

Zbigniew Koper<sup>1</sup>, Andrzej Cąkała<sup>1</sup>**DYSPERSJA POLARYZACYJNA (PMD) W EKSPLOATOWANYCH  
KABLACH ŚWIATŁOWODOWYCH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów polaryzacyjnej dyspersji modowej (PMD – Polarization Mode Dispersion) wykonanych w eksploatowanych kablach optotelekomunikacyjnych o całkowitej długości 415 km zainstalowanych w sieci TP S.A. Łączna długość zmierzonych włókien wynosiła 2407 km. Przedstawiono również analizę uzyskanych danych pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** światłowody, kable światłowodowe, dyspersja polaryzacyjna, optotelekomunikacja

**1. Wstęp**

W przeszłości uważano, że wpływ zjawiska dyspersji polaryzacyjnej na pracę cyfrowych systemów transmisyjnych jest pomijalnie mały. Ocena taka związana była z relatywnie małymi wartościami dyspersji polaryzacyjnej w porównaniu z wartościami dyspersji chromatycznej, którą uważano za podstawowy czynnik ograniczający transmisję. Obecnie, gdy potrafimy kompensować dyspersję chromatyczną, gdy transmisja z przepływnością 10Gbit/s staje się standardem a za chwilę takim standardem stanie się transmisja 40Gbit/s, dyspersja polaryzacyjna stała się głównym czynnikiem ograniczającym pracę systemów. Wdrażanie nowych technologii odbywa się najczęściej drogą modernizacji istniejącej infrastruktury. Systemy szybkiej transmisji instalowane są w już istniejącym „środowisku” sieciowym. Środowisko to tworzą zarówno kable światłowodowe instalowane „przed chwilą” z doskonałymi światłowodami nowej generacji jak również kable instalowane na początku lat dziewięćdziesiątych, których właściwości w zakresie dyspersji polaryzacyjnej są właściwie nieznane. Stąd potrzeba pomiaru dyspersji polaryzacyjnej w eksploatowanych kablach. Odpowiedzią na taką potrzebę był realizowany w latach 2000 i 2001 pilotowy program pomiaru dyspersji polaryzacyjnej w wybranych liniach sieci TP S.A. W artykule przedstawiono wyniki wykonanych wówczas pomiarów oraz analizę uzyskanych danych. Artykuł zorganizowany jest w sposób następujący. W części drugiej (po wstępie) omówiono zjawisko dyspersji polaryzacyjnej w światłowodach telekomunikacyjnych i podano formuły pozwalające na wyznaczanie parametru dyspersji polaryzacyjnej w przypadku światłowodów o słabym sprzężeniu między or-

<sup>1</sup> Telekomunikacja Polska S.A. Ośrodek Techniki Optotelekomunikacyjnej w Lublinie

togonalnie spolaryzowanymi modami oraz światłowodów o silnym sprzężeniu. W części trzeciej przedstawiono wpływ zjawiska dyspersji polaryzacyjnej na pracę systemów transmisyjnych. W części czwartej wymieniono metody pomiaru dyspersji polaryzacyjnej i bardziej szczegółowo przedstawiono stosowaną przez autorów artykułu metodę interferencyjną. Część piąta zawiera omówienie wyników uzyskanych pomiarów i analizę wyników. Część szósta zawiera uwagi i wnioski podsumowujące całą pracę.

