

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**INSTYTUTU**  
**ŁĄCZNOŚCI**

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
BIBLIOTEKA  
00004



**1996**

**5**



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
BIBLIOTEKA NAUKOWA

Nr .....

**BIULETYN  
INFORMACYJNY  
INSTYTUTU  
ŁĄCZNOŚCI**

ROK 36

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

NR 5(339)

---

WARSZAWA 1996

**Komitet Redakcyjny**  
**Redaktor Naczelny: dr inż. Krystyn Plewko**  
**Z-ca Redaktora Naczelnego: doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska**  
**Redaktorzy Działowi:**  
**doc. dr inż. Włodzimierz Barjasz**  
**dr inż. Stanisław Sońta**  
**inż. Maria Łopuszniak**

© Copyright by Instytut Łączności, Warszawa 1996

ISSN 0209-1046

**Redaktor: mgr Krystyna Juskiewicz**

**Skład komputerowy: techn. Grażyna Woźnica**

---

**Instytut Łączności, Dział Ogólnotechniczny**  
**ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa**

Zbigniew Miarzyński

**TŁUMIENNOŚĆ I DYSPERSJA  
JEDNOMODOWYCH LINII ŚWIATŁOWODOWYCH**

**SPIS TREŚCI**

	Str.
1. Wprowadzenie	5
2. Tłumienność toru światłowodowego	6
2.1. Straty materiałowe w światłowodach krzemionkowych	7
2.2. Falowodowe straty mocy w światłowodzie	16
2.3. Tłumienność złączy	16
3. Bilans mocy i tłumienności toru światłowodowego	19
3.1. Tor światłowodowy	19
3.2. Budżet mocy	22
4. Dyspersja światłowodów	25
5. Bilans czasu narastania impulsu i dyspersji światłowodu	33
6. Przykłady określania bilansu mocy i czasu narastania impulsu	38
6.1. Przykład I	41
6.2. Przykład II	43
6.3. Przykład III	46
6.4. Przykład IV	49
7. Zakończenie	53
Wykaz literatury	54

---

♦

♦

♦

♦

## TŁUMIENNOŚĆ I DYSPERSJA JEDNOMODOWYCH LINII ŚWIATŁOWODOWYCH

### 1. WPROWADZENIE

Podstawowymi parametrami transmisyjnymi światłowodów przeznaczającymi o ich zastosowaniu w sieciach telekomunikacyjnych są tłumienność i dyspersja. Pierwszy determinuje długość odcinka regeneratorskiego, drugi - przepływność transmitowanego sygnału. Dla właściwego doboru parametrów linii, która będzie stosowana w określonym systemie teletransmisyjnym, należy dokonać bilansu mocy sygnału i tłumienności linii, a także bilansu czasu narastania impulsu oraz dyspersji światłowodu. Obliczenia mogą być niekiedy pominięte, na przykład w miejskich sieciach międzycentralowych, w których odległości między centralami nie przekraczają kilku kilometrów, a przepływność sygnału nie przewyższa 34 bądź 140 Mbit/s. Przykłady sieci, dla których należy dokonać bilansu, omówiono na końcu artykułu.

Zakres długości fal promieniowania elektromagnetycznego, który wykorzystuje się obecnie w telekomunikacji światłowodowej rozciąga się od 800 do 1600 nm, a więc w bliskiej podczerwieni. Zamiast długości fali  $\lambda$  spektroskopia posługuje się niekiedy jej odwrotnością  $1/\lambda = \tilde{\nu}$ , nazywaną liczbą falową (określaną w  $\text{cm}^{-1}$ ) bądź częstością  $\nu$  (podawaną w  $\text{s}^{-1}$ ), związaną z długością fali zależnością:

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

gdzie  $c$  jest prędkością rozchodzenia się fali w próżni:  $c = 2,99792456 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Liczba  $\tilde{\nu}$  wskazuje, ile fal mieści się na

---

<sup>\*)</sup> Autor pracuje w Centrum Badawczo-Wdrożeniowym "OPTOTRAKT" - Sp. z o.o. w Lublinie - w Zespole Koordynacyjnym w Warszawie.

drodze o długości 1 cm, a częstość  $\nu$  - ile fal wystąpi w jednostce czasu - jednej sekundzie. Dla fal sinusoidalnych zamiast częstości  $\nu$  stosuje się częstotliwość  $f$  wyrażoną w Hz. Zakres promieniowania może być więc określony także częstotliwością lub liczbą falową.

Promieniowanie elektromagnetyczne może być traktowane jako strumień cząstek-fotonów, pozbawionych masy spoczynkowej, ale niosących ściśle określoną w ergach energię:

$$E = h \cdot f,$$

gdzie  $h$  jest stałą Plancka ( $h = 6,622 \cdot 10^{-27}$  erg·s). Promieniowaniu o danej długości fali można zatem, wykorzystując zależności:

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV},$$

$$1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6021 \cdot 10^{-12} \text{ erg},$$

przyporządkować ściśle określoną energię w dżulach, ergach lub elektronowoltach. Dla promieniowania stosowanego w telekomunikacji światłowodowej wielkości te osiągają wartości:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 850 \text{ nm}, & \nu_1 &= 11764 \text{ cm}^{-1}, & f_1 &= 352,697 \text{ THz}, & E_1 &= 1,458 \text{ eV}, \\ \lambda_2 &= 1300 \text{ nm}, & \nu_2 &= 7692 \text{ cm}^{-1}, & f_2 &= 230,610 \text{ THz}, & E_2 &= 0,953 \text{ eV}, \\ \lambda_3 &= 1550 \text{ nm}, & \nu_3 &= 6452 \text{ cm}^{-1}, & f_3 &= 193,414 \text{ THz}, & E_3 &= 0,799 \text{ eV}. \end{aligned}$$

## 2. TŁUMIENNOŚĆ TORU ŚWIATŁOWODOWEGO

Na tłumienność toru światłowodowego składa się tłumienność włókien, połączeń stałych (spawów włókien światłowodowych) i złączy rozłączalnych. Odrębnym problemem jest efektywność sprzężenia źródła i odbiornika światła ze światłowodem, którego rozwiązaniem zajmują się producenci tych elementów.

Tłumienie mocy promieniowania w światłowodach zależy od właściwości materiałów, z których je wytworzono, a także konstrukcji, wymiarów i precyzji wykonania włókna. Straty wynikające z właści-



wości materiałów są powodowane absorpcją (pochłanianiem) i rozpraszaniem mocy fali elektromagnetycznej rozprzestrzeniającej się w dielektryku, natomiast konstrukcja oraz struktura włókna, a także niejednorodności zarówno struktury jak i konstrukcji, stanowią o stratach falowodowych.

Stosowane obecnie w kablach telekomunikacyjnych światłowody są wytwarzane z nieorganicznego, tlenkowego szkła krzemionkowego  $\text{SiO}_2$ , nazywanego popularnie szkłem kwarcowym (w laboratoriach przodujących konsorcjów telekomunikacyjnych trwają próby stosowania do światłowodów szkieł fluorowych na zakres fal o długości  $2 \div 4 \mu\text{m}$ ). Rdzeń światłowodu o większej, w stosunku do płaszcza, gęstości optycznej (większym współczynniku załamania  $n$ ) zawiera domieszkę tlenku germanu  $\text{GeO}_2$ .

Nieorganiczne szkło tlenkowe ma, jak każda substancja szklista, strukturę nieuporządkowaną. Jego składnikami są rodniki szkła - cząsteczki  $\text{SiO}_2$  i  $\text{GeO}_2$ , aniony tlenowe  $\text{O}_2$  - oraz tak zwane modyfikatory - tlenki wapnia  $\text{CaO}$ , sodu  $\text{Na}_2\text{O}$ , potasu  $\text{K}_2\text{O}$  itp. Aniony tlenowe tworzą mostki tlenowe (wysyczone) oraz jony tlenowe niewysyczone, łączące się z niepożądanymi domieszkami - jonami metali, a także jonami  $\text{OH}^-$ , będącymi śladami pary wodnej w masie szklanej. Ostatnie osiągnięcia technologii szkła krzemionkowego, preform światłowodowych, wyciągania i zabezpieczania włókna pozwoliły na uzyskanie światłowodów, które prawie nie zawierają niewysyczonych jonów tlenowych, a więc i domieszek metali - ich stężenia są pomijalnie małe. Nadal należy jednak uwzględniać występowanie w włóknach światłowodowych jonów  $\text{OH}^-$ .

### **2.1. Straty materiałowe w światłowodach krzemionkowych**

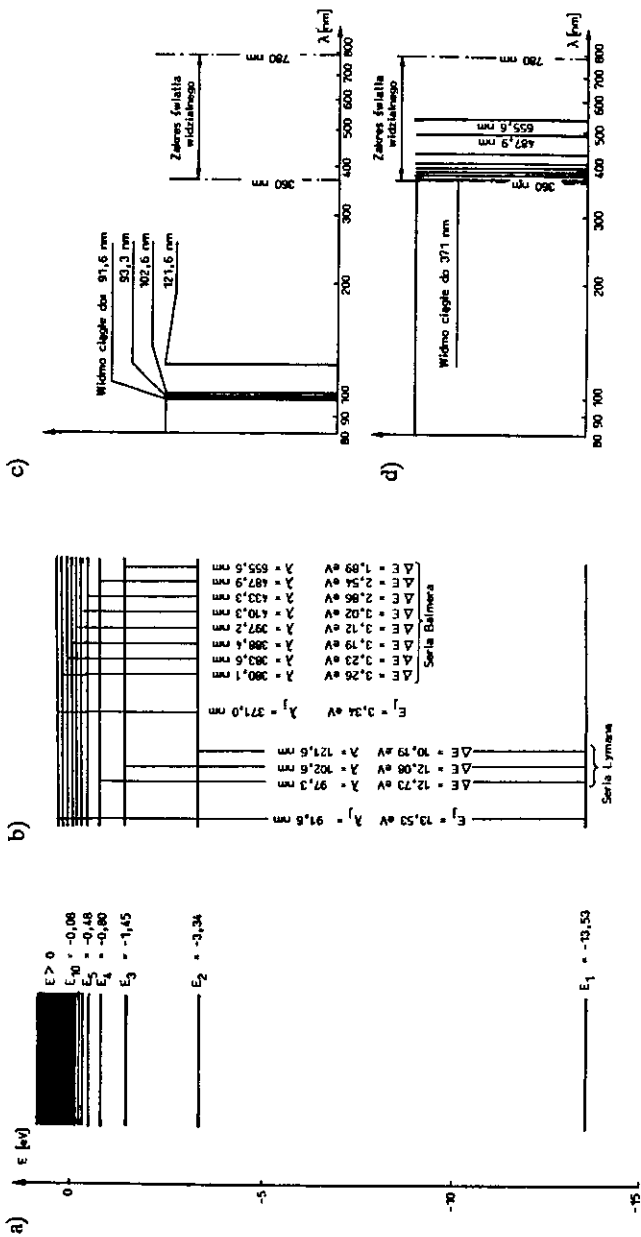
Zjawisko absorpcji elektronowej polega na pochłanianiu przez cząstki dielektryka promieniowania o pewnych długościach fal. Proces zachodzi, gdy foton energii promieniowania  $E$  jest równy różnicy

między poziomami energetycznymi nie w pełni obsadzonych powłok wewnętrznych cząstek, a także jonów ewentualnych domieszek. Pochłonięty foton jest wykorzystany do przeniesienia jednego elektronu na wyższy poziom energetyczny. Fala promieniowania absorbowanego przez dielektryk ma więc ściśle określoną, skwantowaną energię  $E$ , a zatem i długość  $\lambda$ .

Gdy energia niesiona przez promieniowanie jest równa lub wyższa od energii jonizacji  $E_j$  cząsteczki, powoduje oderwanie elektronu od cząsteczki. Widmo absorpcji elektronowej składa się więc z pasma ciągłego rozciągającego się powyżej energii jonizacji  $E_j$  (poniżej granicznej długości fali  $\lambda_j$ ) oraz z prążków odpowiadających wartościom różnicy energii stanu podstawowego  $E_1$  i stanów wzbudzonych  $E_n$  cząsteczki. Dla ilustracji zjawiska przykładowo przedstawiono na rys. 1 energie elektronu w pojedynczym atomie wodoru oraz elektronowe widma absorpcji w stanie podstawowym i wzbudzonym do pierwszego stanu  $E_2$ .

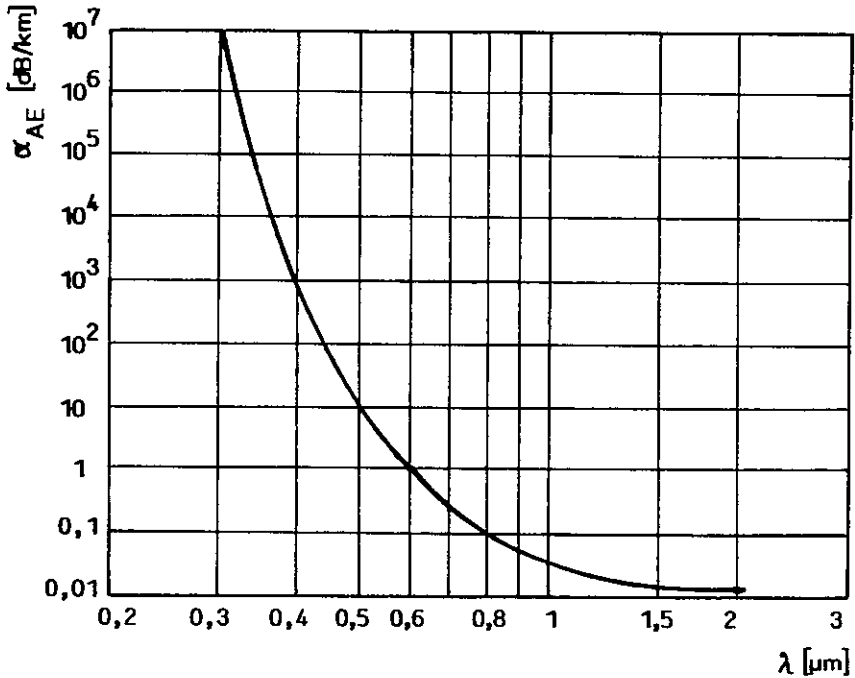
Wartość energii jonizacji pierwiastków wynosi od około 3,87 eV dla cezu, do około 21,47 eV dla sodu. Takie kwanty energii niesie promieniowanie o długości odpowiednio 320 i 58 nm.

