

7. Metode ispitivanja karakteristika optičkih vlakana i kablova

7.1 Uvod

Merenje karakteristika optičkih vlakana je od višestruke koristi proizvođačima (koje interesuju tehnološki i mehanički problemi pri proizvodnji optičkih vlakana i kablova), korisnicima (koje zanima maksimalno iskorišćenje prenosa po optičkom vlaknu) i sistem inženjerima (koji projektuju optičke prenosne sisteme). Pri merenju prenosnih osobina optičkih vlakana i kablova veoma je važna mogućnost otkrivanja mesta oštećenja ili prekida optičkog vlakna.

Prema IEC-u, karakteristike optičkih vlakana i kablova koje se mere podeljene su u četiri osnovne grupe:

1. Prenosne i optičke karakteristike
 - slabljenje
 - širina propusnog opsega
 - disperzija impulsa
 - granična talasna dužina
 - nulta talasna dužina
 - profil indeksa prelamanja
 - numerički otvor (apertura)
2. Geometrijske karakteristike
 - dimenzija jezgra i omotača
 - nekoncentričnost jezgra i omotača
 - eliptičnost
 - geometrijske karakteristike pojedinih komponenti kabla (spoljašnji prečnik optičke žile, centralnog rasteretnog elementa, jezgra kabla, i kabla, kao i debljina cevčice sekundarne zaštite i plašta, itd.)
3. Mehaničke karakteristike
 - promena slabljenja optičkog vlakna pod dejstvom sile izduženja
 - otpornost optičkog kabla na udar, savijanje, pritisak i uvijanje
4. Otpornost na uticaj okoline
 - promena slabljenja zbog promene klimatskih uslova
 - promena slabljenja usled delovanja energetskog polja i nuklearnog zračenja
 - propustljivost vode kod optičkog kabla i slično.

Na kratkom rastojanju od mesta prodora svetlosti u optičko vlakno promena njegove prenosne karakteristike (slabljenje, disperzija) je nelinearna funkcija rastojanja zbog širine ulaznog impulsa, opadanja svetlosne snage po eksponencijalnom zakonu i razmene energije između modova. To je tzv. prelazni režim. Kada se uspostavi "stacionarno stanje", odnosno linearna zavisnost prenosnih karakteristika od dužine, onda se može govoriti o definisanosti parametara dugih transmisionih linija, na koje ne utiču uslovi prodora svetlosnog zraka u jezgro optičkog vlakna.

Multimodna vlakna podržavaju veliki broj prostirućih modova (disperziju zraka), ali se na kraćim rastojanjima javljaju i «cureći» modovi koji remete tačnost merenja. «Cureća disperzija» je posledica prostiranja svetlosnog snopa u mnogo pravaca. Kako se laserski snop udaljava od izvora, fotoni koji se prostiru pod prevelikim uglom nestaju usled

refleksije i curenja na granicama optičkog vlakna, tako da su na većim rasrojanjima ovi «modovi» u potpunosti eliminisani. Kako bi se na što kraćem rastojanju postiglo "stacionarno stanje" koristi se "mešač" modova, odnosno vrši se pritiskanje optičkog vlakna na hrapavu površinu, ili se ono savija oko nekog profila određenog prečnika. Ovo savijanje ne treba mešati sa savijanjem optičkog vlakna pod kritičnim uglom koje se sprovodi radi namernog izbijanja fotona iz njega i grubih očitavanja parametara svetlosnog snopa.

Prenosne osobine optičkog kabla zavise od prenosnih osobina ugrađenih optičkih vlakana i tehnologije kabliranja. Pri merenju karakteristika optičkog kabla, uvek se dolazi do golog vlakna, i koriste se metode merenja koje se ni malo ne razlikuju od onih korišćenih za ispitivanje osobina samog optičkog vlakna.

Kabliranje predstavlja proces nanošenja zaštitnih omotača na jedno ili više optičkih vlakana sa primarnom zaštitom, kako bi se ona zaštitila od delovanja spoljnih faktora (mehaničkih, hemijskih i drugih uticaja). Na taj način se utiče na zadnje dve grupe karakteristika po IEC-u.

7.2 Prenosne i optičke karakteristike

7.2.1 Merenje slabljenja optičkog vlakna

Slabljenje svetlosne snage u optičkom vlaknu rezultat je apsorpcije, rasejanja i efekata talasovoda. Pri merenju ukupnih gubitaka prenosa signala kroz vlakno koriste se dve osnovne metode:

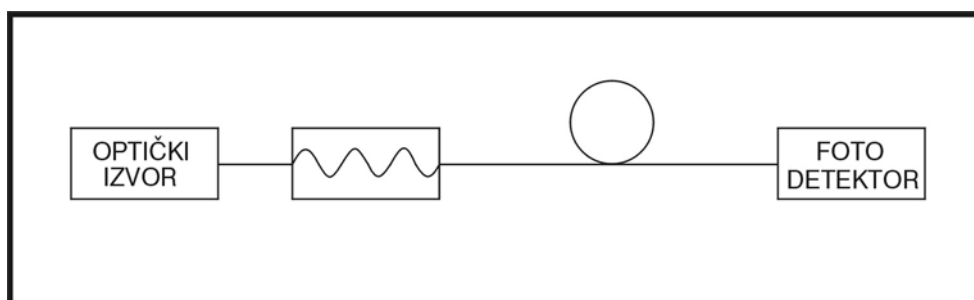
- Tehnika odsecanja (cutback technique) - najranije korišćen metod, koji se zasniva na upoređivanju izmerene svetlosne snage na maloj i velikoj dužini, pri istim uslovima ulaska svetlosnog zraka u optičko vlakno.
- Metoda povratnog rasejanja – povratno rasejanje je osobina optičkog vlakna čiji je princip koji je korišćen kod optičkog reflektometra u vremenskom domenu.

7.2.1.1 Merenje slabljenja tehnikom odsecanja

Ovo je destruktivna tehnika koja zahteva pristup na oba kraja optičkog vlakna, a sam proces merenja sastoji se iz dva merenja svetlosne snage.

Prvo se meri snaga na daljem kraju optičkog vlakna, a onda se bez ikakve promene na ulaznom kraju preseca vlakno na nekoliko metara od izvora, i ponovo se meri snaga.

Slika 7.1 Blok šema uređaja za merenje metodom odsecanja



Srednje slabljenje optičkog vlakna se izračunava prema izrazu:

$$a = (10/L) \log P_b/P_d \quad (\text{dB/km})$$

gde su P_d i P_b izmerene optičke snage na daljem i bliže odsečenom kraju optičkog vlakna, respektivno, a L - geometrijsko rastojanje između mernih tačaka.

Pridržavanje redosleda radnji kod primene ove metode veoma je bitno, kako bi se odredila tačna količina energije uneta u optičko vlakno. Takođe je veoma važno očuvanje istih uslova imisije svetlosnog zraka u optičko vlakno, jer to može uticati na vrednost izmerenog slabljenja.

Vrednosti slabljenja mogu se ekstrapolirati jedino za optička vlakna u stanju uravnoteženja, koje se postiže ili metodom kontrolisanja numeričkog otvora izvora, i veličine zraka, ili primenom "mešača" modova. U slučaju da je indeks prelamanja primarne zaštite manji od indeksa prelamanja omotača, "mešač" modova se koristi i na početku i na kraju optičkog vlakna.

7.2.1.2 Metoda unesenih gubitaka

Kod ove metode se najpre meri svetlosna snaga P_1 , na izlazu iz kratkog referentnog vlakna kojim su povezani optički izvor i merni uređaj. Posle toga sa na referentno vlakno, preko konektora, veže ispitivano vlakno i meri njegoa izlazna snaga P_2 . Slabljenje se izračunava prema izrazu:

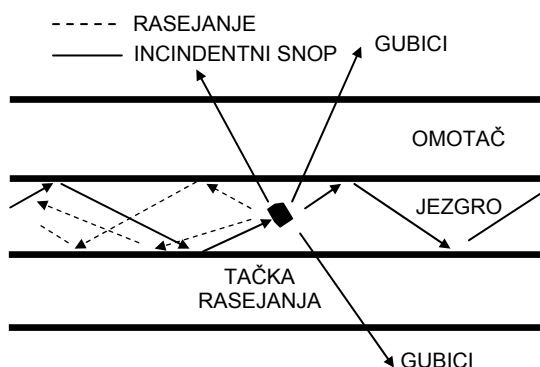
$$a = 10 \log P_1/P_2 \quad (\text{dB})$$

Rezultati se moraju korigovati za vrednost gubitaka na konektorima.

7.2.1.3 Metoda povratnog rasejanja

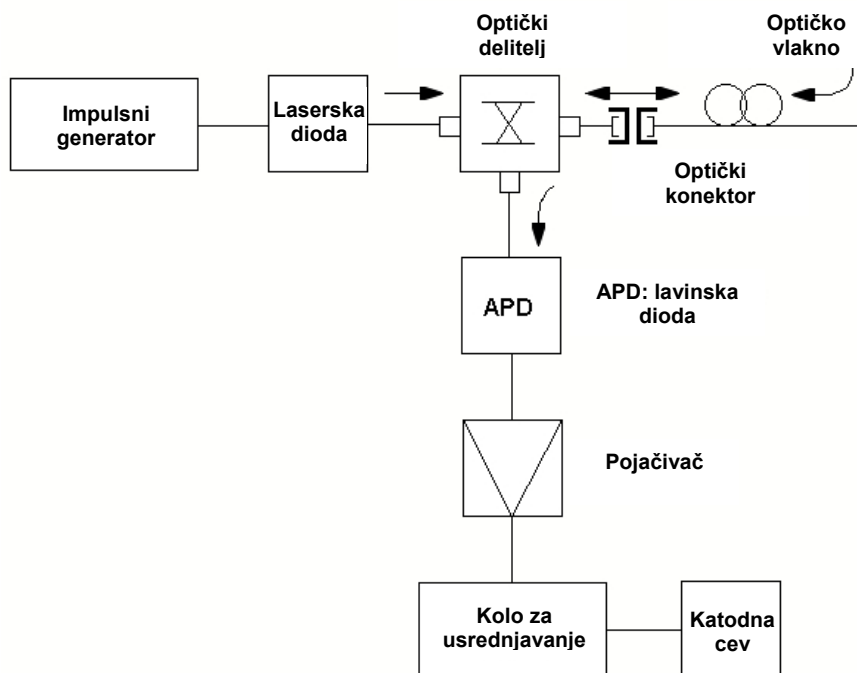
Ovo je nedestruktivna metoda, kojoj je dovoljan pristup samo jednom kraju optičkog vlakna. Jedino ovom metodom se mogu pratiti promene slabljenja duž celog vlakna, kao i njegovo eventualno oštećenje, jer je optički reflektometar u vremenskom domenu (OTDR) u osnovi optički radar.

Slika 7.2 Princip povratnog rasejanja



Izvor svetlosnog zraka je poluprovodnički laser velike snage koji periodično šalje impulse u jezgro optičkog vlakna, a njegov zrak usmerava se sistemom sočiva i polupropustljivim ogledalom (eng. beam splitter). Kao detektor povratnog svetlosnog signala koristi se lavinska foto-dioda (APD), čiji se izlazni signal pojačava pre dovođenja na ekran mernog uređaja. Da bi se obezbedio što bolji odnos signal/šum vrednosti povratnog svetlosnog signala se usrednjavaju.

Slika 7.3 Blok šema OTDR-a



7.2.1.3.1

Karakteristike i osobine optičkih reflektometara u vremenskom domenu

Optički reflektometar u vremenskom domenu je postao osnovni merni instrument svima koji se bave proizvodnjom i postavljanjem optičkih kablova, kao i onima koji se bave održavanjem optičkih linija.

U reflektometru, generator impulsa kontroliše rad optičkog izvora, obično je to poluprovodnički laser, koji je modulisan frekvencijom od nekoliko kHz-a (viša frekvencija – kraća dužina koja se meri), i to se zove vreme ponavljanja ubacivanja laserskog impulsa. Optički izvor imituje optički impuls u vlakno, snage od 1mW pa na više, do 1 W, dok je dužina trajanja impulsa od 3ns do 10 ms.

