

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

REFERATY  
PROBLEMOWE

Zeszyt 75

Krzysztof Borzycki

POMIARY DYSPERSJI MODOWEJ ŚWIATŁOWODÓW



Warszawa 1987

I N S T Y T U T   Ł Ą C Z N O Ś C I

KOŁO ZAKŁADOWE STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

Na prawach rękopisu

R E F E R A T Y   P R O B L E M O W E

Zeszyt 75

Krzysztof Borzycki

POMIARY DYSPERSJI MODOWEJ ŚWIATŁOWODÓW

Warszawa 1987

S-9453

Zespół Redakcyjny:

dr inż. Stanisław Sołta, mgr inż. Andrzej Stągrowski  
mgr inż. Krystyna Frączek

Opracował:

mgr inż. Krzysztof Borzycki

Zakład Telekomunikacji Optycznej /Z-25/

Instytut Łączności

04-894 Warszawa, ul. Szachowa 1, tel. 128-620

Praca 6.02.A.02

Opiniował: dr inż. Stanisław Sołta i mgr inż. Janusz Podejko

Manuskrypt dostarczono dnia 1986.12.10.

Opisano zjawisko dyspersji modowej w światłowodach wielomodowych gradientowych i metody pomiaru dyspersji. Przedstawiono opracowane w Instytucie Łączności zestawy pomiarowe i charakterystyki próbek światłowodów.

Redaktor: mgr Krystyna Juezkiewicz

Montaż tekstu: Barbara Skwara

---

Wpłynęło do Działu Wydawniczego Instytutu Łączności  
w Warszawie, ul. Szachowa 1 dnia 1987.02.17.

Nakład 70 egz.

Krzysztof Borzycki

POMIARY DISPERSJI MODOWEJ ŚWIATŁOWODÓW

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Ograniczenia dyspersyjne szybkości transmisji światłowodowej	2
2.1. Dyspersja w światłowodzie wielomodowym gradientowym	3
2.2. Kompensacja dyspersji modowej	9
2.3. Wpływ sprzęgania się modów	10
3. Metody pomiarowe	12
4. Aparatura opracowana w Ił	20
Wykaz literatury	34

## POMIARY DISPERSJI MODOWEJ ŚWIATŁOWODÓW

### 1. WPROWADZENIE

Pomimo obserwowanego na świecie szybkiego wprowadzania do sieci telekomunikacyjnych światłowodów jednomodowych, większość użytkowanych obecnie systemów łączności światłowodowej wykorzystuje światłowody wielomodowe gradientowe jako łatwiejsze do sprzęgnięcia ze źródłami promieniowania oraz nie stwarzające poważniejszych problemów z wykonywaniem złączy stałych i rozłączalnych podczas instalacji linii. Należy dodać, że światłowody wielomodowe nadają się szczególnie dobrze do współpracy z diodami elektroluminescencyjnymi /LED/ jako źródłami promieniowania. Ich mniej korzystne parametry transmisyjne są wystarczające w systemach łączności światłowodowej o niewielkiej i średniej przepływności - do 34 Mbit/s, zwłaszcza w sieci miejskiej. Dzięki systematycznemu ulepszaniu technologii produkcji stało się możliwe na razie doświadczalne użycie włókien wielomodowych gradientowych pracujących przy długości fali 1300 nm nawet w systemach 400 i 565 Mbit/s o długości odcinka międzyregeneratorowego 25 + 50 km [6,11].

W warunkach krajowych dość odległe terminy uruchomienia produkcji światłowodów jednomodowych i laserów półprzewodnikowych 1300 i 1550 nm, a także ograniczone zapotrzebowanie na systemy cyfrowe o najwyższych krotnościach pozwalają przyjąć za pewnik długotrwałą dominację światłowodów wielomodowych gradientowych przewidzianych do pracy przy długości fali 850 + 900, a następnie 1300 nm.

Fundamentalnym ograniczeniem szybkości transmisji w światłowodach tego rodzaju jest zjawisko dyspersji modowej powodujące szkodliwe rozszerzenie przesyłanych impulsów optycznych. Tematem niniejszego artykułu jest opis wpływu tego

zjawiska na własności transmisyjne odcinków światłowodów i światłowodowych linii transmisyjnych. W dalszej jego części przedstawiono podstawowe metody pomiarowe dyspersji modowej - w dziedzinie czasu i częstotliwości. Następnie omówiono opracowane w Instytucie łączności zestawy pomiarowe pracujące w paśmie 850 nm oraz przykłady zmierzonych przy ich użyciu charakterystyk częstotliwościowych światłowodów.

## 2. OGRANICZENIA DYSPERSYJNE SZYBKOŚCI TRANSMISJI ŚWIATŁOWODOWEJ

Konieczność ograniczenia interferencji międzysymbolowej w cyfrowych systemach łączności narzuca wymagania, dotyczące szerokości pasma lub dyspersji impulsu w torze światłowodowym, zwykle wymagana jest minimalna szerokość pasma /na poziomie - 6 dB/ rzędu  $3/4$  częstotliwości zegarowej lub wartość dyspersji nie większa niż 50% szerokości impulsu nadajnika. Wymagania zaostrza dodatkowo fakt, że stosowanie w transmisji światłowodowej kodów dwupoziomowych /najczęściej 1B 2B lub 5B 6B/ prowadzi do mniejszych szerokości impulsów i zajmowania szerszego pasma w porównaniu z systemami pracującymi na kablach współosiowych lub symetrycznych wykorzystującymi kod trójpoziomowy HDB-3. Przykładowo: w systemie 34 Mbit/s pracującym w kodzie 5B 6B wymagana szerokość pasma wynosi co najmniej 35 MHz - taka wartość prowadzi już do widocznego pogorszenia użytecznej czułości odbiornika /zalecenia CCITT podają tutaj szerokość pasma 50 MHz/. Własności dyspersyjne toru światłowodowego określa się zwykle podając szerokość pasma na poziomie -6 dB /elektr./ [5] lub alternatywnie wartość skuteczną szerokości bądź szerokość połówkową odpowiedzi impulsowej. Teoretycznie istnieje możliwość dokładnych przeliczeń: charakterystyki częstotliwościowe - odpowiedź impulsowa za pomocą transformacji Fouriera [8]. W praktyce dokładność wyników

uzyskanych tą metodą jest ograniczona [7], głównie wskutek często spotykanych nierównomierności przebiegu charakterystyk częstotliwościowych i impulsowych rzeczywistych próbek światłowodów, różnego kształtu impulsów pomiarowych oraz pasożytniczych zjawisk optycznych występujących podczas pomiaru. W przybliżeniu można przyjąć, że rozszerzenie impulsu o 1 ns, odpowiada szerokości pasma około 400 MHz [21].

### 2.1. Dyspersja w światłowodzie wielomodowym gradientowym

Odnaczający się najprostszą technologią wytwarzania światłowodów wielomodowy o skokowym profilu współczynnika załamania cechuje się bardzo niewielką szerokością pasma - - zaledwie 15 + 40 MHz dla 1 km odcinka światłowodu o średnicy rdzenia 50 + 100  $\mu\text{m}$  i aperturze numerycznej 0.2+0.3 [3,16,19,22], co bardzo ogranicza jego przydatność dla telekomunikacji. Umiejętne wykorzystanie w procesie produkcji światłowodu metodą podwójnego tygla zjawiska wzajemnej dyfuzji materiałów rdzenia i płaszczka podczas wyciągania pozwala na uzyskanie "zaokrąglonego" profilu współczynnika załamania [23] i zwiększenie szerokości pasma do około 100 MHz  $\cdot$  km [16], co umożliwia szersze zastosowania telekomunikacyjne włókien tego rodzaju. Stosunkowo wczesne prace teoretyczne [14] pozwoliły na znalezienie profilu refrakcyjnego  $n(r)$  światłowodu opisywanego w obciążeniu rdzenia zależnością:

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{0,5} \quad r \leq a$$

gdzie:

$r$  - odległość od osi światłowodu,

$n_0$  - współczynnik załamania materiału rdzenia w części centralnej,

$n(r)$  - współczynnik załamania materiału rdzenia w punkcie odległym o  $r$  od osi włókna,

$\Delta$  - różnica wartości współczynników załamania materiałów rdzenia /dla  $r = 0$ / i płaszczka,

$a$  - promień rdzenia światłowodów.

Tego rodzaju profil, który /przy pominięciu wpływu zjawiska tzw. dyspersji profilu/ dla  $\alpha_{\text{odt}} = 2 - 2\Delta$  [14] lub  $2 - 2,4\Delta$  [23], zależnie od przyjętych definicji dyspersji impulsu zapewnia wyrównanie czasów przejścia kilkuset propagowanych w typowym światłowodzie modów i radykalną /do 100 razy i więcej/ redukcję dyspersji modowej. Dla standardowego telekomunikacyjnego światłowodu wielomodowego gradientowego o średnicy 50/125  $\mu\text{m}$  i aperturze numerycznej 0,20 można teoretycznie uzyskać szerokość pasma ok. 10 GHz /dyspersja 0,025 ns/ dla odcinka o długości 1 km. Zostało to potwierdzone laboratoryjnie w przypadku światłowodu przewidzianego do pracy w paśmie 1300 nm [6].

Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa toru światłowodowego ze światłowodem wielomodowym gradientowym wykazuje zasadnicze różnice w porównaniu z torom współosiowym /rys. 1/:

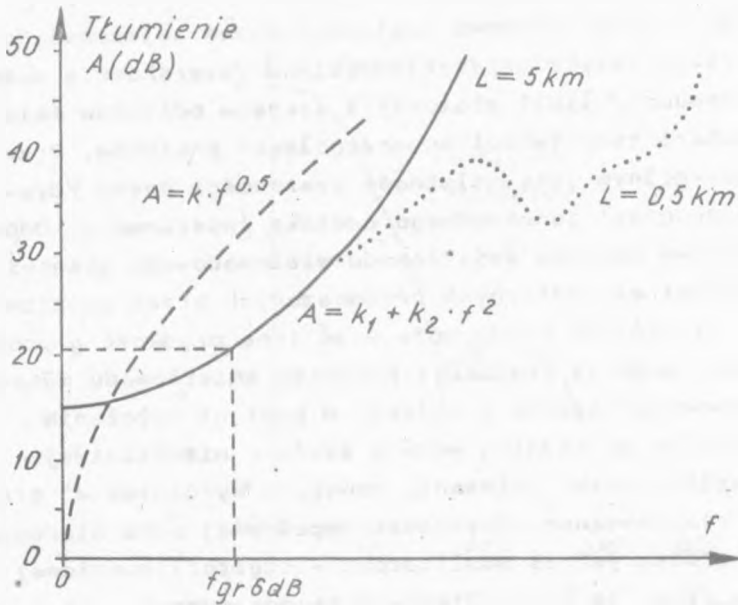
- istnieje zakres częstotliwości, zwykle  $0 \rightarrow (1-1,5) \cdot 10^9 \text{ Hz}$  w którym przebieg charakterystyki  $A(f)$  jest zawsze monotonicznie opadający;
- dla częstotliwości powyżej  $(1,5 \rightarrow 2) \cdot 10^9 \text{ Hz}$  charakterystyka posiada przebieg trudny do przewidzenia - zależny od typu i egzemplarza światłowodu, długości badanego odcinka oraz wpływu czynników zewnętrznych, zwłaszcza zgięć. Im mniej dokładna kontrola profilu refrakcyjnego oraz im krótszy /poniżej  $1 \rightarrow 2 \text{ km}$ / odcinek światłowodu, tym przebieg charakterystyki bardziej nieregularny, z możliwością wystąpienia szeregu "rezonansów" o amplitudzie ponad 10 dB /rys. 2,3,4/.



