

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

**mgr inż. Krzysztof Borzycki**

**Wpływ temperatury na dyspersję polaryzacyjną (PMD)  
jednomodowych włókien światłowodowych  
w pokryciach ściśłych**

**Warszawa 2006**

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

**mgr inż. Krzysztof Borzycki**

### **Wpływ temperatury na dyspersję polaryzacyjną (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych w pokryciach ścisłych**

Rozprawa doktorska napisana  
w Instytucie Łączności  
pod kierunkiem  
doc. dra hab. Mariana Marciniaka

**Warszawa 2006**

Krzysztof Borzycki

Wpływ temperatury na dyspersję  
polaryzacyjną (PMD) jednomodowych włókien  
światłowodowych w pokryciach ściśle

*Praca doktorska napisana  
w Instytucie Łączności  
pod kierunkiem  
doc. dra hab. Mariana Marciniaka*

Warszawa, luty 2006

## **Dedykacja**

Pracę tę dedykuję mojej matce Teresie Borzyckiej, która rozbudziła we mnie zainteresowania intelektualne, miłość do książek i nigdy nie wątpiła w celowość wyboru przeze mnie pracy naukowej. Była również źródłem oparcia psychicznego i motywacji podczas długich przygotowań i pisania pracy.

## **Podziękowania**

Wyrażam wdzięczność dla promotora pracy doc. dra hab. Mariana Marciniaka za motywację do jej realizacji i zakończenia oraz wszelką pomoc udzieloną w organizacji misji naukowych, a następnie w czasie pisania pracy.

Kierownictwu europejskich programów badawczych COST-270 "Reliability of Optical Components and Devices in Communications Systems and Networks" oraz COST-291 „Towards Digital Optical Networks” dziękuję za organizację misji naukowych i zapewnienie warunków do wymiany doświadczeń z kolegami z zagranicznych ośrodków badawczych.

Wykonanie opisanych w tej pracy badań laboratoryjnych byłoby niemożliwe bez uczestnictwa i czynnej pomocy szeregu osób, spośród których należy wymienić przede wszystkim moich obecnych i byłych kolegów z Instytutu Łączności w Warszawie: Konrada Woyczkowskiego, dra inż. Marka Jaworskiego - który wniósł wielki wkład w przygotowanie i uruchomienie stanowiska pomiarowego PMD, Jerzego Molgę i Andrzeja Zawiślańskiego.

Spośród innych osób chciałbym zaznaczyć cenną pomoc dra Mariana Wronikowskiego z TeleFoniki Kable, Zenona Drabika z OTO Lublin i Richarda Bielowicza z US Technologies w gromadzeniu próbek do badań oraz kolegów z laboratoriów zagranicznych wizytowanych w czasie misji naukowych, do których należą Silvio Abrate i Antonino Nespola z ISMB (Turyn, Włochy) oraz Marcel Held i dr Phillip Nellen z EMPA (Dübendorf, Szwajcaria).

Program badawczy „Badania wpływu zmiennych temperatur i przyspieszonego starzenia na zmiany modowej dyspersji polaryzacyjnej (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych (ITU-T G.652 i G.655) w pokryciach ochronnych o konstrukcji ściślejszej i kabli z takimi włóknami dla potrzeb udziału IŁ w europejskim projekcie badawczym COST-270” był dofinansowany przez Komitet Badań Naukowych, a później Ministerstwo Nauki i Informatyzacji na mocy decyzji Nr 632/E-242/SPB/COST/T-11/DZ198/2003-2005.

## Spis treści

Dedykacja.....	2
Podziękowania.....	2
Wskaz oznaczeń i skrótów.....	5
1. Wstęp.....	10
2. Rozwiązania konstrukcyjne włókien i kabli światłowodowych.....	13
2.1. Wymiary włókna szklanego a wymagania montażowe.....	13
2.2. Budowa jednomodowego włókna światłowodowego.....	14
2.3. Jednomodowe włókna telekomunikacyjne.....	16
2.3.1. Włókna o nieprzesuniętej dyspersji (ITU-T G.652, SMF).....	16
2.3.2. Włókna o przesuniętej dyspersji (ITU-T G.653, DSF).....	20
2.3.3. Włókna o przesuniętej tali odcięcia (ITU-T G.654, CSF, PSCF).....	21
2.3.4. Włókna o niezerowej przesuniętej dyspersji (ITU-T G.655, NZDSF).....	22
2.3.5. Szerokopasmowe włókna NZDSF (ITU-T G.656).....	24
2.4. Pierwotne pokrycie ochronne włókna światłowodowego.....	25
2.4.1. Przeznaczenie pokrycia pierwotnego.....	25
2.4.2. Budowa pokrycia pierwotnego.....	25
2.4.3. Materiały pokrycia pierwotnego.....	26
2.5. Wpływ zmiennych temperatur i obciążeń mechanicznych.....	27
2.5.1. Zmiany wymiarów z temperaturą.....	27
2.5.2. Wpływ wilgoci i wybranych czynników chemicznych.....	29
2.6. Luźna tuba.....	30
2.6.1. Budowa tuby luźnej.....	31
2.6.2. Materiały do produkcji tub luźnych.....	32
2.6.3. Wybrane własności PBT.....	33
2.6.4. Zachowanie tuby luźnej w warunkach zmiennego wydłużenia.....	36
2.6.5. Kable światłowodowe z tubą centralną.....	41
2.6.6. Kable światłowodowe z tubami skręcanymi.....	42
2.7. Rozeta.....	45
2.8. Pokrycie ściśle (ściśła tuba).....	46
2.8.1. Budowa ściślej tuby.....	46
2.8.2. Materiały do produkcji tub ściśłych.....	48
2.8.3. Kable światłowodowe z włóknami w ściśłych tubach.....	49
2.8.4. Nadmiar długości włókna w ściśłej tubie.....	50
2.9. Półściśle pokrycie ochronne (półściśła tuba).....	51
2.10. Jednostki wielowłóknowe o budowie ściśłej.....	52
2.11. Taśmy światłowodowe.....	54
3. Modowa dyspersja polaryzacyjna (PMD).....	56
3.1. Mechanizm PMD.....	56
3.1.1. Przyczyny powstawania PMD.....	56
3.1.2. Geometryczne indukowanie dwójłomności optycznej.....	58
3.1.3. Mechaniczne indukowanie dwójłomności optycznej.....	59
3.1.4. Wpływ mieszania modów polaryzacyjnych.....	63
3.1.5. PMD jako parametr transmisyjny włókna światłowodowego.....	66
3.1.6. Wirowanie włókna światłowodowego w celu redukcji PMD.....	68
3.1.7. Wpływ skręcenia włókna światłowodowego na PMD.....	76
3.2. Wpływ PMD na pracę łącza cyfrowego.....	86
3.2.1. Degradacja transmisji cyfrowej w łączy z kodem liniowym NRZ.....	86
3.2.2. Obliczenia łącza cyfrowego związane z PMD.....	88
3.2.3. Metody ograniczania wpływu PMD.....	90
3.3. Wybrane problemy pomiarów PMD.....	102
3.3.1. Wpływ skończonego zakresu spektralnego.....	102
3.3.2. Pomiar PMD metodą stałego analizatora.....	104
3.3.3. Wpływ zaburzeń zewnętrznych.....	108
3.3.4. Efekty dynamiczne w badaniach termicznych.....	110

3.3.5. Reflektometryczne pomiary PMD .....	111
4. Oddziaływanie pokryć ochronnych na włókno szklane .....	115
4.1. Podstawy .....	115
4.1.1. Wprowadzenie.....	115
4.1.2. Zakres analizy .....	116
4.1.3. Oznaczenia wymiarów włókna i założenia upraszczające .....	116
4.2. Własności termiczno-mechaniczne materiałów pokrycia .....	117
4.2.1. Nakładanie pokrycia i temperatura równowagi.....	117
4.2.2. Zmiany własności polimerów z temperaturą .....	118
4.3. Wzdłużna rozszerzalność termiczna włókien światłowodowych .....	121
4.4. Oddziaływanie pokrycia pierwotnego na włókno szklane.....	122
4.4.1. Oddziaływanie pokrycia 1-warstwowego .....	123
4.4.2. Oddziaływanie pokrycia 2-warstwowego .....	124
4.4.3. Wyboczenie włókna światłowodowego .....	129
4.5. Oddziaływanie pokrycia ścisłego na włókno światłowodowe .....	130
4.5.1. Siły działające na włókno w ścisłej tubie.....	130
4.5.2. Zmiany PMD po wyboczeniu włókna w ścisłej tubie .....	135
4.5.3. Inne przyczyny wzrostu PMD w niskich temperaturach .....	138
4.6. Oddziaływanie pokrycia półścisłego na włókno światłowodowe.....	141
4.7. Relaksacja i krystalizacja materiałów pokrycia .....	142
4.7.1. Relaksacja.....	142
4.7.2. Krystalizacja .....	144
5. Wpływ temperatury na PMD – dane literaturowe.....	146
5.1. Zmiany PMD z temperaturą w ułożonych kablach światłowodowych.....	146
5.2. Badania laboratoryjne wpływu temperatury i czynników mechanicznych na PMD ...	148
5.2.1. Włókna jednomodowe w pokryciu pierwotnym.....	149
5.2.2. Kable tubowe z tubami skręcanymi .....	150
5.2.3. Kable z taśmami światłowodowymi w tubie centralnej .....	153
5.2.4. Kable podmorskie i przewody OPGW z jednostkami ścisłymi.....	154
6. Wpływ temperatury na PMD - badania laboratoryjne .....	157
6.1. Zakres i metodyka badań .....	157
6.1.1. Przygotowanie próbek do badania.....	157
6.1.2. Przebieg badania .....	158
6.2. Aparatura pomiarowa .....	159
6.2.1. Instytut Łączności.....	159
6.2.2. EMPA.....	161
6.2.3. ISMB - PhotonLab .....	162
6.3. Testowane włókna i kable światłowodowe.....	163
6.3.1. Włókna światłowodowe w pokryciu pierwotnym.....	164
6.3.2. Włókna światłowodowe w ścisłej tubie.....	164
6.3.3. Włókna światłowodowe w półścisłej tubie .....	164
6.3.4. Kable stacyjne z włóknami w ścisłej tubie.....	164
6.3.5. Jednostka optyczna dla kabli pustych.....	165
6.3.6. Przewody OPGW i jednostki optyczne OPGW .....	165
6.4. Wyniki badań .....	166
6.4.1. Włókna światłowodowe G.652 w pokryciu pierwotnym .....	166
6.4.2. Włókna światłowodowe w ścisłej tubie.....	168
6.4.3. Włókna światłowodowe G.652 w półścisłej tubie .....	174
6.4.4. Kable stacyjne z włóknami w ścisłej tubie.....	176
6.4.5. Jednostka optyczna dla kabli pustych.....	181
6.4.6. Przewody OPGW i jednostki optyczne OPGW .....	182
6.5. Wnioski .....	186
7. Podsumowanie .....	187
Literatura .....	188

## Wykaz oznaczeń i skrótów

ADL	- podczepiany napowietrzny kabel światłowodowy o konstrukcji dielektrycznej (ang. <i>Aerial Dielectric Lashed</i> )
ADSS	- samonośny napowietrzny kabel światłowodowy o konstrukcji dielektrycznej (ang. <i>Aerial Dielectric Self Supporting</i> )
$A_{\text{eff}}$	- efektywna powierzchnia pola modowego włókna światłowodowego
AM	- modulacja amplitudy (ang. <i>Amplitude Modulation</i> )
$\alpha$	- (1) współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej materiału, (2) szybkość wirowania włókna, wyrażana w [rad/m] lub [obr/m]
B	- (1) współczynnik dwójłomności optycznej materiału (2) częstotliwość taktowania sygnału cyfrowego
BER	- elementowa stopa błędów (ang. <i>Bit Error Ratio</i> )
$B_F$	- współczynnik modowej dwójłomności optycznej włókna światłowodowego
$\beta$	- stała fazowa propagacji promieniowania w światłowodzie
c	- prędkość światła w próżni ( $2,99793 \times 10^8$ m/s)
CATV	- sieć telewizji kablowej (ang. <i>Community Antenna Television</i> )
CD	- dyspersja chromatyczna (ang. <i>Chromatic Dispersion</i> )
CSF	- jednomodowe włókno światłowodowe o przesuniętej długości fali odcięcia (ang. <i>Cut-off Shifted Fiber</i> )
CTE	- współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej (ang. <i>Coefficient of Thermal Expansion</i> )
CWDM	- luźne zwielokrotnienie falowe (ang. <i>Coarse Wavelength Multiplexing</i> )
d	- średnica skrętu spiralnego tub lub innych elementów w ośrodku kabla; symbol może zawierać indeks zależny od elementu, którego dotyczy.
D	- współczynnik dyspersji chromatycznej włókna światłowodowego
DCF	- włókno światłowodowe do kompensacji dyspersji chromatycznej (ang. <i>Dispersion Compensating Fiber</i> )
$d_F$	- średnica części szklanej włókna światłowodowego, zwykle 0,125 mm
DGD	- różnicowe opóźnienie grupowe (ang. <i>Differential Group Delay</i> )
DMA	- dynamiczna analiza mechaniczna (ang. <i>Dynamic Mechanical Analysis</i> )
DSF	- jednomodowe włókno światłowodowe o przesuniętej dyspersji (ang. <i>Dispersion Shifted Fiber</i> )
$d_{TS}$	- średnica zwoju sprężyny
DWDM	- gęste zwielokrotnienie falowe (ang. <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> )
$\Delta$	- znormalizowana różnica współczynników załamania materiałów rdzenia i płaszczka włókna światłowodowego (wartość maksymalna)
$\Delta\beta$	- dwójłomność optyczna włókna światłowodowego
$\Delta L_F$	- czynny nadmiar długości włókna światłowodowego w stosunku do długości kabla, dostępny dla kompensacji zmian długości kabla bez naprężeń włókna
$\Delta L_K$	- całkowity nadmiar długości włókna światłowodowego w stosunku do długości kabla

$\Delta L_{KMAX}$	- zakres względnych zmian długości kabla, w którym włókna światłowodowe są ułożone swobodnie i bez naprężeń mechanicznych wywołanych rozciąganiem lub dociskaniem do ścianek tub bądź innych elementów kabla
$\Delta L_{LIN}$	- współczynnik nadmiaru długości kabla względem długości trasy linii
$\Delta L_R$	- nadmiar długości włókna światłowodowego w stosunku do długości rozety
$\Delta L_S$	- nadmiar długości elementów skręcanego spiralnie ośrodka kabla w stosunku do długości kabla, wynikający ze skręcenia
$\Delta L_T$	- nadmiar długości włókna światłowodowego w stosunku do długości tuby
$\Delta L_{TMAX}$	- maksymalny nadmiar długości włókna światłowodowego w stosunku do długości tuby, przy którym nie występuje dociskanie włókien do ścianek tuby
$\Delta P$	- strata czułości odbiornika wskutek szkodliwych zjawisk związanych z propagacją we włóknie światłowodowym, np. dyspersją
$\Delta \tau$	- względne opóźnienie modów polaryzacyjnych odpowiadających PSP, oznaczenie używane dla DGD
e	- eliptyczność rdzenia włókna światłowodowego
E	- moduł sprężystości materiału (moduł Younga)
EDFA	- wzmacniacz optyczny z włóknom światłowodowym domieszkowanym $Er_2O_3$ (ang. <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> )
$E_F$	- moduł sprężystości szkła, z którego wykonano włókno światłowodowe
$E_P$	- moduł sprężystości pokrycia włókna światłowodowego
E-PSCF	- jednomodowe włókno światłowodowe o rdzeniu dużej średnicy wykonanym z czystego $SiO_2$ (ang. <i>Enlarged Pure Silica Core Fiber</i> )
$\epsilon$	- odkształcenie względne
$\epsilon_P$	- wydłużenie względne włókna światłowodowego w czasie testu przesiewczego wytrzymałości mechanicznej (ang. <i>Proof-test</i> )
F	- siła ściskająca włókno w kierunku poprzecznym
FA	- pomiar PMD metodą stałego analizatora (ang. <i>Fixed Analyzer</i> )
FEC	- korekcja błędów „w przód” (ang. <i>Forward Error Correction</i> )
FM	- modulacja częstotliwości (ang. <i>Frequency Modulation</i> )
FRP	- laminat wzmacniany włóknom szklanym, aramidowym lub węglowym, klejony żywicą epoksydową lub poliestrową (ang. <i>Fiber Reinforced Plastic</i> )
FTTH	- światłowodowa sieć dostępową (ang. <i>Fiber To The Home</i> )
FWM	- mieszanie czterofalowe (ang. <i>Four Wave Mixing</i> )
$\varnothing_T$	- średnica wewnętrzna tuby z włóknomi światłowodowymi
g	- obrotowy współczynnik elastoptyczny szkła opisujący dwójłomność kołową powstałą w wyniku skręcenia włókna, spełniający zależność: $g = 2g_s$
G	- dwójłomność optyczna włókna światłowodowego wynikająca z braku symetrii osiowej falowodu (składowa geometryczna $B_F$ )
GbE	- Gigabit Ethernet
$g_s$	- obrotowy współczynnik elastoptyczny szkła opisujący skręcenie płaszczyzny polaryzacji w wyniku skręcenia włókna
$\gamma$	- szybkość skręcania włókna, wyrażana w [rad/m] lub [obr/m]
h	- droga korelacji (średnia odległość między punktami sprzęgania modów polaryzacyjnych)



HDPE	- polietylen o wysokiej gęstości (ang. <i>High Density Polyethylene</i> )
IM	- pomiar PMD metodą interferencyjną (ang. <i>Interferometric Method</i> )
ITU	- Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna (ang. <i>International Telecommunication Union</i> )
JME	- pomiar PMD metodą macierzy Jonesa (ang. <i>Jones Matrix Eigenanalysis</i> )
k	- stała Boltzmanna ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$ ) ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
$k_{\text{PMD}}$	- współczynnik dyspersji polaryzacyjnej włókna światłowodowego używany do obliczeń dyspersji linii kablowych, uwzględniający zjawisko mieszania modów polaryzacyjnych [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]
$k_{\text{SPMD}}$	- współczynnik podatności skrętnej dyspersji polaryzacyjnej włókna światłowodowego, uwzględniający zjawisko mieszania modów polaryzacyjnych [ps/m· $\sqrt{\text{km}}$ ]
$k_s$	- stała sprężyny (F/ $\Delta L$ )
L	- długość całkowita włókna, kabla lub linii światłowodowej
LAN	- sieć lokalna transmisji danych (ang. <i>Local Area Network</i> )
$L_B$	- droga zdudniania modów polaryzacyjnych (ang. <i>Beat Length</i> )
$L_{\text{BS}}$	- droga zdudniania modów polaryzacyjnych we włóknie skręconym
LDPE	- polietylen o niskiej gęstości (ang. <i>Low Density Polyethylene</i> )
$L_{\text{LIN}}$	- długość rzeczywista (trasowa) linii kablowej
$L_{\text{OTDR}}$	- wynik reflektometrycznego pomiaru odległości bez korekcji
LSZH	- trudnopalne tworzywo bezhalogenowe spalające się z małą emisją dymu (ang. <i>Low Smoke Zero Halogen</i> ).
$\lambda$	- długość fali promieniowania w próżni
$\lambda_{\text{cc}}$	- długość fali odcięcia włókna światłowodowego umieszczonego w kablu
$\lambda_0$	- długość fali odpowiadająca zerowej dyspersji chromatycznej włókna światłowodowego
$\Lambda$	- okres zmian szybkości wirowania włókna [m]
$\Lambda_s$	- okres (skok) skręcenia włókna [m]
M	- dwójłomność optyczna włókna światłowodowego wynikająca z naprężeń mechanicznych (składowa mechaniczna $B_F$ )
MAN	- sieć miejska (ang. <i>Metropolitan Area Network</i> )
MFD	- średnica pola modowego włókna światłowodowego (ang. <i>Mode Field Diameter</i> )
n	- (1) współczynnik załamania światła (2) wykładnik opisujący szybkość rozwoju korozji naprężeniowej szkła
$n_1$	- współczynnik załamania materiału płaszczka włókna światłowodowego
$n_2$	- współczynnik załamania materiału rdzenia włókna światłowodowego
$N_{\text{EX}}$	- liczba ekstremów zliczonych podczas pomiaru PMD metodą FA
NRZ	- kod liniowy bez powrotu do zera (ang. <i>Non Return to Zero</i> )
NZDSF	- jednomodowe włókno światłowodowe o niezerowej przesuniętej dyspersji (ang. <i>Nonzero Dispersion Shifted Fiber</i> )
$\nu$	- współczynnik Poissona

Okno C	- zakres długości fal ok. 1528-1563 nm (ang. <i>Conventional</i> )
Okno L	- zakres długości fal ok. 1570-1625 nm (ang. <i>Longwave</i> )
Okno S	- zakres długości fal ok. 1480-1520 nm (ang. <i>Shortwave</i> )
OPGW	- przewód energetyczny odgromowy z włóknami światłowodowymi (ang. <i>Optical Ground Wire</i> )
OPT-PC	- przewód energetyczny fazowy z włóknami światłowodowymi (ang. <i>Optical Phase Conductor</i> )
OTDR	- reflektometr światłowodowy impulsowy (ang. <i>Optical Time Domain Reflectometer</i> )
p	- (1) współczynnik dyspersji polaryzacyjnej nie uwzględniający zjawiska mieszania modów polaryzacyjnych [ps/km] (2) skok skrętu spiralnego tub lub innych elementów w ośrodku kabla
P	- (1) moc optyczna (2) siła ściskająca włókno szklane w kierunku osiowym
PA	- poliamid (ang. <i>Polyamide</i> )
PBT	- politereftalan butylenowy (ang. <i>Poly-Butylene Terephthalate</i> )
PC	- poliwęglan (ang. <i>Polycarbonate</i> )
PDF	- funkcja gęstości prawdopodobieństwa (ang. <i>Probability Density Function</i> )
PE	- polietylen (ang. <i>Polyethylene</i> )
PEI	- polieteroimid (ang. <i>Polyetheroimide</i> )
PET	- politereftalan etylenowy (ang. <i>Poly-Ethylene Terephthalate</i> )
PMD	- modowa dyspersja polaryzacyjna (ang. <i>Polarization Mode Dispersion</i> )
PMDRF	- współczynnik redukcji PMD włókna światłowodowego wskutek wirowania lub skręcenia (ang. <i>PMD Reduction Factor</i> )
PMD <sub>Q</sub>	- współczynnik dyspersji polaryzacyjnej k <sub>PMD</sub> obliczony statystycznie dla linii złożonej z M odcinków kabli taki, że prawdopodobieństwo przekroczenia tej wartości jest ≤ Q. Typowe wartości parametrów używane w specyfikacjach: M = 20, Q = 0,01%.
POTDR	- reflektometr światłowodowy impulsowy z analizą stanu polaryzacji (ang. <i>Polarization Optical Time Domain Reflectometer</i> )
PP	- polipropylen (ang. <i>Polypropylene</i> )
P <sub>RX</sub>	- moc sygnału optycznego na wejściu odbiornika
PSCF	- jednomodowe włókno światłowodowe o rdzeniu wykonanym z czystego SiO <sub>2</sub> (ang. <i>Pure Silica Core Fiber</i> )
PSP	- podstawowy stan polaryzacji we włóknie światłowodowym (ang. <i>Principal State of Polarization</i> )
PTFE	- politetrafluoroetylen (ang. <i>Poly-Tetrafluoroethylene</i> )
PVC	- polichlorek winylu (ang. <i>Polyvinyl Chloride</i> )
P <sub>w</sub>	- osiowa siła ściskająca powodująca wyboczenie włókna szklanego
R	- współczynnik elastooptyczny dwójłomności optycznej szkła
r <sub>g</sub>	- promień zginania lub nawijania włókna światłowodowego
r <sub>s</sub>	- współczynnik resztkowych naprężeń skręcających pozostałych po wirowaniu włókna
RZ	- kod liniowy z powrotem do zera (ang. <i>Return to Zero</i> )

QoS	- jakość usługi w sieci telekomunikacyjnej (ang. <i>Quality of Service</i> )
S	- stosunek chwilowej DGD do PMD włókna światłowodowego: $S = \Delta\tau / \langle \tau \rangle$
SAN	- sieć rozproszonego zapisu danych (ang. <i>Storage Area Network</i> )
SDH	- synchroniczna hierarchia cyfrowa (ang. <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> )
SMF	- jednomodowe włókno światłowodowe o nieprzesuniętej dyspersji (ang. <i>Single Mode Fiber</i> )
$\sigma$	- naprężenie mechaniczne
t	- czas
T	- temperatura
$T_k$	- temperatura kruchości polimeru
$T_g$	- temperatura zeszklenia polimeru
$T_m$	- temperatura mięknięcia polimeru
$T_p$	- temperatura płynięcia polimeru
$T_r$	- temperatura rozkładu polimeru
$T_w$	- temperatura, poniżej której następuje wyboczenie włókna szklanego
V	- znormalizowana częstość promieniowania w falowodzie optycznym
$\omega$	- pulsacja fali świetlnej ( $\omega = 2\pi c / \lambda$ )
WAN	- sieć rozległa (ang. <i>Wide Area Network</i> )
z	- odległość mierzona od początku włókna światłowodowego
$\zeta_w$	- współczynnik redukcji własnej PMD włókna światłowodowego wskutek wirowania
$\zeta_s$	- współczynnik redukcji PMD indukowanej we włóknie światłowodowym przez zewnętrzne siły ściskające wskutek skręcenia
$\zeta_{SN}$	- współczynnik redukcji własnej (geometrycznej) PMD włókna światłowodowego wskutek skręcenia

# 1. Wstęp

Modowa dyspersja polaryzacyjna (PMD) to jedno z podstawowych zjawisk ograniczających przydatność jednomodowego włókna światłowodowego do przesyłania sygnałów cyfrowych o bardzo wysokich przepływnościach. W przypadku strumieni cyfrowych 40 Gbit/s ograniczenia długości łącza wprowadzane przez PMD są uważane za najtrudniejsze do usunięcia. Znaczenie PMD dla sieci telekomunikacyjnych uświadomiono sobie późno. Pionierskie publikacje z lat 1978-1979 [1,2] nie wywołały większego zainteresowania, za wyjątkiem zastosowania światłowodów jednomodowych w czujnikach pól magnetycznych wykorzystujących efekt Faradaya, dla których już w 1979 r. grupa badaczy z uniwersytetu w Southampton opracowała metodę produkcji skręcanych włókien o niskiej dwójłomności optycznej [3,4]. Dokładniejsze analizy, jak przeglądowe opracowanie Kaminowa [5] czy praca Poole'a i Wagnera [6] nie wzbudziły większego zainteresowania przemysłu, a po wprowadzeniu włókien jednomodowych do sieci telekomunikacyjnych w 1982 r. reklamowano je jako medium transmisyjne o nieograniczonych zasobach.

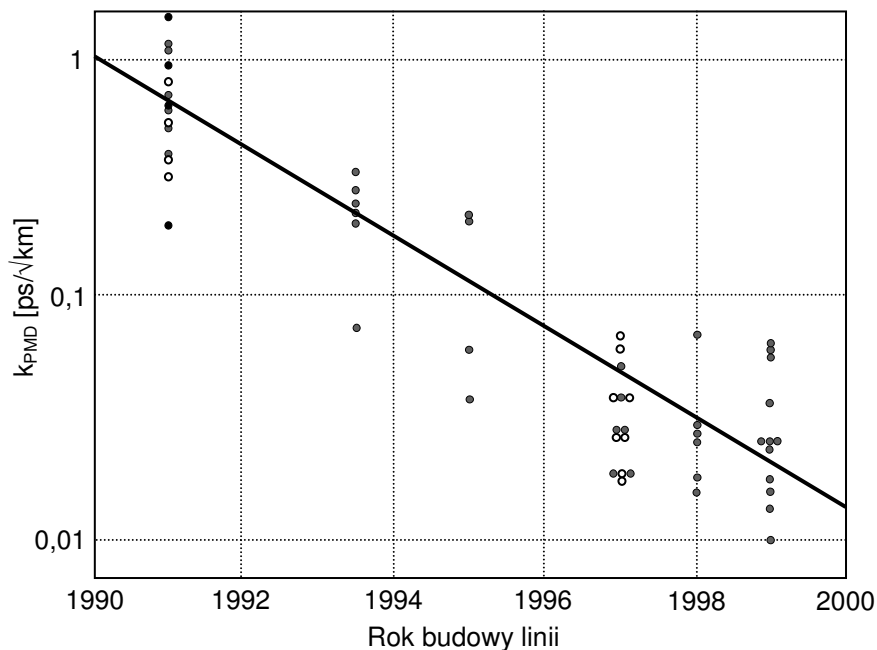
Sieci światłowodowe budowane przed 1990 r. nie zawierały optycznych wzmacniaczy przelotowych. Maksymalne przepływności łącza w tym czasie nie przekraczały 1,6 Gbit/s i były zbyt niskie, by dyspersja polaryzacyjna powodowała degradację sygnału w odcinku regeneracyjnym długości 60-150 km. PMD nabrała znaczenia w łączach z optycznymi wzmacniaczami przelotowym EDFA nie regenerującymi impulsów, gdzie występuje akumulacja dyspersji z kolejnych sekcji wzmacniaczkowych.

Szkodliwy wpływ PMD wykryto w 1993 r. w analogowych sieciach TV kablowej [7,8] i w doświadczalnym łączu cyfrowym 10 Gbit/s ze wzmacniaczami EDFA [9]. Od tego czasu występuje duże zainteresowanie dyspersją polaryzacyjną oraz metodami jej ograniczania i pomiarów. Problem degradacji sygnału przez PMD ma ogromne znaczenie w przypadku modernizacji już eksploatowanych linii kablowych przez wprowadzanie urządzeń transmisyjnych o wyższej przepływności, na przykład 10 Gbit/s zamiast 622 Mbit/s. Wysoka PMD spowodowała moralne zestarzenie światłowodowej infrastruktury kablowej zbudowanej przed 1997 r., mimo że jej fizyczna trwałość jest szacowana przeważnie na 25-100 lat.

Normalizacja PMD nastąpiła z opóźnieniem: dopuszczalną PMD włókien i kabli światłowodowych określono w zaleceniach ITU-T G.652 [10] i G.655 [11] zatwierdzonych odpowiednio w październiku 1996 r. i kwietniu 1997 r., ustalając ją początkowo na  $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . Krajowe wymagania techniczne dla kabli światłowodowych telekomunikacyjnych uwzględniające PMD powstały w 1996 r. i wprowadzono je we wrześniu 1997 r. [12,13,14]; analogiczny standard przyjęła energetyka [15]. W latach 1982-1997 zainstalowano na świecie około 130 mln km jednomodowych włókien światłowodowych o niekontrolowanej, często wysokiej wartości PMD. Problem ten występuje również w Polsce, co potwierdziły pomiary linii kablowych w sieci TP S.A. [16-18], których wyniki przedstawia rys. 1.

W trakcie cyfrowym z modulacją NRZ i bez mechanizmów ograniczających wpływ dyspersji, takich jak optyczna kompensacja PMD, korekcja błędów (FEC) lub adaptacyjna korekcja sygnału w odbiorniku, tolerowana wartość różnicowego opóźnienia grupowego (DGD) nie przekracza 35% szerokości impulsu. PMD nie powinna przekraczać 10% szerokości impulsu, czyli 10 ps w łączu 10 Gbit/s i 2,5 ps w łączu 40 Gbit/s [19,20]. Maksymalna długość łącza z włóknami o PMD równej  $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  wynosi wtedy odpowiednio 400 km i 25 km; obniżenie PMD do  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  zwiększa ją do odpowiednio 2500 km i 150 km. Dyspersja polaryzacyjna przeszkadza w budowie łącza 40 Gbit/s nawet w sieciach miejskich i strefowych; niezbędne są pomiary PMD i selekcja torów światłowodowych.

Zachowanie niskiej PMD włókna światłowodowego w kablu zależy ściśle od budowy ośrodka, w szczególności stopnia izolacji włókna szklanego od oddziaływań mechanicznych przenoszonych z zewnątrz i z pozostałych elementów kabla. Podstawowe konstrukcje kabli światłowodowych: rozetowych, tubowych, taśmowych i z włóknami w pokryciach ściśłych opracowano w latach 1975-80, nie uwzględniając oczywiście potrzeby minimalizacji PMD.



Rys. 1. PMD włókien w liniach kablowych TP S.A. w funkcji daty budowy.  
Rysunek sporządzony na podstawie danych z referatu [16].

Rozwiązania konstrukcyjne kabli wprowadzone dla zagwarantowania niskiej i stabilnej tłumienności, niskich strat złączy i wysokiej niezawodności włókna światłowodowego, w tym:

- ograniczanie do minimum naprężeń mechanicznych i zgięć włókien w kablu,
- skręcanie jednostek ośrodka,
- zastrzone tolerancje wymiarów włókien,
- 2-warstwowe pokrycia ochronne nakładane na włókno szklane

zapewniają względnie dobrą stabilność PMD włókna światłowodowego w kablu liniowym z ośrodkiem o konstrukcji luźnej, na przykład tubowej. Sytuacja jest odmienna w kablu z włóknami umieszczonymi w ścisłych pokryciach ochronnych (ściślych tubach), które wywierają znaczne, zmieniające się z temperaturą siły na włókno światłowodowe.

Teza niniejszej rozprawy jest następująca:

**Ściste pokrycie ochronne włókna światłowodowego, które zmienia swe wymiary z temperaturą oraz wywiera na włókno zmienny nacisk i osiową siłę ściskającą, jest w stanie wielokrotnie zwiększyć PMD włókna w porównaniu do wartości charakteryzującej to samo włókno w pokryciu pierwotnym. PMD włókna w pokryciu ścisłym rośnie przy obniżaniu temperatury pracy, kiedy kurczące się pokrycie doprowadza do wyboczenia i deformacji włókna oraz wywiera nań rosnące anizotropowe ciśnienie; wynikiem tych oddziaływań jest dwójłomność optyczna szkła.**

Zjawiska wymienione wyżej nasilają się, kiedy włókno z wytłaczanym pokryciem polimerowym pracuje okresowo w temperaturze wyższej od temperatury zeszklenia polimeru, co prowadzi do krystalizacji i trwałego kurczenia się tworzywa.

Indukowaniu PMD przez siły pochodzące od pokrycia ścisłego przeciwdziałają naprężenia skręcające wewnątrz włókna światłowodowego, wprowadzone (a) podczas wirowania włókna światłowodowego, stosowanego przez jego producenta jako środek do redukcji PMD lub (b) w czasie formowania jednostki optycznej przez producenta kabla. Odpowiednio silne naprężenia skręcające mogą usunąć deterministyczną zależność PMD włókna światłowodowego w pokryciu ścisłym od temperatury.

Powyższe zależności potwierdzono w eksperymentach laboratoryjnych.

W dostępnych źródłach literaturowych brak opisów podobnych analiz i eksperymentów dotyczących włókien telekomunikacyjnych w pokryciach ścisłych i kabli z nimi; zagadnienie wpływu pokrycia włókna światłowodowego na jego dwójłomność optyczną jest natomiast analizowane w odniesieniu do włókien przeznaczonych dla czujników światłowodowych.

Na podstawie wyników pracy można przedstawić następujące wnioski dla projektantów sieci światłowodowych z kablami o ścisłej budowie ośrodka:

- Użytkowanie kabli zawierających włókna nie wirowane poza budynkami wymaga przyjęcia do obliczeń dodatkowego składnika PMD pojawiającego się w niskich temperaturach. Dla spotykanych w Polsce temperatur zimowych mieszczących się w zakresie od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$  składnik ten może przekroczyć  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .
- Kabel, który ma zachować stabilną PMD w warunkach zimowych, powinien zawierać włókna wirowane podczas wyciągania z preformy lub skręcane mechanicznie. Większość obecnie produkowanych włókien jednomodowych o przesuniętej niezerowej dyspersji (NZDSF) jest wirowana podczas wyciągania.

Występująca w nie wirowanych i nie skręcanych włóknach jednomodowych ze ścisłymi pokryciami monotoniczna zależność PMD od temperatury w szerokim zakresie, na przykład 1:8 przy zmianie temperatury od  $+60^{\circ}\text{C}$  do  $-20^{\circ}\text{C}$  może być wykorzystana do budowy termicznie przestrajanych generatorów PMD oraz czujników temperatury, ciśnienia i naprężeń mechanicznych.

Pomiary PMD włókien światłowodowych w pokryciach ścisłych stanowią ponadto wartościowe narzędzie dla badania warunków ich pracy oraz optymalizacji technologii nakładania pokrycia ścisłego i produkcji kabli światłowodowych.

## 2. Rozwiązania konstrukcyjne włókien i kabli światłowodowych

Opisy w tym rozdziale mają na celu dostarczenie informacji niezbędnych dla analizy zależności między budową kabla światłowodowego i warunkami jego pracy, a PMD włókien światłowodowych w kablu. Zgodnie z tematem pracy najwięcej uwagi poświęcono konstrukcjom z włóknami w pokryciach ścisłych oraz uwypukleniu różnic w porównaniu do częściej używanych i stanowiących przedmiot większego zainteresowania kabli z ośrodkami o konstrukcji luźnej. Pominięto inne własności użytkowe i metody ich testowania oraz wybór rozwiązań konstrukcyjnych kabli światłowodowych w zależności od wymagań i warunków pracy. Zagadnienia te są przedmiotem opracowań [21,22] tego samego (współ)autora.

To samo dotyczy włókien wielomodowych i mikrostrukturalnych nie używanych obecnie w publicznych sieciach telekomunikacyjnych oraz specjalnych włókien jednomodowych do kompensacji dyspersji chromatycznej (DCF), budowy żyroskopów laserowych, czujników światłowodowych i wzmacniaczy optycznych EDFA, przetwarzania sygnałów optycznych i in.