Dužina trajanja laserskog impulsa definiše snagu signala, upravo proporcionalno. U ovom slučaju postoji fizičko ograničenje u korišćenoj snazi, jer može doći do zasićenja prijemne diode. Korišćenje snage velikog intenziteta može izazvati pojavu fenomena nelinearnosti. Vreme ponavljanja emisije laserskog impulsa se odabira tako da omogućuje adekvatno merenje dužine.

Usmeravanje laserskog zraka koji se imituje u jezgro optičkog vlakna se vrši sistemom sočiva i preko Y-kaplera, odnosno preko razdelnika svetlosnog zraka. Povratni signal se odvaja od emitovanog signala direkcionalnim kaplerom.

Direkcionni kapler se može izvesti na dva načina:

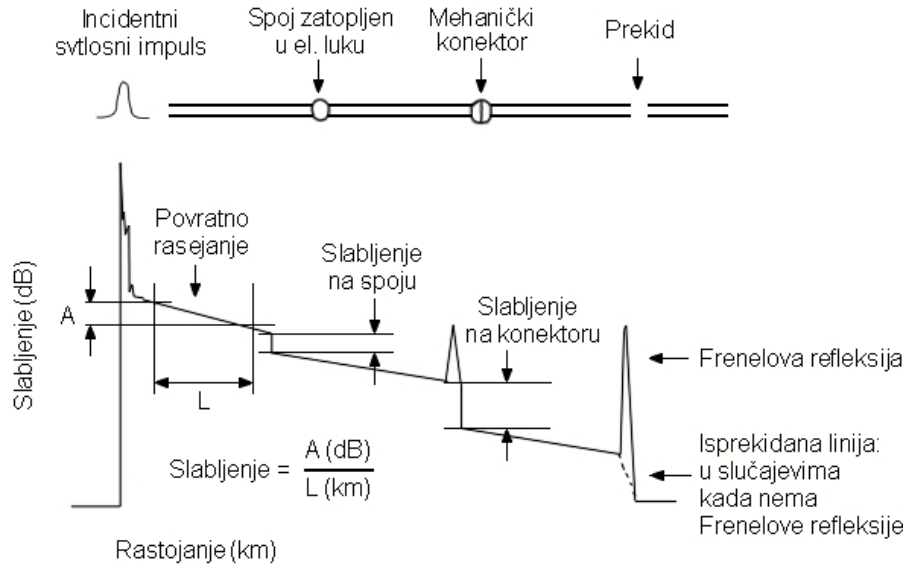
- Kapler jednake raspodele polja – veliki nivo izolacije, čak do 50 dB. Izvodi se tako što se optičko vlakno preseče pod uglom od 45° i na njega se postavi delimično reflektivni sloj, zatim se presečeni krajevi ponovo spoje, a na njihov spoj se pod pravim uglom spaja treće optičko vlakno.
- Razdelnik zraka sa polarizatorskim dejstvom – većina razdelnika zraka zavisi od stanja polarizacije upadnog talasa, ova pojava se koristi u OTDR-u kod deljenja nepolarisanog signala rasejanja od polarisanog reflektovanog zraka na bližem kraju optičkog vlakna.

Kao detektor svetlosti najčešće se koristi lavinska foto-dioda. Primljeni signal se prosleđuje u pojačavač i deo za digitalizaciju. Potom se signal prosleđuje u jedinicu koja vrši akviziciju i usrednjavanje, odnosno postiže određeni odnos signal/šum. Ovo se postiže repetitivnim uzorkovanjem signala u fiksnom vremenskom razmaku, počevši od nultog trenutka. Aritmetičko usrednjavanje uzoraka je generisano nisko-propusnim filterom ili numeričkim putem. Potom se koristi vremensko kašnjenje kako bi se prešlo na sledeći vremenski interval. Na taj način usrednjivač prelazi ceo signal. Veći broj uzoraka u vremenskom razmaku uslovljava manju efektivnu snagu šuma, odn. amplituda šuma se smanjuje sa kvadratnim korenom broja uzoraka.

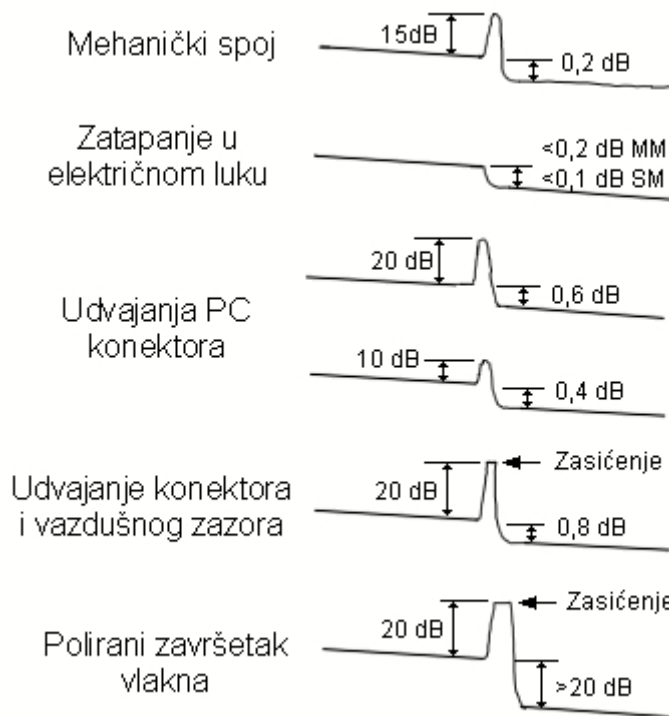
Posle usrednjavanja signal se transformiše logaritamskom funkcijom kako bi se signal kasnije prikazao na ekranu instrumenta, kao kriva povratnog rasejanja. Kriva prikazuje slabljenje, u dB, u funkciji dužine, u metrima. Karakteristika optičkog vlakna se definiše na osnovu analize tako dobijenog povratnog signala predstavljenog na ekranu mernog uređaja krivom koja može imati nekoliko tipičnih oblika prikazanih na slici 7.4:

- veliki početni impuls, koji je rezultat Frenelove refleksije na ulaznom kraju optičkog vlakna,
- dugačka opadajuća kriva, koja je rezultat Rejljevog rasejanja,
- prevojne tačke, koje su izazvane nereflektivnim gubicima u optičkom vlaknu (spojevi i mehanički uticaji koji nisu doveli do prekida vlakna, ali su doveli do njegovog naprezanja)
- manji impulsi duž opadajuće krive, koji su rezultat manje refleksije u pojedinim tačkama (oštećenja i nehomogenosti materijala jezgra optičkog vlakna, kvalitetno izvedeni mehanički spojevi i slično)
- impulsi duž opadajuće krive i na njenom kraju, do kojih dolazi zbog Frenelove refleksije na graničnoj površini jezgro-vazduh (konektorski spojevi, i kraj optičkog vlakna).

Slika 7.4 Izgled krive na ekranu OTDR-a



Slika 7.5 Tipične vrednosti refleksije od pojedinih diskontinuiteta u vlaknu



Povratni signal je rezultat Rejljevog rasejanja svetlosnog zraka u optičkom vlaknu. Kod kvalitetnih optičkih vlakana rasejanje je najveći izvor gubitaka.

Srednje slabljenje između dve tačke na rastojanjima x_1 i x_2 gde je $x_2 > x_1$, i dato je izrazom:

$$a_{sr} = -10 [\log P_D(x_2) - \log P_D(x_1)] / 2 (x_2 - x_1) \quad (\text{dB/km})$$

Prednosti korišćenja optičkog reflektometra (OTDR-a) su:

- metoda je nedestruktivna,

- dovoljan je pristup samo jednom kraju optičkog vlakna,
- dobijanje informacija o gubicima duž celog vlakna, i
- mogućnost otkrivanja grešaka, prekida i spojeva na optičkom vlaknu.

Nepovoljne strane korišćenja ove metode su:

- nemogućnost merenja spektra,
- nemogućnost kontrolisanja raspodele modova,
- slab povratni signal, što zahteva osetljiviji prijemnik, i
- osetljivost na neuniformnost optičkog vlakna.

Slika 7.6 Izgled prednje strane OTDR-a



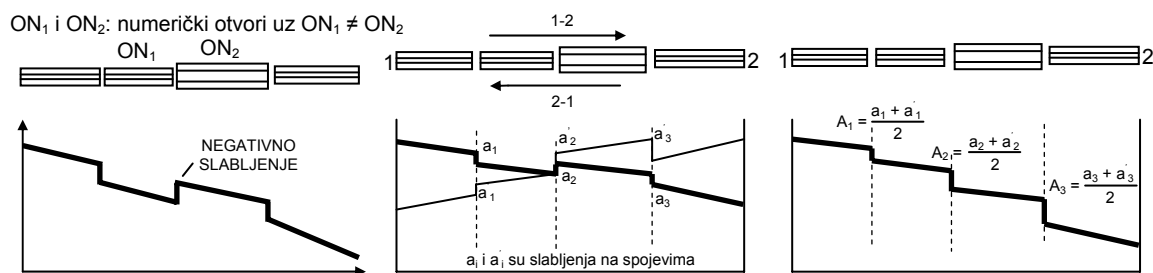
7.2.1.4 Merenje slabljenja na mestu spoja optičkih vlakana

Za merenje gubitaka na mestu spoja optičkih vlakana koristi se metoda povratnog rasejanja (OTDR) zbog mogućnosti praćenja izgleda krive na mestu spoja. Ovakva merenja se izvode u fabrikama i na terenu.

Fabrička merenja i merenja na terenu se izvode istom opremom te su rezultati vrlo slični. Odstupanja u vrednostima koja se mogu izmeriti u fabrikama i na terenu su zbog različitih pratećih uslova merenja. Fabrička merenja se odlikuju velikom ponovljivošću rezultata, jer su ulazni i izlazni krajevi optičkih vlakana koja se spajaju fiksirani za vreme i posle merenja, pored toga pri fabričkim merenjima u svakom momentu su dostupna oba kraja za dodatna merenja. Na terenu se posle spajanja optička vlakna «pakuju» u spojnice, a često je onemogućen pristup daljem kraju merenog vlakna te je nemoguće izvršiti dodatna merenja.

Pri merenju slabljenja na spoju postoji mogućnost pojave negativnog slabljenja. Ovo je uslovljeno spajanjem dva vlakna čija su jezgra različitih dimenzija (obe su u dozvoljenim granicama). Za određivanje što tačnije vrednosti na spoju neophodno je izvršiti merenje istog spoja sa druge strane vlakna, a vrednost slabljenja na spoju se izračunava kao srednja vrednost izmerena sa oba kraja vlakna.

Slika 7.7 Izgled krive na ekranu OTDR-a i izgled vlakana pri negativnom slabljenju



7.2.2 Otkrivanje oštećenja optičkog vlakna

7.2.2.1 Otkrivanje oštećenja optičkog vlakna primenom OTDR merenja

Najvažnija primena merenja OTDR metodom su otkrivanje i lokalizacija oštećenja i prekida optičkog vlakna. Tačnost lociranja greške na kraćim rastojanjima (do 300m) zavisi od primenjene širine ulaznog impulsa (odnosno od dužine nelinearnog dela krive slabljenja) i rezolucije, a na većim dužinama zavisi od tačnosti određivanja brzine prostiranja svetlosti kroz optičko vlakno tj. od tačnosti unapred određenog indeksa prelamanja (moguća greška je oko 1%), i tačnosti instrumenta. Dužina neprekinutog dela optičkog vlakna (L) data je izrazom:

$$L = (c t) / (2 n_1)$$

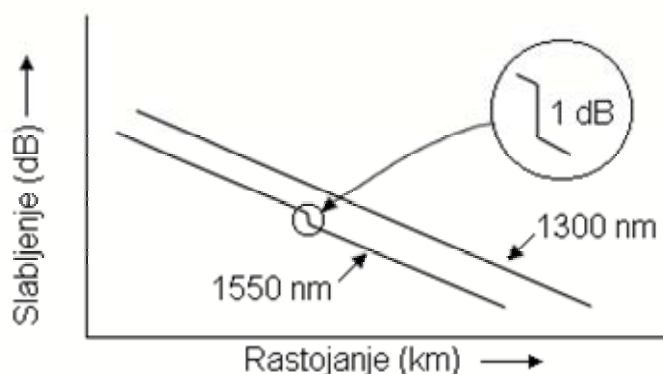
gde je t - vremenska razlika između ulaznog impulsa i impulsa odbijenog od mesta oštećenja ili prekida vlakna, n_1 - indeks prelamanja jezgra optičkog vlakna, i c - brzina prostiranja svetlosti u vakuumu.

