



Paweł PIETRZAK, Marian WRONIKOWSKI

TELE-FONIKA KABLE S.A. Zakład Myślenice

Kable światłowodowe dla energetyki – zagadnienia dyspersji polaryzacyjnej w kablach światłowodowych na przykładzie kabli ADSS

Streszczenie: W artykule przeprowadzono analizę statystyczną wyników pomiarów PMD w kablach ADSS. Wybrano rozkład GAMMA jako najlepiej przybliżający rozkład PMD. Przeanalizowano wpływ procesu technologicznego produkcji kabli na PMD w ujęciu statystycznym. Oszacowano szybkość transmisji łącza ze względu na ograniczenie PMD.

Abstract: (*Fibre optic cables for power industry – polarisation mode dispersion in fibre optic cables on ADSS cable's example*). In the article was made statistical analysis of the PMD measurement results in ADSS cables. The Gamma distribution was chosen as the best approximation of the PMD phenomenon. The influence of technological cable production process on PMD was considered in statistical way. Taking into account a PMD limitation the transmission speed was also estimated.

Słowa kluczowe: dyspersja polaryzacyjna, kabel ADSS, rozkład gamma.

Keywords: polarisation mode dispersion, ADSS cable, gamma distribution.

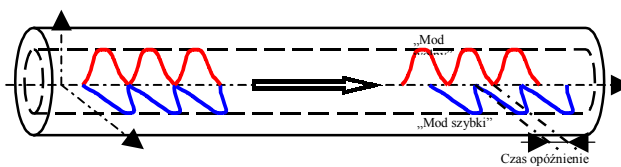
Wstęp

W czasach współczesnych najszybciej rozwijającą się dziedziną jest telekomunikacja, która stawia sobie coraz wyższe wymagania co do szybkości transmisji jak i niezawodności przekazu. Obok rozbudowanej światłowodowej sieci TP SA, powstała ogólnopolska światłowodowa sieć telekomunikacyjna energetyki. Sieć tą zbudowano w oparciu o kable światłowodowe, z wykorzystaniem dwóch podstawowych technologii: kabla światłowodowego zintegrowanego z linką odgromową (OPGW) i dielektrycznego kabla samonośnego (ADSS). Wzrost ilości przesyłanych informacji i realizacja nowych usług prowadzi do podwyższenia wymagań co do jakości samego medium transmisyjnego, technologii produkcji, montażu oraz utrzymania. Naukowcy opracowali już doskonałe metody pozwalające na eliminację dwóch podstawowych czynników ograniczających sprawność systemów transmisyjnych to jest tłumienność i dyspersję chromatyczną. Wraz z rozwojem systemów transmisyjnych pojawił się jednak nowy czynnik ograniczający szybkość i odległość transmisji a mianowicie dyspersja polaryzacyjna światłowodów – PMD (*polarisation mode dispersion*). Czynnik ten charakteryzujący tylko włókna jednomodowe do niedawna był często pomijany ze względu na swe małe znaczenie przy niewielkich przepływnościach. Jednak w obliczu powszechnego dziś zastosowania dalekosiężnych systemów 10Gbit/s i oczekujących na pierwsze zastosowanie handlowe systemów 40Gbit/s rola dyspersji polaryzacyjnej nie może być zaniedbana przy analizie systemu. PMD może w znacznej mierze wpływać na niezawodność przekazu, ograniczenie zarówno szybkości transmisji jak i jej zasięgu. Sieć telekomunikacyjna energetyki składa się z łączy telekomunikacyjnych dalekosiężnych dlatego stosowane medium transmisyjne musi być najwyższej jakości.

Dlaczego istotny jest parametr PMD?

Włókno światłowodowe jednomodowe prowadzi dwa spolaryzowane, wzajemnie prostopadłe mody, które przemieszczają się wzdłuż światłowodu z różną prędkością

grupową, co w konsekwencji powoduje przesunięcie fazowe modów (różnicę między nimi w fazie). Rozkład prędkości grupowych zmienia się przypadkowo co prowadzi do poszerzenia impulsu optycznego na wyjściu światłowodu.