### 2.1. Wymiary włókna szklanego a wymagania montażowe

W jednomodowym włóknie telekomunikacyjnym propagacja promieniowania o długości fali 1250-1650 nm odbywa się w rdzeniu o średnicy 5-8  $\mu\text{m}$  i otaczającej rdzeń warstwie szkła o średnicy poniżej 30  $\mu\text{m}$ , znacznie mniejszej od średnicy włókna szklanego. Zależnie od rodzaju włókna i długości fali, średnica pola modowego (MFD) ograniczona spadkiem gęstości mocy optycznej do  $1/e^2 \approx 13,53\%$  wartości maksymalnej wynosi 7-16  $\mu\text{m}$  [21-27], a poza tym obszarem następuje wykładniczy spadek gęstości mocy. Pozostałe elementy włókna i kabla światłowodowego zapewniają niezbędną odporność na czynniki zewnętrzne: obciążenia mechaniczne, wilgoć, zmiany temperatury, promieniowanie słoneczne, chemikalia i in. oraz własności montażowe: wymiary i sztywność odpowiednią dla montażu, identyfikacji włókien i kabli, formowania włókien w jednostki i kompatybilności z osprzętem.

Włókna telekomunikacyjne mają średnicę części szklanej 125  $\mu\text{m}$  [12,13,23-28], wybraną jako minimalna gwarantująca sztywność i wytrzymałość mechaniczną odpowiednią dla ręcznego montażu. Test przesiewczy (*proof-test*) włókna ze szkła kwarcowego o tej średnicy obejmuje rozciąganie siłą 8,9 N, której odpowiadają wydłużenie względne 1% i naprężenie 0,73 GPa [29-31]. Typowa siła zrywająca włókno wynosi 58 N przy wydłużeniu względnym 6,5%. Wielkości te wiążą zależność:

$$F = \frac{\pi}{4} d_F^2 E_F \varepsilon \quad (1)$$

gdzie: F - siła osiowa działająca na włókno,  $d_F$  - średnica włókna szklanego (125  $\mu\text{m}$ ),  $E_F$  - moduł sprężystości szkła z  $\text{SiO}_2$  (73 GPa),  $\varepsilon$  - wzdłużne odkształcenie włókna.

Produkowane przed 1995 r. włókna wielomodowe o większych średnicach, m.in. 100/140  $\mu\text{m}$  i 200/280  $\mu\text{m}$  wycofano z powodu wyższej tłumienności, dyspersji modowej i ceny w porównaniu do włókien gradientowych 62,5/125  $\mu\text{m}$  i 50/125  $\mu\text{m}$ .

Średnicę włókien w pokryciu ścisłym: 0,9 mm wybrano tak, by przypominały izolowany przewód miedziany z żyłą  $\varnothing 0,4$  mm, najcieńszy z używanych w sieciach telefonicznych. Siła zrywająca włókno to 80-95 N, z czego 60 N przypada na włókno szklane  $\varnothing 0,125$  mm i 20-35 N na pokrycie  $\varnothing 0,9$  mm z PBT lub PA o granicy plastyczności 35-60 MPa [32-34]. Dla porównania, siła zrywająca przewód miedziany z żyłą  $\varnothing 0,4$  mm wynosi około 140 N.

Do celów innych niż transmisja optyczna służy odpowiednio 94,24% przekroju włókna światłowodowego w pokryciu pierwotnym  $\varnothing 250$   $\mu\text{m}$ , 99,56% przekroju włókna w pokryciu ścisłym  $\varnothing 900$   $\mu\text{m}$  i 99,88% przekroju 48-włóknowego kabla kanałowego  $\varnothing 12$  mm.

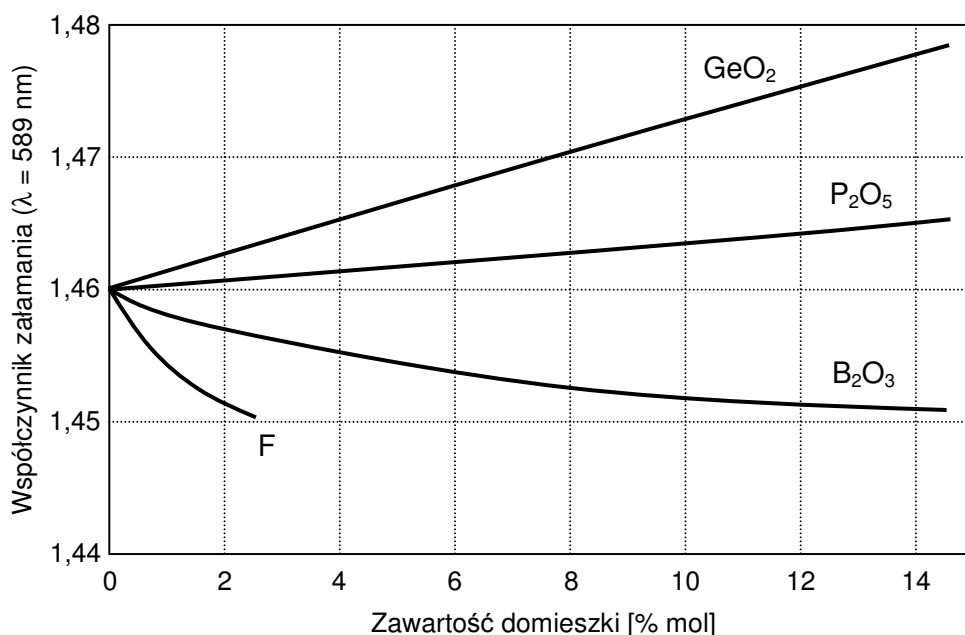
Włókna specjalne, na przykład do produkcji żyroskopów laserowych lub kompensatorów dyspersji chromatycznej (DCF), umieszczane fabrycznie w obudowach ochronnych mają mniejszą średnicę, najczęściej 80  $\mu\text{m}$  i bardzo cienkie pokrycia ochronne.

## 2.2. Budowa jednomodowego włókna światłowodowego

Podstawowym materiałem używanym do wytwarzania telekomunikacyjnych włókien światłowodowych jest szkło kwarcowe ( $\text{SiO}_2$ ). W celu uformowania falowodu, szkło rdzenia jest domieszkowane dwutlenkiem germanu ( $\text{GeO}_2$ ) w ilości zależnej od wymaganej różnicy współczynnika załamania w porównaniu do szkła tworzącego płaszcz (rys. 2). W przypadku włókna jednomodowego o nieprzesuniętej dyspersji i nie obniżonym, skokowym profilu współczynnika załamania, zgodnego z zaleceniem ITU-T G.652 [23] wymagana różnica współczynników załamania określona formułą:

$$\Delta \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2} \cdot 100\% \quad (2)$$

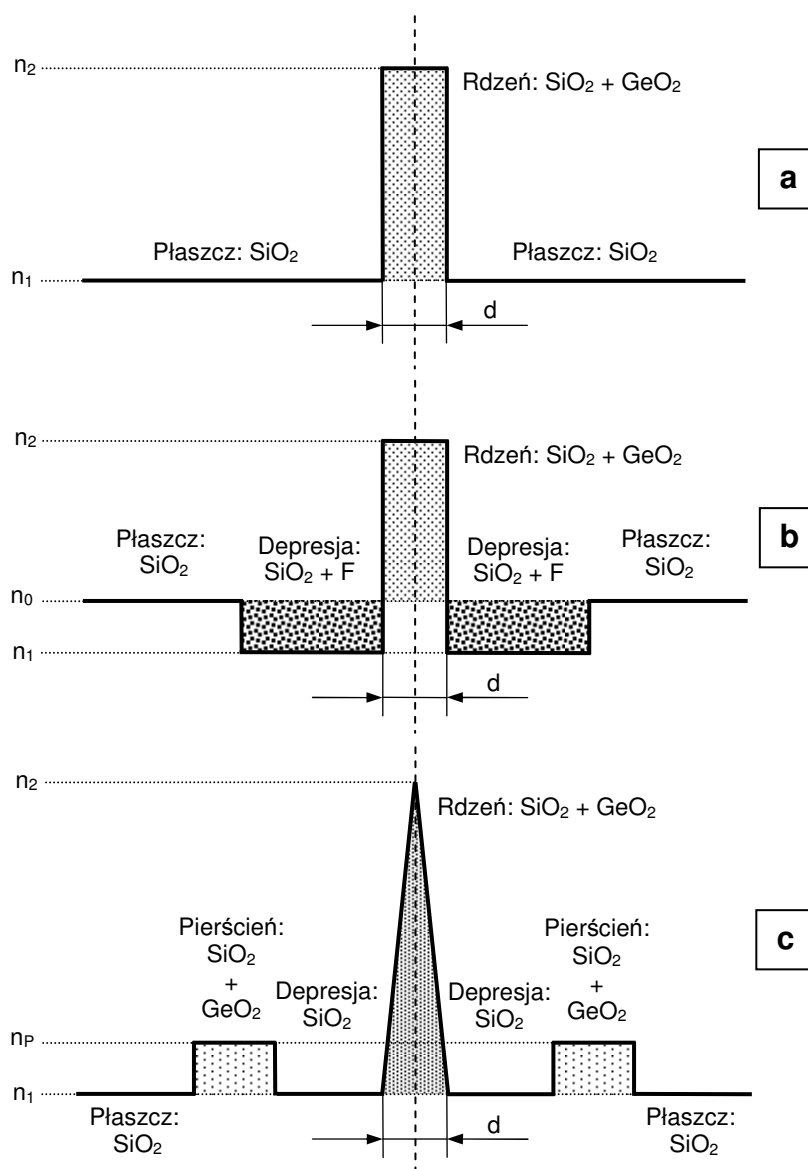
gdzie:  $\Delta$  to znormalizowana różnica współczynnika załamania,  $n_1$  – współczynnik załamania materiału płaszcz otaczającego rdzeń (rys. 3),  $n_2$  – współczynnik załamania materiału rdzenia, zawiera się w granicach 0,35-0,40% ( $n_2 - n_1 = 0,0051-0,0058$ ). Niezbędna zawartość  $\text{GeO}_2$  w materiale rdzenia wynosi wtedy 4-5% (rys. 2). Dla najbardziej rozpowszechnionego na świecie włókna G.652 typu SMF-28 firmy Corning wartości te wynoszą odpowiednio 0,36%, 0,0053 i 4,0% mol. [29,30].



Rys. 2. Zależność współczynnika załamania szkła  $\text{SiO}_2$  od zawartości domieszki [35].  
W produkcji włókien telekomunikacyjnych używa się obecnie  $\text{GeO}_2$  i F.

Włókna jednomodowe o przesuniętej dyspersji, znormalizowane w zaleceniach ITU-T G.653 [24], G.655 [26] i G.656 [27] odznaczają się generalnie mniejszą średnicą rdzenia i bardziej skomplikowanym profilem współczynnika załamania, na przykład trójkątnym z pierścieniem ochronnym. We włóknach tego rodzaju  $\Delta$  osiąga 0,65-1,25%, a maksymalna zawartość  $\text{GeO}_2$  w obszarze wokół osi włókna 7-13% (rys. 3c,7). Włókna światłowodowe obecnie sprzedawane w Europie dla zastosowań w sieciach lądowych nie zawierają innych niż  $\text{GeO}_2$  domieszek do modyfikacji współczynnika załamania.





Rys. 3. Profile refrakcyjne włókien jednomodowych: (a) skokowy bez obniżenia, (b) skokowy z obniżeniem, (c) trójkątny z pierścieniem zewnętrznym.

Profile (a) i (b) są typowe dla włókien o nieprzesuniętej dyspersji (G.652, G.654), a profile podobne do (c) dla włókien o przesuniętej dyspersji (ITU-T G.653, G.655, G.656).

Część jednomodowych kabli światłowodowych zainstalowanych w Polsce w latach 1990-1999 zawierała włókna G.652 o obniżonym profilu refrakcyjnym (ang. *Depressed Cladding*), dostarczane głównie przez firmę AT&T Cable Network Systems, od 1996 r. znaną jako Lucent Technologies, a od 2001 r. OFS [31]. We włóknach tego typu rdzeń ze szkła  $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$  jest otoczony przez warstwę szkła z domieszką fluoru (F), o niższym niż czyste  $\text{SiO}_2$  współczynniku załamania, a zawartość  $\text{GeO}_2$  w materiale rdzenia jest niższa niż we włóknach o profilu nie obniżonym (ang. *Matched Cladding*), co przedstawia rys. 3b. Istnieją włókna tego rodzaju z rdzeniem z czystego  $\text{SiO}_2$  (PSCF – ang. *Pure Silica Core Fiber*), gdzie cała różnica współczynników załamania wynika z dodatku fluoru, przeznaczone dla sieci podmorskich lub transkontynentalnych i przedstawione w rozdziale 2.3.3.

Włókna o obniżonym profilu refrakcyjnym straciły popularność w Europie z powodu zjawiska dyfuzji fluoru w wysokiej temperaturze, pogarszającego jakość złączy spawanych i trudności ich łączenia z częściej używanymi włóknami o profilu nie obniżonym. Wcześniej ułożone kable z tymi włóknami są nadal użytkowane.

## 2.3 Jednomodowe włókna telekomunikacyjne

W początkowym okresie rozwoju telekomunikacji optycznej (1974-85) używano włókien wielomodowych, początkowo o profilu skokowym (pierwsza instalacja w kraju: Lublin 1979), a następnie gradientowym (pierwsza instalacja w kraju: Łódź 1982). Ich duża średnica rdzenia wynosząca 50-200  $\mu\text{m}$  ułatwiała łączenie i pozwalała na wystarczająco efektywne sprzężenie włókna ze źródłami promieniowania LED.

Włókna gradientowe 50/125  $\mu\text{m}$  i 62,5/125  $\mu\text{m}$  nadal są używane w sieciach lokalnych (LAN) dla transmisji sygnałów o przepływności do 1 Gbit/s (GbE) na niewielkie odległości. Ich dyspersja modowa uniemożliwia jednak budowę długich łączy o przepływności powyżej 140 Mbit/s i od 1982 r. rozpoczęto masowe wprowadzanie włókien jednomodowych pozbawionych tej wady, a ponadto tańszych w produkcji i o niższej tłumienności: 0,18-0,25 dB/km dla  $\lambda = 1550$  nm, wobec 0,7-1,2 dB/km dla  $\lambda = 1300$  nm we włóknach wielomodowych. Instalowanie włókien jednomodowych w Polsce rozpoczęto w 1990 r.

Ewolucja lądowych sieci telekomunikacyjnych i stopniowa budowa sieci: miejskich i strefowych pracujących w zakresie 1310 nm, międzymiastowych jednofalowych z transmisją w zakresie 1550 nm, DWDM ze wzmacniaczami optycznymi EDFA oraz miejskich CWDM zaowocowała opracowaniem 4 rodzajów włókien jednomodowych zoptymalizowanych dla tych celów. W odróżnieniu od sytuacji w innych dziedzinach techniki (energetyka, telefonia komórkowa, telewizja, kolej) i historii rozwoju włókien wielomodowych, przyjęto jednolite standardy dla włókien jednomodowych na całym świecie, aczkolwiek zakres stosowania włókien poszczególnych rodzajów różni się w zależności od operatora.

Pomijamy tu włókna jednomodowe dla innych zastosowań w telekomunikacji, jak sieci podmorskie, kompensacja dyspersji chromatycznej i budowa wzmacniaczy optycznych oraz poza telekomunikacją – do budowy czujników, żyroskopów, sterowania pociskami itd.

Dla przygotowania tego rozdziału wykorzystano dokumenty normalizacyjne, w tym [36] i opisy techniczne włókien światłowodowych najważniejszych producentów [37-56].

### 2.3.1. Włókna o nieprzesuniętej dyspersji (ITU-T G.652, SMF)

#### 2.3.1.1. Budowa i własności

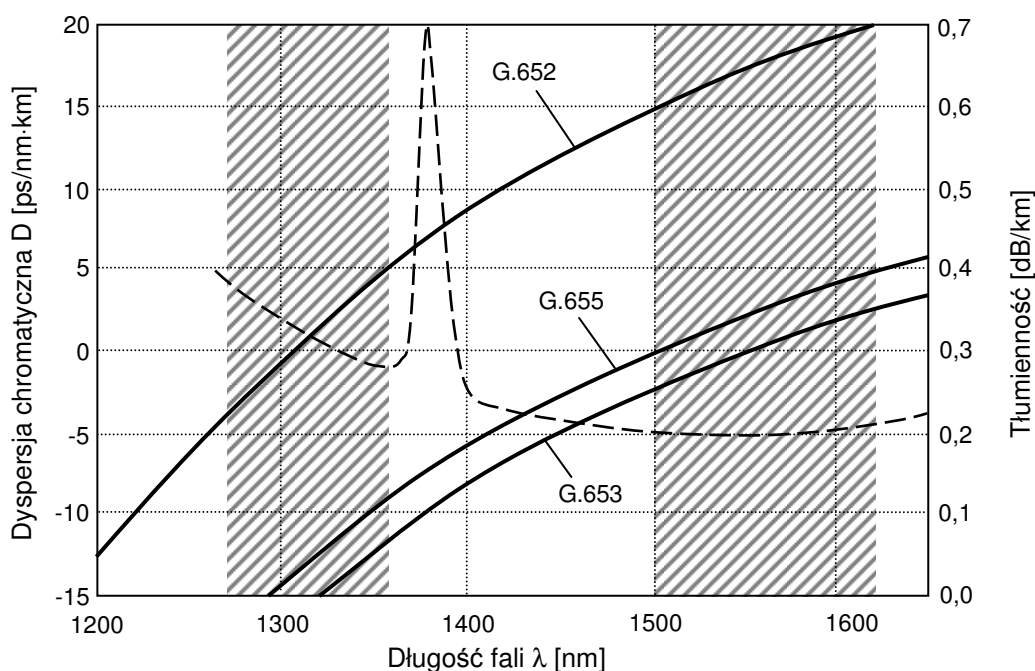
Jest to najwcześniej wprowadzony do sieci, najtańszy, najłatwiejszy w montażu i najczęściej używany rodzaj włókien jednomodowych. Nazwa pochodzi od faktu, że charakterystyka dyspersji chromatycznej włókna mało różni się od odpowiedniej charakterystyki szkła kwarcowego ( $\lambda_0 \approx 1270$  nm), gdyż nie zastosowano żadnych zabiegów dla jej przesunięcia w kierunku przedziału długości fal odpowiadającego minimalnej tłumienności. W efekcie, jest to jedyny rodzaj włókna jednomodowego, dla którego minima dyspersji chromatycznej ( $\lambda_0 = 1300$ -1324 nm) i tłumienności ( $\lambda \approx 1550$ -1580 nm) występują w zupełnie odmiennych zakresach widma pokazanych na rys. 4 zakreskowanymi pasami.

Włókna o nieprzesuniętej dyspersji są znormalizowane w zaleceniu ITU-T G.652 [23] i z tego powodu oznaczane skrótowo jako "G.652" oraz w dokumencie IEC 60793-2-50 jako typy B1.1, B1.2 i B1.3 [36]. Były one oryginalnie przeznaczone dla transmisji cyfrowej w "oknie" 1310 nm na średnie odległości, zwykle do 60-80 km, w związku z czym długość fali odcięcia włókna umieszczonego w kablu ustalono jako  $\lambda_{cc} \leq 1260$  nm.

Tłumienność włókna G.652 w zakresie 1260-1340 nm wynosi 0,30-0,38 dB/km. Po uwzględnieniu typowych strat złączy (0,10 dB co 2 km) i marginesu na wzrost tłumienności wskutek starzenia, zmian temperatury i napraw (0,05-0,10 dB/km), przyjmowana w konserwatywnych kalkulacjach tłumienność linii kablowej wynosi 0,45-0,50 dB/km.

Transmisja w zakresie około 1550 nm, a obecnie do 1650 nm jest możliwa; włókno wykazuje wówczas niską tłumienność: 0,18-0,25 dB/km ( $\lambda = 1550$ -1650 nm), ale wysoką dyspersję chromatyczną: 16-18 ps/nm\*km dla 1550 nm i 20-22 ps/nm\*km dla 1625 nm.

Łąca 10 Gbit/s o długości przekraczającej 60-100 km wymagają wtedy kompensacji dyspersji chromaticznej, wykonywanej za pomocą modułów z włóknami DCF lub kompensatorów zawierających siatki Bragga o płynnie zmiennym okresie. Podzespoły te są kosztowne i wnoszą dodatkowe straty oraz PMD.



Rys. 4. Charakterystyki dyspersji chromaticznej (linie ciągłe) i tłumienności (linia przerywana) jednomodowych włókien telekomunikacyjnych znormalizowanych przez ITU-T.

Włókna G.652 mają prosty profil skokowy (rys. 3a-b) następujących parametrach:

- $\Delta n$ : 0,3-0,4% (wartość typowa: 0,35%),
- średnica rdzenia: 7,8-9,0  $\mu\text{m}$  (wartość typowa: 8,3  $\mu\text{m}$ ),
- średnica pola modowego (MFD): 8,8-9,5  $\mu\text{m}$  dla 1310 nm i 10,5-11,5  $\mu\text{m}$  dla 1550 nm,
- pole przekroju czynnego rdzenia ( $A_{\text{eff}}$ ): około 80  $\mu\text{m}^2$  dla 1550 nm.

Opis uwarunkowań konstrukcyjnych w tym zakresie przedstawia broszura [30].

Włókna G.652 są nadal przydatne dla sieci DWDM, w których przesyłane są sygnały wielofalowe o wysokiej mocy, często przekraczającej 100 mW (+20 dBm). Ich główny atut to odporność na optyczne efekty nieliniowe dzięki dużej powierzchni czynnej rdzenia i odpowiednio niższej gęstości mocy promieniowania oraz bardzo osłabionej akumulacji produktów mieszania czterofalowego (FWM) z powodu wysokiej dyspersji chromaticznej.

Prosty profil refrakcyjny, względnie duża średnica rdzenia i niska zawartość  $\text{GeO}_2$  skutkują lepszą symetrią rdzenia i niższą dwójłomnością optyczną w porównaniu do włókien o przesuniętej dyspersji wytwarzanych za pomocą identycznych technologii, stąd większość włókien G.652 była i jest nadal produkowana bez wirowania.

### 2.3.1.2. Kierunki rozwoju i normalizacji

Ponad 20-letni okres produkcji i użytkowania, nacisk na obniżenie kosztów montażu oraz wprowadzenie systemów transmisyjnych DWDM, CWDM i FTTH doprowadziły do rozwoju technicznego oraz pojawienia się kilku kategorii włókien adaptowanych do określonych zastosowań. Zalecenie G.652, opublikowane po raz pierwszy w 1984 r., przeszło w 7 kolejnych wydaniach poważną ewolucję [57], polegającą głównie na:

- ✓ zaostrzeniu tolerancji parametrów optogeometrycznych,
- ✓ wprowadzeniu i zaostrzeniu wymagań na dyspersję polaryzacyjną (PMD),
- ✓ wprowadzeniu 4 kategorii włókien o różnym przeznaczeniu,
- ✓ stopniowym poszerzaniu użytecznego zakresu widma, obecnie do 1260-1625 nm.

Wydanie ze stycznia 2005 r. [23] definiuje 4 kategorie, przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie parametrów włókien światłowodowych określonych w zaleceniu ITU-T G.652 i zakresów ich zastosowań. „b.w.” - brak wymagania.

Kategoria włókna	Tłumienność (dB/km)					PMD <sub>Q</sub> ps/√km
	1310 nm	1383 nm	1550 nm	1625 nm	1310-1625 nm	
G.652.A	≤0,50	b.w.	≤0,40	b.w.	b.w.	≤0,5
G.652.B	≤0,40	b.w.	≤0,35	≤0,40	b.w.	≤0,2
G.652.C	≤0,40	≤0,40	≤0,30	≤0,40	≤0,40	≤0,5
G.652.D	≤0,40	≤0,40	≤0,30	≤0,40	≤0,40	≤0,2
G.652.A	Sieci lokalne, dostępne, miejskie i regionalne; λ = 1310 nm i 1550 nm.					
G.652.B	Sieci międzymiastowe i miejskie o przepływnościach 10 Gbit/s i 40 Gbit/s					
G.652.C	Sieci CWDM o średniej przepływności i zakresie widma 1270-1610 nm					
G.652.D	Sieci CWDM i DWDM o przepływności 10/40 Gbit/s i zakresie widma jw.					

G.652.A to włókno o najniższych parametrach. Wymagania dla tej kategorii pozostały identyczne jak w wydaniu 4 zalecenia ITU-T G.652 (04/1997).

Wartości współczynnika PMD<sub>Q</sub> gwarantowane w 2005 r. przez głównych producentów są znacznie niższe od wymaganych w normach i zawierają się w granicach 0,06-0,10 ps/√km.

Obniżenie gwarantowanej tłumienności dla długości fali 1383 nm do 0,40 dB/km, osiągnięte po raz pierwszy w 1999 r. (włókno AllWave firmy Lucent Technologies) wymagało zredukowania zawartości wody w materiale rdzenia poniżej 0,003 ppm ( $3 \times 10^{-7}\%$ ).

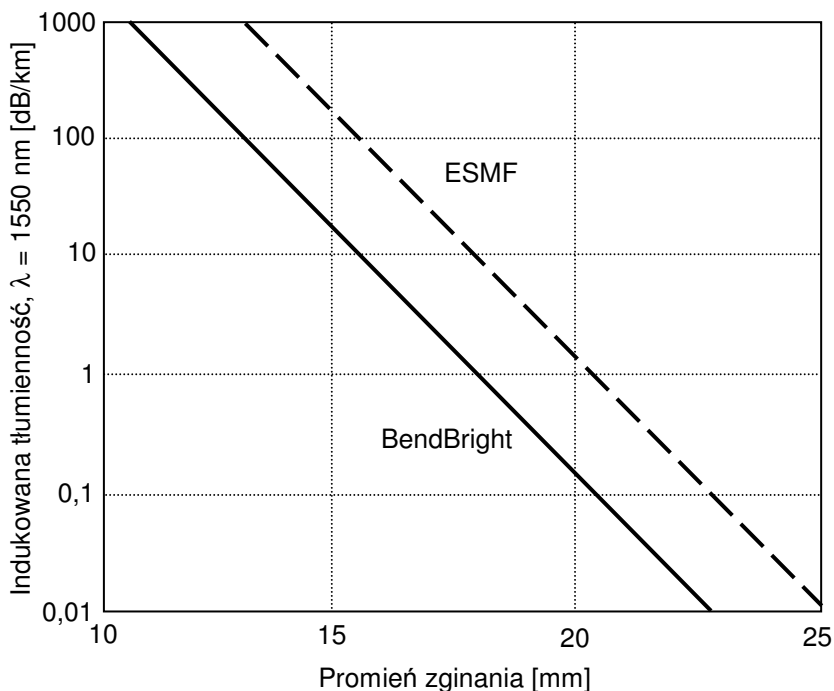
### 2.3.1.3. Włókna G.652 dla sieci LAN i FTTH

Od 2000 r. postępuje wprowadzanie na dużą skalę światłowodów jednomodowych do sieci abonenckich FTTH lub FTTC (Japonia, RFN, USA, Francja, Wielka Brytania) oraz wewnętrznego okablowania budynków biurowych, gdzie kable światłowodowe o lekkiej konstrukcji są narażone na ciasne zginanie i zwijanie. Pojawiło się zapotrzebowanie na małogabarytowy osprzęt dla tego rodzaju sieci, w którym jednak zapasy włókien muszą być zwijane w pętle o mniejszej średnicy niż dotychczas przyjęte 60-100 mm.

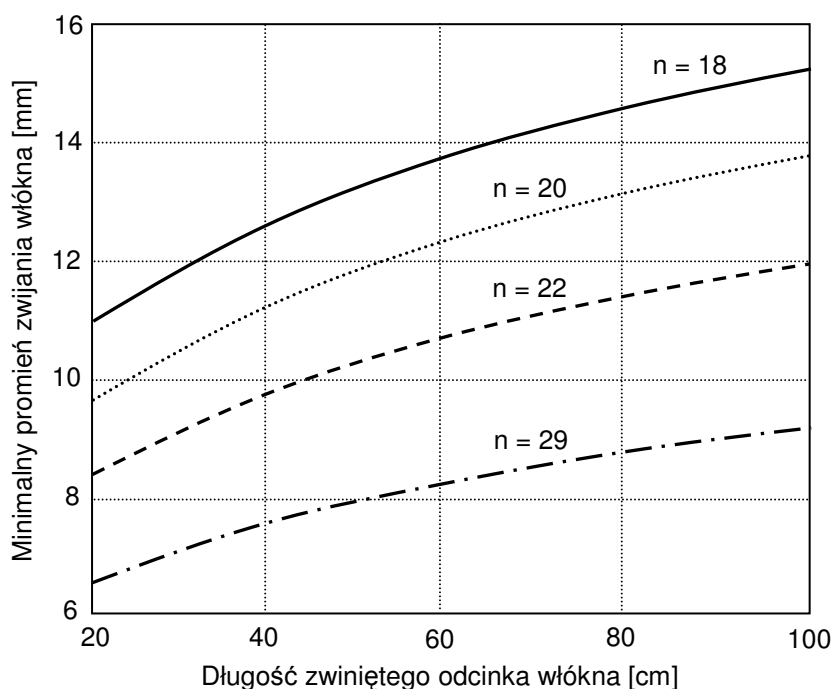
Opracowano do tego celu włókna tolerujące zgięcia o promieniu zredukowanym nawet do 15 mm bez znaczącego wzrostu tłumienności, w tym FutureGuide-SR15 i FutureGuide-SR15E firmy Fujikura, BendBright firmy Draka Comteq i MagniLight firmy Pirelli (obecnie Prysmian Cables & Systems) [42-44,49].

Według aktualnego zalecenia G.652, straty wprowadzone przez nawinięcie 100 zwojów na walcu Ø60 mm nie mogą przekraczać 0,5 dB dla długości fali 1550 nm (G.652.A) lub 1625 nm (G.652.B/C/D). Specyfikacje włókien dla sieci LAN i FTTH dopuszczają nawijanie na walcu Ø50 mm i, co jest nowe, pojedyncze zgięcia o kąt 180° o promieniu 16 mm lub nawinięcie 10 zwojów Ø32 mm. Zmiany te wprowadzono zachowując kompatybilność montażową z włóknami G.652 innych wersji i te same parametry transmisyjne.

Matthijssen i Griffioen [58] sugerują, że osiągnięto tu kres rozwoju, gdyż 12-15 mm to najmniejszy promień zginania włókna o średnicy 125  $\mu\text{m}$ . Przyjmując dopuszczalne prawdopodobieństwo pęknięcia zapasu włókna w osłonie złączowej równe 0,001% w okresie 20 lat i długość zapasu 1 m, autorzy otrzymali dozwolony promień zwijania włókna o typowym współczynniku korozji naprężeniowej  $n = 20$  równy 14 mm. Charakterystyki indukowanej nawijaniem tłumienności i dozwolonego promienia zwijania przedstawiają rys. 5 i 6 sporządzone na podstawie danych z artykułu [58].



Rys. 5. Typowe charakterystyki strat zgięciowych włókien G.652 firmy Draka Comteq: standardowego ESMF i BendBright dla sieci LAN i FTTH. Według danych z [58].



Rys. 6. Dozwolony promień zwijania włókna światłowodowego ze szkła  $\text{SiO}_2$  o średnicy 125  $\mu\text{m}$  i  $\epsilon_p = 1\%$ . Prawdopodobieństwo pęknięcia  $10^{-5}$  w okresie 20 lat [58].

Włókna jednomodowe wysokiej jakości tolerują zwinanie o promieniu mniejszym niż tradycyjnie zalecane 40 mm bez znaczącego wzrostu tłumienności lub ryzyka pęknięcia. Zginanie takie wiąże się z wysokim poziomem naprężeń wewnętrznych w kierunku osiowym, o wartości zmieniającej się w poprzek włókna, co opisuje wzór [58]:

$$\sigma_{\max} = \frac{E_1 \cdot d_1}{2r_g} \quad (3)$$

w którym:  $\sigma_{\max}$  - najwyższa wartość naprężenia występująca na powierzchni włókna,  $d_1$  - średnica włókna szklanego,  $E_1$  – moduł sprężystości szkła,  $r_g$  – promień zginania włókna. Naprężenia wprowadzają niestety dwójłomność optyczną szkła i PMD, więc zginanie włókien jest dopuszczalne tylko na niewielkiej części całej długości linii. Powstawanie PMD wskutek zginania włókna światłowodowego przedstawiono w rozdziale 3.1.3.3.

## 2.3.2. Włókna o przesuniętej dyspersji (ITU-T G.653, DSF)

### 2.3.2.1. Budowa, własności i zastosowanie

Włókna o nieprzesuniętej dyspersji są nieoptymalne dla łączy jednofalowych o przepływności powyżej 1 Gbit/s z transmisją na długości fali 1550 nm. Nawet w przypadku zastosowania nadajnika z laserem DFB z modulacją zewnętrzną, dyspersja chromatyczna włókna ogranicza przepływność sygnału i długość odcinka regeneracyjnego zgodnie z przybliżoną zależnością [20] dla łączy z kodem liniowym NRZ i bez kompensacji dyspersji:

$$B_{\max} \approx \frac{0,45}{\lambda} \sqrt{\frac{c}{D(\lambda) \cdot L}} \quad (4)$$

gdzie:  $B_{\max}$  – najwyższa częstotliwość taktowania sygnału cyfrowego,  $\lambda$  - długość fali,  $D(\lambda)$  - dyspersja chromatyczna włókna,  $L$  – długość odcinka regeneracyjnego.

Pierwszym rozwiązaniem problemu było wprowadzenie włókien jednomodowych o zmniejszonej w porównaniu do włókien G.652 średnicy rdzenia, co zaowocowało zwiększoną dyspersją falowodową i przesunięciem charakterystyki dyspersji chromatycznej, tak by przejście przez zero następowało dla długości fali  $\lambda_0 \approx 1550$  nm (rys. 4). Włókna nowego typu, określone jako włókna jednomodowe o przesuniętej dyspersji (ang. *Dispersion Shifted Fiber* – DSF) objęte zaleceniem ITU-T G.653 [24] i oznaczone jako typ B2 przez IEC, początkowo nie były w ogóle przewidziane do przesyłania sygnałów w oknie 1310 nm. W późniejszym okresie wprowadzono wymóg  $\lambda_{cc} \leq 1270$  nm, lecz dyspersja chromatyczna DSF w zakresie 1310 nm jest wysoka: około -25 ps/nm\*km.

Tabela 2. Wybrane parametry włókien DSF według zalecenia ITU-T G.653.

Kategoria włókna	Tłumienność ( $\lambda = 1550$ nm)	$\lambda_0$	MFD ( $\lambda = 1550$ nm)	PMD <sub>Q</sub>
	dB/km	nm	$\mu\text{m}$	ps/ $\sqrt{\text{km}}$
G.653.A	$\leq 0,35$	1500-1600	7,8-8,5	$\leq 0,5$
G.653.B	$\leq 0,35$	1500-1600	7,8-8,5	$\leq 0,2$

Opracowanie nowego typu włókien było trudne technicznie, gdyż zwiększona koncentracja GeO<sub>2</sub> w rdzeniu o mniejszej średnicy podwyższyła rozproszenie Rayleigha i tłumienność w porównaniu do włókna G.652, a także straty wprowadzane przez zginanie. Problemy te usunięto wprowadzając skomplikowany trójkątny profil refrakcyjny z pierścieniem ochronnym (rys. 3c), niestety cena włókna wzrosła prawie 3-krotnie.

Kolejny problem stanowiła trudna do kontrolowania eliptyczność i niejednorodność materiału rdzenia, wynik mniejszej jego średnicy i skomplikowanego procesu produkcji preform. W efekcie, włókna DSF produkowane i instalowane w szeregu krajów w latach 1985-96 odznaczały się wysoką i bardzo zmienną wartością PMD. Z tego samego powodu wykonywanie złączy spawanych o niskich stratach było znacznie trudniejsze w porównaniu do włókien G.652, czego doświadczone w 1996 r. w kraju podczas instalacji 1500 km kabli zawierających 4 dodatkowe włókna DSF w sieci międzymiastowej TP S.A.

Producenci włókien selekcjonowali je, odsiewając odcinki o wysokiej eliptyczności i PMD. Pojęcie o ówczesnych standardach jakości daje publikacja Bell Laboratories z 1990 r. [59] z opisem metody kontroli PMD polegającej na oszacowaniu eliptyczności rdzenia metodą skanowania rozkładu gęstości promieniowania emitowanego z końca włókna w polu dalekim. Sposób ten pozwalał wykrywać odcinki o  $p > 5$  ps/km.

### 2.3.2.2. Przyczyny wycofania

Z instalowania kabli z włóknami DSF zrezygnowano po wprowadzeniu międzymiastowych systemów transmisyjnych DWDM z przelotowymi wzmacniaczami optycznymi EDFA, wykorzystujących zakres widma znany jako okno C ( $\lambda \approx 1528-1563$  nm).

Przesyłanie włóknem wielu sygnałów o mocy  $>0$  dBm i częstotliwościach nośnych rozmieszczonych ze stałym, niewielkim odstępem 50-200 GHz prowadzi do ich intermodulacji wskutek nieliniowości optycznej szkła (efekt Kerra), znanej jako mieszanie czterofalowe (FWM). Powstają sygnały zakłócające o częstotliwościach identycznych jak użyteczne, których nie da się usunąć za pomocą filtrów optycznych. Intermodulacja taka zachodzi w każdym włóknie światłowodowym, ale akumulacja produktów intermodulacji w długim odcinku włókna zachodzi wyłącznie, gdy dyspersja chromatyczna jest odpowiednio niska i różnica faz pomiędzy falami nośnymi kanałów nie zmienia się w odcinku włókna o długości wielu kilometrów. Warunek ten jest spełniony we włóknach DSF, co drastycznie ogranicza ich przydatność dla sieci DWDM. FWM można usunąć, wykorzystując inny niż C zakres widma, głównie L ( $\lambda \approx 1570-1625$  nm), lecz koszt urządzeń transmisyjnych wzrasta.

Większość producentów wycofała włókna DSF ze swej oferty przed 2000 r. Wyjątkiem jest Fujikura produkująca włókno FutureGuide-DS [44].

Włókien DSF praktycznie nie używa się w kraju, za wyjątkiem sieci TV kablowej. TP S.A. ułożyła w latach 1995-1997 około 3300 km linii z kabli firm Alcatel i Pirelli, zawierających po 4 włókna DSF jako rezerwę modernizacyjną, lecz nigdy ich nie wykorzystano. Pozostali operatorzy w Polsce nie byli zainteresowani włóknami G.653 z powodu wysokich cen.