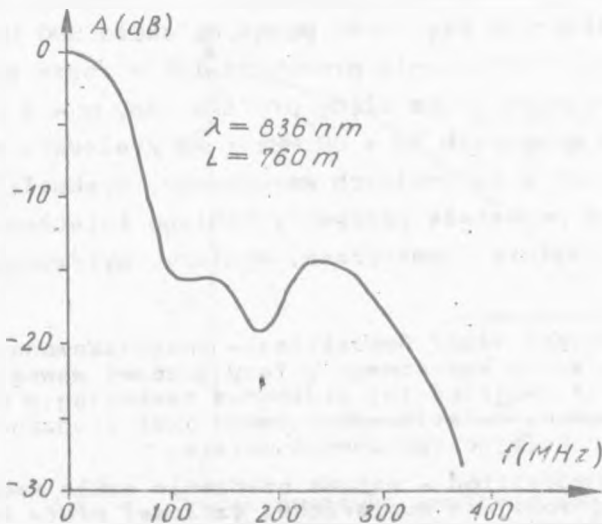
Dodatkowy problem stanowi niejednoznaczna zależność pomiędzy charakterystyką częstotliwościową /szerokością pasma, dyspersją impulsu/ linii złożonej z szeregu odcinków światłowodów a charakterystykami poszczególnych odcinków. Przypadkiem szczególnym jest zależność szerokości pasma /dyspersji/ od długości jednorodnego odcinka światłowodu. Odpowiedź impulsowa odcinka światłowodu wielomodowego stanowi sumę odpowiedzi elementarnych przenoszonych przez poszczególne mody, z których każdy może mieć inną prędkość grupową. Typowy defekt podczas produkcji preformy światłowodu metodą MCVD<sup>x/</sup> /stosowaną obecnie w Polsce/ w postaci nałożenia jednej lub kilku sąsiednich warstw szkła o niewłaściwej wartości współczynnika załamania powoduje "wyróżnienie" grupy modów i rozproszenie odpowiedzi impulsowej oraz nierównomierność charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowej światłowodu /rys. 5a,b,c/. Zjawisko to praktycznie nie występuje w światłowodach wytwarzanych metodą VAD<sup>xx/</sup>. Podstawowy najbardziej szkodliwy błąd technologiczny objawia się niewłaściwą wartością parametru profilu  $\alpha$ , różną od  $\alpha_{opt} \approx 2$ , ale z zachowaniem "gładkiego" jego kształtu. Odchyłka rzędu 0,05 redukuje osiągalną szerokość pasma do około 500 MHz · km. Spotykane podczas uruchamiania produkcji lub w razie awarii urządzeń produkcyjnych grube błędy profilu, np.  $\alpha = 1$  prowadzi do wyników w granicach 30 + 80 MHz · km /zaledwie 2-5% wartości osiągalnej w optymalnych warunkach/. Dyskwalifikuje to wyrób, mimo że pozostałe parametry takiego światłowodu - tłumienność, apertura numeryczna, wymiary, wytrzymałość

<sup>x/</sup> Modified Chemical Vapor Deposition - zmodyfikowana metoda osadzania szkła kwarcowego z fazy gazowej wewnątrz rury kwarcowej. Najczęściej stosowana technologia wytwarzania preform światłowodów. Szkło jest osadzane w postaci wielu kolejno tworzonych warstw.

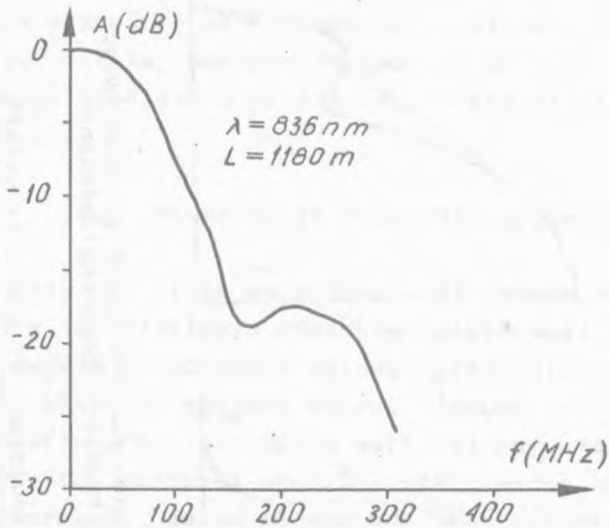
<sup>xx/</sup> Vapor Axial Deposition - metoda osadzania szkła kwarcowego z fazy gazowej na powierzchni czołowej pręta kwarcowego. Cały rdzeń preformy powstaje jednocześnie.



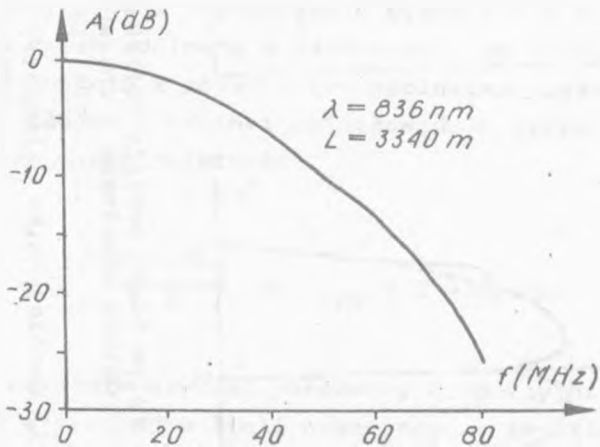
Rys. 1. Charakterystyki tłumienia w funkcji częstotliwości modułacji dla torów światłowodowych /linie ciągła i kropkowana/ i toru współosiowego



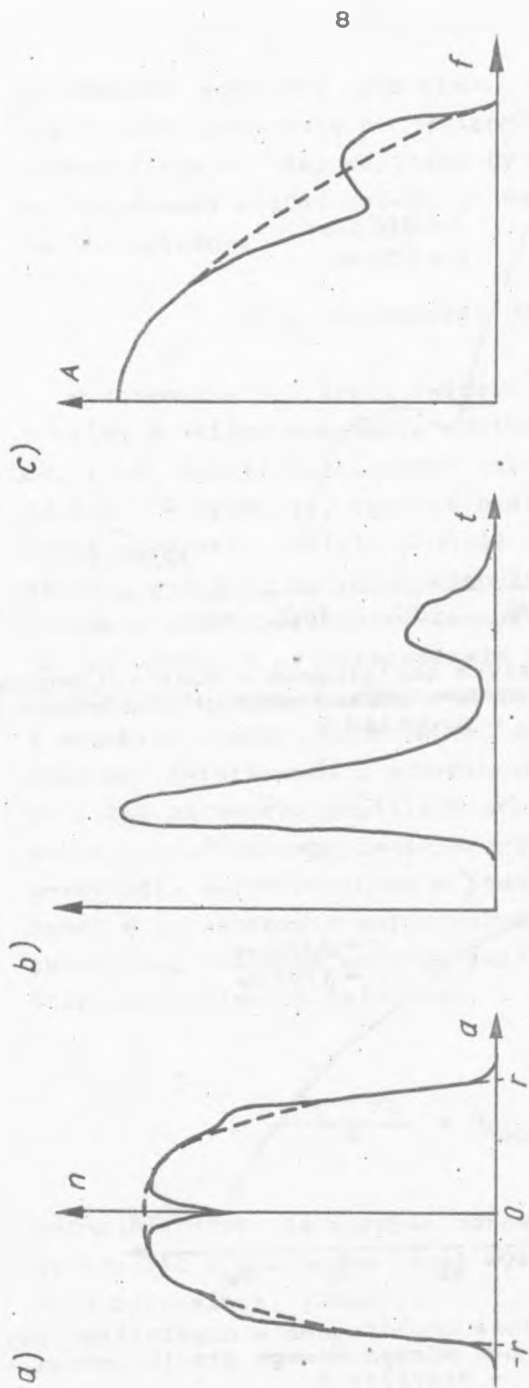
Rys. 2. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa odcinka światłowodu wielomodowego gradientowego - przykład 1



Rys. 3. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa odcinka światłowodu wielomodowego gradientowego - przykład 2



Rys. 4. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa odcinka światłowodu wielomodowego gradientowego - przykład 3



Rys. 5. Wpływ błędu profilu refrakcyjnego światłowodów wielomodowych gradientowych na odpowiedź impulsową i charakterystykę amplitudowo - częstotliwościową odcinka światłowodowego

a/ profil współczynnika załamania; b/ odpowiedź impulsowa; c/ charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa

mechaniczna mogą być właściwe. Dotychczasowe doświadczenia krajowe pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że uzyskanie zadowalająco niskiej wartości dyspersji modowej światłowodu wielomodowego gradientowego stanowi najtrudniejszy problem technologiczny.

## 2.2. Kompensacja dyspersji modowej

Rzeczywisty tor linii światłowodowej składa się zwykle z kilku do kilkudziesięciu odcinków światłowodu o długości ok. 1 km, zwykle połączonych metodą zgrzewania łukowego. Odcinki te wykazują, ogólnie biorąc, losowy rozrzut wartości parametru profilu  $\alpha$  wokół wartości optymalnej. Dla niezbyt wysokich wartości odchyłki efekt podatawowy - ograniczenie szerokości pasma danego odcinka jest niezależny od jej znaku, w przeciwieństwie do względnego opóźnienia impulsu optycznego propagowanego w postaci modów niskich i wysokich rzędów. Oznacza to, że połączenie ze sobą dwóch odcinków światłowodu o przeciwnym znaku i zbliżonej wartości odchyłek parametru profilu  $\alpha$  prowadzi do pozornie paradoksalnego, radykalnego zmniejszenia dyspersji w porównaniu do połączenia dwóch odcinków o jednakowym znaku odchyłki, a nawet w porównaniu z pojedynczym odcinkiem. Łącząc dwa o jednakowej długości odcinki światłowodu o wykładnikach profilu spełniających zależność

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \alpha_{opt} = 2 - 2,4\Delta$$

można teoretycznie uzyskać parametry dyspersyjne całości nie gorsze niż w przypadku linii wykonanej ze światłowodu o profilu optymalnym, [10,23].