Rys.1. Propagacja modów w światłowodzie jednomodowym

We współcześnie produkowanych włóknach dwójmnośność będąca bezpośrednim powodem występowania opóźnienia grupowego DGD jest niewielka i rozłożona losowo. Dla małych długości średnia wartość opóźnienia grupowego jest proporcjonalna do długości. W zakresie dużych długości wartość średnia PMD jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z długości gdzie [2]:

$$(1) \quad PMD_{L_{coeff}} = \Delta\tau / \sqrt{L}$$

gdzie:

$\Delta\tau$ - wartość średniokwadratowa (RMS) rozszerzenia impulsu (DGD), L- długość.

W telekomunikacyjnych cyfrowych systemach światłowodowych, a w szczególności w systemach ze zwielokrotnieniem sygnału DWDM, jakość przesyłania sygnałów zależy od rozróżniania przez odbiornik sąsiednich bitów informacji. Możliwość rozróżniania jest ściśle związana z kształtem odbieranych impulsów (z wysokością, głębokością i szerokością). Zjawisko dyspersyjne w światłowodzie rozszerza transmitowane impulsy zamazując różnicę pomiędzy sygnałami cyfrowymi „0” i „1” [1].

Dyfuzyjny charakter dwóch spolaryzowanych modów powoduje, że poszerzenie impulsu się powiększa w trakcie propagacji światła wzdłuż włókna. Dostępne możliwości

redukcji dyspersji chromatycznej poszerzają związek PMD z łączami długodystansowymi.

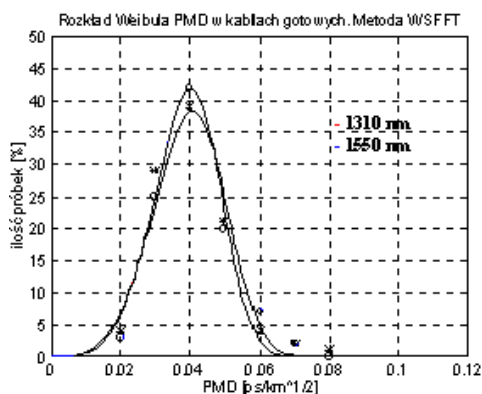
Obliczenia wskazują, że kabel optyczny, który ma wartość PMD równą 0,5 [ps/km^{1/2}] pozwoli na transmisję na odległość 400 [km] z szybkością 10 [Gbit/s] bez jakichkolwiek zniekształceń. Dlatego też PMD ≤ 0,5 [ps/km^{1/2}] zalecane są przez międzynarodowe standardy ITU-T G.652 i G.655 [4].

W Polsce wymagania Ministra Łączności (WTE) również podają parametr PMD ≤ 0,5 [ps/km^{1/2}]. TELE-FONIKA stosuje wyłącznie włókna o PMD mniejszym niż 0,1 [ps/km^{1/2}] (jest to gwarantowane przez producentów włókien). Wyniki własnych pomiarów i rozkłady statystyczne, przedstawione poniżej dowodzą, że wartości PMD w kablach TELE-FONIKI nie przekraczają wartości 0,1 [ps/km^{1/2}].

Wyniki pomiarów oraz ich interpretacja

Pomiar dyspersji polaryzacyjnej jest z natury pomiarem statystycznym. Aby wykonać pomiar z jak najmniejszym błędem statystycznym należy bazować na wystarczająco dużej, liczbie pomierzonych światłowodów. Wyniki pomiarów PMD określonej liczby światłowodów poddanych jednakowemu procesowi technologicznemu można przybliżyć za pomocą typowych funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Podstawą jest znalezienie funkcji najlepiej przybliżającej wyniki pomiarów i wyznaczenie błędów przybliżeń.