### 2.3.3. Włókna o przesuniętej fali odcięcia (ITU-T G.654, CSF, PSCF)

Włókna te opracowano dla przesyłania sygnałów na bardzo duże odległości w sieciach transkontynentalnych i podmorskich; są one zoptymalizowane wyłącznie dla pracy w zakresie 1530-1625 nm. Typowe zastosowania to systemy transoceaniczne z regularnie rozmieszczonymi wzmacniaczami optycznymi o całkowitej długości nawet do 15000 km i łącza podmorskie bez podwodnych urządzeń elektronicznych o długości do 400 km.

Ich długość fali odcięcia jest przesunięta w stronę fal dłuższych:  $\lambda_{cc} \leq 1530$  nm (ang. *Cut-off Shifted Fiber* – CSF), co wyklucza współpracę z urządzeniami pracującymi w zakresie 1310 nm. W odróżnieniu DSF, włókna te nie mają przesuniętej charakterystyki dyspersji, natomiast nacisk położono na obniżenie tłumienności i zwiększenie przekroju czynnego rdzenia – nawet powyżej  $200 \mu\text{m}^2$  [60] dla osłabienia zjawisk nieliniowych i zwiększenia dopuszczalnej mocy sygnału wprowadzanego do włókna. Rdzeń jest często wykonywany z czystego  $\text{SiO}_2$  (ang. *Pure Silica Core Fiber* – PSCF) i otoczony cylindrem ze szkła domieszkowanego fluorem. Ta konstrukcja zapewnia niską tłumienność, najczęściej około 0,16 dB/km ( $\lambda = 1550-1580$  nm), ponieważ dodatek  $\text{GeO}_2$  do szkła podwyższa poziom

rozproszenia Rayleigha. Jeszcze niższą tłumienność ma włókno o rdzeniu ze szkła  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ , ale ulega ono szybkiej degradacji pod wpływem wodoru.

Wymagania techniczne określa zalecenie ITU-T G.654 [25], gdzie CSF podzielono na dwie kategorie. Dokument IEC 60793-2-50 [36] klasyfikuje CSF jako typ B1.2, czyli jedną z odmian włókien o nieprzesuniętej dyspersji.

Tabela 3. Wybrane parametry włókien CSF według zalecenia ITU-T G.654.

Kategoria włókna	Tłumienność ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )	Dyspersja ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )	MFD ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )	PMD <sub>Q</sub>
	dB/km	ps/nm*km	$\mu\text{m}$	ps/√km
G.654.A	≤0,22	≤20	9,5-10,5	≤0,5
G.654.B	≤0,22	≤22	9,5-13,0	≤0,2

Autor nie ma żadnych informacji o stosowaniu kabli z włóknami CSF w kraju.

### 2.3.4. Włókna o niezerowej przesuniętej dyspersji (ITU-T G.655, NZDSF)

#### 2.3.4.1. Budowa, własności i zastosowanie

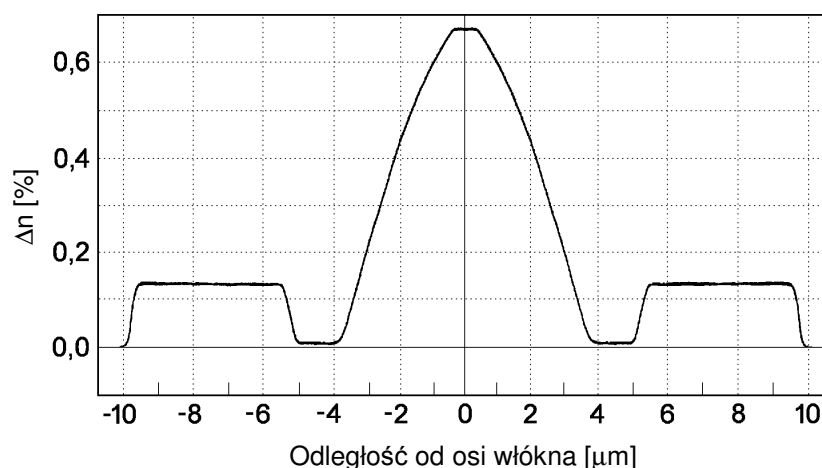
Problem wywołanej przez FWM niezgodności włókien G.653 z aparaturą transmisyjną DWDM rozwiązano zmieniając charakterystykę dyspersji chromatycznej tak, by uniknąć przejścia przez zero w całym przedziale widma wykorzystywanym w sieci DWDM, przede wszystkim w oknie C, i zagwarantować pewną minimalną wartość dyspersji. Dyspersja nowego włókna jest w oknach C i L znacznie niższa niż włókna G.652, by ograniczyć potrzebę jej kompensacji, lecz wystarczająca dla stłumienia efektów FWM.

Najczęściej spotykane włókna o niezerowej przesuniętej dyspersji (ang. *Nonzero Dispersion Shifted Fiber* – NZDSF) mają nieco mniej niż włókno DSF przesuniętą charakterystykę dyspersji (rys. 4), która w oknach C i L jest zawsze dodatnia. Parametry włókien NZDSF definiuje zalecenie ITU-T G.655, ustalające 3 kategorie [24]. W nomenklaturze IEC są one określone jako typ B4.

Profil refrakcyjny jest podobny jak we włóknach DSF, ale z licznymi zmianami dla optymalizacji parametrów, głównie zwiększenia przekroju czynnego rdzenia i ograniczenia nachylenia charakterystyki dyspersji chromatycznej. Profil refrakcyjny najczęściej używanego włókna LEAF firmy Corning [37] przedstawia rys. 7. Widoczna jest modyfikacja profilu trójkątnego polegająca na „spłaszczeniu” jego środkowej części w celu ograniczenia maksymalnej koncentracji  $\text{GeO}_2$ , częściowo wynikająca z realiów produkcji metodą OVD: ubytku germanu z zaciskanego w wysokiej temperaturze kanału na osi preformy.

Włókna NZDSF, szczególnie wersje o małej średnicy pola modowego, mają względnie wysokie wartości dwójłomności geometrycznej i PMD spowodowanej przez odstępstwa od symetrii promieniowej rdzenia i profilu rozkładu domieszek, podobnie jak włókna DSF. Prócz precyzyjnej kontroli wymiarów i centryczności rdzenia, powszechnie stosowane jest wirowanie wyciąganego włókna przedstawione w rozdziale 3.1.6. Dodatkową rolę odgrywają zewnętrzne części rdzenia, w tym pierścień widoczny na rys. 3c i 7, stanowiący bufor minimalizujący i rozkładający obwodowo naprężenia wynikające z różnicy rozszerzalności termicznej płaszczki i środkowej części rdzenia.





Rys. 7. Profil refrakcyjny włókna LEAF (Corning). Rysunek z opisu patentowego [61].

### 2.3.4.2. Kierunki rozwoju i normalizacji

Pierwsze włókno NZDSF (Corning SMF-LS) pojawiło się w 1993 r. Od tego czasu trwa ewolucja stanowiąca odpowiedź na wymagania związane z używaniem w sieciach DWDM i CATV, a od 2001 r. i CWDM, szczególnie w zakresie optymalizacji charakterystyki dyspersji chromatycznej, redukcji nieliniowości i PMD oraz poprawy własności montażowych.

Włókna G.655.A mają inną charakterystykę dyspersji chromatycznej  $D(\lambda)$  niż G.655.B/C. Efektem jest brak zamienności oraz odmienne metody kompensacji dyspersji i doboru zakresów widma dla sieci DWDM. Trzy kategorie odzwierciedlają propozycje oryginalnie forsowane przez firmy Corning (A) i Alcatel (B, C) z myślą o zastosowaniach w sieciach międzymiastowych DWDM. Dla wszystkich ustalono długość fali odcięcia  $\lambda_{cc} \leq 1450$  nm wykluczającą transmisję sygnałów w oknie 1310 nm, co nie jest odpowiednie dla sieci miejskich. W 2001 r. pojawiły się jednak włókna NZDSF o  $\lambda_{cc} \approx 1270$  nm.

Zalecenie G.655 określa zakresy wartości bezwzględnych dyspersji chromatycznej, ale nie jej znak. Do tej samej kategorii należą włókna o ujemnej i dodatniej dyspersji chromatycznej, na przykład LEAF [37] i MetroCor [38] firmy Corning, oba G.655.A. Większość NZDSF dla sieci lądowych ma dodatnią dyspersję w użytkowych zakresach widma.

Tabela 4. Porównanie parametrów i zakresów zastosowań włókien światłowodowych znormalizowanych w zaleceniu ITU-T G.655. „b.w.” - brak wymagania.

Kategoria włókna	Tłumiennosc (dB/km)		Dyspersja chromatyczna min. (ps/nm*km)		PMD <sub>Q</sub> ps/√km
	1550 nm	1625 nm	1530-1565 nm	1565-1625 nm	
G.655.A	≤0,35	-----	0,1-6,0	-----	≤0,50
G.655.B	≤0,35	≤0,40	1,0-10,0	b.w	≤0,50
G.655.C	≤0,35	≤0,40	1,0-10,0	b.w.	≤0,20
G.655.A	Sieci miejskie i regionalne, zwłaszcza DWDM; $\lambda = 1530-1565$ nm.				
G.655.B	Sieci metropolitalne DWDM, także na zakres S ( $\lambda = 1480-1520$ nm)				
G.655.C	Sieci międzymiastowe DWDM, także na zakres S i o przepływności $n \times 40$ Gbit/s				

Wymagania dużej powierzchni czynnej rdzenia i płaskiej charakterystyki dyspersji chromatycznej są sprzeczne. Dostępne włókna mają skrajne lub kompromisowe kombinacje tych parametrów, przedstawione w tabeli 5 na podstawie opisów katalogowych [37,38,41,42,44,47-49,54,55].

Tabela 5. Porównanie powierzchni czynnej ( $A_{eff}$ ), dyspersji ( $D$ ) i nachylenia charakterystyki dyspersji ( $DS$ ) dla  $\lambda = 1550$  nm dla NZDSF. Dane w nawiasach są szacunkowe.

Producent włókna	Nazwa włókna	MFD	$A_{eff}$	DS	D
		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^2$	$\text{ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{km}$	$\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$
Fujikura	FutureGuide USS	$7,7 \pm 0,4$	45	0,017	5,6
Fujikura	FutureGuide SS	$8,4 \pm 0,6$	55	(0,040)	4,5
OFS	TrueWave RS	$8,4 \pm 0,6$	(53)	$\leq 0,050 / 0,046$	4,5
Sumitomo	PureMetro	$8,3 \pm 0,5$	(52)	$\leq 0,061$	4,1
OFS	TrueWave REACH	$8,6 \pm 0,4$	55	$\leq 0,045 / 0,040$	8,0
Draka Comteq	TeraLight Metro	$9,2 \pm 0,5$	63	0,052	8,0
Sumitomo	PureGuide	$9,2 \pm 0,5$	(63)	$\leq 0,063$	8,0
Samsung	UltraPass	$9,2 \pm 0,5$	68	0,062	8,5
Corning	LEAF	$9,6 \pm 0,4$	72	(0,085)	4,0
Prysmian	FreeLight	$9,6 \pm 0,4$	72	(0,085)	4,2
Fujikura	FutureGuide LA	$9,6 \pm 0,4$	72	(0,085)	4,2
Fujikura	FutureGuide ULA	$9,5 \pm 0,4$	95	0,065	9,8
Corning	MetroCor	$8,1 \pm 0,5$	(50)	(0,095)	-7,2
Prysmian	WideLight	$8,1 \pm 0,5$	50	(0,095)	-7,5

Faktycznie istnieje już 6-7 odmian włókien NZDSF przeznaczonych dla sieci lądowych; wyroby dominujących producentów są dokładnie kopiowane.

### 2.3.5. Szerokopasmowe włókna NZDSF (ITU-T G.656)

W związku z rozszerzaniem zakresu spektrum wykorzystywanego do transmisji DWDM o okna C i S, oraz wprowadzeniem systemów CWDM, dla których znormalizowano centralne długości fal 8 kanałów w zakresie 1470-1610 nm [57], pojawiło się zapotrzebowanie na włókna światłowodowe o niezerowej dyspersji i rozszerzonym użytecznym zakresie długości fal. Zalecenie ITU-T G.656 [27] ustala ten zakres na 1460-1625 nm.

Włókno NZDSF może spełniać równocześnie wymagania zaleceń G.655 i G.656. Przykładami są TeraLight Ultra i TeraLight Metro firmy Draka Comteq [41,42], przy czym drugie włókno nadaje się też do transmisji w zakresie 1310 nm, mając  $\lambda_{cc} \leq 1260$  nm.

Tabela 6. Wybrane parametry szerokopasmowych włókien NZDSF według ITU-T G.656.

Tłumienność (dB/km)			Dyspersja min. (ps/nm <sup>2</sup> ·km)	Długość fali odcięcia $\lambda_{cc}$	MFD ( $\lambda = 1550$ nm)	PMD <sub>Q</sub>
1460 nm	1550 nm	1625 nm	1460-1625 nm	nm	$\mu\text{m}$	ps/√km
$\leq 0,40$	$\leq 0,35$	$\leq 0,40$	2,0-14,0	$\leq 1450$	7,0-11,0	$\leq 0,20$

## 2.4. Pierwotne pokrycie ochronne włókna światłowodowego

### 2.4.1. Przeznaczenie pokrycia pierwotnego

Zadaniem pokrycia pierwotnego jest (1) ochrona włókna szklanego przez uszkodzeniami mechanicznymi i chemicznymi powierzchni, co warunkuje jego żywotność i niezawodność eksploatacyjną oraz (2) zapewnienie stabilności parametrów transmisyjnych włókna w warunkach panujących podczas składowania i transportu włókien, produkcji, instalacji i eksploatacji kabli oraz montażu włókien wydobytych z rozszytego kabla.

Pokrycie pierwotne nie chroni przed narażeniami typowymi dla eksploatacji w budynkach i na zewnątrz. Ochronę taką dają elementy konstrukcyjne kabli światłowodowych i osprzęt: osłony złączowe, szafki kablone, przełącznice optyczne i in. oraz ewentualnie dodatkowe elementy sieci kablowej, jak kanalizacja kablowa (dla kabli podziemnych), tłumiki drgań (dla kabli napowietrznych), prowadnice (dla kabli stacyjnych) i inne.

Zasadnicze funkcje pokrycia pierwotnego to:

- ochrona włókna szklanego przed uszkodzeniem mechanicznym: zarysowaniem przy kontakcie z pyłem lub twardą powierzchnią bądź zanieczyszczeniem agresywnymi wobec szkła materiałami, do których należą silne zasady i inne związki o odczynie alkalicznym,
- ograniczanie do minimum sił działających na włókno, w szczególności ściskających i zginających, również w warunkach zmiennych temperatur i umieszczenia jednego lub wielu włókien w strukturze kabla, ściślej albo luźnej tubie względnie rozecie lub taśmie,
- czytelna identyfikacja włókna w kablu lub w kasecie osłony złączowej. W tym celu włókna są barwione jednolicie na 12-16 barw lub z dodatkowym wzorem, np. z prążków.

### 2.4.2. Budowa pokrycia pierwotnego

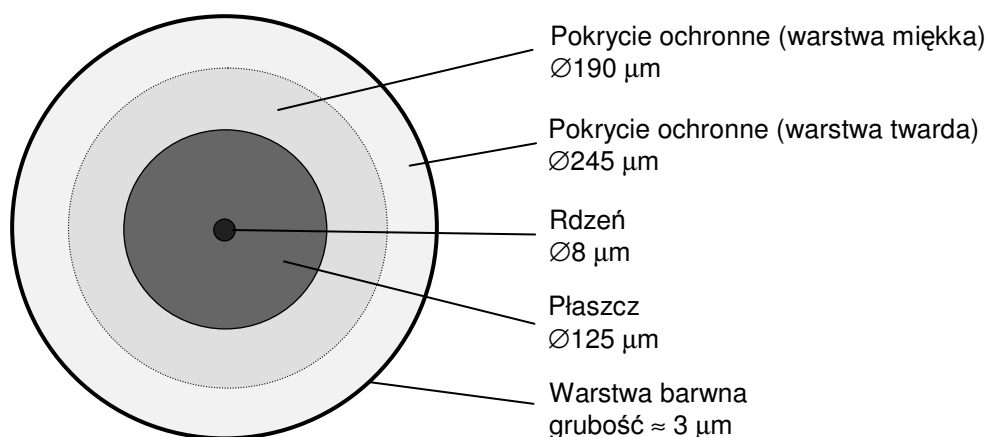
Pokrycie pierwotne włókna telekomunikacyjnego (rys. 8) tworzą trzy warstwy [62-66]:

1. Wewnętrznej z elastomeru akrylowego lub silikonowego o bardzo niskim module sprężystości ( $E = 1-4$  MPa) i dobrej przyczepności do szkła. W przypadku działania sił zewnętrznych, miękkie pokrycie przekazuje je na włókno w formie ograniczonego ciśnienia quasi-hydrostatycznego. Mikrozdgięcia włókna szklanego są ograniczane, ponieważ układa się ono wewnątrz łatwo odkształcanego pokrycia.
2. Zewnętrznej z materiału sztywnego ( $E = 600-2500$  MPa) i o bardzo gładkiej powierzchni. Jej zadaniem jest ograniczanie odkształceń warstwy wewnętrznej pod wpływem sił zewnętrznych, ochrona jej i włókna przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz ograniczenie tarcia pomiędzy sąsiednimi włóknami w pęczku lub między włóknem, a ścianą tuby. Ostatnia cecha jest ważna dla kabli poddawanych działaniu zmiennych sił rozciągających; jej znaczenie odkryto względnie niedawno [66].
3. Warstwy zabarwionego materiału o własnościach jak w p. 2 i grubości ok.  $3 \mu\text{m}$ , służącej do kolorowania włókna. Nie występuje ona we włóknach bezbarwnych lub kolorowanych przed dodatek barwnika do materiału warstwy 2.

Warstwy (1) i (2) nakłada się na włókno szklane natychmiast po wyciągnięciu z preformy, w suchym i wolnym od pyłu otoczeniu. Ciekłe monomery z dodatkami są aplikowane ciśnieniowo na włókno szklane wyciągane z prędkością 20-40 m/s i utwardzane za pomocą promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez lampy metalohalogenkowe lub rtęciowe, aktywowującego inicjatory polimeryzacji – patrz rys. 43. Proces utwardzania przebiega w czasie poniżej 0,1 s. Centryczność i tolerancja wymiarów pokrycia są w tych warunkach względnie trudne do kontroli, m.in. z powodu wibracji włókna.

Nakładanie warstwy (3) wykonuje producent kabli. Dominuje używanie tworzyw utwardzanych promieniowaniem ultrafioletowym. Ich własności zmieniają się w pewnym stopniu po dodaniu pigmentu i spotyka się szkodliwą zależność tłumienności włókien od

koloru i równomierności nałożenia warstwy barwnej. Problem ten dotyczy i PMD, co wykazał eksperyment, w którym nałożono pokrycie barwne tylko z jednej strony włókna. Zaobserwowano 2-3-krotny wzrost PMD w temperaturze +20°C i nawet 6-krotny w temperaturze -60°C [67] oraz silną zależność skali tego efektu od koloru włókna.

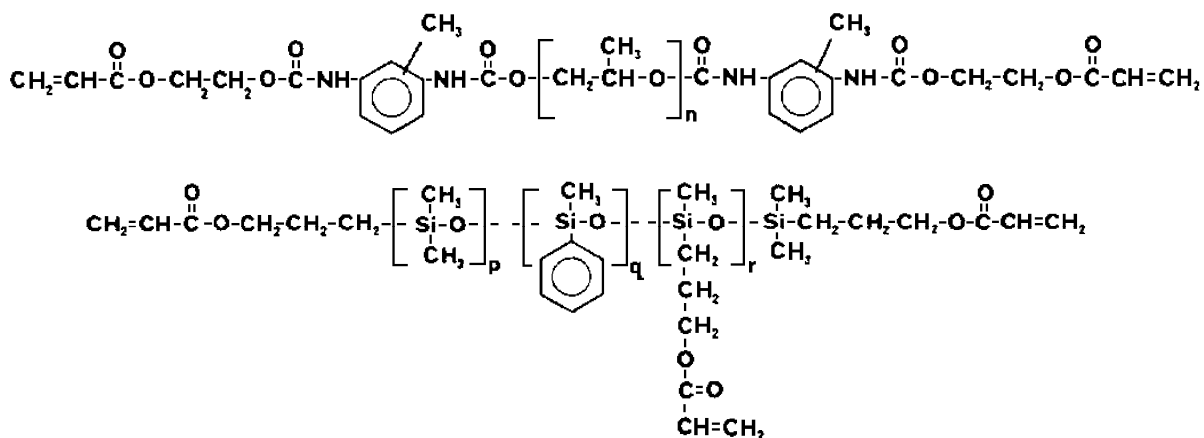


Rys. 8. Przekrój jednomodowego włókna światłowodowego w pokryciu pierwotnym (Corning SMF-28 w pokryciu CPC-3, barwione)[29,62]. Zachowane proporcje wymiarów.

Ważny jest 2-stopniowy mechanizm ochrony włókna szklanego przed siłami zewnętrznymi: twarda powłoka przejmuje promieniowe i boczne naciski mechaniczne przy minimalnych odkształceniach, miękki bufor wywiera niewielki i względnie izotropowy nacisk na włókno szklane nawet w razie znacznego odkształcenia. Efektywność redukcji nacisków rośnie ze stosunkiem modułu sprężystości materiałów obu warstw. Pokrycie 1-warstwowe nie zapewnia podobnej ochrony. Szczegółowe omówienie rozkładu sił w pokryciach pierwotnych 2-warstwowych znajduje się w rozdziale 4.1. Analogiczna zasada działania dotyczy luźnych elementów ochronnych (tuby i rozety) oraz 2-warstwowych tub ścisłych.

### 2.4.3. Materiały pokrycia pierwotnego

Materiałem pokrycia pierwotnego włókien światłowodowych telekomunikacyjnych jest najczęściej sieciowany kopolimer akrylowy lub silikonowy, utwardzany za pomocą fotoinicjatorów aktywowanych promieniowaniem ultrafioletowym ( $\lambda \approx 365$  nm). Tworzywa obu rodzajów mają rozgałęzione cząsteczki o skomplikowanej budowie niezbędnej dla optymalizacji charakterystyk termomechanicznych i szybkości utwardzania. Przykłady ujawnione w 1986 r. [68] pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Polimery na pokrycia włókien światłowodowych: poli(etero-uretan) akrylowy (rys. górny) i poli(dimetylo-ko-metylo-fenilo-siloksan) akrylowy (rys. dolny) [68].

Publikacja firmy OFS z 2002 r. [69] potwierdza, że podobne tworzywa akrylowe używane są nadal. Przykłady receptur znajdują się we wniosku patentowym firmy Corning [70]. Utwardzanie wymaga atmosfery beztlenowej, najczęściej z azotu.

Znacznie rzadziej pokrycia pierwotne wykonuje się z materiałów termoplastycznych i termoutwardzalnych. Włókna specjalne mogą posiadać pokrycia z materiałów o lepszych własnościach termicznych, takich jak politetrafluoroetylen (PTFE), użyteczny w temperaturach kriogenicznych do  $-200^{\circ}\text{C}$  lub poliimidy i aluminium wytrzymujące temperatury powyżej  $+400^{\circ}\text{C}$ . Patrz rozdziały: 2.5.3 i 4.2.

## **2.5. Wpływ zmiennych temperatur i obciążeń mechanicznych**

### **2.5.1. Zmiany wymiarów z temperaturą**

Szkoło kwarcowe, stanowiące silnie przezchłodzoną ciecz, odznacza się wysoką sztywnością ( $E = 73 \text{ GPa}$ ), wytrzymałością na rozciąganie ( $R_m \approx 6,5 \text{ GPa}$ ), wyjątkowo niskim współczynnikiem liniowej rozszerzalności termicznej ( $\alpha = 5,5 \times 10^{-7}/\text{K}$ ) i bardzo wysoką temperaturą mięknięcia, ponad  $1100^{\circ}\text{C}$ . W istotnym dla włókien telekomunikacyjnych przedziale temperatur od  $-60^{\circ}\text{C}$  do  $+250^{\circ}\text{C}$  własności szkła kwarcowego prawie nie zmieniają się. Stabilność wymiarów szkła krzemionkowego stanowi ogromną zaletę w zastosowaniach związanych z działaniem zmiennych temperatur, ale tylko, kiedy narażony element wykonano w całości ze szkła, lub szkło współpracuje z materiałami o zbliżonym współczynniku rozszerzalności termicznej, jak inwar lub ceramika alundowa ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Ta sama właściwość stanowi główny problem w projektowaniu kabli światłowodowych, ponieważ prawie wszystkie inne materiały używane w przemyśle kablowym zachowują się inaczej. Termoplasty konstrukcyjne i elastomery mają współczynnik rozszerzalności termicznej 100-1000 razy wyższy niż  $\text{SiO}_2$ , a metale, szkła wieloskładnikowe i laminaty z nich wykonywane orientacyjnie 10-krotnie wyższy (tabela 7).

Dla uniknięcia pęknięć powodowanych rozwojem skaz powierzchniowych pod wpływem naprężeń, wydłużenie względne  $\varepsilon$  włókna światłowodowego poddanego wcześniej testowi przesiewczemu z wydłużeniem  $\varepsilon_p$  nie może przekraczać granicy określonej wzorem:

$$\varepsilon \leq 0,33\varepsilon_p \quad (5)$$

Włókno światłowodowe o typowym dla wyrobów telekomunikacyjnych  $\varepsilon_p = 1\%$  nie powinno być rozciągnięte o więcej niż 0,33% (doraźnie) i 0,05% (trwale).

Włókno szklane jest ułożone w pokryciu pierwotnym praktycznie prostoliniowo. Grubość pokrycia nie pozwala wprowadzić znaczącego nadmiaru długości – patrz tabela 8, poz. 1.

Osiowe skrócenie włókna nie jest szkodliwe dla trwałości i parametrów transmisyjnych, lecz skrócenie powyżej 0,05% jest możliwe wyłącznie, gdy włókno otacza dość grube i sztywne pokrycie. Nadmierna osiowa siła ściskająca powoduje wyboczenie włókna oraz wzrost tłumienności i PMD wskutek zgięć. Bliższe opisy znajdują się w rozdziałach 4.4 i 4.5.

W przeciwieństwie do kabli energetycznych i telefonicznych z żyłami miedzianymi, ośrodek kabla światłowodowego nie może przenosić obciążeń siłami wzdłużnymi. Niezbędne są elementy wytrzymałościowe zapewniające wytrzymałość na rozciąganie oraz stabilność długości i kształtu kabla w warunkach zmiennych temperatur i obciążeń mechanicznych. Kable wystawione na działanie niskich temperatur bez stałego obciążenia siłą rozciągającą, na przykład układane luźno na ziemi lub w korytkach muszą mieć sztywny element wytrzymałościowy. Po obniżeniu temperatury z  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$  najczęściej używany materiał powłokowy kabli liniowych - HDPE kurczy się o około 0,35%. Przy braku sztywnego pręta wzmacniającego skurcz powłoki skraca kabel i deformuje ośrodek, prowadząc do zginania włókien światłowodowych i wzrostu ich tłumienności (rozdział 2.6.4.1, rys. 16).

Tabela 7. Porównanie modułów sprężystości i współczynników liniowej rozszerzalności termicznej materiałów kabli światłowodowych.

Uwaga: Własności wielu materiałów zmieniają się zależnie od masy cząsteczkowej, kompozycji wyrobu i technologii produkcji. Dotyczy to w szczególności plastyfikowanego PVC zawierającego 20–50% dodatków.

Materiał	Zastosowanie	E (MPa, +20 °C)	$\alpha$ (K <sup>-1</sup> , +20 °C)
Szkło kwarcowe	Włókno światłowodowe	72000–74000	$5,5 \times 10^{-7}$
Kopolimer silikonowy (miękki)	Pokrycie pierwotne włókna	1–4	$5,0\text{--}8,0 \times 10^{-5}$
Kopolimer akrylowy (miękki)	Pokrycie pierwotne włókna	1–4	$1,5\text{--}4,5 \times 10^{-4}$
Kopolimer akrylowy (twardy)	Pokrycie pierwotne włókna	500–1500	$0,5\text{--}1,5 \times 10^{-4}$
Włókna aramidowe (Twaron)	Element wytrzymałościowy	90000–110000	$-3,5 \times 10^{-6}$
Włókna szklane (szkło S)	Element wytrzymałościowy	83000	$1,6 \times 10^{-5}$
Stal węglowa	Element wytrzymałościowy	210000	$1,3 \times 10^{-5}$
Laminat aramidowo-epoksydowy (FRP)	Element wytrzymałościowy	60000	$-2,0 \times 10^{-6}$
Laminat szklano-epoksydowy (FRP)	Element wytrzymałościowy	45000–57000	$4\text{--}7 \times 10^{-6}$
Politereftalan butylenowy (PBT)	Tuby luźne i ściste	2200–2800	$0,7\text{--}1,3 \times 10^{-4}$
Poliamid 12 (PA 12)	Tuby luźne i ściste	900–1400	$0,9\text{--}1,5 \times 10^{-4}$
Poliamid 6 (PA 6)	Tuby luźne i ściste	1100	$8,3 \times 10^{-5}$
Poliamid mieszany alifat./cykloalif./arom.	Tuby luźne i ściste	2200	$8,0 \times 10^{-5}$
Poliwęglan (PC)	Tuby luźne i ściste	2200	$6,8 \times 10^{-5}$
Polichlorek winylu miękki (PVC)	Tuby ściste, powłoki kabli	20–500	$0,7\text{--}2,5 \times 10^{-4}$
Polipropylen (PP)	Tuby luźne, rozety, powłoki	1350	$2,2 \times 10^{-4}$
Polietylen (HDPE)	Powłoki kabli, tuby, rozety	1400	$5,9 \times 10^{-5}$
Politetrafluoroetylen (PTFE)	Pokrycia specjalne	490	$1,2 \times 10^{-4}$
Aluminium (czyste)	Tuby luźne dla OPGW	68000	$2,4 \times 10^{-5}$
Stal nierdzewna 304L	Tuby luźne dla OPGW	200000	$1,66 \times 10^{-5}$

Dane w tabeli pochodzą w większości z katalogów producentów i protokołów badań materiałów.

Kabel liniowy obciążony maksymalną siłą rozciągającą ulega wydłużeniu o 0,4-1,5%. Identyczne wydłużenie włókien powoduje ich zniszczenie, więc muszą być one odizolowane mechanicznie od pozostałych elementów kabla przez luźne umieszczenie w strukturach zapewniających kontrolowany nadmiar długości, co przedstawiono w rozdziałach 2.6-2.8.

Dane z tabeli 7 wskazują, że wszelkie pokrycia ochronne i inne elementy kabli będą podczas pracy w zmiennych temperaturach zmieniać swe wymiary w porównaniu do włókna szklanego i niezbędne są zabiegi minimalizujące ich wzajemne oddziaływania mechaniczne. Wytłaczanie powłok, tub i pokryć z tworzyw termoplastycznych odbywa się w wysokich temperaturach, na ogół od +220 °C do +300 °C, a chłodzenie owocuje znacznym skurczem. Ten efekt może być korzystny, zapewniając nadmiar długości włókna w luźnej tubie i w pokryciu ścisłym, co przedstawiono w rozdziałach 2.6, 2.8 i 4.2. Z drugiej strony, wytłaczanie powłoki na kablu z elementem wytrzymałościowym włóknistym (włóknina aramidowa) lub elastycznym (linka stalowa) prowadzi do deformacji (sfalowania) kabla i skrócenia ośrodka, jeśli podczas tej operacji element wytrzymałościowy nie jest obciążony właściwie dobraną siłą rozciągającą.

Wyjątek to kompozyty i konstrukcje hybrydowe zawierające włókna aramidowe (Kevlar, Twaron) i inne polimery ciekłokrystaliczne (LCP) o ujemnym współczynniku rozszerzalności termicznej, które mogą mieć zbliżoną do szkła kwarcowego stabilność termiczną wymiarów.

Liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej struktury zawierającej N elementów ułożonych równolegle i ściśle sprzężonych mechanicznie opisuje zależność:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot E_n \cdot A_n}{\sum_{n=1}^N E_n \cdot A_n} \quad (6)$$

gdzie  $\alpha_k$  to współczynnik rozszerzalności termicznej kabla złożonego z N elementów, natomiast  $\alpha_n$ ,  $E_n$  i  $A_n$  to odpowiednio liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej, moduł sprężystości i przekrój poprzeczny materiału, z którego wykonano n-ty element kabla.

Wartości  $\alpha$  i  $E$  zmieniają się z temperaturą i mamy do czynienia z charakterystyką  $\alpha_k(T)$ , a nie z jedną liczbą. W przypadku kabli zawierających włókniste elementy wytrzymałościowe i linki stalowe wzór (2) dotyczy wyłącznie pracy w stanie napreżonym.

Zgodność rozszerzalności termicznej kabla i włókien światłowodowych w pokryciach pierwotnych można uzyskać w kablach napowietrznych ADSS o ściśle określonym stosunku przekroju elementów wytrzymałościowych z laminatu szklanego i włókniny aramidowej.

Spośród materiałów powszechnie używanych do wytwarzania kabli światłowodowych, najkorzystniejsze własności termomechaniczne mają metale - stal i stopy aluminium, oraz włókna szklane i aramidowe, które odznaczają się niskim  $\alpha$  oraz słabą zależnością  $E$  i  $\alpha$  od temperatury. Podobne cechy mają laminaty wzmacniane włóknami obu rodzajów, z których wykonuje się elementy wytrzymałościowe kabli światłowodowych.

## 2.5.2. Wpływ wilgoci i wybranych czynników chemicznych

Dyfuzja wody lub oleju węglowodorowego z żelu uszczelniającego ośrodek kabla do materiałów polimerowych skutkuje zmianą ich wymiarów i własności mechanicznych. Chłonność wody jest bardzo różna dla poszczególnych polimerów konstrukcyjnych, od <0,04% dla PTFE do nawet 10% dla poliamidów alifatycznych; w przypadku szkła i metali jest pomijalnie mała. O ile wpływ temperatury otoczenia jest szybki – na przykład stała czasowa wymiany ciepła między ośrodkiem kabla o średnicy 10-18 mm i masie jednostkowej 80-400 kg/km, a powietrzem wynosi 1-15 minut, to mechaniczne efekty zmian wilgotności pojawiają się ze znacznym opóźnieniem, związanym z powolną dyfuzją wody w głąb tworzywa. Okres ten zmienia się od minut dla pokrycia pierwotnego do lat w przypadku powolnej migracji wilgoci wzdłuż uszczelnionego poprzecznie, ale nie wzdłużnie ośrodka kabla o długości kilkuset metrów i przenikania przez ścianki tub lub jednostek z PC lub PBT.

Standardowe pokrycie pierwotne wykonane z polimerów nie chroni włókna przed działaniem wilgoci, wodoru ( $H_2$ ), rozpuszczalników organicznych i lekkich węglowodorów alifatycznych. Szereg typowych rozpuszczalników, m.in. aceton ( $CH_3$ )<sub>2</sub>CO, chlorek metylenu  $CH_2Cl_2$ , heksan  $C_6H_{14}$  i benzyna szybko uszkadza pokrycie powodując jego pęcznienie i utratę przyczepności do szkła. Dyfuzja wilgoci z lub do otaczającego powietrza atmosferycznego przez akrylowe pokrycie pierwotne włókna światłowodowego o grubości 60  $\mu m$  zachodzi w ciągu 1-2 h [71]. Wrażliwości pokrycia na działanie acetonu dowodzi, że jest on powszechnie używany do czyszczenia włókna z resztek pokrycia. Wnikanie wymienionych substancji blokuje specjalne elementy kabla: hermetyczne tuby metalowe z miedzi lub stali nierdzewnej, bariera przeciwwilgociowa z folii aluminiowej grubości 0,08-0,15 mm względnie spawany wzdłużnie pancierz z blachy miedzianej lub aluminiowej.

Ochronę przed wymienionymi czynnikami dają również pokrycia hermetyczne, wykonywane z aluminium, niklu, wolframu lub węgla bezpostaciowego uzyskiwanego z rozkładu metanu ( $CH_4$ ) lub acetyleny ( $C_2H_2$ ) na powierzchni włókna szklanego, używane w produkcji włókien światłowodowych pracujących w szczególnie ciężkich warunkach – w kablach podmorskich, instalacjach naftowych, czujnikach używanych w wysokich

temperaturach, w systemach przewodowego sterowania torped lub pocisków raketowych itd. Hermetyczne pokrycie grafitowe stanowi cienką warstwę o grubości około 0,2  $\mu\text{m}$  osłaniającą włókno szklane, nad którą znajduje się pokrycie z materiałów polimerowych.

Powszechne wprowadzenie pokryć hermetycznych jest niemożliwe z powodu wysokich kosztów produkcji, ponadto obniżają one wytrzymałość mechaniczną włókna. Usuwanie pokrycia hermetycznego jest trudne i wymaga użycia kwasów albo wypalania. Wielu użytkowników wymaga, by włókna lub kable światłowodowe były dielektryczne, co wyklucza pokrycia metalowe i grafitowe. Przykłady to kable stacyjne, kable napowietrzne ADSS i ADL oraz ośrodki przewodów odgromowych z włóknami światłowodowymi OPGW.

## **2.6. Luźna tuba**

Wprowadzone przez firmy Northern Telecom i AT&T w 1978 r. kable z ośrodkiem tubowym z tubami skręcanymi lub z tubą centralną stanowią powszechnie przyjęte, wypróbowane w eksploatacji i względnie tanie rozwiązanie, przede wszystkim w roli kabli liniowych pracujących w szerokim zakresie temperatur oraz narażonych na działanie znacznych sił rozciągających i ściskających. Przykładami takich wyrobów są eksploatowane w najtrudniejszych warunkach napowietrzne przewody energetyczne z włóknami światłowodowymi (OPGW) i samonośne napowietrzne kable dielektryczne (ADSS). Kable tubowe są wytwarzane w dużej liczbie odmian różniących się m.in. elementami wytrzymałościowymi, rozmiarami i materiałem tub, liczbą włókien (do 4000 i więcej) i materiałem powłoki. Wprowadzenie po 1990 r. suchego uszczelniania wzdłużnego za pomocą materiałów superabsorbujących w miejsce żelowania uprościło montaż kabli, nie zmieniając ich własności mechanicznych i termicznych. Jednocześnie wzrosło zainteresowanie produkcją kabli z tubą centralną jako cieńszych, lżejszych i tańszych.