## 2. Zjawisko dyspersji polaryzacyjnej w światłowodach

Potencjalnym źródłem poszerzenia impulsów w światłowodach jest ich dwójłomność. Już niewielkie odchylenia kształtu rdzenia światłowodu od symetrii cylindrycznej powodują jego dwójłomność. Dwójłomność światłowodu wynika z tego, że tzw. mod podstawowy  $HE_{11}$  jest w istocie superpozycją dwu ortogonalnie spolaryzowanych modów. Jeśli symetria cylindryczna jest zachowana mody te są zdegenerowane ze względu na stałą propagacji  $k$ . Zniesienie symetrii powoduje również zniesienie degeneracji ortogonalnie spolaryzowanych modów czyli zróżnicowanie ich stałych propagacji. Oznacza to, że poruszają się one w z różnymi prędkościami grupowymi. Jeśli do światłowodu dwójłomnego wprowadzimy impuls światła w taki sposób, że wzbudzone zostaną oba ortogonalnie spolaryzowane mody to na wyjściu światłowodu impuls ten ulegnie rozmyciu. Zjawisko rozmycia impulsów światła powodowane dwójłomnością światłowodu nazywamy polaryzacyjną dyspersją modową (po angielsku PMD – Polarization-Mode Dispersion).

Poszerzenie impulsu propagującego w światłowodzie można ocenić na podstawie tzw. różnicy opóźnień  $\Delta T$  między dwiema składowymi polaryzacji. Dla światłowodu o długości  $L$  różnica opóźnień wyraża się formułą:

$$\Delta T = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| = L \left| \beta_{1x} - \beta_{1y} \right| = L \Delta \beta_1 \quad (1)$$

gdzie indeksy  $x$  i  $y$  przypisane są do dwu ortogonalnie spolaryzowanych modów a  $\Delta \beta_1$  oznacza dwójłomność światłowodu. Wartość  $\Delta T/L$  jest miarą polaryzacyjnej dyspersji modowej. Równanie (1) znajduje bezpośrednie zastosowanie w przypadku tzw. światłowodów o dużej dwójłomności (HB- high birefringence fiber) cechujących się dużą różnicą stałych propagacji ortogonalnie spolaryzowanych modów i brakiem sprzęgania między modami.

W przypadku standardowych światłowodów telekomunikacyjnych charakteryzujących się niewielkimi odchyleniami od symetrii cylindrycznej równanie (1) nie może być stosowane bezpośrednio ze względu na zjawisko sprzęgania się modów. Sprzęganie się modów związane jest z niewielkimi zmianami dwójłomności wzdłuż światłowodu o charakterze statystycznym. Sprzęganie się modów prowadzi do wyrównywania czasów opóźnienia dwu ortogonalnie spolaryzowanych modów i osłabienia efektu PMD. Dla standardowych światłowodów telekomunikacyjnych stosuje się podaną w pracy [2] formułę:

$$\sigma_T^2 = \langle (\Delta T)^2 \rangle = \frac{1}{2} \Delta \beta_1^2 h^2 \left[ \frac{2L}{h} - 1 + \exp\left(-\frac{2L}{h}\right) \right] \quad (2)$$

gdzie  $h$  jest tzw. drogą dekorrelacji. Dla światłowodów HB wartość drogi dekorrelacji jest nieskończenie duża i wówczas  $\sigma_T$  rośnie liniowo z długością włókna.

W przypadku światłowodów telekomunikacyjnych  $h < L$ . Wówczas można operować przybliżeniem:

$$\sigma_T \approx \Delta\beta_1 \sqrt{hL} = D_p \sqrt{L} \quad (3)$$

gdzie  $D_p$  jest tzw. parametrem dyspersji PMD. Polaryzacyjna dyspersja modowa rośnie w funkcji długości włókna dużo wolniej w przypadku standardowych światłowodów telekomunikacyjnych niż w przypadku włókien HB. W wielu zastosowaniach jej wpływ na pracę systemów telekomunikacyjnych można pominąć.

### 3. Wpływ dyspersji polaryzacyjnej na pracę systemów transmisyjnych

Doskonalenie systemów transmisyjnych polegające na zwiększaniu odległości między regeneratorami, stosowaniu wzmacniania optycznego i zwiększaniu szybkości transmisji zmusza jednak do uwzględniania efektu PMD przy projektowaniu systemów transmisyjnych. Dotyczy to zwłaszcza stosowanych obecnie systemów o przepływnościach 10 Gbit/s i projektowanych systemów 40 Gbit/s.