Energie jonizacji głównych składników szkła krzemionkowego są następujące: tlenu  $E_o = 13,55$  eV; krzemu  $E_{si} = 8,12$  eV; germanu  $E_{Ge} = 8,09$  eV. Takim kwantom energii odpowiadają długości fal promieniowania:  $\lambda_o = 91,5$  nm;  $\lambda_{si} = 152,6$  nm;  $\lambda_{Ge} = 153,2$  nm. Energia jonizacji cząstek zbudowanych z tych pierwiastków nie jest równa energiom jonizacji ich atomów, ale można się spodziewać, że fale ultrafioletowe o długości mniejszej od 150 nm będą w masie szkła całkowicie pochłaniane, a prążki absorpcyjne o malejącej wysokości wystąpią dodatkowo dla fal o większych długościach. Badania szkła krzemionkowego potwierdziły, że dla  $\lambda = 500$  nm tłumienność wynosi około 10 dB/km, a dla  $\lambda = 300$  nm -  $10^7$  dB/km. Prawdopodobną tłumienność  $\alpha_{AE}$  spowodowaną absorpcją elektronową światłowodu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Poziomy energetyczne atomu wodoru

a) energie elektronu w atomie wodoru w stanie podstawowym  $E_1$  i w stanach wzbudzonych od  $E_2$  do  $E_{10}$ ;  
 b) podstawowe termy widmowe atomu wodoru: seria Lymana i seria Balmera - kwanty energii  $\Delta E$  i długości fali promieniowania o tej energii; c) absorpcyjne widmo energetyczne atomu wodoru w stanie podstawowym, leżące w dalekim nadfiolecie (seria Lymana); d) absorpcyjne widmo energetyczne atomu wodoru wzbudzonego do poziomu  $E_2 = -3,34$  eV, leżące w zakresie światła widzialnego (seria Balmera)

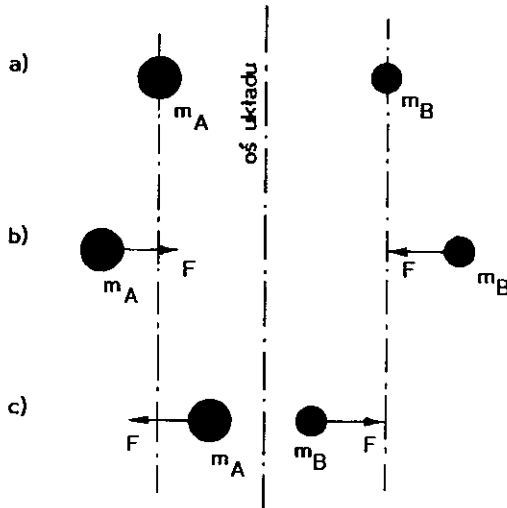


Rys. 2. Tłumiennosc jednostkowa  $\alpha_{AE}$  światłowodu wywołana absorpcją elektronową; tzw. warkocz (ogon) tłumienności w nadfiolecie; wartości teoretyczne - interpolacja pomijająca wąskie linie absorpcji cząsteczek wzbudzonych

Absorpcja oscylacyjna występuje w każdym ciele zbudowanym z cząsteczek wieloatomowych. Atomy wchodzące w skład cząsteczek wykonują ruchy oscylacyjne (drżania rezonansowe) względem ich położeń równowagi (patrz rys. 3). Każdemu drżaniu z częstotliwością  $f_{osc}$  można oczywiście przypisać energię  $E_{osc}$ . Energetyczne poziomy oscylacyjne są poziomami dyskretnymi (energia oscylacji jest skwantowana).

Dominującym rodniakiem szkłotwórczym w światłowodach jest krzemionka  $\text{SiO}_2$ . Częstotliwość rezonansowa cząsteczek krzemowych

wynosi około 24 THz, co odpowiada długości fali około  $12,5 \mu\text{m}$ . Występujące w szkłe jony OH- rezonują na częstotliwości około 110 THz - na fali o długości około  $2,7 \mu\text{m}$  [5]. Na tych długościach fal (średnia podczerwień) występują w światłowodach krzemionkowych stosunkowo wąskie, ale bardzo silne linie absorpcyjne - energia promieniowania jest pochłaniana do wzbudzenia oscylacji.



Rys. 3. Model oscylacji cząsteczki dwuatomowej o masach  $m_A$  i  $m_B$   
 a) stan równowagi układu; b) odchylenie na zewnątrz osi równowagi - siła sprężysta  $F$  działa w kierunku przeciwnym do odchylenia;  
 c) "ściśnięcie" atomów - siła sprężysta  $F$  działa w kierunku odpychania

W układzie cząsteczek  $\text{SiO}_2$  i jonów OH- drgania oscylacyjne występują nie tylko przy częstotliwościach rezonansowych, ale także przy wyższych harmonicznych każdego drgającego układu, a także częstotliwościach spełniających warunek:

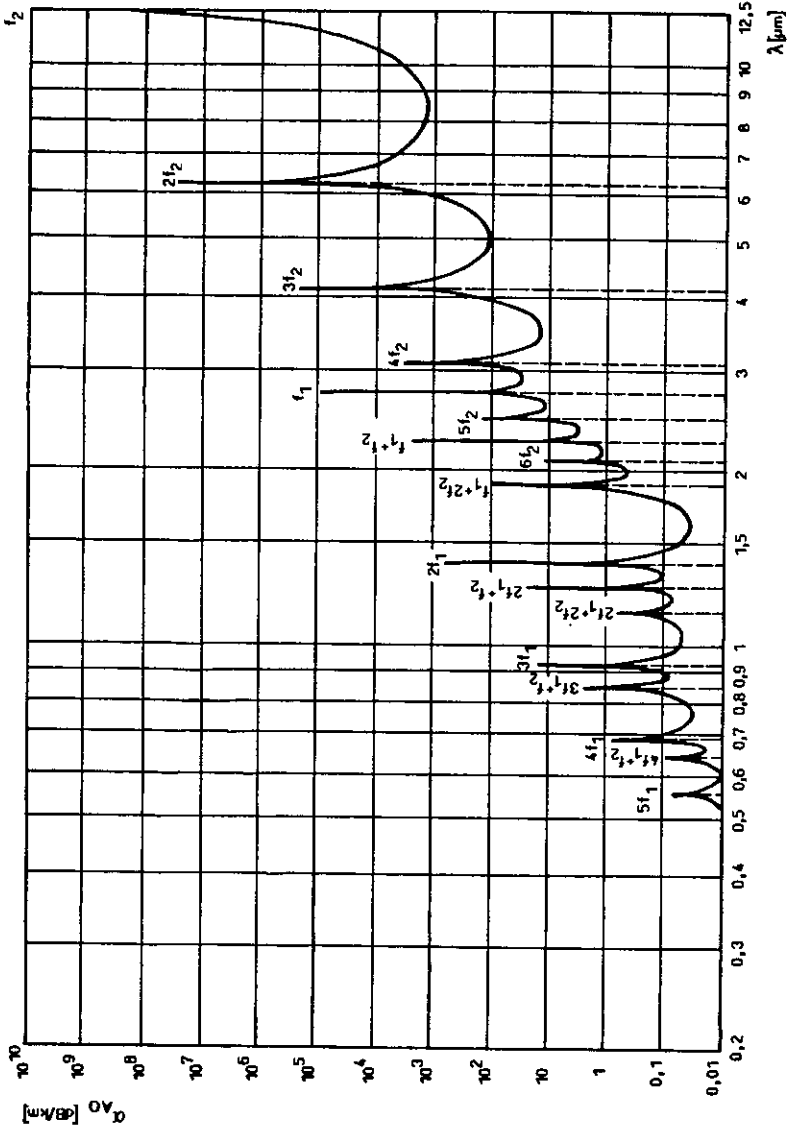
$$f = p \cdot f_1 + q \cdot f_2,$$

gdzie:  $f_1 = 1,1 \cdot 10^{14}$  Hz;  $f_2 = 2,4 \cdot 10^{13}$  Hz;  $p = 1,2,3,4$  i  $5$ ;  $q = 0,1,2$ .

Charakterystyczne maksima absorpcji oscylacyjnej występujące teoretycznie w światłowodzie zawarto w tabelicy 1, a przebieg tłumienności  $\alpha_{AO}$ , będącej skutkiem tej absorpcji, zobrazowano na rys. 4. Ponieważ struktura szkła nie jest z natury ściśle periodyczna i stanowi sieć nieuporządkowaną, pojawiające się w rzeczywistości maksima tłumienności są tylko w przybliżeniu położone przy obliczonych długościach fal.

Tablica 1  
Prążki absorpcji oscylacyjnej w szkłe krzemionkowym

Częstotliwość $f$		Długość fali	Tłumienność jednostkowa
Symbol	Wartość [THz]	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\alpha_{AO}$ [dB/km]
$f_2$	24	12,5	$10^{10}$
$2f_2$	48	6,25	$3 \cdot 10^7$
$3f_2$	72	4,16	$2,5 \cdot 10^5$
$4f_2$	96	3,12	$3 \cdot 10^3$
$5f_2$	120	2,5	140
$6f_2$	144	2,08	13
$f_1$	110	2,7	$10^5$
$f_1 + f_2$	134	2,24	$2 \cdot 10^3$
$f_1 + 2f_2$	158	1,9	100
$2f_1$	220	1,36	650
$2f_1 + f_2$	244	1,23	25
$2f_1 + 2f_2$	268	1,12	0,6
$3f_1$	330	0,91	18
$3f_1 + f_2$	354	0,85	2
$3f_1 + 2f_2$	376	0,79	-
$4f_1$	440	0,68	0,7
$4f_1 + f_2$	464	0,65	0,1
$4f_1 + 2f_2$	488	0,61	-
$5f_1$	550	0,55	0,08
$5f_1 + f_2$	574	0,52	-
$5f_1 + 2f_2$	598	0,5	-



Rys. 4. Tłumiennosc jednostkowa  $\alpha_{A0}$  światłowodu jednomodowego (widmo absorpcji oscylacyjnej); warkocz (ogon) tłumienności w podczterwieni; wartości teoretyczne

**Rozpraszanie promieniowania elektromagnetycznego w szkle krzemionkowym** jest zjawiskiem naturalnym, występującym w każdym ciele nieorganicznym. Promieniowanie przechodzące przez ośrodki dla promieniowania przezroczyste, ale zawierające bezładnie zawieszony cząstki odległe od siebie dalej niż długość fali, ulega odbijaniu od tych cząstek. W szkle krzemionkowym cząstkami takimi są domieszki, ale rozpraszanie następuje także na skutek fluktuacji gęstości i fluktuacji składu masy szklanej. Fale odbite od cząstek modyfikatorów i zagęszczonych skupisk masy, mając różne kierunki i fazy, bardziej lub mniej wzmacniają się interferencyjnie. Pojawia się dzięki temu tzw. promieniowanie rozproszone o kierunku różnym od kierunku promieniowania pierwotnego. Częstość tego promieniowania jest identyczna z częstością wiązki pierwotnej, a amplituda wypromieniowanej fali jest proporcjonalna do kwadratu  $v^2$ . Natężenie światła mierzone gęstością strumienia energii jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy, tak więc natężenie światła rozproszonego jest proporcjonalne do czwartej potęgi częstości, czyli odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali:

$$I \sim v^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}.$$

Związek ten nosi nazwę prawa Rayleigha, a naturalne rozpraszanie podlegające temu procesowi - rozpraszanie Rayleigha.

Istnieją także inne mechanizmy rozpraszania promieniowania w szkle; można do nich zaliczyć rozpraszanie Mie, stymulowane rozpraszanie Ramana oraz stymulowane rozpraszanie Brillouina, przyjmuje się jednak, że w światłowodach, w których nadajniki pracują z poziomem mocy od 0 dBm do -4 dBm (1 mW ÷ 0,398 mW), można je pominąć [1, 5].

W szkle krzemionkowym o najwyższej nawet czystości rozpraszanie Rayleigha wywołuje straty (w dB/km) określone zależnością:



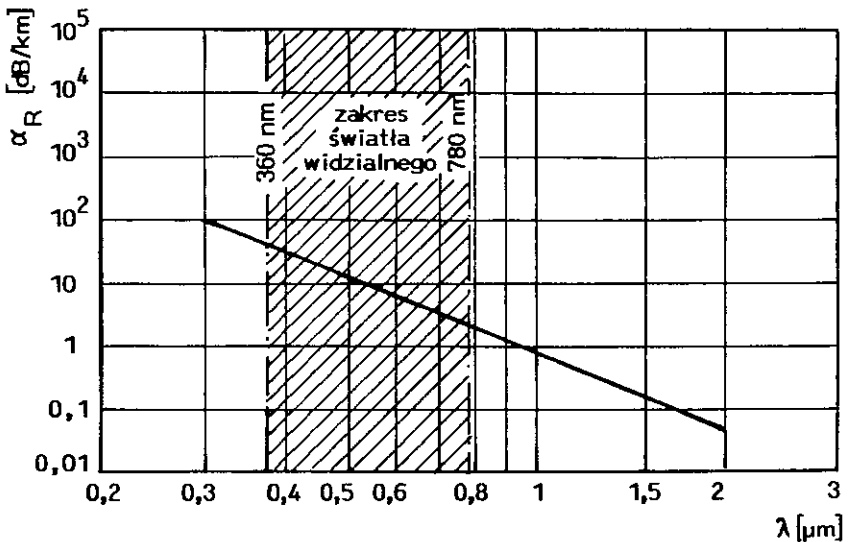
$$\alpha_R = 11,4 \left( \frac{514,5}{\lambda} \right)^4,$$

gdzie  $\lambda$  jest wyrażona w nomometrach [5]. Obliczone z tej zależności teoretyczne wartości tłumienności jednostkowych światłowodów zebrano w tabelicy 2; zilustrowano je także na rys. 5.