Pri merenju u tačkama koje su prikazane Frenelovim impulsom ili prevojnomo tačkom na krivoj, dodatni problem može predstavljati bliski (do 10m) izvor povećanog slabljenja, jer je on «maskiran» ranijim prikazom na krivoj slabljenja. Na krivoj se to vidi kao jedan izvor, a u stvari ih je dva ili više na kratkom rastojanju.

Problem se javlja ako je mesto oštećenja ili prekida neravna površina pa ne reflektuje dovoljno snage, te ne postoji uočljiv impuls na ulaznom kraju optičkog vlakna, nego se kritično mesto određuje prema prestanku povratnog signala, što je veoma nesigurno. Ova nesigurnost je izražena pri ispitivanju veoma dugih vlakana (zbog većeg slabljenja intenziteta reflektovanog signala).

Obzirom da je Rejljevo rasejanje u funkciji talasne dužine korišćene svetlosti, pojedine tačke gde dolazi do lokalnog slabljenja su neprimetne prikorišćenju talasne dužine 1310 nm, dok su veoma uočljive pri korišćenju talasne dužine 1550 nm.

Slika 7.8 Zavisnost lokalnog povećanja slabljenja od talasne dužine merenja



Takođe, OTDR nije moguće primeniti u nelineranim sredinama, odnosno na deonicama na kojima su prisutne repetitorske laserske diode ili u slučajevima kada svetlosni fluks premašuje optički kapacitet kabla (WDM).

7.2.3 Merenje širine propusnog opsega optičkog vlakna

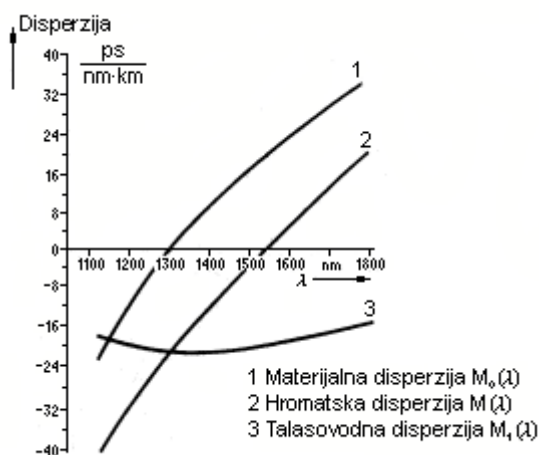
Svetlosni impulsi se proširuju i izobličuju kretanjem kroz optičko vlakno zbog delovanja modalne i hromatske (materijalne i talasovodne) disperzije. Ovo proširenje impulsa, tzv. disperzija, dovodi do intersimbolske interferencije. Stepenn širenja impulsa određuje informacioni kapacitet – maksimalni digitalni protok, pri čemu se ovaj kapacitet obično izražava proizvodom širine propusnog opsega i dužine.

Totalna disperzija u optičkom vlaknu ima dva glavna izvora: modalnu i hromatsku disperziju. Hromatska disperzija se sastoji od: materijalne i talasovodne (profilne) disperzije.

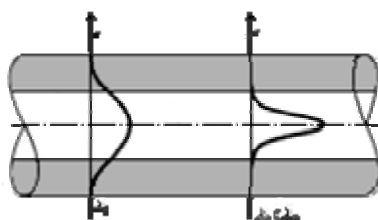
Modalna disperzija predstavlja vremensko pomeranje istovremeno emitovanih impulsa koji se prostiru različitim modovima kroz vlakno. U multimodnim vlaknima dominantan je tip modalne disperzije, jer kašnjenja pojedinih talasa (modova) u optičkom vlaknu imaju veće vrednosti nego hromatska disperzija.

Hromatska disperzija je dominantan tip u monomodnim vlaknima u kojima se prostire samo jedan mod, te nema modalne disperzije. Do materijalne disperzije dolazi zbog optičkog izvora, koji emituje svetlost širine nekoliko nm. Iako se kroz vlakno prostire samo jedan mod, u stvari se prostire nekoliko «podmodova». Vremensko pomeranje između «podmodova» definiše materijalnu disperziju. Talasovodna disperzija izazvana je promenom profila indeksa prelamanja za različite talasne dužine. Na taj način dolazi do različite raspodele energije osnovnog moda u jezgru i omotaču vlakna, odn. do pojave «podmodova». Ova pojava dovodi do vremenskog pomeranja «podmodova» i dovodi do disperzije.

Slika 7.9 Krive disperzije



Slika 7.10 Talasovodna disperzija



Multimodno optičko vlakno skokovitog indeksa prelamanja ima širinu propusnog opsega oko 20 MHzxkm, vlakno gradijentnog indeksa 1 GHzxkm, a monomodna vlakna oko 100 GHzxkm. Sa poboljšanjem tehnologije izrade optičkih vlakana i optičkih karakteristika vlakana, širina propusnog opsega se povećava tako da u bliskoj budućnosti možemo očekivati mnogo veće vrednosti.

Kako bi se dobila tačna predstava o izmerenoj širini propusnog opsega potrebno je definisati uslove merenja - korišćen izvor i geometrijske uslove imisije svetlosnog zraka u vlakno, talasnu dužinu na kojoj radi izvor, itd.

Merenje širine propusnog opsega treba da ispuni dva zadatka:

- da odredi brojnu vrednost disperzije koja će postojati pri realnim uslovima primene, kako bi se mogao projektovati sistem, i
- da se dobije potpuna informacija o širenju i mešanju svetlosnih zraka.

Merni uređaj koji se koristi mora da ima različite karakteristike i mogućnosti zavisno od optičke veze koja se testira, jer ona određuje koliki treba da bude amplitudski i frekventni opseg, odnosno domet uređaja.

7.2.3.1 Merenje disperzije u vremenskom domenu

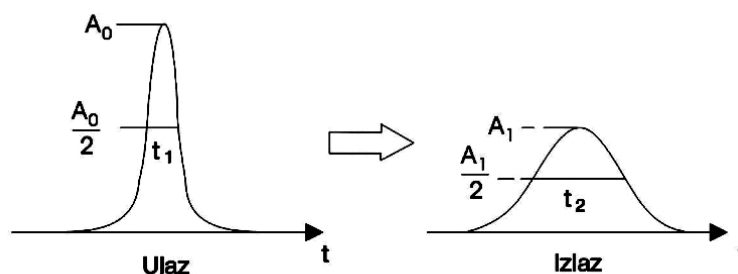
7.2.3.1.1 Tehnika direktne detekcije

Najlakši način merenja disperzije impulsa u testiranom optičkom vlaknu je slanje kratkog svetlosnog signala (oko 100 ps) sa jedne strane, i merenje širine proširenog

izlaznog impulsa na drugom kraju. Za monomodna vlakna se koriste veoma brzi detektori, dok se za multimodna vlakna koriste detektori čije su vremenske rezolucije samo reda ns.

Ako se nekom impulsu, koji se prostire duž vlakna određene dužine, izmeri disperzija i podeli dužinom, dobije se direktno vrednost širenja impulsa u ns/km.

Slika 7.11 Disperzija signala koji se kreće kroz optičko vlakno



Pretpostavlja se da impulсни odziv optičkog vlakna i ulazni impuls imaju Gausov oblik, tako da se onda širina propusnog opsega izračunava prema trajanju impulsa u vremenskom domenu prema izrazu

$$B = 0,44 / t_{imp} \quad (\text{Hz})$$

gde je t_{imp} vreme odziva vlakna (koje je direktno srazmerno varijansi, tj. efektivnoj širini, impulsnog odziva) za signal koji prođe kroz optičko vlakno izračunava se prema izrazu:

$$t_{imp} = \sqrt{t_1^2 + t_2^2} \quad (\text{ns})$$

gde su t_1 i t_2 širine impulsa ulaznog i izlaznog signala u optičko vlakno merene na polovini maksimalne amplitude impulsa, respektivno.

Kod ostalih prenosnih sistema koji se ne ponašaju po Gausovom zakonu bilo bi potrebno izvršiti konverziju izlaznog i ulaznog impulsa iz vremenskog u frekventni domen Furijeovom transformacijom. Njihovim delenjem dobila bi se prenosna funkcija, koja u sebi sadrži informaciju o propusnom opsegu.

Najveći nedostatak tehnike direktne detekcije je inertnost fotodetektora, pa se ovom tehnikom mere samo veoma duga vlakna. Sa druge strane, pošto širenje impulsa zavisi i od mešanja modova i od slabljenja, koji opet zavise od dužine, ne može se ekstrapolirati vrednost disperzije za neku dužinu na osnovu vrednosti disperzije za neku drugu dužinu optičkog vlakna, tako da se ovom metodom disperzija za vlakna različite dužine treba meriti za svako vlakno ponaosob.

7.2.3.1.2

Metoda kliznog impulsa (višestruke refleksije)

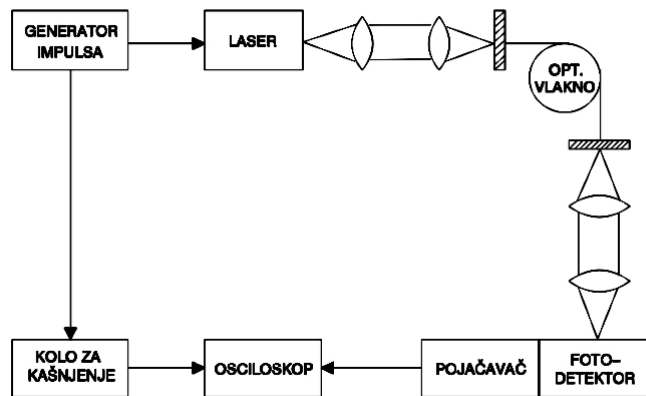
Kako bi se prevazišli nedostaci prethodne tehnike razvijen je sistem kliznog impulsa (shuttle pulse).

Krajevi optičkog vlakna se naslanjaju na delimično reflektujuća ogledala, između kojih svetlosni zrak ubačen u vlakno "klizi" napred-nazad (svaki put se deo energije reflektuje od odgovarajućeg ogledala). Uzorak impulsa se može uzeti na kraju optičkog

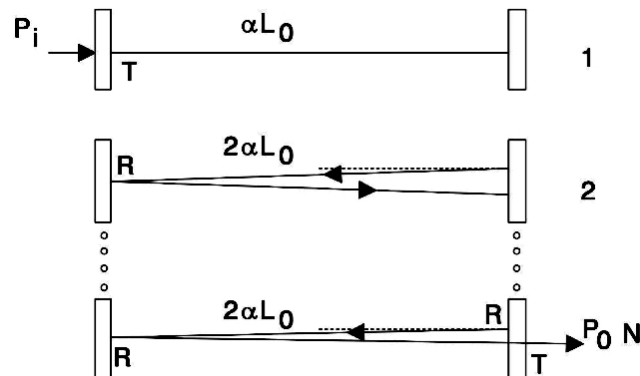
vlakna posle svakih $2N-1$ prolazaka, gde je $N=1,2,\dots$. Disperzija se meri tako što se upoređuje širina impulsa koji se uzimaju posle svakog "kruga" odbijanja unutar vlakna. Princip rada je prikazan na slici 7.13.