Zastosowanie taśm, najczęściej 12-włóknowych zamiast pojedynczych włókien ułatwia umieszczenie i identyfikację dużej liczby włókien światłowodowych (>240) w kablu tubowym, a także umożliwia znaczącą redukcję jego średnicy i masy jednostkowej oraz przyspiesza wykonywanie złączy przelotowych. Montaż kabli taśmowych wymaga jednak specjalnych narzędzi i spawarek światłowodowych; kable takie nie są stosowane w Polsce.

Badania laboratoryjne [72-74] ujawniły, że sklejenie włókien w taśmę wprowadza dodatkowe poprzeczne do osi włókna siły ściskające działające na wszystkie włókna za wyjątkiem skrajnych, indukując dodatkową dwójłomność i znacznie zwiększając ich PMD. Taśma światłowodowa stanowi wiązkę włókien w pokryciu ścisłym o typowych dla tego rodzaju produktu własnościach, mimo luźnego jej ułożenia w tubie lub rozecie.

Luźne umieszczenie włókien w wypełnionej półpłynnym żelem, sztywnej tubie z kontrolowanym nadmiarem długości zapewnia bardzo skuteczną izolację od oddziaływań zewnętrznych i dobrą stabilność tłumienności w każdych warunkach pracy. Warunkiem jest dokładne zaprojektowanie kabla i ścisły reżim technologiczny w produkcji tub, przede wszystkim używanie materiałów o powtarzalnych parametrach i precyzyjna kontrola nadmiaru długości włókien światłowodowych.

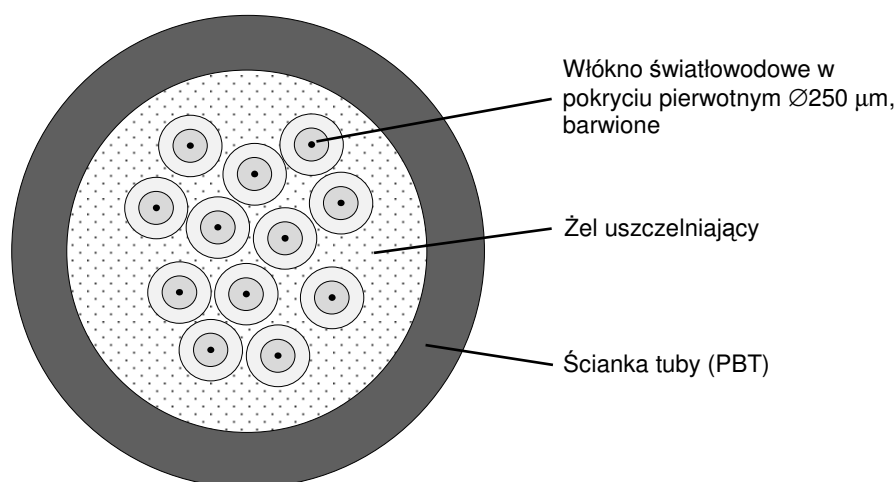
Wadą kabli tubowych jest ograniczona przydatność do instalacji w budynkach, ponieważ wydobyte z tuby włókna w pokryciu pierwotnym łatwo uszkodzić i nie nadają się do bezpośredniego oprawiania wtyków złączy światłowodowych dostosowanych do włókien w pokryciach ścisłych i kabli z nimi. Istnieją kable z pustymi tubami  $\varnothing 0,9$  mm do tego celu.

Kabli tubowych nie można instalować pionowo w wysokich budynkach, szybach kopalnianych itp., gdyż następuje migracja włókien w tubie i wypływ żelu z jej dolnego końca. Obecność palnego żelu utrudnia też spełnienie wymagań przeciwpożarowych.

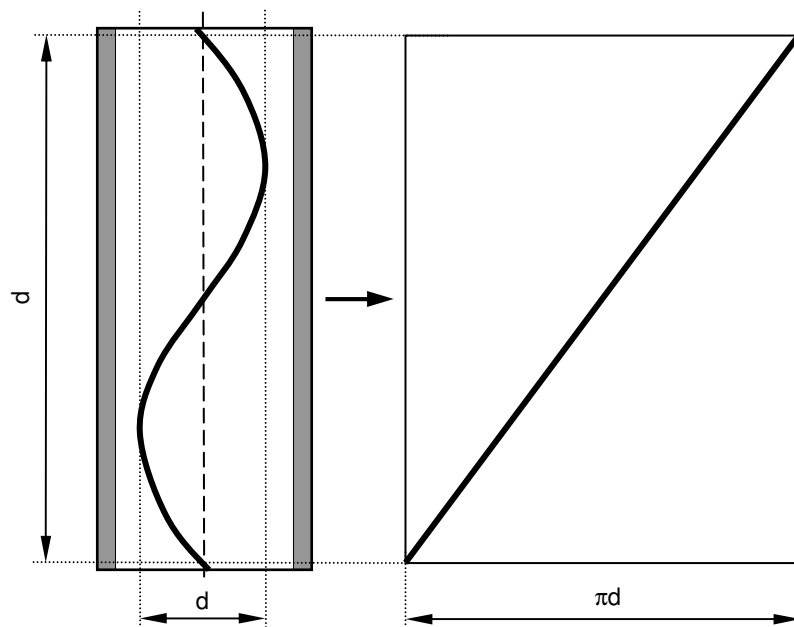


### 2.6.1. Budowa tuby luźnej

Omawiany element kabla jest szczelną rurką o przekroju okrągłym, wewnątrz której znajduje się luźno ułożone pojedyncze włókno światłowodowe w pokryciu pierwotnym, wiązka takich włókien lub taśmy światłowodowe (rys. 10). Włókno lub ich wiązka ma określony nadmiar długości w porównaniu do tuby, zapewniony przez ich spiralne lub faliste ułożenie (rys. 11) oraz swobodę ruchu wewnątrz tuby. Wewnętrzna powierzchnia tuby jest gładka w celu ograniczenia do minimum tarcia pomiędzy tubą a włóknami znajdującymi wewnątrz. Zmiany długości i deformacje tuby, na przykład pod wpływem sił rozciągających lub zgniatających nie powodują naprężeń włókna, które jedynie przemieszcza się wewnątrz.



Rys. 10. Tuba luźna  $\varnothing 2,4/3,0$  mm o ściankach 1-warstwowych, zawierająca 12 włókien światłowodowych. Zachowane proporcje wymiarów.



Rys. 11. Spiralne ułożenie włókna światłowodowego w luźnej tubie i jego rozwinięcie.

Jeżeli wymagana jest wodoszczelność wzdłużna kabla, tuba jest wypełniona żelem hydrofobowym, który stanowi zagęszczony olej mineralny, poliizobutylen (oligomer) lub olej silikonowy. Żel wypełniający powinien być tiksotropowy: gęstnieć w stanie nieruchomym i nie wypływać z otwartego końca tuby w całym zakresie temperatur pracy kabla. Dodatkową funkcją żelu jest tłumienie wibracji włókien światłowodowych, co poprawia stabilność

tłumienności i PMD kabli napowietrznych lub układanych wzdłuż linii kolejowych. Uszczelniania tub za pomocą materiałów pęczniejących prawie nie stosuje się: gładka ścianka tuby uniemożliwia skuteczne zacopowanie otworu w razie działania ciśnienia hydrostatycznego i spęczniały element uszczelniający jest wypychany z przeciętej tuby.

Tuby nie żelowane spotyka się w niektórych wersjach kabli stacyjnych lub jako materiały instalacyjne do ochrony luźnych włókien, na przykład w czasie montażu kabli rozetowych.

Warto poświęcić trochę miejsca sposobom układania się włókien światłowodowych wewnątrz luźnej tuby, opisywanym w literaturze w sposób bardzo uproszczony.

Ułożenie spiralne ze stałym kierunkiem skrętu zapewnia największy nadmiar długości przy ograniczonej średnicy wewnętrznej tuby i promieniu zginania włókna, ale w praktyce nie jest możliwe. Włókno podawane jest do wytłaczanej tuby bez skręcania, jego końce są unieruchomione, a lepkość żelu i tarcie o ścianki tuby stanowią dodatkową przeszkodę dla swobodnego obracania się. Uformowanie w tych warunkach zwykłej spirali wymaga skręcenia włókna, do czego konieczne byłoby pokonanie znacznej siły sprężystości.

Obserwacje włókien w tubach o przezroczystych ściankach wykazują, że układają się one zwykle w spiralę rewersyjną z cyklicznie odwracającym kierunkiem skrętu, której całkowity kąt obrotu na dłuższym odcinku jest zerowy. Uzyskiwany w tych warunkach nadmiar długości włókna jest nieco mniejszy od obliczonego dla spirali o stałym kierunku skrętu.

Taśmy światłowodowe mogą być zginane tylko w jednym kierunku i układają się faliście. W obliczeniach konstrukcyjnych zakłada się ułożenie sinusoidalne.

Istnieją też kable tubowe z pustymi tubami, układane bez włókien światłowodowych wewnątrz. Włókna światłowodowe w specjalnym ścisłym pokryciu ochronnym o niskim współczynniku tarcia (rys. 28-29) wciąga się do tub w już ułożonym kablu pneumatycznie lub mechanicznie, zależnie od aktualnie wymaganej liczby łączy światłowodowych. Unikalną cechą tego systemu okablowania jest możliwość wyciągnięcia zbędnych lub wadliwych włókien z tub i zastąpienia ich innymi. Wciąganie włókien do tub nie zapewnia nadmiaru długości; nie jest ponadto możliwe wypełnienie tuby żelem.

## 2.6.2. Materiały do produkcji tub luźnych

W zależności od warunków pracy kabla, do produkcji luźnych tub służą:

- **Termoplasty** o wysokiej wytrzymałości i sztywności: politereftalan butylenowy (PBT), poliamidy (PA), poliwęglan (PC), polietylen wysokiej gęstości (HDPE), polipropylen (PP) względnie polieteroimid (PEI), wytłaczane w temperaturze +220...+300°C.
- **Metale** o wysokiej plastyczności: stal nierdzewna, aluminium lub miedź. Tuby metalowe powstają przez zwijanie taśmy metalowej i spawanie wzdłużne łukiem elektrycznym lub promieniowaniem lasera CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ) oraz przeciąganie uformowanej tuby.

Tuby z termoplastów są tanie, elastyczne, dielektryczne i łatwe do usuwania podczas montażu kabli. Najczęściej używanym tworzywem jest PBT, opisany w rozdziale 2.6.3.

Tańsze materiały alternatywne to PP i jego kopolimery z PE lub mieszanki z kauczukami syntetycznymi [75] oraz HDPE, odpowiedni do wyrobu tub centralnych o grubych ściankach ( $\geq 1 \text{ mm}$ ). Wadami PP są kruchość w temperaturze poniżej -5°C ( $T_g \approx -10^\circ\text{C}$ ), deformacja pod obciążeniem i szybka degradacja w podwyższonych temperaturach [76]. Materiał ten nie nadaje się do produkcji tub dla kabli napowietrznych, które według polskich wymagań [12] muszą pracować w temperaturach od -40°C do +70°C. Szerszy zakres niskich temperatur pracy ma kopolimer PP-PE.

Poliwęglan (PC) i polieteroimid (PEI) to drogie i trudniejsze w przetwórstwie termoplasty konstrukcyjne o wysokiej maksymalnej temperaturze pracy ciągłej, przekraczającej +220°C dla PEI. Służą one do produkcji tub kabli ADL i przewodów OPGW narażonych na ciągłe nagrzewanie do temperatury około +80°C i udary termiczne do +250°C.

Ścianki tub mogą być 1-warstwowe lub 2-warstwowe. W drugim przypadku materiał warstwy wewnętrznej zwykle odznacza się gładkością powierzchni, a zewnętrznej – wyższą odpornością mechaniczną lub środowiskową. Często spotyka się zestaw PA/PBT i producenci oferują kompatybilne tworzywa [34], rzadziej PBT/PC.

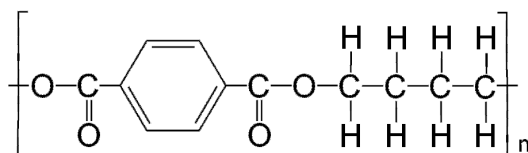
Tuby metalowe są hermetyczne, odporne na działanie wszystkich rozpuszczalników organicznych i produktów naftowych oraz promieniowania widzialnego i ultrafioletowego. Ich wymiary i własności mechaniczne mało zależą od temperatury, a temperatura pracy krótkotrwałej przekracza 300°C. Tuby ze stali nierdzewnej cechuje ponadto odporność na zgniatanie i działanie kwasów. Dość kosztownych tub metalowych używa się w kablach eksploatowanych w trudnych warunkach – w energetyce (OPGW), w miejscach skażonych produktami naftowymi, w warunkach wysokiej wilgotności. Tuba aluminiowa stanowi w przewodzie OPGW ważny element przewodzący.

Tuby dla przewodów energetycznych OPGW mogą być wykonywane z kombinacji: stal nierdzewna/aluminium, lub PEI/stal nierdzewna. Zadaniem cienkiej warstwy wewnętrznej jest głównie zapobieżenie wnikaniu wody do wnętrza tuby po pęknięciu warstwy zewnętrznej.

Wady tub metalowych to oprócz ceny sztywność, możliwość korozji elektrochemicznej i akumulacja wodoru powstającego wskutek rozkładu materiału pokrycia włókien światłowodowych lub żeluzuszczającego tubę.

### 2.6.3. Wybrane własności PBT

Spśród wielu możliwych termoplastów konstrukcyjnych, materiałem najczęściej stosowanym przez producentów kabli do wykonywania tub ścisłych oraz 1-warstwowych tub luźnych dla ośrodków skręcanych jest politereftalan butylenowy (PBT), polimer o strukturze liniowej z pojedynczym pierścieniem aromatycznym i dwoma odgałęzieniami liniowymi w cząsteczce (rys. 12), co zapewnia twardość i wysoką temperaturę mięknięcia:



Rys. 12. Struktura cząsteczki PBT [77].

PBT ma liczne korzystne cechy [33,34,77,78]:

- szeroki zakres temperatur pracy, orientacyjnie od -50°C do +120°C,
- wysoką sztywność:  $E = 2200-2800$  MPa w temperaturze +20°C,
- wysoką wytrzymałość na rozerwanie: 50-60 MPa w temperaturze +20°C,
- wydłużenie sprężyste porównywalne do wydłużenia pękającego włókna z  $\text{SiO}_2$ : 3,5-9%,
- wysoką udarność: nie pęka na próbie Charpy'ego bez karbu,
- brak skłonności do pęcznienia pod obciążeniem i korozji naprężeniowej, typowych dla PP,
- niską chłonność wody: <0,5% i stałość wymiarów przy zmianach wilgotności:  $\leq 0,1\%$ ,
- dobrą stabilność chemiczną w suchym środowisku, również w obecności tlenu,
- odporność na działanie olejów mineralnych, syntetycznych i silikonowych,
- gładkość powierzchni i niski współczynnik tarcia: 0,15-0,20,
- nietoksyczność,
- łatwość barwienia w masie,
- dobre własności elektroizolacyjne: rezystywność skrośna osiąga  $10^{14}-10^{16}$   $\Omega\text{m}$ .

Przetwórstwo PBT odbywa się metodą wtrysku i wytłaczania w temperaturze +240...+260°C i nie wymaga szczególnych zabiegów, poza bardzo starannym suszeniem granulatu tworzywa przed użyciem. Do wytłaczania pokryć światłowodów używa się polimeru bez napełniaczy nieorganicznych, a jedynie z dodatkiem barwnika, o prawie izotropowych własnościach mechanicznych, w odróżnieniu od produkcji osprzętu samochodowego i elektrycznego, obudów urządzeń i in., gdzie często stosuje się PBT napełniany ciętym włóknem szklanym, o podwyższonej sztywności i odporności termicznej.

Wady PBT istotne w produkcji kabli światłowodowych to prócz wysokiej ceny:

- Silna zależność własności od temperatury (rys. 13-14); temperatura zeszklenia  $T_g$  odmian handlowych PBT zawiera się w granicach od +20°C do +68°C, leżąc wewnątrz zakresu temperatur pracy kabli telekomunikacyjnych. Ważny dla obliczeń rozszerzalności termicznej iloczyn  $\alpha E$  mniej zmienia się z temperaturą (rys. 14).
- Podatność na hydrolizę w wilgotnym i ciepłym środowisku; proces ten powoduje utratę wytrzymałości i łamliwość tworzywa. Autor zna z własnej praktyki uszkodzenia tub 2-warstwowych w zawilgoconych po uszkodzeniu powłoki kablach ADL, gdzie popękała warstwa z PBT, a warstwa z PC pozostała nieuszkodzona (rys. 15). Odporność na hydrolizę zależy od masy cząsteczkowej, metody produkcji polimeru i dodatków; istnieją specjalne gatunki PBT o wysokiej odporności.
- Łamliwość i pamięć kształtu spotykana w niektórych gatunkach PBT o wysokiej masie cząsteczkowej i twardości, takich jak Vestodur 3000.

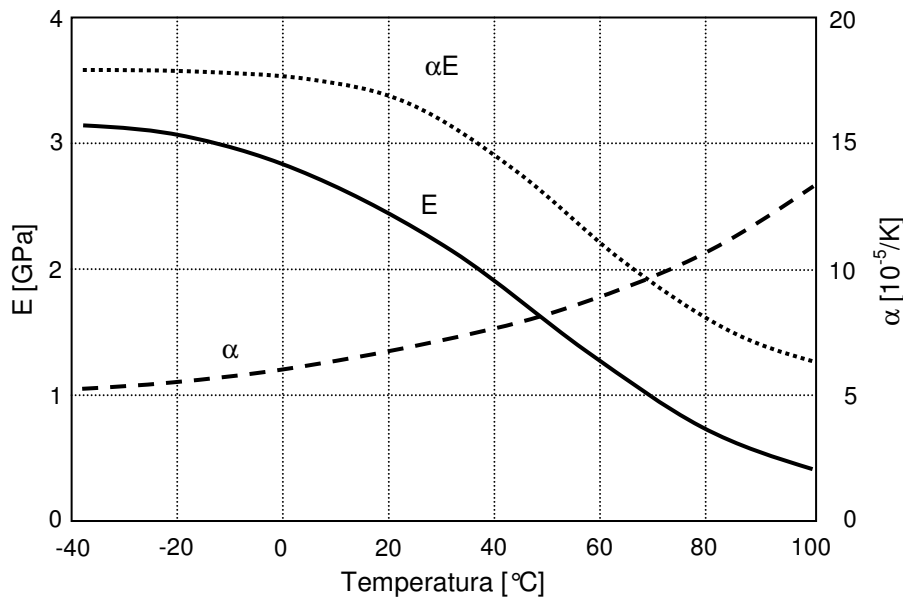
Gęstość PBT wynosi 1280-1310 kg/m<sup>3</sup> i jest wysoka w porównaniu do zamienników: HDPE: 940-965 kg/m<sup>3</sup>, PP: 900-917 kg/m<sup>3</sup>, PA: 1010-1150 kg/m<sup>3</sup>, PC: ok. 1200 kg/m<sup>3</sup>.

PBT ma strukturę częściowo krystaliczną; stopień krystaliczności zmienia się w szerokich granicach (20-70%) zależnie od warunków chłodzenia po wytłoczeniu i podczas ekspozycji na działanie temperatur przekraczających temperaturę zeszklenia - od +60°C w górę. Zmienna i trudna do kontrolowania zawartość fazy krystalicznej alfa jest źródłem problemów z uzyskaniem powtarzalnej wartości skurczu podczas wytłaczania i związanego z nim nadmiaru długości włókien w tubie [80]. Najniższy stopień krystalizacji i skurcz ma polimer błyskawicznie chłodzony po wytłoczeniu, na przykład w zimnej wodzie, ale tak uformowany materiał jest w trakcie późniejszej pracy w podwyższonej temperaturze najbardziej podatny na krystalizację i odkształcenia. Przy powolnym chłodzeniu wynik jest odwrotny. Problemy te przedstawiono w rozdziałach 4.2.1 i 4.7.2.

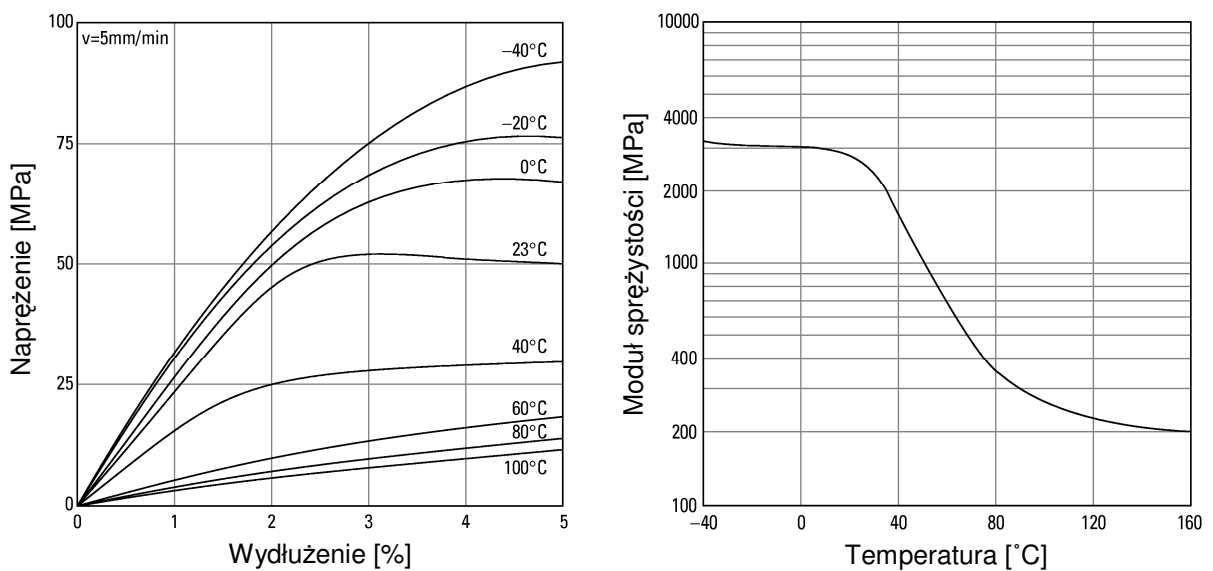
Polimer amorficzny zawiera około 2,5% objętości pustej między łańcuchami [78], której udział maleje w miarę wzrostu stopnia krystalizacji; tworzywo zwiększa gęstość i sztywnieje. Krystalizacja 20% masy polimeru oznacza teoretycznie spadek objętości materiału o 0,5%. Przyjmując, że faktyczna zmiana objętości po chaotycznym wtrąceniu fazy krystalicznej jest 2-krotnie mniejsza, nastąpi skurcz liniowy o 0,08%; przy krystalizacji 40% polimeru już o 0,16%. Jednocześnie wymaga się kontrolowania długości tub luźnych z włóknami światłowodowymi z tolerancją lepszą niż 0,05%. Niekontrolowana krystalizacja jest bardzo szkodliwa dla powtarzalności i stabilności parametrów kabli światłowodowych.

Faza krystaliczna PBT tworzy drobne wtrącenia sferyczne [80]. Odstępy między nimi są mniejsze od 1 μm, więc wynikające ze zmian stopnia krystalizacji odkształcenia powierzchni tuby luźnej lub ściślej praktycznie nie wprowadzają mikrozgięć włókna światłowodowego.

Opracowanie badacza Bellcore [81] i poradnik firmy ADC [82] sygnalizują spotkany w środkowo-zachodniej części USA problem wzdluznego kurczenia się luźnych tub z PBT w kablach napowietrznych wystawionych na działanie intensywnego promieniowania słonecznego latem, co prowadzi do przekraczania dopuszczalnego nadmiaru długości włókien zimą w temperaturach poniżej -30°C i wzrostu tłumienności kabli oraz uszkodzeń włókien w szafkach kablowych. Warunki klimatyczne w Polsce cechuje niewiele mniejsza zmienność temperatur, lecz wymienionego problemu dotąd nie sygnalizowano.



Rys. 13. Moduł sprężystości (E) i współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ ) tworzywa Planac BT-1000 firmy Dainippon Ink and Chemicals w funkcji temperatury [77].  $T_g \approx +25^\circ\text{C}$ .



Rys. 14. Krzywe naprężenie – wydłużenie oraz moduł sprężystości tworzywa Crastin S600 F10 firmy DuPont w funkcji temperatury [79].  $T_g \approx +55^\circ\text{C}$ .



Rys. 15. Uszkodzenie tuby w wyniku hydrolizy PBT tworzącego warstwę zewnętrzną.

Odmiany handlowe PBT zawierają prócz podstawowego polimeru stabilizatory, barwniki oraz dodatki modyfikujące własności mechaniczne, lepkość stopu, skurcz podczas wytlaczania i temperaturę mięknienia, w tym kauczuki syntetyczne.

Poliwęglan (PC) o budowie amorficznej odznacza się szerokim zakresem temperatur pracy, odpornością na hydrolizę, przezroczystością i brakiem problemów z krystalizacją, lecz jest mniej sztywny i sprężysty niż PBT, ponadto przetwórstwo PC jest trudne i mało wydajne. Inny alternatywny materiał to politereftalan etylenowy (PET), mający  $T_g = +70^\circ\text{C}$  i lepsze niż PBT własności mechaniczne. Niestety, są jeszcze większe problemy z kontrolą stopnia krystalizacji, co w przypadku PBT, a temperatura wytlaczania wynosi aż  $+280^\circ\text{C}$ .

## 2.6.4. Zachowanie tuby luźnej w warunkach zmiennego wydłużenia

Podstawową zaletą ośrodka tubowego w porównaniu do innych konstrukcji jest brak szkodliwych naprężeń rozciągających włókien światłowodowych mimo zmian długości kabla spowodowanych działaniem sił rozciągających, na przykład podczas wciągania do kanalizacji, zmianami temperatury oraz starzeniem lub pełzaniem materiałów.

Zgodnie z wymaganiami [12-15] wydłużenie włókien w kablu tubowym nie powinno przekraczać 0,05% w warunkach obciążenia dozwolonego dla pracy ciągłej i 0,33% w czasie krótkotrwałego obciążenia siłą rozciągającą, zgodnie z zależnością (5). Wymagane w kraju zakresy temperatur pracy i towarzyszące im zmiany długości kabli przedstawiono w tabeli 8. Konstrukcja ośrodka powinna ograniczyć naprężenia włókien światłowodowych do 0,33% przy zmianie długości kabla w całym zakresie podanym w tabeli, z czego wynika zakres zmian długości ośrodka bez naprężeń włókien, znany jako „okno wydłużenia”.

W związku z różnorodnością konstrukcji kabli dostępnych na rynku, parametry w tabeli 8 są wartościami orientacyjnymi. Dane o wydłużeniu kabli pod wpływem sił rozciągających pochodzą z badań homologacyjnych i certyfikacyjnych wykonywanych przez autora w latach 1992-2004. Większości podanych parametrów producenci nie ujawniają. Wyjątek to specyfikacje techniczne przewodów OPGW, które muszą dostarczyć projektantom linii informacji koniecznych do obliczeń sił rozciągających i zwisów przewodów napowietrznych.

Tabela 8. Zakresy temperatur pracy światłowodowych kabli telekomunikacyjnych liniowych [13-15] i obliczone zmiany długości kabli w skrajnych warunkach pracy.

Rodzaj kabla światłowodowego		Kanałowy lub doziemny	Napowietrzny (ADSS)	OPGW lub OPT-PC
Zakres temperatur pracy	$^\circ\text{C}$	-30...+60	-40...+70	-40...+85
Szerokość zakresu temperatur	K	90	110	125
Typowa wartość $\alpha$	$\text{K}^{-1}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Skrócenie w min. temperaturze pracy	%	0,13	0,03	0,10
Wydłużenie w max. temperaturze pracy	%	0,10 (0,05) *	0,02	0,10
Zmiany długości w skrajnych temperaturach	%	0,23 (0,18) *	0,05	0,20
Wydłużenie przez siłę rozciągającą	%	0,40-0,80	0,70-1,50	0,75-1,00
Maksymalne wydłużenie kabla	%	0,45-0,85	0,72-1,52	0,85-1,10
Zakres zmian długości kabla	%	0,58-0,98	0,75-1,55	0,95-1,20
Okno wydłużenia ( $\Delta L_F = 0,33\%$ )	%	<b>0,25-0,65</b>	<b>0,42-1,22</b>	<b>0,62-0,87</b>

(\*) Względem stanu odniesienia w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ .

(\*\*) Kable kanałowe i doziemne są narażone na rozciąganie tylko w czasie instalacji, wykonywanej w znacznie węższym zakresie temperatur, na przykład do  $+40^\circ\text{C}$ . Wartości w nawiasie dotyczą tej temperatury.

### 2.6.4.1. Nadmiar długości i okno wydłużenia włókien światłowodowych

Terminu „okno wydłużenia” nie należy mylić z terminem „nadmiar długości włókien światłowodowych”, używanym do obliczeń odległości na podstawie pomiarów reflektometrycznych. Nadmiar długości włókien w kablu, tubie lub rozecie określa zależność:

$$\Delta L_K = \frac{L_F - L_K}{L_K} \quad (7)$$

gdzie  $\Delta L_K$  to nadmiar długości włókna w kablu ( $\Delta L_T$  - w tubie,  $\Delta L_R$  - w rozecie),  $L_F$  - fizyczna długość prostego włókna światłowodowego, a  $L_K$  ( $L_T$ ,  $L_R$ ) - fizyczna długość kabla, tuby, rozety lub innej jednostki optycznej. W specyfikacjach kabli używa się wartości:

$$\Delta L_K = \frac{L_F - L_K}{L_K} \cdot 100\% \quad (8)$$

Wartość  $\Delta L_K$  jest przydatna do korekcji odległości w pomiarach reflektometrycznych:

$$L_{LIN} = \frac{L_{OTDR} - L_P}{\left(1 + \frac{\Delta L_K}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_{LIN}}{100}\right)} \quad (9)$$

lub w przybliżeniu:

$$L_{LIN} = \frac{L_{OTDR} - L_P}{1 + \frac{\Delta L_K}{100} + \frac{\Delta L_{LIN}}{100}} \quad (10)$$

gdzie  $L_{LIN}$  to długość linii kablowej od zakończenia do miejsca uszkodzenia,  $L_{OTDR}$  - odległość reflektometryczna do miejsca uszkodzenia,  $\Delta L_K$  to procentowy nadmiar długości włókna w kablu według wzoru (8),  $L_P$  - długość sznurów połączeniowych i innych odcinków włókna pomiędzy reflektometrem, a zakończeniem linii, na przykład włókna rozbiegowego, a  $\Delta L_{LIN}$  to współczynnik nadmiaru długości kabla względem trasy linii, wynikający ze zwisu kabla napowietrznego, obecności zapasów w studniach kablowych itd., wyrażony w %.

W kablu z tubą lub rozetą centralną  $\Delta L_K$  jest, pomijając odkształcenia tuby lub rozety podczas wytłaczania powłoki kabla równy nadmiarowi długości włókna w tym elemencie:

$$\Delta L_K \approx \Delta L_T, \text{ lub: } \Delta L_K \approx \Delta L_R.$$

Nadmiar długości włókna w tubie  $\Delta L_T$  określony wzorem (16), (17) lub (18) i dotyczący sytuacji w temperaturze pokojowej (+20°C) oznacza, o ile może wydłużyć się tuba bez rozciągania włókna wewnątrz. Stan graniczny to prostoliniowe ułożenie włókna w tubie; od tej granicy dalsze przyrosty długości kabla i włókna są jednakowe. Analogicznie, czynny nadmiar długości włókna w kablu  $\Delta L_F$  określa o ile może wydłużyć się kompletny kabel bez rozciągania włókna wewnątrz. W kablu z tubą (rozetą) umieszczoną centralnie  $\Delta L_K = \Delta L_F$ .

Włókno światłowodowe zamknięte w kanale tuby o skończonej średnicy i ułożone w spiralę lub sfalowane nie może ulec dowolnemu skróceniu, kiedy kabel pracuje w obniżonej temperaturze i ulega skróceniu. Stan graniczny to docięnięcie włókna do ścianek tuby i jego wyboczenie, co wprowadza szybko wzrastające straty mikrozgięciowe; boczny nacisk na włókna może ponadto wywołać znaczny wzrost PMD. Ten maksymalny nadmiar długości włókna w tubie oznaczamy  $\Delta L_{TMAX}$ . Trajektorii ułożenia włókna w tubie nie da się kontrolować i  $\Delta L_{TMAX}$  przeważnie wyznacza się doświadczalnie. Równoważny parametr kabla to  $\Delta L_{KMAX}$ , zakres względnych zmian długości kabla, w którym włókna są ułożone swobodnie i bez naprężeń wywołanych rozciąganiem lub dociskaniem do ścianek tub.

Zakres zmian długości tuby i kabla, w którym nie ma niedopuszczalnych oddziaływań mechanicznych na włókno światłowodowe, znany jako okno wydłużenia wynosi łącznie:

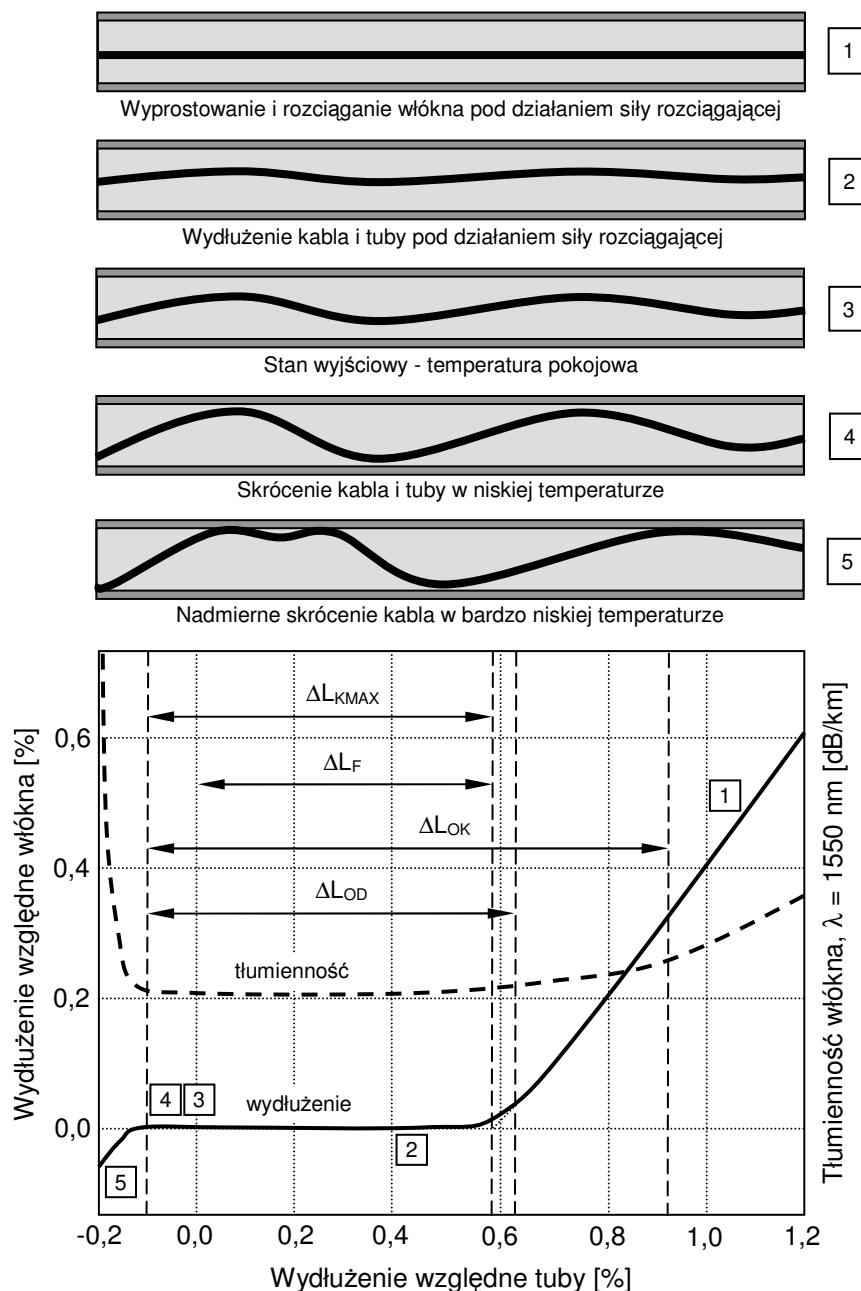
dla pracy długotrwałej:

$$\Delta L_{OD} = \Delta L_F + 0,05\% + \Delta L_{KMAX} \quad (11)$$

dla pracy krótkotrwałej:

$$\Delta L_{OD} = \Delta L_F + 0,33\epsilon_P + \Delta L_{KMAX} \quad (12)$$

gdzie  $\Delta L_{OD}$  i  $\Delta L_{OK}$  to szerokość okna wydłużenia, a  $\epsilon_P$  to wydłużenie względne włókien w czasie testu przesiewczego wytrzymałości (proof-test), najczęściej 1%. Nazwa jest myląca, ponieważ na  $\Delta L_{OD}$  lub  $\Delta L_{OK}$  składają się zarówno wydłużenie jak i skrócenie tuby (kabla). Projektant kabla musi optymalnie wykorzystać dostępne okno wydłużenia, dobierając jego szerokość i przesuwając tak, by pokryło zakres zmian długości kabla we wszystkich warunkach pracy (rys. 16). Literatura na ten temat jest nieliczna, m.in. [83,84].



Rys. 16. Ułożenie włókna światłowodowego w luźnej tubie w różnych warunkach pracy.  
Rysunki tub nie mają zachowanej proporcji wymiarów.



Ułożenie włókien lub ich pęczków owijanych nićmi w tubie jest zbliżone do spiralnego, czego nie widać w rzucie bocznym na rys. 16. Nadmiar długości włókien w kablu z tubami skręcanymi rozpatrzono w rozdziale 2.6.6.1.