Tabela 2

Tłumienność jednostkowa światłowodu  
spowodowana rozpraszaniem Rayleigha

Długość fali światła $\lambda$ [nm]	300	360	600	780	850	1300	1550	2000
Tłumienność jednostkowa $\alpha_R$ [dB/km]	98,6	47,6	6,16	2,16	1,53	0,28	0,14	0,05



Rys. 5. Tłumienność jednostkowa  $\alpha_R$  światłowodu wywołana naturalnym rozpraszaniem Rayleigha; wartości teoretyczne

## 2.2. Falowodowe straty mocy w światłowodzie

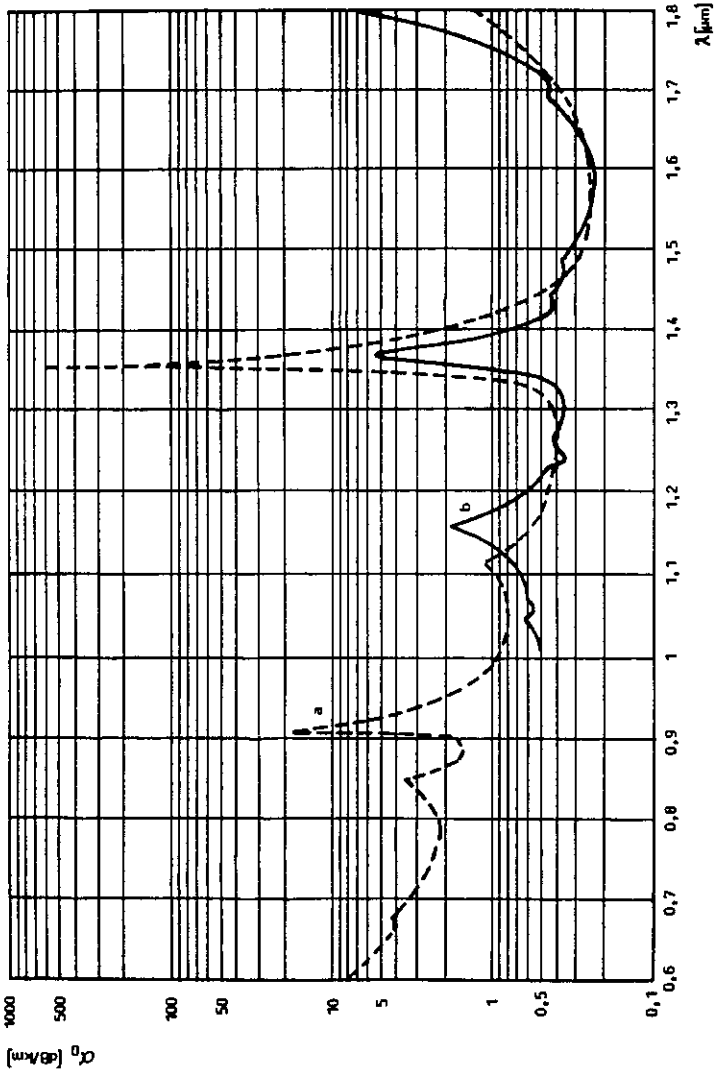
Falowodowe straty mocy promieniowania prowadzonego światłowodem włóknistym o skokowej zmianie współczynnika załamania są spowodowane naturalną "nieostrością" granicy rdzeń - płaszcz i wszelkimi nieregularnościami tej granicy. Wywołują je także mikro-zgięcia i mikropeknięcia włókna oraz zgięcia włókna układanego w kablu i zgięcia kabla układanego w kanalizacji [6, 7].

Źródłem mikro-zgięć i niejednorodności granicy rdzeń - płaszcz są niedoskonałości technologii wytwarzania struktury światłowodu. Rozpraszanie promieniowania na zgięciach i mikropeknięciach może być wynikiem niestarannego wykonania kabla (skręt i naciąganie włókien), a także zginania i naciągania kabla podczas budowy linii kablowych [8]. Powstają one również przez osiadanie pyłów i pary wodnej na powierzchni wyciąganego włókna przed zabezpieczeniem odpowiednimi lakierami. Można temu zapobiec stosując właściwą technologię wyciągania i stopień czystości pomieszczeń.

W właściwie wyprodukowanym kablu i wybudowanej linii straty falowodowe są stosunkowo małe. Przyjmuje się, że nie przekraczają wartości 0,03 dB/km i są niezależne od długości fali promieniowania [1]. Na rys. 6 przedstawiono pomierzoną tłumienność jednostkową  $\alpha_0$  jednomodowego kabla światłowodowego o długości 2259 m. Zwraca uwagę fakt, że sumaryczna tłumienność, na którą składają się zarówno straty materiałowe jak i falowodowe, praktycznie nie odbiega od wartości obliczonych teoretycznie strat materiałowych. Dla wykorzystywanych w technice światłowodowej: fali promieniowania o długości 1,3  $\mu\text{m}$  tłumienność  $\alpha_0 < 0,4$  dB/km, a dla fali 1,55  $\mu\text{m}$  -  $\alpha_0 < 0,25$  dB/km.

## 2.3. Tłumienność złączy

Wybudowanie linii światłowodowej o długości przekraczającej jeden odcinek fabrykacyjny kabla wymaga trwałego połączenia włó-



Rys. 6. Tłumiennosc jednostkowa  $\alpha_0$  światłowodu jednomodowego  
 a) wartości stanowiące sumę tłumienności przedstawionych na rysunkach 2, 4 i 5; b) wartości mierzone  
 tłumienności włókna światłowodowego w kablu o długości 2259 m nawiniętego na bęben kablowy  
 (pomiarów dokonano w Ośrodku Techniki Optotelekomunikacyjnej TP SA w Lublinie)

kien różnych odcinków. Istnieje kilka sposobów łączenia, z których najpopularniejszym, bo gwarantującym uzyskanie najmniejszej tłumienności, jest spawanie (zgrzewanie) włókien.

Na tłumienność połączeń spawanych wpływa jednorodność włókien i precyzja wykonania zgrzewu. Podstawowymi parametrami włókien decydującymi o jakości spawu są:

- rozkład współczynnika załamania,
- apertura numeryczna (kąt akceptacji),
- średnica rdzenia i płaszczka,
- niekoncentryczność położenia rdzenia,
- eliptyczność rdzenia.

Połączenie włókien powinno zapewniać odpowiednią współosiowość obu włókien, nie powinno wystąpić przesunięcie radialne ani poosiowe rozsunięcie włókien, a także nachylenie czoł. Obróbka płaszczyzn czoł (prostopadłość do osi, płaskość, gładkość) powinna być wykonana bardzo starannie i precyzyjnie [6, 8].

Tłumienność skuteczna poprawnie wykonanego złącza stałego nie powinna przekraczać wartości  $a_w = 0,15$  dB. Niektóre projekty kablowych linii światłowodowych zawierają nawet wymaganie, by średnia tłumienność skuteczna wybudowanej linii dalekosiężnej dla fali promieniowania  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$  nie przekraczała wartości  $A_s \leq 0,4$  dB/km.

Ponieważ długość standardowych odcinków fabrycznych kabla wynosi zazwyczaj  $2100 \pm 100$  lub  $4200 \pm 100$  m (niekiedy także  $6300 \pm 100$  m) i na 1 km linii przypada tylko połowa (lub mniej) tłumienności jednego spawu, to średnia tłumienność jednostkowa rozwiniętego kabla dobrej jakości wynosi  $\alpha_o \leq 0,35$  dB/km, a tłumienność poprawnie wykonanego spawu zawiera się w granicach  $0,07 \div 0,10$  dB. Wymaganie takie nie przekracza granic rozsądku.

Norma Zakładowa Telekomunikacji Polskiej SA dotycząca budowy dalekosiężnych linii światłowodowych wymaga, by tłumienność połączenia spawanego nie przekraczała 0,15 dB, ale dopuszcza ma-

ksymalną wartość tłumienności 0,3 dB, jeżeli trzy kolejne próby spawania nie pozwoliły na uzyskanie mniejszej wartości. Złącza takich nie może być jednak w odcinku regeneratorskim więcej niż trzy, pod warunkiem uwzględnienia ich w bilansie mocy [3].

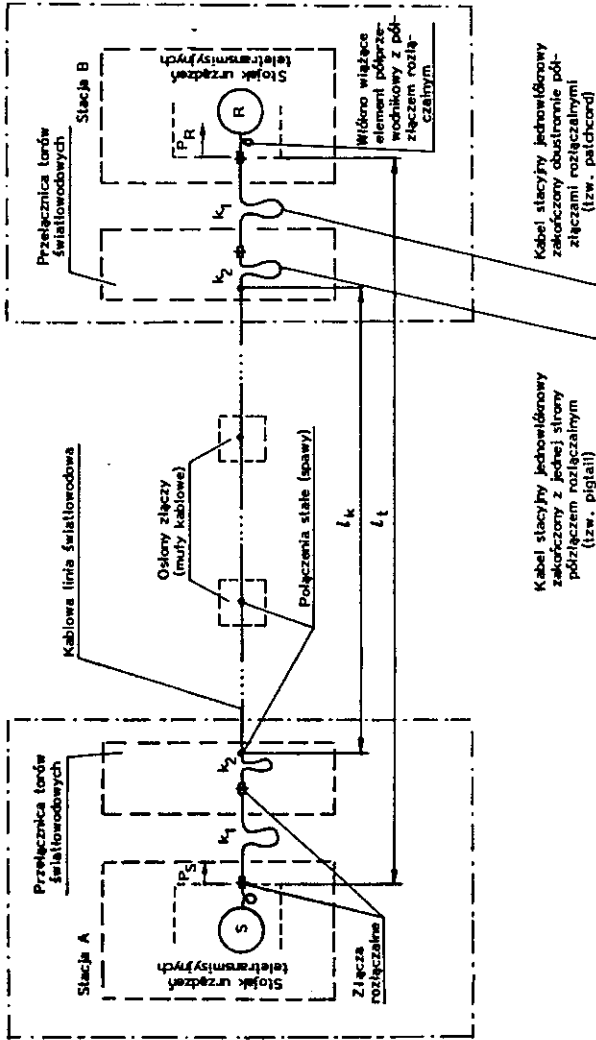
**Tłumienność stosowanych w telekomunikacji złączy rozłączalnych** mieści się w granicach  $0,5 \div 1,0$  dB, w zależności od konstrukcji i precyzji wykonania. Opracowano wiele konstrukcji złączy, które można podzielić na trzy grupy różniące się sposobem centrowania włókna [6]. Stosowane obecnie w Polsce złącza typu FC-PC dla światłowodów jednomodowych zapewniają uzyskanie średniej tłumienności połączenia  $a_z \leq 0,6$  dB. Taką wartość tłumienności złącza rozłączalnego dopuszcza norma TP SA.

### 3. BILANS MOCY I TŁUMIENNOŚCI TORU ŚWIATŁOWODOWEGO

#### 3.1. Tor światłowodowy

Tor światłowodowy łączący przetwornik elektrooptyczny - nadajnik sygnałów świetlnych  $S$  z przetwornikiem optoelektrycznym sygnałów  $R$  składa się z kilku odcinków. Drogę sygnałów zobrazowano na rys. 7.

Nadajnik sygnałów optycznych - laser półprzewodnikowy oraz odbiornik - fotodiody są wyposażone w odcinki włókna światłowodowego zakończonego półzłączką rozłączalną FC-PC. Efektywność sprzężenia światłowodu ze źródłem i fotodetekтором, wyrażoną kątem akceptacji i stosunkiem mocy wprowadzonej do światłowodu (lub z niego uzyskanej), zapewnia producent elementów półprzewodnikowych w procesie technologicznym [2, 6]. Moc nadawana  $P_S$  jest mierzona na wyjściu półzłączki umieszczonej zazwyczaj na płycie czołowej modułu mieszczącego laser w urządzeniu teletransmisyjnym, a moc odbierana  $P_R$  - na wejściu półzłączki przy fotodiodzie.



Rys. 7. Schemat teletransmisyjnego traktu światłowodowego

S - nadajnik - laser półprzewodnikowy, R - odbiornik - fotodioda ze wzmacniaczem wstępnym,  $P_S$  - moc optyczna nadajnika na wyjściu półzłączki rozłączalnej [w dBm],  $P_R$  - czułość odbiorcza fotodiody wraz ze wzmacniaczem [w dBm],  $l_k$  - długość trasowa kabla [w km],  $l_t$  - długość odcinka regeneratorowego, wraz z kablami stacyjnymi i półzłączkami [w km],  $k_1$  - kabel stacyjny zakończony obustronnie złączem rozłączalnym (patchcord),  $k_2$  - kabel stacyjny przyspawany do włókna kabla liniowego (pigtail)

Wielowłoknowy liniowy kabel światłowodowy jest wprowadzany do stacji teletransmisyjnej bezpośrednio do przełącznicy torów światłowodowych wyposażonej w głowice (tzw. mufy) stacyjne. Poszczególne włókna światłowodowe kabla dalekosiężnego są w głowicach zgrzewane z krótkimi, giętkimi, jednowłoknowymi kablami stacyjnymi (tzw. pigtailami) zakończonymi z przeciwnej strony półzłączkami rozłączalnymi, mocowanymi na odpowiednich tablicach.

Półzłączki urządzeniowe są łączone z półzłączkami kablowymi za pomocą jednowłoknowych kabli stacyjnych odpowiedniej długości, zakończonych obustronnie półzłączkami (tzw. patchcordami).