Wpływ PMD na pracę cyfrowych systemów transmisyjnych polega, podobnie jak w przypadku dyspersji chromatycznej, na rozmywaniu impulsów, co przy dużych odległościach transmisji i dużych przepływnościach prowadzi do wzrostu liczby błędów i zakłóceń w pracy całego systemu. O ile jednak w przypadku dyspersji chromatycznej możliwa jest skuteczna kompensacja rozmycia impulsów poprzez stosowanie tzw. modułów kompensujących (są to najczęściej odcinki światłowodów o dyspersji ze znakiem przeciwnym niż dyspersja w kompensowanej linii światłowodowej) o tyle kompensacja dyspersji polaryzacyjnej jest bardzo trudna ze względu na jej statystyczny charakter i zależność wartości chwilowej od warunków środowiska. Stąd potrzeba określania zmienności PMD. Znajomość zmienności PMD pozwala projektantom na właściwą ocenę wpływu PMD na pracę systemów transmisyjnych. Dotyczy to zarówno linii już istniejących, jeśli przewiduje się ich modernizację, jak również linii nowych. W przypadku linii nowych margines błędu przy ich projektowaniu jest nieco większy ze względu na większą jakość współcześnie produkowanych światłowodów, które charakteryzują się dużo niższymi niż dawniej współczynnikami dyspersji polaryzacyjnej  $D_p$  i również wysoką ich odpornością na działanie czynników środowiskowych.

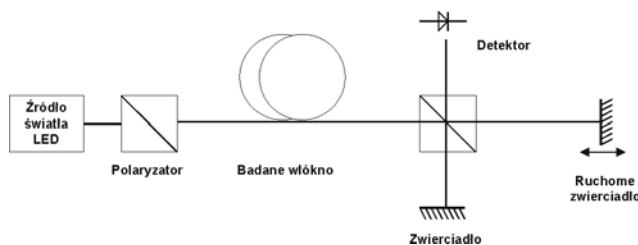
W przypadku linii eksploatowanych niezbędna jest odpowiednia diagnostyka, pozwalająca określić przedział zmienności PMD, przed ich ewentualną modernizacją.

### 4. Metoda pomiaru

Istnieje szereg metod pomiaru dyspersji polaryzacyjnej. Uznawana powszechnie jako dokument odniesienia norma ITU-T G650 [3] proponuje cztery metody pomiaru dyspersji polaryzacyjnej:

- metodę macierzy Jonesa
- metodę ustalonego analizatora
- metodę interferencyjną
- metodę pomiaru stanu polaryzacji

Z czterech metod pomiaru dyspersji polaryzacyjnej proponowanych przez normę [3] najbardziej predysponowana do pomiarów polowych jest metoda interferencyjna. Jej zaletami są zwarta, ułatwiająca transport konstrukcja przyrządu pomiarowego oraz duża szybkość pomiarów. Tą metodę zastosowano w trakcie badań opisanych w niniejszym artykule. Metoda interferencyjna może występować w kilku wariantach [3]. Możliwe jest zastosowanie interferometru Michelsona lub interferometru Macha-Zehndera [4], interferometr może prowadzić wiązki światła w powietrzu lub w światłowodach [3], i wreszcie może być zlokalizowany w pobliżu źródła światła albo w pobliżu detektora. Do pomiarów zastosowano metodę interferometru Michelsona, zlokalizowanego w pobliżu detektora, z prowadzeniem wiązek światła w światłowodach. Jedynie niewielką część drogi optycznej w tej gałęzi interferometru gdzie znajduje się ruchome zwierciadło przebiegała w powietrzu. Pomiar wykonano przy pomocy przyrządu PMD440 firmy Perkin-Elmer. Rysunek nr 1 przedstawia schemat ideowy zastosowanego przyrządu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat blokowy interferometru Michelsona użytego w pomiarach dyspersji polaryzacyjnej