Broj klizećih impulsa N koji se mogu izmeriti zavisi od amplitudskog (dinamičkog) opsega sistema D . Važi : $D = 10 \log \frac{P_{1MAX}}{P_{2MIN}}$ gde je P_{1MAX} maksimalna snaga koja se može imitovati u vlakno, a P_{2MIN} minimalna snaga koja se može detektovati fotodetektorom.

Slika 7.12 Blok šema uređaja za merenje disperzije optičkog vlakna metodom kliznog impulsa



Slika 7.13 Princip merenja disperzije optičkog vlakna metodom kliznog impulsa



7.2.3.2 Merenje disperzije u frekventnom domenu

Merenje disperzije u frekventnom domenu korisno je sistem inženjerima koji projektuju i proizvode korisničku opremu.

Za merenje širine propusnog opsega, odnosno disperzije optičkog vlakna, postoji nekoliko metoda.

Sinusoidalnom modulacijom kontinualnog svetlosnog zraka oko određenog nivoa ne može se meriti promena faze sinusoidalno modulisanog signala, osim ako to nije ekstremni slučaj fazne distorzije, ali se zato informacioni kapacitet može dobiti iz modula prenosa funkcije. Prenosna funkcija optičkog vlakna data je izrazom

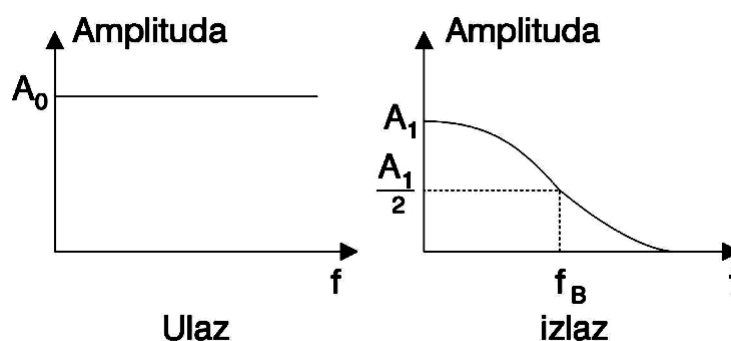
$$H(f) = P_{iz}(f) / P_{ul}(f)$$

gde su P_{iz} i P_{ul} - snage izlaznog i ulaznog optičkog signala, respektivno, koje se mere za različite frekvencije.

S obzirom da se optička vlakna ponašaju kao nisko-frekventni filter, širina propusnog opsega B određuje se kao učestanost pri kojoj amplituda signala opadne za 3 dB, odnosno opadne na polovinu svoje nominalne (jednosmerne, tj. za $f = 0$) vrednosti. Sa slike 7.14 se vidi da je $B = f_B$.

Treba voditi računa da padu amplitude optičke snage od 3 dB odgovara pad amplitude električne snage za 6 dB, gledano u odnosu na graničnu učestanost.

Slika 7.14 Promena amplitude signala pri prolasku kroz optičko vlakno



Prednosti merenja disperzije u frekventnom domenu su:

- prenosna funkcija optičkog vlakna može se dobiti direktno, bez Furijeove transformacije podataka dobijenih u vremenskom domenu
- nije potrebna linearnost fotodetektora preko celog opsega, zbog malog signala modulacije oko konstantnog nivoa
- lakše je sinusoidalno modulirati optički izvor na višim učestanostima, nego napraviti seriju uskih impulsa.

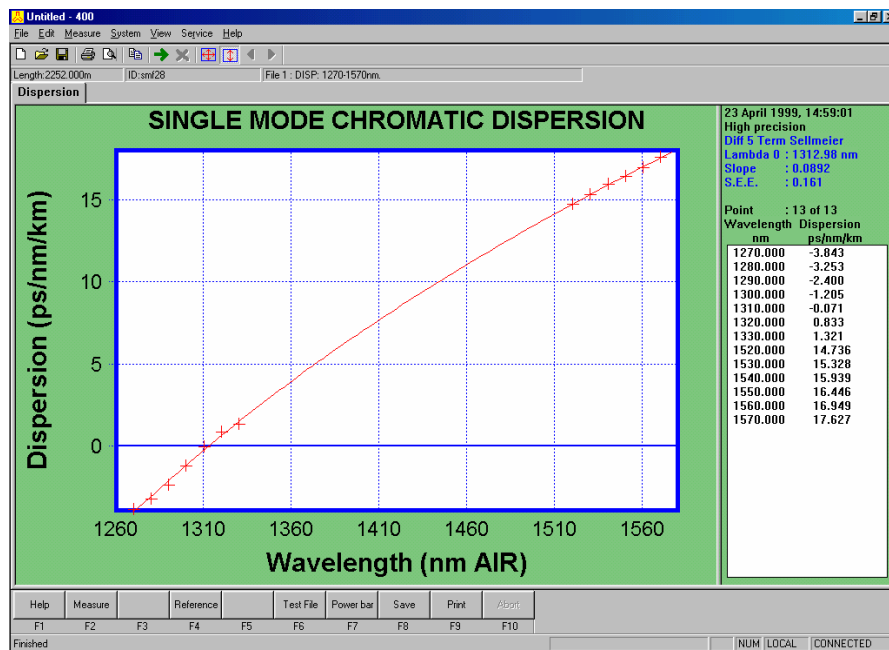
7.2.3.3 Merenje hromatske disperzije

U slučaju optičkog vlakna malog propusnog opsega ili u slučaju primene LED diode kao izvora svetlosnog zračenja (koja ima široki spektar zračenja), uticaj hromatske disperzije ne može se zanemariti, pa je za njeno merenje predloženo nekoliko metoda.

Najčešće primenjivan metod (tehnika direktne detekcije) koristi slanje impulsa monohromatskog svetla različitih talasnih dužina i beleženje razlika trenutaka njihovog stizanja na drugi kraj vlakna. U slučaju upotrebe različitih izvora, treba očuvati uslove emisije svetlosnog zraka u optičko vlakno.

Od skoro se primenjuje veoma jednostavna tehnika sa svetlosnim izvorom širokog spektra (LED dioda) koji se sinusno moduliše. Ova metoda merenja je poznata kao tehnika duple demodulacije. Fazna pomeranja do kojih dolazi između različitih talasnih dužina odabiraju se monohromatorom i mere. Odgovarajuća vremenska kašnjenja se obračunavaju, a rezultati su veoma precizni, reda nekoliko pikosekundi.

Slika 7.15 Izmerena kriva vrednosti hromatske disperzije



Slika 7.16 Instrument za merenje hromatske disperzije



7.2.3.4 Merenje modalne polarizacione disperzije

DWDM i 10 Gb/s transmisioni sistemi učinili su modalnu polarizacionu disperziju (PMD) veoma značajnim parametrom u industriji optičkih vlakana. PMD dominira nad drugim oblicima disperzije pri velikim brzinama komunikacije. U 40 Gb/s sistemima, kao što je metro, najvažniji parametar optičkog vlakna postaje upravo PMD. Održavanje PMD-a takođe je veoma bitno u slučajevima kada se postojeći optički kablovi žele koristiti za sisteme sa velikim bitskim brzinama jer pre 1994 proizvođači nisu merili i deklarirali PMD. Tolerancije kašnjenja za 10 Gb/s mrežu su tipično 10 ps, a za 40 Gb/s, 2,5 ps.

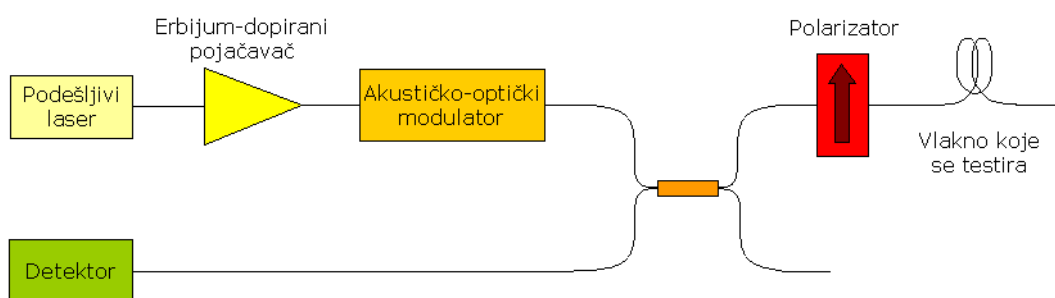
Postoji nekoliko mernih metoda za određivanje modalne polarizacione disperzije:

1. Interferometrijski metod (vremenski domen).
2. Merenja impulsnog kašnjenja (vremenski domen).
3. RF spektralni odziv (vremenski domen)
4. Metod faznog pomeranja (vremenski domen)

Ove metode su iste kao i kod merenja ostalih oblika disperzije. Nepovoljne su zbog male rezolucije i ograničenog ospega.

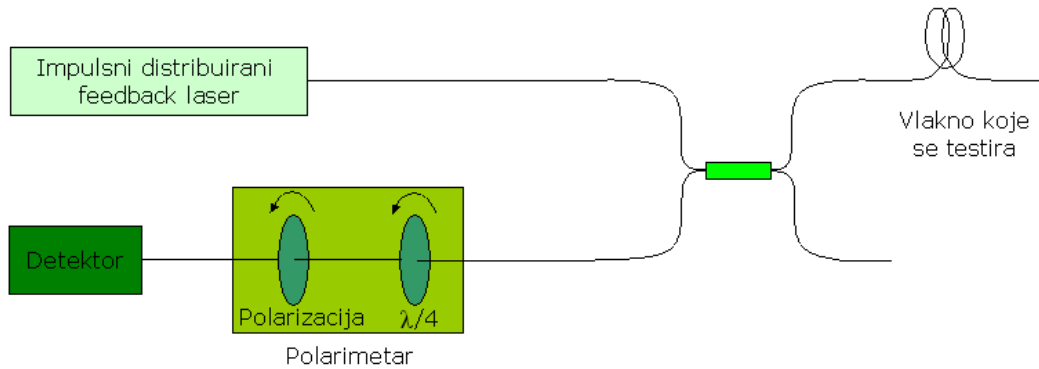
5. Metod fiksnog analizatora (frekvencijski domen). Ovo je prva metoda razvijena isključivo za merenje PMD-a. Zasniva se na analizi transmisionog spektra merenog pomoću analizatora smeštenog na izlaz vlakna koje se testira. Ako se upotrebi OTDR moguće je sva merenja obaviti sa jednog kraja kabla. Postoje dve podvarijante ove metode koje koriste P-OTDR:
 - skeniranje talasnih dužina, za koje se koristi kombinacija podešljivog lasera sa kontinualnim opsegom talasnih dužina i merač svetlosne snage. Rezultat mernja je izlazna snaga u funkciji rastojanja i talasne dužine za svaku od ravni polarizacije.

Slika 7.17 Realizacije metode fiksnog analizatora skeniranjem talasnih dužina pomoću P-OTDR-a



- merenje statistike stepena polarizacije, za koju se koristi kombinacija impulsnog širokopolasnog lasera i optičkog spektroanalizatora. PMD se određuje indirektno merenjem dužine uparivanja h (minimalna dužina na kojoj dolazi do mešanja modova).

Slika 7.18 Realizacija metode fiksnog analizatora određivanjem statistike stepena polarizacije P-OTDR-om



PMD se dobija iz formule

$$PMD = \frac{\beta L}{\sqrt{L/h}}$$

gde je β koeficijent bi-refrakcije (relativno kašnjenje između najbržeg i najsporijeg polarizacionog moda), a L rastojanje. Kada je h malo, postoji značajno mešanje modova i PMD je proporcionalno kvadratnom korenu od L . Kada je h veoma veliko, smanjeno je uparivanje između brzih i sporih modova i PMD se povećava linearno sa rastojanjem L .

Mane ove metode su dug interval merenja, kompleksna merna oprema i potreba za OTDR-om veoma velike prostorne rezolucije

6. Džonsova matrična analiza sopstvenih vrednosti (Jones Matrix Eigenanalysis - JME) (frekvencijski domen). Koristi podešljivi laser za generisanje klizne talasne dužine i polarizator. Omogućuje merenja u femtosekundskom opsegu. Nedostaci su u zametnoj obradi podataka i osetljivosti na mehaničke uticaje (vibracije), zbog čega merenja od nekoliko desetina minuta mogu biti nepouzdana i njihove rezultate treba obazrivo interpretirati.