Teletransmisyjny trakt światłowodowy zawiera co najmniej cztery złącza rozłączalne oraz  $N + 1$  połączeń stałych (spawów), gdzie  $N$  jest liczbą odcinków kabla, użytych do budowy linii.

Tłumienność całego toru światłowodowego  $A_t$  jako drogi sygnału od nadajnika  $S$  do odbiornika  $R$  składa się z tłumienności skutecznej linii  $A_1$  oraz tłumienności kabli stacyjnych wraz z tłumiennością złączy rozłączalnych:

$$A_t = A_1 + 2 \cdot a_z + 2 \cdot a_{k1},$$

$$A_1 = 2 \cdot a_z + 2 \cdot a_{k2} + (N + 1) a_w + \alpha_k (l_k + l_p),$$

gdzie:

- $a_z$  - tłumienność złącza rozłączalnego [w dB],
- $a_{k1}$  - tłumienność kabli stacyjnych - patchcordów [w dB],
- $a_{k2}$  - tłumienność kabli stacyjnych - pigtaili [w dB],
- $N$  - liczba odcinków kabla użytego do budowy linii,
- $a_w$  - tłumienność połączenia stałego (spawu) [w dB],
- $\alpha_k$  - tłumienność jednostkowa (na jednostkę długości) gotowego kabla [w dB/km],
- $l_k$  - długość trasowa kabla [w km],
- $l_p$  - łączna długość kabla w obiektach oraz jego zapasów (w studniach kablowych, komorach kablowych i salach aparatowych stacji teletransmisyjnych), a także zapasów światłowodów

(w paletach osłon złączowych - muf kablowych), zapasów wynikających z falowania kabla i stosowanego w kablu skrętu włókien - razem wziętych [w km].

Na ogół przyjmuje się, że w obliczeniach tłumienności toru  $A$ , można pominąć tłumienność kabli stacyjnych  $a_{k1}$  i  $a_{k2}$ , jako wartości mało znaczących. Zakłada się, że długość zapasów  $l_p$  powinna wynosić  $6 \div 10\%$  długości trasowej kabla  $l_k$ , a więc maksymalna długość odcinka regeneratorskiego (toru światłowodowego)  $l_t$  wynosi:

$$l_t = l_k + l_p = 1,1 l_k.$$

Wzór na tłumienność toru  $A$ , ma wobec tego postać:

$$A_t = n_z \cdot a_z + n_w \cdot a_w + 1,1 \cdot \alpha_k \cdot l_k,$$

gdzie  $n_z$  jest łączną liczbą złączy rozłączalnych w torze (minimalnie, jak wynika z rys. 7, liczba ta wynosi 4),  $n_w$  - liczbą połączeń stałych (minimum  $n_w = N + 1$ ).

### 3.2. Budżet mocy

Budżet mocy systemu  $P$  wyrażony w dB jest różnicą mocy nadajnika  $P_S$  i czułości fotodetektora  $P_R$ , pomniejszoną o rezerwę  $d_p$  i stratę mocy wynikającą z dyspersji chromatycznej  $\delta_p$  (wartości podawane przez producentów urządzeń teletransmisyjnych).

$$P = P_S - P_R - d_p - \delta_p,$$

gdzie:

$P_S$  - moc optyczna nadajnika na wyjściu półzłączki rozłączalnej urządzenia teletransmisyjnego (moc wprowadzona do światłowodu) [w dBm],

$P_R$  - czułość fotodiody wraz ze wzmacniaczem, przy dopuszczalnej stopie błędów  $10^{-9}$  (moc optyczna odbierana na wejściu półzłączki) [w dBm],



$d_p$  - margines, wyrażony w dB, wynikający z degradacji urządzeń teletransmisyjnych, na skutek starzenia się elementów, wahań temperatury itp.,

$\delta_p$  - straty mocy wynikające z dyspersji chromatycznej [w dB].

Bilans budżetu mocy i tłumienności toru określa się z zależności:

$$P \geq A_t + a_r,$$

gdzie:  $a_r$  jest wyrażoną w dB rezerwą tłumienności, na którą składają się dodatkowe połączenia stałe (spawy światłowodów) i wstawki kablowe powstające przy usuwaniu uszkodzeń kabla, a także rezerwa na starzenie się światłowodów. Rezerwa ta nie powinna być mniejsza od 10% tłumienności toru  $A_t$ .

Bilans mocy określa wobec tego nierówność:

$$P \geq 1,1 A_t,$$

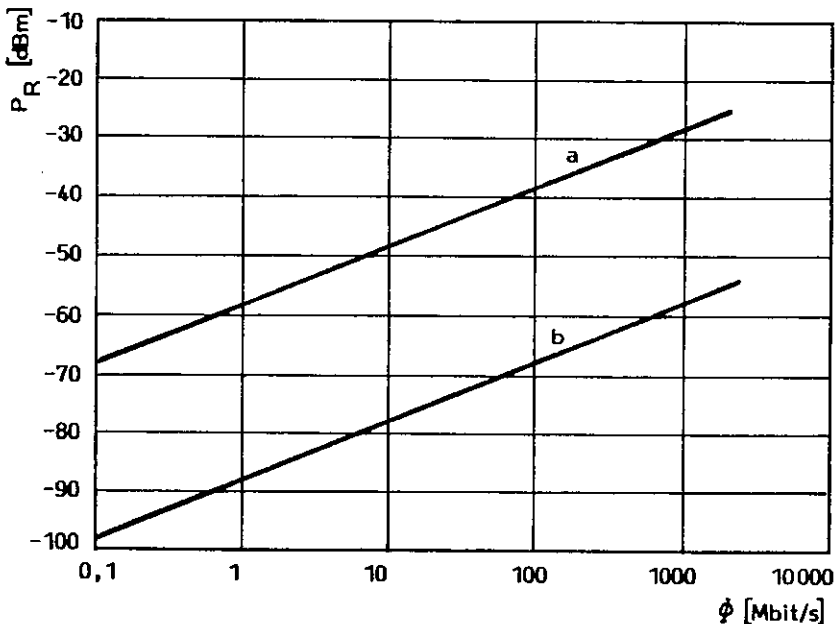
$$P_s - P_R - d_p - \delta_p \geq 1,1 (n_z a_z + n_w a_w + 1,1 \alpha_k l_k).$$

Przekształcając tę zależność można wyznaczyć maksymalną długość trasową odcinka regeneratorskiego ograniczoną bilansem mocy dla danego systemu. Przyjmując założenia, że do budowy linii będą zastosowane kable o odcinkach fabrykacyjnych  $2100 \pm 100$  m, liczba złączy rozłączalnych  $a_z = 4$  (jak na schemacie z rys. 7) oraz że kabel nie będzie dzielony na rozdzielane sekcje, a więc liczba połączeń stałych  $n_w = N + 1$ , wyrażenie na maksymalną długość linii uzyska postać:

$$l_k(\alpha_k) \leq \frac{0,91 (P_s - P_R - d_p - \delta_p) - n_z a_z - a_w}{0,55 a_w + 1,1 \alpha_k}.$$

Budżet mocy  $P$  ma oczywisty, bezpośredni wpływ na długość odcinka regeneratorskiego. Od góry budżet jest ograniczony poziomem mocy nadawczej  $P_s$ . Na ogół moc nadajnika zawiera się w gra-

nicach od  $-2$  dBm do  $-4$  dBm dla laserów o mocy większej i około  $-15$  dBm dla mocy obniżonej. Budowane są także przez niektóre firmy nadajniki o mocy od  $+3$  dBm do  $+6$  dBm. Zwiększenie mocy systemów może być jednak źródłem wzrastania w światłowodzie rozpraszania Brillouina, a więc powiększania jego tłumienności niweczącego zysk mocy. Zwiększanie natomiast czułości fotodiody odbiorczej jest ograniczone jej szumem kwantowym i termicznym. Czułość odbiornika sygnałów optycznych dla  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  przy stopie błędów  $10^{-9}$ , z uwzględnieniem dopuszczalnego odstepu od szumu kwantowego i termicznego, przedstawiono na rys. 8 [4].



Rys. 8. Czułość odbiornika optoelektrycznego w funkcji przepływności  $\Phi$  sygnału przy długości fali  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  i stopie błędów  $10^{-9}$

- a) czułość odbiornika z uwzględnieniem szumu kwantowego i termicznego;  
 b) czułość odbiornika ograniczona szumem kwantowym

Rozwiązaniem problemu jest stosowanie odbiorczych wzmacniaczy optycznych. Uśrednione parametry systemów teletransmisyjnych o różnych przepływnościach podano przykładowo na str. 40.

Z danych tych wynika, że w trzecim oknie transmisyjnym  $\lambda_3 = 1,5 \mu\text{m}$  długość linii wynosi od około 20 do 70 km. Dla osiągnięcia maksymalnych możliwych zasięgów linii jej budowniczy powinni w miarę możliwości stosować długie odcinki fabryczne kabla, co pozwoli na zmniejszenie liczby połączeń stałych  $n_w$ . Połączenia (spawy) powinny być wykonywane bardzo starannie, a po wykonaniu - zabezpieczone przed działaniem wilgoci.

W torze dalekosiężnym nie powinno być więcej niż cztery złącza rozłączalne (rys. 7). Tłumienność tych złączy ( $A_z = 4 \cdot 0,6 \text{ dB}$ ) jest równa w trzecim oknie transmisyjnym tłumienności światłowodu o długości prawie 10 km.

#### 4. DISPERSJA ŚWIATŁOWODÓW

Dyspersja określa zmianę współczynnika załamania  $n$  (a więc także prędkości światła  $v = \frac{c}{n}$ ) w danym ośrodku przezroczystym, w funkcji długości fali promieniowania  $\lambda$ :

$$D = \frac{dn}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} n(\lambda).$$

Zależność współczynnika załamania  $n$  od długości fali  $\lambda$  jest przyczyną znanego zjawiska rozszczepienia światła widzialnego przechodzącego przez szkło. Jest również przyczyną występowania różnicy w czasie przejścia promieni o różnej długości fali przez ośrodek przezroczysty.

W telekomunikacji światłowodowej stosowane źródła światła nie są monochromatyczne, ale zawierają kilka składowych spektralnych. Energia w światłowodzie jest zatem przenoszona przez paczkę fal z prędkością grupową  $v_g$ :

$$v_g = \frac{c}{M},$$

gdzie  $M$  jest grupowym współczynnikiem załamania:

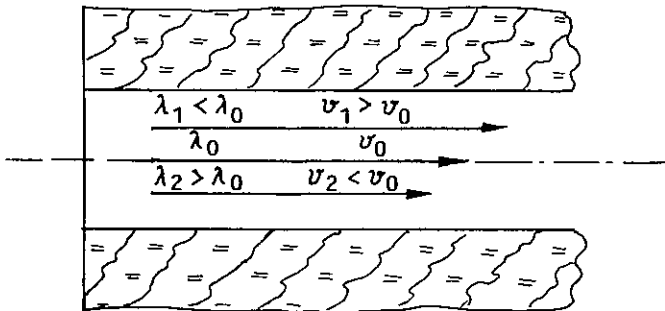
$$M = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}.$$

Gdyby współczynnik załamania  $n$  nie zależał od długości fali  $\lambda$ , to słuszne byłyby równości:  $M = n$  i  $v_g = v$ . Szkło krzemionkowe jest jednak ośrodkiem dyspersyjnym, składowe sygnały przechodzą przezeń z różnymi prędkościami  $v \neq v_g$ , a w rezultacie w różnym czasie i sygnał ulega zniekształceniom.

Dla materiału jednorodnego wielkość:

$$Dm = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{1}{c} \frac{dM}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}$$

nazwano dyspersją materiałową [1, 4]. Wskutek dyspersji materiałowej składowe impulsy optycznego o różnych długościach fal rozchodzą się wzdłuż tych samych dróg z różnymi prędkościami  $v$  i w tym samym czasie przejdą różne odcinki drogi (rys. 9). Z prze-



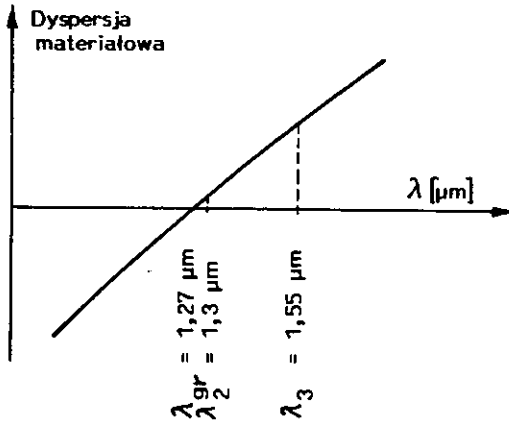
Rys. 9. Dyspersja materiałowa. Poglądowy obraz dróg fazowych składowych impulsu optycznego o falach  $\lambda > 1,27 \mu\text{m}$

prorowadzonych obliczeń wynika, że dla szkła krzemionkowego grupy współczynnik załamania  $M$  osiąga wartość minimalną dla fali promieniowania o długości  $\lambda_{gr} \approx 1,27 \mu\text{m}$  (tablica 3). Dyspersja materiałowa jako pochodna  $dM/d\lambda$  ma więc wartości ujemne dla  $\lambda < \lambda_{gr}$  i dodatnie dla  $\lambda > \lambda_{gr}$  (rys. 10). Oznacza to, że poniżej granicznej długości  $\lambda_{gr}$  "krótsze" składowe impulsu optycznego mają mniejszą prędkość od składowych "dłuższych", a powyżej tej granicy składowe "krótsze" mają prędkość większą. Na rys. 11 przedstawiono zależność współczynników  $n$  i  $M$  oraz prędkości grupowej  $v_g$  od długości fali  $\lambda$  [1].