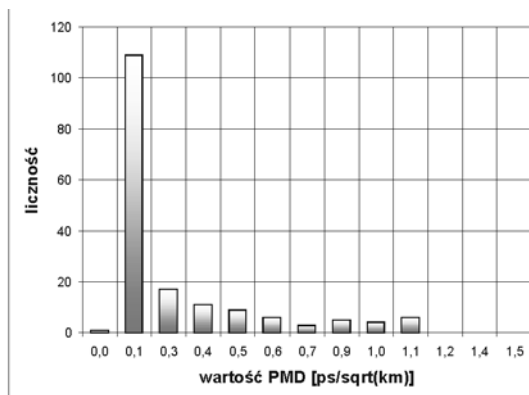
Badany światłowód oświetlany był przy pomocy źródeł światła typu LED pracujących dla długości fal 1310nm i 1550nm sprzężonych z polaryzатorem o współczynniku ekstynkcji większym niż 30dB. Charakterystyka spektralna stosowanych źródeł światła miała kształt bliski funkcji Gaussa co zapewniało gładką funkcję autokorelacji i tym samym łatwość interpretacji interferogramów. Szerokość spektralna źródeł wpływa na dolną granicę mierzonej dyspersji polaryzacyjnej PMD i pozwala na pomiary wartości większych niż 0,1ps.

Górna granica zakresu pomiarowego umieszczonego w układzie detekcyjnym interferometru Michelsona z ruchomym zwierciadłem wynosiła circa 80ps. Ruch zwierciadła i związana z nim zmiana drogi optycznej w jednej z gałęzi interferometru powodował rejestrowanie przez detektor układu prążków zależnego od PMD mierzonego światłowodu. Obwiednia interferogramu uzyskiwanego w trakcie pomiaru pozwalała na wyznaczenie wartości PMD.

## 5. Pomiary i analiza wyników

Pomiary dyspersji polaryzacyjnej obejmowały 9 odcinków linii kablowych budowanych w latach 1991-99 o długościach od 25km do 70km, zlokalizowanych w różnych częściach sieci TP S.A, przebiegających w kanalizacji wtórnej oraz wzdłuż linii kolejowych. Łączna długość zmierzonych linii wynosiła 415km a długość światłowodów przekroczyła 2400km. Niektóre z mierzonych odcinków przekraczały cieki wodne i prowadzone były w przepustach czy też na odkrytych odcinkach wiaduktów i mostach. Pomiary wykonywano dla dwu długości fal odpowiadających drugiemu (1310nm) i trzeciemu (1550nm) oknu trans-

misyjnemu. Na rysunku nr 2 znajduje się histogram zmierzonych wartości parametru PMD dla dł. fali 1310nm. Histogram dla dł. fali 1550nm wygląda podobnie. Już na pierwszy rzut oka widać, że większość uzyskanych wyników skupiona jest w pobliżu wartości 0,1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ .



Rys. 2. Histogram zmierzonych wartości parametru PMD

Rozkład charakteryzuje się znaczną asymetrią i posiada dwa maksima. Większość wyników skoncentrowana jest wokół wartości 0,1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . W okolicy wartości 1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  można mówić o drugim maksimum, choć ze względu na małą liczbę przypadków nie jest ono wyraźne. Skupione wokół tego drugiego maksimum wartości PMD znacznie przekraczają wartość 0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  – będącą według normy G650 górną granicą dla współczesnych światłowodów. Zestawienie wyników pomiarów dla poszczególnych linii przedstawiono w tabeli nr 1.

Tabela nr 1 Szczegółowe zestawienie wyników pomiaru PMD dla poszczególnych linii.

