

10. IMPULSNA REFLEKTOMETRIJA

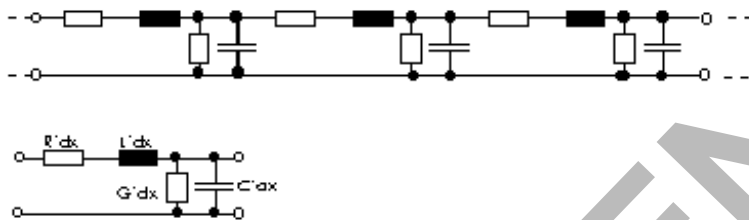
Brzi razvoj telekomunikacijske i energetske mreže ima za posljedicu povećanje broja kvarova, pogotovo u urbanim sredinama, što je dovelo do razvoja uređaja i metoda mjerenja kvarova na kabelima principom refleksije emitiranog impulsa od mjesta kvara, što zahtjeva maksimalnu efikasnost u njihovom pronalaženju i otklanjanju.

Postojećim mostovskim metodama, impulsna reflektometrija je izvršna dopuna. Prema mostovskim metodama od kojih neke određuju manje-više orijentacijski mjesto kvara na kabelu, impulsna reflektometrija daje vizualnu predodžbu o vrsti kvara i stanju na kabelu do mjesta kvara, odnosno do kraja kabela. Time je omogućena registracija više kvarova na mjerenom kabelu i odgovarajućim postupcima određivanje njihove udaljenosti od mjesta promatranja.

Točnost mjerenja ovisi o puno činbenika, a prije svega pogreška koju unosi sam instrument, ali i o tehničkoj dokumentaciji položenih kabela. Kada bi se pomaću instrumenta, koji na primjer unosi grešku od samo $\pm 5\%$, određivalo mjesto kvara na kabelu dužine od 10 km, odstupanje u rezultatu bi bilo ± 50 m. Fizički, to bi značilo u krajnjem slučaju značilo raskopavanje trase kabela na dužini od 100 m.

10.1. PRINCIP RADA IMPULSNE REFLEKTOMETRIJE

Impulsna reflektometrija se temelji na refleksiji koja se javlja na mjestima diskontinuiteta impedancije duž kabela. Nadomjesna shema voda prikazana je slikom 10.1.



Sl. 10.1. Nadomjesna shema voda

Diskontinuiteti su mjesta na kojima se ulazna impedancija voda i ostatka voda razlikuju od njegove karakteristične impedancije \overline{Z}_c . Kod realnih vodova, na nižim frekvencijama, karakteristična impedancija je kompleksna veličina i ovisi o frekvenciji, a na višim frekvencijama je konstantna i dominantno realna. U općem slučaju karakteristična impedancija iznosi:

$$\overline{z}_c = \frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}$$

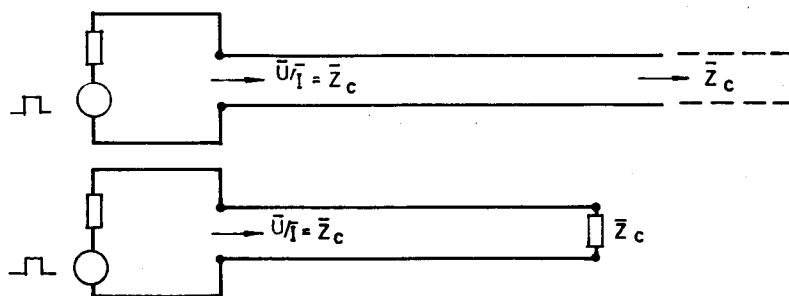
gdje su:

- R' - uzdužni otpor (Ω/km),
- L' - uzdužni induktivitet (H/km),
- G' - uzdužna vodljivost (S/km),
- C' - uzdužni kapacitet (F/km),
- ω - kružna frekvencija.

U slučaju voda s malim gubicima ili pri visokoj frekvenciji, jednadžba za \overline{Z}_c može se napisati u obliku:

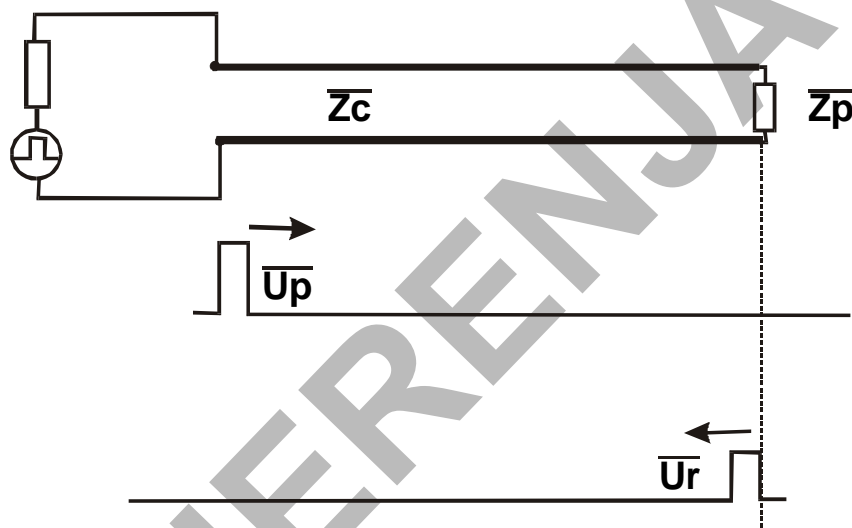
$$\overline{Z}_c \approx |\overline{Z}_c| = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Kod beskonačno dugog homogenog voda nema refleksije progresivnog elektromagnetskog vala, jer je njegova ulazna impedancija u svakoj točki jednaka karakterističnoj impedanciji. Također nema refleksije ni na prilagođenom vodu, tj. na vodu koji je zatvoren svojom karakterističnom impedancijom \overline{Z}_c (sl. 10.2.).



Sl. 10.2. - Beskonačno dugi vod i vod zatvoren svojom karakterističnom impedancijom \bar{Z}_c

Ako se vod zatvori impedancijom $\bar{Z}_p \neq \bar{Z}_c$, a na ulaz se priključi generator impulsa, na mjestu priključka impedancije \bar{Z}_p nastaje nehomogenost (diskontinuitet), pa će jedan dio energije progresivnog impulsa biti reflektiran (sl. 10.3.), a drugi dio se apsorbira u impedanciji \bar{Z}_p (potrošaču).



Sl. 10.3. - Vod zatvoren impedancijom \bar{Z}_p

Odnos amplituda reflektiranog i progresivnog vala $r = \frac{U_r}{U_p}$ naziva se koeficijent refleksije.

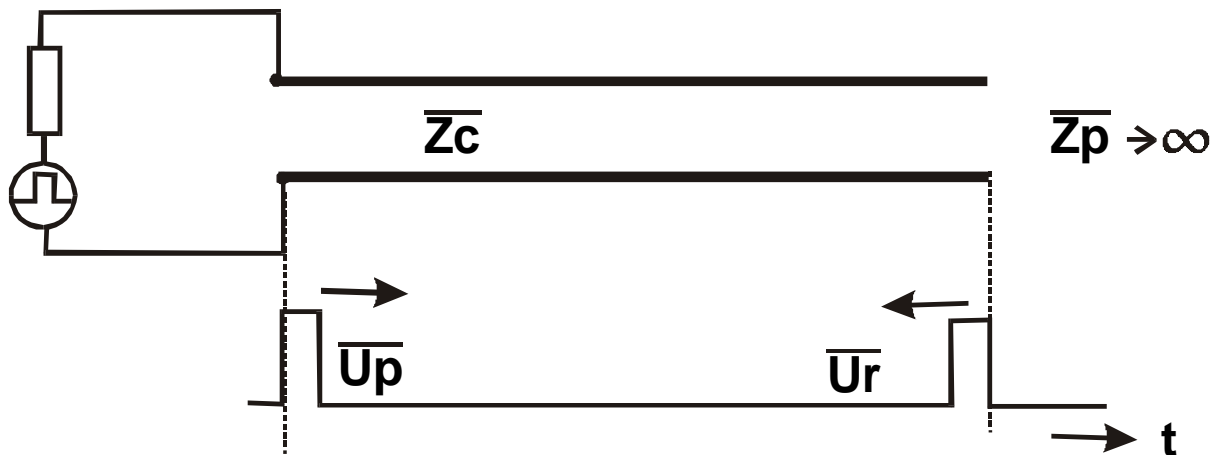
Opći izraz za koeficijent refleksije na kraju voda, kada je vod zatvoren impedancijom \bar{Z}_p , glasi:

$$\bar{r} = \frac{\bar{Z}_p - \bar{Z}_c}{\bar{Z}_p + \bar{Z}_c}; \quad 0 \leq |\bar{r}| \leq 1$$

Veličina koeficijenta refleksije ima veliki uticaj na kvalitetu prijenosa.