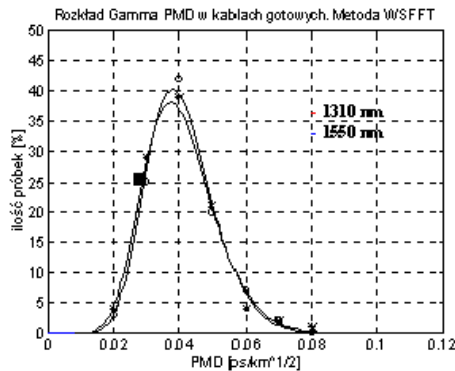
W laboratorium TELE-FONIKI w Zakładzie Kabli Światłowodowych w Myślenicach zostały wykonane pomiary PMD dla jednakowej grupy badanych kabli. Pomiary wykonano miernikiem CD400 firmy EG&G, który mierzy metodą skanowania długością fali WSFFT (*wavelength scanning fixed analyzer method*). Metoda ta bazuje na właściwości PMD wyrażającą się zależnością transformacji polaryzacji od częstotliwości, a wartość PMD wylicza wykorzystując szybką transformatę Fouriera. Wybrana grupa pomiarowa została opisana wybranymi rozkładami statystycznymi. Z czterech różnych funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wybrano jedną o najmniejszym błędzie przybliżenia. Na rysunkach 2 ÷ 5 przedstawione są funkcje gęstości rozkładu prawdopodobieństwa przybliżające grupę pomiarów PMD oraz ich definicje i wartości błędów przybliżeń.



Rys. 2. Rozkład Weibula $f(x) = apx^{p-1}e^{-ax^p}$ [6]

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 7,09[\%] \quad 1550\text{nm}$$

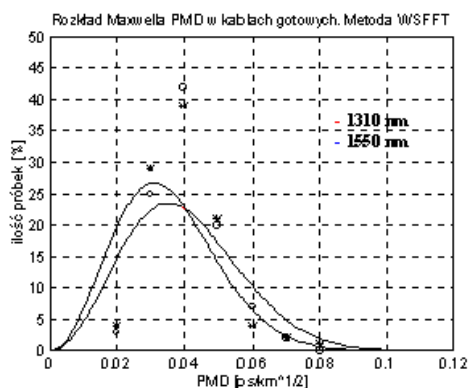
$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 8,84[\%] \quad 1310\text{nm}$$



Rys.3. Rozkład Gamma $f(x) = \frac{2\beta^\alpha x^{2\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\beta x^2)$ [8]

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 2,53[\%] \quad 1550\text{nm}$$

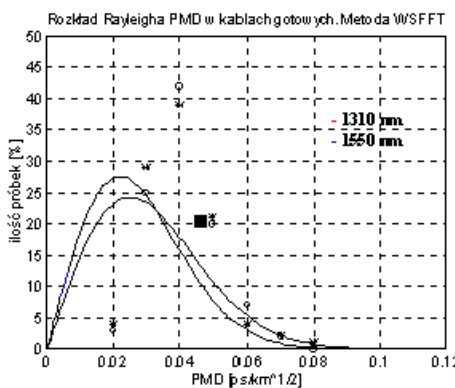
$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 1,95[\%] \quad 1310\text{nm}$$



Rys. 4. Rozkład Maxwella $f(x) = \frac{x^2}{c^3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2c^2}\right]$ [6]

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 69,99[\%] \quad 1310\text{nm}$$

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 97,6[\%] \quad 1550\text{nm}$$



Rys. 5. Rozkład Rayleigha $f(x) = \frac{x^2}{c^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2c^2}\right]$ [6]

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 136,7[\%] \quad 1310\text{nm}$$

$$\varepsilon^2 = \left(\sum_{i=1}^N d_i^2 \right) \frac{1}{N} = 206,2[\%] \quad 1550\text{nm}$$