7. Generalizovana Poincareova sferna analiza (Generalized Poincaré Sphere Analysis - GPSA), (frekvencijski domen) koja se bazira na polarizacionoj interferometriji i daleko je robusnija od JME. TIA, ITU i IEC priznaju GPSA kao ekvivalent JME metode. Moguće merenje na svim talasnim dužinama istovremeno, što skraćuje vreme pojedinačne PMD analize na svega nekoliko sekundi.

Od najvećeg značaja su Džonsonova matrična analiza (JME) i Generalizovana Poincareova analiza (GPSA), jer one jedine daju prihvatljive rezultate u femtosekundskom opsegu. Pri tome je GPSA daleko pouzdanija i rezultati merenja imaju veću ponovljivost.

7.2.4 Merenje granične talasne dužine monomodnog optičkog vlakna

Granična talasna dužina (λ_{cutoff}) predstavlja minimalnu talasnu dužinu svetlosti pri kojoj se kroz monomodno optičko vlakno prostire samo jedan mod. Ukoliko je talasna dužina primenjene svetlosti ispod vrednosti granične talasne dužine, onda se kroz optičko vlakno može prostirati više modova, a ako je iznad nje, onda se prostire samo jedan mod.

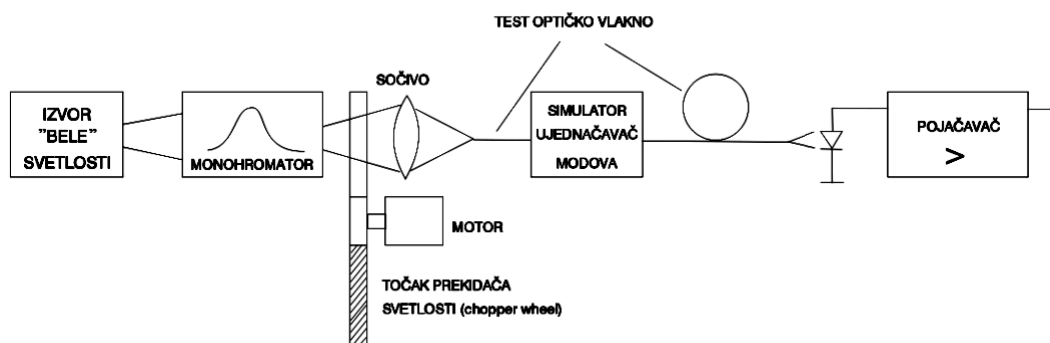
Određivanje granične talasne dužine zasniva se na činjenici da se slabljenje viših modova naglo povećava sa smanjenjem prečnika savijanja optičkog vlakna, dok je promena slabljenja aksijalnog moda (moda koji se prostire duž ose vlakna) zanemarljiva. To bitno utiče na promenu vrednosti podužnog slabljenja.

Određivanje granične talasne dužine prema CCITT preporuci G.652 zasniva se na merenju spektralnog slabljenja svetlosnog zraka.

7.2.4.1 Merenje granične talasne dužine metodom savijanja

Svetlosni zrak se iz izvora "bele" svetlosti propušta kroz podesivi monohromator kako bi se postigla spektralna širina zraka do 10 nm (na polovini amplitude impulsa svetlosnog zraka). Merenje se obavlja na komadu vlakna dužine 2m sa kružnim zavojkom poluprečnika krivine 140mm (mernom vlaknu), tako što se snaga na izlazu $P_1(\lambda)$ snima u funkciji talasne dužine u dovoljno širokom opsegu oko očekivane granične talasne dužine. U nastavku merenja dodaje se još jedan komad monomodnog optičkog vlakna (test vlakno), koji obrazuje novu petlju najvećeg poluprečnika 30 mm, i postavlja se iza prethodno ispitanog komada optičkog vlakna. Ova petlja postavlja se radi eliminisanja prostiranja viših modova. Zatim se meri izlazna snaga $P_2(\lambda)$, na isti način kao i $P_1(\lambda)$.

Slika 7.19 Merenje spektralnog slabljenja



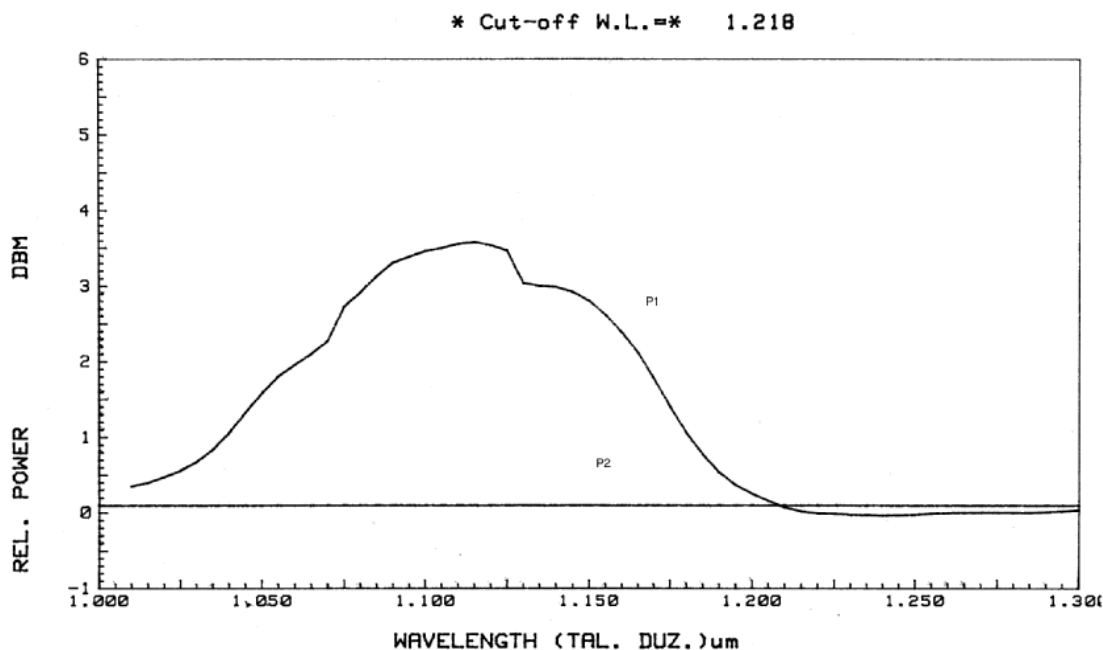
Dodatno slabljenje usled uvođenja nove petlje, tj. odnos prethodno izmerenih izlaznih snaga, dato je izrazom:

$$R(l) = 10 \log [P_1(l)/P_2(l)]$$

gde su $P_1(l)$ i $P_2(l)$ snage izmerene kada postoji samo prva petlja (pored osnovnog postoje i neki niži modovi), odnosno obe petlje (postoji samo osnovni mod), respektivno.

Granična talasna dužina prema definiciji CCITT je ona talasna dužina pri kojoj odnos snaga $P_1(\lambda) / P_2(\lambda)$ iznosi 0,1 dB.

Slika 7.20 Određivanje granične talasne dužine



7.2.5 Merenje nulte talasne dužine optičkog vlakna

Nulta talasna dužina predstavlja onu talasnu dužinu pri kojoj je hromatska disperzija jednaka nuli. Može se meriti istovremeno kad i hromatska disperzija (slika 7.15.). Ovaj parametar prenosa je od velike pomoći projektantima i proizvođačima korisničke opreme pri određivanju tipa emisione diode, kako bi se disperzije smanjila u što većoj mogućoj meri.

7.2.6 Merenje profila indeksa prelamanja optičkog vlakna

Pri određivanju širine propusnog opsega multimodnog optičkog vlakna bitnu ulogu igra profil indeksa prelamanja. Promena njegove vrednosti može se meriti i na samom vlaknu i na pretformi (pripremljenom materijalu pre samog izvlačenja vlakna). Postoji više metoda za merenje profila indeksa prelamanja optičkog vlakna:

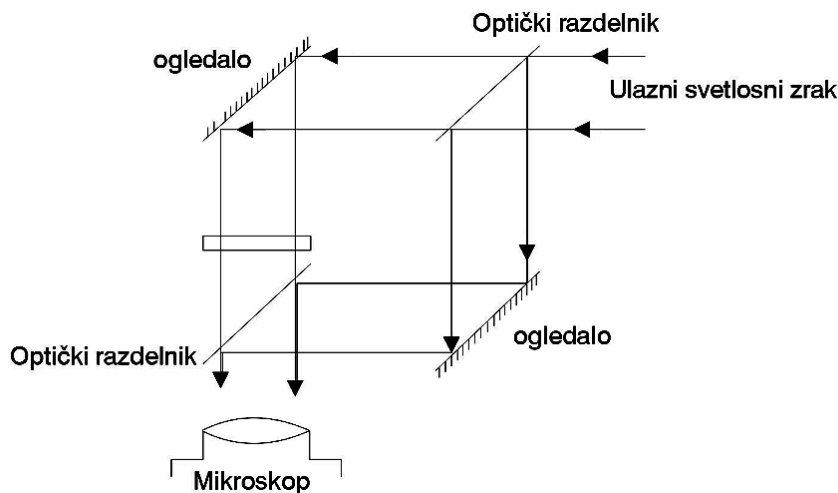
- interferometrijski metod poprečnog preseka
- interferometrijski metod uzdužnog preseka
- metod fokusiranja
- metod skeniranja bliskog polja
- metod prelamanja zraka na bližem kraju vlakna
- metod refleksije na daljem kraju vlakna
- metod rasejanja

7.2.6.1 Interferometrijski metod poprečnog preseka

Ova metoda zahteva isecanje tankog kružnog uzorka vlakna ili pretforme koji mora biti uglačan, ravan i veoma precizno izrezan. Svetlost koja se emituje normalno na površinu poprečnog preseka i prolazi kroz ovaj uzorak se fazno pomera (rezultat debljine uzorka i njegovog indeksa prelamanja) i na izlazu se upoređuje sa osnovnim incidentnim

svetlosnim zrakom. Rezultat toga je pojava interferentnih pruga, koje odgovaraju izgledu profila indeksa prelamanja optičkog vlakna ili materijala od koga se izvlači optičko vlakno.

Slika 7.21 Način merenja profila indeksa prelamanja interferometrijskom metodom poprečnog preseka

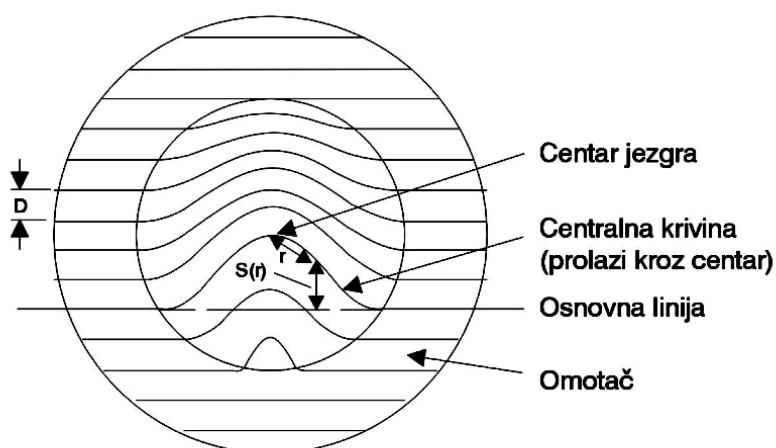


Razlika u indeksima prelamanja jezgra i omotača se izračunava na osnovu izraza:

$$n(r) - n_2 = \lambda \cdot S(r)/(D \cdot d)$$

gde je D - razmak između paralelnih ivica interferentnih pruga, d - debljina uzorka, λ - talasna dužina merenog svetla, a $S(r)$ - odstupanje centralne ivice, na rastojanju r , u odnosu na osnovnu liniju.