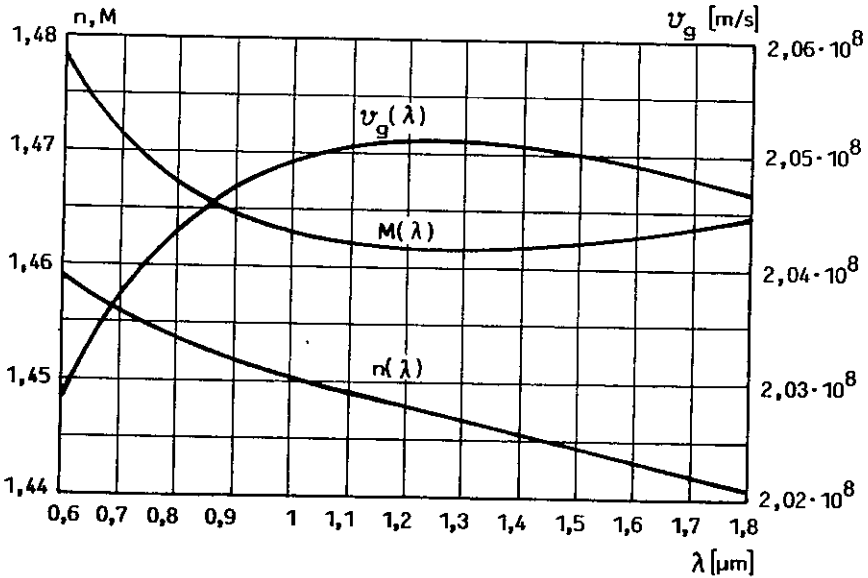
Tablica 3

Zależność współczynnika załamania  $n$ , grupowego współczynnika załamania  $M$  i prędkości grupowej  $v_g$  od długości fali  $\lambda$

$\lambda$ [nm]	$n$	$M$	$v_g$ [ $\text{km s}^{-1}$ ]
600	1,4580	1,4780	202 836,6
700	1,4553	1,4712	203 774,1
800	1,4533	1,4671	204 343,6
900	1,4518	1,4646	204 692,4
1000	1,4504	1,4630	204 916,2
1100	1,4492	1,4621	205 042,4
1200	1,4481	1,4617	205 098,5
1300	1,4469	1,4616	205 112,5
1400	1,4458	1,4618	205 084,5
1500	1,4446	1,4623	205 014,3
1600	1,4434	1,4629	204 930,2
1700	1,4422	1,4638	204 804,2
1800	1,4409	1,4648	204 664,4

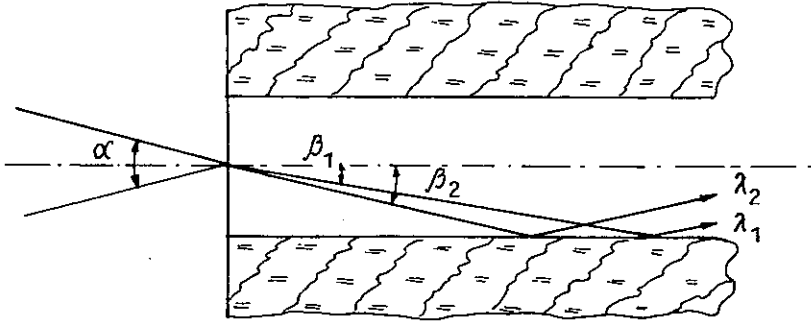


Rys. 10. Orientacyjny przebieg dyspersji materiałowej w funkcji długości fali  $\lambda$



Rys. 11. Zależność współczynnika załamania  $n$ , grupowego współczynnika załamania  $M$  i prędkości grupowej  $v_g$  od długości fali  $\lambda$  dla szkła krzemionkowego

Podobne efekty dla transmisji sygnału optycznego składającego się z kilku składowych spektralnych daje struktura światłowodu włóknistego. Ponieważ dla określonego modu składowe impulsu optycznego, różniące się długością fal, są wprowadzane do rdzenia i odbijają się od nieostrej granicy rdzeń - płaszcz pod różnymi kątami, to mają różne drogi przejścia przez światłowód i różne prędkości wzdłużne propagacji (rys. 12). Następuje przesunięcie w czasie składowych spektralnych impulsu światła. Przyczynę tego nazwano dyspersją falowodową. Dla zakresu fal od 0,6 do 2  $\mu\text{m}$  ma ona wartości ujemne (rys. 13).

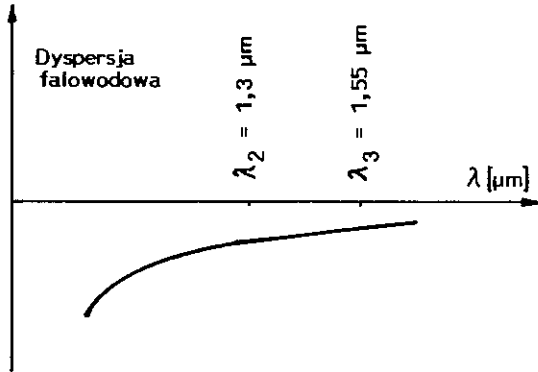


Rys. 12. Dyspersja falowodowa. Prowadzenie składowych impulsu optycznego o różnych długościach  $\lambda_1 < \lambda_2$  należących do tego samego modu

$\alpha$  - kąt akceptacji światłowodu,  $\beta_1$  - kąt załamania składowej o krótszej długości fali ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ),  $\beta_2$  - kąt załamania składowej o dłuższej fali ( $\lambda_2 > \lambda_1$ )

W światłowodzie jednomodowym oba rodzaje dyspersji stanowią tzw. dyspersję modową, uwzględniającą wpływ struktury światłowodu i materiału. Dla pewnej długości fali wpływy materiału i struktury wzajemnie się kompensują tak, że dyspersja modowa ma wartość zerową. Nie jest ona jednak algebraiczną sumą dyspersji materiałowej

i falowodowej, a ponieważ ma charakter częstotliwościowy jest często w literaturze zwana dyspersją monochromatyczną.

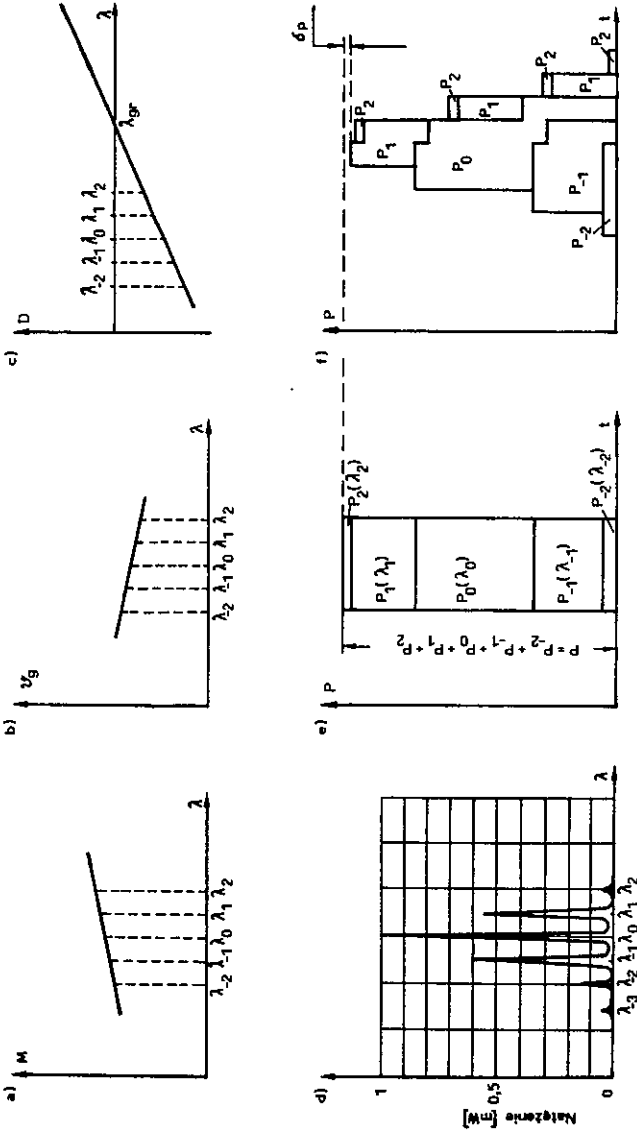


Rys. 13. Zmiany dyspersji falowodowej w funkcji długości fali  $\lambda$

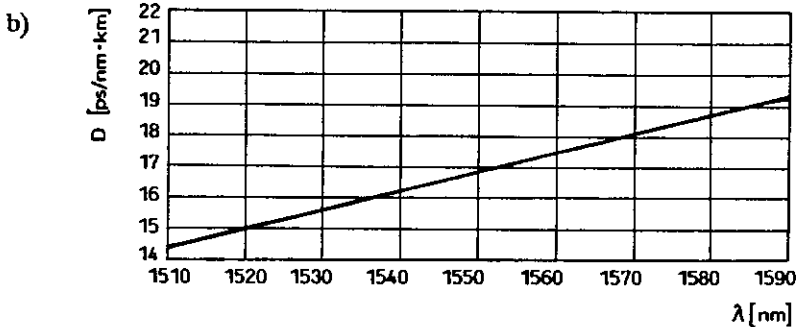
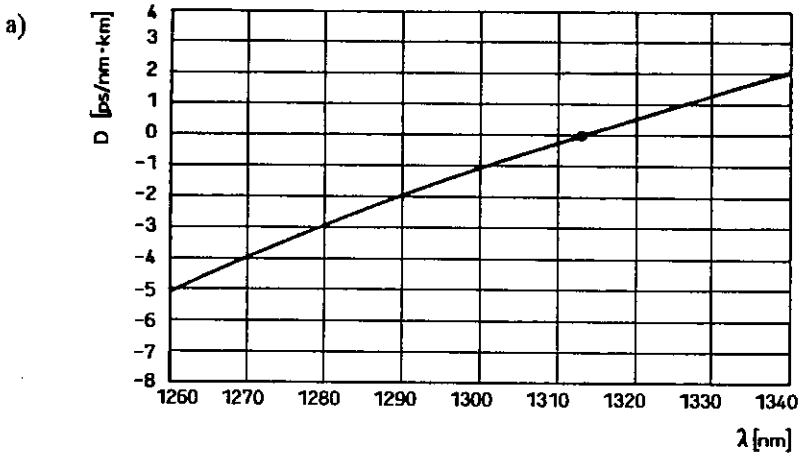
Skutkiem istnienia dyspersji i wywołanej nią różnicy czasu przejścia poszczególnych składowych spektralnych impulsu optycznego jest jego poszerzenie (rozmycie). Mechanizm powstawania poszerzenia impulsu pokazano na rys. 14.

Na rys. 14d przedstawiono przykładowo charakterystykę spektralną lasera jednomodowego firmy Laser Diode Inc. serii SCW-1300 [2]. Na impuls optyczny (rys. 14e) składa się tu w uproszczeniu pięć składowych  $P_{-2} \div P_2$  niosących moc proporcjonalną do natężenia linii spektralnej lasera. Ponieważ poszczególne składowe mają różne prędkości propagacji  $v_g$  (rys. 14b), przejdą przez światłowód jednomodowy w różnym czasie i ułożą się w "piramidę" jak na rys. 14f. Na uwagę zasługuje obniżenie amplitudy sygnału na wyjściu światłowodu w stosunku do amplitudy sygnału wejściowego, mimo umownego założenia, że poszczególne składowe są przenoszone bez strat (nie uwzględniono tłumienności linii). To obniżenie amplitudy otrzymało określenie straty mocy wynikającej z dyspersji  $\delta_p$  podawanej w dB przez producentów urządzeń teletransmisyjnych.





Rys. 14. Mechanizm przesuwania w czasie składowych impulsu złożonego z fal o różnych długościach a) zależność grupowej współczynnika załamania  $M$  od długości fali  $\lambda$ ; b) zależność prędkości grupowej  $v_g$  od długości fali  $\lambda$ ; c) zależność dyspersji chromatycznej od długości fali  $\lambda$ ; d) charakterystyka spektralna lasera SCW-1300 ( $\lambda_0 = 1300$  nm - za [2] rys. 15b); e) moc impulsu nadawanego z lasera; f) moc impulsu na wyjściu światłowodu (bez uwzględnienia tłumienności)



Rys. 15. Dyspersja chromatyczna jednomodowego kabla światłowodowego o długości 2170 m;  $\lambda_{gr} = 1313$  nm -  $D = 0$

a) dyspersja w drugim oknie transmisyjnym dla  $\lambda = 1260 \div 1340$  nm;  
zmierzone wartości dyspersji:

$$\lambda = 1275 \text{ nm} - D = -3,5 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}; \quad \lambda = 1300 \text{ nm} - D = -1,1 \text{ ps/nm}\cdot\text{km};$$

$$\lambda = 1325 \text{ nm} - D = 0,95 \text{ ps/nm}\cdot\text{km};$$

b) dyspersja w trzecim oknie transmisyjnym dla  $\lambda = 1510 \div 1590$  nm;  
zmierzone wartości dyspersji:

$$\lambda = 1525 \text{ nm} - D = 15,3 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}; \quad \lambda = 1550 \text{ nm} - D = 16,8 \text{ ps/nm}\cdot\text{km};$$

$$\lambda = 1575 \text{ nm} - D = 18,4 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$$

(pomiar wykonano w Ośrodku Techniki Optotelekomunikacyjnej TP SA w Lublinie)

Ponieważ dyspersja powoduje poszerzenie czasu trwania impulsu, mierzonego w ps, a różnice czasu przejścia poszczególnych składowych zależą zarówno od szerokości spektralnej źródła  $\Delta\lambda$  jak i długości linii  $l$ , przyjęto, że będzie ona mierzona miarą skutku - a więc miarą czasu narastania impulsu przypadającego na jednostkę szerokości spektralnej źródła sygnału i jednostkę długości linii [w ps/nm·km]. Światłowody stosowane w telekomunikacji powinna charakteryzować wartość dyspersji chromatycznej większa od  $-3,5$  ps/nm·km dla fali o długości  $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$  i mniejsza od  $20$  ps/nm·km dla fali o długości  $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ . Na rys. 15 przedstawiono wyniki rzeczywistych pomiarów dyspersji chromatycznej jednomodowego kabla światłowodowego o długości 2170 m.

