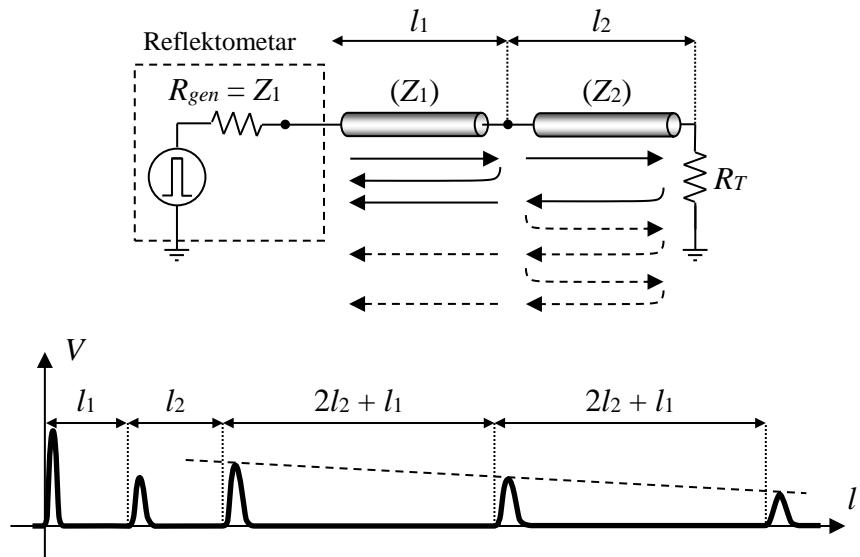
Nakon postavljanja oba kurzora, instrument ispisuje udaljenosti kurzora od početka grafika, kao i međusobnu udaljenost.

Kada su u TDR metodi koriste široki impulsi velike snage, tada postoji opasnost od pojave višestrukih refleksija unutar segmenata kablovske instalacije. Na slici 4.4.58 prikazana je jedna ovakva situacija i reflektrogram koji se dobija nakon merenja.

Višestruke refleksije se pojavljuju kada se na liniji nalaze bar dva veoma izražena diskontinuiteta sa značajnim koeficijentima refleksije. Impulsi se naizmenično odbijaju između ovih diskontinuiteta stvarajući velik broj novih, parazitnih impulsa koji se na krivoj povratnog rasejanja detektuju kao lažni (fantomski) "događaji". Ovi događaji nazivaju se još i duhovi ili echo. Echo može zbuniti operatera koji će imati problema da razlikuje stvarne od fantomskih "događaja" na trasi. S obzirom da je pojavljivanje ovih parazitnih impulsa periodično i da oni linearne slabe sa svakim odbijanjem, fantomski "događaji" mogu se prepoznati po svojoj periodičnosti i linearno opadajućoj amplitudi. Fantomski "događaji" pojavljuju se i u

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

situacijama kada izlazna impedansa reflektometra nije prilagođena ulaznoj impedansi voda koji se testira.



Slika 4.4.58. Pojava fantomskih signala (eha) kao posledica velike snage test impulsa

Režimi rada reflektometra

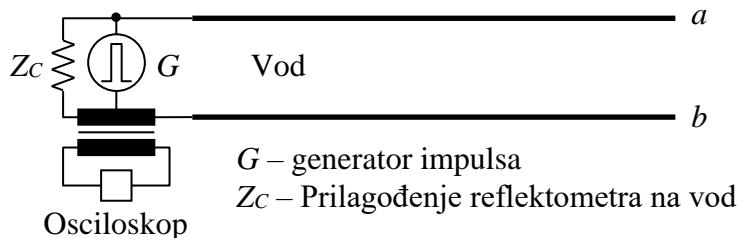
Na osnovu izloženog vidi se da je identifikacija čisto otpornih komponenti prilično jednostavna. Komplikacije dolaze kada se na liniji, pored čisto terminirajućih otpornosti, nađu nastavljeni kablovi neuparenih impedansi, kaskadni odvodi, uzemljivači ka masi, kapacitivni i induktivni elementi, kada dođe do preslušavanja među segmentima višežilne linije, mehaničkog oštećenja izolacije ili prodiranja vode. Da bi omogućili jednostavnu identifikaciju ovakvih pojava na trasi, savremeni reflektometri imaju mogućnost rada u nekoliko režima. U zavisnosti od periodičnosti slanja impulsa razlikuju se normalan i kontinualan režim rada. Različiti načini priključenja na vod i prikazivanja krive povratnog rasejanja dovode reflektometar u normalan ili diferencijalan režim, zatim režim poređenja, preslušavanja i detekcije povremenih smetnji.

Pojedinačan režim podrazumeva slanje jednog impulsa na vod gde reflektovani impuls biva memorisan tako da bilo kakva dalja promena stanja na vodu neće biti detektovana. Smisao ovog režima rada se tiče uštede energije baterija.

Kontinualan režim podrazumeva kontinualno slanje impulsa na vod tako da reflektogram predstavlja stanje na vodu u realnom vremenu.

Normalan režim podrazumeva klasičnu reflektometriju na jednom vodu. Način priključenja na liniju prikazan je na slici 4.4.59. Predajni impuls šalje se na vod korišćenjem balansnog kola. Prijemnik, preko galvanski odvojene sprege detektuje refleksije od svih nehomogenosti.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.59. Priključenje reflektometra za rad u normalnom režimu

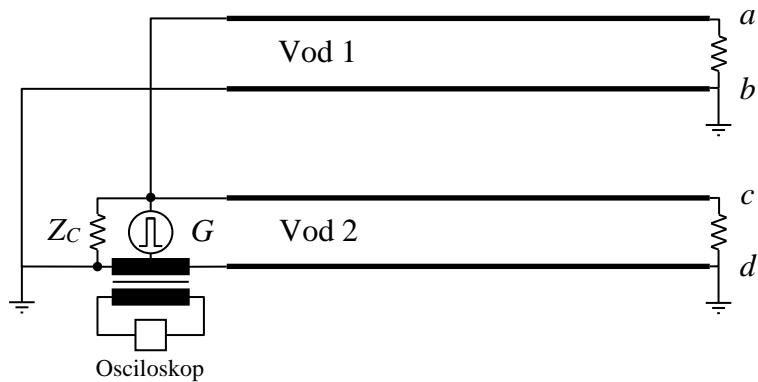
Diferencijalan režim podrazumeva paralelno priključenje reflektometra na više vodova (najčešće dva) ili priključenje dva nezavisna generatora reflektometra na obe žice jednog istog voda. Reflektometri koji imaju mogućnost rada u diferencijalnom režimu imaju više nezavisnih ulaza/izlaza koji se nazivaju kanali. Veoma kvalitetni reflektometri mogu imati i do 8 nezavisnih ulaza za priključenje 8 žica *single-ended* sistema ili 4 para žica sistema sa diferencijalnom signalizacijom. Različiti test impulsi šalju se na sve priključene kanale istovremeno, ali se u praksi, zbog složenosti interpretacije rezultata merenja, najčešće koriste samo po dva kanala, odnosno dva test impulsa – po jedan na svakom kanalu. Prijemnik detektuje i prikazuje samo razlike reflektovanih impulsa od nehomogenosti testiranih linija koje do reflektometra pristižu u istim trenucima (nalaze se na istom rastojanju od reflektometra).

Diferencijalna reflektometrija je važno svojstvo reflektometara, s obzirom da mnogi savremeni sistemi za komunikaciju koriste diferencijalnu signalizaciju (npr. USB, Firewire, Rapid I/O, SCSI, Gigabitski eternet i Sonet). Diferencijalan režim omogućava karakterizaciju međusobnog preslušavanja linija (merenje međuinduktivnosti i međukapacitivnosti), merenje diferencijalne impedanse, otklanjanje nedoumica u tumačenju rezultata merenja dobijenih u normalnom režimu i dr.

Diferencijalan režim ima dve podvarijante: neparnu, koja se još naziva i antisimetrična, i parnu ili simetričnu. **Neparan diferencijalan režim** podrazumeva slanje impulsa suprotnog polariteta (predznaka) na izlaze i sabiranje pristiglih signala kako bi se na reflektogramu prikazale samo razlike u nehomogenostima testiranih linija. Kod nekih reflektometara ovo je postignuto slanjem impulsa istog polariteta na oba kanala i naknadnim oduzimanjem pristiglih refleksija, čime se, u osnovi, postiže identičan rezultat merenja. **Kod parnog diferencijalnog režima** na oba voda šalju se impulsi istog polariteta, a pristigle refleksije se sabiraju i tako prikazuju na reflektogramu.