#### 2.6.4.2. Skręcanie spiralne elementów ośrodka optycznego

Nadmiar długości włókna w tubie wynikający z jego spiralnego ułożenia określają zależności, uzyskane po rozwinięciu spirali na powierzchnię płaską (rys. 11):

$$L^2 = p^2 + (\pi d)^2 \quad (13)$$

gdzie: L – to długość włókna tworzącego jeden skok spirali, p – skok skrętu spirali, d - średnica spirali. Po przekształceniach otrzymujemy:

$$L = \sqrt{\pi^2 d^2 + p^2} \quad (14)$$

$$\frac{L}{p} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{p}\right)^2} \quad (15)$$

i ostatecznie:

$$\Delta L_T = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{p}\right)^2} - 1 \quad (16)$$

Zależność określająca tę samą wartość określoną w procentach jest następująca:

$$\Delta L_T = \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{p}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (17)$$

Wzór uproszczony wystarczający dla obliczeń technicznych  $\Delta L_T$  w zakresie 0-4%:

$$\Delta L_T \approx 491 \left(\frac{d}{p}\right)^2 \quad (18)$$

Do obliczeń  $\Delta L_T \leq 0,5\%$  współczynnik we wzorze (18) powinien wynosić 493 ( $\approx 50\pi^2$ ). Zależność podobna do (18) figuruje w [84] na stronie 258, ale zawiera błąd drukarski.

Minimalny dozwolony promień zginania jednomodowego włókna światłowodowego na całej jego długości, który musi być przestrzegany dla zachowania jego trwałości (25-40 lat) i niezmiętej tłumienności ( $\Delta\alpha \leq 0,01$  dB/km,  $\lambda = 1550$  nm) zawiera się w granicach 30-45 mm, zależnie od poziomu testu przesiewczego i profilu refrakcyjnego włókna. Promień zgięcia włókna ułożonego spiralnie można wyznaczyć z zależności podanej w książce Muraty [84] i opisie patentowym firmy AT&T [85]:

$$r_g = \frac{d}{2} \left[ \left(\frac{p}{\pi d}\right)^2 + 1 \right] \quad (19)$$

względnie:

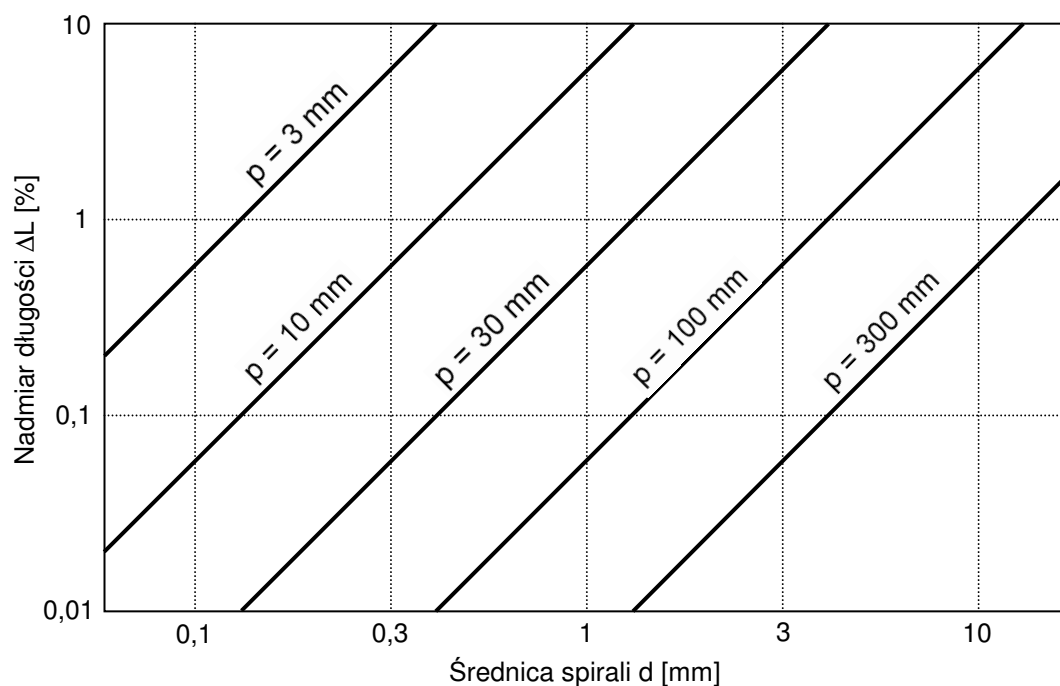
$$r_g = \frac{p^2}{2\pi^2 d} + \frac{d}{2} \quad (20)$$

Analogiczny wzór zamieszczony w [86] zawiera błąd. Zestawienie wartości  $\Delta L_T$  i  $r_g$  dla różnych parametrów skrętu spiralnego zawiera tabela 9. Odpowiednie charakterystyki nadmiaru długości przedstawia rys. 17.

Zależności (17-20) pozwalają też obliczyć nadmiar długości wynikający ze skrętu jednostek optycznych w ośrodku kabla z tubami skręcanymi i promień zginania jednostek.

Tabela 9. Geometryczny nadmiar długości i promień zginania włókien światłowodowych w funkcji parametrów skrętu spiralnego.

Nr	Średnica spirali (d)	Skok spirali (p)	Nadmiar długości ( $\Delta L$ )	Promień zginania ( $r_g$ )	Uwagi
---	mm	mm	%	mm	---
1	0,05	20	0,0031	405,3	Włókno wewnątrz pokrycia pierwotnego $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ .
2	0,10	20	0,0123	202,7	Ułożenie włókna wewnątrz pokrycia ścisłego.
3	1,50	125	0,0710	528,5	Jednostka optyczna przewodu OPGW (12 włókien).
4	1,00	100	0,0493	507,1	Włókno w tubie o małej pojemności (12 włókien).
5	2,00	100	0,1971	254,3	Włókno w tubie o dużej pojemności (144 włókna).
6	2,00	50	0,7865	64,3	Włókno w tubie o dużej pojemności (144 włókna).
7	6,00	200	0,4432	340,7	Ośrodek kabla kanałowego z 6 tubami skręcanymi.
8	10,00	140	2,4868	104,3	Ośrodek kabla ADSS z 12 tubami skręcanymi.
9	4,4	110	(0,7856)	283,0	Rozeta 10-rowkowa (tabela 5), maksymalnie wydłużona.



Rys. 17. Nadmiar długości zapewniany przez skręt spiralny o średnicy spirali  $d$  i skoku skrętu  $p$ .

Ułożenie faliste jest mniej efektywne niż spiralne jako środek do upakowania dodatkowej długości włókna w jednostce luźnej; sytuacja taka występuje w przypadku taśm światłowodowych o anizotropowej sztywności, których zginanie w kierunku płaszczyzny ułożenia włókien jest praktycznie niemożliwe.

Zwiększanie liczby włókien w tubie redukuje wolną przestrzeń, w której przemieszczają się włókna oraz maksymalną średnicę skrętu, która orientacyjnie jest równa różnicy średnic: kanału tuby ( $\varnothing_T$ ) i eliptycznie spłaszczonego pęczka zawierającego  $n$  włókien:

$$d < \varnothing_T - 0,2 \cdot \sqrt{n} \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

Istnieje kompromis między gęstością upakowania włókien w tubie, a osiągalnym nadmiarem długości, parametrami mechanicznymi i zakresem temperatur pracy kabla.

Tuby o średnicy zewnętrznej 2-3,5 mm i grubości ścianek 0,3-0,5 mm, przeznaczone do kabli z ośrodkiem skręcanym lub lekkich kabli z tubą centralną umożliwiają upakowanie włókien z ograniczonym nadmiarem długości, w granicach 0,04-0,10% (tabela 10, poz. 4).

Odpowiedni nadmiar długości włókien w tubach z polimerów zapewnia skurcz tworzywa tuby po ochłodzeniu z temperatury wytłaczania (+240...+260 °C dla PBT i PA); dokładna wartość i stabilność tego parametru zależy od typu tworzywa i warunków chłodzenia po wytłaczaniu. Nadmiar można zwiększyć przez kontrolowane rozciąganie odcinka tuby za wytłaczarką: następuje wciąganie do niego większej długości włókna, które po usunięciu siły rozciągającej zostaje uwięzione w skróconej tubie.

W produkcji spawanych tub metalowych stosuje się wymuszone podawanie włókien ze zwiększoną prędkością w stosunku do prędkości podawania taśmy, z której powstaje ścianka tuby lub wzdlużną mechaniczną kompresję tub po zespawaniu.

Dwie ostatnie metody nadają się do produkcji wielkogabarytowych tub centralnych ( $\varnothing 6-16$  mm). Nadmiar długości włókien zmienia się proporcjonalnie do  $d^2$  (18), więc duża średnica kanału tuby umożliwia zwiększenie  $\Delta L_T$  do 0,2-1,0%. Patrz tabela 9, poz. 5-6.

### 2.6.5. Kable światłowodowe z tubą centralną

Kable tego rodzaju zawiera pojedynczą tubę, ułożoną osiowo i otoczoną przez powłokę oraz elementy wytrzymałościowe (rys. 18). Nie ma tu nadmiaru długości wynikającego ze skrętu elementów ośrodka; okno wydłużenia zależy wyłącznie od ułożenia włókien światłowodowych w tubie. Dla otrzymania wymaganego w kablu napowietrznym zapasu długości włókna, zwykle w granicach 0,5-1% (tabela 3) niezbędne jest stosowanie tub o dużych średnicach wewnętrznych (4-12 mm) lub tub z kanałem spiralnym typu SpiralSpace<sup>®</sup> spotykanych w kablach firmy Draka Comteq (dawniej Nokia).

Proste ułożenie tuby ma istotną dla pracy włókien światłowodowych zaletę: pozostają one proste po obciążeniu kabla dużą siłą rozciągającą i (jeśli kabel nie jest zgięty) nie są dociskane do ścianki tuby nawet, kiedy ulegają rozciąganiu. Ośrodek opisywanego typu zapewnia w związku z tym minimalne odkształcenia i bardzo dobrą stabilność tłumienności włókien światłowodowych w szerokim zakresie sił rozciągających, a także w warunkach wibracji i zgniatania. W warunkach krótkotrwałego obciążenia siłą rozciągającą można dopuścić maksymalne dyktowane przez niezawodność mechaniczną wydłużenie włókien ( $0,33\epsilon_P$ ), stosując w kablach kanałowych tuby o małym nadmiarze ich długości (0,1-0,3%).

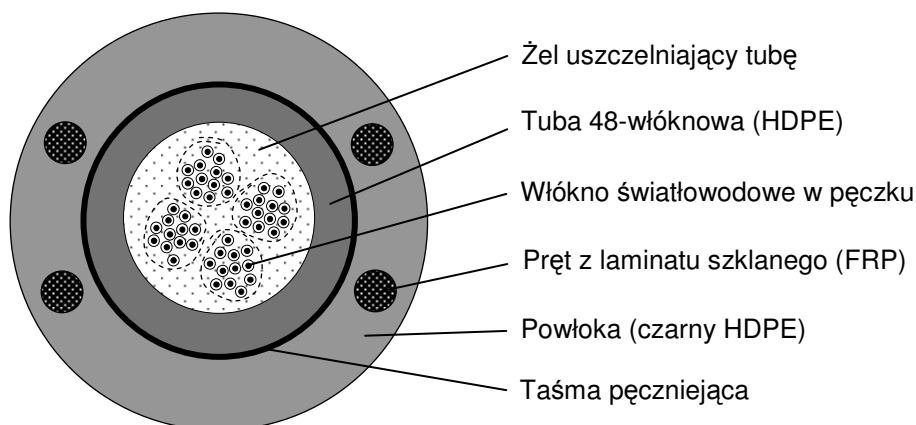
Prawie proste ułożenie i skuteczna ochrona włókien światłowodowych przed mikrozgięciami prowadzą jednak paradoksalnie do wzrostu PMD, gdyż w tych warunkach zredukowane jest sprzęganie modów polaryzacyjnych. Patrz rozdział 3.1.4.

Warunki pracy włókien w kablu ADSS lub ADL z tubą centralną są najtrudniejsze przy braku sił rozciągających i niskiej temperaturze otoczenia, kiedy włókna są ułożone w sposób silnie sfalowany, a zginanie włókien i siły działające pomiędzy sąsiednimi, dociskanymi do siebie włóknami lub taśmami światłowodowymi osiągają maksymalny poziom. Może wystąpić

wzrost tłumienności - znany problem kabli z tubą centralną niskiej jakości. Zmiany PMD trudno przewidzieć wobec równoczesnego wpływu nacisków bocznych, które zwiększają PMD i mieszania modów polaryzacyjnych, które zmniejsza PMD. Autorowi nie są znane wyniki odpowiednich badań laboratoryjnych.

Kable ADL i ADSS pozbawione sztywnego elementu wytrzymałościowego i nie zamocowane ściśle do linki albo podpory metalowej nie mogą być używane w tych warunkach, gdyż skurcz powłoki z HDPE lub PP przy obniżeniu temperatury z  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $-30^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 50 \text{ K}$ ) osiąga nawet 0,3% (patrz tabela 1). Następuje wówczas znaczne przekroczenie dozwolonego nadmiaru długości włókien w tubie, ich dociskanie do ścianek tuby i silny wzrost tłumienności oraz PMD.

Inny mankament kabli z tubą centralną pracujących ze zwisem lub w położeniu pionowym, na przykład na zejściu ze podpory linii energetycznej do osłony złączowej to migracja włókien, najsilniejsza, kiedy kabel poddany jest wibracjom i działaniu podwyższonej temperatury, osiągającej latem przy silnym nasłonecznieniu około  $+70^{\circ}\text{C}$  i znacznie obniżającej lepkość żelu wypełniającego tubę. Efektem jest wzrost nadmiaru długości włókien w najniższej położonej części przęsła lub odcinka pionowego oraz ich tłumienności.

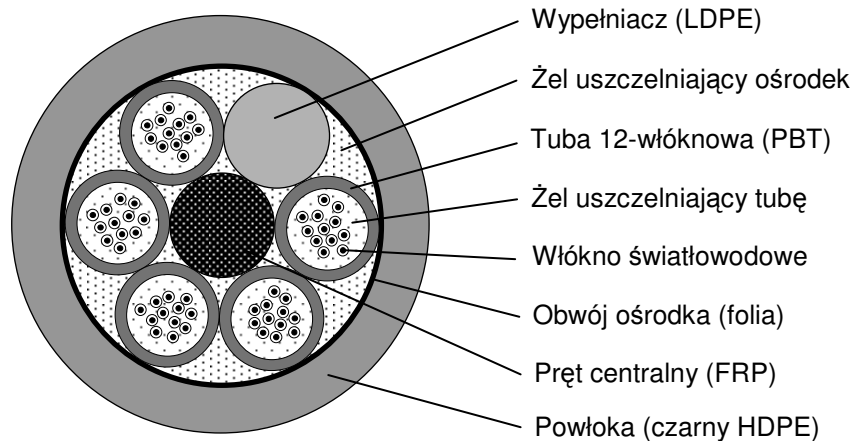


Rys. 18. Dielektryczny kabel kanałowy 48-włóknowy z żelowaną tubą centralną o kanale osiowym, z włóknami w pęczkach owijanych nićmi (Z-XOTKctD 48J).  
Zachowane proporcje wymiarów.

## 2.6.6. Kable światłowodowe z tubami skręcanymi

Charakterystyczną cechą kabli tego rodzaju jest ośrodek zbudowany z wielu identycznych tub skręconych wokół sztywnego elementu wytrzymałościowego, których w kablach jednowarstwowych jest 5-12 (rys. 19). Skręt elementów ośrodka może być spiralny lub oscylacyjny, oznaczany również jako „SZ” lub „ROL” (ang. *Reverse Oscillating Lay*). Drugie rozwiązanie ułatwia skręcanie ośrodka w czasie produkcji i umożliwia dostęp do wybranych włókien z kabla bez przecinania pozostałych; warunki pracy włókien są podobne.

Ośrodek z tubami skręcanymi stanowi w Polsce i wielu innych krajach „złoty standard” dla kabli liniowych, w szczególności dla pracujących w najtrudniejszych warunkach kabli napowietrznych. Jego pojemność i parametry można łatwo dostosować do różnych warunków pracy, modyfikując liczbę, wymiary i ułożenie tub. Kable tubami skręcanymi, sprawdzone w długoletniej eksploatacji i wygodne w montażu, są niestety pracochłonne w produkcji a także mają większą średnicę od kabli z tubą centralną o identycznej pojemności.



Rys. 19. Dielektryczny kabel kanałowy 60-włóknowy z żelowanym ośrodkiem tubowym 6-elementowym o skręcie regularnym (Z-XOTKtd 60J). Zachowane proporcje wymiarów. Wypełniacze umożliwiają uformowanie ośrodka o mniejszej niż maksymalna liczbie włókien i tub.

### 2.6.6.1. Nadmiar długości włókien w ośrodku z tubami skręcanymi

Ośrodek z tubami skręcanymi ma odmienne okno wydłużenia i warunki pracy włókien światłowodowych podczas obciążenia kabla siłą rozciągającą niż wersja z tubą centralną. Spiralny skręt tub układa je z nadmiarem długości  $\Delta L_S$  w stosunku do powłoki i innych elementów kabla; zależności od parametrów skrętu ośrodka są identyczne jak dla włókien wewnątrz tuby:

$$\Delta L_S = \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\pi d_s}{p_s} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (22)$$

oraz w uproszczeniu:

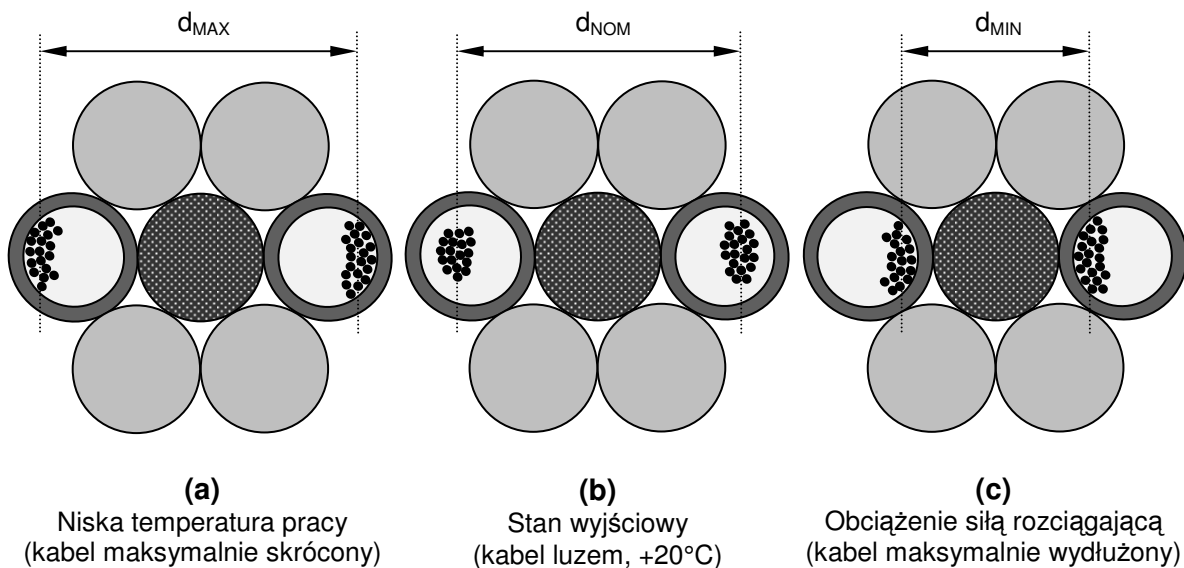
$$\Delta L_S \approx 491 \left( \frac{d_s}{p_s} \right)^2 \quad (23)$$

gdzie  $d_s$  i  $p_s$  to odpowiednio średnica i skok skrętu tub w ośrodku. Łączny nadmiar długości włókien w kablu z ośrodkiem z tubami skręcanymi wynosi (w %):

$$\Delta L_K = \left[ \left( 1 + \frac{\Delta L_S}{100} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Delta L_T}{100} \right) - 1 \right] \cdot 100\% \approx \Delta L_S + \Delta L_T \quad (24)$$

przy czym  $\Delta L_T$  to nadmiar długości włókna wewnątrz tuby;  $\Delta L_K \gg \Delta L_F$ . Nadmiar długości uzyskany przez skręcenie tub wynosi 0,3-4% i znacznie przekracza wartości typowe dla tub małogabarytowych ( $\varnothing 1,2-4$  mm) wynoszące 0,05-0,10%, przedstawione w tabeli 9.

Parametr  $\Delta L_K$  jest odpowiedni do kalkulacji zużycia włókna w produkcji kabli i korygowania odległości wyznaczonych z pomiarów reflektometrycznych według zależności (9) i (10), lecz nie pokrywa się z oknem wydłużenia, ponieważ w przeciwieństwie do sytuacji w tubie centralnej (z prostym kanałem) umieszczonej prosto w kablu, włókna w ośrodku skręcanym nie mogą ułożyć się na osi kabla. Nadmiar długości odpowiadający ułożeniu włókien na ściance tuby w pozycji najbliższej osi kabla (rys. 20c) jest „martwy”, ponieważ nie może być wykorzystany do kompensowania zmian długości kabla.



Rys. 20. Ułożenie włókien światłowodowych w ośrodku kabla ze skręcanymi tubami w zależności od warunków pracy.

Pomijając sfałowanie włókna w tubie, zakres zmian długości kabla (w %), w którym włókno światłowodowe przemieszcza się swobodnie w tubie bez naprężeń określa wzór:

$$\Delta L_{MAX} \approx 491 \frac{d_{MAX}^2 - d_{MIN}^2}{p_S^2} \quad (25)$$

w którym  $d_{MAX}$  i  $d_{MIN}$  to odpowiednio minimalna i maksymalna średnica odpowiadająca skrajnym położeniom włókna pokazanym na rys. 20. Zakres swobodnego ruchu poprzecznego włókien w tubie o danych wymiarach zmniejsza się w miarę wzrostu ich liczby.

Alternatywna postać powyższej zależności, też dająca wynik wyrażony w % to:

$$\Delta L_{MAX} \approx 882 \frac{d_T d_S}{p_S^2} \quad (26)$$

gdzie  $d_T$  to poprzeczny zakres ruchu włókien wewnątrz tuby - znacznie mniejszy od jej średnicy zewnętrznej, a  $d_S$  to średnica skrętu tub. Jest tu spełniona zależność:

$$d_T = d_{MAX} - d_{MIN} \quad (27)$$

Wzór analogiczny do (26) znajduje się w książce Muraty [84] na str. 261, ale ze współczynnikiem o 13% wyższym. Murata bazuje obliczenia na średnicy zewnętrznej tuby ( $d$ ) zamiast zakresu ruchu włókien  $d_T$ , co prowadzi do zbyt optymistycznego oszacowania okna wydłużenia kabla. W przypadku tuby  $\varnothing 0,9/1,4$  mm zawierającej pojedyncze włókno,  $d = 1,4$  mm, a  $d_T = 0,65$  mm i  $\Delta L_{MAX}$  tak wyznaczona jest o 144% wyższa niż ze wzoru (26).

W kablu nieobciążonym siłą rozciągającą włókna nie są ułożone na osi tuby, ponieważ oczekuje się znacznie większego wydłużenia niż skrócenia kabla w skrajnych warunkach pracy. W związku z tym konstruktor kabla musi dokonać podziału całego dostępnego okna wydłużenia  $\Delta L_{MAX}$  na część przeznaczoną do kompensowania możliwego wydłużenia kabla  $\Delta L_F$  i część zarezerwowaną do kompensowania możliwego skrócenia kabla.

Obliczenia okna wydłużenia dla przykładowych parametrów konstrukcyjnych kabli tubowych i rozetowych przedstawiono w tabeli 10.

Porównanie danych dwóch wersji ośrodka kabla ADSS pokazuje, jak dramatyczny wpływ na parametry użytkowe wyrobu ma redukcja wymiarów tub i ośrodka, bardzo

pożądana z powodu oszczędności materiałów, niższego ciężaru kabla i łatwiejszej jego instalacji. Zawężenie okna wydłużenia wymaga użycia zewnętrznego elementu wytrzymałościowego o większym przekroju i masie, więc traci się część korzyści ze zmniejszenia średnicy ośrodka.

Tabela 10. Nadmiar długości włókien i okno wydłużenia przykładowych kabli liniowych. Do wartości  $\Delta L_S$  podanych niżej dla kabli tubowych należy dodać nadmiar długości włókien wewnątrz tub ( $\approx 0,05\%$ ).

$d_{MAX}$	$d_{NOM}$	$d_{MIN}$	$p_S$	$\Delta L_S$	$\Delta L_{MAX}$	Uwagi
mm	mm	mm	mm	%	%	---
4,6	6,7	7,4	250	0,353	0,264	72-włóknowy kabel tubowy kanałowy z 6 tubami $\varnothing 3,0$ mm.
10,5	12,7	13,4	150	3,520	1,512	144-włóknowy kabel tubowy ADSS z 12 tubami $\varnothing 3,0$ mm.
8,8	9,7	10,3	150	2,053	0,625	144-włóknowy kabel tubowy ADSS z 12 tubami $\varnothing 2,5$ mm.
6,9	6,0	4,4	110	1,461	1,146	Kabel rozetowy kanałowy z rozetą 10-rowkową (rys. 21).

Prócz różnic w metodach obliczeń i interpretacji nadmiaru długości włókien w kablu ze skręcanymi tubami, pracują one inaczej, kiedy rozciąganie kabla prowadzi do wyczerpania tego nadmiaru. Włókna nie są prostowane jak w tubie centralnej, lecz najpierw układane w spiralę o coraz mniejszej średnicy, a później dociskane z coraz większą siłą do ścianki tuby. Efektem są rosnące z siłą rozciągającą makro- i mikrozgięcia; intensywność tych ostatnich i towarzyszący im wzrost tłumienności włókien światłowodowych silnie zależy od nierówności powierzchni wewnętrznej tub i gładkości pokrycia włókien. Dociskanie włókien do ścianki tuby zwiększa również znacznie ich PMD, co potwierdziło badanie opisane w rozdziale 5.2.2.

## 2.7. Rozeta

Budowę kanałowego kabla rozetowego produkowanego w kraju w latach 1992-1999 przez Fabrykę Kabli „Ożarów” na licencji francuskiej firmy SAT przedstawiono na rys. 21.

Rowki rozety są ułożone spiralnie, analogicznie jak tuby w kablu z ośrodkiem skręcanym i teoretyczne warunki pracy włókien światłowodowych są jednakowe. Kable rozetowe produkcji krajowej [87] oraz importowane w 1993 r. dla projektu NSL kable firmy NKT Elektronik (Dania) miały najczęściej 1 włókno w rowku rozety, maksymalnie 3.

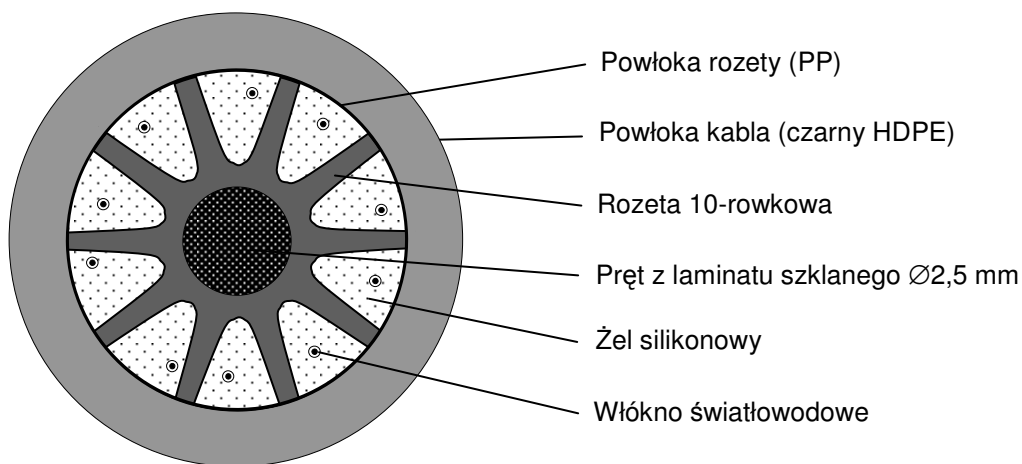
Parametry ośrodka rozetowego produkcji FK „Ożarów”, określone z pomiarów kabla kanałowego Z-XOTKrd 10J wyprodukowanego w 1994 r. podano w tabeli 10. Głębokie rowki zapewniają teoretycznie znaczny nadmiar długości włókien, z którego aż 78% można wykorzystać do kompensacji zmian długości kabla. W praktyce zachowanie kabla podczas badania wytrzymałości na rozciąganie znacznie odbiegało od oczekiwań, przede wszystkim wskutek trudności z kontrolowaniem nadmiaru długości włókien, niskiej jakości żelu oraz mniej gładkiej powierzchni rowków rozety niż kanałów tub produkowanych z PA i PBT.

Pomiary wykonane w Kanadzie wykazały, że mikrozgięcia włókien światłowodowych spowodowane drobnymi nierównościami powierzchni rowków rozety prowadzą do znacznej redukcji PMD, wzmagając sprzęganie modów polaryzacyjnych – patrz rozdział 3.2.3.1. Autor pracy nie dysponuje jednak wynikami podobnych pomiarów kabli rozetowych zainstalowanych w Polsce. Współczynnik tarcia włókien o powierzchnię rozety próbowano z kolei obniżyć stosując żel silikonowy zamiast węglowodorowego.

Umieszczanie włókien światłowodowych w rozecie stanowi operację wykonywaną w temperaturze pokojowej, więc nie ma późniejszego skurczu wzdłużnego rozety. Nadmiar długości włókien uzyskiwano przez kontrolowane rozciąganie 10-15 m odcinka rozety nawiniętego na koło pociągowe za wytłaczarką, co powodowało wciąganie większej długości włókien niż długość rozety po usunięciu siły rozciągającej.

Zaletą ośrodka rozetowego w porównaniu do konstrukcji z tubami skręcanymi był niższy koszt produkcji dzięki mniejszej liczbie operacji technologicznych oraz używaniu taniego tworzywa, najczęściej kopolimeru PP-PE. Produkcja rozety wymaga jednej operacji wytłaczania, natomiast ośrodka tubowego osobnego wytłaczania każdej z tub i następnie skręcania ośrodka. Oszczędności te okupiono pracochłonnym montażem i ograniczoną liczbą włókien w kablu z pojedynczą rozetą, wynoszącą do 30 w kablach krajowych. Od 1997 r. ich miejsce zajęły w Polsce lżejsze i prostsze w instalacji kable z tubą centralną.

Szereg firm wytwarza nadal kable rozetowe z taśmami światłowodowymi zamiast pojedynczych włókien, co przyspiesza wykonywanie złączy kablowych i zwiększa gęstość upakowania włókien w ośrodku. Kabli tego rodzaju nigdy nie instalowano w kraju.



Rys. 21. Kabel rozetowy 10-włóknowy Z-XOTKrd 10J produkcji FK „Ożarów”. Zachowane proporcje wymiarów.

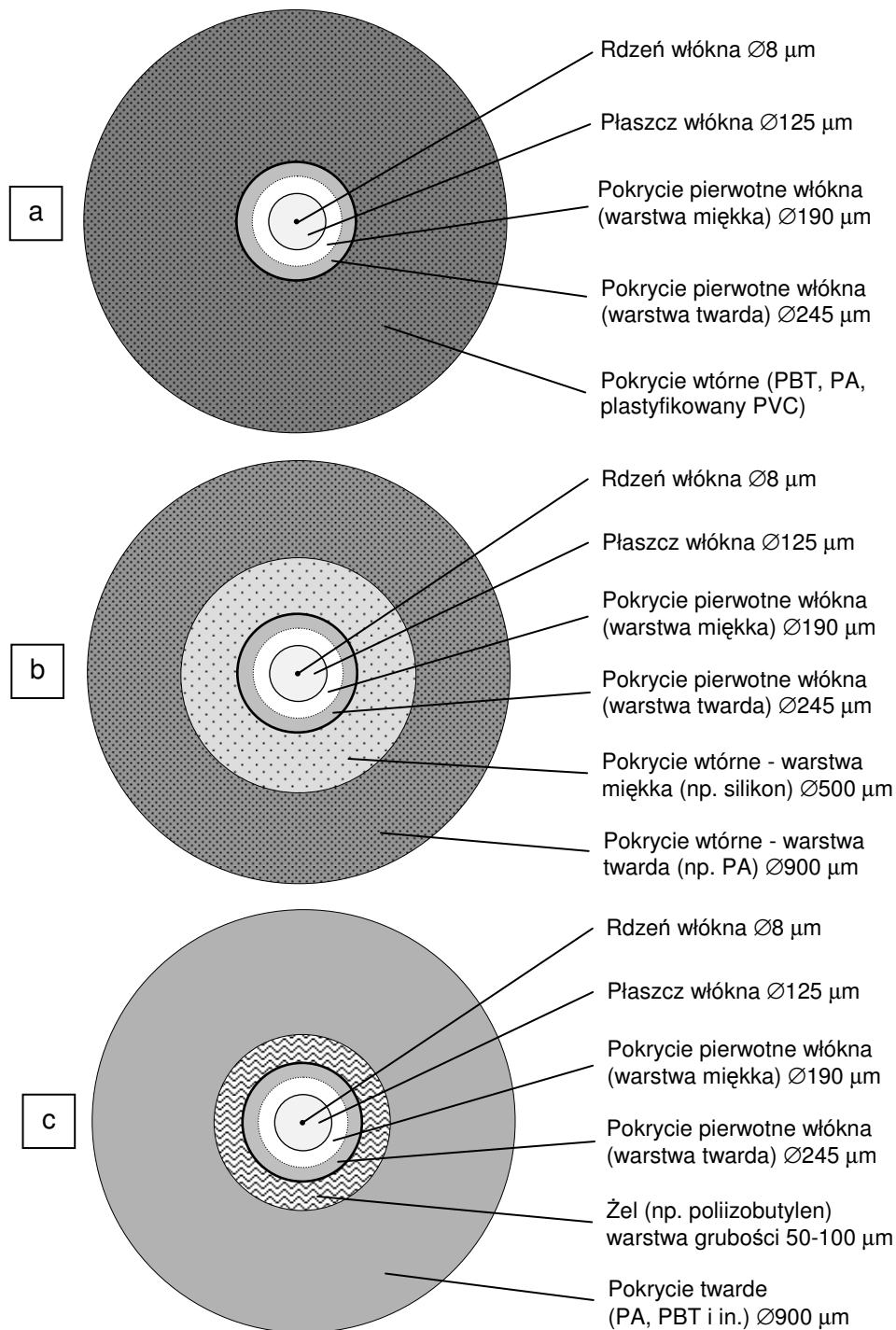
## 2.8. Pokrycie ściśle (ściśła tuba)

### 2.8.1. Budowa ściśłej tuby

Ten rodzaj pokrycia wtórnego różni się zasadniczo od konstrukcji luźnych: na włókno w pokryciu pierwotnym  $\varnothing 250 \mu\text{m}$  nakłada się bezpośrednio jedną lub dwie warstwy polimerów, które pozostają ściśle związane mechanicznie z jego pokryciem pierwotnym (rys. 22a,b). Pokrycie ma przekrój kołowy i znormalizowaną w kablach telekomunikacyjnych średnicę zewnętrzną  $900 \mu\text{m}$ . Pierwsze włókna w pokryciach ścisłych opracowały firmy NTT i Fujikura (Japonia) w 1976 r. jako ośrodek optyczny ogólnego przeznaczenia dla kabli telekomunikacyjnych, również liniowych [88] oraz ITT (USA) w 1978 r. dla zastosowań wojskowych w kablach polowych i zdalnym sterowaniu pociskami.

Skurcz tworzywa po ochłodzeniu podczas wytłaczania zapewnia ściśle przyleganie, ale połączone ze stałym naciskiem na włókno. Ciśnienie wywierane przez pokrycie ściśle silnie wzrasta z obniżeniem temperatury, kiedy tworzywo pokrycia kurczy się, a jego moduł sprężystości wzrasta. Ten ostatni efekt jest silny m.in. w PBT – patrz rys. 13.





Rys. 22. Jednomodowe włókno światłowodowe w pokryciu ścisłym  $\varnothing 900 \mu\text{m}$ :  
 (a) pokrycie 1-warstwowe, (b) pokrycie 2-warstwowe z miękką warstwą buforową,  
 (c) pokrycie półściste z warstwą żelu. Zachowane proporcje wymiarów.  
 W wersji (b) pod pokryciem twardym często znajduje się tylko warstwa buforowa.

Twarde i dobrze związane z pokryciem pierwotnym pokrycie ściste trudno jest mechanicznie usunąć; siła adhezji na odcinku długości 5-10 mm często przekracza wytrzymałość włókna i pęka ono przy próbach ściągania przeciętego w poprzek pokrycia. Z tego powodu opracowano wersje 2-warstwowe (rys. 22b). Miękkie i słabo przylegające do pokrycia pierwotnego materiał warstwy wewnętrznej, na przykład guma silikonowa pełni funkcję bufora pozwalającego ściągnąć z włókna względnie długi odcinek pokrycia ścisłego (10-30 mm) po jego przecięciu, bez uszkodzania pokrycia pierwotnego [89,90]. Grubość

warstwy poślizgowej można ograniczyć do 3-4  $\mu\text{m}$ , jeżeli nie pełni ona innych funkcji [91]. Wersja pokrycia z miękką warstwą buforową pokazana na rys. 22b jest odpowiednia dla kabli polowych i uniwersalnych narażonych na działanie niskich temperatur.

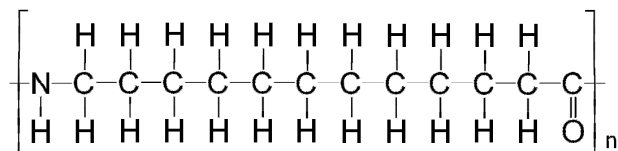
Alternatywne rozwiązanie to pokrycie półściśle (półściśła tuba), gdzie funkcję warstwy poślizgowej pełni żel (rys. 22c), omówione w rozdziale 2.9.

Włókna w pokryciach ścisłych dla sieci dostępowych FTTH mają często średnicę zredukowaną do 500  $\mu\text{m}$  i pokrycie z mniej sztywnego materiału, co pozwala na ich ciałniejsze zginanie oraz ułatwia mechaniczne usuwanie pokrycia i montaż kabli.