## 5. BILANS CZASU NARASTANIA IMPULSU I DYSPERSJI ŚWIATŁOWODU

Na czas narastania  $t_n$  impulsu sygnału od wartości 0,1 do 0,9  $P_{max}$  przenoszonego w teletransmisyjnym systemie światłowodowym składają się:

- czas narastania impulsu źródła światła (lasera)  $\tau_s$  określony przez producenta [ps];
- czas narastania impulsu przesyłanego światłowodem  $\tau_w$  wywołany dyspersją chromatyczną [ps];
- czas narastania odpowiedzi fotodetektora  $\tau_R$  określony przez producenta [ps];
- czas narastania impulsu w obwodzie obciążenia fotodiody  $\tau_{RC} = 2,19 RC$ , gdzie  $C$  jest pojemnością diody złączowej, a  $R$  - rezystancją obciążenia, pomierzony i podawany przez konstruktorów odbiorników optoelektrycznych.

Wielkości te wiążą zależność:

$$t_n = \sqrt{\tau_s^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2}.$$

Można też przyjąć, nie wnikając szczegółowo w stałe inercji poszczególnych członów łańcucha telekomunikacyjnego, że na czas narastania impulsu składa się opóźnienie spowodowane dyspersją i sumą inercji wszystkich pozostałych układów  $\tau_i$ :

$$\tau_i = \sqrt{\tau_S^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2},$$

stąd:

$$t_n = \sqrt{\tau_w^2 + \tau_i^2}.$$

Niektórzy producenci urządzeń teletransmisyjnych nie ujawniają wszystkich parametrów źródeł i fotodetektorów światła, ograniczając się do podania szerokości widmowej lasera  $\Delta\lambda$  oraz tak zwanej "dyspersji dopuszczalnej" linii telekomunikacyjnej.

$$D_{dop} = |D| \cdot l_t = 1,1 \cdot |D| \cdot l_k,$$

skąd:

$$l_k(D) = \frac{D_{dop}}{1,1 \cdot |D|}.$$

Czas narastania impulsu przesłanego włóknem światłowodowym  $\tau_w$  jest w przybliżeniu iloczynem wartości bezwzględnej dyspersji  $|D|$ , szerokości spektralnej widma źródła promieniowania  $\Delta\lambda$  i długości toru światłowodowego  $l_t$  w kablu.

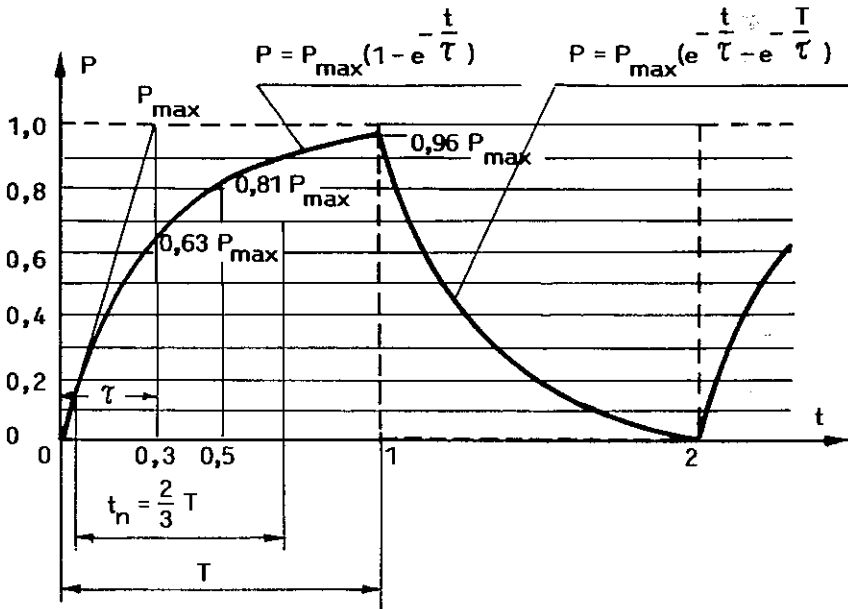
$$\tau_w = |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_t = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_k = D_{dop} \cdot \Delta\lambda.$$

Narastanie impulsu w określonym czasie  $t_n$ , a nie w czasie niekończenie krótkim, powoduje zniekształcenie jego kształtu pierwotnego (prostokątnego) i stratę mocy tym większą, im dłuższy jest czas narastania. Zniekształcenie impulsu (jego "rozmycie") utrudnia regenerację. Dlatego w konwencjonalnych układach techniki impulsowej wymagano na ogół, by czas narastania  $t_n$  nie przekraczał 2/3 okresu  $T$ , stanowiącego odwrotność przepływności liniowej sygnału  $\Phi_i$ :

$$t_n \leq \frac{2}{3} T = \frac{2}{3\Phi_f}$$

Trakty teletransmisyjne zachowują się jak liniowe człony inercyjne pierwszego rzędu i narastanie impulsów zachodzi według krzywej wykładniczej  $P = P_{\max}(1 - e^{-t/\tau})$ , gdzie  $\tau$  jest zastępczą stałą inercji całego układu. Gdy na przykład  $t_n = 2/3 T$ , to stała inercji  $\tau = 0,3 T$ , a strata mocy sygnału spowodowana inercją układu (w tym dyspersją)

$$\delta_p = 10 \log \frac{P_{\max}}{0,96 P_{\max}} = 0,18 \text{ dB} \quad (\text{patrz rys. 16}).$$



Rys. 16. Kształt impulsu aproksymowany krzywymi:  $P = P_{\max}(1 - e^{-t/\tau})$  i  $P = P_{\max}(e^{-t/\tau} - e^{-T/\tau})$ , gdy czas narastania amplitudy od wartości 0,1 do 0,9  $P_{\max}$  wynosi  $2/3 T$ . Zastępcza stała inercji całego systemu wynosi tu  $\tau = 0,3 T$ .

Po zastosowaniu doskonalszych układów rozeznawania i regeneracji impulsów stała się możliwa akceptacja wydłużenia czasu  $t_n$  powyżej  $2/3$  okresu  $T$ . Wydłużanie tego czasu prowadzi oczywiście do większych strat mocy  $\delta_p$ , ale mimo to pozwala na wydłużenie odcinka regeneratorskiego, gdyż znacznie ogranicza wpływ dyspersji. Na przykład wydłużenie czasu narastania impulsu  $t_n$  z wartości  $1 T$  do  $1,4 T$  zwiększa straty mocy sygnału z  $0,5$  do  $1$  dB, a więc przy tłumienności jednostkowej światłowodu w trzecim oknie transmisyjnym  $\alpha_k = 0,25$  dB skraca dopuszczalną długość odcinka regeneratorskiego z  $88,3$  km do  $87$  km (niecałe  $2$  km, gdyż zyskuje się na zmniejszeniu o  $1$  liczby złączy spawanych). Dla systemu o przepływności  $622,080$  Mbit/s z laserem o szerokości widmowej  $\Delta\lambda = 0,5$  nm graniczna długość odcinka  $l_k(D)$  wzrasta natomiast dwukrotnie z  $70$  km do  $140$  km. Realnie można więc wydłużyć odcinek regeneratorski z  $70$  km do  $87$  km.

W systemach światłowodowych wyposażonych w nowoczesne cyfrowe układy detekcji i regeneracji impulsów konstruktorzy regeneratorów dopuszczają, by wartość czasu narastania dochodziła nawet do  $t_n = 2,2 T$ . Stała inercji wynosi wówczas  $\tau = T$ , zaś tłumienie sygnału  $\delta_p = 10 \log \frac{P_{\max}}{0,63 P_{\max}} = 2$  dB.

Ze względu na stosowanie nadmiarowych kodów liniowych przepływność  $\Phi_1$  jest najczęściej większa od przepływności nominalnej  $\Phi$  (tablica 4). Czas narastania impulsu w systemie światłowodowym powinien więc spełniać warunki:

$$t_{n,dep} \leq \frac{2}{3} T = \frac{2}{3 \Phi_1}.$$

dla systemu, w którym  $\delta_p < 0,2$  dB lub:

$$t_{n,dep} \leq 2,2 T = \frac{2,2}{\Phi_1}$$

dla systemu, w którym  $\delta_p < 2$  dB.

Tablica 4

Zależność przepływności liniowej  $\Phi_l$   
od przepływności sygnału  $\Phi$  w systemach teletransmisyjnych  
o różnych kodach liniowych

Kod liniowy	Związek $\Phi_l$ z $\Phi$
1B2B	$\Phi_l = 2 \Phi$
(1+4)B6B	$\Phi_l = 1,5 \Phi$
5B6B	$\Phi_l = 1,2 \Phi$
12B1P1C	$\Phi_l = 14/12 \Phi$
Kodowanie sekwencją pseudolosową	$\Phi_l = \Phi$

Bilans dopuszczalnego czasu narastania impulsu w systemie i rzeczywistego czasu (w tym czasu spowodowanego dyspersją) określa zależność:

$$t_{n\,dop} \geq t_n,$$

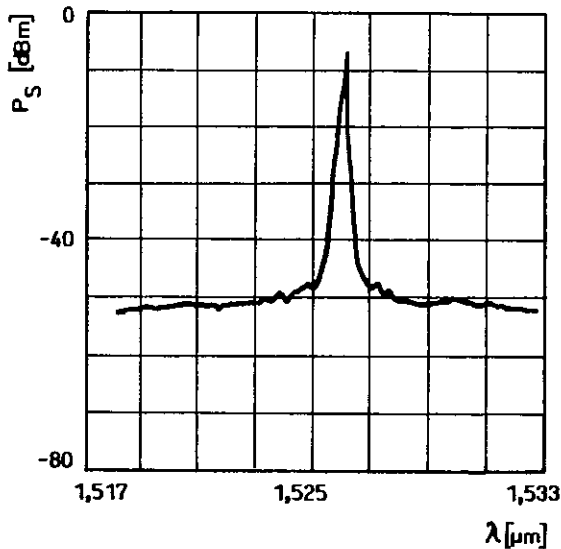
$$t_{n\,dop} \geq \sqrt{\tau_S^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{\tau_w^2 + \tau_i^2}.$$

Z zależności tej można wyprowadzić wzór na dopuszczalną długość linii światłowodowej, przy której nie będzie przekroczony czas narastania impulsu  $t_{n\,dop}$ :

$$l_k(D) \leq \frac{\sqrt{t_{n\,dop}^2 - \tau_S^2 - \tau_R^2 - \tau_{RC}^2}}{1,1 \cdot |D| \cdot \Delta \lambda} = \frac{\sqrt{t_{n\,dop}^2 - \tau_i^2}}{1,1 \cdot |D| \cdot \Delta \lambda}.$$

Długość ograniczają czasy narastania elementów czynnych systemu teletransmisyjnego (lasera, fotodiody, wzmacniaczy), dyspersja i spektralne widmo lasera. Opanowana przed kilku laty techno-

logia laserów jednoczęstotliwościowych, np. z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym DFB [2], pozwoliła na uzyskanie źródeł promieniowania, których widmo na poziomie -20 dB nie przekracza szerokości  $\Delta\tau < 0,3$  nm - patrz rys. 17. Pozwala to na ograniczenie wpływu dyspersji. Znacznej poprawy sytuacji oczekuje się po zastosowaniu optycznych wzmacniaczy nadawczych.



Rys. 17. Typowa charakterystyka widmowa lasera DBF  
(za [2] - rys. 27)

## 6. PRZYKŁADY OKREŚLANIA BILANSU MOCY I CZASU NARASTANIA IMPULSU

Wyliczenie bilansu mocy i tłumienności oraz dyspersji i stałej czasu inercji jest niezbędne w procesie projektowania systemów teletransmisyjnych, zwłaszcza dla przepływności sygnału przekraczającej 140 Mbit/s i odcinków regeneracyjnych dłuższych od 40 km.



Wstępne oszacowanie pozwoli na rozsądny i optymalny dobór źródeł światła i fotodetektorów. Dotyczy to nie tylko doboru mocy wyjściowej laserów oraz czułości diod odbiorczych, zapewniających właściwy budżet mocy i pożądany odstęp od szumów z zachowaniem pierwotnej stopy błędów nie większej niż  $10^{-9}$ , ale także doboru szerokości widmowej źródła światła, inercji elementów łańcucha telekomunikacyjnego oraz zdolności regenerowania zniekształconych sygnałów (dopuszczalnej straty mocy  $\delta_p$ ). Obliczeń tych można dokonać za pomocą podanych wyżej zależności. Do przybliżenia zastosowania wzorów przedstawiono trzy przykłady obliczeń dla:

- odcinka regeneratorskiego o długości nieco ponad 50 km dla systemu PDH o przepływności 140 Mbit/s pracującego w drugim oknie transmisyjnym  $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$  - przypadek obecnie często spotykany w krajowej sieci telekomunikacyjnej;
- odcinka regeneratorskiego o długości 48 km dla systemu STM-4 o przepływności 622,080 Mbit/s pracującego w trzecim oknie transmisyjnym  $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ ;
- linii sieci metropolitalnej o długości rzędu 20 km dla systemu informatycznego o przepływności 2488,320 Mbit/s pracującego w trzecim oknie transmisyjnym  $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ .

W czwartym przykładzie podano sposób oceny systemu i jego przydatności, gdy producent urządzeń nie prezentuje wszystkich parametrów zastosowanych podzespołów optoelektronicznych. Długości odcinków regeneratorskich mają tu 74 i 13 km, a przepływność sygnału wynosi 622,080 Mbit/s.