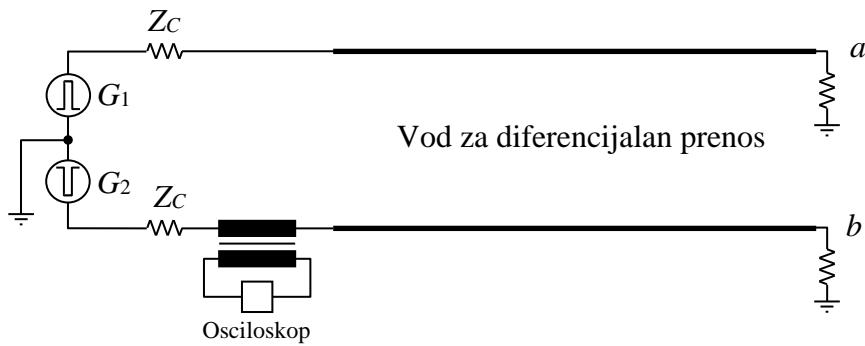
Kod antisimetričnih linija sa diferencijalnom signalizacijom koriste se i neparan i paran diferencijalan režim, dok se kod klasičnih linija, kao što su pristupne mreže sa signalizacijom u odnosu na zajedničku masu, koristi samo neparan diferencijalan režim i to priključenjem reflektometra na dva paralelna voda istovremeno. Neparan diferencijalan režim omogućava da se izbegnu greške u tumačenju reflektograma dobijenih u normalnom režimu merenja, kao i da se odredi nivo smetnji uzrokovani preslušavanjem linija. Na primer, u slučaju da je nastavak loše urađen, postoji mogućnost da se u normalnom režimu rada pozitivna refleksija protumači kao prekid, a da stvarni prekid bude na nekom drugom mestu. U neparnom diferencijalnom režimu rada se iste refleksije poništavaju tako da je ova greška isključena. Šematski prikaz rada reflektometra u diferencijalnom režimu na dva paralelna voda predstavljen je na slici 4.4.60.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.60. Priključenje reflektometra za rad u diferencijalnom režimu na dva voda

Diferencijalan režim na jednom vodu ilustrovan je na slici 4.4.61.



Slika 4.4.61. Diferencijalan režim rada na jednom vodu sa diferencijalnom signalizacijom

Diferencijalna impedansa linije (*differential impedance*) $Z_{diferencijalno}$ definisana je kao impedansa između dva provodnika koji čine tu liniju kada se preko njih signalizira diferencijalno. Neparna impedansa (*odd impedance*) predstavlja impedansu pojedinačne žice kada je linija u režimu diferencijalne signalizacije. Veza između diferencijalne impedanse i neparnih impedansi data je izrazom

$$Z_{diferencijalno} = Z_{neparno \text{ za } vod1} + Z_{neparno \text{ za } vod2}$$

Zajednička impedansa linije (*common mode impedance*) $Z_{zajedničko}$ je impedansa koju linija ima kada se po obe žice signalizira simetričnim impulsima istog polariteta i iste amplitudе. Parna impedansa (*even impedance*) je impedansa pojedinačne žice kada se kroz liniju signalizira simetričnim impulsima. Veza zajedničke i parnih impedansi je

$$Z_{zajedničko} = \frac{1}{2} \frac{Z_{parno \text{ za } vod1} + Z_{parno \text{ za } vod2}}{2}$$

Sopstvena impedansa linije $Z_{sopstveno}$ predstavlja impedansu koju bi linija imala kada između žica ne bi dolazilo do interakcije i preslušavanja.

Izražene preko odgovarajućih induktivnosti i kapacitivnosti, ove impedanse mogu se napisati u obliku

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$Z_{neparno} = \sqrt{\frac{L_{sopstveno} - L_{medju}}{C_{ukupno} + C_{medju}}}$$

$$Z_{sopstveno} = \sqrt{\frac{L_{sopstveno}}{C_{sopstveno}}}$$

$$Z_{parno} = \sqrt{\frac{L_{sopstveno} + L_{medju}}{C_{ukupno} - C_{medju}}}$$

U gornjim relacijama važi da su $L_{sopstveno}$ – sopstvena podužna induktivnost cele linije, $C_{sopstveno}$ – sopstvena podužna kapacitivnost cele linije, L_{medju} – podužna međuinduktivnost žica i C_{medju} – podužna međukapacitivnost žica, dok je $C_{ukupno} = C_{sopstveno} + C_{medju}$. Očigledno je da je neparna impedansa svake od žica manja od sopstvene impedanse cele linije, koja je pak manja od parne impedanse svake od žica.

Da bi se izmerile neparne impedanse žica, operater treba da ih poveže na reflektometar u neparan diferencijalni režim, dok je za merenje parnih impedansi potrebno priključenje žica u parni diferencijalni režim. Različiti reflektometri imaju različite procedure za merenje u diferencijalnom režimu, ali se kod svih njih dobijaju identični rezultati merenja.

U slučaju simetrične linije, neparne i parne impedanse oba voda su iste i zadovoljene su jednačine

$$Z_{diferencijalno} = 2Z_{neparno \text{ za } vod1}$$

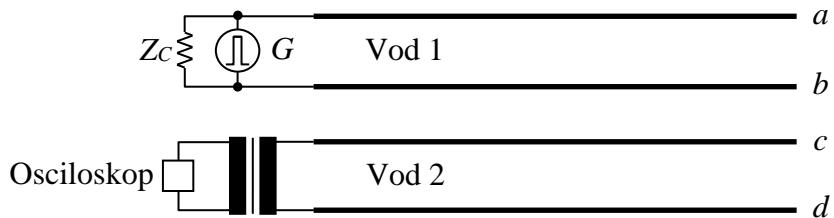
$$Z_{zajednicko} = \frac{1}{2} Z_{parno \text{ za } vod1}$$

pa je, za određivanje svih parametara voda, dovoljno obaviti merenje samo po jednoj liniji.

Diferencijalna i zajednička impedansa su izuzetno korisne za projektovanje i dizajn logičkih kola, komunikacionih linija i energetskih vodova, dok su neparna i parna impedansa značajne sa stanovišta modelovanja interkonekcije i softverske simulacije rada ovih sistema.

Kada reflektometar nema dva odvojena kanala (generatora impulsa) potrebnih za određivanje preslušavanja u diferencijalnom režimu, najverovatnije je da poseduje poseban režim, nazvan **preslušavanje** u kome se pomoću jednog kanala detektuju nesimetrije u dve upregnute parice (četvorci) ili u okviru neke proizvoljne parice kabla za koje se sumnja da imaju izraženu međuinduktivnost ili međukapacitivnost. Način priključenja ilustrovan je na slici 4.4.62.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.62. Priključenje reflektometra za rad u režimu preslušavanja

Generator impulsa priključuje se na jedan vod, dok se prijemni deo kola priključuje na drugi vod. S obzirom da u drugom vodu nema izvora signala, svaki impuls koji se uoči na reflektogramu biće parazitni i ukazivaće na prisustvo preslušavanja. Intenzitet i lokacija smetnje mogu se proceniti na osnovu intenziteta i položaja pristiglih parazitnih impulsa. U zavisnosti od pozicije prijemnika mogu se meriti preslušavanja na bližem kraju (NEXT), što je prikazano na slici 4.4.62 ili na daljem kraju (FEXT) kada bi prijemnik tebalо priključiti na dalji kraj c i d žica.

Poređenje je režim u kome se prikazuju dve krive povratnog rasejanja istovremeno. Postoje dva vida poređenja. Prvi podrazumeva upoređivanje aktuelnog reflektograma dobijenog sa trenutno priključene linija i memorisanog reflektograma učitanog iz interne memorije instrumenta. Način priključenja je isti kao i u normalnom režimu. Drugi vid režima poređenja je istovremeno prikazivanje dva aktuelna reflektograma sa dva voda, s tim da se svaki vod priključuje naizmenično kao u normalnom režimu rada.

Povremene smetnje podrazumevaju priključenje reflektometra na vod u normalnom režimu s tim da se impulsi na vod šalju kontinualno i reflektometar pamti i trajno prikazuje događaje na vodu. Na taj način se mogu uočiti smetnje koje se javljaju samo povremeno, a ne mogu se pretpostaviti uzrok ili vreme njihovog pojavljivanja.

Režim rada sa konvertor smetnje

Posmatrajući slike 4.4.51, 4.4.52, 4.4.53, uočava se, s obzirom na konstantu rezoluciju merenja napona, da je rezolucija merenja impedanse bolja za vrednosti između 0 i Z_c nego između Z_c i beskonačnosti. Kako su karakteristične impedanse bakarnih kablova male, u praksi se pokazalo da svaka impedansa veća od $1\text{ k}\Omega$ ne može biti razlikovana od otvorene veze. Drugim rečima, prilikom merenja velikih impedansi (merenje visokoomskih smetnji otpora izolacije), prave se veće greške nego prilikom merenja malih impedansi. Ovo je direktna posledica slabije rezolucije reflektometra u opsegu impedansi znatno većih od Z_c , pa se, u situacijama kada je ove impedanse neophodno meriti, moraju koristiti posebni uređaji koji visokoomske smetnje pretvaraju u niskoomske. Ovi uređaji nazivaju se konvertori smetnje.