Kada je kraj voda otvoren, odnosno u slučaju prekida vodiča progresivni impuls se potpuno reflektira bez promjene faze (sl. 10.4.), tj. s pozitivnim predznakom, pa koeficijent refleksije iznosi:

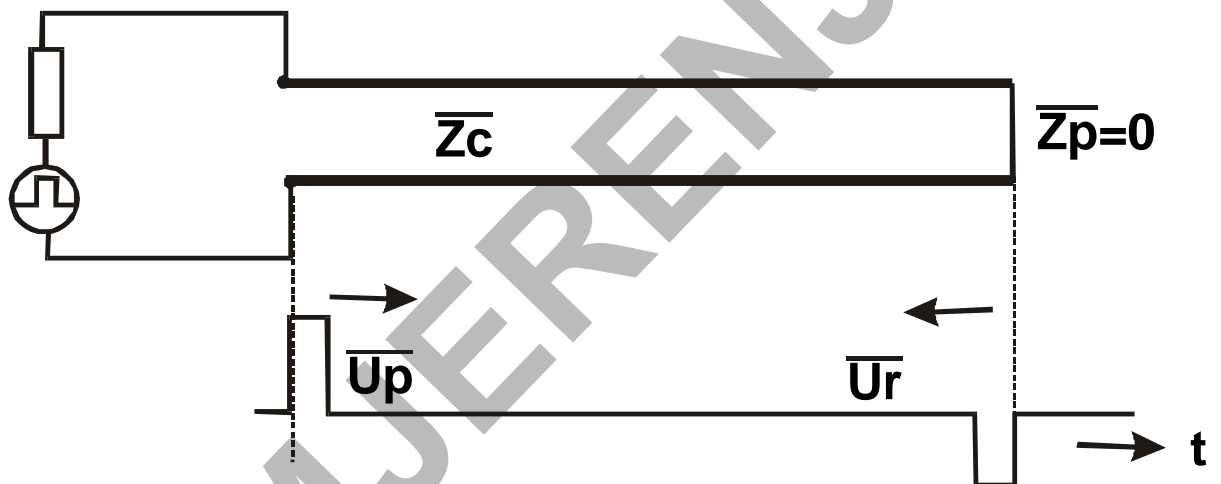
$$\bar{r} = \lim_{\bar{Z}_p \rightarrow \infty} \frac{\bar{Z}_p - \bar{Z}_c}{\bar{Z}_p + \bar{Z}_c} = +1$$



Sl. 10.4. - Refleksija na otvorenom vodu

Kod kratko spojenog voda progresivni impuls se takođe potpuno reflektira, ali s promjenom faze, tj. s negativnim predznakom (sl. 10.5.), i koeficijent refleksije tada iznosi:

$$\bar{r} = \lim_{Z_p \rightarrow 0} \frac{\bar{Z}_p - \bar{Z}_c}{\bar{Z}_p + \bar{Z}_c} = -1$$



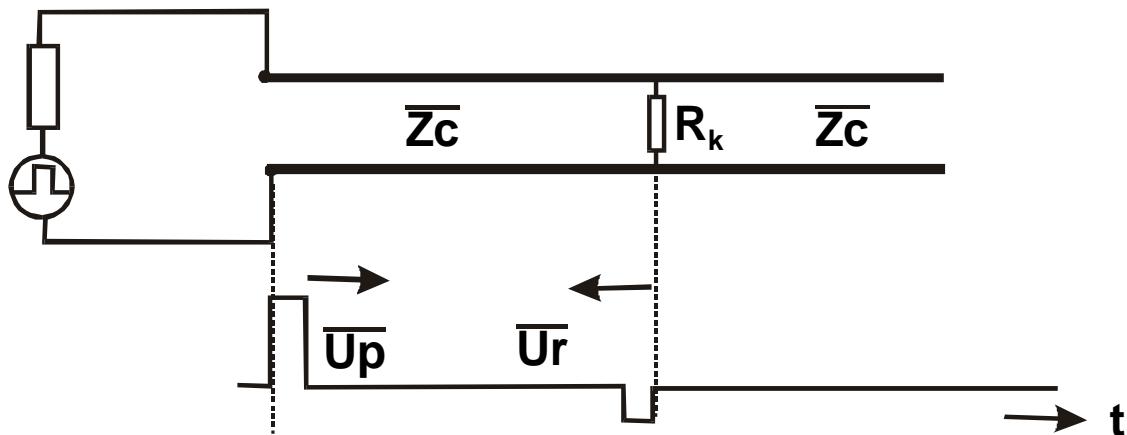
Sl. 10.5. - Refleksija na kratko spojenom vodu

Kada je vod prilagođen, koeficijent refleksije je:

$$\bar{r} = \lim_{Z_p \rightarrow Z_c} \frac{\bar{Z}_p - \bar{Z}_c}{\bar{Z}_p + \bar{Z}_c} = 0$$

U slučaju kvara na vodu (sl. 10.6.), ekvivalentni otpor \bar{Z}_x na mjestu kvara jednak je paralelnoj vezi prijelaznog otpora R_k na mjestu kvara i karakteristične impedancije \bar{Z}_c , pa tada izraz za koeficijent refleksije glasi:

$$\bar{r} = \frac{\bar{Z}_x - \bar{Z}_c}{\bar{Z}_x + \bar{Z}_c} = \frac{\frac{R\bar{Z}_c}{R_k + \bar{Z}_c} - \bar{Z}_c}{\frac{R\bar{Z}_c}{R_k + \bar{Z}_c} + \bar{Z}_c} = \frac{-\bar{Z}_c}{2R_k + \bar{Z}_c}$$



Sl. 10.6.- Refleksija na vodu u slučaju kvara na beskonačno dugom vodu

Ukoliko je na mestu kvara $R_k \gg \bar{Z}_c$, jednačba za koeficijent refleksije dobiva oblik:

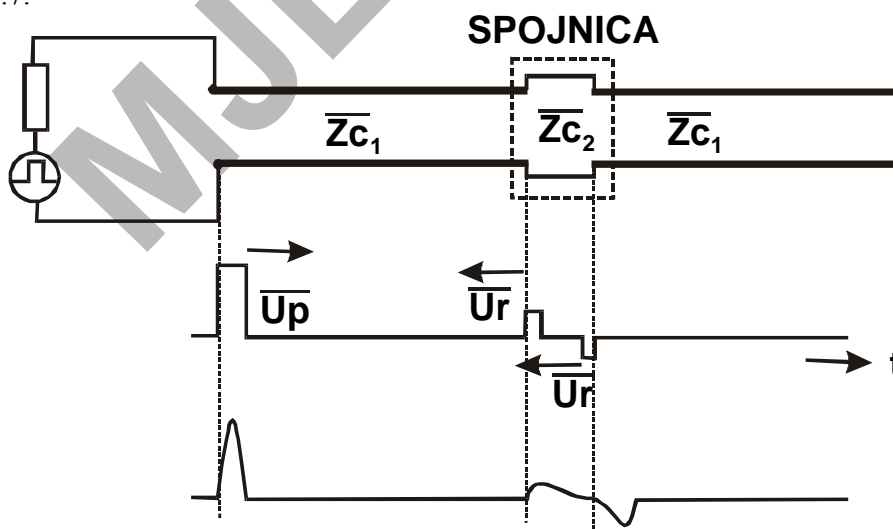
$$r \approx \frac{-Z_c}{2R_k}$$

Na primjer, za vod karakteristične impedancije $Z_c = 75 \Omega$, kod kojeg je na mjestu kvara $R_k = 1 \text{ k}\Omega$, koeficijent refleksije iznosi:

$$r \approx \frac{-75}{2 \cdot 1000}$$

Ovdje treba napomenuti kako nije uzet u obzir čimbenik prigušenja voda. Rezultat iz primjera pokazuje kako će se 3,8 % amplitude progresivnog impulsa reflektirati na mjestu kvara. Iz ovog primjera je vidljivo kako »prepoznavanje« kvarova nije neograničeno i da, uz ostalo, ovisi i o veličini prijelaznog otpora na mjestu kvara.

Na djelomično homogenim vodovima refleksije nastaju na mjestima gdje karakteristična impedancija \bar{Z}_c odstupa od srednje vrijednosti, a to je najčešće na mjestima spojnica, promjena poprečnog presjeka vodiča, nagnječenja kabela itd. Na tim mjestima je promijenjen odnos L/C, te imamo stanje kao na sl. 10.7.