### 2.3. Wpływ sprzęgania się modów

W każdym rzeczywistym światłowodzie wskutek niejednorodności materiału, fluktuacji wymiarów, mikrozgięć itp. występuje zjawisko tzw. sprzęgania lub mieszania się modów - stopniowej wymiany energii propagowanej przez poszczególne mody. Prowadzi to do powstania w dostatecznie dużej odległości od punktu początkowego tzw. ustalonego rozkładu modów, niezależnego od sposobów pobudzenia światłowodu. Dla światłowodów telekomunikacyjnych nie poddawanych zewnętrznym oddziaływaniom mechanicznym odległość ta zawiera się w granicach 1 + 10 km.

Skutki mieszania się modów są trojaki:

1. Skuteczność kompensacji dyspersji modowej spada wraz ze wzrostem długości łączonych odcinków. Zabieg ten należy przeprowadzać tak, aby odcinki o przeciwnych znakach odchyłek parametru profilu występowały na przemian, a nie tworzyły jednolite ciągi.
2. Pobudzenie światłowodu ze źródła promieniowania o niewielkiej aperturze numerycznej /pobudzającego niewielką grupę modów niskich rzędów/ nie ogranicza w istotny sposób dyspersji, jeżeli badany odcinek jest dłuższy od 1 + 2 km. W odcinku wstępnym minimalna początkowo wartość dyspersji impulsu rośnie anormalnie, zgodnie z przybliżoną zależnością [4]:

$$\sigma(L) = K \cdot L^{1,5}$$

gdzie:

- $\sigma(L)$  - wartość skuteczna szerokości odpowiedzi impulsowej światłowodu,  
 K - współczynnik charakteryzujący dany światłowod,  
 L - odległość od punktu początkowego /źródła promieniowania/.

Jeet to spowodowane rosnącym udziałem modów wyższych rzędów o większych różnicach prędkości grupowych.

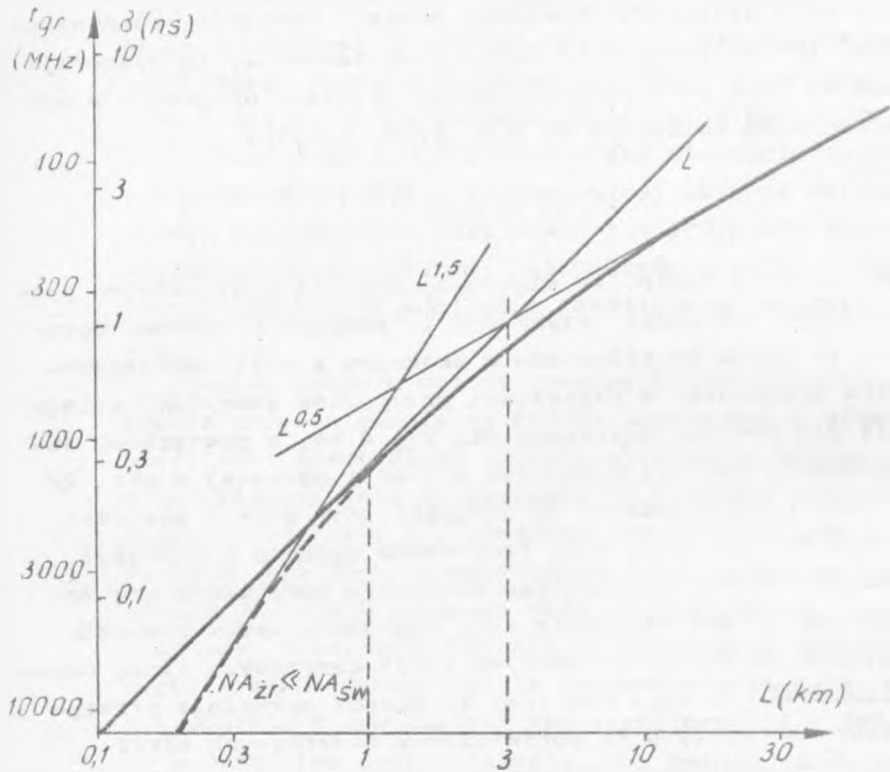
3. Jeżeli w rozpatrywanym torze światłowodowym mamy do czynienia z ustalonym rozkładem modów i znacznym, równomiernym ich mieszaniem na całej jego długości, to dyspersja modowa tego toru rośnie wolniej niż jego długość - z wykładnikiem zbliżonym do 0,5 [3, 4, 6, 19]:

$$\delta(L) \approx K \cdot L^{0,5}$$

Wynika to z faktu, że większość energii jeet kolejno propagowana w postaci "szybkich" i "powolnych" modów. Dotyczy to także światłowodów o skokowym profilu współczynnika załamania. W większości przypadków stan taki osiąga się dla odcinka dłuższego niż 2 ÷ 4 km, a początkowo obserwowany jeet /z wyjątkiem sytuacji opisanej w pkt. 2/ prawie proporcjonalny do długości toru wzrost wartości dyspersji [4, 12]. Stan taki można wymusić w krótszym odcinku włókna zwiększając sztucznie sprzężenie się modów, np. przez włączenie tzw. mieszaczy modów pomiędzy łączone odcinki fabrykacyjne kabli tworzących linię światłowodową [4, 25]. Nie jeet to sposób normalnie praktykowany ze względu na wprowadzanie dodatkowych strat. Opisane zależności ilustruje rys. 6.

Skomplikowany charakter rozpatrywanych zjawisk, a w szczególności silna zależność intensywności mieszania się modów w światłowodzie od jego technologii, partii produkcyjnej i sposobu okablowania oraz wpływu obecności złącz [4] uniemożliwiają dokładne obliczenie szerokości pasma /dyspersji impulsu/ linii światłowodowej tylko na podstawie danych o szerokości pasma i profilu współczynnika załamania poszczególnych odcinków posiadanego światłowodu. Błędy obliczeń rzędu 30 - 50% nie są rzadkością. Dokładniejsze obliczenia [12] wymagają znajomości dodatkowych danych pomiarowych. Niektórzy specjaliści zalecają próbne łączenie od-

inków kabli i eksperymentalny dobór optymalnej ich kolejności w budowanej linii.



Rys. 6. Typowa zależność szerokości pasma i dyspersji impulsu toru ze światłowodu wielomodowego gradientowego od jego długości

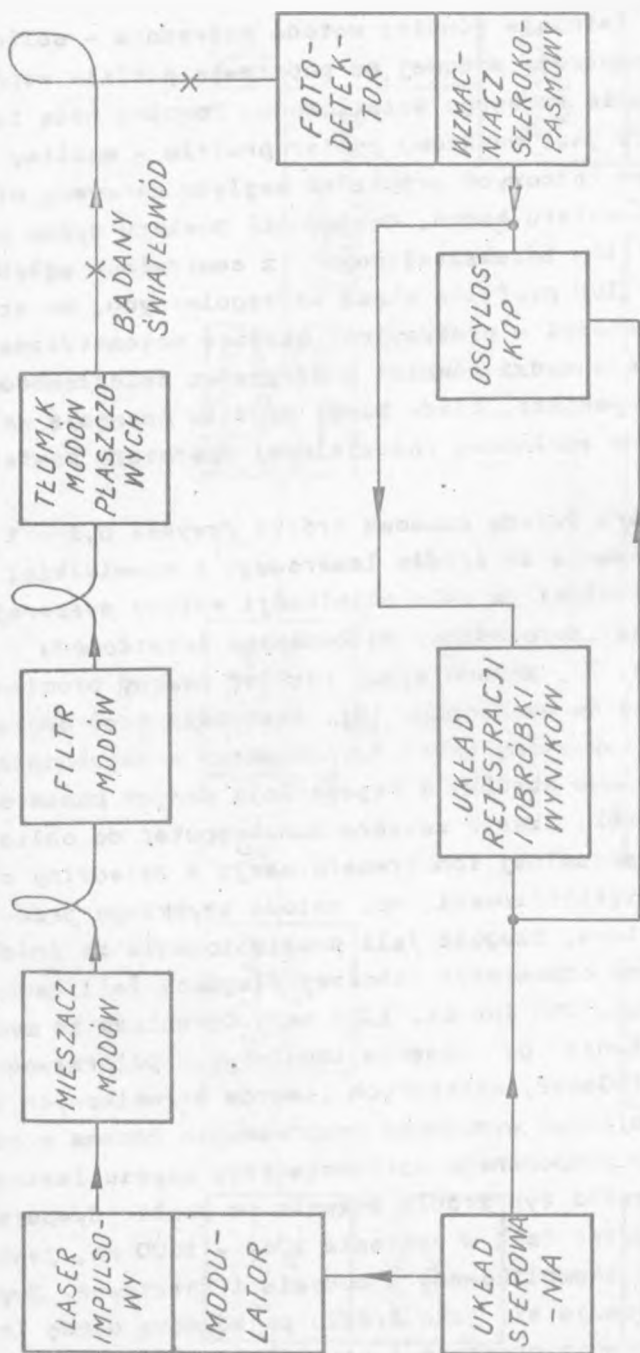
### 3. METODY POMIAROWE

Z dwóch wymienionych poprzednio sposobów określania dyspersji próbki światłowodu przez rozszerzenie impulsu i szerokość pasma przenoszenia wynikają bezpośrednio metody pomiarowe, a mianowicie: metoda czasowa /impulsowa/ i metoda częstotliwościowa /pomiar przy użyciu ciągłego sygnału si-