Primena konvertora smetnje zasnovana je na prepostavci da je uzrok visokoomske greške elektrolitička sredina u okolini žila kabla. Ova sredina ima dipolne molekule koji drastično reaguju na promenu polariteta test impulsa. Pored toga, impedansa mesta na kome postoji smetnja menja se u vremenu čak i kada je linija pod konstantnim naponom. Tako se vremenska promena koeficijenta refleksije može uočiti na mestu na kome postoji greška, dok na ostalom delu kabla neće biti nikakvih promena.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Greška prouzrokovana vlagom može se otkriti i korišćenjem klasičnog megaommetra. Kada se ustanovi da je otpornost izolacije reda veličine $k\Omega$ umesto $M\Omega$, vrlo je verovatno da postoji greška uzrokovanu vlagom. Međutim lociranje mesta na kome počinje natopljena deonica moguća je samo reflektometrom sa priključenim konvertorom smetnje.

Priklučivanjem eksternog napona konvertora smetnje na paricu u odvodu doći će do polarizacije dielektrika i/ili će poteći jonska struja te će se na taj način na mestu smetnje formirati interni naponski izvor. Ukoliko je njegov polaritet takav da se superponiraju struje pod uticajem ovako formiranog naponskog izvora i napona predajnog impulsa reflektometra, smetnja odvoda će imati karakter niskoomske smetnje. Da bi izvesnost ovakvog slučaja bila sigurna, potrebno je konvertor smetnje postaviti u režim rada sa naizmeničnom promenom polariteta tako da se naizmenično formira interni naponski izvor i vrši njegovo pražnjenje. Uspešnost ovog postupka kod kablova sa vazdušno papirnom izolacijom je velika, dok je kod kablova sa termoplastičnom izolacijom žila zanemarljiva. Visinu napona konvertora smetnje treba postepeno povećavati dok se na displeju reflektometra ne pojavi vidljiva refleksija. Dalje povećavanje je nepoželjno zbog mogućnosti da se vlažno mesto isuši. Podrazumeva se da reflektometar treba da bude postavljen za rad u kontinualnom režimu.

Merenje refleksije konvetorom smetnje daje zašumljen reflektogram prepun smetnji. Zamena polariteta rezultuje drastično različitim, čak i negativnim vrednostima impulsa na reflektogramu. Fluktuacije koje se javljaju prilikom zamene polariteta ukazuju na promenu koeficijenta refleksije i omogućuju lociranje mesta smetnje. U tu svrhu mogu se porebiti aktuelni reflektogram i ranije snimljena referentna karakteristika (pre prodora vlage, dok je linija bila ispravna). Na mestu gde se jave razlike i gde aktuelni reflektogram odstupi od referentnog, najverovatnije se nalazi početak segmenta do koga je vlagu prodrla. Kako bi se moglo otkriti i vrlo male promene koeficijenta poželjno je meriti razliku odziva dve paralelne vodice (četvorke) spojene na daljem kraju, za što je pogodan diferencijalni režim rada⁸. Otkrivanje polarizacionih efekata nakon zamene polariteta, zahteva stalno ponavljanje zamene, pa je automatski režim rada konvertora smetnje od velike pomoći. Zamena se može obavljati i ručno u situacijama kada manja osjetljivost merenja ne predstavlja prepreku za uspešnu detekciju.

Rezolucija reflektometra i vreme porasta test impulsa

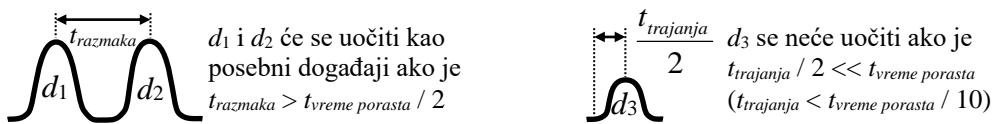
Pitanje prostorne rezolucije reflektograma se često pogrešno interpretira jer postoji opšte ubedjenje u ispravnost sledećeg pravila za grubu procenu sposobnosti instrumenta da razdvoji dva prostorno bliska događaja:

- Dva diskontinuiteta videće se kao odvojeni događaji ako su udaljeni bar polovinu vremena porasta TDR impulsa.
- Pojedinačni mali diskontinuitet neće biti uočen ako je polovina vremena trajanja njegove (nepotpune) refleksije mnogo manja (bar deset puta) od vremena porasta test impulsa.

Ovo pravilo ilustrovano je na slici 4.4.63.

⁸ Neki proizvođači opreme sve režime rada sa konvertorom smetnje nazivaju zajedničkim imenom TDF (*Time Domain Fault*) režim.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.63. Gruba procena rezolucije merenja

Pod pretpostavkom da se korisite kvalitetne sonde za priključenje, da se može zanemariti disperzija impulsa i da je postignuto vreme porasta impulsa od 2 - 4 ns, najmanje fizičko rastojanje na kome se dva diskontinuiteta mogu razvijiti biće oko 1 - 2 ns. Za prosečnu paricu sa brzinom propagacije od 200 m/μs, dobija se da ovo odgovara rastojanju od oko 20 cm. Ovo se ujedno smatra i gornjom granicom prostorne rezolucije današnjih reflektometara koji se primenjuju u telekomunikacijama.

Međutim, u realnosti situacija je znatno povoljnija, jer su komunikacioni impulsi po pravilu i do 10 puta sporiji od brzih TDR impulsa. Prema tome, ako operater nije u mogućnosti da uoči neki događaj ili ne može da razdvoji dva bliska događaja, onda to sa stanovišta komunikacione linije nije ni bitno, jer ih neće uočiti ili razdvojiti ni realni komunikacioni signali. Time se strog zahtev za velikom brzinom porasta test signala može ublažiti, jer operater može efikasno detektovati i one događaje čije je trajanje ili razmakinutost reda veličine 1/10 ili 1/5 vremena porasta TDR impulsa, postižući centimetarsku rezoluciju merenja.

TDR kablovi i sonde za priključenje na vod degradiraju vreme porasta signala, prema relaciji

$$t_{mereno} = \sqrt{t_{reflektometra}^2 + 2\left(\frac{0,35}{f_{3dB}}\right)^2}$$

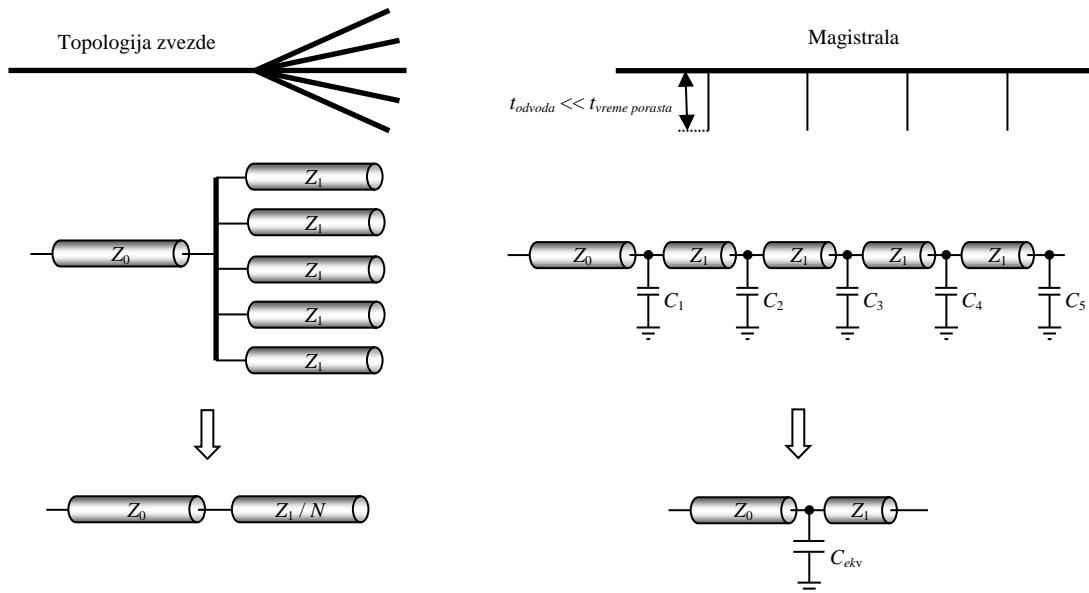
gde je $t_{reflektometra}$ vreme porasta impulsa na izlazu reflektometra mereno bez priključenih sondi, a f_{3dB} je propusni opseg upotrebljenih sondi (učestanost trodecibelskog slabljenja frekvencijske karakteristike). Faktor množenja 2 uveden je stoga što je signalu potrebno dva puta da prođe kroz priključne sonde – jednom prilikom imisije u kabel i drugi put prilikom povratka ka reflektometru. Primera radi, sonde sa propusnim opsegom od 20 MHz, prikačene na reflektometar sa vremenom porasta signala od 3 ns, daju efektivno vreme porasta na svom izlazu od 25 ns. Ako se na isti reflektometar prikače sonde sa propusnim opsegom od 200 MHz, vreme porasta signala biće 4 ns.