Do obliczeń bilansu mocy i czasu narastania impulsów wykorzystano zebrane w tablicy 5 parametry systemów teletransmisyjnych jako uśrednione dane kilku firm. Ostatnie trzy wiersze tej tablicy zawierają wyniki obliczeń maksymalnej długości odcinka regeneratorskiego ograniczonego tłumiennością jednostkową  $\alpha_L$  i dyspersją chromatyczną  $D$  światłowodu, a także obliczeń dopuszczalnej dyspersji

Tablica 5  
 Parametry systemów teletransmisyjnych (uśrednione dane wybranych firm)

Określenie systemu teletransmisyjnego		34 Mbit/s		140 Mbit/s		STM-1		STM-4		STM-16	
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Przebieg sygnału	$\phi$ [Mbit/s]	34,368		139,264		155,520		622,080		2488,32	
Kod liniowy		(4+1)B6B		5B6B		5B6B		12B1P1C		NRZ Skrambling $1+x^2+x^4$	
Przepływność sygnału liniowego	$\phi$ [Mbit/s]	51,552		167,1168		186,624		725,760		2488,320	
Długość fali nadajnika (lasera)	$\lambda$ [nm]	1280 ÷ 1335		1280 ÷ 1335		1280 ÷ 1335		1530 ÷ 1550		1530 ÷ 1550	
Przebieg mocy wyjściowa lasera	$P_S$ [dBm]	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-15	-2	-2	-2
Czyłość odbiornika przy stopie błędów 10 <sup>-9</sup> ograniczona szumem kwantowym i termicznym fotodiody	$P_R$ [dBm]	-43		-38		-41		-31		-31	
Zalecana przez producenta rezerwa mocy	$d_p$ [dB]	3		3		4		4		4	
Stosunek dopuszczalnego czasu narastania $t_{n, dop}$ do okresu $T$	$t_{n, dop}/T$	2/3		1		1		1,4		1,4	
Straty mocy spowodowane inercją układu (w tym dyspersją)	$\delta_p$ [dB]	0,2		0,5		1		1		2	
Szerokość spektralna widma lasera (na poziomie -20 dB)	$\Delta\lambda$ [nm]	<5		<5		<5		<1		<0,5	
Czas narastania impulsu lasera	$\tau_s$ [ps]	<500		<500		<500		<250		<200	
Czas narastania odpowiedzi fotodetektora	$\tau_R$ [ps]	<500		<500		<500		<500		<400	
Czas narastania impulsu w obwodzie obciążenia fotodiody	$\tau_{RC}$ [ps]	<2000		<2000		<2000		<1000		<600	
Obliczona maksymalna długość odcięcia regeneratorskiego ograniczona:	- tłumiennością: $I_1(\alpha_2)$ [km]	38,5	59,5	53	69	53	66,5	20,8	54	33,6	71,8
	- dyspersją: $I_1(D)$ [km]	662	662	290	184	255	164	70	141	43	115
Obliczona wartość dopuszczalnej dyspersji liniowej	$D_{L, dop}$ [ps/nm]	2550	2550	1100	4000	980	3600	1500	3100	950	2500

<sup>1)</sup> System z optycznym wzmacniaczem odbiorczym

liniowej  $D_{dop}$  (w obliczeniach przyjęto, że długość fabryczna jednego odcinka kabla osiąga dolną granicę tolerancji  $2100 \pm 100$  m i wynosi 2000 m, schemat łączy odpowiada rys. 7 - liczba złączy rozłączalnych w torze  $a_n = 4$ , a połączeń stałych  $n_w = N + 1$ ).

### 6.1. Przykład I

Odcinek regeneracyjny światłowodowej linii dalekosiężnej wynosi 52,5 km. Linia ma być zastosowana w systemie teletransmisyjnym PDH - 140 Mbit/s z wykorzystaniem drugiego okna światłowodowego  $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$ .

Należy dokonać bilansu mocy i czasu narastania impulsu w trakcie światłowodowym.

Dane wyjściowe:

$$\begin{array}{lll} \Phi = 139,264 \text{ Mbit/s} & l_k = 52,5 \text{ km} & \lambda_2 = 1300 \text{ nm} \\ & \alpha_k = 0,4 \text{ dB/km} & D = -3,5 \text{ ps/nm}\cdot\text{km} \\ & a_z = 0,6 \text{ dB} & a_w = 0,15 \text{ dB} \end{array}$$

Z tabl. 5 jest wybierany system, którego parametry są umieszczone w kolumnie 4 ( $l_k(\alpha_k) = 53$  km;  $l_k(D) = 290$  km). Zastosowany w urządzeniu kod liniowy 5B6B powiększa przepływność sygnału w stosunku 6/5 (tabl. 4):

$$\Phi_1 = 1,2 \cdot \Phi = 167,1168 \text{ Mbit/s.}$$

Odczytujemy inne parametry systemu, niezbędne do obliczenia bilansu mocy:

$$P_S = -3 \text{ dBm} \quad P_R = -41 \text{ dBm} \quad d_p = 4 \text{ dB} \quad \delta_p = 0,5 \text{ dB} \quad t_{n,dop} \leq T$$

- Określenie liczby odcinków fabrycznych kabla, niezbędnych do budowy linii

$$N = \frac{l_t}{2,1 - 0,1} = \frac{1,1 \cdot 52,5}{2} = 28,9 \approx 29.$$

- *Obliczenie tłumienności toru światłowodowego*

$$n_w = N + 1 = 29 + 1 = 30$$

$$\begin{aligned} A_t &= n_z \cdot a_z + n_w a_w + 1,1 \cdot \alpha_k l_k = \\ &= 4 \cdot 0,6 + 30 \cdot 0,15 + 1,1 \cdot 0,4 \cdot 52,5 = 30,0 \text{ dB}. \end{aligned}$$

- *Wyznaczenie budżetu mocy*

$$P = P_s - P_R - d_p - \delta_p = -3 + 41 - 4 - 0,5 = 33,5 \text{ dB}.$$

- *Bilans mocy*

$$P \geq 1,1 A_t$$

$$33,5 > 1,1 \cdot 30$$

$$33,5 > 33$$

Warunek jest spełniony.

- *Obliczenie czasu trwania impulsu jednostkowego (okresu)*

$$T = \frac{1}{\Phi_l} = \frac{1}{167,1168 \cdot 10^6} = 5984 \text{ ps}.$$

- *Określenie dopuszczalnego czasu narastania impulsu*

$$t_{k_{dop}} \leq T = 5984 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie czasu narastania impulsu w torze światłowodowym, spowodowanego dyspersją*

Z tabl. 5 (kolumna 4) odczytujemy wartość  $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ .

$$\tau_w = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_k = 1,1 \cdot 3,5 \cdot 5 \cdot 52,5 = 1011 \text{ ps}.$$

● *Obliczenie całkowitego czasu narastania impulsu*

Z tabl. 5 odczytujemy wartości:

$$\tau_s = 500 \text{ ps}$$

$$\tau_R = 500 \text{ ps}$$

$$\tau_{RC} = 2000 \text{ ps}$$

$$t_n = \sqrt{\tau_s^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{500^2 + 1011^2 + 500^2 + 2000^2} = 2350 \text{ ps}.$$

● *Bilans czasu narastania*

$$t_{n_{dop}} \geq t_n$$

$$5984 > 2350$$

Warunek jest spełniony.

## 6.2. Przykład II

Jeden z odcinków regeneracyjnych w systemie teletransmisyjnym STM-4 o przepływności sygnału 622,080 Mbit/s ma długość 48 km. System będzie pracować w trzecim oknie transmisyjnym  $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ .

Należy dokonać bilansu mocy i czasu narastania impulsu na tym odcinku.

Dane wyjściowe:

$$\Phi = 622,080 \text{ Mbit/s}$$

$$l_k = 48 \text{ km}$$

$$\lambda_3 = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_k = 0,25 \text{ dB/km}$$

$$D = 20 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$$

$$n_z = 4$$

$$a_z = 0,6 \text{ dB}$$

$$a_w = 0,15 \text{ dB}$$

Z tabl. 5 wybieramy system, którego parametry umieszczono w kolumnie 9 ( $l_k(\alpha_k) = 54 \text{ km}$ ;  $l_k(D) = 141 \text{ km}$ ). Zastosowany w systemie kod liniowy 12B1P1C zwiększa przepływność sygnału w stosunku 14/12 (tabl. 4):

$$\Phi_I = \frac{14}{12} \Phi = 725,760 \text{ Mbit/s}.$$

Odczytujemy z tabl. 5 parametry systemu do obliczania bilansu mocy:

$$P_S = -2 \text{ dBm} \quad P_R = -31 \text{ dBm} \quad d_p = 4 \text{ dB} \quad \delta_p = 1 \text{ dB} \quad t_{n_{dop}} \leq 1,4 T$$

- *Obliczenie liczby odcinków fabrycznych kabla niezbędnych do budowy linii*

$$N = \frac{1,1 \cdot l_k}{2,1 - 0,1} = \frac{1,1 \cdot 48}{2} = 26,4 \approx 27.$$

- *Obliczenie tłumienności toru światłowodowego*

$$n_w = N + 1 = 27 + 1 = 28$$

$$A_t = n_z \cdot a_z + n_w \cdot a_w + 1,1 \cdot \alpha_k \cdot l_k =$$

$$= 4 \cdot 0,6 + 28 \cdot 0,15 + 1,1 \cdot 0,25 \cdot 48 = 19,80 \text{ dB}.$$

- *Wyznaczenie budżetu mocy*

$$P = P_S - P_R - d_p - \delta_p = -2 + 31 - 4 - 1 = 24,0 \text{ dB}.$$

- *Bilans mocy*

$$P \geq 1,1 \cdot A_t$$

$$24 > 1,1 \cdot 19,8$$

$$24 > 21,78$$

Warunek jest spełniony.

- *Obliczenie czasu trwania impulsu jednostkowego*

$$T = \frac{1}{\Phi_t} = \frac{1}{725,760 \cdot 10^6} = 1378 \text{ ps}.$$

- *Określenie dopuszczalnego czasu narastania impulsu*

$$t_{n\text{dop}} \leq 1,4 T = 1,4 \cdot 1378 = 1929 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie czasu narastania impulsu w światłowodzie, spowodowanego dyspersją*

Z tabl. 5 odczytujemy wartość  $\Delta\lambda = 0,5 \text{ nm}$ .

$$\tau_w = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_k = 1,1 \cdot 20 \cdot 0,5 \cdot 48 = 528 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie całkowitego czasu narastania impulsu w systemie*

Z tabl. 5 odczytujemy wartości:

$$\tau_S = 200 \text{ ps} \quad \tau_R = 500 \text{ ps} \quad \tau_{RC} = 1000 \text{ ps}$$

$$t_n = \sqrt{\tau_S^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{200^2 + 528^2 + 500^2 + 1000^2} = 1252 \text{ ps}.$$

- *Bilans czasu narastania*

$$t_{n\text{dop}} \geq t_n$$

$$1929 > 1252$$

**Warunek na dopuszczalną wartość czasu narastania impulsu jest spełniony (z dużym zapasem).**

W urządzeniach proponuje się zastosować tańszy laser o szerokości spektralnej  $\Delta\lambda < 1 \text{ nm}$  o czasie narastania impulsu  $\tau_S < 250 \text{ ps}$ .

- *Obliczenie czasu narastania impulsu w trakcie przesyłania go światłowodem*

$$\tau_w = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_k = 1,1 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 48 = 1056 \text{ ps}.$$

- Obliczenie sumarycznego czasu narastania impulsu optycznego w systemie wyposażonym w laser o szerszym widmie spektralnym

$$t_n = \sqrt{\tau_s^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{250^2 + 1056^2 + 500^2 + 1000^2} = 1558 \text{ ps.}$$

- Bilans czasu narastania

$$t_{n,dop} \geq t_n$$

$$1929 > 1558$$

Warunek jest spełniony.

### 6.3. Przykład III

Odległość trasowa linii wiążącej 4 centra informatyczne A, B, C i D (rys. 18) w tym samym mieście wynosi 20,5 km. Między centrami A i D będą przesyłane sygnały o przepływności 2488,320 Mbit/s. Magistrala kablowa składa się z trzech odcinków. Tor łączący centra A i D jest zestawiony w centrach B i C za pomocą kabli stacyjnych ze złączami rozłączalnymi (patch-cordów). Magistrala kablowa zapewnia również połączenia innym użytkownikom sieci  $E_1 \div E_8$  rozlokowanym wzdłuż trasy. Linia jest w związku z tym zbudowana z 11 odcinków kabla, a liczba połączeń stałych (spawów) w torze A ÷ D  $n_w = 14$ .

Należy sprawdzić bilans mocy i czasu narastania impulsów na trasie od A do D.