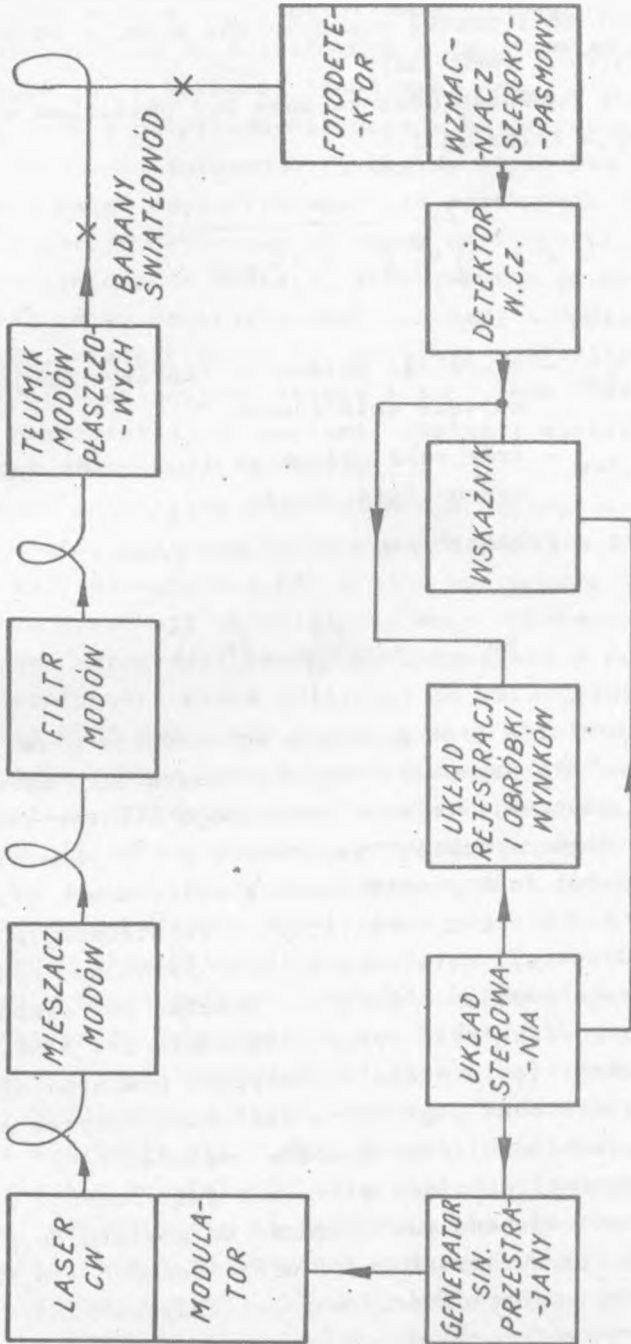


nusoidalnego/. Istnieje również metoda pośrednia - obliczenie wartości dyspersji modowej na podstawie profilu współczynnika załamania badanego światłowodu. Poważną wadą tej ostatniej metody jest punktowy pomiar profilu - możliwy tylko w punktach końcowych próbki ze względu na wymóg nieinwazyjnego charakteru badań. Dokładność pomiaru spada poważnie dla profilów zniekształconych, z centralnym wgłębieniem /tzw. dip/ lub profilów wręcz nieregularnych, co stwarza poważne trudności w precyzyjnej obróbce matematycznej. Metoda pośrednia zawodzi również w przypadku światłowodów bardzo wysokiej jakości, kiedy błędy profilu osiągają wartości zbliżone do zdolności rozdzielczej aparatury pomiarowej.

Podczas pomiaru metodą czasową krótki /zwykle 0,1 - 1 ns/ impuls promieniowania ze źródła laserowego o niewielkiej szerokości spektralnej /w celu eliminacji wpływu dyspersji materiałowej/ jest wprowadzany do badanego światłowodu przez układ /rys. 7/, zapewniający rozkład modowy promieniowania zbliżony do ustalonego [5]. Następnie jest odbierany przez szerokopasmowy układ fotodetektor - wzmacniacz, połączony z zestawem obróbki i rejestracji danych pomiarowych. Zestaw obróbki często zawiera minikomputer do obliczania wyników i ewentualnej ich transformacji z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości, np. metodą szybkiego przekształcenia Fouriera. Długość fali promieniowania ze źródła laserowego powinna odpowiadać roboczej długości fali badanego światłowodu /ok. 850 lub ok. 1300 nm/. Ogranicza to zakres zainteresowań głównie do laserów impulsowych półprzewodnikowych GaAlAs i InGaAsP, niektórych laserów barwnikowych lub układu wykorzystującego wymuszone rozproszenie Ramana w odcinku światłowodu pompowanego optycznie przy użyciu lasera Nd - YAG. Ten ostatni typ źródła pozwala na pomiar dyspersji dla dowolnej długości fali w zakresie 1064 - 1600 nm, jest ono jednak bardzo skomplikowane w budowie i kosztowne. Zwykle w praktyce stosuje się jako źródło pojedynczą diodę laserową, która zapewnia prostotę i niewielkie wymiary urzę-



Rys. 7. Podstawowy układ pomiarowy dyspersji modowej światłowodów metodą impulsową



Rys. 8. Podstawowy układ pomiarowy dyspersji modowej światłowodu metodą częstotliwościową

dzeń. Sprzęt taki został opracowywany m.in. w Polsce /IPE PW/, NRD /IPF/ i ZSRR [13].

Dyspersja badanego odcinka może być obliczona w sposób przybliżony z zależności:

$$\delta = \sqrt{t_{0,5wy}^2 - t_{0,5we}^2}$$

gdzie:  $t_{0,5we}$  - szerokość połówkowa impulsu nadajnika na wejściu światłowodu,

$t_{0,5wy}$  - szerokość połówkowa impulsu na wyjściu badanego światłowodu.

Odpowiada to w przybliżeniu szerokości pasma:

$$BW_{6dB} = \frac{400}{\delta [ns]} \quad [MHz]$$

Dokładność pomiarów jest poważnie ograniczona przez pasywnie zjawisko samoprzestrajania lasera półprzewodnikowego w czasie generacji impulsu optycznego wskutek wzrostu temperatury złącza. Wzrost temperatury o  $5^{\circ}C$  powoduje zwiększenie długości fali promieniowania emitowanego przez laser GaAlAs /850 nm/ o ok. 1,5 nm [1,2]. W światłowodzie o długości 5 km i dyspersji materiałowej  $-100$  ps/km.nm, następuje wtedy kompresja impulsu o 0,75 ns, podczas gdy dyspersja modowa takiego odcinka może wynosić zaledwie  $1 + 3$  ns. Problem ten praktycznie nie istnieje w przypadku pomiarów dla długości fali 1300 nm ze względu na minimalną wówczas wartość dyspersji materiałowej światłowodów kwarcowych.

Metoda częstotliwościowa stosowana jest obecnie w większości oferowanych handlowo urządzeń do pomiaru dyspersji telekomunikacyjnych światłowodów wielomodowych [15,17,24]. W metodzie tej amplituda promieniowania wytwarzanego przez źródło laserowe ciągłego działania jest modulowana sygnałem

sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości. Promieniowanie zostaje wprowadzone do światłowodu z zachowaniem identycznych wymagań jak w metodzie impulsowej /rys. 8/. Zwykle używa się lasera półprzewodnikowego z bezpośrednią modulacją amplitudy promieniowania. Niekiedy stosowana jest dioda LED, jeżeli pasmo częstotliwości nie przekracza 100 MHz, a wpływ dyspersji materiałowej można pominąć. Ciągła praca źródła promieniowania w stałej temperaturze pozwala uniknąć szkodliwych zmian częstotliwości roboczej i związanych z tym błędów. Niebezpieczne są natomiast nieliniowości charakterystyki modulacyjnej lasera i spotykane często skłonności do pasożytniczych oscylacji wielkiej częstotliwości w określonych warunkach modulacji.

Szerokość spektralna promieniowania użytego źródła nie powinna, według zaleceń CCITT, przekraczać 3 i 10 nm dla długości fali odpowiednio 850 i 1300 nm, w przeciwnym przypadku wpływ dyspersji materiałowej może zniekształcić /pozorny spadek szerokości pasma/ wynik pomiaru w przypadku próbek o szerokości pasma zbliżonej do maksymalnie osiągniętych /ponad 1000 MHz . km/.

Układ odbiorczy w najprostszym przypadku składać się może z szybkiego fotodetektora /fotodiody lawinowej, fotodiody PIN o niewielkiej pojemności/, wzmacniacza szerokopasmowego /zwykle 300 + 1000 MHz/, detektora w.cz. i wskaźnika oscylograficznego do bezpośredniej obserwacji charakterystyk amplitudowo - częstotliwościowych.

Dla zwiększenia zakresu dynamiki układu można użyć odbiornika selektywnego /np. analizatora widma/. Ze względu na trudności w uzyskaniu wyrównanej charakterystyki częstotliwościowej modulatora z diodą laserową i odbiornika optycznego często rezygnuje się z dokładnego i pracochłonnego strojenia, stosując automatyczną korekcję wyników pomiarów. Korekcji tej dokonuje się na podstawie charakterystyki własnej zestawu pomiarowego zdejmowanej podczas autokalibracji na początku każdego pomiaru [17, 24] lub zarejestrowanej na stałe [17]. Operację tę wykonuje zwykle mikroprocesor, któ-

regu głównym zadaniem jest sterowanie przebiegiem pomiaru. Rzadziej spotykana jest współpraca z zewnętrznym mikrokomputerem.

Generator sygnału modulującego może pracować z przestrajaniem płynnym w wybranym zakresie częstotliwości lub z przestrajaniem skokowym zwykle co 10 MHz. Pierwszy sposób stosowany jest głównie w zestawach laboratoryjnych z obserwacją oscylograficzną i dokładną rejestracją pełnej charakterystyki częstotliwościowej badanego światłowodu. Druga metoda znajduje zastosowanie w urządzeniach zautomatyzowanych lub uproszczonych typu serwisowego. Podstawowym wynikiem pomiaru jest szerokość pasma badanego odcinka światłowodu definiowana jako najmniejsza częstotliwość, dla której moduł charakterystyki częstotliwościowej spada o 6 dB /do 50%/ w stosunku do częstotliwości bliskich zeru /w praktyce zwykle 1 MHz/. Dla zapewnienia porównywalności wyników pomiarów oblicza się szerokość pasma dla standardowo zalecanego przez CCITT odcinka o długości 1 km. Jeżeli długość próbki nie przekracza 2 km, stosuje się zwykle zależność liniową:

$$BW_{1km} = BW(L) \cdot L$$

gdzie:  $L$  - długość badanego odcinka w km,

$BW(L)$  - szerokość pasma tego odcinka w MHz,

$BW_{1km}$  - szerokość pasma dla odcinka 1 km w MHz · km

Zalecenia CCITT [5] określają następujący podział światłowodów wielomodowych gradientowych według wymaganej minimalnej szerokości pasma odcinka o długości 1 km, ograniczonej dyspersją modową /tablica 1/:

Należy podkreślić, że ze względu na własności dyspersyjne wszystkich materiałów używanych do produkcji światłowodu, dyspersja modowa jest funkcją długości fali [6] i nawet niewielka jej odchyłka, np. z 830 na 860 nm powoduje już widoczną zmianę wyników pomiaru.