Merenja na paralelnim odvodima i sukcesivnim šantovima

Ako se vod razdvaja u više pravaca, kao npr. u slučaju adresnih linija memoriskih modula, reflektometar će pokazati zbirne refleksije sa svih N paralelnih odvoda, ali neće biti u mogućnosti da razdvoji poreklo refleksije i prikaže koja je refleksija došla sa kojeg odvoda. Ako svih N odvoda imaju istu karakteristiknu impedansu i isto kašnjenje, kao kod topologije zvezda, oni se mogu zameniti jednom linijom N puta manje karakteristikne impedanse (slika 4.4.63).

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

U slučaju sukcesivnih šantova na magistrali (*daisy-chain*) koji se pojavljuju kada je ulazna kapacitivnost priključenih uređaja veoma velika, ako je priključak na magistralu kratak u odnosu na vreme porasta i trajanje signala na magistrali (kao što bi i trebalo da bude), sve ove kapacitivnosti mogu se zameniti jednom ekvivalentnom kapacitivnošću koja opterećuje glavni vod i merenje se može znatno pojednostaviti (slika 4.4.64).



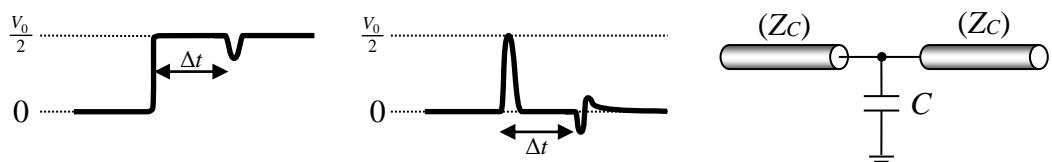
Slika 4.4.64. Reflektometrija na paralelnim odvodima i sukcesivnim šantovima

Primeri krivi povratnog rasejanja

Iskusni korisnici reflektometara mogu na prvi pogled, na osnovu pristiglih impulsa prepoznati tip diskontinuiteta na liniji. Tako se npr. redni induktivni element odlikuje malim pozitivnim impulsom na reflektogramu, dok se kapacitivni šant prepoznaće po malom negativnom impulsu. Neki tipovi diskontinuiteta su veoma karakteristični, dok se neki drugi lako mogu pobrkatи. Stoga je u nastavku dato nekoliko veoma karakterističnih reflektograma. Na svim slikama, prvi reflektogram uvek predstavlja odziv na odskočnu pobudu ili rastuću ivicu dugog usamljenog impulsa, dok drugi predstavlja odziv na veoma kratak (uzan) usamljen impulsa.

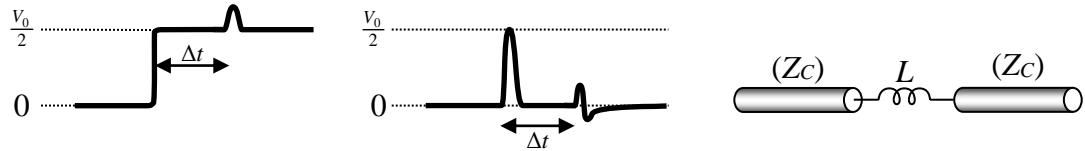
LC diskontinuiteti

Nekoliko tipičnih odziva linije na kojoj se nalaze *LC* diskontinuiteti, za slučaj odskočne i impulsne pobude prikazano je na slikama 4.4.65 do 4.4.72. Reflektogram odskočne pobude odgovara polovini reflektograma za dugačke usamljene impulse (rastuća ivica), pri čemu bi nedostajuća polovina bila pomerena za trajanje impulsa i imala bi refleksiju suprotnog znaka (opadajuća ivica).

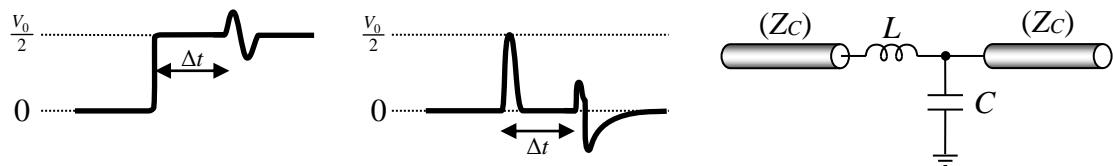


Slika 4.4.65. Prepoznavanje kapacitivnog šanta na liniji

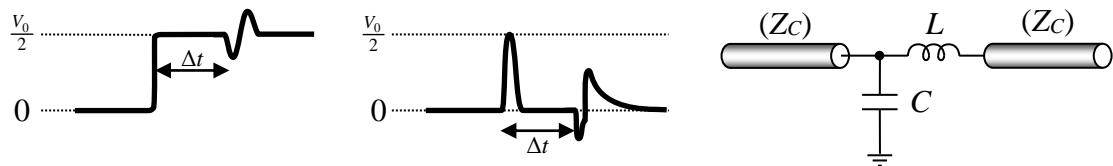
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



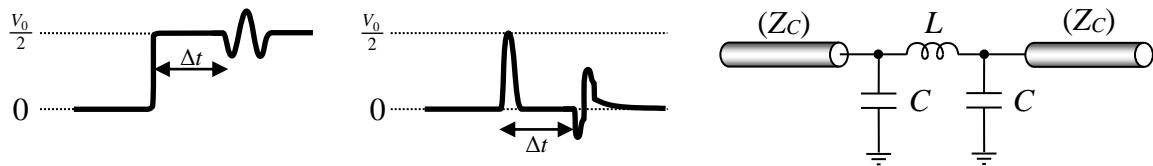
Slika 4.4.66. Prepoznavanje redne induktivnosti na liniji



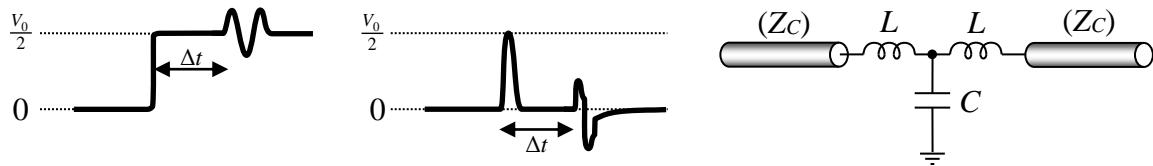
Slika 4.4.67. Prepoznavanje L-C diskontinuiteta



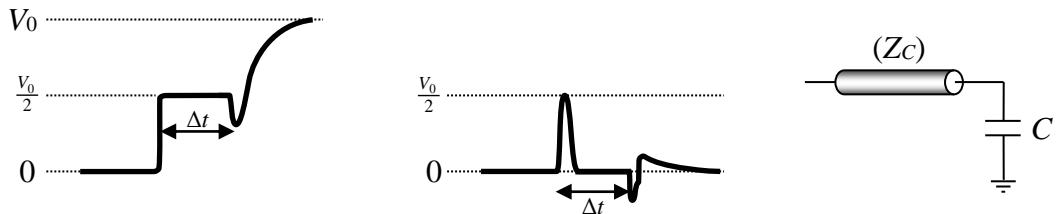
Slika 4.4.68. Prepoznavanje C-L diskontinuiteta



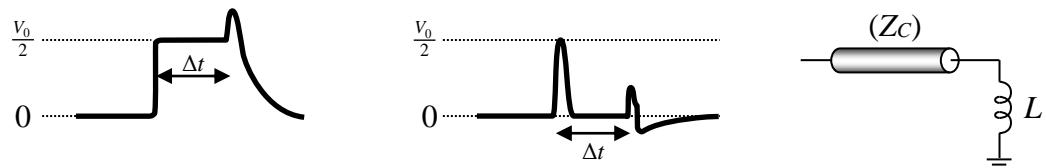
Slika 4.4.69. Prepoznavanje C-L-C diskontinuiteta



Slika 4.4.70. Prepoznavanje L-C-L diskontinuiteta



Slika 4.4.71. Prepoznavanje kapacitivne terminacije voda



Slika 4.4.72. Prepoznavanje induktivne terminacije voda

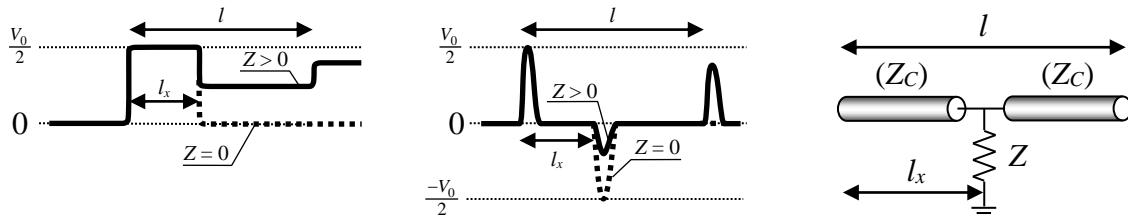
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

Antena

S obzirom da je antena aktivan LC element, na reflektogramu će se dobiti odziv kao i u slučaju LC diskontinuiteta.