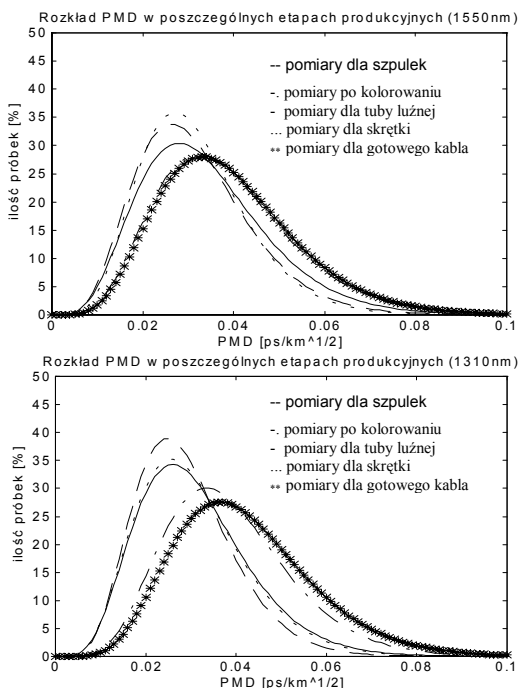
Na rysunkach od 2 do 5 doskonale widać różnicę między funkcjami, co pozwala stwierdzić, że najlepszym narzędziem statystycznym do określenia rozkładu wartości PMD jest *rozkład Gamma*. Krzywa statystyczna przebiega najbliżej punktów należących do grup pomiarowych; świadczy o tym mały błąd średniokwadratowy. Rozkład ten posiada dwa współczynniki „ α ” i „ β ” odpowiedzialne za amplitudę i rozproszenie funkcji prawdopodobieństwa, za pomocą których bardzo łatwo można dokonać przybliżenia statystycznego. Co najważniejsze funkcja Gamma określa maksymalne wartości PMD („ogon funkcji gęstości rozkładu”) co jest bardzo ważne dla obliczenia prawdopodobieństwa występowania maksymalnej dyspersji polaryzacyjnej w celu określenia jakości kabli.

Wpływ technologii produkcji kabli optycznych na wyniki pomiarów PMD

Rozważając wpływ procesu technologicznego na zmiany dyspersji polaryzacyjnej należy przyrzeć się rzeczywistym parametrom produkowanych obecnie kabli. Jak wiadomo proces produkcji światłowodów naraża włókno na liczne oddziaływania zewnętrzne, które mogą mieć wpływ na powiększenie się tłumienności jednostkowej włókna jak i na zmianę PMD. Dlatego ważne jest aby określić wielkość zachodzących zmian dyspersji polaryzacyjnej w funkcji wykonywanych operacji technologicznych. W Zakładzie Kabli Światłowodowych Tele-Fonika KABLE S.A. w Myślenicach, podczas każdego z etapów produkcyjnych kabli tubowych, zostało wykonanych po kilkaset pomiarów PMD. Wykonywano pomiary na włóknach o nie przesuniętej dyspersji typu SMF-28 dla kabli o długości 2km.

Jeśli by przyjąć założenie, że zbiór współczynników PMD posiada rozkład Gamma, wówczas gęstość prawdopodobieństwa dyspersji polaryzacyjnej PMD wyraża się wzorem (2). Do przybliżeń statystycznych została użyta metoda najmniejszych kwadratów.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów PMD po wykonaniu wymienionych procesów technologicznych oraz ich przybliżenia za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa Gamma.



Rys. 6. Zestawienie porównawcze wyników pomiarowych dla dwóch długości fal.

Wyprodukowanie kabli dobrej jakości (pod względem występowania PMD) wiąże się z odpowiednią kontrolą podczas procesu technologicznego tzn. należy tak opracować proces wytwarzania kabla aby maksymalne wartości rozkładu statystycznego jak najmniej przesunęły się w kierunku PMD krytycznego. Zatem rysunek 3 określa statystyczną miarę łącznej efektywności czterech kolejnych procesów technologicznych. Wartości maksymalne PMD nie przekraczają 0,1 [ps/km^{1/2}] co świadczy o bardzo dobrej jakości wykonanych kabli.

Wartość PMD obliczona we włóknie okablowanym

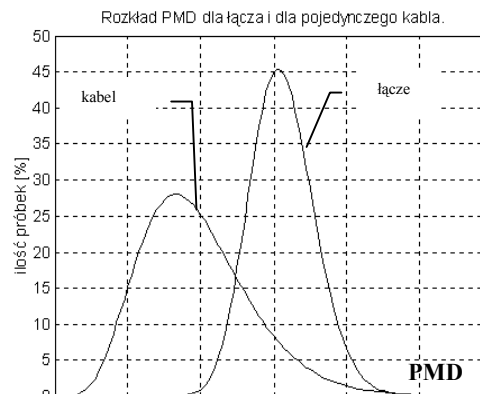
Systemy optyczne budowane są z wielu sekcji kabli połączonych razem w jedno łącze. Dla projektanta danej linii ważne jest PMD całego łącza.