Sl. 10.7. - Stanje na beskonačno dugom vodu vodu radi nehomogenosti (npr. spojnica.)

Promjena odnosa L/C uzrok je skokovite promjene karakteristične impedancije \bar{Z}_{c1} na \bar{Z}_{c2} , te koeficijent refleksije iznosi:

$$r = \frac{\bar{Z}_{c2} - \bar{Z}_{c1}}{\bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c1}} = \frac{\Delta \bar{Z}}{2\bar{Z}_{c1} + \Delta \bar{Z}}$$

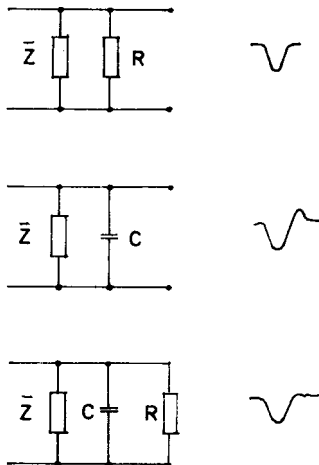
gdje je:

$$\bar{Z}_{c2} = \bar{Z}_{c1} + \Delta\bar{Z}$$

Kada je $\Delta\bar{Z} \ll \bar{Z}_{c1}$, jednadžba dobiva oblik:

$$\bar{r} = \frac{\Delta\bar{Z}}{2\bar{Z}_{c1}}$$

Kada je prijelazni otpor na mjestu kvara realan, tj. ako je nezavisan o frekvenciji, oblik progresivnog impulsa na mjestu kvara neće biti promijenjen. Međutim, ukoliko na mestu kvara postoji kompleksna impedancija, pojedinačne komponente impulsnog spektra različito će se reflektirati - u ovisnosti o komponentama ove kompleksne impedancije. Različiti oblici refleksije imaju za posljedicu deformaciju reflektiranog impulsa. Tipični oblici kvarova koji se sreću u praksi prikazani su slikom 10.8.



Sl. 10.8. - Neki tipični oblici kvarova

Također, na slici su prikazani i valni oblici reflektiranog impulsa koji su različiti u ovisnosti o karakteru kvara. Karakter prikazanih kvarova, kao i koeficijentata refleksije, mogu se interpretirati na slijedeći način:

- a) Vodljivi kvar:
$$\bar{r} = \frac{-\bar{Z}}{\bar{Z} - 2R}$$
- b) Kvar kapacitivne naravi:
$$\bar{r} = \frac{j\omega C\bar{Z}}{2 - j\omega C\bar{Z}}$$
- c) Mješoviti kvar:
$$\bar{r} = \frac{\bar{Z} - j\omega CR\bar{Z}}{\bar{Z} - 2R - j\omega CR\bar{Z}}$$

10.2. PRIGUŠENJE VODOVA

Očito je, kako u analizi impusnih metoda treba uzeti u obzir prigušenje koje bitno utječe na karakteristike vodova i koje je jako značajno u impulsnoj reflektometriji.

Radi prigušenja voda, amplituda progresivnog impulsa na putu do mjesta kvara opada s udaljenosti. Opadanje amplituda je eksponencijalno, te amplitudna karakteristika duž voda može se izraziti logaritamski iz relacije:

$$\alpha l_x = -20 \log \frac{U_x}{U_0}$$

gde su:

U_0 - napon na početku voda,

U_x - napon na udaljenosti l_x od početka voda,

α - koeficijent vlastitog prigušenja voda,

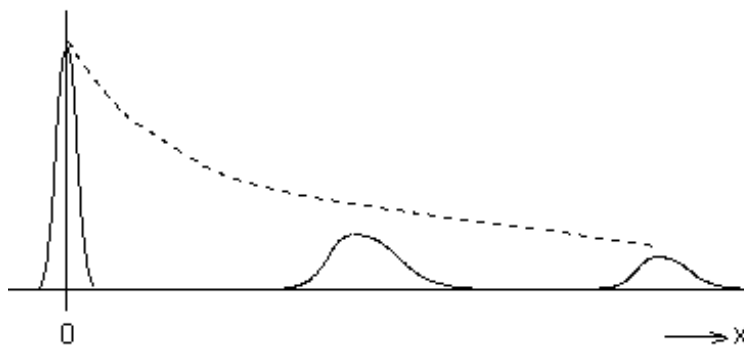
l_x - udaljenost od početka voda do mjesta x na vodu.

Iz jednadžbe se može definirati veličina napona na mjestu x duž voda:

$$U_x = U_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha l_x}{20}}$$

Veličina prigušenja voda određuju njegova konstrukcija i izbor vodiča i izolacijskog materijala. Prigušenje je ovisno i o frekvenciji, jer su vodljivost i dielektrična konstanta ovisni o frekvenciji. Razumljivo je da će visokofrekventni signali na vodu biti više prigušeni nego niskofrekventni signali. Kod telekomunikacijskih vodova može se uzeti da prigušenje približno raste sa kvadratnim korjenom iz frekvencije. Tako na primjer, za NF četvorku promjera 0,4 mm s polietilenskom izolacijom, koeficijent vlastitog prigušenja od vrijednosti 0,45 dB/km na 100 Hz naraste na 3,3 dB/km za frekvenciju 4 kHz.

Posljedica frekvencijske ovisnosti prigušenja voda je deformacija reflektiranog impulsa ne samo glede amplitude, već i strmine boka i njegova trajanja. Na primer, pravokutni impuls će s porastom dužine voda sve više dobivati zvonolik oblik. Ovo izobličavanje impulsa otežava nalaženje mjesta kvara na vodu, pa se prilikom mjerenja mora vaditi računa o izboru oblika i trajanja impulsa (sl 10.9.).



Sl. 10.9. - Širenje impulsa po vodu

10.3. IMPULSNI REFLEKTOMETAR

Impulsni reflektometar je instrument za određivanje udaljenosti do mesta kvara na telekomunikacijskim i enegetskim kabelima koji radi na principu refleksije progresivnog impulsa od mjesta kvara. Moderni instrumenti ove vrste imaju slijedeće osnovne sklopove:

- generator impulsa,
- osciloskop,
- točna vremenska baza,
- sklop za predaju i prijam impulsa s mogućnošću odgovarajućeg prilagođenja,
- sklop za proračunavanje udaljenosti od mjesta mjerenja do mjesta kvara,
- sklop za memoriju slike.

Na takav instrument može se priključiti pisar ili osobno računalo PC, kako bi se analizirali rezultati mjerenja i definiralo stanje u kabelu. Usporedbom rezultata omogućuje se detekcija svake promjene na karakteristikici, a takva promjena je pokazatelj početne faza kvara na određenom mjestu duž kabela. Pravovremenom intervencijom može se pruhitriti kvar koji bi mogao dovesti do potpunog prekida TT prometa.

Moderni impulsni reflektometri, čiji se princip rada temelji na tehnici uzimanja uzoraka (sampling), imaju i slijedeće prednosti:

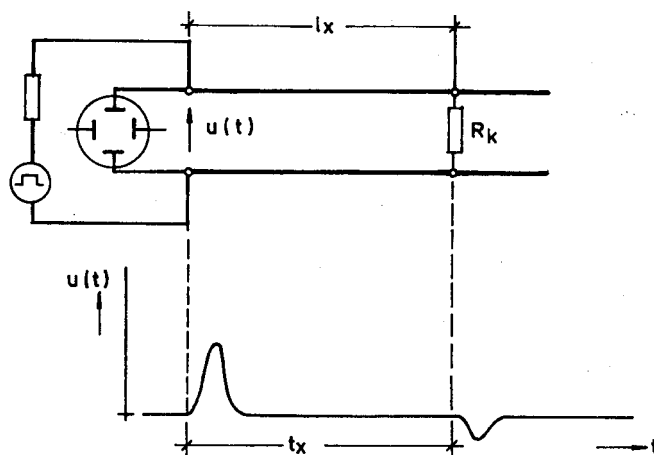
- udaljenost od početka voda do mjesta kvara pokazuje se digitalno u metrima,
- vrijeme prostiranja impulsa se direktno očitava na osciloskopskoj cijevi ili displayu,
- moguće je za određene vremenske intervale skokovito ili kontinualno pomicanje impulsa na pokazivaču do početka progresivnog impulsa
- standardizirani uzorci mogu se prenijeti, pohraniti i obraditi na osobnom računalu.