Odvod, kratak spoj

Neka je na vodu karakteristične impedanse Z_C , dužine l , na rastojanju l_x prisutna neka impedansa Z između a i b žile. Ovakva impedansa naziva se odvod ka masi. Ukoliko je vrednost impedanse jednaka nuli reč je o kratkom spoju. Na slici 4.4.73 predstavljen je ovaj slučaj sa odgovarajućim reflektogramom.

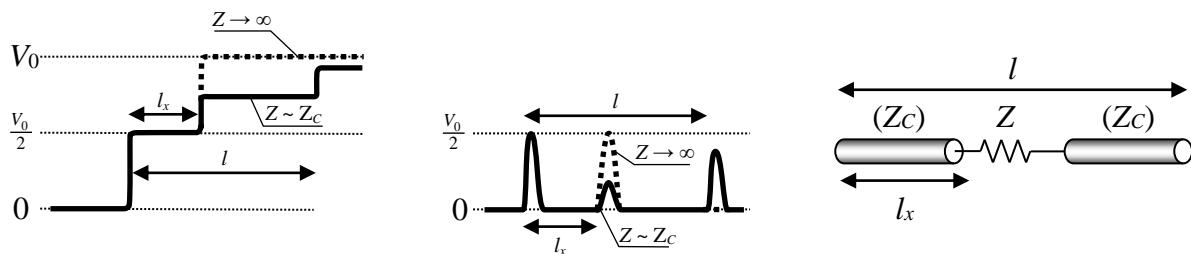


Slika 4.4.73. Reflektogram odvoda i kratkog spoja ka masi

Koeficijent refleksije uvek je manji od nule jer je paralelna veza Z i Z_C koju "vidi" impuls dolazeći iz sredine Z_C uvek manja od Z_C . Ponekad se može desiti da se u okviru utvrđivanja stanja kabla pouzdano ustanovi izražen odvod (skoro kratak spoj), a da refleksije nema. Ovo se javlja u slučaju smetnje na kraju voda (na kablovskoj glavi, na primer) kada impedansa odvoda odgovara karakterističnoj impedansi kabla. Rešenje ovog problema dobija se merenjem sa drugog kraja voda i/ili primenom diferencijalnog režima rada.

Omski diskontinuitet, prekid

Kod omskog diskontinuiteta impedansa se nalazi u jednoj od žila, a ne između njih (slika 4.4.74). Ako je reč o potpunom prekidu ($Z \rightarrow \infty$), dobiće se maksimalna refleksija. Za konačnu impedansu dobiće se pozitivna refleksija, jer je redna veza Z i Z_C uvek veća od Z_C . Pri tome treba imati na umu da će i otpornosti veće od $1\text{ k}\Omega$ podsećati na otvoren vod s obzirom na malu rezoluciju instrumenta u opsegu velikih impedansi, osim ako se ne koristi konvertor smetnje.

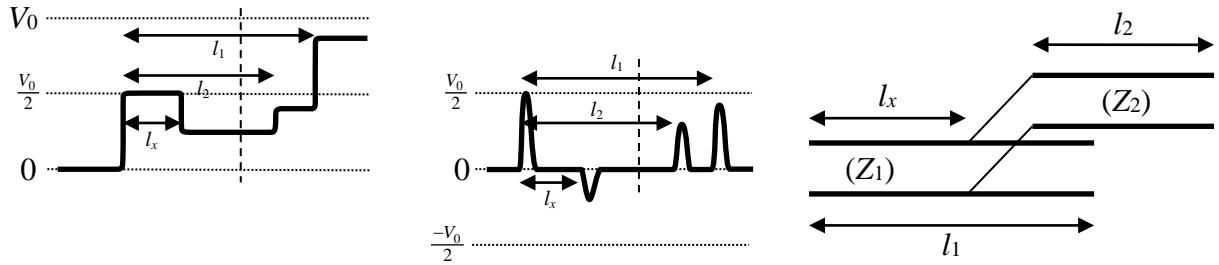


Slika 4.4.74. Reflektogram omske smetnje i prekida

Paralelna veza

Kada se dva voda vežu paralelno u nekoj tački na rastojanju l_x od početka, očekivani reflektogram dat je na slici 4.4.75.

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

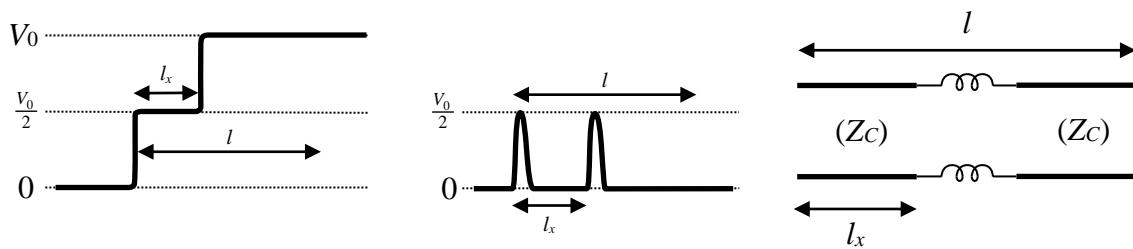


Slika 4.4.75. Reflektogram paralelne veze

Veličina koeficijenta refleksije u tački grananja zavisi od ekvivalentne impedanse paralelne veze dva voda. Kada se navedeni primer javi u praksi, moguća je konfuzija u tumačenju reflektograma i brkanje sa slučajem odvoda, odnosno kratkog spoja. Ovo se dešava kada korisnik zaboravi da na ekranu prikaže ceo reflektogram, već samo deo do isprekidane linije na slici 4.4.75. Ipak, iskusni operater će na osnovu intentziteta refleksija lako razlikovati odvod od paralelne veze. Naime, kod odvoda impulsi slabe sa svakom refleksijom dok se kod paralelne veze kreću nezavisnim linijama, pa je refleksija od kraja voda podjednakog intentziteta kao i refleksija od kraja odvodne linije.

Pupinovan vod

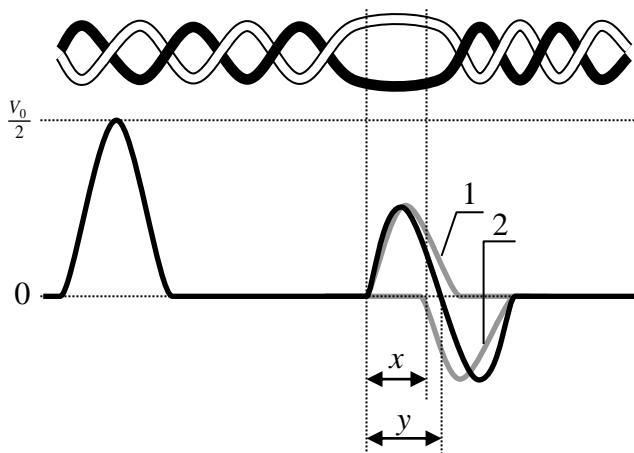
Pupinovi kalemovi uvedeni su na analognim telefonskim linijama radi popravljanja karakteristike sistema u opsegu govornog signala. Pupinovi kalemovi sastoje se iz para induktivnih elemenata stavljenih u obe žile prenosne linije. U frekvencijskom opsegu govornog signala (< 4 kHz) ovi kalemovi pojačavaju signal i omogućuju veći domet linije. Iznad ovog opsega Pupinovi kalemovi imaju vrlo veliko slabljenje. Kako je spektar digitalnih impulsa daleko širi od spektra govornih signala, Pupinovi kalemovi za predajni impuls standardnih reflektometara predstavljaju beskonačnu impedansu. Zbog toga tipičan reflektogram za pupinovan vod veoma liči na slučaju prekida. Jedini pokazatelj da se zaista radi o pupinovanom vodu je preuranjena refleksija, kada je, bar približno, poznata stvarna dužina linije i kada je isključena mogućnost prekida kabla. Odgovarajući reflektogram dat je na slici 4.4.76.