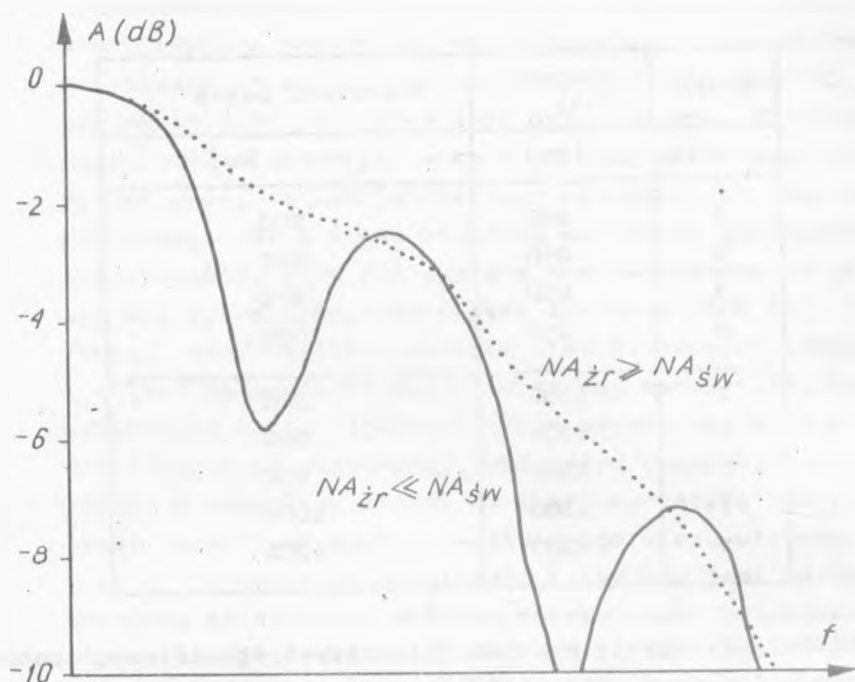
Tablica 1

Klasa	Długość fali	Szerokość pasma
-	[nm]	[MHz · km]
1	850	200
2	850	500
3	850	800
4	850	1000
I	1300	200
II	1300	500
III	1300	800
IV	1300	1000
V	1300	1200

Nieprzestrzeganie wymagań dotyczących prawidłowego pobudzenia światłowodu jest źródłem poważnych błędów pomiarów dyspersji krótkich /do 1 km/ odcinków światłowodów i kabli. Typowy efekt użycia źródła o zbyt niewielkiej aperturze numerycznej przedstawia rys. 9 [18].

Praktyczne układy mieszaczy modów, np. złożonych z odcinków światłowodów o profilu na przemian skokowym i gradientowym /zwłaszcza w układzie GSG<sup>x/</sup>/ czy też w postaci odcinka włókna nawiniętego na szpulę o niewielkiej średnicy spełniają swe zadanie prawidłowo tylko dla określonych wartości apertury numerycznej i średnicy światłowodu badanego, stąd też znaczący rozrzut tych wartości np. podczas badań światłowodów z produkcji doświadczalnej prowadzi do nieuniknionego pogorszenia dokładności pomiarów. Konieczne wydaje się także ostrzeżenie, że stosowane w nadajnikach systemów światłowodowych o wysokich przepływnościach lasery półprzewodniko-

<sup>x/</sup> Mieszacz modów złożony z trzech odcinków światłowodów: środkowego o profilu skokowym i dwóch o profilu gradientowym.



Rys. 9. Zniekształcenie obserwowanej charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowej krótkiego odcinka światłowodu wskutek niewłaściwego pobudzenia światłowodu

we z zasady zapewniają pobudzenie światłowodu wyraźnie różne od przyjętego dla aparatury pomiarowej - w szczególności cechuje je ograniczona apertura numeryczna i brak symetrii osiowej. Stąd też wynik pomiaru wykonanego nawet bardzo precyzyjną aparaturą niekoniecznie odpowiada zachowaniu się linii światłowodowej podczas pracy w rzeczywistych warunkach, a dążenie do uzyskiwania bardzo wysokiej dokładności pomiarów nie jest celowe.

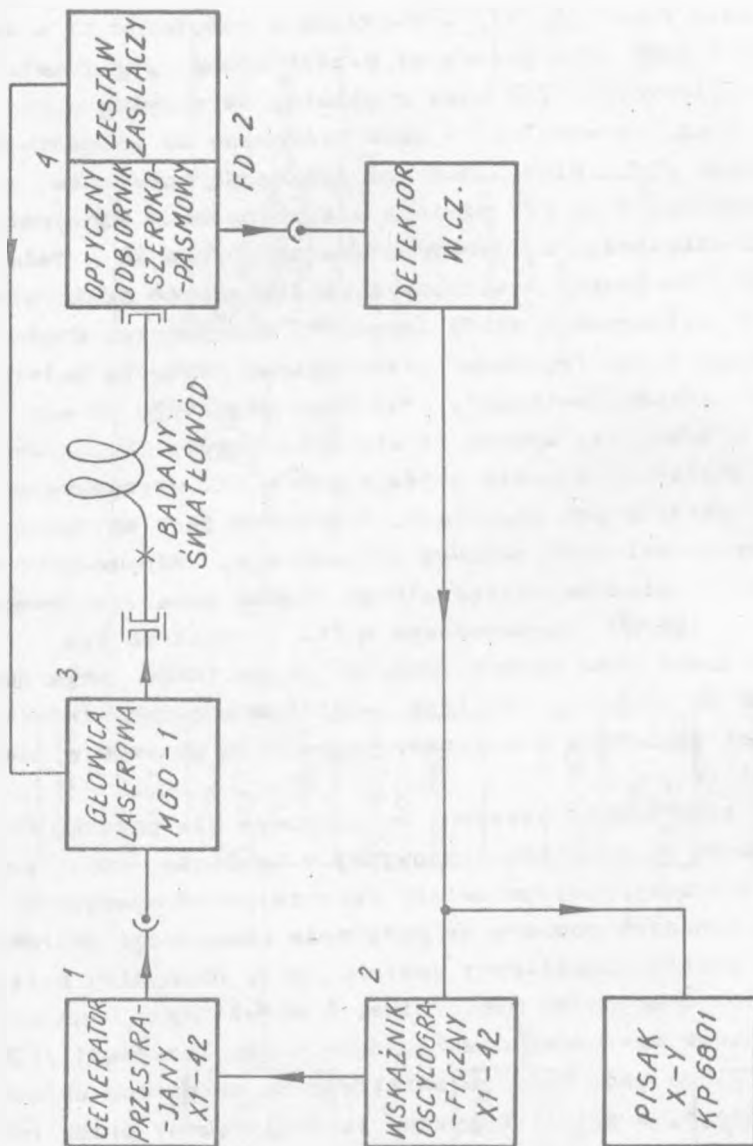
#### 4. APARATURA OPRACOWANA W IŁ

W Instytucie Łączności, w Samodzielnej Pracowni Telekomunikacji Optycznej, opracowano i wykonano w latach 1983-85 dwie wersje zestawu pomiarowego dyspersji modowej światło-

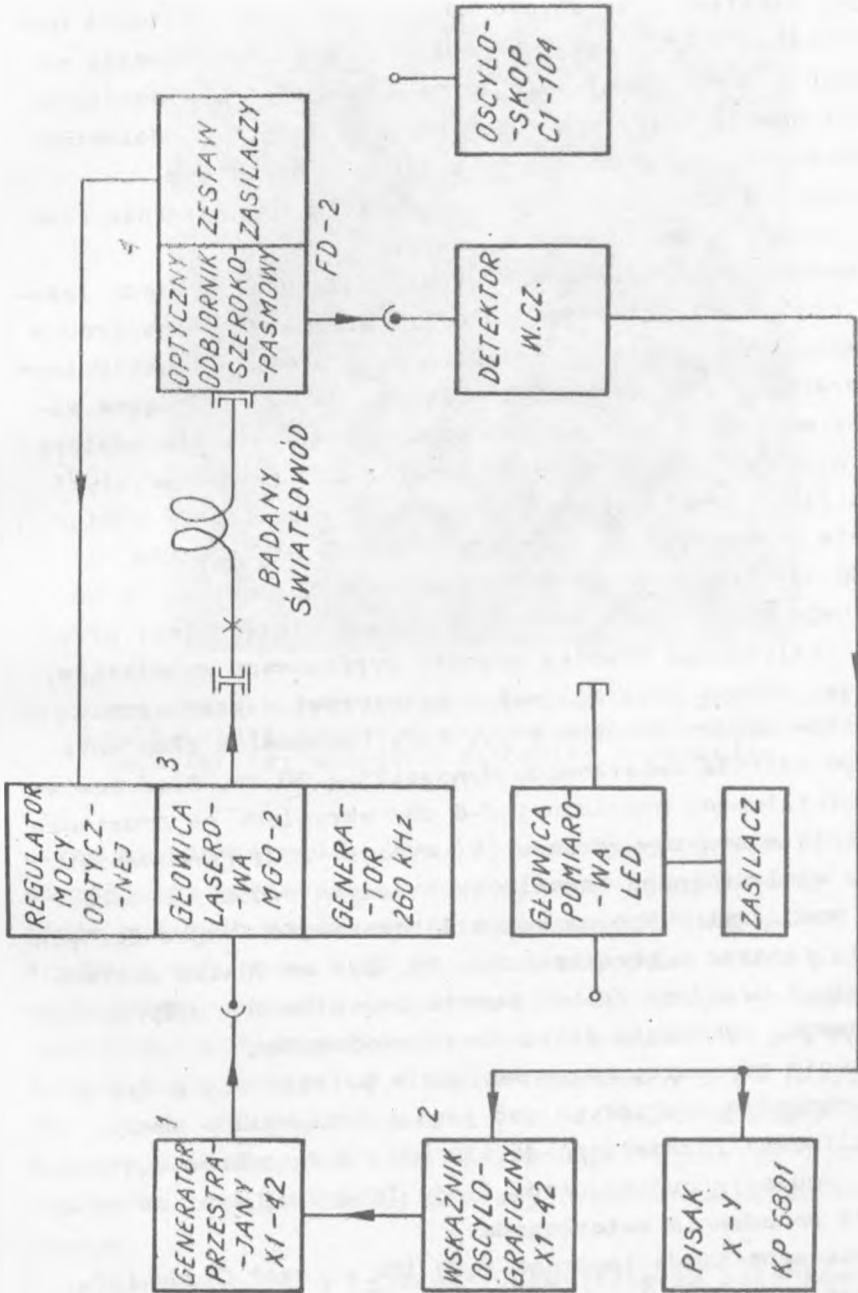


wodów wielomodowych gradientowych o średnicy 50/125  $\mu\text{m}$ , pracujących w pasmie 850 nm, metodą częstotliwościową. W zestawie /rys. 10, 11/ wykorzystano wobulator X1 - 42 produkcji ZSRR jako generator przestrajany /1/ i wskaźnik oscyloskopowy /2/ wraz z głowicą detekcyjną w.c.z. Sygnał w.c.z. z wobulatora jest kierowany do modulatora optycznego /3/ z diodą laserową sprzężoną optycznie ze światłowodem. Blok /4/ zawiera szerokopasmowy odbiornik sygnału optycznego z fotodiodą lawinową /BPW 28 - Telefunken/ oraz zespół zasilaczy stabilizowanych odbiornika i układu polaryzacji diody laserowej modulatora. Czułość odbiornika można regulować przez zmianę napięcia polaryzacji fotodiody lawinowej, przy czym regulacja ta nie wpływa w szkodliwy sposób na charakterystykę odbiornika, jeżeli amplituda sygnału wyjściowego w.c.z. utrzymywana jest w określonych granicach. Fotodioda jest sprzężona z końcówką światłowodu układem soczewkowym, umieszczonym w obudowie z gniazdem rozłączalnego złącza światłowodowego SZR - 4 - 125/50 opracowanego w Ił. Z gniazdem tym współpracować może oprócz typowego wtyku także wtyk rozbiernalny do szybkiego montażu, w którym końcówka światłowodu jest zaciskana elastycznym elementem gumowym w rowku o profilu V.