10.4. PRINCIP MJERENJA

Priključenjem instrumenta na mjerni kabel, na ekranu se pokazuje tijek prostiranja impulsa duž voda, a pritom reflektirani impulsi kasne u odnosu na progresivni impuls. Kašnjenje t_x je vrijeme koje je potrebno da impuls od početka voda dođe do mjesta kvara i vrati se na početak voda. Ako se udaljenost od početka voda do mjesta kvara označi s l_x , ukupni put koji je impuls prešao od početka

voda do mjesta kvara i natrag iznosi $2 l_x$ (sl. 10.10.). Uzimajući u obzir brzinu prostiranja impulsa, nepoznata udaljenost l_x od početka voda do mjesta kvara dobiva se iz jednadžbe:

$$2 l_x = v t_x$$



Sl. 10.10. - Princip mjerenja pomoću impulsnog reflektometra odakle je:

$$l_x = \frac{v}{2} t_x$$

gdje su:

l_x - udaljenost od početka voda do mjesta kvara,

v - brzina prostiranja elektromagnetskog vala (impulsa) duž voda.

Kao što je već navedeno, vrijeme t_x prostiranja impulsa može se direktno očitati na ekranu katodne cijevi impulsnog reflektometra ili LCD pokazivaču. Brzina prostiranja impulsa ovisi o primarnim parametrima voda, odnosno o vrsti izolacionog materijala vodiča, i ona iznosi:

$$v = \sqrt{\frac{c_0}{\epsilon_r}}$$

gde su:

c_0 - brzina svjetlosti u vakuumu (oko 300 000 km/s),

ϵ_r - relativna dielektrična konstanta izolacionog materijala vodiča voda.

Vrijednosti relativne dielektrične konstante najčešće upotrebljivanih materijala u kabelskoj industriji prikazani su u tablici 1.

Tablica 1.

Materijal	Relativna dielektrična konstanta
Pjenasti polietilen	1,5
Polivinilklorid	3,4-3,5
Poliamidne trake	6,0
Polietilenterafalatne trake	3,1-3,2

Podaci o brzini prostiranja za pojedine tipove kabela mogu se dobiti od proizvođača ili izmjeriti pomoću impulsnog reflektometra na poznatoj dužini kabela. U tablici 2. navedeni su podaci za $v/2$ izraženi u m/ μ s.

10.5. PRIMERI PRAKTIČNE PRIMJENE IMPULSNOG REFLEKTOMETRA U ODREĐIVANJU UDALJENOSTI DO MESTA KVARA

10.5.1. Brzina prostiranja $v/2$ je poznata

Od svih slučajeva koji se sreću u praksi - ovaj je najjednostavniji. Pretpostavlja se da je podatak o brzini prostiranja dobiven od proizvođača ili iz ranijih mjerenja. Vrijednost brzine prostiranja $v/2$ se podese na odgovarajućem numeratoru, a vrijeme t_x , mjereno od mjesta kvara do reflektiranog impulsa, očita na pokazivaču. Razmak od početka voda do mjesta kvara dobije se iz već poznate relacije:

$$l_x = \frac{v}{2} t_x$$

Kod impulsnih reflektometara koji imaju ugrađen sklop za proračun udaljenosti - mjerenje je znatno pojednostavljeno. Nakon postavljanja veličine $v/2$ na numeratoru, svjetla točka ili marker na reflektogramu se pomiče da podnožja reflektiranog impulsa i na digitalnom pokazivaču se dobije veličina l_x izražena u metrima.

Tablica 5.2.

Vrst kabela	Izolacija	$v/2$ (m/ μ s)
<i>Simetrični kabe</i>		
Pretplatnički kabe	papirno-zračna	~ 107
Pretplatnički kabe	plastična	~ 100
Pretplatnički kabe	puna plastična	~ 104
Međumjesni (VF)	papirno-zračna	~ 117
Međumjesni (VF)	plastična	~ 99
Instalacijski	PVC	~ 85
<i>Koaksijalni kabe</i>		
2,6/9,5		~ 141
1,2/4,4		~ 140
0,6/2,7	penasti PE	~ 120
kabel za kablsku televiziju	penasti PE	~ 124

10.5.2. Brzina prostiranja $v/2$ nije poznata, ali je na raspolaganju jedan neoštećen vodič

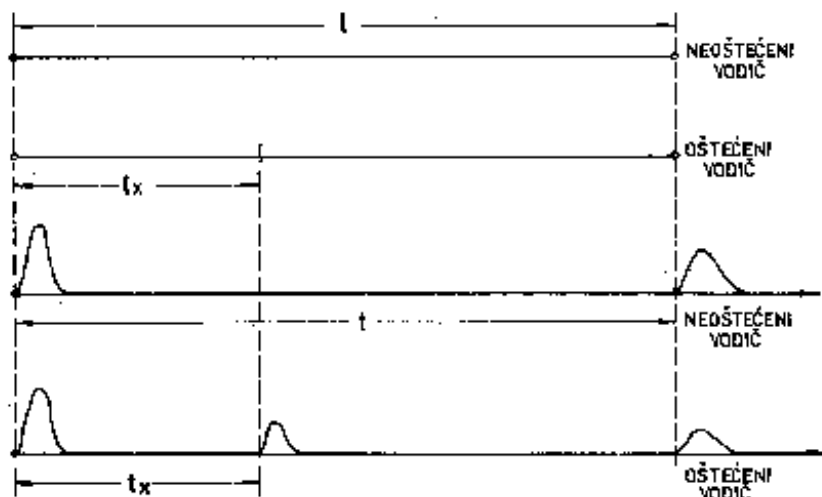
U ovom slučaju mora biti na raspolaganju poznata referentna veličina. To može biti dužina neoštećenog vodiča na mjerenom kabeu ili udaljenost do spojnice (koju jasno raspoznamo na reflektogramu). Ako udaljenost do poznate točke označimo sa l , a vrijeme prostiranja progresivnog impulsa do nje sa t , tada najprije mjerimo vrijeme t za koje se impuls reflektira od poznate točke, a zatim vrijeme t_x za koje se impuls reflektira od mjesta kvara. Sada možemo postaviti relaciju:

$$\frac{l}{t} = \frac{l_x}{t_x}$$

odakle je udaljenost do mjesta kvara:

$$l_x = \frac{l}{t} \cdot t_x$$

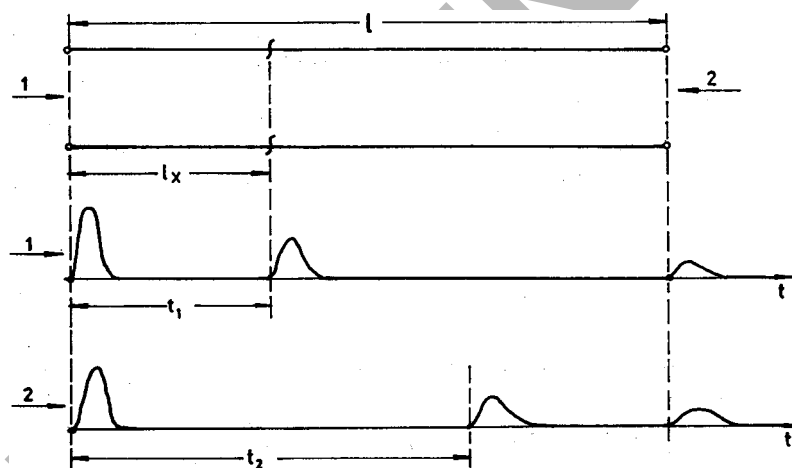
Kod impulsnih reflektometara s digitalnim pokazivanjem za pronalaženje udaljenosti do mjesta kvara pomiče se marker na reflektogramu do podnožja reflektiranog impulsa od poznate točke (kraja neoštećenog vodiča ili mjesta spojnice) i numerator se podešava sve dok se na digitalnom pokazivaču ne pokaže poznata dužina l . U tom trenutku imamo podatak za brzinu prostiranja $v/2$, koju možemo zapisati za kasnija mjerenja. Kada se na numeratoru dobije podatak za $v/2$, na instrument se priključuje neispravan vodič i marker na reflektogramu se pomiče do podnožja impulsa koji je reflektiran od mjesta kvara, a na digitalnom pokazivaču se dobije vrijednost l_x do mjesta kvara. Ovaj slučaj je prikazan na sl. 10.11.



Sl. 10.11 - Princip određivanja mjesta kvara kada je na raspolaganju jedan neoštećeni vodič

10.5.3. Brzina prostiranja $v/2$ nije poznata, ne raspolaže se neoštećenim vodičem, ali je poznata ukupna dužina voda l

Da bi se dobila nepoznata udaljenost l_x do mjesta kvara, u ovom slučaju je potrebno obaviti dva mjerenja i to s jednog i drugog kraja voda (sl. 10.12). Mjerenjem od početka voda (1) do mjesta kvara na uobičajeni način se određuje t_1 . Mjerenjem od kraja voda (2) do mjesta kvara određuje se t_2 .