Slika 4.4.76. Reflektogram pupinovanog voda

Nastavak

Električne osobine upredene parice su uniformne duž kabla zahvaljujući uniformnosti materijala provodnika i izolacije i geometrijskih karakteristika u koje spadaju i karakteristike samog upredanja. Na mestu nastavljanja se ova uniformnost kvari što rezultuje nehomogenošću impedanse. Očigledan primer nehomogenosti je razmaknutost žila, mada može biti i promene smera upredanja, omskih nehomogenosti itd. Ovo se lako detektuje reflektometrom, kao što je predstavljeno na slici 4.4.77.



Slika 4.4.77. Reflektogram nastavljanog voda

Na slici 4.4.77 nastavak je predstavljen raspredelenim segmentom parice. Sa slike se vidi da je došlo do stapanja reflektovanih impulsa od rastuće ivice (1) i opadajuće ivice (2) na mjestu nastavka na osnovu koga se može izvesti pogrešan zaključak o početku i kraju raspredelenog dela parice. Tačna dužina raspredelenog dela parice x uvek je manja od uočene dužine y .

Pozitivna ili negativna refleksija od nastavka mogu ponekad biti vrlo izražene što može dovesti do pogrešnog zaključka da se radi o *LC* smetnji. Ovakve dileme se razrešavaju merenjem u diferencijalnom režimu.

Kada na vodu ima više od jednog nastavka, svaka naredna refleksija će, zbog slabljenja, biti sve manjeg intenziteta. Ukoliko se nakon male refleksije pojavi veća, to može biti indikacija da ovaj nastavak ima lošije prilagođenje karakteristične impedanse.

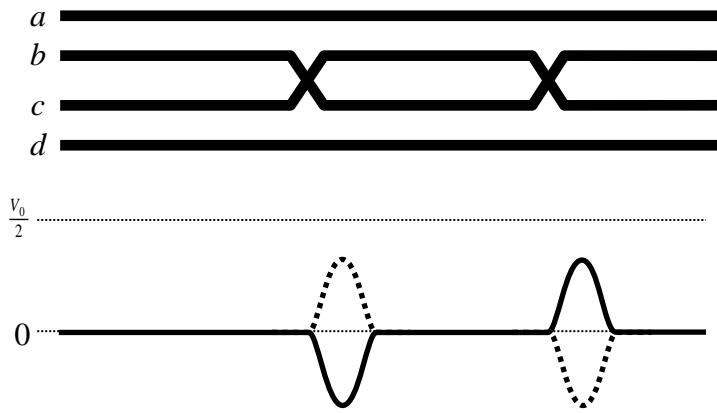
Rasparenje

Lociranje mesta rasparenja reflektometrom je moguće izvršiti u diferencijalnom režimu, režimu upoređenja, normalnom režimu i režimu preslušavanja. Podrazumeva se da se u diferencijalnom režimu i u režimu upoređenja koristi jedna od rasparenih parica i jedna ispravna parica. Međutim, za praktičnu primenu je najpogodniji **režim preslušavanja** zbog znatno izraženijeg i lakše uočljivog reflektovanog impulsa.

Vrlo čest slučaj u praksi je pojava dvostrukе zamene, tj. rasparivanja i ponovnog sparivanja na različitim položajima u kablu. Jedan takav primer prikazan je na slici 4.4.78.

Ukoliko se na priključnicama reflektometra zamene mesta a i b ili c i d žile, reflektogram će zbog promene znaka sprege promeniti polaritet (prikazano isprekidanom linijom na slici 4.4.78). Na reflektogramu nema početnog impulsa koji je u režimu preslušavanja kompenzovan oduzimanjem početnog impulsa sa druge parice. Isti slučaj javlja se i kod rada u diferencijalnom režimu.

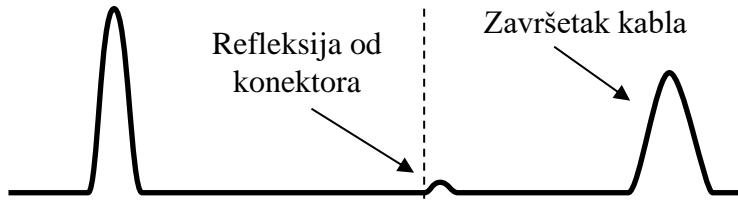
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.78. Reflektogram rasparenja kabla

Konektor

Kada su dve sekcije kabla povezane konektorom, količina refleksije od konektora je direktno proporcionalna kvalitetu izrade spoja (slika 4.4.79).



Slika 4.4.79. Reflektogram konektora

Kabel pod elektromagnetskom smetnjom

Reflektogrami kablova koji se završavaju antenama ili se nalaze u njihovoј blizini, odnosno kablova koji prolaze blizu energetskih vodova ili drugih izvora zračenja, biće zašumljeni što nekada može otežati uočavanje i lociranje "događaja" (slika 4.4.80). Ove smetnje mogu se "ispeglati" primenom odgovarajućih filtera ugrađenih u reflektogram.

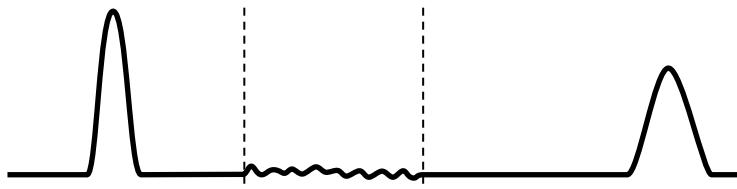


Slika 4.4.80. Zašumljen reflektogram kao posledica spoljašnjeg izvora smetnje

Vlažan kabel

Na slici 4.4.81 prikazan je izgled reflektograma kabla sa segmentom čija je izolacija propustila vlagu. Početak i kraj zašumljenog segmenta ukazuju na početak i dužinu vlažne deonice kabla.

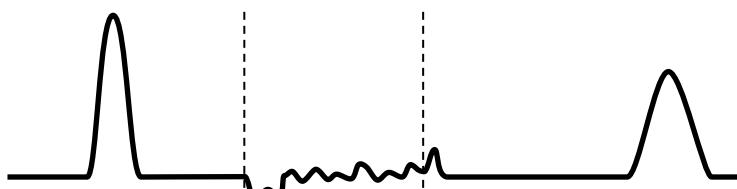
4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima



Slika 4.4.81. Vlažna deonica kabla imaće blago zatalasan i zašumljen odziv

Kabel natopljen vodom

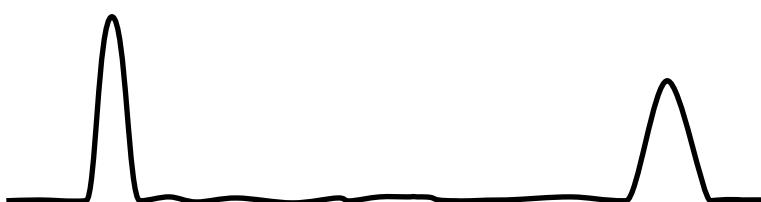
Kada je deonica kabla natopljena vodom i potpuno u nju uronjena, na reflektogramu će se uočiti negativan propad na početku deonice i pozitivan skok na njenom kraju. Između ovih refleksija signal će biti značajno zašumljen i deformisan. Kraj deonice natopljene vodom je neposredno pre poslednjeg pozitivnog pika.



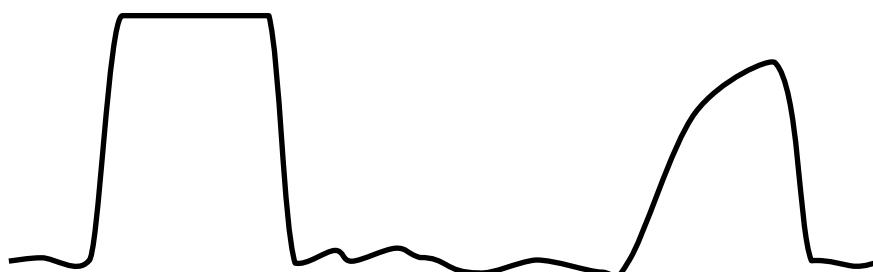
Slika 4.4.82. Deonica vlakna natopljena vodom

Upotreba impulsa različitih trajanja

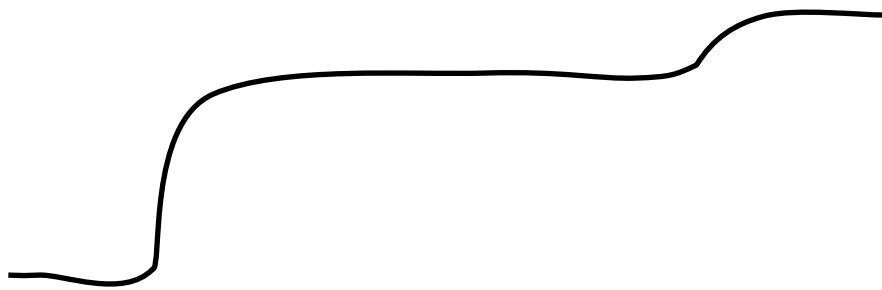
Merenje uzanim impulsima je poželjno radi dobijanja dobre prostorne rezolucije, ali je ograničeno na situacije kada je dužina deonice koja se ispituje relativno mala. Kod dužih kablova, potrebno je da impuls ima dovoljno energije kako nastale refleksije ne bi suviše oslabile pre nego što stignu nazad do instrumenta. Međutim, ako se sa dužinom impulsa pretera, reflektogram može postati potpuno neupotrebljiv. Na slikama 4.4.83, 4.4.84 i 4.4.85 prikazana su tri reflektograma iste trase za tri različite dužine impulsa.