## 2.8.2. Materiały do produkcji tub ścisłych

Zewnętrzna warstwa pokrycia ścisłego (lub jego całość) jest przeważnie wytłaczana z barwionego w masie termoplastycznego tworzywa konstrukcyjnego o wysokiej sztywności i wytrzymałości mechanicznej, najczęściej PBT lub poliamidu bez napełniaczy. Własności PBT i problemy związane z formowaniem elementów kabli światłowodowych z tego materiału przedstawiono bliżej w rozdziałach 2.6.3, 4.2.2 i 4.7.2.

Poliamidy są trudniej palne i mają bardziej gładką powierzchnię niż PBT. Ich słabą stroną jest silna absorpcja wilgoci (2-10%) skutkująca zmianami wymiarów i sztywności, również usuwanie śliskiego i ciągliwego pokrycia poliamidowego z włókna jest trudne. Istnieje wiele odmian poliamidów o zróżnicowanej budowie cząsteczki, zawierającej podstawniki alifatyczne, cykloalifatyczne i aromatyczne. Często używane w innych branżach przemysłu PA 6 i PA 6.6 są mało przydatne z powodu nadmiernej absorpcji wilgoci (8-10%) i wyspecjalizowane firmy, jak Degussa (RFN)[34] i EMS Grivory (Szwajcaria)[32] oferują produkty stanowiące mieszanki kilku odmian PA. Głównym składnikiem jest prawdopodobnie PA 12, wykazujący najniższą u szeroko używanych poliamidów gęstość grup amidowych -C=O-NH- i związaną z nią chłonność wody – około 1,5% [78].



Rys. 23. Struktura cząsteczki poliamidu PA 12 [78].

Pokrycie ściśle z plastyfikowanego polichlorku winylu (PVC) jest elastyczne, łatwe do mechanicznego usuwania i trudnopalne, lecz nie zapewnia równie dobrej jak PBT ochrony włókna przed ściskaniem i mikrozdgięciami pochodzącymi od sił zewnętrznych.

Materiał pokrycia ścisłego musi odznaczać się wytrzymałością na rozernanie i szerokim zakresem odkształceń sprężystych, by pokrycie nie pękało lub deformowało się w czasie ciasnego zginania typowego dla użytkowania kabli stacyjnych z włóknami nowej generacji (rozdział 2.3.1.3). Naprężenie wewnętrzne pokrycia określa zależność:

$$\sigma_{\max} = \frac{E_p \cdot d_p}{2r_g} \quad (28)$$

a odkształcenie materiału wzór:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{d_p}{2r_g} \quad (29)$$

w którym:  $\sigma_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  - najwyższe naprężenie i odkształcenie występujące na zewnętrznej powierzchni pokrycia,  $d_p$  – średnica zewnętrzna pokrycia,  $E_p$  – moduł sprężystości materiału pokrycia,  $r_g$  – promień zginania włókna. Przyjmując:  $d_p = 0,9 \text{ mm}$ ,  $E_p = 2500 \text{ MPa}$  oraz

$r_g = 20$  mm, otrzymujemy:  $\sigma_{\max} = 56$  MPa i  $\epsilon_{\max} = 2,25\%$ , odpowiadające granicy odkształcenia plastycznego w PBT (rys. 14). Specjalne włókna dla sieci LAN i FTTH przedstawione w rozdziale 2.3.1.3 wymagają pokryć z bardziej elastycznych polimerów, niestety przeważnie o niższej wytrzymałości.

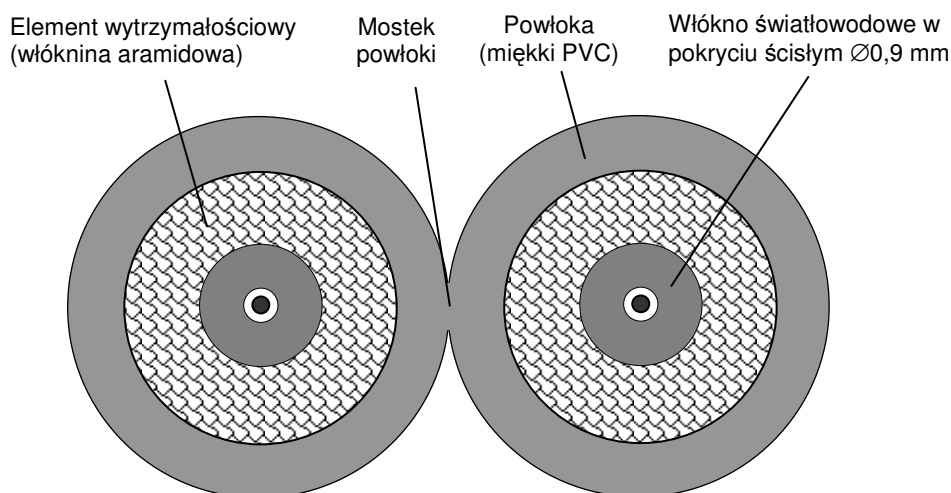
Inny materiał do produkcji tub ścisłych to twarde kopolimer akrylowy, nakładany na włókno światłowodowe jako ciecz i utwardzany promieniowaniem ultrafioletowym, tak jak przy nakładaniu pokrycia pierwotnego (rys. 43). Moduł sprężystości ma podobną wartość jak u PBT ( $E \approx 2-3$  GPa), ale temperatura zeszklenia tworzywa jest wyższa i jego własności słabiej zależą od temperatury. Usieciovany polimer nie ma skłonności do krystalizacji i towarzyszących jej zmian wymiarów, co jest ważną zaletą.

Istnieją trudnopalne odmiany materiałów tego rodzaju. Tworzywo jest przezroczyste i umożliwia identyfikację włókna na podstawie barwy jego pokrycia pierwotnego, dając przy tym ciekawe efekty wizualne. Opisaną metodę stosuje Zakład Produkcji Kabli Światłowodowych Corning Polska w Lublinie, znany do 2005 r. jako OTO Lublin.

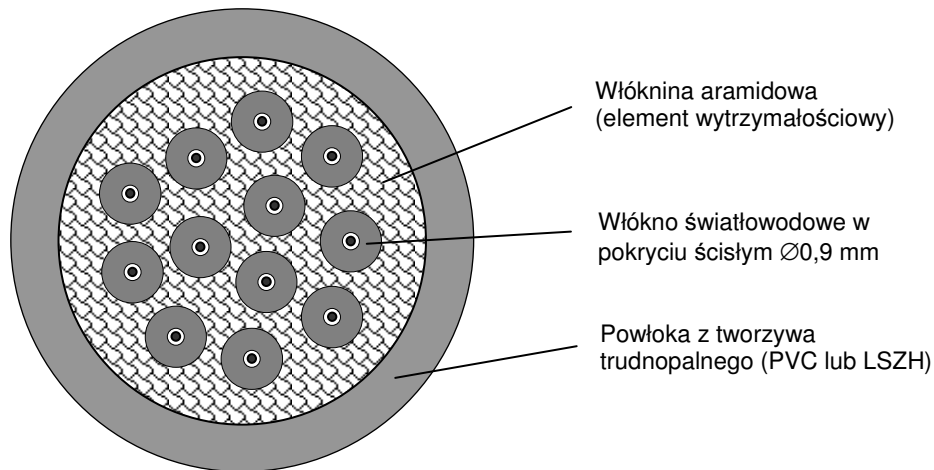
### 2.8.3. Kable światłowodowe z włóknami w ścisłych tubach

W telekomunikacji i teleinformatyce włókna w tubach ścisłych stosowane są na ogół w kablach stacyjnych, instalowanych wewnątrz budynków i pracujących w łagodnych warunkach środowiskowych, natomiast narażonych na zwiłanie i zginanie. Znacznie rzadziej ośrodek ścisły spotyka się w kablach „uniwersalnych”, przystosowanych do układania pod ziemią lub zawieszania, a równocześnie trudnopalnych i nadających do wprowadzania do budynków. Kable napowietrzne z włóknami w tubach ścisłych, przystosowane do pracy w temperaturach do  $-40^\circ\text{C}$  oferuje Optical Cable Corporation (USA). W kraju TeleFonika Kable S.A. produkuje kable uniwersalne typu ZW-NOTKSd i połowe typu PSKD [90] z włóknami w tubach ścisłych, o zakresach temperatur pracy odpowiednio  $-30\dots+60^\circ\text{C}$  i  $-40\dots+70^\circ\text{C}$ .

Najprostsze i najczęściej spotykane konstrukcje kabli stacyjnych [90] pokazano na rys. 24-25. Ich charakterystyczną cechą to otoczenie włókien światłowodowych przez włókninę aramidową: Kevlar<sup>®</sup> firmy DuPont lub Twaron<sup>®</sup> firmy Tanjin (dawniej Akzo), stanowiącą równocześnie element wytrzymałościowy i osłonę mechaniczną przed zgniataniem lub uderzeniami. Przed 1995 r. używano też tańszej włókniny szklanej lub poliamidowej. Kable stacyjne o liczbie włókien 1-12 zwykle nie mają sztywnych elementów wytrzymałościowych, który mogłyby zapobiegać wzdłużnemu kurczeniu się kabla w niskiej temperaturze, natomiast kable uniwersalne z reguły takie elementy posiadają.



Rys. 24. Kabel stacyjny 2-włóknowy (dupleks) z włóknami w pokryciu ścisłym. Zachowane proporcje wymiarów.



Rys. 25. Kabel stacyjny z 12 włóknami w pokryciu ścisłym.

Kable stacyjne zawierające więcej niż 24 włókna światłowodowe zbudowane są najczęściej z kilku jednostek skręconych spiralnie wokół centralnego dielektrycznego elementu wytrzymałościowego (pręt FRP) i otoczonych wspólną powłoką.

Wszystkie kable stacyjne muszą być trudnopalne. Ich powłoki wykonuje się z plastyfikowanego PVC lub kopolimeru PE-PP napelnianego sproszkowanym uwodnionym wodorotlenkiem magnezu ( $Mg(OH)_2 \cdot nH_2O$ ) lub glinu ( $Al(OH)_3 \cdot nH_2O$ ), oznaczanego jako LSZH (ang. *Low Smoke Zero Halogen*). W krajach UE dominuje stosowanie drugiego z wymienionych materiałów, gdyż wymaga się, by kabel nie wydzielał gęstego dymu i trujących gazów pod działaniem ognia, co jest charakterystyczne dla zawierającego chlor PVC.

#### 2.8.4. Nadmiar długości włókna w ścisłej tubie

Zakładając, że średnica spirali, w którą ułoży się włókno szklane jest równa podwójnej grubości wszystkich miękkich warstw pokrycia ochronnego, otrzymujemy przedstawione w tabeli 11 wartości geometrycznego nadmiaru długości włókna  $\Delta L_{TS}$  dla tub ścisłych oraz dodatkowo  $\Delta L_T$  dla tub półścisłych. W przeciwieństwie do sytuacji włókien w tubach luźnych i rozetach, zmiany długości ścisłej tuby zawsze zmieniają naprężenia włókna.

Parametry skrętu w tabeli są tylko orientacyjne, ponieważ nie można ich bezpośrednio zmierzyć prostymi metodami. Wartości odpowiadające promieniom gięcia włókien bliskim minimalnym wyróżniono tłustym drukiem. Geometryczny nadmiar długości włókna w tubie ścisłej 1-warstwowej nie przekracza 0,05%.

Włókno umieszczone w pokryciu ścisłym jest wskutek kurczenia się materiału pokrycia po wytłoczeniu w wysokiej temperaturze poddane działaniu osiowej siły ściskającej i skrócone o 0,05-0,40% bez znaczniejszych deformacji. Dopiero przekroczenie przez siłę osiową granicy stabilności mechanicznej włókna powoduje jego wyboczenie i wprowadzenie geometrycznego nadmiaru długości na zasadzie założonej powyżej. Ciasne ułożenie włókna światłowodowego w sprężynę spiralną i jego dociśnięcie do twardego pokrycia prowadzi do znacznego wzrostu PMD w niskich temperaturach, charakterystycznego dla kabli z włóknami w pokryciach ścisłych. Dokładne analizy tych zjawisk znajdują się w rozdziałach 4.2 i 4.5.

Tabela 11. Geometryczny nadmiar długości i promień zginania ( $r_g$ ) włókna światłowodowego w tubach ścisłych i półścisłych z rys. 22.

$p$	$d_T$	$d_{TS}$	$\Delta L_T$	$\Delta L_{TS}$	$r_g$	Uwagi
mm	mm	mm	%	%	mm	---
20	----	0,065	----	0,0052	311,8	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i 1-warstwowej tubie ścisłej $\varnothing 900 \mu\text{m}$ z twardego tworzywa.
10	----	0,065	----	0,0207	77,8	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i 1-warstwowej tubie ścisłej $\varnothing 900 \mu\text{m}$ z twardego tworzywa.
<b>7,5</b>	----	<b>0,065</b>	----	<b>0,0369</b>	<b>43,9</b>	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i 1-warstwowej tubie ścisłej $\varnothing 900 \mu\text{m}$ z twardego tworzywa.
20	----	0,320	----	0,1257	63,5	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i 2-warstwowej tubie ścisłej $\varnothing 500/900 \mu\text{m}$ .
<b>16</b>	----	<b>0,320</b>	----	<b>0,1964</b>	<b>40,7</b>	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i 2-warstwowej tubie ścisłej $\varnothing 500/900 \mu\text{m}$ .
20	0,100	0,165	0,0123	0,0334	122,9	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i tubie półścisłej $\varnothing 345/900 \mu\text{m}$ z warstwą żelu grubości $50 \mu\text{m}$ .
<b>12</b>	<b>0,100</b>	<b>0,165</b>	<b>0,0341</b>	<b>0,0928</b>	<b>44,3</b>	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i tubie półścisłej $\varnothing 345/900 \mu\text{m}$ z warstwą żelu grubości $50 \mu\text{m}$ .
20	0,200	0,265	0,0491	0,0862	76,6	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i tubie półścisłej $\varnothing 445/900 \mu\text{m}$ z warstwą żelu grubości $100 \mu\text{m}$ .
<b>15</b>	<b>0,200</b>	<b>0,265</b>	<b>0,0873</b>	<b>0,1532</b>	<b>43,1</b>	Włókno $\varnothing 125 \mu\text{m}$ w pokryciu pierwotnym $\varnothing 190/245 \mu\text{m}$ i tubie półścisłej $\varnothing 445/900 \mu\text{m}$ z warstwą żelu grubości $100 \mu\text{m}$ .

## 2.9. Półścisłe pokrycie ochronne (półścisła tuba)

Informacje katalogowe producentów kabli klasyfikują półścisłą tubę (rys. 22c) jako wariant pokrycia ścisłego o zmodyfikowanych własnościach montażowych. O ile jest to zgodne z prawdą w zakresie wymiarów i zastosowania, to istotne dla stabilności PMD warunki pracy włókna światłowodowego w tubach ścisłej i półścisłej różnią się zasadniczo.

Dane z tabeli 12 sugerują, że w tubie półścisłej z cienką warstwą żelu produkowanej bez zabiegów redukujących długość podawanego włókna jest ono na całej długości i w całym zakresie temperatur pracy dociśnięte do ścianek pokrycia, a luźne ułożenie nastąpi wyłącznie po rozciągnięciu tuby siłą zewnętrzną. PMD włókna w półścisłej tubie będzie normalnie wielokrotnie wyższa w porównaniu do identycznego włókna w pokryciu pierwotnym i zmniejszała się w miarę wydłużania tuby pod działaniem sił rozciągających kabel lub podwyższonej temperatury. Kwestię tę rozpatrzono w rozdziale 4.6.

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają te oczekiwania – patrz rozdział 6.4.3.

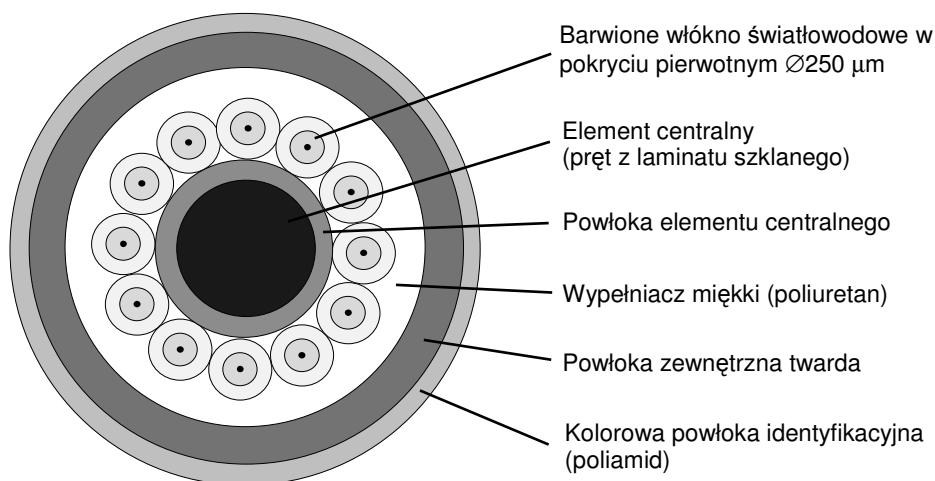
## 2.10. Jednostki wielowłóknowe o budowie ścistej

W ścisłym pokryciu ochronnym można umieścić większą liczbę włókien światłowodowych, uzyskując dielektryczny ośrodek optyczny o małej średnicy.

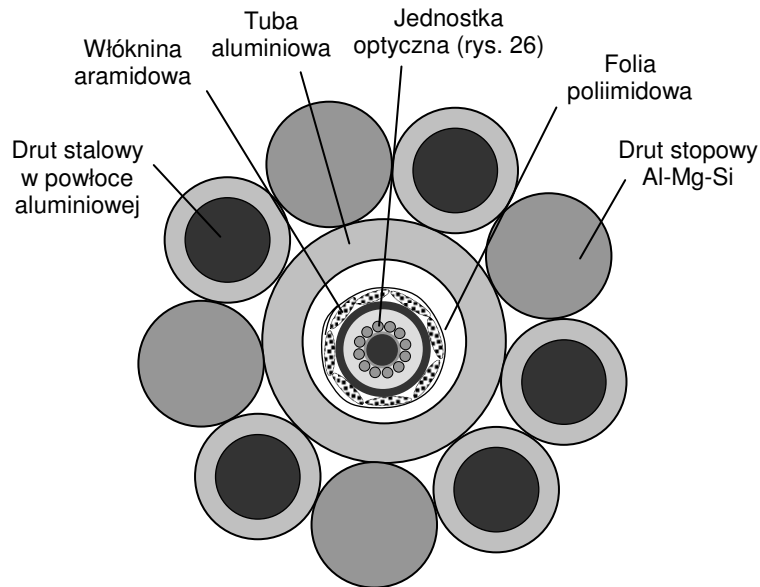
Przykład konstrukcji często używanej w kraju przedstawiono na rys. 26. Jednostki tego rodzaju mają względnie skomplikowaną budowę - zawierają centralny element wytrzymałościowy z laminatu szklanego (FRP), kolorowane włókna światłowodowe ułożone wokół tego elementu i spojone za pomocą miękkiego tworzywa chemoutwardzalnego oraz twarde powłoki ochronne. Charakterystyczną cechą jest spiralne skręcenie włókien wokół elementu centralnego, wymuszone przez technologię produkcji i rozwiązania maszyn kablowych. Przedstawiony ośrodek opracowano w Japonii około 1980 r. Był on często spotykany w kablach różnego typu zaprojektowanych przed 1990 r., w tym podmorskich, OPGW i stacyjnych, produkowanych przez firmy japońskie Furukawa/Fitel/OFS, Fujikura i Sumitomo oraz spółki od nich zależne.

Zalety opisywanej konstrukcji to brak żelu i problemów z jego migracją, szeroki zakres temperatur pracy, mała średnica, odporność na wilgoć oraz gładka powierzchnia zewnętrzna. Wady obejmują praktyczny brak nadmiaru długości włókien światłowodowych, ważnego dla kabli liniowych, ograniczoną do 6-24 liczbę włókien światłowodowych, wrażliwość na działanie sił zgniatających oraz brak możliwości bezpośredniego oprawiania wtyków złączy światłowodowych, kłopotliwy w przypadku kabli stacyjnych i polowych. Z drugiej strony, sztywny pręt centralny o niskiej rozszerzalności termicznej skutecznie redukuje zmiany długości jednostki z temperaturą i zapobiega jej deformacji.

W Polsce zainstalowano od 1993 r. około 7500 km przewodów energetycznych odgromowych i fazowych z włóknami światłowodowymi OPGW i OPT-PC (rys. 27) dostarczonych przez firmę Alcoa Fujikura Ltd., działającą obecnie jako AFL Telecommunications (USA)[92] oraz skręcanych na jej licencji w Fabryce Przewodów Energetycznych w Będzinie. Próby wprowadzenia na rynek innych kabli z ośrodkiem o podobnej budowie, jak kable stacyjne QuantumLink firmy Alcoa Fujikura Ltd. [93] i przewody OPGW firmy Philips-Fitel (Kanada) skończyły się niepowodzeniem.



Rys. 26. Jednostka 12-włóknowa  $\varnothing 2,5 \text{ mm}$  przewodu OPGW (Alcoa Fujikura Ltd.). Pominięto zewnętrzne wzmocnienie z włókniny aramidowej i obwój z folii poliimidowej. Zachowane proporcje wymiarów.

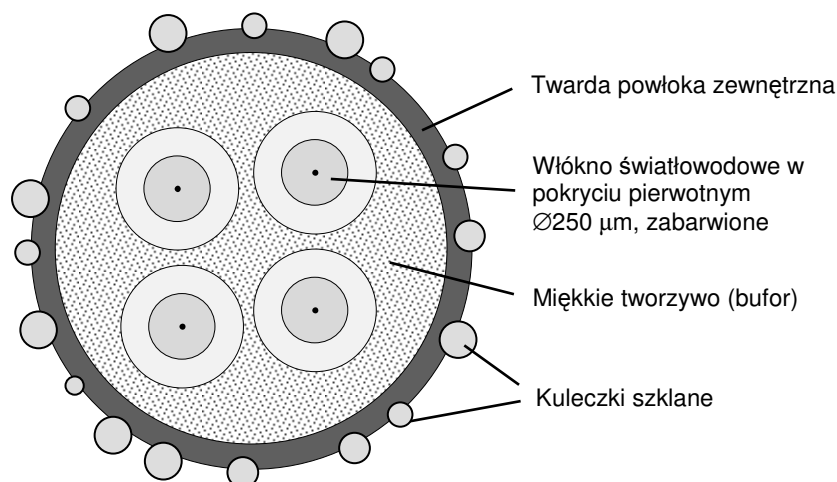


Rys. 27. Przewód OPGW z jednostką ścisłą AlumaCore OPT-GW 30/38 mm<sup>2</sup>/496 (Alcoa Fujikura Ltd.). Średnica zewnętrzna 12,7 mm. Zachowane proporcje wymiarów.

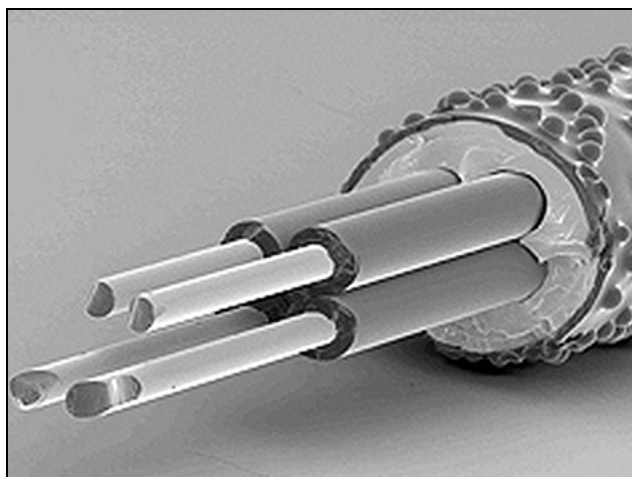
Innego rodzaju jednostki o budowie ścisłej zastosowano w kablach z pustymi tubami, oferowanych m.in. przez firmy Sumitomo, Prysmian i Ericsson [94,95]. Wymagana liczba włókien światłowodowych - najczęściej 4, 8 lub 12 jest sklejona miękkim tworzywem o własnościach zbliżonych do materiału wewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego, nad którym znajduje się cienka, twarda powłoka o sfalowanej powierzchni lub z naklejonymi mikroskopijnymi kulkami szklanymi dla zmniejszenia tarcia o ścianki tub (rys. 28-29). Pokrycie jednostki wykonuje się z tworzyw utwardzanych promieniowaniem ultrafioletowym.

Kable „puste” są w Polsce rzadko używane, na ogół w budynkach biurowych.

Kable „puste” stacyjne lub kanałowe instaluje się bez włókien, a jednostki światłowodowe wciąga później pneumatycznie lub mechanicznie za pomocą nici pociągowych. Reklamowane zalety tego rozwiązania to unikanie narażania włókien światłowodowych na naprężenia mechaniczne podczas wciągania kabla do kanalizacji i innych robót montażowych oraz regulowanie liczby i rodzaju włókien stosownie do potrzeb, włącznie z możliwością wyciągnięcia jednostki z tuby i wymiany na inną.



Rys. 28. Przekrój 4-włóknowej jednostki EPFU Ø1 mm wciąganej do kabli pustych.



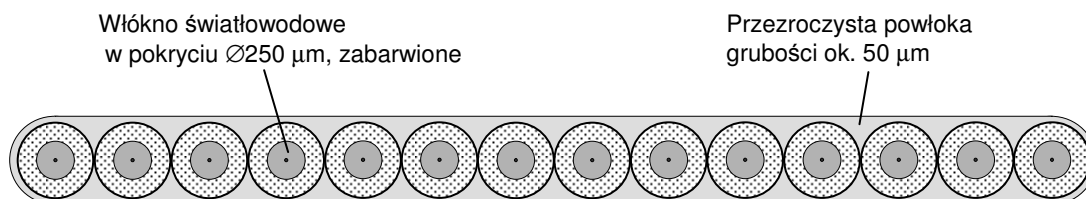
Rys. 29. Fotografia EPFU wykonana skanującym mikroskopem elektronowym (Pirelli).

Faktycznie jednostka jest rozciągana w czasie wciągania, szczególnie wciągania mechanicznego do tuby kabla ułożonego ze zgięciami. Po zakończeniu wciągania pozostaje resztkowe obciążenie, które można skompensować skróceniem włókien pod wpływem sił wytwarzanych przez kurczącą się po utwardzeniu powłokę jednostki. Nie ma natomiast zewnętrznych sił ściskających, za wyjątkiem zakrzywionych odcinków kabla.

## 2.11. Taśmy światłowodowe

Taśma (wstążka) światłowodowa to zespół ułożonych równolegle w jednej płaszczyźnie włókien światłowodowych w pokryciach pierwotnych, kolorowanych i połączonych w całość cienką, łatwo usuwalną powłoką z przezroczystego tworzywa. Do tego celu służy przeważnie polimer akrylowy utwardzany promieniowaniem ultrafioletowym, podobny do używanego na zewnętrzną warstwę pokrycia pierwotnego włókien światłowodowych [96] i odznaczający się względnie wysoką sztywnością ( $E \approx 200-3000$  MPa) oraz gładką powierzchnią.

Budowę typowej taśmy dla kabli liniowych przedstawia rys. 30, a kabla tubowego z taśmami rys. 31. Produkowane są taśmy o liczbie włókien od 2 (dla kabli do sieci FTTH) do 24 (dla kabli liniowych o wysokich pojemnościach). Kable kanałowe z taśmami światłowodowymi w tubie centralnej wprowadziła w 1978 r. amerykańska firma AT&T.



Rys. 30. 12-włóknowa taśma światłowodowa w przekroju. Zachowane proporcje wymiarów.

Główne zalety kabli z taśmami światłowodowymi to bardzo gęste upakowanie włókien w ośrodku, łatwa ich identyfikacja i szybkie wykonywanie złączy spawanych przelotowych, gdyż za pomocą specjalnych narzędzi oraz spawarki łączy się kompletne taśmy. Taśmy umieszczane są luźno w tubach centralnych lub rozetach, najczęściej o dużych przekrojach, gdyż typowa taśma 12-włóknowa ma szerokość 3,2 mm. Kabli taśmowych nigdy nie zastosowano w Polsce. Są rozpowszechnione głównie w USA i w krajach azjatyckich.

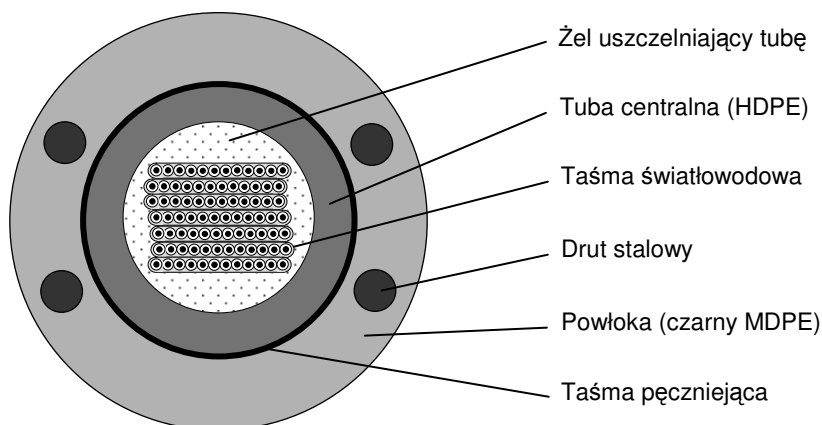
Mechaniczne warunki pracy włókna w taśmie są trudniejsze niż pojedynczego włókna umieszczonego w tubie luźnej:



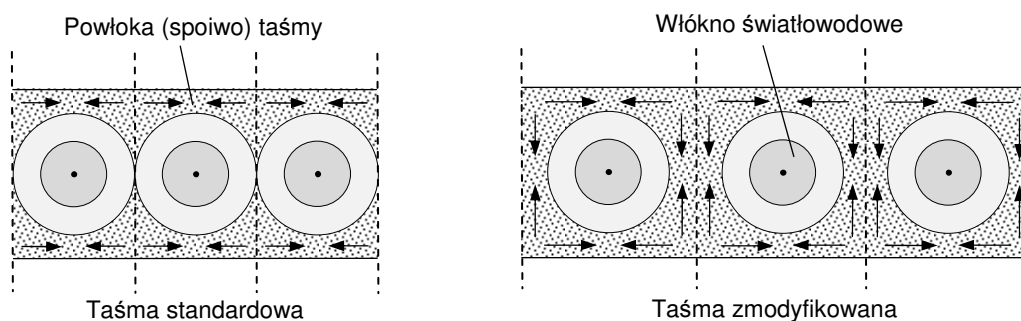
1. Taśma nie zgina się w kierunku poprzecznym i jedyny sposób uzyskania nadmiaru długości to sfalowanie. Otrzymany tak nadmiar długości włókien jest mniejszy niż ten zapewniany przez skręt spiralny, szczególnie w okrągłej tubie, której część przekroju jest niedostępna dla ułożenia pakietu taśm a amplituda sfalowania ograniczona.
2. Zaobserwowano, że wszystkie poza skrajnymi włókna światłowodowe umieszczone w taśmie wykazują kilkukrotny wzrost PMD w porównaniu do tych samych włókien testowanych indywidualnie [73,74], szczególnie, jeśli taśmę nawinięto na szpulę.

Analiza rozkładu naprężeń mechanicznych wykonana w pracy [74] wykazała, że skurcz powłoki taśmy powoduje dociskanie do siebie włókien światłowodowych wzdłuż osi poziomej na rys. 30. Włókna w taśmie są ułożone bez odstępów, nie ma pionowych „mostków” z materiału powłoki i pochodzących od nich sił ściskających w kierunku pionowym. Wyjątkiem są włókna boczne, ściskane prawie ze wszystkich stron przez powłokę. Ułożenie taśm w ośrodku kabla w pakiet (rys. 31) poddawany zginaniu lub zginaniu powoduje powstawanie bocznych sił ściskających taśmy, które zwiększają PMD włókien. PMD włókien wewnętrznych może być w temperaturze pokojowej 3-4-krotnie wyższa niż włókien bocznych, szczególnie, kiedy taśma lub kabel są zwinięte na szpuli lub bębnie [73].

Opisany problem można usunąć wprowadzając między włókna odstępów równe podwójnej grubości powłoki (rys. 32), co zapewni symetryczny rozkład nacisków wywieranych przez kurczącą się powłokę na włókna wewnętrzne. Oprócz sił starających się zwęzić taśmę, będą działały zbliżone siły starające się ją spłaszczyć, a włókno będzie ściskane identyczną siłą w obu kierunkach. Szerokość taśmy z powłoką grubości 0,05 mm wzrośnie jednak o prawie 40%: z 3,2 mm do 4,3 mm dla taśmy 12-włóknowej; również usuwanie powłoki w czasie prac instalacyjnych będzie bardziej pracochłonne.



Rys. 31. Kabel 84-włóknowy z taśmami światłowodowymi w tubie centralnej.



Rys. 32. Porównanie warunków pracy włókien wewnętrznych w taśmach: standardowej oraz zmodyfikowanej dla ograniczenia PMD. Strzałki pokazują kierunki naprężeń w powłoce.

## 3. Modowa dyspersja polaryzacyjna (PMD)

### 3.1. Mechanizm PMD

#### 3.1.1. Przyczyny powstawania PMD

PMD stanowi jedyny rodzaj dyspersji modowej występujący w jednomodowych włóknach telekomunikacyjnych, w których promieniowanie o długości fali wyższej od fali odcięcia  $\lambda_{cc}$  propagowane jest wyłącznie w modzie podstawowym oznaczanym jako  $HE_{11}$  lub  $LP_{01}$ . Definicje i metody pomiaru tego parametru znajdują się m.in. w zaleceniu ITU-T G.650 [97] oraz przygotowywanym do publikacji dokumencie IEC 61282-9 [98]. Odkrycie PMD i eksperymentalne potwierdzenie jej szkodliwego wpływu było zaskoczeniem dla użytkowników sieci światłowodowych [8,9], mimo że już wykonywane w latach 1978-88 doświadczenia z budową czujników światłowodowych i koherentną detekcją promieniowania w systemach transmisyjnych dostarczyły wielu danych o niestabilności polaryzacji promieniowania rozchodzącego się w typowych włóknach jednomodowych.

Mod podstawowy  $HE_{11}$  rozkłada się na dwa mody polaryzacyjne o prostopadłej polaryzacji liniowej, zorientowanej w osiach X i Y prostopadłych do osi włókna światłowodowego [98-101]. W idealnych warunkach mody polaryzacyjne są zdegenerowane: oba rozchodzą się z identyczną prędkością, nie występuje dwójłomność optyczna, nie zachodzi transfer mocy pomiędzy nimi (sprzęganie modów) i stan polaryzacji promieniowania nie zmienia się wzdłuż włókna.

Szkło kwarcowe używane do produkcji włókien telekomunikacyjnych jest materiałem amorficznym, który nie wykazuje naturalnej dwójłomności optycznej, spotykanej w niektórych materiałach krystalicznych, takich jak znany w przemyśle optycznym spat islandzki - romboedryczna odmiana węglanu wapniowego ( $CaCO_3$ ). Dwójłomność, czyli różnica współczynników załamania światła dla dwóch prostopadłych polaryzacji liniowych może być wymuszona przez naprężenie mechaniczne, spowodowane eliptycznością włókna szklanego, niejednorodnością materiału, naciskiem wywieranym przez eliptyczne lub niecentryczne pokrycie ochronne, stykiem włókna ze ścianką tuby itd.

Jednomodowe włókno światłowodowe o idealnie okrągłym przekroju, wykonane z jednorodnego i izotropowego materiału oraz pozbawione naprężeń mechanicznych w kierunkach innych niż osiowy jest wolne od dwójłomności optycznej. Spełnienie tych wymagań jest w praktyce niemożliwe i można tylko mówić o utrzymywaniu odstępstw od nich w założonych granicach tolerancji. Odstępstwa te skutkują [5,98,100]:

1. Zróżnicowaniem stałych propagacji dla ortogonalnych modów polaryzacyjnych  $\beta_x$  i  $\beta_y$  w związku z brakiem symetrii osiowej falowodu – powstaje dwójłomność geometryczna,
2. Powstawaniem naprężeń mechanicznych w materiale tworzącym rdzeń włókna i dwójłomności optycznej wymuszonej mechanicznie.

Stałą dwójłomności optycznej włókna światłowodowego  $B_F$  opisuje zależność [5]:

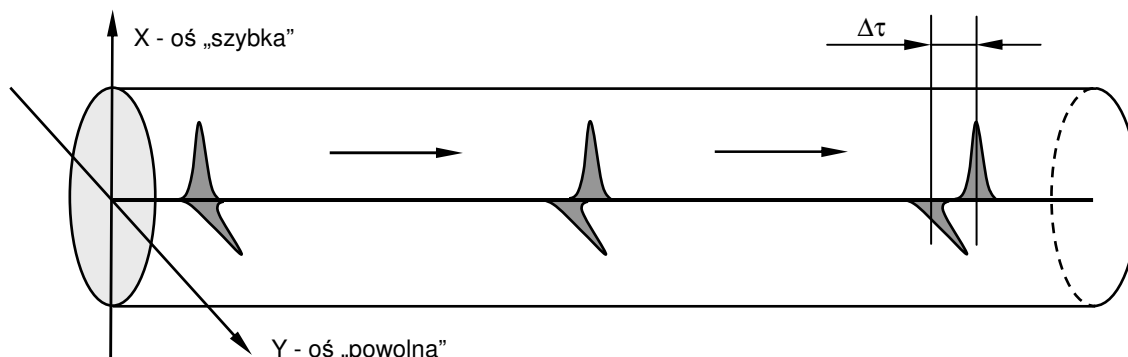
$$B_F = n_x - n_y = \frac{(\beta_x - \beta_y)}{2\pi} \lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\beta \quad (30)$$

w której  $B_F$  to dwójłomność modowa włókna,  $n_x$  i  $n_y$  – współczynniki załamania dla promieniowania o polaryzacji liniowej w osiach X i Y,  $\beta_x$  i  $\beta_y$  – stałe propagacji w osiach X i Y,  $\lambda$  - długość fali promieniowania w próżni.

Orientacja osi X i Y spełnia warunek:  $[\beta_x - \beta_y] = \max$ . Oś o niższych wartościach  $\beta$  i  $n$  jest nazywana osią „szybką” (ang. *Fast Axis*), a prostopadła do niej osią „powolną” (ang. *Slow Axis*). W przypadku typowych zaburzeń geometrii włókna, na przykład często spotykanej eliptyczności rdzenia, prostopadłe osie X i Y odpowiadają osiom symetrii jego kształtu.