Slika 7.22 Izgled profila indeksa prelamanja dobijen interferometrijskim metodom poprečnog preseka



7.2.6.2 Interferometrijski metod uzdužnog preseka

Ova metoda ne zahteva sečenje vlakna i njegovu posebnu pripremu. Optičko vlakno se potopi u tečnost kako bi se izbeglo krivljenje zraka i postavi transverzalno ispod uporednog mikroskopa. Svetlost osvetljava vlakno pod pravim uglom (u odnosu na osu vlakna) tako

da svaki svetlosni zrak prolazi kroz oblasti sa različitim indeksom prelamanja. Sveukupna putanja svetlosti se mora izraziti preko integrala, pa se za dobijanje raspodele indeksa prelamanja mora rešiti integralna jednačina (Abelova integralna jednačina, Furijeova transformacija i Beselova funkcija).

Oba interferometrijska metoda su vrlo tačna pri određivanju profila indeksa prelamanja.

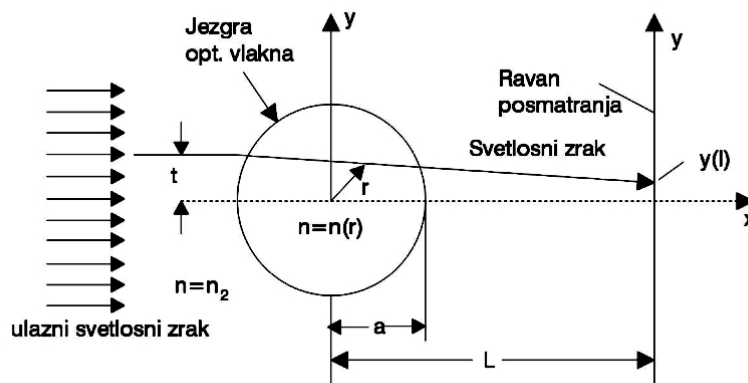
7.2.6.3 Metod fokusiranja

Ovaj metod se može primeniti i na vlakna i na pretforme, a bazira se na činjenici da se jezgro optičkog vlakna ponaša kao cilindrično sočivo za svetlosne zrake koji nailaze transverzalno (pod pravim uglom) u odnosu na vlakno, odnosno njegovu cilindričnu osu z (duž koje se inače prenosi svetlost). Vlakno se potapa u fluid odgovarajućeg indeksa prelamanja (da bi se sprečilo prelamanje svetlosti na spoljnoj granici omotača) i osvetljava na prethodno opisan način. Na ravnoj ploči (ravni posmatranja) dobija se gustina raspodele optičke snage i na osnovu toga se izračunava raspodela indeksa prelamanja. Rešava se numeričkim putem integralna jednačina:

$$n(r) - n_2 = \frac{n_2}{\pi L} \int_r^a \frac{t - y(t)}{\sqrt{t^2 - r^2}} dt$$

Ovaj metod merenja daje veoma tačne rezultate, ali je za njegovu primenu potrebna kružna simetrija i oštre promene indeksa prelamanja.

Slika 7.23 Način merenja profila indeksa prelamanja metodom fokusiranja



7.2.6.4 Metod bliskog polja

Kod ovog metoda se na ulaz optičkog vlakna postavlja izvor koji pobuđuje jezgro tako da ono bude ravnomerno osvetljeno po prečniku. Takva pobuda se ostvaruje Lambertijanovim izvorom, kojim se obezbeđuje da svi modovi u vlaknu budu jednako pobuđeni. Na dalji kraj vlakna postavlja se mikroskop pomoću koga se skenira raspodela energije na izlazu vlakna. Indeks prelamanja $n(r)$ na poluprečniku jezgra r vezan je sa optičkom snagom bliskog polja (polja na izlazu vlakna) na istom poluprečniku r $P(r)$ sledećim izrazom

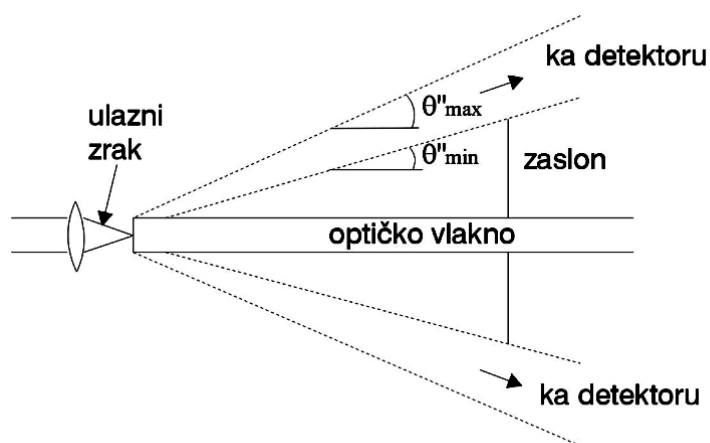
$$[n(r) - n_2] / [n(0) - n_2] = P(r) / P(0)$$

gde je n_2 - indeks prelamanja omotača, $n(0)$ i $P(0)$ su indeks prelamanja i optička snaga u centru jezgra.

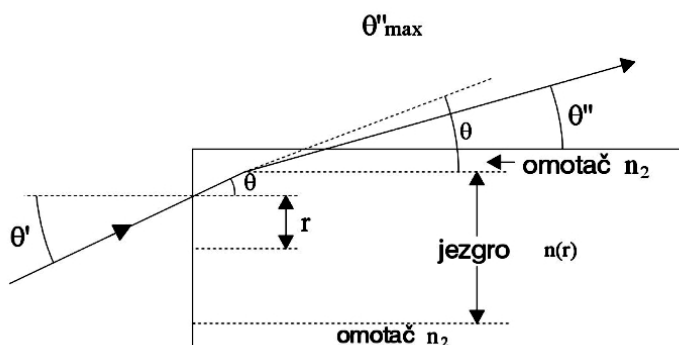
7.2.6.5 Metod prelamanja zraka na bližem kraju vlakna

Ova metoda spada među najinteresantnije, jer se može koristiti za bilo koju dužinu vlakna. Nisu potrebne nikakve posebne pripreme kraja vlakna, ni uslovi čistoće, takođe je nepotrebno vršiti korekcije zbog modova koji "iscure" iz vlakna (curećih modova). Vlakno se potapa u tečnost koja ima indeks prelamanja jednak indeksu prelamanja omotača. Laserski zrak sa znatno većim numeričkim otvorom nego prihvatni ugao vlakna usmerava se na optičko vlakno malog poprečnog preseka.

Slika 7.24.a)



Slika 7.24.b)



Slika 7.24 Merenje indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna metodom prelamanja zraka na bližem kraju vlakna (na slici 7.24.a)

Svetlost koja pada na detektor i koja se meri je ona koja izlazi iz optičkog vlakna na njegovom bližem (ulaznom) kraju. Ova svetlost sastoji se od zraka koji padaju van prihvatnog ugla vlakna (i prelamaju se iz jezgra u omotač), i koji su "izašli" iz omotača vlakna. Za određivanje indeksa prelamanja koriste se samo svetlosni zraci koji su odbijeni, ali ne i oni viših modova koji su izašli iz omotača. Sprečavanje dejstva ovih curećih talasa se obavlja zaklonom u obliku neprozirnog prstena. Indeks prelamanja jezgra $n(r)$ na mestu gde odgovarajući zrak ulazi u jezgro se računa prema izrazu:

$$n(r) - n_2 = n_2 \cos \theta''_{\min} (\cos \theta''_{\min} - \cos \theta'_{\max}) [P(a) - P(r)] / P(a)$$

gde je $P(r)$ - detektovana optička snaga, $P(a)$ - izlazna snaga merena kada je ulazni svetlosni zrak fokusiran na omotač, θ_{\min}'' - minimalan ugao prema osi vlakna pod kojim svetlosni zrak napušta jezgro, koji je određen zaklonom za elimisanje viših modova koji izađu iz omotača, i θ_{\max} - maksimalni ugao prema osi vlakna pod kojim upada incidentni svetlosni zrak, koji je određen izvorom svetlosti.

Mane ove metode su potreba za izjednačavanjem indeksa prelamanja tečnosti i omotača vlakna, zatim kvalitetan, praktično idealan presek vlakna na bližem kraju i poznavanje minimalnog ugla prelamanja θ_{\min}'' .

7.3 Geometrijske karakteristike optičkog vlakna

Pri spajanju optičkih vlakana neophodno je da ona imaju jednake (ili vrlo približne) geometrijske karakteristike, da bi gubici na spoju bili što manji.

7.3.1 Merenje prečnika optičkog vlakna

Za potrebe proizvođača vrši se merenje spoljnog prečnika optičkog vlakna nekontaktnim optičkim metodama, i to kao deo procesa proizvodnje.

Za potrebe prerađivača i korisnika optičkih vlakana ovo merenje, odn. kontrola podataka proizvođača se može izvesti mikrometrom.

7.3.2 Merenje prečnika jezgra optičkog vlakna

Kod ovog merenja javlja se problem jednoznačnog definisanja jezgra multimodnog optičkog vlakna sa gradijentnim indeksom prelamanja. Postoje dva pristupa rešenju ovog problema:

- Smatrati da je jezgro ona oblast optičkog vlakna za koju je vrednost indeksa prelamanja veća od predviđene vrednosti za omotač
- Smatrati da je jezgro optičkog vlakna ona oblast gde je lociran određen procenat (90 - 95 %) energije koja se prenosi kroz vlakno.

Ako se jezgro vlakna definiše prema prvom pristupu onda se njegov prečnik može meriti pomoću svih metoda za merenje profila indeksa prelamanja. Definisanjem jezgra optičkog vlakna prema drugom pristupu merenje se bazira na raspodeli energije u vlaknu, i ono ima nedostatak koji se ogleda u tome da ta raspodela energije, odnosno, samo merenje, zavisi od dužine vlakna, različitog slabljenja modova i uslova ubacivanja svetlosnog zraka u vlakno.

Uopšteno gledano, prema CCITT-u, merenje jezgra definisanog na prvi način je verodostojnije i adekvatnije.

7.3.3 Prečnik polja moda

Prečnik polja moda je predstavljen tačkom gde amplituda svetlosnog zraka osnovnog moda opadne na $1/e$ ti deo. Prečnik polja moda je osnovni parametar definisanja jezgra monomodnog optičkog vlakna jer se kroz njega prostire najveći deo snage. Prečnik polja

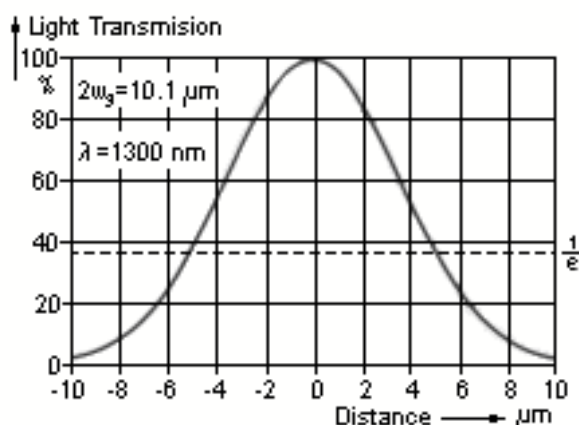
moda je promenljiv u odnosu na talasnu dužinu svetlosti koja se prostire kroz vlakno. Što je viša talasna dužina svetlosti, prečnik polja moda je veći.

Raspodela svetlosnog zraka osnovnog moda u monomodnom optičkom vlaknu je bitan faktor u proceni unetog slabljenja, slabljenja spoja i slabljenju usled savijanja.