W starszym modelu zestawu, opracowanym dla potrzeb Ośrodka Techniki Optotelekomunikacyjnej w Lublinie, punkt pracy diody laserowej jest ustawiany ręcznie przez operatora przed wykonaniem pomiaru na podstawie obserwacji charakterystyki częstotliwościowej zestawu, przy nadajniku połączonym wprost z wejściem odbiornika. W modulatorze - nadajniku optycznym zastosowano sprzężenie diody laserowej /LCW 10 - Laser Diode Inc, USA/ ze światłowodem za pomocą układu soczewkowego, a sygnał optyczny jest kierowany przez rozłączalne złącze światłowodowe do odcinka wstępnego światłowodu wielomodowego gradientowego dł. ok. 50 m, nawiniętego na szpulę o niewielkiej średnicy. Połączenie ze światłowodem badanym wykonuje się zwykle metodą zgrzewania łu-



Rys. 10. Schemat blokowy układu pomiarowego dyspersji opracowanego dla potrzeb OTO - Lublin



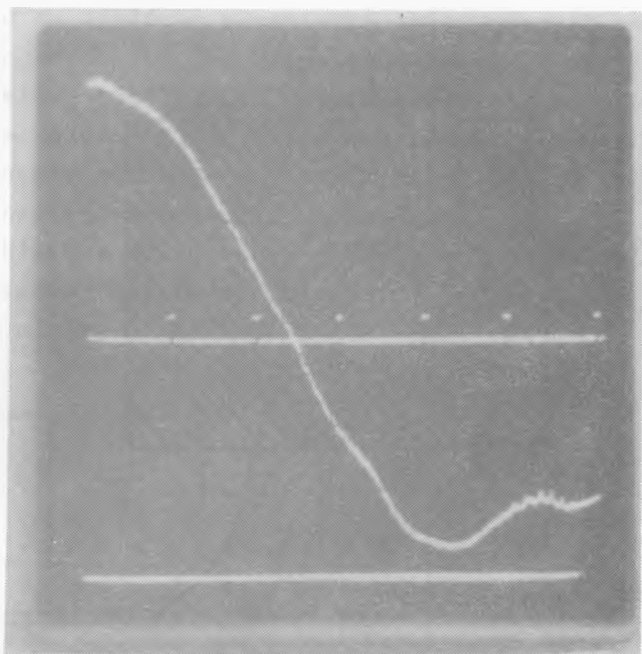
Rys. 11. Schemat blokowy zestawu pomiarowego stosowanego w Instytucie Łączności

kowego, rzadziej przy użyciu manipulatora XYZ. Istotne dla dokładności pomiaru jest unikanie odbić promieniowania na złączach w niewielkiej odległości od nadajnika - powstaje wówczas pasożytniczy rezonator Fabry - Perota z odcinkiem światłowodu laser - złącze jako linią opóźniającą, co zniekształca obserwowaną charakterystykę równomiernie rozmieszczonymi "pikami" rezonansowymi.

W modulatorze zastosowano układy polaryzacji diody laserowej prądem stałym / $\approx 140$  mA/ ze stabilizowanego źródła prądowego oraz modulacji przebiegiem prądowym sinusoidalnym z generatora, o użytecznej głębokości do 60%. Wymagana minimalna wartość mocy sygnału optycznego na wejściu odbiornika wynosi ok. 500 nW. Nierównomierność charakterystyki częstotliwościowej zestawu wobulator - modulator - odbiornik nie przekracza  $\pm 0,8$  dB w zakresie  $0,8 + 400$  MHz i  $\pm 0,3$  dB w zakresie  $1 + 150$  MHz. Określenie poziomu  $-6$  dB wymaganego dla pomiaru szerokości pasma możliwe jest przy użyciu skalowanego tłumika sygnału wyjściowego wobulatora, natomiast odczyt częstotliwości granicznej - przy użyciu znaczników częstotliwości /rys. 12/. Maksymalne tłumienie badanego odcinka światłowodu wynosi  $25 + 30$  dB. Błąd pomiaru częstotliwości granicznej  $-6$  dB/ określony na podstawie parametrów elementów zestawu [9] wynosi  $\pm 10\%$ . Porównania wyników wielokrotnego badania tych samych próbek ze sobą oraz z pomiarami wykonywanymi w laboratoriach zagranicznych wykazują różnice w granicach 5 - 7%, pod warunkiem starannej obsługi urządzeń /dobór punktu pracy lasera półprzewodnikowego, wykonanie złącz światłowodowych/.

W drugim zestawie, wykonywanym dla potrzeb IŁ, podjęto próbę usunięcia niektórych wad jego poprzednika - pasmo częstotliwości rozszerzono do 630 MHz, wprowadzono automatyczną regulację punktu pracy diody laserowej oraz zmieniono układ pobudzania światłowodu.

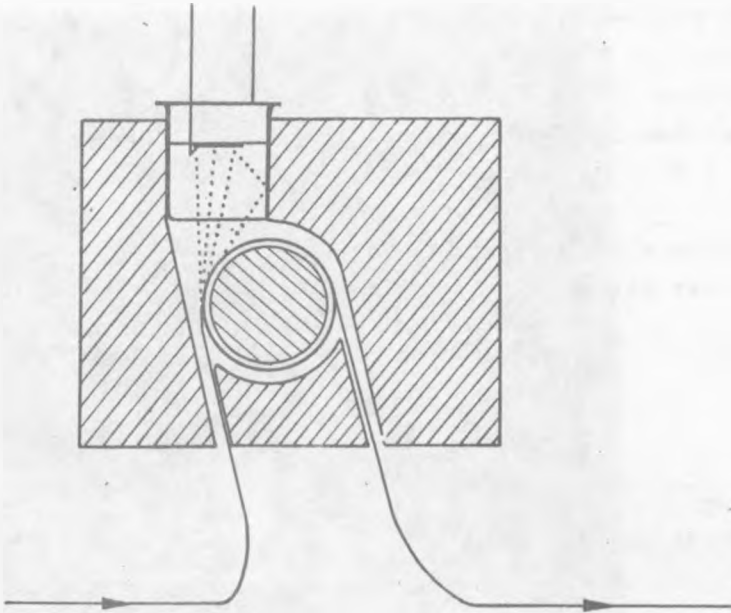
Zastosowana dioda laserowa /LCW 10F - Laser Diode Inc., USA/ jest bezpośrednio sprzężona fabrycznie ze światłowodem, bez fotodiody kontrolnej. W tej sytuacji zastosowano



Rys. 12. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa kabla światłowodowego obserwowana na wskaźniku wobulatora; widoczne znaczniki częstotliwości 100 MHz

układ mieszacza modów /rys. 13/, będącego jednocześnie sprzęgaczem wprowadzającym część mocy propagowanej w formie modów wyższych rzędów do fotodiody pomiarowej /BPYP 35, średnica struktury 3,08 mm/ oraz tłumikiem modów płaszczykowych dzięki pokryciu światłowodu nawiniętego na szpulę warstwą przezroczystego kleju. Straty wnoszone przez ten element wynoszą poniżej 0,4 dB, a uzyskiwany prąd fotodiody jest rzędu 300 nA. Umieszczony za mieszaczem modów odcinek wstępny światłowodu /8 m/ jest poddany zgięciom o promieniu ok. 10 mm w celu dalszej poprawy pobudzenia światłowodu badanego.

Przeprowadzone z kilkoma typami laserów półprzewodnikowych próby bezpośredniej modulacji amplitudy promieniowania w zakresie częstotliwości 300 + 900 MHz wykazały bardzo



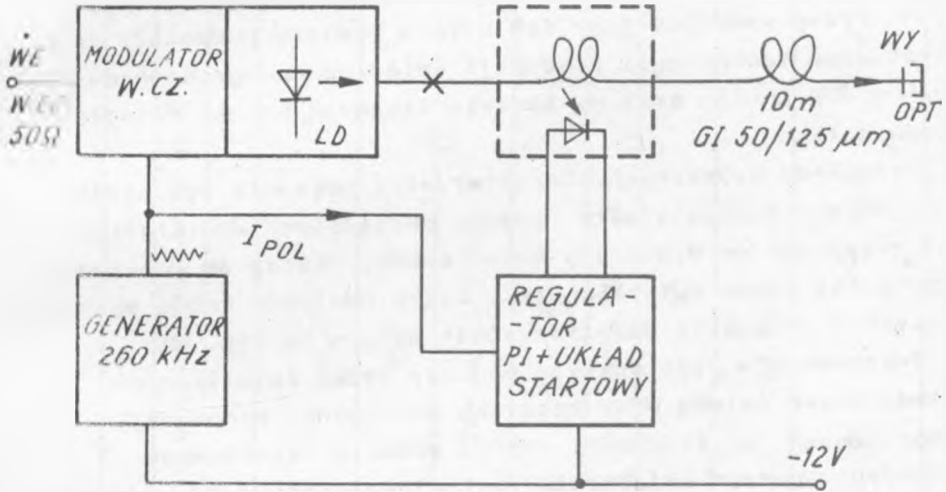
Rys. 13. Sprzęgacz do pomiaru mocy promieniowania w światłowodzie

silną zależność charakterystyk amplitudowo - częstotliwościowych tych elementów od prądu polaryzacji. Już zmiany o  $0,5 \pm 1$  mA powodują poważną zmianę przebiegu charakterystyki. Zmiany te nie cechowały się regularną zależnością od wartości prądu polaryzacji, amplituda ich była rzędu 2 dB - w przeciwieństwie do bardzo równomiernego przebiegu charakterystyk w zakresie  $0 \pm 200$  MHz. Niektóre egzemplarze laserów wykazywały samoczynne oscylacje wartości mocy promieniowanej o częstotliwości około 300 MHz, po przekroczeniu określonego progu mocy wyjściowej.