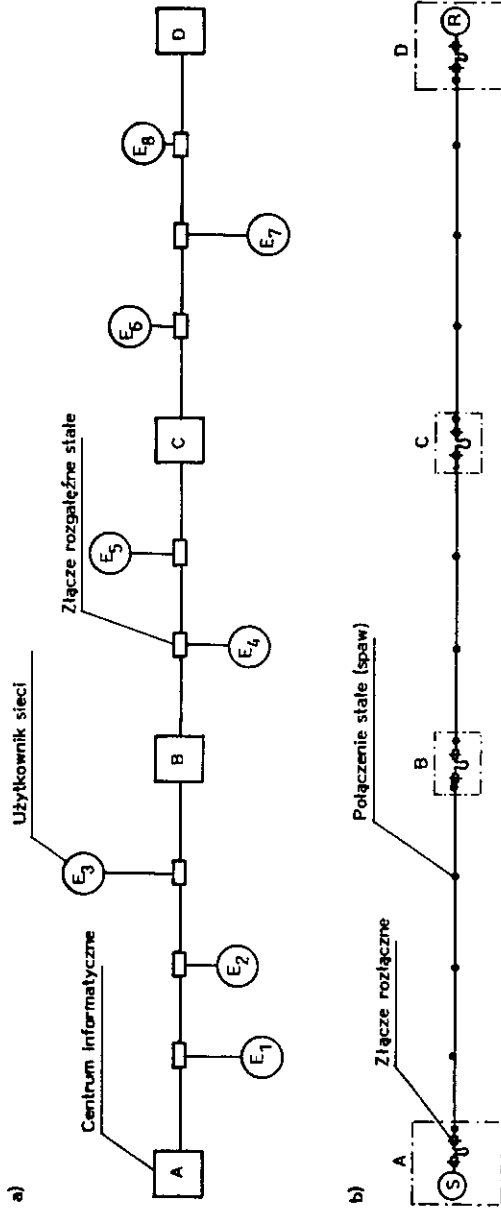
Dane wyjściowe:

$$\begin{array}{lll} \Phi = 2488,320 \text{ Mbit/s} & l_k = 20,5 \text{ km} & \lambda_3 = 1550 \text{ nm} \\ & \alpha_k = 0,25 \text{ dB/km} & D = 20 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \\ n_z = 8 & a_z = 0,6 \text{ dB} & n_w = 14 & a_w = 0,15 \text{ dB} \end{array}$$

Z tabl. 5 wybieramy system z kolumny 10 ( $l_k(\alpha_k) = 33,6 \text{ km}$ ;  $l_k(D) = 43 \text{ km}$ ) i odczytujemy dane do obliczenia budżetu mocy:

$$P_S = -2 \text{ dBm} \quad P_R = -25 \text{ dBm} \quad d_p = 5 \text{ dB} \quad \delta_p = 2 \text{ dB} \quad t_{n,dop} \leq 2,2 T$$





Rys. 18. Linia światłowodowa z przykładu III

a) schemat ideowy linii teleinformatycznej; b) tor światłowodowy łączący centra A i D

- *Obliczenie tłumienności toru*

$$A_t = n_z \cdot a_z + n_w \cdot a_w + 1,1 \alpha_k \cdot l_k =$$

$$= 8 \cdot 0,6 + 14 \cdot 0,15 + 1,1 \cdot 0,25 \cdot 20,5 = 12,54 \text{ dB}.$$

- *Wyznaczenie budżetu mocy*

$$P = P_s - P_R - d_p - \delta_p = -2 + 25 - 5 - 2 = 16 \text{ dB}.$$

- *Bilans mocy*

$$P \geq 1,1 A_t$$

$$16 > 1,1 \cdot 12,54$$

$$16 > 13,79$$

**Warunek jest spełniony.**

- *Obliczenie czasu trwania impulsu optycznego (okresu)*

Zastosowane w systemie kodowanie pseudolosowe o sekwencji  $1 + x^{28} + x^{31}$  nie zwiększa przepływności sygnału:

$$\Phi_i = \Phi$$

$$T = \frac{1}{\Phi_i} = \frac{1}{2488,320 \cdot 10^6} = 402 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie dopuszczalnego czasu narastania impulsu*

$$t_{n_{dop}} \leq 2,2 T = 2,2 \cdot 402 = 884 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie czasu narastania impulsu spowodowanego dyspersją (szerokość spektralna lasera  $\Delta\lambda < 0,5 \text{ nm}$  - z tabl. 5)*

$$\tau_w = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta\lambda \cdot l_k = 1,1 \cdot 20 \cdot 0,5 \cdot 20,5 = 226 \text{ ps}.$$

● *Obliczenie sumarycznego czasu narastania impulsu*

Z tabl. 5 odczytujemy wartości:

$$\tau_S = 200 \text{ ps} \quad \tau_R = 400 \text{ ps} \quad \tau_{RC} = 600 \text{ ps}$$

$$t_n = \sqrt{\tau_S^2 + \tau_w^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{200^2 + 226^2 + 400^2 + 600^2} = 782 \text{ ps.}$$

● *Bilans czasu narastania*

$$t_{n\text{ dop}} \geq t_n$$

$$884 > 782$$

Warunek jest spełniony.

#### 6.4. Przykład IV

Dwie końcowe centrale międzynarodowe kategorii ISC-3 (dokonujące połączeń łączy międzynarodowych z łączami krajowymi), między którymi odległość trasowa  $l_k$  wynosi 369 km, należy połączyć traktem światłowodowym o przepływności 622,080 Mbit/s. Linię podzielono na 9 odcinków regeneracyjnych, z których najdłuższy ma 74 km, a najkrótszy - 13 km. Do transmisji będzie wykorzystane trzecie okno  $\lambda_3 = 1,55 \mu\text{m}$ .

Należy obliczyć bilans mocy i tłumienności oraz dyspersji i czasu narastania impulsu dla odcinków o skrajnych długościach.

Producent wytypowanego systemu teletransmisyjnego podał następujące dane:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| - kod liniowy:   | 12B1P1C           |
| - moc wyjściowa lasera $P_S$ :                           | -4, -1 lub +3 dBm |
| - szerokość spektralna lasera $\Delta\lambda$ :          | 0,5 nm            |
| - czułość odbiornika przy stopie błędów $10^{-10} P_R$ : | -39 lub -17 dBm   |
| - strata mocy spowodowana dyspersją $\delta_p$ :         | 1 dB              |
| - dopuszczalna dyspersja liniowa $D_{\text{dop}}$ :      | 3000 ps/nm        |

Nie określono rezerwy mocy gwarantującej poprawną pracę regeneratorów w trakcie starzenia się elementów wzmacniaczy. Przyjmuje się, że będzie ona wynosić  $d_p = 4$  dB.

#### A. Odcinek regeneratorowy o długości 74 km

- *Określenie liczby odcinków fabrycznych kabla do budowy linii*

$$N = \frac{l_t}{2,1 - 0,1} = \frac{1,1 \cdot 74}{2} = 40,7 \approx 41.$$

- *Obliczenie tłumienności toru światłowodowego*

$$n_w = N + 1 = 41 + 1 = 42,$$

$$A_t = n_z \cdot a_z + n_w \cdot a_w + 1,1 \alpha_k l_k = \\ = 4 \cdot 0,6 + 42 \cdot 0,15 + 1,1 \cdot 0,25 \cdot 74 = 29,05 \text{ dB}.$$

- *Wyznaczenie budżetu mocy*

Wybieramy laser o mocy  $P_S = -1$  dBm oraz fotodiodę o czułości  $P_R = -39$  dBm.

$$P = P_S - P_R - d_p - \delta_p = -1 + 39 - 4 - 1 = 33 \text{ dB}.$$

- *Bilans mocy*

$$P \geq 1,1 A_t,$$

$$33 > 1,1 \cdot 29,05,$$

$$33 > 31,96.$$

Warunek jest spełniony.

- *Obliczenie "dyspersji liniowej" odcinka regeneratorowego*

$$D_{lin} = 1,1 \cdot |D| \cdot l_k = 1,1 \cdot 20 \cdot 74 = 1628 \text{ ps/nm}.$$

- *Bilans "dyspersji dopuszczalnej" i rzeczywistej "dyspersji liniowej"*

$$D_{dop} \geq D_{lin},$$

$$3000 > 1628.$$

Obliczenia w zasadzie kończą się w tym miejscu, można jednak dodatkowo oszacować wartość sumarycznego czasu narastania impulsu  $\tau_i$  wprowadzanego łącznie przez laser, fotodiodę i wzmacniacze. W tym celu należy określić dopuszczalny czas narastania impulsu  $t_{n,dop}$ , maksymalną dopuszczalną długość odcinka regeneratorskiego  $l_k(D)$  i czas narastania spowodowany dyspersją światłowodu  $\tau_w$ .

- *Obliczenie czasu trwania (okresu) impulsu*

$$T = \frac{1}{\Phi_i} = \frac{1}{\frac{14}{12} \Phi} = \frac{12}{14 \cdot 622,080 \cdot 10^6} = 1378 \text{ ps}.$$

- *Określenie dopuszczalnego czasu narastania impulsu*

Dla  $\delta_p = 1 \text{ dB}$  mamy  $t_{n,dop} \leq 1,4 T$ ,

$$t_{n,dop} \leq 1,4 T = 1,4 \cdot 1378 = 1929 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie maksymalnej dopuszczalnej długości odcinka regeneratorskiego*

$$l_k(D) = \frac{D_{dop}}{1,1 \cdot |D|} = \frac{3000}{1,1 \cdot 20} = 136 \text{ km}.$$

- *Obliczenie czasu narastania impulsu transmitowanego światłowodu*

$$\tau_w = 1,1 \cdot |D| \cdot \Delta \lambda \cdot l_k(D) = 1,1 \cdot 20 \cdot 0,5 \cdot 136 = 1496 \text{ ps}.$$

- *Obliczenie granicznej wartości czasu narastania*

$$\tau_i = \sqrt{t_{n\ dep}^2 - \tau_w^2} = \sqrt{1929^2 - 1496^2} = 1218 \text{ ps.}$$

Średnie wartości czasów narastania impulsu dla systemu o przepływności 622,080 Mbit/s (patrz tabl. 5 kolumna 8) wynoszą:

$$\tau_S < 250 \text{ ps} \qquad \tau_R < 500 \text{ ps} \qquad \tau_{RC} < 1000 \text{ ps,}$$

a więc sumaryczny czas narastania  $\tau_i$  w tym przypadku

$$\tau_i = \sqrt{\tau_S^2 + \tau_R^2 + \tau_{RC}^2} = \sqrt{250^2 + 500^2 + 1000^2} = 1146 \text{ ps.}$$

Obliczona powyżej wartość graniczna  $\tau_i$  jest większa, można zatem przyjąć, że proponowany przez producenta system spełni swe zadanie.

## B. Odcinek regeneracyjny o długości 13 km

- *Określenie liczby odcinków fabrycznych kabla*

$$N = \frac{l_t}{2,1 - 0,1} = \frac{13}{2} = 6,5 \approx 7.$$

- *Obliczenie tłumienności toru światłowodowego*

$$n_w = N + 1 = 7 + 1 = 8,$$

$$A_t = n_z \cdot a_z + n_w \cdot a_w + 1,1 \cdot \alpha_k \cdot l_k =$$

$$= 4 \cdot 0,6 + 8 \cdot 0,15 + 1,1 \cdot 0,25 \cdot 13 = 7,18 \text{ dB.}$$

- *Wyznaczenie budżetu mocy*

Wybieramy laser o mocy  $P_S = -4 \text{ dBm}$  oraz fotodiodę o czułości  $P_R = -17 \text{ dBm}$ .

$$P = P_S - P_R - d_p - \delta_p = -4 + 17 - 4 - 1 = 8 \text{ dB.}$$

● *Bilans mocy*

$$P \geq 1,1 A_1,$$

$$8 > 1,1 \cdot 7,18,$$

$$8 > 7,9.$$

**Warunek jest spełniony.**

Obliczanie bilansu dyspersji i czasu narastania jest w tym przypadku (krótki odcinek regeneracyjny) zbyteczne.

## 7. ZAKOŃCZENIE

Technika optoelektroniczna rozwija się bardzo dynamicznie i każdy rok przynosi nowe osiągnięcia. Spodziewane jest pojawienie się laserów o szerokości widmowej (mierzonej na poziomie -20 dB poniżej mocy maksymalnej) nie przekraczającej 0,2 nm i czasie narastania impulsu rzędu 100 ps oraz elementów optyki zintegrowanej - optycznych wzmacniaczy nadawczych i odbiorczych zapewniających budżet mocy powyżej 50 dB. Dopuszczalna dyspersja liniowa w trzecim oknie transmisyjnym może więc przekroczyć wartość 5000 ps/nm dla sygnałów o przepływności 600 Mbit/s. Doskonalona jest także technologia światłowodów i uzyskiwanie koncentryczności położenia rdzenia oraz proces budowy linii kablowych (a zwłaszcza spawania włókien światłowodowych), co w efekcie obniży tłumienność złączy stałych. Dane zawarte w tabelicy 5 i wartość tłumienności złączy ulegają przedawnieniu, ale podane w artykule metody obliczeń pozostają aktualne.

Wyliczenia tłumienności toru może dokonać projektant kablowej linii światłowodowej dysponujący standardowymi parametrami światłowodów i złączy [3, 6]. Do obliczenia bilansu mocy i tłumienności niezbędna już jest znajomość budżetu mocy, a więc parametrów urządzeń teletransmisyjnych. Określenie bilansu czasu narastania

impulsu w systemie wymaga znajomości nie tylko dyspersji światłowodów, ale wielu innych parametrów urządzeń (przepływności, kodu liniowego, szerokości widmowej lasera, inercji elementów optoelektronicznych i wzmacniaczy, dopuszczalnych strat mocy powodowanych dyspersją). Do projektowania linii światłowodowych jest konieczna zatem ścisła współpraca specjalistów budowy linii kablowych i urządzeń teletransmisyjnych.

#### WYKAZ LITERATURY

1. Majewski A.: *Teoria i projektowanie światłowodów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
2. Mroziewicz B.: *Półprzewodnikowe źródła i detektory sygnałów optycznych dla jednomodowych systemów światłowodowych*. VI Krajowa Szkoła Optoelektroniki. Instytut Łączności, Warszawa 1992.
3. Norma Zakładowa ZN-93/TP S.A. - 002: *Telekomunikacyjne linie kablowe dalekosiężne. Linie optotelekomunikacyjne. Ogólne wymagania techniczne*.
4. Palais J.C.: *Zarys telekomunikacji światłowodowej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
5. Paszkowski B.: *Włókna światłowodowe. Własności, technologia, kierunki rozwojowe*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław 1978.
6. Szustakowski M.: *Elementy techniki światłowodowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
7. Szustakowski M.: *Światłowody jednomodowe*. VI Krajowa Szkoła Optoelektroniki. Instytut Łączności, Warszawa 1992.
8. Zbyrad S.: *Budowa kablowych linii światłowodowych*. VI Krajowa Szkoła Optoelektroniki. Instytut Łączności, Warszawa 1992.