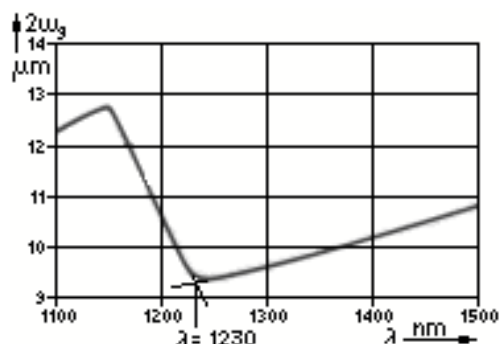
7.3.3.1 Metod poprečnog pomeranja

Komad optičkog vlakna dužine 2 m se postavlja u sistem za merenje spektralnog slabljenja. Potom se uzorak prepolovi i polovine se fiksiraju u mikropozicionere, tako da su im vrhovi udaljeni do 10 mikrona. Jedan kraj vlakna se pomera kako bi se dostigla maksimalna vrednost prenosa svetlosti kroz ovakav sistem. Potom se od tog položaja vlakno pomera i meri se opadanje snage u funkciji radijalnog pomeraja. Svetlosni izvor emituje na jednoj talasnoj dužini, za koju se meri prečnik polja moda.

Slika 7.25 Određivanje prečnika polja moda metodom poprečnog pomeranja



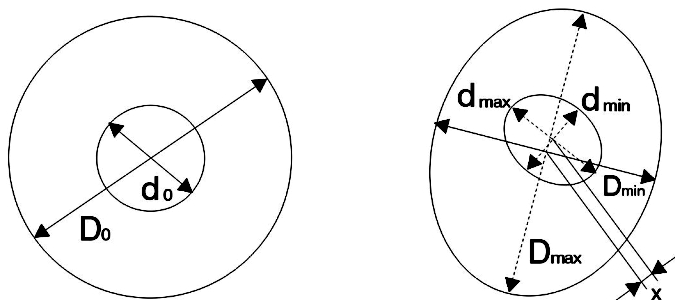
Slika 7.26 Zavisnost prečnika polja moda od talasne dužine korišćene svetlosti



7.3.4 Eliptičnost - koncentričnost jezgra i omotača

Koncentričnost (odn. greška u koncentričnosti) se može definisati kao razmak između centara jezgra i omotača. Greške u koncentričnosti mogu se meriti tako što će se merenje profila indeksa prelamanja jezgra proširiti i na omotač. Merenje se vrši na nekoliko prečnika. Obično se nekoncentričnost javlja u vidu eliptičnosti.

Slika 7.27 Prikaz nekonzentričnosti jezgra i omotača optičkog vlakna



Ekscentritet jezgra optičkog vlakna izračunava se prema izrazu

$$e = (d_{\max} - d_{\min}) 100 / d_0 \quad (\%)$$

gde su d_{\max} i d_{\min} – maksimalna i minimalna vrednost prečnika nekonzentričnog jezgra, a d_0 – nominalna vrednost prečnika jezgra optičkog vlakna.

Ekscentritet omotača izračunava se prema formuli

$$E = (D_{\max} - D_{\min}) 100 / D_0 \quad (\%)$$

gde su D_{\max} i D_{\min} – maksimalna i minimalna vrednost prečnika nekonzentričnog omotača, a D_0 – nominalna vrednost prečnika omotača optičkog vlakna.

Konzentričnost jezgra i omotača optičkog vlakna izračunava se pomoću obrasca

$$C = x 100 / d \quad (\%)$$

gde je $d = (d_{\max} + d_{\min}) / 2$, a x je razmak između centara jezgra i omotača

7.3.5 Metoda četiri koncentrične kružnice

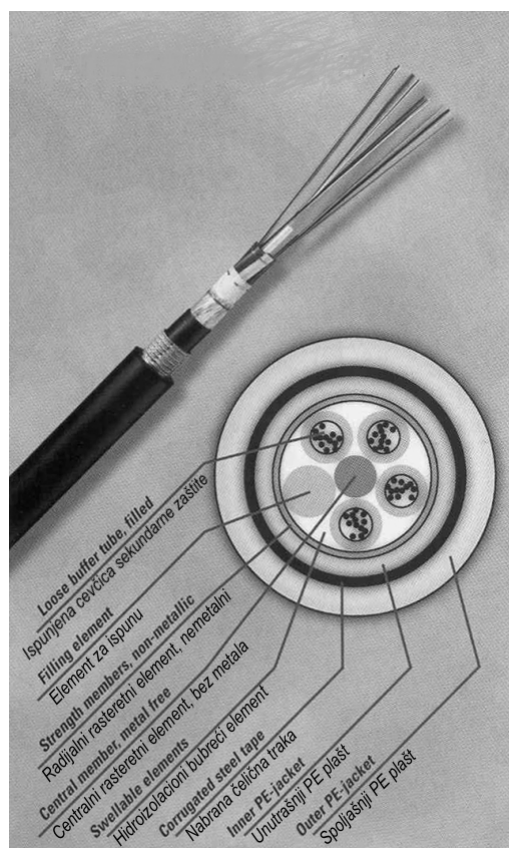
Veoma jednostavan metod verifikovanja geometrijskih karakteristika optičkog vlakna je poređenje kontura jezgra i omotača sa etalom koji ima četiri kružnice, po dve granične vrednosti prečnika jezgra i omotača. Upoređivanje se vrši metodama objektivnog ocenjivanja koje omogućuju analizu slike (npr. videoanalizator). Tehnike bazirane na vizuelnom ispitivanju (direktnom posmatranju) ne mogu se smatrati važećim (iako se u praksi koriste), zato što dozvoljavaju pojavu subjektivne greške pri merenju geometrijskih i optičkih osobina.

7.3.6 Geometrijske karakteristike optičkih kablova

Pod ovim se podrazumeva ispitivanje svih ostalih komponenata kabla, osim optičkog vlakna. To su geometrijske karakteristike (spoljni i unutrašnji prečnik i debljina zida) cevčice sekundarne zaštite i plaštava postavljenih preko jezgra optičkog kabla. Takođe se mere spoljni prečnici centralnog rasteretnog elementa, optičkog kablovskog jezgra. Ova merenja se vrše kao i kod drugih kablova, sa metalnim provodnicima, u kablovskoj industriji.

Bitnu karakteristiku optičkog kabela predstavlja "višak" dužine vlakna u cevčici. On mora biti toliki da pri termičkoj dilataciji sekundarne zaštite ne dođe do zatezanja optičkog vlakna i eventualnih promena njegovih prenosnih karakteristika. Sa druge strane ne sme ga biti previše da pri skraćivanju cevčice na niskim temperaturama ne dođe do prevelikih mikrosavijanja optičkog vlakna i promene njegovih prenosnih osobina. Razlike dužine vlakna i dužine cevčice su oko 0,5%, dok razlika dužine vlakna i dužine kabela nije veća od 1%.

Slika 7.28 Armirani optički kabal



7.4 Mehaničke osobine

Pri mehaničkim ispitivanjima optičkog kabela testiraju se zaštitne komponente - cevčica sekundarne zaštite, centralni rasterećni element, plaševi i armatura. Tokom eksperimenta optički kabal izlaže se različitim mehaničkim naprezanjima, i prati se promena slabljenja optičkog vlakna, odn. da li je došlo do povećanja slabljenja, odn. prekida nekog od vlakana ili vizuelno uočljivog oštećenja spoljnog plašta optičkog kabela.

7.5 Otpornost na uticaj okoline

U zavisnosti od mesta primene optičkog kabela, on može biti izložen različitim uticajima iz spoljašnje sredine - mehaničkim, hemijskim, klimatskim, energetskim, nuklearnim i drugim.

Ispitivanje na dejstvo klimatskih uslova obuhvata izloženost različitim temperaturnim dejstvima, kao i dejstvima povećane vlažnosti, pri čemu ne sme doći do povećanja slabljenja više nego što je to propisano.

Delovanje energetske polja i nuklearnog zračenja ogleda se u dejstvu na nečistoće i aditive (dopante) koji se nalaze u staklu optičkog vlakna, čime se povećava slabljenje. Materijali koji se uobičajeno koriste u kablovskoj inustriji kao zaštita optičkog vlakna u kablju, u ovom slučaju imaju malu ulogu, pa je potrebno ugraditi PCS optička vlakna sa jezgrom velike čistoće, ili koristiti specijalne materijale za zaštitu.

Za ispitivanja karakteristika optičkih vlakana i kabela iz prve dve grupe karakteristika (1. prenosne i optičke i 2. geometrijske) po IEC-u postoje instrumenti koji ih mere direktnim ili indirektnim metodama, koje su detaljno opisane u poglavljima 1. i 2. Za one osobine koje pripadaju drugim dvema grupama (3. mehaničke i 4. otpornost na uticaj okoline) se uz instrumente za merenje slabljenja (bilo kojom metodom), koriste i dodatne aparature koje omogućuju da optički kabl bude izložen potrebnom dejstvu bilo mehaničkih ili nekih drugih uticaja okoline.

Propisi koji definišu vrednosti izmerenih karakteristika, kao i izgled mernog sistema i pomoćne aparature za merenje tih karakteristika dati su u međunarodnim okvirima kroz IEC publikacije, a u okviru Jugoslavije u Glasniku ZJPTT.

7.6 Preporuke za nabavku opreme

Postoji velik broj alata raspoloživih za ispitivanje optičkih kablova. Koje testere i mernu opremu koristiti, zavisi od tipa posla koji je potrebno odraditi, koliko često će biti potrebno testirati optičku mrežu i, naravno, od budžeta kojim se raspolaže. Bitne osobine koje ukazuju na kvalitet nekog instrumenta mogu biti subjektivno odabrane, ali postoje parametri koje je neophodno uzeti u obzir, i oni se nalaze u tabelama karakteristika instrumenta.

Terenska merna oprema trebalo bi da obuhvati:

- jednostavne izvore bele svetlosti za identifikaciju vlakana i proveru njihovog kontinuiteta
- lokatori prekida optičkog vlakna sa laserskim izvorima
- optički set za merenje slabljenja
- alati za merenje podužnog slabljenja i usklađenosti sa standardima
- OTDR instrumenti za dijagnostiku i merenje rastojanja do optičkih pojava

7.6.1 OTDR

Za izbor OTDR-a su objektivno bitne karakteristike:

- Dinamički opseg,
- Tačnost
- Rezolucija
- Ponovljivost merenja
- Mogućnost automatskog merenja slabljenja na spoju
- Očitavanje u realnom vremenu
- Talasna dužina korišćene svetlosti i način njene izmene
- Težina i prenosivost

- Jednostavnost rukovanja i mogućnost memorisanja podataka
- Brzina usrednjavanja
- Robusnost

7.6.1.1 Dinamički opseg (Dynamic Range)

Dinamički opseg je odnos maksimalne emitovane snage (P_0) i najmanje snage koja se može detektovati na ulazu prijemnika (P_{\min}).

$$D \text{ (dB)} = -10 \log (P_0 / P_{\min})$$

Dinamički opseg određuje maksimalnu vidljivu dužinu optičkog vlakna, i u tabelama karakteristika se pojavljuje u dve varijante:

- onaj koji ukazuje na to koliko se maksimalno dalek Frenelov impuls na kraju vlakna može videti, i određen je dinamičkim opsegom prijemnika,
- onaj koji se odnosi na merenje povratnog rasejanja (backscattering)

Prilikom upoređenja vrednosti dinamičkog opsega treba obratiti pažnju na tačnu definiciju proizvođača OTDR-a, da li je opseg za jedansmerno ili dvosmerno merenje, na šta se odnosi tačka definisanja dinamičkog opsega i da li je vrednost data u «električnim» ili «optičkim» decibelima.

- Zbog činjenice da OTDR-om merimo samo sa jedne strane, te svetlosni signal putuje u oba smera, pravi opseg merenja instrumenta u jednom pravcu predstavlja polovinu dinamičkog opsega prijemnika.
- Tačka definisanja je konektor na prednjem panelu, ali neki proizvođači definišu referentnu tačku unutar instrumenta.
- Neki proizvođači definišu referentnu tačku «negde unutar» elektro-optičkog intarface-a, te zbog gubitaka u interface-u i razlike između dva tipa decibela, se ne dobija adekvatan podatak o «korisnom» dinamičkom opsegu.