Dwójłomność powoduje zróżnicowanie czasów propagacji składowych sygnału różniących się polaryzacją o  $\Delta\tau$  po przebyciu we włóknie drogi równej  $z$  (rys. 33):

$$\Delta\tau = \frac{d(\Delta\beta)}{d\omega} z = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} z \quad (31)$$



Rys. 33. Wpływ dwójłomności optycznej włókna jednomodowego na propagację impulsu optycznego. Impuls na wejściu światłowodu ma płaszczyznę polaryzacji obróconą o  $45^\circ$  względem osi X i Y, pobudzając dwa tryby polaryzacyjne w identycznym stopniu. Pominięto mieszanie trybów polaryzacyjnych (rys. 37).

Ważnym parametrem opisującym propagację promieniowania we włóknie światłowodowym z dwójłomnością optyczną jest droga zdudnienia (ang. *Beat Length*): długość włókna, na której różnica faz pomiędzy promieniowaniem o polaryzacji liniowej zgodnej z osią X i Y zmienia się o  $2\pi$  [5]:

$$L_B = \frac{\lambda}{B_F} = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (32)$$

Zależność pomiędzy  $L_B$  a  $B_F$  jest wykorzystywana do reflektometrycznych pomiarów dwójłomności i PMD przez obserwację zmian amplitudy jednej składowej polaryzacyjnej promieniowania rozproszonego wstecznie. Włókna telekomunikacyjne mają  $L_B = 0,1-100$  m.

Całkowita dwójłomność modowa włókna światłowodowego jest sumą algebraiczną dwóch składowych [5] odzwierciedlających efektywnie, uśrednione odstępstwa od warunków wymienionych w drugim akapicie: geometrycznej (G), wywołanej brakiem symetrii promieniowej obszaru, w którym następuje propagacja promieniowania i mechanicznej (M), spowodowanej przez naprężenia mechaniczne wewnątrz materiału w tym obszarze:

$$B_F = M + G \quad (33)$$

Składowe M i G, określane również w polskiej literaturze jako dwójłomność „materiałowa” i „falowodowa” [100] mogą mieć przeciwne znaki i znosić się; obie są losowo zmienne w funkcji położenia wzdłuż włókna. W przypadku włókien telekomunikacyjnych o niskiej dwójłomności składowa G jest zasadniczo określona przez proces produkcyjny włókna światłowodowego i pozostaje względnie niezmienna w czasie jego pracy, natomiast składowa M zależy w dużym stopniu od sił zewnętrznych działających na to włókno, zmieniając się w funkcji czasu, temperatury, sposobu ułożenia kabla itd.

Specjalne włókna jednopolarizacyjne znane jako Bow-Tie i PANDA, w których przez wstawienie segmentów wykonanych ze szkła o niższym niż krzemionka współczynniku rozszerzalności termicznej, najczęściej  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  wprowadzono silne naprężenia mechaniczne o stałej orientacji i wysoką dwójłomność mechaniczną M nie są przedmiotem tej pracy.

### 3.1.2. Geometryczne indukowanie dwójłomności optycznej

Podstawowym powodem powstawania składowej geometrycznej dwójłomności we włóknie telekomunikacyjnym o ściśle kontrolowanych parametrach optogeometrycznych jest eliptyczność rdzenia, normalnie nie podawana w specyfikacjach jednomodowych włókien światłowodowych. Artykuł przeglądowy Kaminowa [5], którego autor powołuje się na szereg innych prac, w tym [2] zawiera przybliżoną zależność dla eliptycznego włókna o profilu skokowym, przedstawioną tutaj w zmodyfikowanej formie:

$$G \approx C \frac{\lambda \left[ 1 - \left( \frac{d_y}{d_x} \right)^2 \right] \Delta^{1,5}}{d} = C_k \left[ 1 - \left( \frac{d_y}{d_x} \right)^2 \right] \Delta^2 \quad (34)$$

gdzie:  $\Delta = (n_2 - n_1)/n_2$  – różnica współczynników załamania rdzenia i płaszczka obliczana podobnie jak we wzorze (1), lecz nie podawana w procentach,  $d$  – średnia średnica rdzenia,  $d_x$  i  $d_y$  – mniejsza i większa średnica eliptycznego rdzenia włókna. Współczynnik  $C$  zależy od znormalizowanej częstości promieniowania  $V$ :

$$V = \frac{\pi d (n_2 - n_1)^2}{\lambda} \quad (35)$$

i osiąga wartość bliską -0,05 na granicy odcięcia modów wyższego rzędu ( $V \approx 2,405$ ) (rys. 34), co we włóknie Corning SMF-28 następuje dla  $\lambda = 1332$  nm. W zakresie długości fal używanych w telekomunikacji (1260-1650 nm)  $C$  monotonicznie rośnie do zera.

$C_k$  to współczynnik  $C$  skorygowany według formuły:

$$C_k = C \frac{2\sqrt{2}\pi}{V} \quad (36)$$

Po wprowadzeniu jako parametru eliptyczności rdzenia włókna  $e$ :

$$e = \sqrt{1 - \left( \frac{d_y}{d_x} \right)^2} \quad (37)$$

zależność (34) przyjmuje następującą postać:

$$G \approx C_k e^2 \Delta^2 \quad (38)$$

Przyjmując następujące parametry włókna Corning SMF-28:  $\lambda = 1550$  nm,  $C = -0,020$ ,  $V = 2,066$ ,  $d = 8,3$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0,0036$  oraz  $d_y/d_x = 0,99$  (różnica średnic 1%,  $e = 0,141$ ) otrzymujemy:  $C' = 0,0860$  i  $G = -2,22 \times 10^{-8}$ . Dla najwyższej spotykanej w praktyce eliptyczności  $d_y/d_x = 0,9$  (różnica średnic 10%,  $e = 0,436$ ) dostajemy  $G = -2,12 \times 10^{-7}$ .

Różnica grupowych czasów propagacji (ang. *Differential Group Delay* - DGD)  $\Delta\tau$  modów polaryzacyjnych o polaryzacji liniowej odpowiadającej osiom „szybkiej” i „powolnej” wynosi:

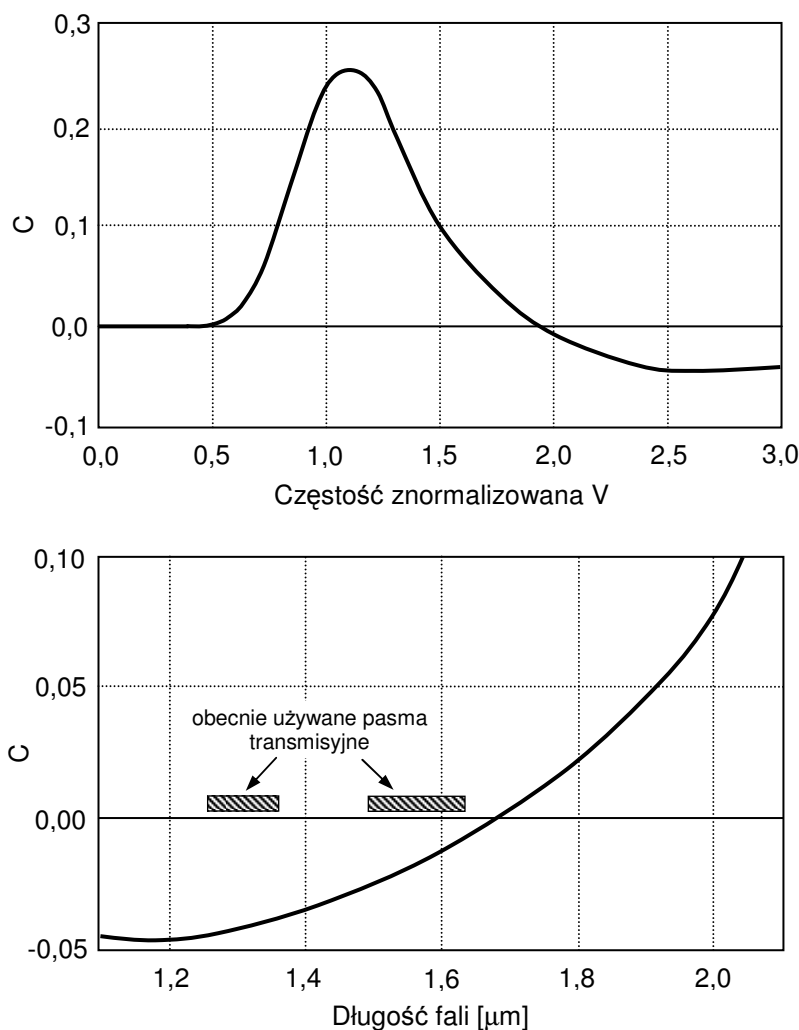
$$\Delta\tau = \frac{G}{c} z \quad (39)$$

gdzie  $c$  to prędkość światła w próżni ( $2,99793 \times 10^8$  m/s). Przyjmując obliczone wcześniej wartości  $G = -2,22 \times 10^{-8}$  i  $G = -2,12 \times 10^{-7}$  oraz ignorując mieszanie modów polaryzacyjnych dostajemy DGD równe odpowiednio 0,074 ps/km i 0,707 ps/km. Wyniki te realistycznie opisują własności włókien światłowodowych produkowanych obecnie i około 1997 r., jeśli założymy, że włókna są skutecznie chronione od zewnętrznych oddziaływań mechanicznych i udział składowej  $M$  w całkowitej dwójłomności można pominąć.

W [59] przedstawiono podobną zależność dla włókna o przesuniętej dyspersji (DSF, ITU-T G.653) i  $\lambda = 1550$  nm, którą po drobnym przekształceniu można sformułować jako:

$$\Delta\tau \approx 0,4 \frac{ne^2\Delta^2}{c} z \quad (40)$$

gdzie  $n$  – współczynnik załamania materiału rdzenia ( $\approx 1,48$ ). W porównaniu do wzorów (34-38) daje ona nieco wyższe wartości DGD. Z uwagi na skąpe dane o parametrach geometrycznych włókien G.653 i fakt, że ich profil refrakcyjny jest inny od skokowego, który przyjęto w pracach [2,5] nie można przeprowadzić ścisłego porównania.



Rys. 34. Zależność współczynnika  $C$  od częstości znormalizowanej  $V$  (rys. górny) [2] i wynikająca z nich charakterystyka  $C(\lambda)$  dla włókna Corning SMF-28 (rys. dolny).

### 3.1.3. Mechaniczne indukowanie dwójłomności optycznej

Naprężenie mechaniczne wywołuje odkształcenie struktury materiału w odpowiednim kierunku, przy czym występują zarówno zmiany odległości międzyatomowych jak i odkształcenia samych atomów. W efekcie, liczba atomów Si, Ge i O przypadających na jednostkę drogi w danym materiale i intensywność ich oddziaływania z polem elektromagnetycznym wyrażona pośrednio przez współczynnik załamania światła  $n$ , stała w materiale wolnym od naprężeń, staje się zależna od kierunku.

### 3.1.3.1. Współczynnik elastoptyczny dwójłomności

Wymuszoną dwójłomność optyczną w materiale bezpostaciowym opisuje wzór [2,102]:

$$B = n_x - n_y = R(\sigma_x - \sigma_y) \quad (41)$$

gdzie: B – dwójłomność wymuszona przez naprężenia mechaniczne,  $n_x$  i  $n_y$  – współczynniki załamania dla promieniowania o polaryzacji liniowej w osiach X i Y,  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  – średnie naprężenia mechaniczne w osiach X i Y, R – współczynnik elastoptyczny materiału.

Współczynnik elastoptyczny dwójłomności optycznej R czystego szkła kwarcowego jest funkcją długości fali promieniowania [102-104]:

$$R(\lambda) = R(\lambda_0) \frac{n_{\lambda_0}}{n_\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda_0^2} \cdot \frac{\lambda_0^2 - \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} \cdot \frac{\lambda^2 - \lambda_2^2}{\lambda_0^2 - \lambda_2^2} \quad (42)$$

gdzie:  $R(\lambda)$  – poszukiwany współczynnik R odpowiadający długości fali  $\lambda$ ,  $R(\lambda_0)$  - współczynnik R wyznaczony dla długości fali odniesienia  $\lambda_0$ ,  $n_{\lambda_0}$  – współczynnik załamania szkła dla długości fali  $\lambda_0$ ,  $n_\lambda$  – współczynnik załamania szkła dla długości fali  $\lambda$ ,  $\lambda_1 = 121,5$  nm,  $\lambda_2 = 6900$  nm. Wartości i wykres  $R(\lambda)$  przedstawiono w tabeli 12 i na rys. 35.

Tabela 12. Współczynniki: załamania światła i elastoptyczny dwójłomności optycznej R szkła kwarcowego w funkcji długości fali.

$\lambda$ nm	$n(\lambda)$ ----	$R(\lambda)$ $\times 10^{-6}/\text{MPa}$
248	1,5090	-4,147
400	1,4701	-3,557
633	1,4570	-3,365
850	1,4525	-3,296
1000	1,4504	-3,263
1310	1,4468	-3,201
1550	1,4440	-3,151
1650	1,4428	-3,129
1800	1,4409	-3,094

Wartości R podawane w literaturze, najczęściej otrzymane z pomiarów dla  $\lambda = 633$  nm różnią się w granicach  $\pm 8\%$ ; 4-cyfrowe liczby w tabeli mają na celu zilustrowanie kierunku i szybkości zmian. Pomiarów włókien światłowodowych wykazały, że domieszka  $\text{GeO}_2$  wprowadzana do szkła kwarcowego dla zmiany współczynnika załamania tylko minimalnie zmienia charakterystykę  $R(\lambda)$ [104]. Nachylenie charakterystyki  $dR/d\lambda$  jest w zakresie długości fal 1250-1700 nm prawie stałe i wynosi około  $2,1 \times 10^{-10}/\text{MPa}\cdot\text{nm}$  ( $2,1 \times 10^{-7}$  m/N).

Różnicowe opóźnienie transmisyjne (DGD) indukowane przez prostopadłe do osi włókna naprężenia mechaniczne określa zależność:

$$\Delta\tau = \frac{RL}{c} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (43)$$

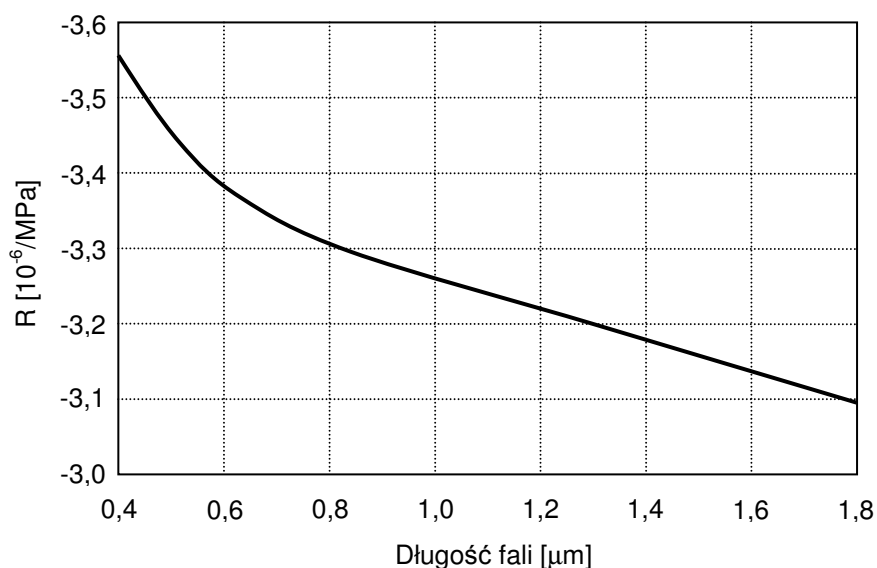
Zakładając:  $\lambda = 1550$  nm,  $R = -3,15 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  oraz  $(\sigma_x - \sigma_y) = 1$  MPa, DGD indukowane przez naprężenie osiąga 10,5 ps/km. Własności transmisyjne włókna światłowodowego są potencjalnie łatwo pogarszane przez naciski zewnętrzne. Uwzględnienie zjawiska mieszania

modów polaryzacyjnych (rozdział 3.1.4) prowadzi do mającego większe znaczenie praktyczne wzoru na współczynnik dyspersji polaryzacyjnej indukowanej mechanicznie:

$$k_{PMDM} = \frac{R}{c} \sqrt{\frac{h}{1000}} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (44)$$

w którym  $h$  to długość drogi korelacji wyrażona w [m].

Chcąc ograniczyć indukowaną PMD poniżej 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  i przyjmując 10-krotną redukcję PMD w wyniku mieszania modów ( $h = 10$  m), otrzymujemy, że dozwolone naprężenie poprzeczne  $\sigma_x$  w rdzeniu włókna nie może przekroczyć 0,18 MPa.



Rys. 35. Charakterystyka  $R(\lambda)$  szkła kwarcowego wyznaczona z zależności (42)[102].

Ochrona włókien światłowodowych przed mechanicznym indukowaniem PMD wymaga:

- mechanicznej separacji włókna w pokryciu pierwotnym od pozostałych elementów kabla,
- równomiernego, quasi-hydrostatycznego rozłożenia ewentualnych nacisków na całym obwodzie włókna szklanego, by uniknąć powstawania naprężeń poprzecznych.

Z innych efektów polaryzacyjnych związanych z oddziaływaniami mechanicznymi istotny jest obrót płaszczyzny polaryzacji światła spowodowany mechanicznym skręceniem włókna światłowodowego. Badania włókien telekomunikacyjnych [104,105] wykazały, że kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji spowodowanego powstałymi wówczas naprężeniami wynosi około 7% kąta mechanicznego skręcenia włókna. Patrz rozdział 3.1.7.

### 3.1.3.2. Powstawanie PMD wskutek naprężeń wewnętrznych włókna

Według [106] dodatek 1% mol.  $\text{GeO}_2$  do szkła  $\text{SiO}_2$  zwiększa współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ ) o  $6,5 \times 10^{-8}/\text{K}$ . Przyjmując następujące dane włókna NZDSF typu LEAF:  $\Delta = 0,68\%$ , maksymalna zawartość  $\text{GeO}_2$ : 7% mol., otrzymujemy dla szkła w środkowej części rdzenia  $\alpha_R = 10,05 \times 10^{-7}/\text{K}$ . Analogiczne dane włókna G.652 typu SMF-28 to  $\Delta = 0,36\%$ , 5% mol.  $\text{GeO}_2$  i  $\alpha_R = 8,75 \times 10^{-7}/\text{K}$ .

Temperatura równowagi  $T_R$ , przy której naprężenia wewnętrzne są bliskie zero jest dla włókna ze szkła  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$  szacowana na  $+1000^\circ\text{C}$ . Na rdzeń włókna działają siły rozciągające wywierane przez płaszcz, który podczas chłodzenia wyciąganego włókna kurczy się około 2-krotnie mniej niż główny segment rdzenia. Powstałe w rdzeniu naprężenie

promieniowe można oszacować według zależności sformułowanej w pracy [106] dla włókna o profilu skokowym:

$$\sigma_r = \frac{(T_R - T) \cdot E \cdot (\alpha_R - \alpha_P)}{1 - \nu} \left[ 1 - \left( \frac{a}{r_0} \right)^2 \right] \quad (45)$$

gdzie:  $T$  - temperatura pracy włókna,  $T_R$  - temperatura równowagi,  $\alpha_R$  i  $\alpha_P$  - współczynniki rozszerzalności termicznej rdzenia i płaszczka,  $E$  - moduł sprężystości szkła,  $\nu$  - współczynnik Poissona,  $a$  - promień rdzenia,  $r_0$  - promień płaszczka. Przyjmując dla włókna SMF-28:  $T = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_R = +1000^\circ\text{C}$ ,  $E = 73 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,17$ ,  $\alpha_R = 8,75 \times 10^{-7}/\text{K}$ ,  $\alpha_P = 5,5 \times 10^{-7}/\text{K}$ ,  $a = 4,15 \mu\text{m}$ ,  $r_0 = 62,5 \mu\text{m}$  otrzymujemy  $\sigma_r = 29,6 \text{ MPa}$ . Podobne obliczenie dla włókna LEAF daje  $\sigma_r = 41,4 \text{ MPa}$ .

Wymienione naprężenia powodują deformację szkła o 0,043% (SMF-28) i 0,060% (LEAF), nie stanowiąc zagrożenia dla niezawodności włókna. Asymetryczny rozkład naprężeń przy braku osiowej symetrii rdzenia wprowadza jednak naprężenie różnicowe, w przybliżeniu proporcjonalne do eliptyczności rdzenia  $e$  określonej przez wzór (37):

$$\sigma_x - \sigma_y \approx e \frac{(T_R - T) \cdot E \cdot (\alpha_R - \alpha_P)}{1 - \nu} \left[ 1 - \left( \frac{a}{r_0} \right)^2 \right] \quad (46)$$

i związaną z nim wymuszoną mechanicznie dwójłomność optyczną szkła zgodnie z opisem zamieszczonym w rozdziale 3.1.3.1. To podwyższa PMD włókna.

### 3.1.3.3. Indukowanie dwójłomności i PMD wskutek nawijania włókna.

Jednorodne zginanie jednomodowego włókna światłowodowego na dużej długości, wywołane jego nawinięciem na szpuli lub skręcaniem ośrodka optycznego w kablu wprowadza naprężenia, dwójłomność i PMD o wartości opisywanej wzorem Ulricha [107], potwierdzonym pomiarami wykonanymi przez Gisina i in. [108]:

$$k_{PMD} = \frac{k}{r_g^2} \quad (47)$$

gdzie:  $r_g$  - promień zginania włókna światłowodowego,  $k$  - współczynnik zależny od materiału i średnicy włókna [107] oraz jego profilu refrakcyjnego i drogi korelacji.

Artykuł [108] podaje wartość  $k$  dla włókna G.652 o profilu bez obniżenia wynoszącą około  $1700 \text{ ps} \cdot \text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$ , która jest zdaniem autora zawyżona. Zwinięcie włókna na promieniu  $140 \text{ mm}$  typowym dla szpuli transportowej powinno wprowadzić PMD równe  $0,085 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , tymczasem wyniki pomiarów wykonanych w ŁŁ i zamieszczonych w rozdziale 6.4 są często niższe. Na podstawie zależności w pracy [107] można określić, że indukowana PMD zmienia się w szerokim zakresie w funkcji drogi korelacji włókna według wzoru:

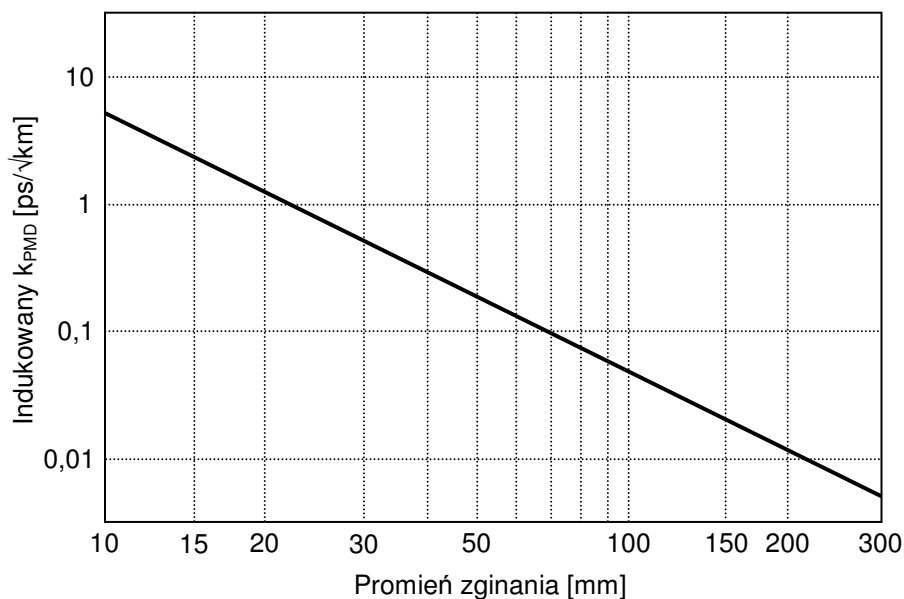
$$k_{PMD} = \frac{n_2^3 (p_{11} - p_{12}) (1 - \nu) r_1^2}{2c r_g^2} \sqrt{\frac{h}{1000}} \quad (48)$$

w którym:  $n_2$  - współczynnik załamania światła w rdzeniu włókna,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  - współczynniki elastooptyczne szkła ( $p_{11} - p_{12} \approx -0,15$  dla  $\text{SiO}_2$ ),  $c$  - prędkość światła w próżni,  $\nu$  - współczynnik Poissona ( $\approx 0,17$  dla  $\text{SiO}_2$ ),  $r_1$  - średnica włókna ( $125 \times 10^{-6} \text{ m}$ ),  $r_g$  - promień zginania włókna,  $h$  - droga korelacji [m]. Wartość  $k$  obliczona dla typowych parametrów włókna G.652 oraz  $h = 10 \text{ m}$  wynosi  $363 \text{ ps} \cdot \text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$ . Zależność (47) ilustruje rys. 36.

Wzrost PMD może być pierwszym szkodliwym objawem nadmiernego skrócenia tuby ściślej lub luźnej (patrz rozdział 2.6.4.1, rys. 15 i tabela 12), występującym wcześniej niż



wzrost tłumienności lub pękanie włókien wskutek naprężeń mechanicznych. Kwestie te rozpatrzono w rozdziałach 2.3.1.3 i 4.5.2.



Rys. 36. PMD wprowadzana przez zginanie włókna G.652.  $k = 500 \text{ ps}\cdot\text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$ .

### 3.1.4. Wpływ mieszania modów polaryzacyjnych

Parametrem opisującym dyspersję polaryzacyjną jest różnica czasów propagacji promieniowania o dwóch podstawowych, prostopadłych stanach polaryzacji (PSP – ang. *Principal States of Polarization*), których orientacja jest w pewnym zakresie niezależna od długości fali promieniowania. Należy zaznaczyć, że orientacja tych PSP zmienia się wzdłuż każdego rzeczywistego włókna w przypadkowy sposób.  $\Delta\tau(t,\lambda)$  opisuje chwilowy wynik działania dyspersji polaryzacyjnej na propagację promieniowania o określonej długości fali.

W krótkim, jednorodnym włóknie o stałej dwójłomności bez sprzęgania modów różnica czasów propagacji modów polaryzacyjnych w podstawowych stanach polaryzacji (DGD,  $\Delta\tau$ ) rośnie proporcjonalnie do jego długości i różnicy prędkości grupowych modów (rys. 33,37):

$$\Delta\tau = \left( \frac{1}{v_{gx}} - \frac{1}{v_{gy}} \right) L = \left( \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} \right) L = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} L = p \cdot L \quad (49)$$

gdzie:  $\Delta\tau$  - względne opóźnienie modów polaryzacyjnych,  $v_{gx}$  i  $v_{gy}$  – prędkości grupowe modów o polaryzacji liniowej w osi x i y,  $\beta_x$  i  $\beta_y$  – stałe propagacji modów o polaryzacji w osiach x i y,  $\Delta\beta$  - dwójłomność optyczna włókna światłowodowego, L - długość włókna,  $\omega$  - pulsacja fali świetlnej ( $\omega = 2\pi c/\lambda$ ), p - współczynnik dyspersji polaryzacyjnej.

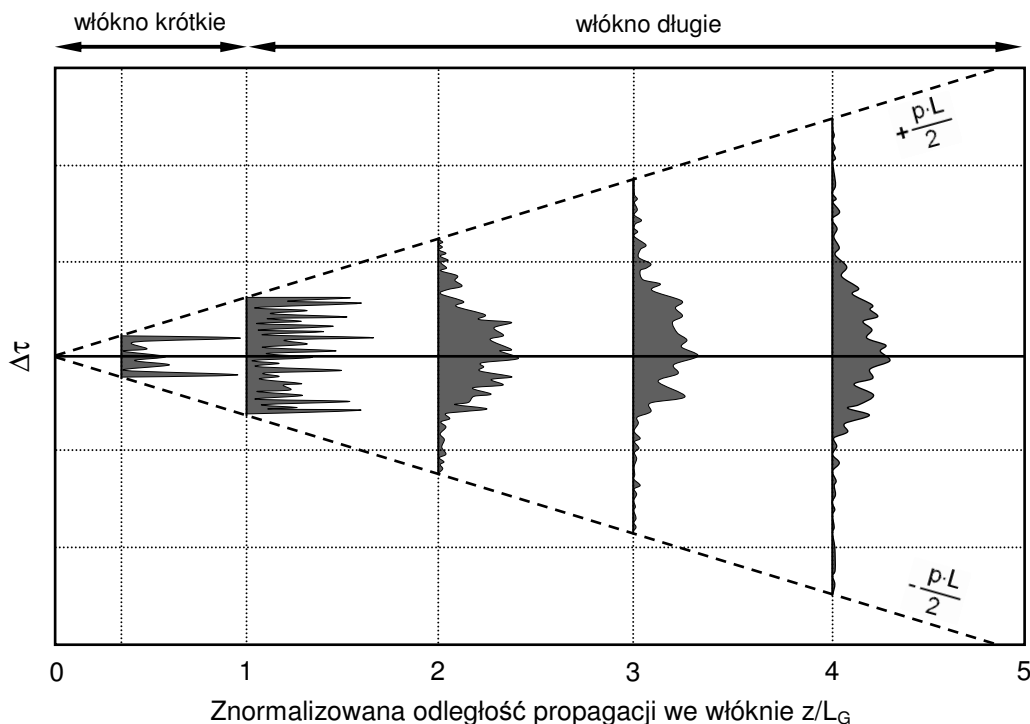
Rzeczywiste włókno światłowodowe cechuje niewielka, płynna zmienność wymiarów, np. eliptyczności i niecentryczności rdzenia wzdłuż rozpatrywanego odcinka oraz pewna liczba quasi-punktowych defektów budowy powodujących niewielką zmianę polaryzacji promieniowania. Są to m.in. niejednorodności zawartości domieszek dodawanych do szkła tworzącego rdzeń, wtrącenia obcych materiałów i otaczające je strefy naprężeń mechanicznych, mikroskopijne bąbelki gazów uwięzione w szkłe rdzenia, miejsca lokalnie odkształcone w czasie wyciągania włókna wskutek wibracji wieży wyciągowej itd. Innym źródłem zaburzeń są wszelkie złącza światłowodowe i siły zewnętrzne działające lokalnie na włókno, na przykład w miejscach krzyżowania się włókien w luźnej tubie. Degradacja żelu wypełniającego luźną tubę lub rozetę prowadzi często do wytrącania kropelek oleju lub

wody, która w niskiej temperaturze tworzy twarde kryształki lodu; takie niejednorodności wprowadzają mikrozgięcia włókien światłowodowych i wzmożone sprzężanie modów.

W każdym punkcie tego rodzaju następuje transfer części mocy promieniowania o określonej liniowej polaryzacji podstawowej do polaryzacji prostopadłej i odwrotnie, określane jako sprzężanie modów polaryzacyjnych.

W efekcie, odsetek wprowadzonej na początku włókna światłowodowego składowej impulsu o danej polaryzacji podstawowej, który zachowa tę samą polaryzację i opóźnienie transmisyjne po przejściu odcinka włókna maleje wykładniczo z długością tego odcinka. Stanem najbardziej prawdopodobnym w długim włóknie jest wielokrotna zmiana polaryzacji w obu kierunkach i opóźnienie transmisyjne o wartości pośredniej pomiędzy wartościami charakterystycznymi dla obu modów polaryzacyjnych. Ze wzrostem liczby punktów sprzężania rozkład prawdopodobieństwa opóźnienia transmisyjnego zawęża się (rys. 37).

Przykład na rys. 37, dotyczący włókna o stałej dwójłomności pokazuje, że proces mieszania modów polaryzacyjnych zmniejsza zakumulowane po drodze poszerzenie impulsu przesyłanego przez światłowód. Linie oznaczone „ $-pL/2$ ” i „ $+pL/2$ ” pokazują na rys. 37 ekstremalne opóźnienia związane z propagacją w formie modów o polaryzacji „szybkiej” i „powolnej” w porównaniu do średniego czasu propagacji.



Rys. 37. Ewolucja przebiegu wąskiego impulsu (delta Diraca) wraz z odległością propagacji we włóknie światłowodowym o stałej dwójłomności  $B_F$  i z silnym sprzężaniem modów.

Pomiary włókien światłowodowych wykazują, że wzrost średniego rozszerzenia przesyłanego impulsu z długością włókna przestaje być liniowy w przypadku odcinków dłuższych od pewnej długości granicznej, oznaczonej na rys. 37 jako  $L_G$ . Według najbardziej rozpowszechnionego w literaturze modelu [109], długie włókno jednomodowe stanowi szeregowe połączenie wielu odcinków o losowo wybranej wartości i orientacji dwójłomności, których przeciętna długość wynosi  $h$ . Na połączeniach między nimi następuje sprzężanie modów. Parametr  $h$  jest określany jako średnia odległość między punktami sprzężania modów, przy założeniu losowej orientacji dwójłomności w pełnym zakresie kątowym ( $2\pi$ ) i nosi nazwę „drogi korelacji”. Przy  $L \leq h$ , mamy do czynienia z jednorodnym odcinkiem włókna światłowodowego o stałej dwójłomności, dla którego obowiązuje wzór (49).

Długie włókno o  $L \gg h$  składa się z  $m = L/h$  elementarnych odcinków. Zakładając, że każdy z nich ma identyczną dwójłomność i dyspersję impulsu  $\Delta\tau_i$ :

$$\Delta\tau_i = p \cdot h \quad (50)$$

kumulowanie się dyspersji impulsu  $\Delta\tau$  opisuje zależność kwadraturowa:

$$\Delta\tau = \sqrt{\sum_{n=1}^m (p \cdot h)^2} \quad (51)$$

z której otrzymujemy prostą formułę do obliczeń  $\Delta\tau$ :

$$\Delta\tau = p\sqrt{h \cdot L} \quad (52)$$

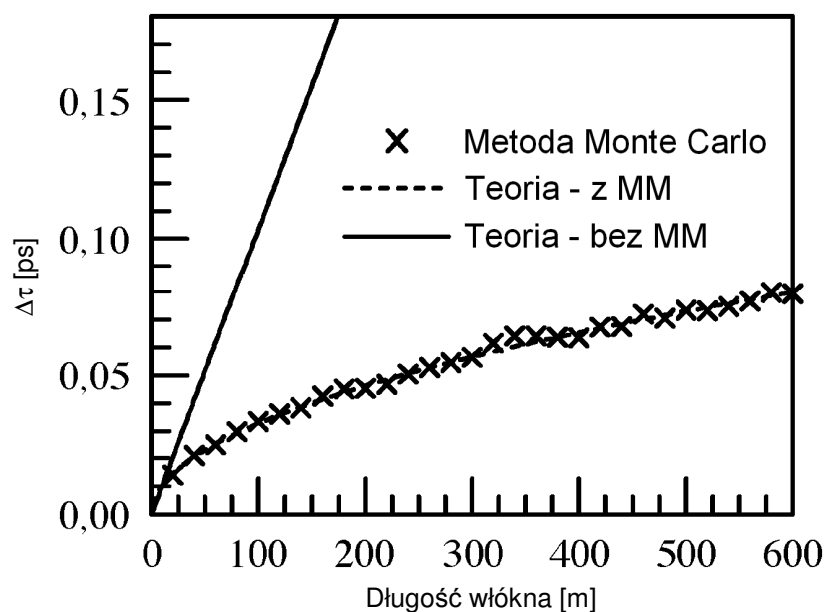
Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (ang. *Probability Density Function* – PDF) dla  $\Delta\tau$  wyraża się wówczas wzorem [98]:

$$PDF(\Delta\tau) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\langle\Delta\tau^2\rangle}} \right) e^{-\tau^2/2\langle\Delta\tau^2\rangle} \quad (53)$$

w którym parametr  $\langle\Delta\tau^2\rangle$  to średnia wartość kwadratu odchylenia opóźnienia transmisyjnego od wartości średniej.

Istnienie granicznej długości włókna  $L_G \approx h$ , na której kończy się proporcjonalny wzrost dyspersji stanowi analogię do dyspersji modowej włókien wielomodowych.

Rys. 38 zaczerpnięty z publikacji [110] przedstawia wynik symulacji komputerowej wzrostu  $\Delta\tau$  z długością włókna wykonanej metodą Monte Carlo, z pseudolosową generacją orientacji dwójłomności kolejnych odcinków elementarnych włókna.



Rys. 38. Wzrost DGD z długością włókna – wyniki obliczeń i symulacji dla stanu bez mieszania modów polaryzacyjnych ( $h = \infty$ ) oraz dla  $h = 10$  m,  $L_B = 5$  m [109].

W publikacjach firmy Corning [109,110] opisujących badania włókien w pokryciu pierwotnym podano  $h = 5-100$  m. Zależność (52) obowiązuje z dobrą dokładnością dla  $L \geq 3h$ . Dane te są sprzeczne z podawaną w wielu dokumentach technicznych odległością

graniczną  $L_G \approx 1$  km. Podczas pomiarów kabli tubowych [111] we włóknach jednomodowych ułożonych prawie swobodnie w kablu obserwowano natomiast  $h = 120-1000$  m, podczas kiedy podobne włókna nawinięte na szpulach miały przeważnie  $h = 2-8$  m.

Pojawienie się dodatkowych punktów sprzęgania modów wskutek oddziaływań zewnętrznych, na przykład mikrozgieć skraca drogę korelacji i zmniejsza PMD włókna. Ten efekt tłumaczy, dlaczego nawinięcie włókna na szpulę, połączone z naciąganiem i dociśnięciem do siebie sąsiednich zwojów tak radykalnie skraca drogę korelacji i redukuje PMD do wartości wielokrotnie niższej niż obserwowana w kablu z luźną tubą, szczególnie centralną, zawierającym identyczne włókno.

### 3.1.5. PMD jako parametr transmisyjny włókna światłowodowego

Chwilowa degradacja jakości sygnału cyfrowego z modulacją intensywności (ang. *Intensity Modulation – Direct Detection*, IM-DD) przesyłanego włóknem światłowodowym jest funkcją różnicowego opóźnienia grupowego DGD, oznaczanego tu jako  $\Delta\tau$ . Posługiwanie się jednakże do opisu własności transmisyjnych włókna lub linii kablowej parametrem  $\Delta\tau(t,\lambda)$  mającym postać macierzy wartości losowo zmiennych jest nie do przyjęcia. Niezbędny jest parametr wyrażany jako pojedyncza liczba opisująca rozkład statystyczny DGD.