Sl. 10.12. - Princip određivanja mjesta kvara kada se ne raspolaže neoštećenim vodičem

Nepoznata udaljenost l_x od početka voda do mjesta kvara dobiva se iz jednadžbe:

$$l_x = \frac{t_1}{t_1 - t_2} l$$

Kod impulsnog reflektometra sa digitalnim pokazivanjem udaljenosti do mjesta kvara - na numeratoru za $v/2$ postavi se vrednost od $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ i time se pojednostavi mjerenje vremena prostiranja impulsa. Tada veličina na digitalnom pokazivaču, podijeljena sa 100, daje vrijeme prostiranja u μs .

Kako su $t_1 \sim l_1$ i $t_2 \sim l_2$, tražena udaljenost l_x do mjesta kvara izračunava se iz relacije:

$$l_x = \frac{l}{l_1 - l_2} l_1$$

Brzina prostiranja impulsa iznosi:

$$v/2 = 100 \text{ m}/\mu\text{s} \frac{l}{l_1 - l_2}$$

10.5.4. Mjereni kabel se sastoji od više dionica sa različitim brzinama prostiranja,

Ovaj slučaj je ilustrativno prikazan na sl. 10.13. Nepoznata udaljenost od početka kabela do mjesta kvara dobije se mjerenjem na pojedinačnim dionicama, tako da je:

$$l_x = l_1 + l_2 + l_3 + \dots$$

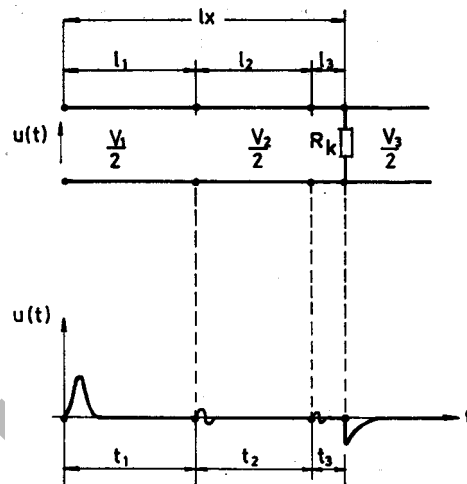
$$l_x = \frac{v_1}{2} t_1 + \frac{v_2}{2} t_2 + \frac{v_3}{2} t_3 + \dots$$

Mjerenje na pojedinačnim dionicama može se obaviti na dva načina:

- Mjerenje pojedinačnih dužina. Na numeratoru instrumenta se podesi poznata brzina prostiranja $v/2$ za odgovarajuću dionicu. Zatim se svjetla točka na reflektogramu pomiče do impulsa koji je reflektiran od spojnice i na digitalnom pokazivaču se očitava dužina l mjerene deonice.
- Mjerenje vremena prostiranja. Na numeratoru se podesi $v/2 = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$. Svjetla točka na reflektogramu se pomiče do impulsa koji je reflektiran od spojnice i na digitalnom pokazivaču se očitava dužina l dionice. Vrijeme prostiranja t je sada jednako:

$$t = \frac{l}{100 \text{ m}/\mu\text{s}}$$

Razumljivo je da se na poslednjoj dionici mjerenje obavlja od njenog početka do mjesta kvara.

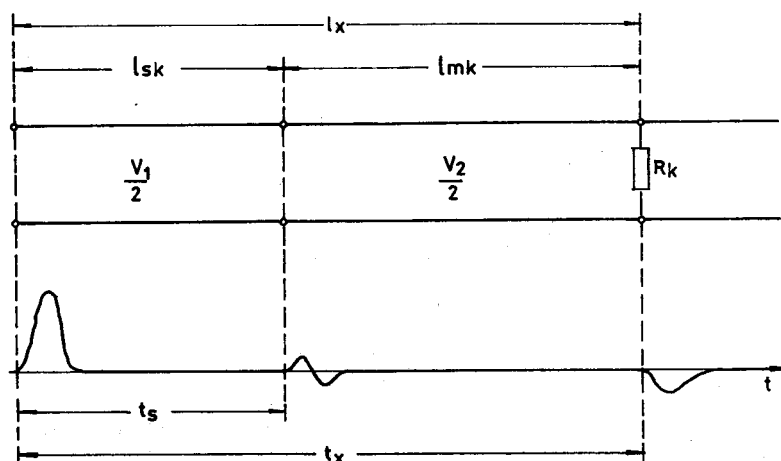


Sl. 10.13 - Princip određivanja mesta kvara kada se kabel sastoji od više dionica sa različitim brzinama prostiranja

10.5.5. Mjereni kabel je priključen na instrument preko spojnog kabela

Ovaj slučaj je prikazan na sl. 10.14. Brzine prostiranja impulsa spojnog kabela $v_1/2$ i merenog kabela $v_2/2$ su poznate.

Ovde se mora od ukupnog vremena prostiranja impulsa t_x oduzeti vrijeme prostiranja t_{sk} impulsa na spojnom kabeu. Vreme prostiranja impulsa t_{sk} na spojnom kabeu se dobija mjerenjem pri otvorenom ili kratko spojenom spojnom kabeu.



Sl. 10.14 - Princip mjerenja kada je impulsni reflektometar priključen na mereni kabel preko spojnog kabela

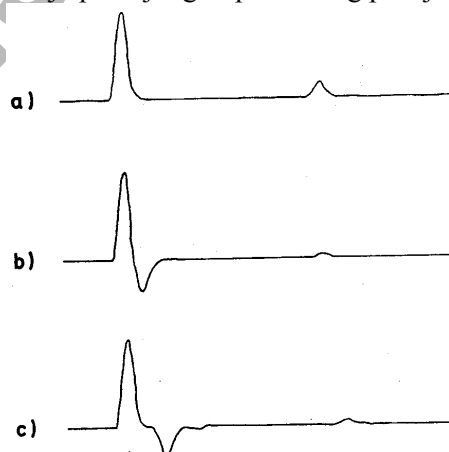
Ako se mjeri impulsnim reflektometrom koji digitalno pokazuje udaljenost do mjesta kvara, od ukupne dužine l_{uk} mora se oduzeti dužina spojnog kabela l_{sk} . Dužina spojnog kabela l_{sk} izračunava se mjerenjem na otvorenom ili kratko spojenom spojnom kabeu, pri čemu se na numeratoru podesi vrijednost $v/2$ voda koji se treba meriti.

10.5.6. Kvar se nalazi na početku mjerenog kabela

U ovakvim slučajevima dolaze u obzir samo kratkotrajni predajni impulsi, jer bi u suprotnom reflektirani impuls od mjesta kvara, koje se nalazi u neposrednoj blizini početka mjerenog voda, bio u području predajnog impulsa, a to bi znatno otežalo jasno određivanje položaja reflektiranog impulsa. Ukoliko ni ovo nije dovoljno, preporuča se priključak instrument na mjereni vod preko dovoljno dugog spojnog kabela, čime se povećava vrijeme kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa.

Povećanjem vremena kašnjenja postiže se da reflektirani impuls na reflektogramu dođe u područje izvan progresivnog impulsa. Prema gruboj procjeni, obzirom na različitost tipova spojnih kabela, može se reći da trajanju progresivnog impulsa od 10 ns odgovara 1 m spojnog kabela. Nakon priključivanja instrumenta preko spojnog kabela mjerenje se obavlja na već opisani način. Na sl. 10.15. prikazani su reflektogrami za ovaj slučaj mjerenja, gdje su:

- ispravan vodič,
- reflektirani impuls u području progresivnog impulsa,
- reflektirani impuls izvan područja predajnog impulsa zbog priključenja spojnog kabela.



Sl. 10.15 - Oblici impulsa u slučaju kada se kvar nalazi na početku mjerenog kabela

10.5.7. Diferencijalno mjerenje i uspoređivanje vodiča

U praksi se često dešava da reflektirani impulsi od spojnih mjesta (na primjer - od lemnog spoja ili spojne letvice) »maskiraju« reflektirane impulse od mjesta kvara s malim prelaznim otporom. Tada je

vrlo teško prepoznati reflektirani impuls, odnosno točka njegovog položaja više se ne može točno odrediti.

U ovakvim slučajevima se preporuča diferencijalna metoda. Za primjenu ove metode, korišteni impulsni reflektometar imati odgovarajući sklop za diferencijalno mjerenje ili memoriju slike.