Numer linii	dł. linii [km]	liczba włókien	PMD śr.(1310) (ps/sqrt(km))	rozstęp (1310) (ps/sqrt(km))	PMD śr.(1550) (ps/sqrt(km))	rozstęp(1550) (ps/sqrt(km))
1	41,8	6	0,062	0,065	0,038	0,06
2	55,6	6	0,068	0,286	0,043	0,115
3	25,0	14	0,043	0,069	0,036	0,057
4	37,0	6	0,02	0,016	0,02	0,014
5	70,0	6	0,193	0,172	0,17	0,208
6	43,5	4	0,186	0,232	0,115	0,156
7	47,2	6	0,85	1,659	0,736	1,483
8	48,0	4	0,486	0,285	0,474	0,503
9	47,0	6	0,769	1,097	0,682	0,693

Tabela zawiera informacje o długości linii, liczbie zmierzonych światłowodów, wartości średniej parametru dyspersji polaryzacyjnej dla danej linii oraz tzw. rozstępem czyli różnicą wartości największej i najmniejszej w danej próbie. Jako miarę rozproszenia badanej cechy

przyjęto rozstęp ze względu na ograniczoną liczbę pomiarów. Widoczne jest duże zróżnicowanie uzyskanych wyników zarówno między różnymi liniami jak również między poszczególnymi światłowodami w ramach danej linii o czym informuje wartość rozstępu. Bliższe przyjrzenie się tabeli 1 pozwala podzielić przedstawione tam linie optotelekomunikacyjne na dwie grupy. Grupa pierwsza składająca się z linii od 1 do 6 charakteryzuje się dość małymi (nie przekraczającymi  $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ) średnimi wartościami PMD i również niewielkimi rozproszeniami mierzonej cechy. Grupa druga to linie od 7 do 9 charakteryzujące się znacznymi wartościami parametru PMD i również znacznym rozproszeniem mierzonej cechy. Odpowiedź na pytanie o powód tak znacznego zróżnicowania między liniami można znaleźć biorąc pod uwagę czas budowy linii oraz warunki ich eksploatacji. Linie 7,8,9 powstały w latach 91-92. Stosowane w nich światłowody charakteryzowały się gorszymi geometrycznymi właściwościami niż współczesne włókna. Dodatkowo są one zainstalowane w tzw. trudnym terenie i są dużo bardziej niż inne linie narażone na działanie czynników klimatycznych. Skutkuje to dużo większymi wartościami PMD. Natomiast linie od 1 do 7 budowane były w drugiej połowie lat 90-tych i wykorzystywały światłowody o lepszej geometrii. Stąd średnie wartości PMD są małe i mieszczą się w granicach tolerancji określanych normą G650.

## 6. Podsumowanie

Praca przedstawia wyniki pomiarów dyspersji polaryzacyjnej eksploatowanych linii optotelekomunikacyjnych, wykonane w ramach pracy badawczej nr 163/26/99/0332. Pomimo dość ograniczonej próby i związanych z tym problemów z analizą statystyczną uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie kilku istotnych spostrzeżeń i wniosków. Najważniejsze z nich wiążą się ze znacznym zróżnicowaniem badanej cechy w próbie oraz z obecnością w niej wartości PMD znacznie przekraczających dopuszczalny limit  $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Wskazuje to na potrzebę zachowania szczególnej ostrożności przy modernizacji eksploatowanych linii polegającej na zwiększeniu szybkości transmisji.

## Literatura

- [1] **Agrawal P. Govind.**: *Fiber-Optic Communication Systems*, New York, John Wiley & Sons, Inc. 1997
- [2] **Suetsugu Y. Kato. T. and Nishimura M.**: *IEE Photon. Technol. Lett.* 7,887 (1995)
- [3] ITU-T, *G650-Transmission media characteristics- Optical fibre cables, Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibers.* (1997)
- [4] **Born M., Wolf E.**, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford (1968)
- [5] PerkinElmer Optoelectronics: *Interferometric PMD Measurement System, Instruction Manual.* (2000)

### POLARISATION MODE DISPERSION (PMD) IN EXPLOITED OPTICAL CABLES

In the paper we present the results of the polarisation mode dispersion (PMD) measurements of exploited optical cables with 420 km of total length in the network of TP S.A. An analysis of the measurement data is presented.