W tej sytuacji zastosowano dodatkowy układ dynamicznego uśredniania przebiegów charakterystyki lasera. Prąd polaryzacji zawiera dodatkową składową o częstotliwości 260 kHz i przebiegu zbliżonym do piłokształtnego. Filtr dolnoprzepustowy umieszczony w głowicy detekcyjnej wobulatora zapewnia skuteczne tłumienie tego sygnału pomocniczego, nie

dopuszczając do zakłóceń przebiegów obserwowanych na wskaźniku oscylograficznym lub rejestrowanych przy użyciu pisarka X - Y. Układ stabilizacji mocy wyjściowej, modulacji pomocniczej, modulator w.c.z. i elementy światłowodowe umieszczono w obudowie modulatora o wymiarach 132 x 36 x 41 mm i zasilano napięciem stabilizowanym -12 V.

Schemat blokowy modulatora - nadajnika przedstawia ryc.14. Pozostałe /oprócz zasilacza/ elementy i wygląd zewnętrzny zestawu nie uległy poważniejszym zmianom.



Ryc. 14. Schemat blokowy modulowanego generatora optycznego MGO - 2

Oprócz spełniania swych podstawowych zadań, odbiornik zestawu może też służyć jako szerokopasmowy monitor impulsów optycznych /współpracujący z oscyloskopem szerokopasmowym, np. C - 104, prod. ZSRR/ do kontroli pracy nadajników systemów światłowodowych o wysokich krotnościach, pomiarów dyspersji metodą impulsową, testowania źródeł promieniowania itp. Nadajnik /bez modulacji w.c.z./ może być używany jako stabilizowane źródło promieniowania dużej mocy, np. do pomiarów tłumienia światłowodów.

Podstawowe dane i charakterystyki obu zestawów zebrano w tabelicy 2 i na rys. 15, 16. W najbliższej przyszłości przewidziane jest opracowanie podobnego zestawu pracującego przy długości fali 1300 nm. Opisyany zestaw umożliwi również pomiar szerokości pasma linii zainstalowanej w terenie, pod warunkiem uzupełnienia go o dodatkowy zasilacz i oscyloskop. Przy użyciu podobnego zestawu wykonano w 1983 roku pierwsze pomiary dyspersji doświadczalnej linii światłowodowej zainstalowanej w Łodzi [20]. Opracowane w Łd. zestawy stanowią obecnie jedyny eksploatowany w kraju sprzęt do pomiaru dyspersji światłowodów telekomunikacyjnych. Przeprowadzone przy ich użyciu pomiary pozwoliły na ulepszenie technologii produkcji światłowodów gradientowych w OTO Lublin oraz na badania licznych próbek światłowodów w Łd.

Przykłady uzyskanych charakterystyk pokazują rys. 17÷20, ilustrujące typowe efekty wpływu określonych wad profilu refrakcyjnego na dyspersję światłowodu. Histogram rozkładu szerokości pasma światłowodów z kilku odcinków kabli pochodzących z produkcji doświadczalnej podano na rys. 21.

Interesujące jest odkryte podczas badań światłowodów wytwarzanych metodą MCVD zjawisko anormalnej propagacji jednomodowej w środkowej części rdzenia światłowodu o przekompensowanym wgłębieniu centralnym profilu /rys.22a,b/. Objawia się ono istnieniem 2 składowych odpowiedzi światłowodu w dziedzinie częstotliwości:

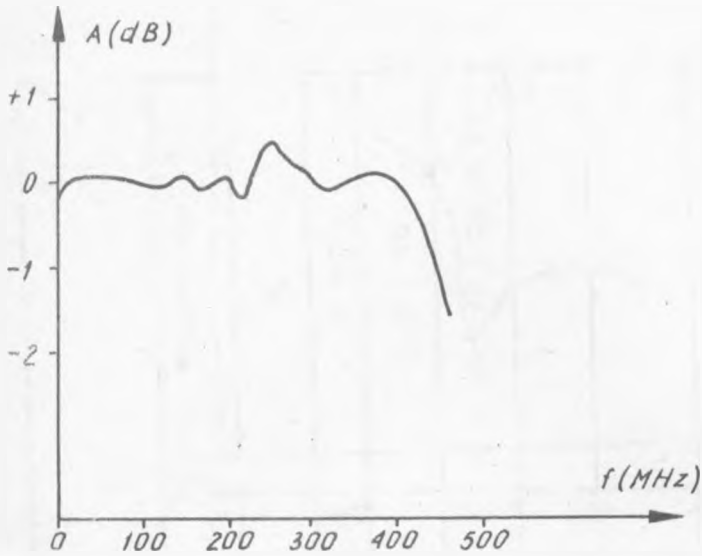
- "normalnej" o amplitudzie malejącej monotonicznie /rządziej oscylacyjnie/ do zera wraz ze wzrostem częstotliwości,
- "anormalnej" o amplitudzie niezależnej od częstotliwości, będącej wynikiem propagacji jednomodowej.

Efekt powyższy nie był dotychczas opisywany w znanej autorowi artykule literaturze.

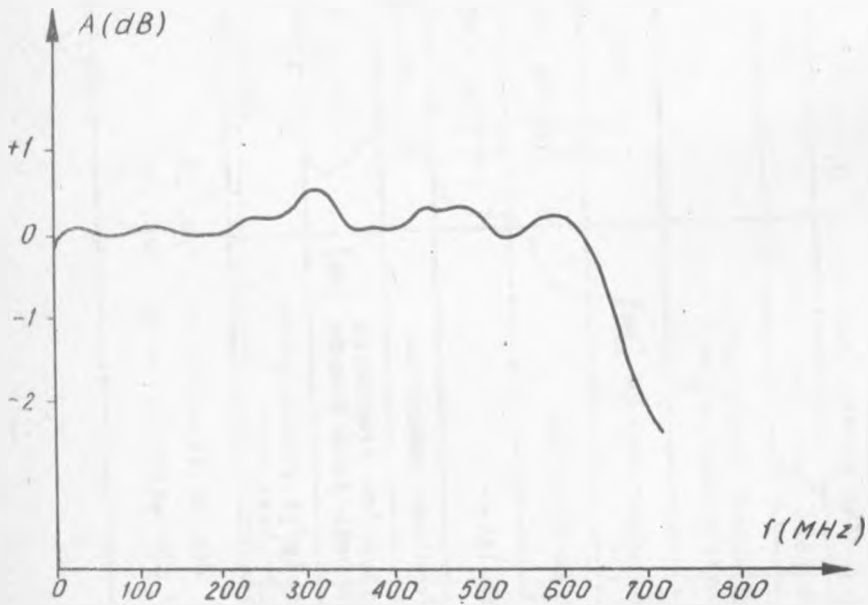


Tablica 2

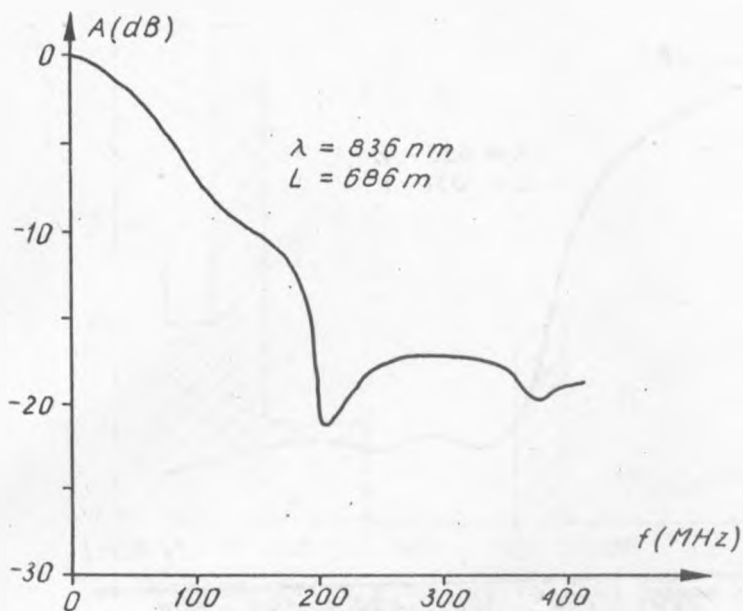
Zestaw	OTO	IL
Zakres częstotliwości	0,8 + 410 MHz ±0,8 dB x/	2 + 630 MHz ±0,5 dB xx/
Długość fali [nm]	836	856
Szerokość spektralna promieniowania [nm]	2,5	2,5
Moc wyjściowa CW [ $\mu$ W]	220	720
Dioda laserowa	GaAlAs (LCW 10)	GaAlAs (LCW 10 F)
Wobulator	X1 - 42	X1 - 42
Fotodioda odbiorcza	S1 - APD (BPW 28)	S1 APD
Maksymalne tłumienie badanego światłowodu [dB]	25 + 30	30
Regulacja punktu pracy diody laserowej	ręczna	automatyczne
x/ Charakterystyka wg rys. 15.		
xx/ Charakterystyka wg rys. 16.		



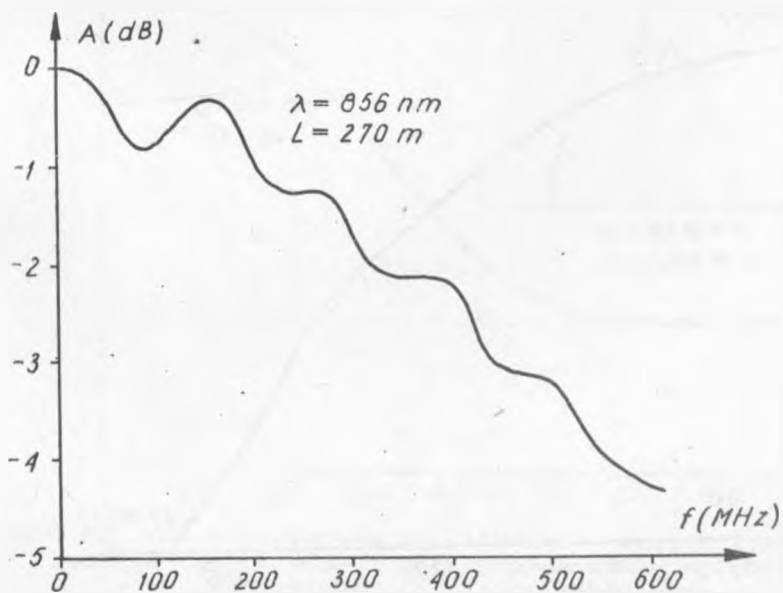
Rys. 15. Charakteretyka amplitudowo - częstotliwościowa zestawu pomiarowego stosowanego w OTO - Lublin



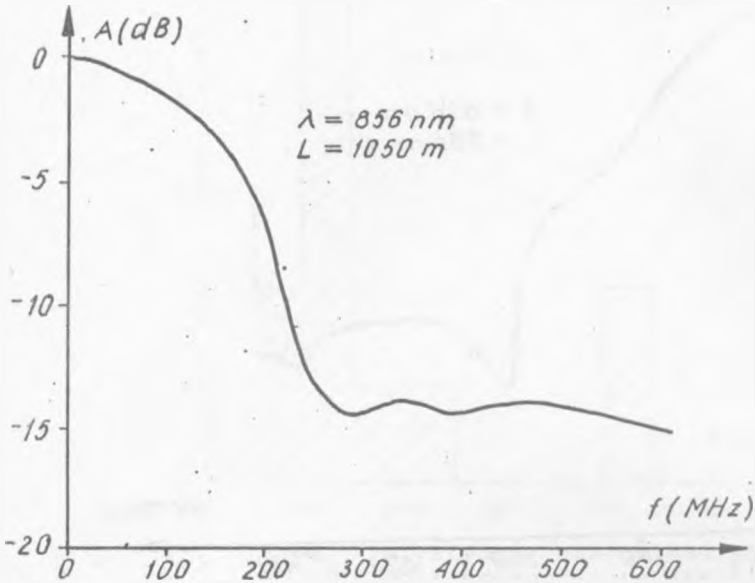
Rys. 16. Charakteretyka amplitudowo - częstotliwościowa zestawu pomiarowego stosowanego w It.