U ovisnosti o tipu impulsnog reflektometra, kod ove metode predajni impulsi se šalju istovremeno, izmjenično ili jedan za drugim - na neispravan i ispravan vodič istog voda. Na ekranu se dobije diferencijalni prikaz obje slike impulsa. Kad se isti dijelovi karakteristike reflektiranih impulsa oba vodiča prostorno razdvoje, može se jasnije raspoznati reflektirani impuls na mjestu kvara. Sve faze ove mjerne metode prikazane su na sl. 10.16, gdje su:

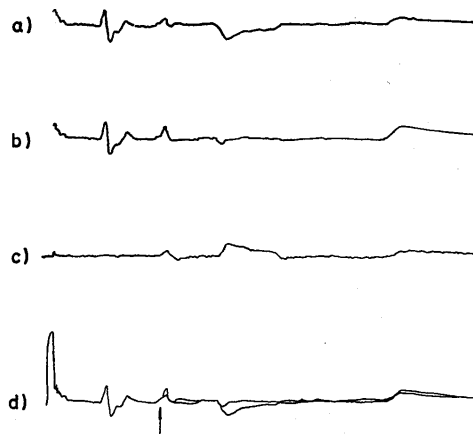
a - ispravan vodič,

b - neispravan vodič, reflektirani impuls od mjesta kvara u području reflektiranog impulsa spojnice,

c - diferencijalno mjerenje,

d - reflektogrami neispravnog i ispravnog vodiča ispisani pisačem jedan preko drugog.

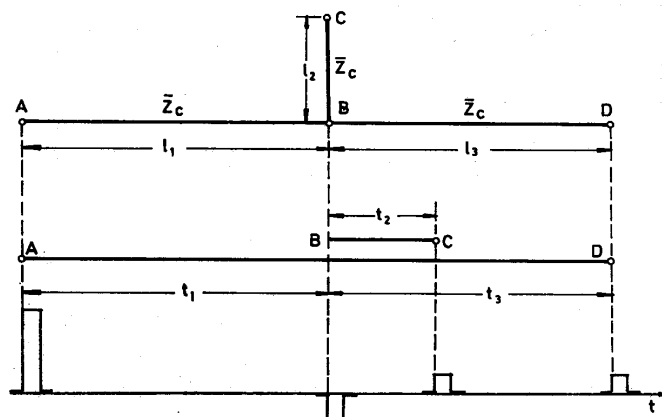
Ukoliko impulsni reflektometar nema ulazni sklop za diferencijalno mjerenje, ali ima mogućnost usporedbe vodiča ili ima izlaz za priključivanje pisača - također se može identificirati reflektirani impuls od mjesta kvara komparacijom tijekom mjerenja.



Sl.10.16. Oblici impulsa kod metode usporedbe vodiča

10.5.8. Mjerenje kvarova u razgranatim mrežama

U razgranatim mrežama mjesta grananja uzrokom su mnoštva primarnih i sekundarnih refleksija, pa je zato primjena impulsnih reflektometara za mjerenje udaljenosti do mjesta kvara izuzetno teška. I najjednostavniji slučaj (samo sa jednim grananjem) dovodi do nedovoljno pregledanih reflektograma. Na sl. 10.17 je prikazan slučaj jednog grananja.



Sl. 10.17. - Primer grananja mreže

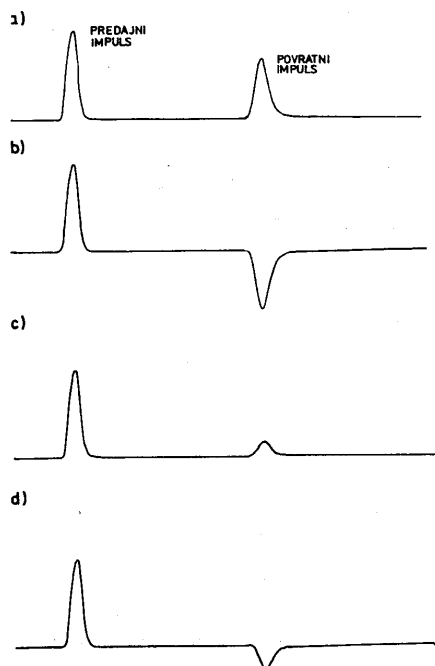
Za sada nije moguće generalno preporučiti određenu metodu mjerenja. Izlaz u ovakvim situacijama se nalazi u izmjeničnom otvaranju i kratkom spajanju krajeva vodova, mjerenjima pomoću impulsa različitog trajanja, ili u uspoređivanju reflektograma iz ranijih mjerenja radi donošenja iskustvenih

zaključaka. Jako je važno da unutrašnji otpor impulsnog reflektometra bude prilagođen karakterističnoj impedanciji ispitivanog voda - kako već u točki priključivanja instrumenta ne bi došlo do sekundarnih refleksija. Na žalost, u praksi nije moguće da se krajevi voda uvijek zatvore karakterističnom impedancijom.

10.6. PROBLEMATIKA MJERENJA IMPULSNIM REFLEKTOMETROM

10.6.1. Interpretacija reflektograma

Na sl. 10.18 je prikazano nekoliko karakterističnih reflektograma koji su dobiveni na energetskom kabelu. Mjerenje je obavljeno pomoću impulsnog reflektometra s pisačem. Pojedinačni analizirani slučajevi mogu da se interpretiraju na slijedeći način:



Sl. 10.18. - Oblici impulsa u nekim karakterističnim slučajevima

a - prekid, vod otvoren na kraju,

b - kratak spoj,

c - spojni kvar s $R_k > Z_c$, na primjer - prijelaz na kabel s većom karakterističnom impedancijom, povećanim otporom vodiča i sl.,

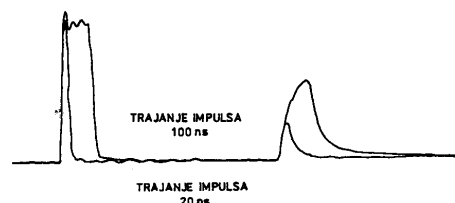
d - spojni kvar s $R_k < Z_c$, na primjer - prijelazi na kabel s manjom karakterističnom impedancijom ili kratki spoj s velikim prelaznim otporom,

e - reflektirani impulsi od spojnice,

f - oblici reflektiranih impulsa u ovisnosti o vremenu trajanja predajnih impulsa.



f)



Sl. 10.18. - Oblici impulsa u nekim karakterističnim slučajevima

Radi potpunijeg pregleda najkarakterističnijih reflektograma, na sl. 10.19. su prikazane moguće situacije na jednom segmentu simetričnog telekomunikacionog kabela.

10.6.2. Oblik i trajanje impulsa

Na trajanje impulsa utječu dva značajna čimbenika koji pri određivanju udaljenosti od mjesta kvara impulsnim reflektorom trebaju biti zadovoljeni:

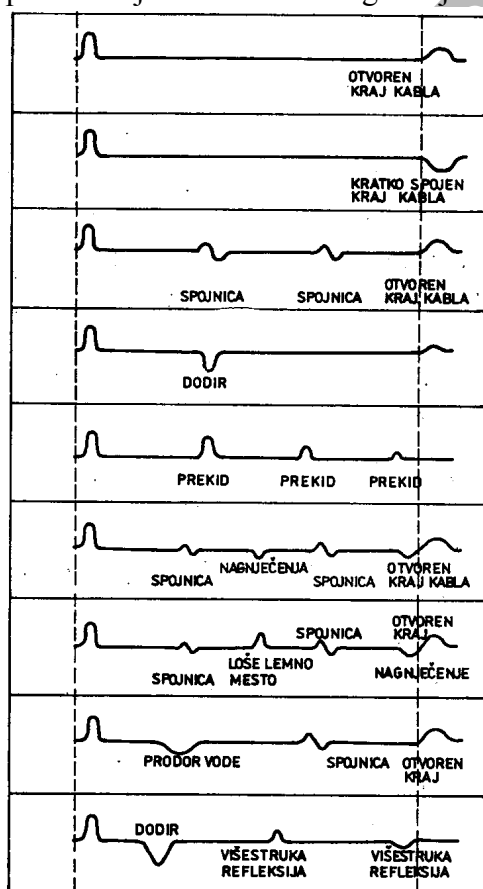
- sposobnost prepoznavanja, tj. najmanje udaljenosti između dva mjesta kvara, pri kome njihovi reflektirani impulsi još se uvijek mogu odvojeno prepoznati,
- domet, tj. najveća udaljenost pri kojem se reflektirani impuls još uvek može pouzdano prepoznati.