Slika 4.4.83. Kratki impulsi dobro razdvajaju događaje, ali su refleksije slabog intenziteta



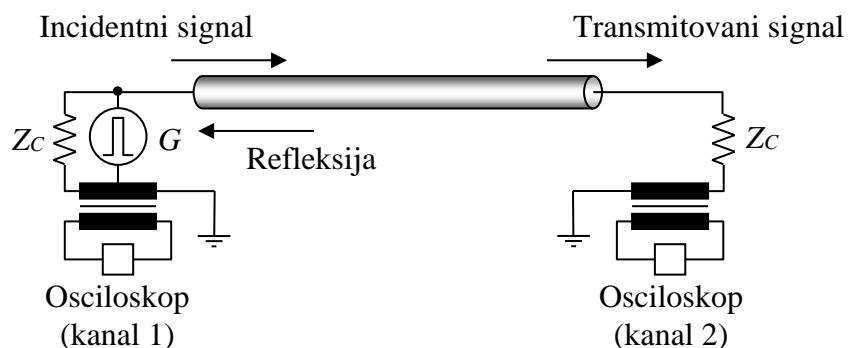
Slika 4.4.84. Povećanje širine impulsa daje veće mrtve zone



Slika 4.4.85. Za previše dugačke impulse reflektogram se ili svodi na slučaj odskočne pobude ili je degradiran do nivoa potpune neupotrebljivosti

4.4.8. Transmisija u vremenskom domenu i interpretacija rezultata merenja preko S parametara

Transmisija u vremenskom domenu ili TDT (*Time Domain Transmission*) može se primeniti kod reflektometara koji imaju više kanala. Na jedan kanal dovode se reflektovani signali, a na drugi signali koji se transmituju kroz ispitivano kolo ili vod. Ovo je prikazano na slici 4.4.86.



Slika 4.4.86. Priključenje reflektometra za snimanje transmisione karakteristike

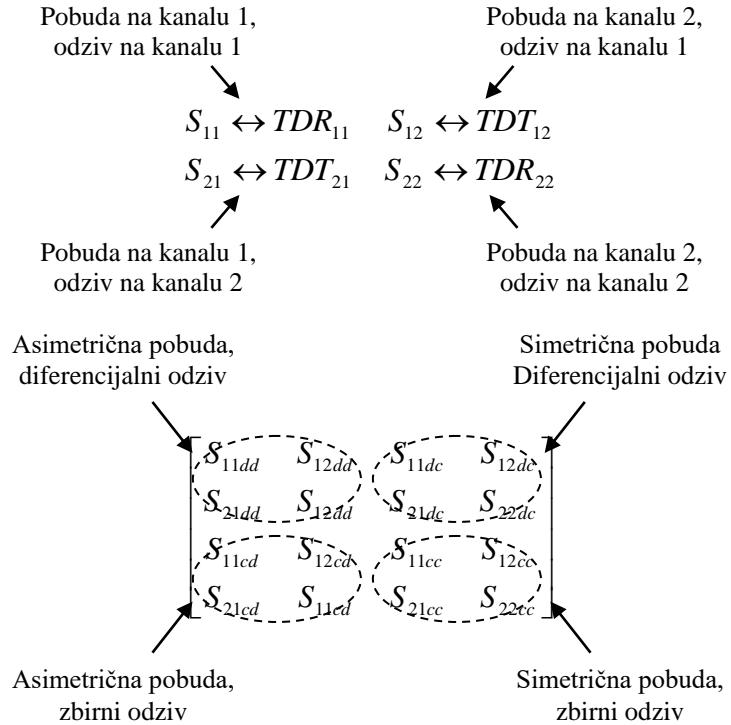
TDT je korisna za karakterizaciju elemenata sa dva pristupa, za merenje efekata koji diskontinuiteti na liniji imaju po rad uređaja, za procenu degradacije vremena porasta signala, slabljenja, skin efekta i dielektričnih gubitaka. Neki reflektometri nude mogućnost da na osnovu TDT i TDR krivih procene degradaciju dijagrama oka kroz datu liniju.

Slično kao i kod diferencijalne reflektometrije, i ovde se koristi tehnika vremenskog reskaliranja krivih. Širok frekvencijski opseg reflektometra omogućava širokopojasnu karakterizaciju kola. Na osnovu TDR reflektovanih impulsa može se odrediti povratno slabljenje (*return loss*) ili S_{11} parametar kola, a na osnovu TDT transmitovanih impulsa direktno slabljenje (*insertion loss*) ili S_{21} parametar kola. Rezultati diferencijalne reflektometrije mogu se prevesti u odgovarajuće diferencijalne (*differential*) i mešovite (*mixed mode*) S parametre. Ovo je prikazano na slici 4.4.87.

Neki vektorski mrežni analizatori (*vector network analyzer*) imaju mogućnost konverzije rezultata merenja iz frekvencijskog u vremenski domen. Ovi instrumenti mogu se tada koristiti u nedostatku reflektometara, ali je njihova upotreba povezana sa brojnim teškoćama, kao što je teško podešavanje i prilagođenje liniji, komplikovana upotreba, potreba za vrhunskom obukom

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

i velikim iskustvom, kao i izuzetno visoka cena uređaja. Po pravilu, upotreba vektorskih mrežnih analizatora ograničena je na karakterizaciju analognih, radio i mikrotalasnih sistema, dok se reflektometari koriste za testiranje brzih digitalnih sistema, proveru integriteta linije i lociranje smetnji.



Slika 4.4.87. Matrica S parametara sistema i veza sa rezultatima TDR, TDT i diferencijalnih TDR merenja

4.4.8. Račun greške kod predlociranja smetnje reflektometrom

Ukupna apsolutna greška sastoji se od grube, sistematske i slučajne greške, odnosno data je sa

$$|G_l| = |G_{l \text{ grubo}}| + |G_{l \text{ sistematsko}}| + |G_{l \text{ slučajno}}|$$

Grube greške

Ako je merenje obavljenko korektno tada je

$$|G_{l \text{ grubo}}| = 0 \text{ m}$$

Sistematske greške

Sistematska greška ima nekoliko komponenti:

$$|G_{l \text{ sistematsko}}| = |G_{\text{priklj. kabl.}}| + |G_{v/2}| + |G_{\text{nehomogenosti}}| + |G_{\text{kabriranja}}|$$

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$|G_{\text{priklj. kabl.}}$ je greška koju u rezultat merenja unose priključni kablovi. Ako je dužina priključnih kablova npr. 2,5 m, a na instrumentu se očita udaljenost do smetnje od 167,46 m, onda je taj očitani rezultat za 2,5 m veći od stvarne udaljenosti od početka kabla do smetnje. Ova greška se lako otklanja ako je poznata dužina priključnih kablova.

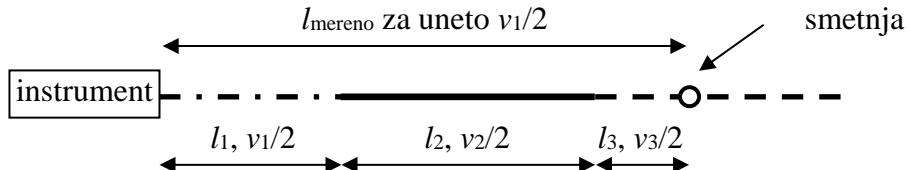
$G_{v/2}$ je greška uzrokovana (ne)poznavanjem stvarne polubrzine prostiranja polja kroz paricu i ne može se otkloniti iz rezultata merenja zato što je polubrzina uslovljena velikim brojem uticajnih veličina koje se ne mogu kontrolisati. Ako bi apslutne vrednosti polubrzina bile poznate, tada bi se greška mogla odrediti na osnovu obrasca

$$G_l = \Delta \left(\frac{v}{2} \right) \cdot 2t + \frac{v}{2} \cdot 2\Delta t = \underbrace{\Delta \left(\frac{v}{2} \right)}_{G_{v/2}} \cdot \underbrace{2l_{\text{mereno}}}_{v/2} + \underbrace{\frac{v}{2} \cdot 2\Delta t}_{G_{\text{instrumenta}}}$$

U gornjem izrazu samo prvi član predstavlja grešku nepoznavanja polubrzine, dok je $G_{\text{instrumenta}}$ slučajan deo greške koji je opisan unastavku.