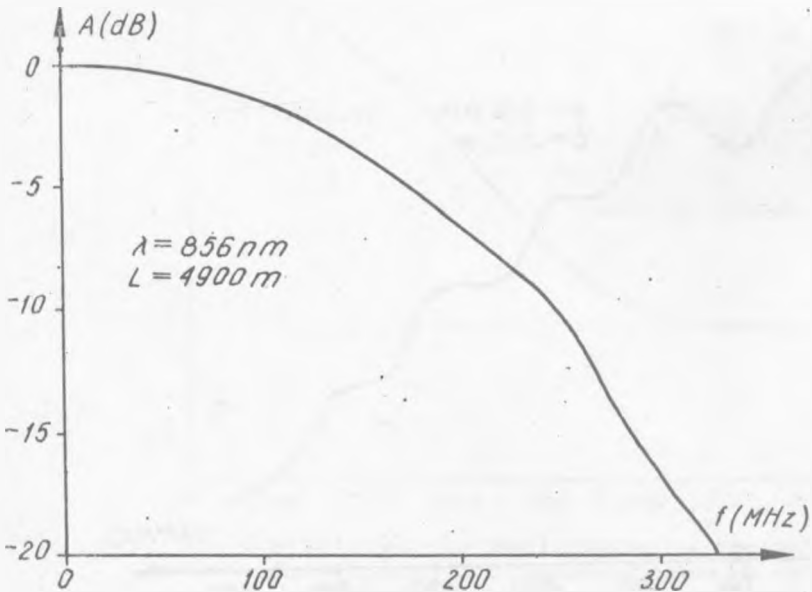
Rys. 17. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa próbki światłowodu wielomodowego gradientowego 50/125  $\mu\text{m}$  - przykład 1



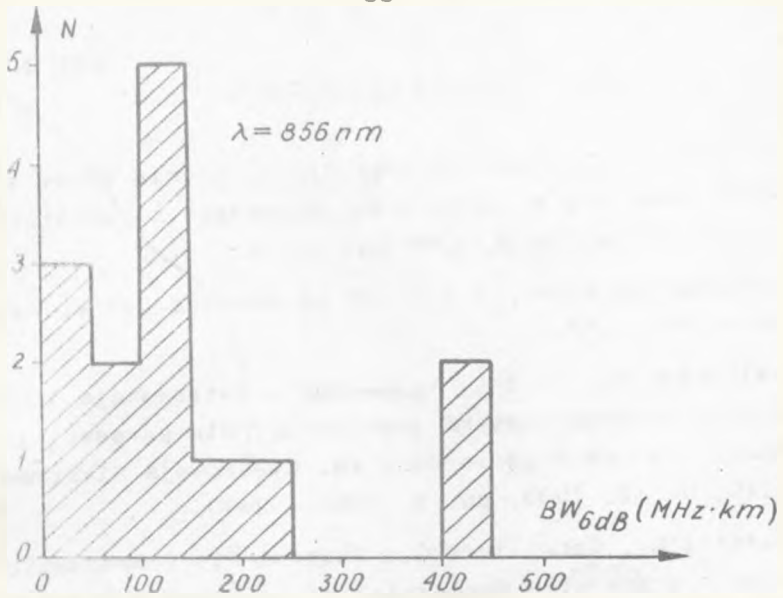
Rys. 18. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa próbki światłowodu wielomodowego gradientowego 50/125  $\mu\text{m}$  - przykład 2



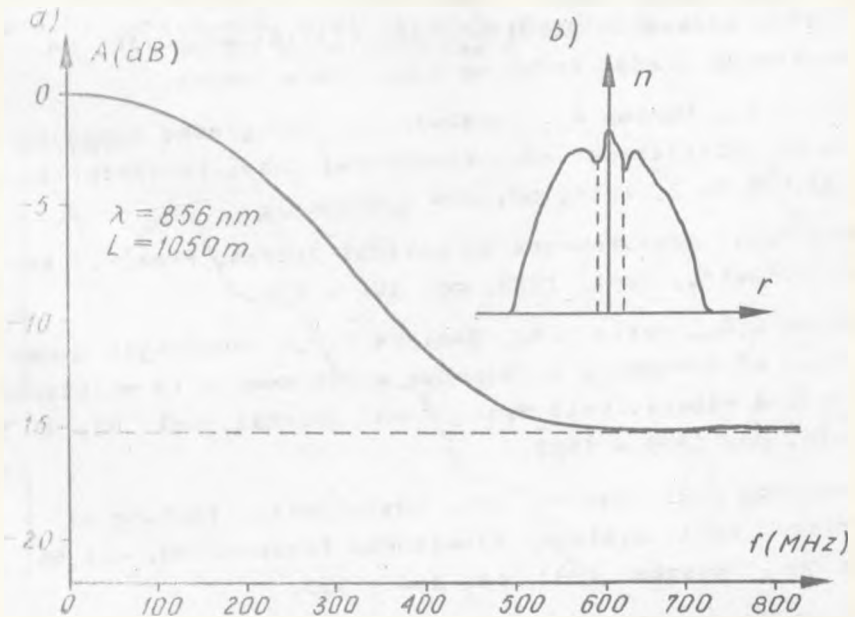
Rys. 19. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa próbki światłowodu wielomodowego gradientowego 50/125  $\mu\text{m}$  - przykład 3



Rys. 20. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa próbki światłowodu wielomodowego gradientowego 50/125  $\mu\text{m}$  - przykład 4



Rys. 21. Rozkład statystyczny szerokości pasma światłowodów z doświadczalnej partii kabli



Rys. 22. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa odcinka światłowodu z przekompensowanym wgłębieniem centralnym profilu refrakcyjnego

a/ charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa odcinka o długości 1,05 km; b/ profil współczynnika załamania

## WYKAZ LITERATURY

1. Anlishev A.V. i in.: Pribor dla izmerenia dispersionnykh iskazhenij w opticeskich voloknach i kabeliach . Elektrosviaz, No 9, 1984 pp. 43-44.
2. Application Note A/N 101: CW Lasers and Led's. Laser Diode Inc, USA.
3. Belovolov M.I. i in.: Volokonno - opticeskaja linija sviazi s mnogomodovymi svetovodami dla peredaci informacii na rasstojanie do 8 km. Kvantovaja Elektronika, t.10, No 12, 1983, pp. s. 2487 - 2490.
4. Bonetti M., Canallieri G., Fautini P.: Compensation in time - dispersion properties of cascaded multimode fibres. Electronics Letters, vol. 20, No 5, 1984, pp. 211 - 212.
5. CCITT: Zalecenie G.651: Characteristics of 50/125  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical fibre cables.
6. Chida K., Hanawa F., Nakahara M.: VAD graded index optical fiber fabrication. Rev. Electrical Comm. Laboratories, vol. 32 No 3, 1984, pp. 404 - 410.
7. Chu P.L.: Measurements in optical fibres. Proc. of the IREE Austr., Sept. 1979, pp. 102 - 114.
8. Cohen L.G., Astle H.W., Kaminow I.P.: Wavelength dependence of frequency - response measurements in multimode optical fibers. Bell Syst. Tech. Journal, vol. 55, No 10, 1976, pp. 1509 - 1523.
9. Fielding S.J., Murphy F.M.: Installation testing of optical cable systems. Electronic Engineering, vol.56, No 695, November 1984, pp. 154 - 155.
10. Gloge D., Marcattili E.A.J.: Multimode theory of graded - core fibers. Bell Syst. Tech. Journal, vol. 52, No 9, 1973, pp. 1563 - 1578.

11. Gosch J.: Philips gives boost to performance of multimode fiber. *Electronics Week*, vol. 58, No 18, 1984, pp. 25 - 28.
12. Ikeda M.: Basic properties of transmission characteristics in multimode optical fibers. *Rev. Electrical Comm. Laboratories*, vol. 26, No. 3-4, 1978, pp 484-499.
13. Ikeda M., Kitayama K.: Transfer function of long spliced graded - index fibers with mode scramblers. *Applied Optics*, vol. 17, No 1, 1978. pp. 63 - 67.
14. Karta katalogowa firmy GEC Optical Fibres: Double Crucible partially graded index fibres type DCG 100/ /type DCG 160/ type DCG 200. Wielka Brytania 1983.
15. Karta katalogowa: 5450 Multimode Optical bandwidth test set. Tau - Tron Inc., USA.
16. Katalog firmy Fibres Optiques Industries. Francja 1984.
17. Katalog: Measurement instruments for optical fiber communications. Ando Electric Co., Japonia.
18. Katalogi sprzętu pomiarowego łączności optycznej, firmy Anritsu Co., Japonia.
19. Kobayashi I., Koyama M.: Step - index multimode fiber transmission characteristics. *Rev. Electrical Comm. Laboratories*, vol. 26, No. 3-4, 1978, pp. 500 - 508.
20. Kowar J., Borzycki K., Podejko J.: Instrukcja obsługi zestawu pomiarowego dyspersji w światłowodach. Instytut łączności, Warszawa 1984.
21. Kowar J., Figura U.: Problemy przeliczania dyspersji z dziedziny czasu na pasmo częstotliwości. Materiały III Krajowego Sympozjum "Światłowody i ich zastosowania", PWN Warszawa - Łódź, t. II, str. 186-190.
22. Kowar J., Podejko J., Borzycki K., Kiepas T.: Badanie kabla światłowodowego ułożonego w Łodzi. Sprawozdanie wewnętrzne Instytutu łączności, Warszawa 1983.