Sposobnost prepoznavanja kvarova na vodu bez gubitaka, neovisno o udaljenosti od početka voda, toliko je veća koliko je impuls kraćeg trajanja. Međutim, domet bi na vodu bez gubitaka, nezavisno o trajanju impulsa, bio proizvoljno velik.

Frekvencijska ovisnost prigušenja voda utječe na to da se impuls, s porastom udaljenosti od početka voda, izobličava, da se strmina bokova smanjuje, širina impulsa povećava, a amplituda opada. Na sl. 10.20 je prikazan reflektogram mjerenja na vodu dužine 200 m, kod kojeg je progresivni impuls potpuno reflektiran. Mjerenje je obavljeno s različitim trajanjem impulsa.

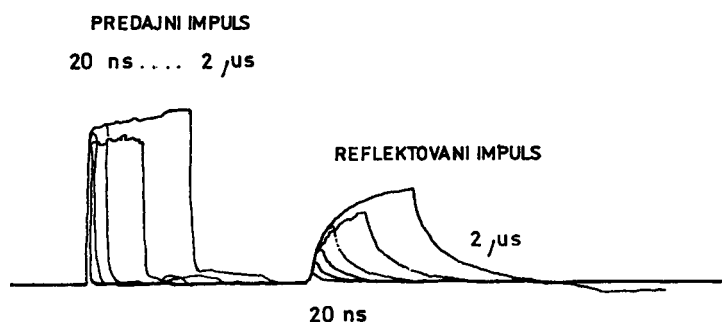
Radi preglednije usporedbe, rezultati mjerenja su pomoću pisaa prikazani na istom mestu, a na sl. 10.20 rezultati mjerenja na istom vodu prikazani su odvojeno. Očevidno je da trajanje i širina impulsa treba pogodnim izborom prilagoditi datim okolnostima (vrst kabela, dužina i dr.).

Pošto se zbog prijenosnih karakteristika kabela (naročito zbog prigušenja) pri merenju velikih dužina impulsi više deformiraju, a to znači da se širina spektra s porastom dužine više ograničava - preporuča se se u ovim slučajevima koristiti širi impuls s uskim spektrom, jer se on na putu do mjesta kvara i natrag manje deformira.



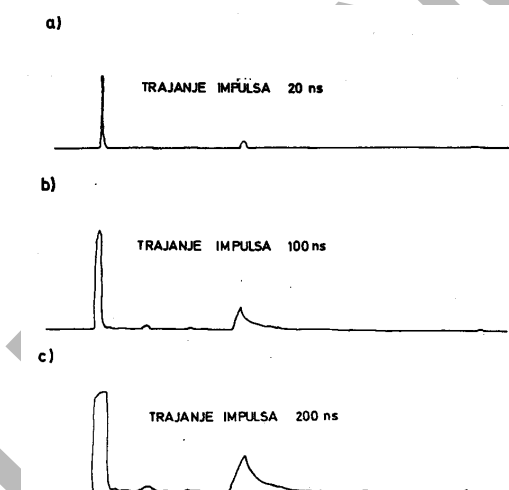
Sl. 10.19. - Primjeri mogućih kvarova na jednom segmentu simetričnog telekomunikacijskog kabela

Pravkutni impuls se s porastom udaljenosti više deformira, jer zbog prigušenja voda njihove visokofrekventne komponente budu jako prigušene. Impulsi oblika \cos^2 se s porastom udaljenosti, naprotiv, manje deformiraju, jer oni skoro ne sadrže visokofrekventne komponente na koje bi prigušenje imalo veći utjecaj.



Sl. 10.20. - Oblici impulsa u ovisnosti o vremenu trajanja progresivnog impulsa

S druge strane, sposobnost razlučivanja i prepoznavanja kvarova sa malim prijelaznom otporom bolja je kod pravokutnih impulsa - (zbog njihovih visokofrekventnih komponenata) nego kod impulsa \cos^2 , uz uvjet da su obje vrste impulsa istog trajanja. S porastom udaljenosti ova prednost pravokutnih impulsa postepeno se gubi.



Sl. 10.21. - Oblici impulsa različitog vremena trajanja koji su registrirani pomoću pisača

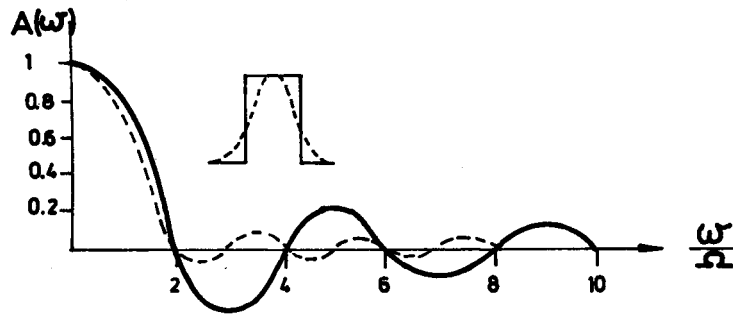
Na sl. 10.22 je prikazana usporedba pravokutnog i \cos^2 impulsa, a na sl. 10.23. je još jedna ilustracija, gde su:

- a - oblik progresivnog impulsa na početku voda,
- b - oblik reflektiranog impulsa..

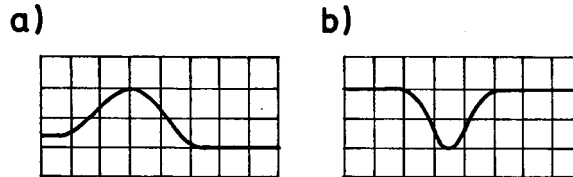
Mjerenje je obavljeno na dužini od 600 m, a kvar je bio realnog karaktera.

Kod nepupiniziranih simetričnih kabela u pretplatničkom mrežama, problem mjerenja isti kao u razgranatim mrežama, a mjerenja na koaksijalnim kabelima je relativno jednostavnije, jer nema grananja, a dužine su ograničene zbog velikog prigušenja.

Za mjerenje na kabelima s ograničenom širinom frekventijskog opsega, na primjer - za mjerenje na pupiniziranim kabelima, odgovaraju specijalni oblici impulsa s ograničenim spektrom, jer pupinizirani kabeli imaju malo prigušenje na svim frekvencijama ispod granične frekvencije. Spomenute uvjete zadovoljavaju trokutasti i zvonoliki impulsi. Međutim, najveći uspjeh se postiže pomoću impulsa koji se sastoje od jednog jedinog sinusnog vala, koji se tako bira da njegova frekvencija bude jednaka polovici granične frekvencije kabela. Ukoliko je granična frekvencija kabela $f_{gk} = 8$ kHz, frekvencija sinusoidalnog impulsa treba biti $f_{si} = 4$ kHz.



Sl. 10.22. - Usporedba pravokutnog i \cos^2 impulsa



Sl. 10.23. - Primjer oblika progresivnog i reflektiranog impulsa

Kod podmorskih koaksijalnih kabela pojačala se napajaju preko filtera čije su granične frekvencije približno iste kao i za pupinizirane vodove. Ako se oblik sinusoidalnog impulsa prilagodi spomenutim filterima, može se na isti način (kao i kod pupiniziranih kabela) mjerenjem utvrditi na kojoj pojačavačkoj ili regeneratorskoj dionici je kvar. Dobri rezultati mogu se, također, postići s jednim sinusoidalnim impulsom i pri mjerenju na podzemnim koaksijalnim kabelima i za mjerenja na kabelima za PCM sisteme.

10.6.3. Granice primjene impulsne reflektometrije

Poznato je da kvarovi s velikim prelaznim otporom predstavljaju značajan problem u impulsnoj reflektometriji. Izuzetak je kvar zbog prodiranja vlage. Iako najčešće ima prijelazni otpor oko 100 k Ω , ovaj kvar može još se uvijek meriti pomoću impulsnog reflektometra. Razlog ovome je činjenica da voda koja je prodrla u kabel, znatno utječe na promjenu relativne dielektrične konstante, koja je uzrokom odgovarajućih promjena primarnih parametara, a time i promjene karakteristične impedancije. Treba spomenuti da u ovom specifičnom slučaju može odrediti početak i kraj segmenta kabela koji je zahvaćen vodom, ali ne i samo mjesto oštećenja (npr. nehermetičnost plašta kabela).

Kod kvarova sa velikim prijelaznim otporom, primjenom uređaja za propaljivanje može se postići mali prelazni otpor, ali je ovaj postupak dozvoljen samo na energetskim kabelima uz priključivanje energetskih razdvojnih filtera - zbog zaštite impulsnog reflektometra od generatora visokog napona.