Dla łącza składającego się z „M” kabli o długości L_i współczynnik PMD scalanego łącza jest równy [8]:

$$(2) \quad PMD_l = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M PMD_i^2}$$

gdzie: PMD_i - wartość średnia dla pojedynczego kabla.

Jak już wiadomo współczynnik PMD dla pojedynczego kabla jest wartością statystyczną, dlatego PMD dla całego łącza również jest określane statystycznie z tą różnicą, że dla łącza rozkład losowy będzie miał mniejszą wariancję niż dla pojedynczego kabla z powodu uśrednienia po scaleniu kabli. Również amplituda rozkładu statystycznego dla łącza jest większa od amplitudy dla rozkładu statystycznego kabla. Dla porównania rys. 7 przedstawia dwa rozkłady o różnych wariancjach i różnych amplitudach.



Rys. 7. Przykładowe rozkłady PMD dla łącza i dla pojedynczego kabla TELE-FONIKI.

Według IEC SC86A WG1, wartość PMD okablowanego włókna powinna być charakteryzowana statystycznie a nie na bazie właściwości indywidualnego włókna. Przy wykorzystaniu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla współczynników PMD w łączy można określić wartość PMD_Q . W łączy kaskadowym składającym się z M kabli, wartość PMD_Q jest określana jako wartość, jaką współczynnik $PMD = \Delta\tau_M$ przekracza z prawdopodobieństwem Q [8]:

$$(3) \quad P(\Delta\tau_M > PMD_Q) = Q$$

Dla celów obliczeniowych przyjęto, że $Q=10^{-4}$ [8]

W literaturze do wyznaczania PMD łączy telekomunikacyjnych światłowodowych stosuje się postać rozkładów statystycznych zgodnie z zapisem funkcji

Gamma przedstawionej w normie IEC 86A WG1, która wyraża się następująco [8]:

$$(4) \quad f_{cable}(X; \alpha, \beta) = \frac{2\beta^\alpha X^{2\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\beta X^2)$$

gdzie: X - jest to wartość PMD

Metodą najmniejszych kwadratów zostały wyznaczone parametry α i β dla wyników pomiarów PMD kabli gotowych, które wyrażają się następująco:

dla fali 1310nm $\alpha=2,2$ $\beta=1150$

dla fali 1550nm $\alpha=1,9$ $\beta=1150$

Posługując się obliczonymi parametrami α i β można obliczyć dyspersję polaryzacyjną dla łącza o dowolnej długości i składającą się z dowolnej liczby kabli „M” korzystając z zależności podanej w normie IEC 86A WG1 gdzie [8]:

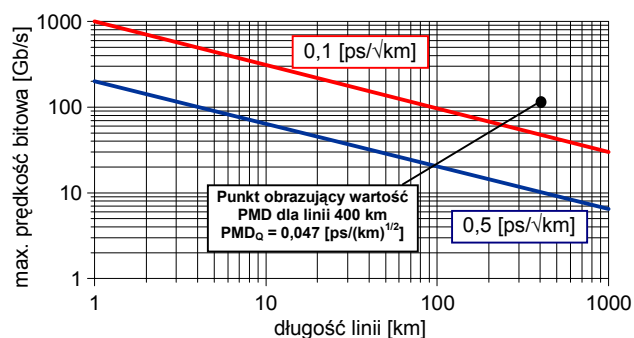
$$(5) \quad PMD_Q = \frac{2,004 + 0,975\sqrt{M\alpha}}{\sqrt{M\beta}}$$

Przyjmując, że $M=200$ kabli w linii, α i β jak dla rozkładu kabli gotowych otrzymuje się:

dla fali 1310nm: $PMD_Q=0,047$ [ps/(km)^{1/2}]

dla fali 1550nm: $PMD_Q=0,043$ [ps/(km)^{1/2}]

Zatem dla łącza światłowodowego o długości 400km zbudowanego z kabli światłowodowych TELE-FONIKI z włóknami typu SMF-28 wartość PMD nie powinna przekroczyć wartości $PMD_Q=0,047$ [ps/(km)^{1/2}] dla fali 1550nm i $PMD_Q=0,043$ [ps/(km)^{1/2}] dla fali 1310nm z prawdopodobieństwem 10⁻²