7.6.1.2 Tačnost merenja dužine (Distance Measurement Accuracy)

Veoma bitna osobina OTDR-a za lociranje događaja na optičkom vlaknu. Tačnost instrumenta je definisana sa dva parametra:

- Sopstvenom tačnošću samog instrumenta
- Tačnošću jednoznačno definisanog indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna. Pošto je indeks prelamanja promenljiv duž vlakna, a operater ga aproksimira nekom konačnom vrednošću od samog početka merenja se unosi sistemski greška.

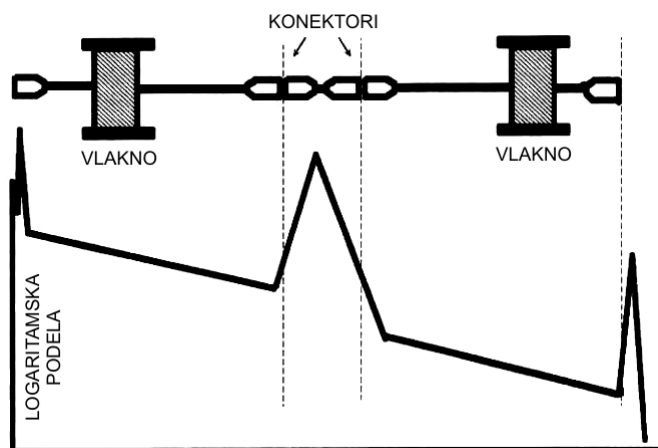
7.6.1.3 Rezolucija (Resolution)

Rezolucija očitavanja dužine (Distance Readout Resolution) definiše najmanju vrednost horizontalnog pokazivanja displeja na instrumentu.

Rezolucija očitavanja gubitaka (Loss Readout Resolution) definiše najmanju vrednost vertikalnog pokazivanja displeja na instrumentu

Prostorna rezolucija (Spatial Resolution) ukazuje na sposobnost instrumenta da razlikuje i locira dva prostorno bliska, izolovana događaja (oštećenja, konekcije i sl.), i direktno zavisi od širine laserskog impulsa koji se koristi.

Slika 7.29 Prostorna rezolucija



Savremeniji instrumenti nude mogućnost elektronskog «maskiranja» reflektivnih spojeva te se smanjuje nelinearni deo krive iza Frenelovog impulsa, a istovremeno se izbegava dovođenje prijemne diode u zasićenje.

Širok impuls obezbeđuje više energije, za obavljanje merenja na većim dužinama vlakna, dok impuls manje širine smanjuje dinamički opseg, ali poboljšava prostornu rezoluciju. Sistem akvizicije preko logaritamske konverzije i metoda usrednjavanja doprinosi rezoluciji i tačnosti.

7.6.1.4 Merenje slabljenja OTDR-om

Merenje slabljenja upotrebom OTDR-a je indirektna, i meri se slabljenje rasejane svetlosne energije duž vlakna. Količina rasejane svetlosti na prijemu logaritamski opada sa dužinom optičkog vlakna. Faktori koji utiču na tačnost merenja slabljenja su:

- Linearnost ekrana instrumenta
- Odnos signal/šum
- Rezolucija očitavanja gubitaka

Vreme oporavka instrumenta od početnog impulsa je ograničavajući faktor koji određuje na koliko bliskoj udaljenosti se mogu vršiti tačna merenja OTDR-om.

Osobine OTDR-a koje su bitne pri merenju slabljenja na spojevima su:

- Jednostavno rukovanje i prenosivost
- Brzina rada
- Mogućnost praćenja rada u realnom vremenu
- Visoka rezolucija
- Laka promenljivost talasne dužine korišćene svetlosti
- Ponovljivost ispravnog merenja

Savremeni OTDR-i imaju razvijen sistem automatskog merenja slabljenja na spoju, tako da se pozicioniranjem kursora na spoj, obrade podaci krive iz okoline spoja na osnovu čega se izračunava vrednost slabljenja na spoju. Na ovaj način je povećana ponovljivost merenja slabljenja spoja.

7.6.1.5 Memorisanje i obrada podataka i upravljanje merenjem preko računara

Memorisanje izmerenih rezultata je veoma važan parametar za izbor OTDR-a, jer nam pruža mogućnost obrade rezultata po povratku sa terena. Takođe omogućava arhiviranje i kasnije praćenje optičkih linija u vremenskim intervalima eksploatacije.

Gotovo svi proizvođači OTDR-a nude svoje software-ske pakete koji olakšavaju obradu izmerenih rezultata, njihovo obeležavanje i upoređenje i najčešće je to za Windows okruženje.

Automatizacija procesa merenja i upravljanje radom OTDR-a se izvodi preko računara priključenjem na IEEE 488 interface (GPIB).

Savremeni optički reflektometri u vremenskom domenu se mogu naći u nekoliko varijanti:

- Uređaj na koji se priključuje mereno vlakno, ima svoj ekran koji prikazuje krivu i koristi više talasnih dužina svetlosti bez izmene modula, jednim pritiskom na dugme ih menja i ima svoj deo za memorisanje
- Uređaj na koji se priključuje mereno vlakno, i koji imaju displej za prikaz dužine do najbližeg događaja uz korišćenje više talasnih dužina svetlosti bez izmene modula. Da bi se prikazala kriva slabljenja potrebno je ovakav uređaj priključiti preko serijskog interface-a na računar koji uz odgovarajući software ima ulogu akvizicione jedinice i ekrana.
- Kartica na koju se priključuje mereno vlakno, i koja se instalira u laptop koji uz odgovarajući software ima ulogu kompletnog OTDR-a sa prikazom krive slabljenja.

7.6.2 Set za merenje slabljenja

Optički set za merenje slabljenja je neophodan pri završnim merenjima da bi se utvrdilo realno slabljenje između priključnih konektora korisničke opreme sa obe strane optičke linije. Ovakav set je važan instrument onima koji se bave održavanjem optičkih linija i proizvodnjom korisničke opreme. Ovakav set se sastoji iz optičkog izvora i optičkog merača snage.

Slika 7.30 Set za merenje slabljenja



U svrhu merenja «apsolutnog» slabljenja, najčešće se koristi set za merenje slabljenja koji je namenjen za merenja van laboratorije. Stoga su uređaji robusne izrade sa gumiranim spoljnim futrolama zbog rada u različitim uslovima

Pri izboru setova za merenje neophodno je znati za koje će se tipove vlakana koristiti, jer optički izvor ima LED diodu koja se koristi za merenja u multimodnim aplikacijama i laserske diode za merenja u monomodnim aplikacijama. Ostali parametri koji mogu uticati na izbor ovakvog tipa opreme su:

- Dinamički opseg
- Način promene talasne dužine korišćene svetlosti
- Tačnost i kalibrisanost
- Rezolucija i očitavanje rezultata
- Robusnost
- Trajanje autonomnog rada i tip baterije
- Veličina

Savremeni optički izvori i merači snage imaju ugrađen sistem za automatsku detekciju talasne dužine, kako bi rezultati bili isparvni. Kod setova koji se koriste za merenje po dve talasne dužine istovremeno se vrši ispitivanje po obe (850 nm i 1300 nm za MM vlakna, i 1310 nm i 1550 nm za SM vlakna). Takođe su opremljeni sitemom za zvučnu detekciju priključenog vlakna, time se olakšava pronalaženje vlakna koje se meri u kablovima velikog kapaciteta.

7.6.3 Optički izvori

Optički izvori emituju svetlost «standardne» talasne dužine, koja može biti kontinualna ili modulisana. Stariji modeli su imali za svaku talasnu poseban izlaz tako da se za promenu talasne dužine morao isključivati i ponovo uključivati optički konektor. Savremeniji uređaji imaju jedan port za priključak na kome se promena talasne dužine svetlosti menja pritiskom na dugme. Za imisiju svetlosti u monomodno vlakno se koriste laserske diode koje emituju svetlost na 1310 nm i 1550 nm, dok se za multimodno vlakno koristi LED dioda koja emituje svetlost na 850 nm i 1300 nm. Uz ove podatke se u katalogima mogu pronaći i odstupanja talasne dužine emitovane svetlosti.

Spektralna širina propusnog opsega je takođe faktor koji se može pronaći u katalogima i olakšati izbor instrumenta.

7.6.4 Optički merači snage

Optički merači snage detektuju svetlost u širokom opsegu od 780 nm do 1700 nm, te im je potreban samo jedan port za priključak test vlakna. Dinamički opseg je najčešće izražen u dBm. Displej koji služi za očitavanje rezultata je najčešće rezolucije 0,01 dB, a rezultati se prikazuju pomoću četiri cifre u dB ili dBm.

Savremeni optički merači mogu da memorišu 1000 rezultata koji se priključkom preko serijskog interface-a mogu obraditi na računaru radi izdavanja sertifikata o kvalitetu linija. Kod nekih se mogu, prema određenom standardu, postaviti granice kvaliteta tako da se dobije rezltat PASS ili FAIL u zavisnosti da li su rezultati u zadatim granicama ili nisu.

7.6.5 Novi trendovi kod savremenih mernih instrumenata

U poslednjih nekoliko godina primetan je trend multifunkcionalnih uređaja. Česta je pojava modularnih main-fraim-ova za koje se mogu iskombinovati različiti priključni

moduli tako da on postane OTDR, set za merenje slabljenja i optički telefon u jednom, ili MM OTDR, SM OTDR i set za merenje slabljenja za MM ili SM i slično.

Prošlo godišnji novitet je OTDR koji uz postavljanje odgovarajućeg modula može da se koristi i za merenje hromatske disperzije. Trenutno je to još uvek jedini uređaj tog tipa, ali se može očekivati pojava još nekog proizvođača sa sličnom ponudom.

7.7 Glasnici JPTT

- «PTT Vesnik» 16/86 – Tehnički uslovi za konektore za završne kablove sa multimodnim optičkim vlaknom 50/125/250 mikrona
- «PTT Vesnik» 23/86 – Tehnički uslovi za osnovnu regeneratorsku deonicu telekomunikacionog kabla sa optičkim vlaknima
- «PTT Vesnik» 25/87 – Tehnički uslovi za samonosive optičke kablove sa nosećim užetom
- «PTT Vesnik» 12/88 – Tehnički uslovi za telekomunikacione kablove sa optičkim vlaknima bez metalnih elemenata
- «PTT Vesnik» 13/88 – Tehnički uslovi za telekomunikacione kablove sa multimodnim optičkim vlaknima sa gradijentnim indeksom
- «PTT Vesnik» 13/88 i 16/92 – Tehnički uslovi za telekomunikacione kablove sa monomodnim optičkim vlaknima
- «PTT Vesnik» 4/89 – Tehnički uslovi za završne telekomunikacione kablove sa jednim optičkim vlaknom
- «PTT Vesnik» 4/89 – Tehnički uslovi za spojnice za nastavljjanje telekomunikacionih kablova sa optičkim vlaknima
- «PTT Vesnik» 32/92 – Tehnički uslovi za telekomunikacione kablove sa optičkim vlaknima za polaganje po stubovima EE linija
- «PTT Vesnik» 21/87 – Uputstvo o merenju optičkih karakteristika i karakteristika prenosa optičkih vlakana
- «PTT Vesnik» 23/87 i 6/91 – Uputstvo o planiranju optičkih kablovskih deonica i sistema prenosa
- «PTT Vesnik» 4/89 i 32/92 – Uputstvo o polaganju i montaži optičkih kablova
- «PTT Vesnik» 27/90 – Uputstvo o obimu ispitivanja pri preuzimanju telekomunikacionih kablova sa optičkim vlaknima
- «PTT Vesnik» 12/91 – Uputstvo o merenju na telekomunikacionim linijama sa optičkim kablovima
- «PTT Vesnik» 24/97 – Uputstvo o tehničkoj evidenciji međumesnih i spojnih telekomunikacionih linija sa optičkim kablovima
- «PTT Vesnik» 1/98 – Uputstvo o organizaciji i zadacima službe održavanja međumesne i mesne mreže sa optičkim kablovima