Izuzetno, kod telekomunikacijskih kabela sa papirno-zračnom izolacijom, u slučaju prodora vlage kvar s velikim prijelaznim otporom može se prabaciti u kvar sa malim prelaznim otporom. U ovom slučaju prisutna voda, sa sadržajem raznih minerala, predstavlja elektrolit, a vodiči kabela su elektrode, tako da na mjestu kvara imamo bateriju. Priključivanjem dodatnog izvora istosmjernog napona, koji za impulse ima veliki otpor, može se postići da mjesto kvara ima mali prelazni otpor. Ovo se postiže na taj način da se mijenja polaritet izvora istosmjernog napona. Ovom promjenom mijenja se i polaritet struje koja teče u farmiranoj bateriji, što dovodi do smanjenja prelaznog otpora na mjestu kvara.

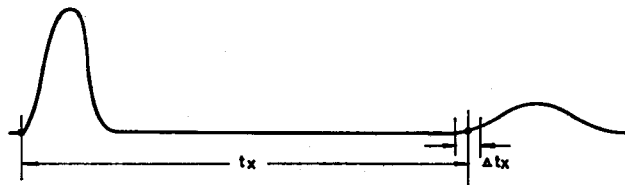
Na kraju treba ukazati kako su i brzina prostiranja, kao i vrijeme kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa, podložni utjecaju, zbog čega se javlja relativna pogreška prilikom određivanja udaljenosti do mjesta kvara. Relativna pogreška udaljenosti do mjesta kvara jednaka je zbroju relativnih pogrešaka brzine prostiranja i vremena kašnjenja:

$$\frac{\Delta l_x}{l} = \frac{\Delta \left(\frac{v}{2} \right)}{\left(\frac{v}{2} \right)} + \frac{\Delta t_x}{t}$$

Podatke o brzini prostiranja za različite tipove kabela, koji se dobiju od proizvođača kabela, treba prihvatiti kao orijentacijske vrijednosti, jer su moguća odstupanja za nekoliko postotaka. Ovo se ne može izbjeći, jer različiti procesi proizvodnje, kao i broj vodiča, utječu da se dielektrična konstanta izolacijskih materijala znatno mijenja. Također mogu se uočiti razlike u rezultatima mjerenja brzine prostiranja na poznataj dužini višeparičnog kabla kod vodiča u centralnom dijelu - i vodiča u perifernom dijelu kabela. Razlog za ovo su različite dužine vodiča uslijed použavanja. Najtočniji rezultati se dobivaju kada se mjerenje obavlja na točno poznatoj dužini. Preporuča se da se za poznate tipove kabela formiraju korekcijski dijagrami ili tablice (korekcije bi se odnosile na dužinu kabla), ili da se ove korekcije unesu u plan mreže.

Glede vremena kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa, ono se mora mjeriti (zbog izobličnog boka reflektiranog impulsa) od podnožja progresivnog impulsa do podnožja reflektiranog impulsa (sl.10.24.).

Rezultujuća pogreška u mjerenju vremena kašnjenja se sastoji od pogreške koju unosi sam instrument i pogreške određivanja točke podnožja reflektiranog impulsa. Suvremeni elektronički sustavi za mjerenje vremena, koji su ugrađeni u moderne impulsne reflektometre, čine sasvim neznatnu pogrešku, tako da se ona može zanemariti. Ostaje, prema tomu, pogreška u određivanju točke podnožja reflektiranog impulsa, ali temeljem navedenih postupaka moguće je da se i ona znatno smanji.



Sl. 10.24. - Vrijeme kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa

10.6.4. Zaključak

Temeljem prethodno izloženog može se zaključiti slijedeće:

- Područje primjene, odnosno mogući domet - ograničavaju mjesta kvara sa velikim i malim prelaznim otporom (zbog nehomogenosti na vodu), a time ograničavaju i prepoznavanje reflektiranih impulsa.
- Drugi čimbenik koji utječe na domet - frekvencijska ovisnost prigušenja na vodu. Jako prigušenje visokofrekventne komponente predajnog impulsa ne mogu se odgovarajućim pojačanjem reproducirati, pošto su one na razini šuma ili ispod razine šuma.
- Vrijeme prostiranja, također unosi pogrešku, što se odražava na točnost analize reflektiranog impulsa. Prosječna pogreška pri vremenu prostiranja (osim kod koaksijalnih kabela) može se kretati i do $\pm 5\%$. Vrijeme prostiranja, na primjer, zbog različite boje izolacije vodiča, a time i različite vrijednosti ϵ , može se razlikovati od jednog do drugog vodiča čak i više od $\pm 1\%$.
- Nedostatak visokofrekventnih komponenti u podnožju reflektiranog impulsa također otežava analizu i donošenje zaključaka o udaljenosti do mjesta kvara.

Ukupna pogreška u određivanju vremena prostiranja i točke podnožja reflektiranog impulsa, uz određene mjere korekcije, prosječno iznosi $< 2\%$, dok kod mjerenja na koaksijalnim kablama i četvorkama za rad u visokofrekventnom području treba očekivati pogrešku $< 5\%$.

Treba napomenuti da prethodna analiza ne bi trebala umanjiti značaj mjernih metoda pomoću impulsnog reflektometra. Naprotiv, upravo impulсни reflektometar, u kombinaciji sa mjernim mostom i tragačem kabela, pomaže brzom i preciznom određivanju udaljenosti do mjesta kvara.

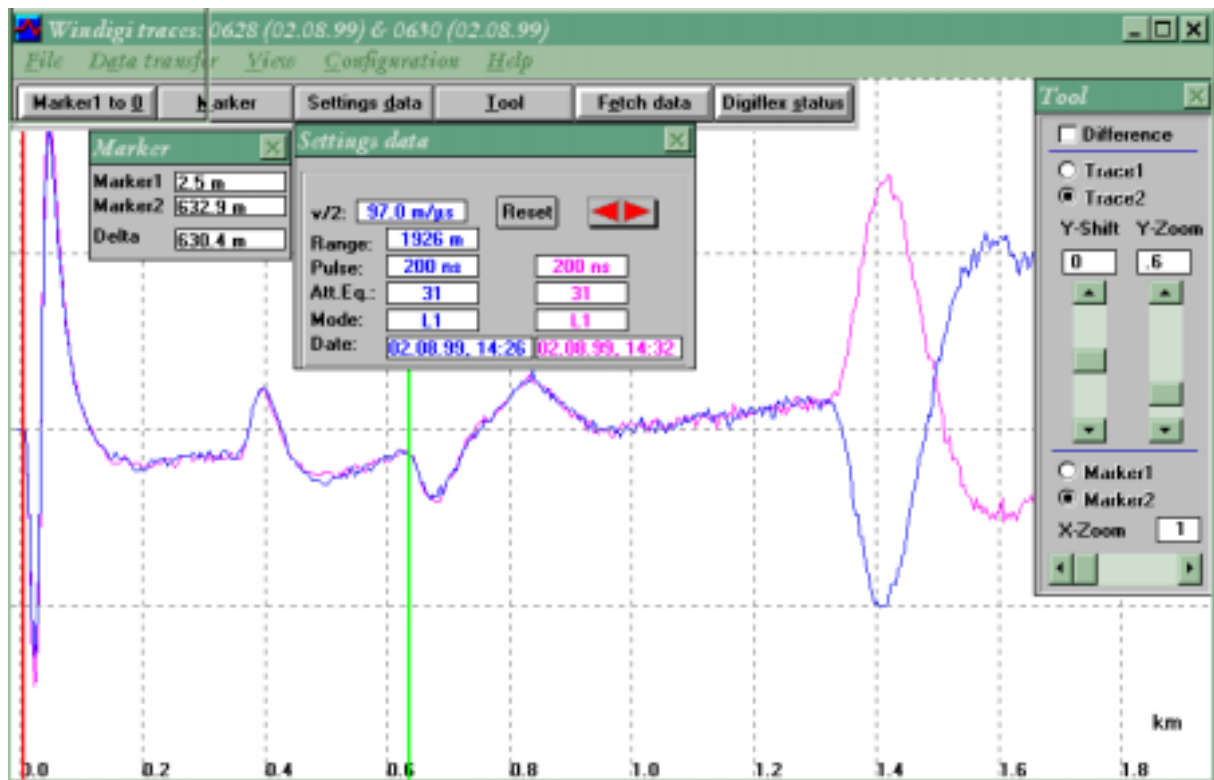


Sl. 10.25. Razni tipovi TDR reflektometara

Na sljedećim slikama dati su prikazi različitih softvera u Windows okruženju.



Sl. 10.26. Software Waveview



Sl. 10.27. Software Windigi