Rys.8. Szybkość transmisji w funkcji długości łącza dla dwóch wartości PMD 0,1 i 0,5 [ps/km^{1/2}] [7]

Znając wartość PMD_Q i długość łącza optycznego można oszacować szybkość transmisji łącza korzystając z wzoru [1]:

$$(6) \quad f_{linii} = \frac{100}{PMD_Q * \sqrt{l}} \quad [\text{Gbit/s}]$$

otrzymuje się:

$$f_{1310} = 116,27 \quad [\text{Gbit/s}]$$

$$f_{1550} = 106,38 \quad [\text{Gbit/s}]$$

Z obliczonych wartości wynika, że rozpatrywana 400km linia światłowodowa zbudowana z kabli wyprodukowanych w TELE-FONICE z powodzeniem może być skalowana w przyszłości i pracować w systemach o teoretycznej dzisiejszej szybkości transmisji rzędu 100 [Gbit/s] (rys. 8).

Podsumowanie

Parametr PMD jest bardzo trudno kontrolować zważywszy na jego statystyczny charakter. W porównaniu z dyspersją chromatyczną jest on bardzo zmienny. W pracy wykazano, że najwierniejszym przybliżeniem rozkładu statystycznego wartości współczynnika PMD jest rozkład Gamma.

Po dokonaniu dostatecznie dużej liczby pomiarów rozkład PMD może zostać usystematyzowany za pomocą funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa Gamma. Funkcja ta została wybrana spośród czterech różnych rozkładów gdyż posiadała najmniejszy błąd przybliżenia. Z rozkładów gęstości prawdopodobieństwa wynika, że poszczególne procesy produkcyjne mają niewielki wpływ na pogorszenie się wartości PMD.

Jak podaje norma IEC prawidłowa interpretacja PMD powinna być charakteryzowana statystycznie a nie na bazie właściwości indywidualnego włókna. Wykonane pomiary PMD w kablach TELE-FONIKI dowodzą, że wartość dyspersji polaryzacyjnej jest pięciokrotnie niższa niż dopuszczalne wartości wg normy ITU-T. Stwierdzono, że obok tłumienności jednostkowej jest ona znakomitym wyznacznikiem jakościowym kabli. Aby dyspersja polaryzacyjna PMD była zadowalająco niska nie wystarczy dysponować dobrą jakością włókna, ale również trzeba posiadać precyzyjną kontrolę procesu technologicznego produkcji kabli światłowodowych. Chociaż obserwowane wartości PMD światłowodów w kablach TELE-FONIKI są wyjątkowo niskie nie należy bagatelizować zjawiska PMD ze względu na coraz większe wymagania odnośnie przepływności linii telekomunikacyjnych. Dla łącza optycznych o przepływnościach przekraczających 40Gbit/s - które są już budowane- PMD zaczyna nabierać większego znaczenia.

LITERATURA

- [1] Dziekan M. „PMD w Kablach Telefoniki” Telnet 2001
- [2] PerkinElmer Application Note An-006 rev2 manual instruction version 4.0 August 1998
- [3] Romaniuk R., „DWDM Technologia i pomiary, eksploatacja i rozwój” TP S.A. Warszawa 2001
- [4] ITU – T Recommendation G.652, G.655 ITU-1994r
- [5] PMD Fiber Optic Product Line, ALCATEL, April 1998
- [6] Midwinter J. E. Guo Y.L., Optoelektronika i technika światłowodowa, WKŁ, Warszawa, 1995r.
- [7] Wronikowski M., Bauman E., Statistical Characterization of Polarization Mode Dispersion. Siecor 1998 r
- [8] IEC SC86A WG1 ED-24 8 September 1997

Autorzy: mgr inż. Paweł Pietrzaki, TELE-FONIKA KABLE S.A.
E-mail: Pawel.Pietrzak@tfkable.pl; dr inż. Marian Wronikowski,
TELE-FONIKA KABLE S.A., E-mail:
Marian.Wronikowski@tfkable.pl