$G_{\text{nehomogenosti}}$ je greška koja se javlja, ako je kabel nehomogen, odnosno ako se sastoji iz više deonica različitih električnih osobina. Greška je otklonjiva, ako je poznata šema kabla i relativne razlike u polubrzinama između svake deonice.

Primer otklanjanja greške nehomogenosti



Neka je instrument prilagođen prvoj deonici, tj. neka je uneta polubrzina $v_1/2$ koja se podrazumeva za ceo kabel. Tada se rastojanje manja od l_1 mere bez greške nehomogenosti, dok se sva ostala rastojanja mere sa nekom greškom. Kako instrument zapravo meri vreme potrebno impulsu da stigne do smetnje i vrati se nazad, na osnovu slike sledi da će instrument izmeriti vreme

$$2t = 2t_1 + 2t_2 + 2t_3 = \frac{2l_1}{v_1} + \frac{2l_2}{v_2} + \frac{2l_3}{v_3}$$

Instrument ovo vreme množi sa unetom polubrzinom $v_1/2$ i dobija

$$l_{\text{mereno}} = l_{\text{priklj.kablova}} + 2t \cdot \frac{v_1}{2} = l_1 + l_2 \frac{v_1}{v_2} + l_3 \frac{v_1}{v_3}$$

Na osnovu ovoga se dobija da je

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

$$l_3 = \frac{v_3}{v_1} \left(l_{\text{mereno}} - l_{\text{priklj. kablova}} - l_1 - l_2 \frac{v_1}{v_2} \right)$$

Dakle, da bi se ova greška otklonila potrebno je znati relativne odnose polubrzina za sve deonice do smetnje, kao i udaljenosti svih nastavaka do smetnje (l_1 i l_2). Relativni odnosi plubrzina se poznaju bolje od samih polubrzina, pa se mogu usvojiti tablične vrednosti, dok se dužine deonica l_1 i l_2 moraju očitati iz dokumentacije o kablu.

$G_{\text{kabliranja}}$ je greška uzrokovana razlikom u dužini metalnog provodnika i dužini kabla u kome se taj provodnik nalazi. Ovo je otklonjiva greška ukoliko je poznat koeficijent kabliranja za svaki od segmenata voda i ukoliko je instrument prilagođen prvoj deonici po impedansi i brzini propagacije. Da bi se mogla otkloniti ova greška, najpre je potrebno otkloniti grešku nehomogenosti.

Primer otklanjanja greške kabliranja

Neka su koeficijenti kabliranja za deonice na kablu sa gornje slike redom k_1 , k_2 i k_3 i neka je obavljena grepka korekcije nehomogenosti, tj. neka su poznate tačne dužine delova žile do smetnje l_1 , l_2 i l_3 . Tada je udaljenost smetnje od instrumenta izražena u dužini kabla

$$l = k_1 \cdot l_1 + k_2 \cdot l_2 + k_3 \cdot l_3$$

Slučajne greške

Slučajne greške su neotklonjive, čak i kada se približno znaju njihovi uzroci. To je zato što je veza između uzroka i iznosa greške toliko komplikovana da se može modelovati jedino slučajnim procesima i teorijom verovatnoće. Dakle, poznaju se samo granice slučajne greške, ali ne i njeni stvarni iznosi.

Kao i sistematska, i slučajna greška sastoji se iz više komponenti:

$$|G_l \text{ slučajno}| = |G_{\text{očitavanja}}| + |G_{\text{impulsa}}| + |G_{\text{instrumenta}}|$$

$G_{\text{očitavanja}}$ je posledica konačnog koraka kurzora na ekranu instrumenta. Svaki put kada se točkić instrumenta okreće za jedan podeok, kurzor se pomeri za određeno rastojanje. Kada se ovo rastojanje (korak kurzora) određuje baš na mestu smetnje i to u maksimalnom mogućem zumu za dati događaj, ono predstavlja $G_{\text{očitavanja}}$. Pri tome se točkić, prilikom provere, mora pomeriti i unapred i u nazad za po jedan podeok, a usvaja se veća (gora) od dve dobijene vrednosti.

Napomena: nekada se dešava da prilikom okretanja točkića za jedan korak ne dođe do vidljivog pomeranja kurzora, tada se točkić mora okretati sve dok kurzor ne napravi vidljiv preskok od bar jednog piksela. Zbog toga je korišćenje što većeg zuma potrebno da bi se ova greška minimizovala.

G_{impulsa} definiše prostornu rezoluciju instrumenta u zavisnosti od širine impulsa. Širi impulsi omogućavaju veći domet signalu, ali pokrivaju veći deo žile i onemogućavaju da se razdvoje događaji koji su bliži od širine impulsa. Dakle, treba koristiti što uže impulse za koje se još

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

može dobaciti do smetnje. U praksi se može usvojiti i nešto blaži kriterijum, odnosno da je greška uzrokovana širinom impulsa zapravo jednaka 1/10 širine impulsa.

$$G_{impulsa} = \frac{1}{10} L_{impulsa}$$

$G_{instrumenta}$ je inherentna greška određena konstrukcijom instrumenta i kvalitetom ugrađenih elektronskih komponenti. Maksimalna vrednost dobije se iz dokumentacije proizvođača ili na osnovu poslednje obavljene kalibracije.

Najbolja procena ukupne greške merenja je data sa

$$|G_l| > |G_l \text{ slučajno}| = |G_{očitavanja}| + |G_{impulsa}| + |G_{instrumenta}|$$

Dakle, rezultat merenja se može izraziti kao

$$l = k_1 \cdot l_1 + k_2 \cdot l_2 + k_3 \cdot (l_3 \pm |G_l|)$$

Literatura

- [1] Ethirajan and Nemec, "Termination Techniques for High Speed Buses," EDN, 2/16/98, p. 135.
- [2] M.D. Tilden, "Measuring controlled-impedance boards with TDR," – Printed Circuit Fabrication, February 1992, Tektronix Application Note 85W-8531-0
- [3] "Advanced TDR Techniques," – Hewlett Packard Application Note 62-3, May 1990
- [4] "Guidelines for Measurement of Electronic Package Inductance and Capacitance Model Parameters," – JEDEC Publications JEP-123, 1994
- [5] D.A. Smolyansky, "TDR Techniques for Characterization and Modeling of Electronic Packaging," – High Density Interconnect Magazine, March and April 2001, 2 parts (TDA Systems application note PKGM-0101)
- [6] C. Odegard, C. Lambert, "Comparative TDR Analysis as a Packaging FA Tool," – Proceedings from the 25th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 14-18 November, 1999, Santa Clara, CA
- [7] D.A. Smolyansky, "Electronic Package Failure Analysis Using TDR," – Proceedings from the 26th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 2000, Bellevue, Washington
- [8] D. A. Smolyansky, S. D. Corey, "Characterization of Differential Interconnects from Time Domain Reflectometry Measurements," – Microwave Journal, Vol. 43, No. 3, pp. 68-80 (TDA Systems application note DIFF-1099)
- [9] "Differential Ohms Measurement with the 11800- Series Oscilloscope," – Tektronix Technical Brief 47W- 7520
- [10] L.A. Hayden, V.K. Tripathi, "Characterization and modeling of multiple line interconnections from TDR measurements," – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 42, September 1994, pp.1737-1743
- [11] C.-W. Hsue, T.-W. Pan, "Reconstruction of Nonuniform Transmission Lines from Time-Domain Reflectometry," – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 45, No. 1, January 1997, pp. 32-38

4.4. Refleksije na bakarnim provodnicima

- [12] D. A. Smolyansky, S. D. Corey, "Printed Circuit Board Interconnect Characterization from TDR Measurements" – Printed Circuit Design Magazine, May 1999, pp. 18-26 (TDA Systems Application Note PCBD-0699)
- [13] E. Bogatin, S. Corey, M. Resso, "Practical Characterization, Analysis and Simulation of Lossy Lines," – DesignCon 2001, Santa Clara, CA, January 2001 (TDA Systems Application Note LOSS-0601)
- [14] D. Smolyansky, S. Corey, M. Resso, "Choosing The Right Signal Integrity Tools for Infiniband Measurements," DesignCon 2002, Santa Clara, CA, January 2002 (TDA Systems Application Note TDFD-0202)
- [15] SEBA KMT, Hagenuk KMT Kabelmesstechnik GmbH, "Digiflex Com reflektometar u vremenskom domenu – uputstvo za upotrebu", Izdanje: 10-99, Item No: 9003628,1999.
- [16] SEBA KMT, Hagenuk KMT Kabelmesstechnik GmbH, "Konvertor greške – uputstvo",1999.