Parametrem tym jest PMD definiowana jako:

- **wartość średnia  $\Delta\tau$**  oznaczana jako  $\langle\Delta\tau\rangle$ , lub (rzadziej):
- **wartość skuteczna  $\Delta\tau$**  oznaczana jako  $\sqrt{\langle\Delta\tau^2\rangle}$ .

Określenie PMD według tej definicji wymaga zgromadzenia możliwie dużej liczby wartości DGD zmierzonych w pewnym (możliwie długim) przedziale czasu i dla wielu długości fal w (możliwie szerokim) zakresie, by zgromadzone dane opisywały z akceptowalnym przybliżeniem pełny zakres zmienności DGD danego włókna. W celu ujawnienia pełnego zakresu zmienności DGD podczas pomiaru mogą być w kontrolowany sposób zmieniane również inne warunki fizyczne, na przykład ułożenie próbki włókna lub kabla [112]. W trakcie badań wykonywanych w laboratorium IŁ takim czynnikiem dodatkowymi były wibracje włókien powodowane przez wentylator komory klimatycznej oraz oscylacje temperatury w komorze wokół zadanej wartości.

Badania włókien światłowodowych wykazały, że zmienność DGD w jednomodowych włóknach światłowodowych o nominalnej symetrii osiowej i z silnym sprzęganiem modów polaryzacyjnych jest (z pewnymi wyjątkami) dobrze opisywana przez rozkład statystyczny Maxwella przedstawiony na rys. 39 i 40, w którym funkcja gęstości prawdopodobieństwa (PDF) wyraża się wzorem zależnym od definicji PMD [98]:

(a)  $PMD = \langle\Delta\tau\rangle$ :

$$PDF(\Delta\tau) = \frac{32}{\pi^2} \frac{\Delta\tau^2}{\langle\Delta\tau\rangle^3} e^{-4\Delta\tau^2/\pi\langle\Delta\tau\rangle^2} \quad (54)$$

(b)  $PMD = \sqrt{\langle\Delta\tau^2\rangle}$ :

$$PDF(\Delta\tau) = 3 \left( \sqrt{\frac{6}{\pi}} \right) \frac{\Delta\tau^2}{\langle\Delta\tau^2\rangle^3} e^{-3\Delta\tau^2/2\langle\Delta\tau^2\rangle} \quad (55)$$

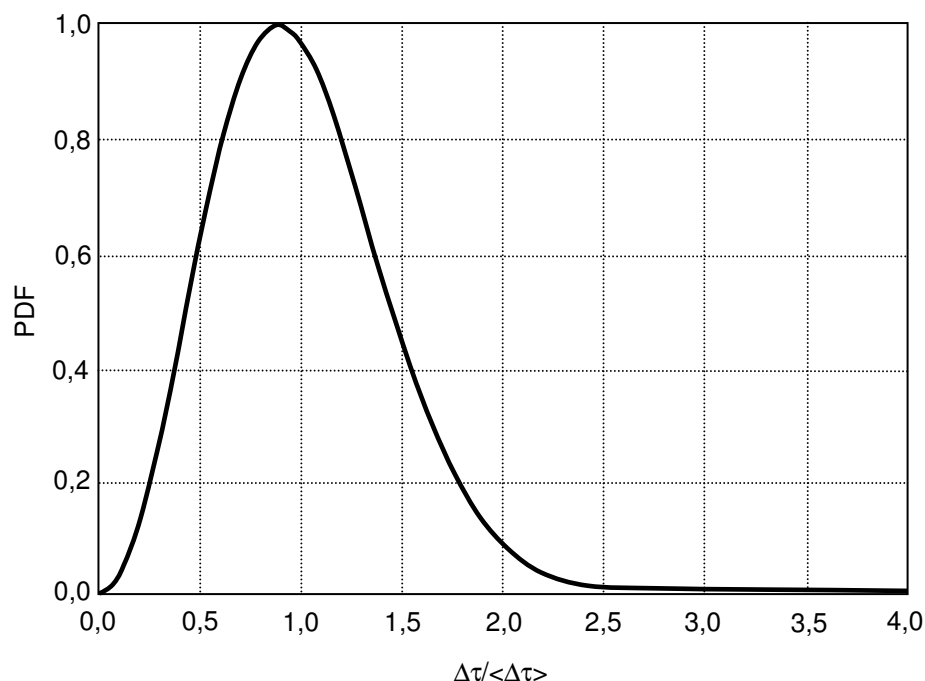
Wartości PMD wyznaczone z definicji (a) i (b) wiąże relacja [98,108]:

$$\langle\Delta\tau^2\rangle = \frac{3\pi}{8} \langle\Delta\tau\rangle^2 \quad (56)$$

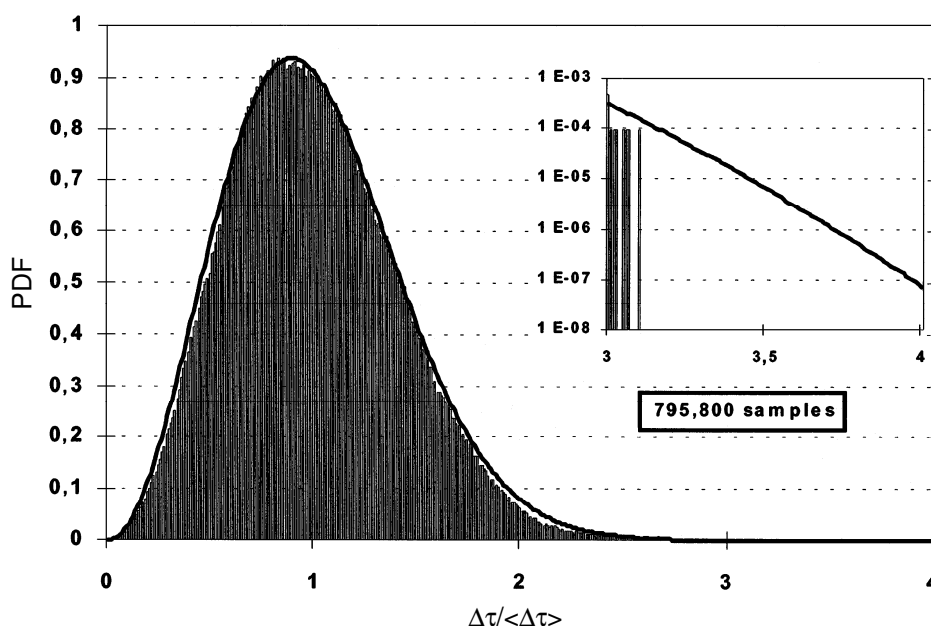
względnie:

$$PMD_a \approx 1,085 \cdot PMD_b \quad (57)$$

Różnica o 8,5% ma w praktyce niewielkie znaczenie wobec znacznej niepewności pomiarów dyspersji polaryzacyjnej, wynikającej z fundamentalnych ograniczeń wnoszonych przez zasadę pomiaru (patrz rozdział 3.3.1) i z niestabilności PMD w praktycznie każdym badanym włóknie lub kablu światłowodowym, nawet w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych (patrz rozdziały 3.3.2 i 3.3.3). Zalecenie ITU-T G.650.2 [97] określa sposób obliczeń (a) jako element wzorcowej metody pomiaru PMD.



Rys. 39. Rozkład Maxwella prawdopodobieństwa wartości  $\Delta\tau$ .

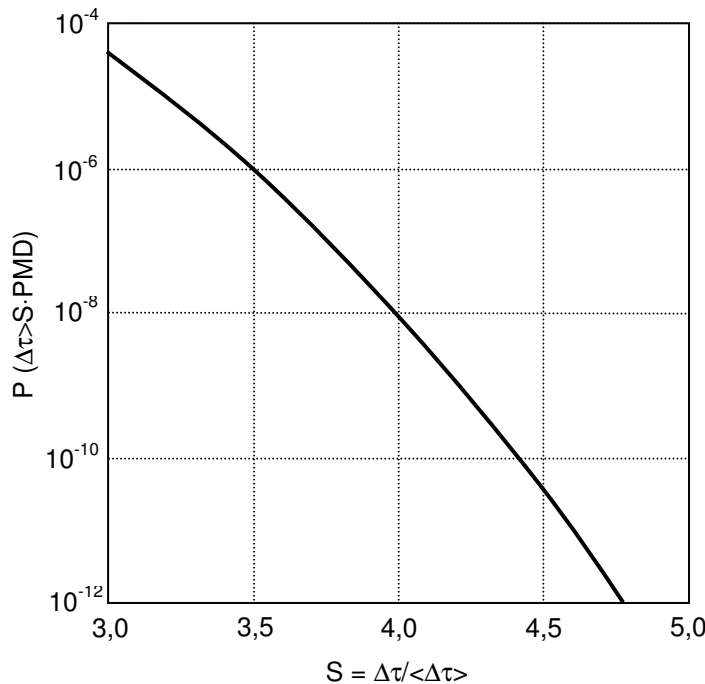


Rys. 40. Rozkład statystyczny DGD linii długości 95 km z doziemnych kabli rozetowych z włóknami G.652 w porównaniu z rozkładem Maxwella. Czas pomiaru: 86 dni [113].

W czasie pomiarów PMD często występuje problem niedostatecznej liczby i zakresu zmienności zgromadzonych danych pomiarowych [112], szczególnie w sytuacji, kiedy badany kabel lub włókno znajdują się w statycznych warunkach, a czas obserwacji i zakres

spektralny pomiarów są bardzo ograniczone. Powszechnie stosowanym sposobem weryfikacji zestawu danych jest obliczenie znormalizowanej wariancji, która w idealnym przypadku wynosi 0,422. Wartości znacznie niższe sygnalizują „obcięty” zestaw danych niewystarczający dla wiarygodnego oszacowania PMD.

Chwilowa wartość DGD jest losowo zmienna i projektant systemu transmisyjnego może na podstawie PMD określić jedynie prawdopodobieństwo, z jakim DGD nie przekracza określonego limitu, na przykład  $10^{-5}$ . Odpowiednią zależność przedstawia rys. 41. Zestawienie wartości prawdopodobieństwa znajduje się w tabeli 13 w rozdziale 3.2.2.



Rys. 41. Prawdopodobieństwo przekroczenia przez  $\Delta\tau$  opisywaną rozkładem Maxwella S-krotnej wartości PMD z definicji (a). Według danych z [112,114].

Do obliczeń PMD włókien o długości  $L \gg h$  stosuje się zależność:

$$PMD = k_{PMD} \sqrt{L} \quad (58)$$

w której współczynnik  $k_{PMD}$  [ $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ] oznacza PMD odcinka danego włókna o długości 1 km, natomiast  $L$  – długość włókna lub kabla wyrażoną w [km].

### 3.1.6. Wirowanie włókna światłowodowego w celu redukcji PMD

Masową produkcję włókien jednomodowych rozpoczęto w Japonii (Sumitomo, Fujikura) i USA (Corning, AT&T) w 1982 r. Były to włókna o nieprzesuniętej dyspersji, zaprojektowane dla transmisji na długości fali 1310 nm. W latach 80-tych długość odcinka regeneratorskiego zwykle nie przekraczała 100 km, a przepływność łącza 565 Mbit/s. PMD tolerowana w łączu o tych parametrach wynosi aż 17,7 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ; warunek ten spełniają włókna niskiej jakości.

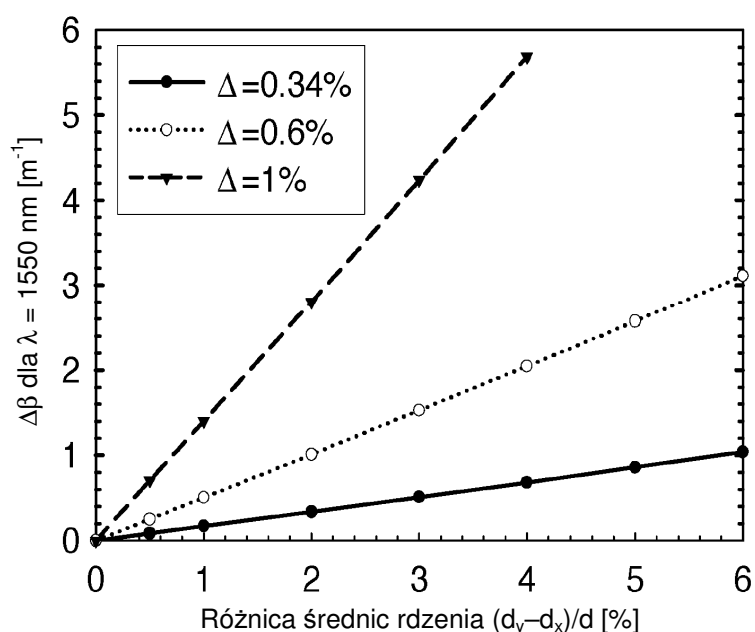
W 1986 r. uruchomiono produkcję włókien jednomodowych o przesuniętej dyspersji (DSF), opracowanych dla transmisji sygnałów cyfrowych o najwyższych przepływnościach w zakresie 1550 nm; równocześnie wprowadzono pierwsze systemy transmisyjne o przepływnościach gigabitowych: F-1.6G (1588 Mbit/s) instalowany w Japonii od 1986 r. i system 3,4 Gbit/s firmy AT&T wprowadzony w USA w 1988 r. Zastosowanie po 1992 r. włókien DSF w długich łączach międzymiastowych i podmorskich ze wzmacniaczami optycznymi EDFA ujawniło problem degradacji sygnału przez PMD [9]. W 1995 r. firma

Nortel uruchomiła w produkcję krotnic SONET OC-192 generujących sygnały 10 Gbit/s, co ujawniło problem PMD również w łączach o długości rzędu 100 km.

Głównym źródłem PMD we włóknach światłowodowych wytwarzanych przed 1995 r. była eliptyczność rdzenia, prowadząca do powstawania składowej geometrycznej PMD według zależności (38) przedstawionej w rozdziale 3.1.2:

$$G \approx C_k e^2 \Delta^2 \quad (38)$$

Różnica współczynników załamania we włóknie jednomodowym o przesuniętej dyspersji ( $\Delta = 0,65-1,25\%$ ) jest znacznie większa niż we włóknie o nieprzesuniętej dyspersji ( $\Delta = 0,28-0,40\%$ ) i przy identycznej tolerancji wymiarów rdzenia dwójłomność i PMD są 4-15 razy wyższe. Zależność tę ilustruje wykres zaczerpnięty z artykułu [109] prezentującego wyniki analiz teoretycznych wykonanych w firmie Corning i przedstawiony na rys. 42. Linia ciągła przedstawia charakterystykę dwójłomności geometrycznej włókna G.652, a przerywana i kropkowana charakterystyki typowe dla włókien G.653 i G.655.



Rys. 42. Dwójłomność optyczna włókien światłowodowych w funkcji eliptyczności rdzenia i różnicy współczynników załamania  $\Delta$  [109].

Ze względu na niezadowalający postęp w kontroli parametrów optogeometrycznych włókien, w 1993 r. firma AT&T (obecnie Furukawa - OFS Fitel) wprowadziła dodatkową metodę ograniczania PMD, którą było wirowanie włókna w trakcie wyciągania z preformy, kiedy szkło ma jeszcze temperaturę 1200-1800 °C, niską lepkość i daje się trwale odkształcić. Pierwszy opis przemysłowego zastosowania tej technologii znajduje się w patencie USA Nr 5418881 [115] wydanym na podstawie wniosku zgłoszonego w październiku 1994 r.

**Wirowanie to skręcanie włókna na gorąco połączone z trwałym odkształceniem, określane w literaturze anglojęzycznej jako „spin”, w odróżnieniu od skręcania włókna na zimno, połączonego z odkształceniem sprężystym i określanego terminem „twist”.**

Wirowanie zastosowali już w 1979 r. badacze brytyjscy z uniwersytetu w Southampton [3,4] do wytwarzania na małą skalę włókien jednomodowych o niskiej dwójłomności, pracujących przy długości fali 633 nm i używanych w czujnikach światłowodowych do pomiarów prądów w sieciach energetycznych. Czujniki te wykorzystywały zjawisko skręcenia polaryzacji światła we włóknie znajdującym się w polu magnetycznym wytwarzanym przez przewodnik z prądem (efekt Faradaya) i niekontrolowane zmiany polaryzacji promieniowania we włóknach łączących czujnik ze źródłem promieniowania i analizatorem stanu polaryzacji

musiały być sprowadzone do minimum. Wykonane wówczas analizy dwójłomności optycznej włókien z eliptycznym rdzeniem [2,5] są wykorzystywane do dzisiaj.

W momencie publikacji komunikatu [2] przepływność sygnałów przesyłanych w sieciach światłowodowych, wówczas wyłącznie z włóknami wielomodowymi zawierała się w granicach 1,5-140 Mbit/s, stąd PMD nie wzbudziła zainteresowania projektantów sieci. Pierwsze opisy PMD i jej konsekwencji dla transmisji cyfrowej w polskiej literaturze technicznej przedstawił prof. Adam Smoliński w referacie konferencyjnym wygłoszonym w 1983 r. [116] i w książce opublikowanej w 1985 r. [101, s. 56-60], lecz ich autor rozwiązanie problemu widział raczej we wprowadzeniu włókien jednopolarizacyjnych.

Przedstawione w literaturze specjalistycznej [110,117-121] i patentach [61,122-124] metody produkcji włókien światłowodowych o zredukowanej PMD obejmują każdorazowo obracanie włókna odbieranego z wieży wyciągowej, posiadającego już pokrycie pierwotne, względem preformy, z której włókno jest wyciągane. Schemat blokowy wieży wyciągowej do produkcji włókien wirowanych przedstawia rys. 43. Znajdujące się pomiędzy tymi punktami: aplikator do nakładania pokrycia pierwotnego i oświetlacz utwardzający je promieniowaniem ultrafioletowym nie blokują obrotu włókna, stąd skręcenie przenosi się do strefy gorącej, w której włókno jest wyciągane z gorącego, półpłynnego końca preformy i powoduje odkształcenie włókna, „zamrażane” po jego ochłodzeniu w komorze wypełnionej zimnym helem (gaz ten odznacza się wysoką przewodnością ciepła).

Różnice pomiędzy patentowanymi rozwiązaniami dotyczą zasadniczo:

1. sposobu obracania włókna względem preformy i konstrukcji odpowiednich mechanizmów
2. charakterystyk wirowania, opisanych funkcją szybkości obrotowej  $a(z)$ .

### **3.1.6.1. Realizacja techniczna wirowania**

Teoretycznie nie ma znaczenia, czy obracane jest odbierane włókno względem nieruchomej preformy, czy odwrotnie (rys. 43), ale z technologicznego punktu widzenia kwestia ta ma zasadnicze znaczenie i preferowane są rozwiązania pierwszego typu.

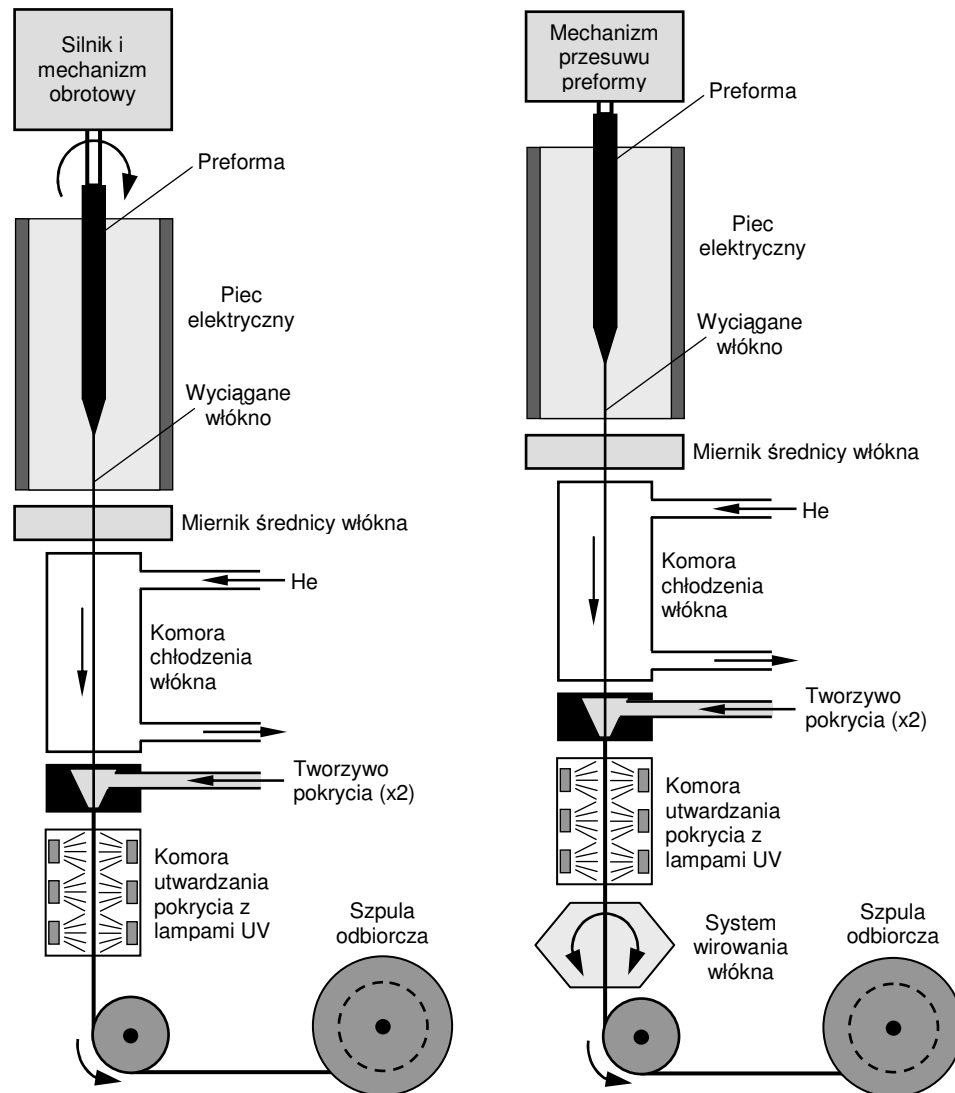
Obracanie preformy jest proste w założeniu i nie wymaga skomplikowanych mechanizmów. Metoda ta była stosowana do produkcji włókien specjalnych w warunkach laboratoryjnych, kiedy z preformy  $\varnothing 10-20$  mm wyciągano włókno z prędkością 10-60 m/min.

Prędkość wyciągania włókna w instalacjach przemysłowych wzrosła w 1995 r. do 300-750 m/min, obecnie do 1000-2000 m/min. Wirowanie z często podawaną w literaturze szybkością  $a = 4$  obr/m wymagałoby w ostatnim przypadku obracania preformy z prędkością 8000 obr/min. Duże wymiary (długość 1-2,5 m,  $\varnothing 70-200$  mm), masa (30-100 kg), a przede wszystkim stan półpłynny dolnej części preformy uniemożliwiają obracanie jej z tak wysoką prędkością bez uszkodzenia.

Nawet zakładając pokonanie problemów z wyważeniem elementów wirujących (preforma często nie jest centryczna względem uchwytu i lekko skrzywiona, szczególnie przy produkcji metodami MCVD i PCVD), które musi następować adaptacyjnie w miarę skracania preformy, ich moment bezwładności uniemożliwia skręcanie z szybko zmieniającą się prędkością. Najczęściej podawany w opisach patentowych okres modulacji prędkości obrotowej wynosi 5-50 m. Przy prędkości wyciągania 1500 m/min oznacza to odwrócenie kierunku wirowania co 0,1-1 s, niemożliwe bez rozerwania gorącej części preformy.

Wielką zaletą rozwiązania z obracaną preformą i stałą prędkością wirowania jest brak ochrony patentowej, gdyż opis opublikowano w 1979 r. [3]. Patenty w tym zakresie należą głównie do koncernów Corning, OFS i Draka Comteq. Niedawne publikacje opisujące doświadczenia wyłącznie z włóknami ze skrętem spiralnym [125] sugerują, że ta sytuacja dotyczy m.in. firmy Prysmian (d. Pirelli) i małych wytwórców włókien nietelekomunikacyjnych, używanych w żyroskopach laserowych i czujnikach [126].

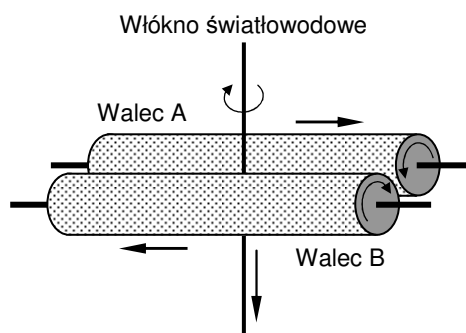




Rys. 43. Stanowiska do wyciągania włókien wirowanych: z obracaniem preformy (rys. lewy) i z obracaniem wyciąganego włókna (rys. prawy).

Najwięksi producenci włókien stosują obracanie za pomocą stykających się z włóknem ruchomych walców lub prowadnic, przekazujących siły skręcające na włókno szklane przez pokrycie pierwotne. Eleganckie rozwiązanie opatentowane w 1999 r. przez firmę POF (obecnie Draka Comteq) [123] i przedstawione na rys. 44 polega na dociśnięciu do włókna pary poprzecznych do niego i równoległych do siebie walców A i B powleczonych miękką powłoką z materiału o wysokim współczynniku tarcia - gumy, plastyfikowanego PVC, elastomeru poliuretanowego itd., obracających się tak, by nadażać za ruchem postępowym wyciąganego włókna i przeciwbieżnie przesuwanych względem siebie w celu wirowania włókna. Lekkie walce nie ograniczają szybkości i częstotliwości zmian kierunku wirowania.

Rozwiązania z obracaniem wyciąganego włókna są generalnie nieodpowiednie do wirowania ze stałą prędkością w jednym kierunku, gdyż włókno zwijane na szpulę odbiorczą jest równocześnie identycznie skręcone, co pozostawia niepożądane naprężenia mechaniczne i kołową dwójłomność optyczną. W 2003 r. firma Pirelli ujawniła, że opracowała maszynę zdolną do likwidowania tego skrętu na stanowisku do wyciągania włókna, bez późniejszego przewijania połączonego ze skręcaniem kompensacyjnym, co potwierdza to przypuszczenia sformułowane wyżej. Mechanizm z rys. 44 ma ograniczony zakres ruchu poprzecznego walców i nie pozwala na jednokierunkowe wirowanie włókna. Stosuje się wirowanie z cykliczną zmianą kierunku, opisane funkcją  $\alpha(z)$  bez składowej stałej.



Rys. 44. Zasada wirowania włókna za pomocą pary walców wykonujących przeciwbieżne ruchy oscylacyjne. Rysunek na podstawie opisu patentowego [123].

### 3.1.6.2. Wpływ wirowania na zmniejszenie PMD

Skuteczność redukcji PMD uzyskanej dzięki wirowaniu określa współczynnik PMDRF (ang. *Polarization Mode Dispersion Reduction Factor*) definiowany wzorem:

$$\zeta_w = \frac{\Delta\tau_w}{\Delta\tau_0} \quad (59)$$

w którym  $\zeta_w$  to PMDRF,  $\Delta\tau_w$  - DGD włókna światłowodowego wirowanego,  $\Delta\tau_0$  - DGD identycznego włókna nie wirowanego. Zamiast DGD można wprowadzić wartości PMD. W praktyce PMDRF można określić porównując PMD sąsiednich odcinków włókna wyciąganego z tej samej preformy przy użyciu wirowania i bez niego.

$\zeta_w = 1$  oznacza brak redukcji PMD,  $\zeta_w = 0$  idealny przypadek pełnej eliminacji PMD.

#### Wirowanie jednokierunkowe ze stałą prędkością

Najprostszy sposób wirowania polega na obracaniu włókna ze stałą prędkością  $\alpha$  wyrażoną w [rad/m], co w odcinku o długości  $z$  powoduje obrót rdzenia włókna o kąt  $\Theta$ :

$$\Theta = \alpha z \quad (60)$$

We wirowanym włóknie posiadającym bez wirowania jednorodną wzdłuż jego długości dwójtomność geometryczną, orientacja tej dwójtomności ulega ciągłemu obracaniu z okresem równym  $\Lambda = a \cdot z$ . Po przebyciu odcinka równego  $\Lambda/2$  następuje odwrócenie kierunku dwójtomności geometrycznej ( $\Theta = \pi$ ). W obrębie każdego odcinka elementarnego o długości  $\Lambda$  następuje likwidacja zakumulowanej dwójtomności, ponieważ każdy punkt o określonej dwójtomności  $G$  ma w odległości  $\Lambda/2$  swój odpowiednik o odwróconej orientacji ( $-G$ ) i ich przyczynki do wnoszone do  $\Delta\tau$  znoszą się. Pozostaje resztkowe  $\Delta\tau$  zakumulowane w jednym niepełnym odcinku o długości mniejszej niż  $\Lambda$ . Dokładniejsza analiza [110] przedstawiona przez najbardziej zaawansowaną grupę teoretyków firmy Corning (M.J. Chen, X. Li i D.A. Nolan) wykazuje, że efektywność redukcji PMD spada z wydłużaniem okresu wirowania i jest opisywana w długim odcinku włókna światłowodowego zależnością:

$$\zeta_w = \frac{\Delta\beta}{2\sqrt{\alpha^2 + \frac{1}{4}\Delta\beta^2}} \quad (61)$$

Podstawiając do wzoru (61) zależność (32):

$$L_B = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (32)$$

oraz:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\alpha} \quad (62)$$

otrzymujemy zależności wiążące PMDRF z drogą zdudniania danego włókna:

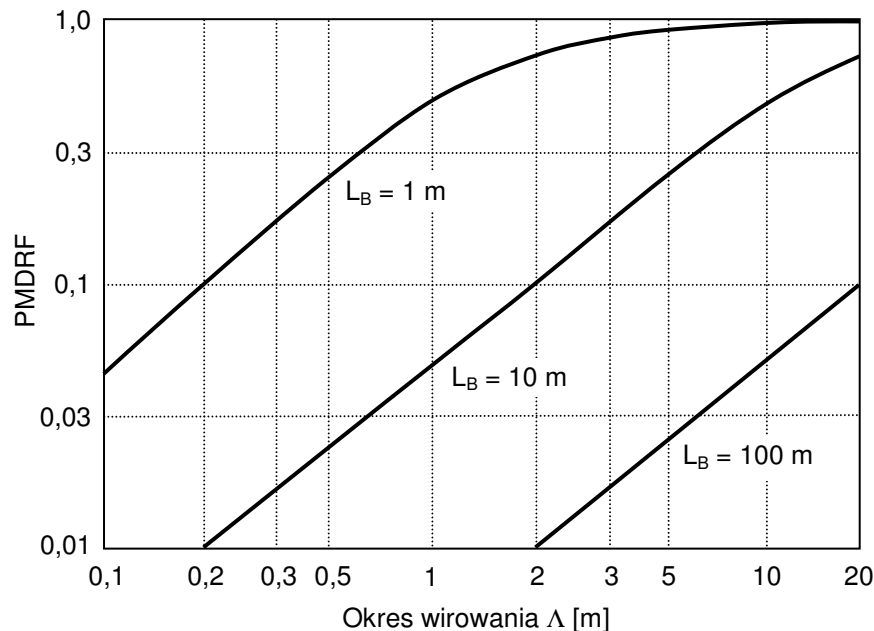
$$\zeta_w = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha L_B}{\pi}\right)^2}} \quad (63)$$

a także:

$$\zeta_w = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\left(\frac{L_B}{\Lambda}\right)^2}} \quad (64)$$

z których wynika, że w celu zachowania stałej efektywności redukcji PMD należy zachować warunek  $L_B/\Lambda = \text{const.}$  i że przy zachowaniu identycznych parametrów włókna nie wirowanego, PMDRF rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie do szybkości wirowania.

Aby uzyskać  $\zeta_w = 0,1$  we włóknie o  $L_B = 5$  m, którą według danych dostępnych w literaturze [127] można uznać za minimalną dla współcześnie produkowanych włókien telekomunikacyjnych wysokiej jakości, wymagany jest okres skrętu  $\Lambda \leq 0,45$  m. W przypadku  $L_B = 1$  m, typowej dla włókien z połowy lat 1990-tych, konieczny byłby  $\Lambda \leq 0,09$  m i trudno osiągalna prędkość obrotowa mechanizmu wirującego wynosząca aż 11100 obr/min podczas wyciągania włókna z prędkością 1000 m/min. Nie zachowanie tych warunków drastycznie zmniejsza skuteczność skręcania, co widać na rys. 45.



Rys. 45. Charakterystyki współczynnika redukcji PMD dla wirowania o stałej prędkości.

#### Wirowanie oscylacyjne ze modulowaną prędkością

Wyższą w porównaniu do wirowania o stałej prędkości efektywność redukcji PMD i brak problemów z niepożądanym skręcaniem włókna może zapewnić wirowanie oscylacyjne, w którym prędkość obrotowa jest opisana funkcją okresowo zmienną bez składowej stałej.

W sytuacji, kiedy prędkość obrotowa wirowania  $a(z)$  zmienia się, kąt obrotu  $\Theta$  na odcinku włókna o długości  $z$  opisuje całka:

$$\Theta(z) = \int_0^z a(z) dz \quad (65)$$

Najczęściej używane, a przynajmniej opisywane w dostępnej literaturze, przede wszystkim [109,110] i w jawnych opisach patentowych są następujące funkcje skrętu:

- **sinusoidalna** z okresem  $\Lambda$ , częstością kątową  $\eta$  i amplitudą  $a_0$ :

$$a(z) = a_0 \sin(\eta z) = a_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (66)$$

dla której, w przypadku obecnych włókien telekomunikacyjnych, których  $L_B$  wynosi co najmniej kilka metrów, PMDRF określa wzór z funkcją Bessela zerowego rzędu [110]:

$$\zeta_w \approx J_0\left(\frac{2a_0}{\eta}\right) = J_0\left(\frac{a_0 \cdot \Lambda}{\pi}\right) \quad (67)$$

Kiedy  $J_0(2a_0/\eta) = 0$ , obserwuje się periodyczne zmiany DGD z długością włókna w stałym zakresie, ale teoretycznie nie zachodzi akumulacja PMD w dowolnie długim odcinku [110]. Stan taki nosi nazwę dopasowania fazy (ang. *Phase Matching Condition*). Jeżeli włókno odznacza się krótką drogą zdudniania  $L_B$ , optymalny okres oscylacji wirowania  $\Lambda$  zwiększa się ze skracaniem  $L_B$  w porównaniu do wartości określonej wzorem (67).

Ponieważ droga zdudniania zmienia się losowo i nie można z góry dopasować do niej parametrów wirowania, w przypadku włókien o wysokiej (bez wirowania) dwójłomności wirowanie sinusoidalne traci efektywność, a produkowane włókna mają duży rozrzut PMD.

W przypadku włókien o naturalnie niskiej dwójłomności wirowanie sinusoidalne jest bardzo skuteczne, pod warunkiem zachowania ścisłych tolerancji obu parametrów  $\Lambda$  i  $a_0$ . O ile precyzyjna kontrola okresu oscylacji  $\Lambda$  jest względnie prosta, to utrzymanie stabilnej amplitudy prędkości wirowania  $a_0$  w warunkach produkcyjnych jest dość trudne, głównie z powodu zmiennej elastyczności pokrycia pierwotnego włókna i możliwego poślizgu włókna względem ruchomych elementów przekazujących obrót. Nie ma prostego i niezawodnego sposobu pomiaru  $a_0$  w trakcie wyciągania włókna.

Niestabilność amplitudy wirowania jest teoretycznie mniej dokuczliwa w przypadku wirowania ze stałą prędkością, kiedy dla redukcji PMD istotne jest wyłącznie, by nie spadała ona poniżej ustalonego minimum. Praktycznie problem pozostaje, gdyż stałość i dość dokładna znajomość  $a_0$  są konieczne dla prawidłowego „odkręcenia” włókna po wyciąganiu.

- **sinusoidalna z modulacją amplitudy (AM)** z okresem modulacji  $\Lambda_m$ :

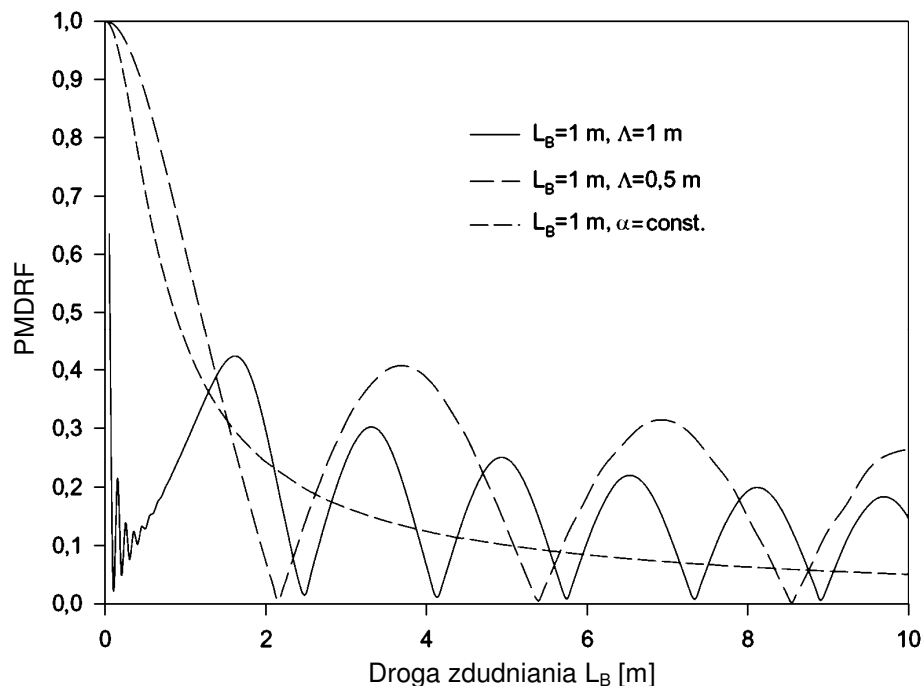
$$a(z) = \left[ a_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda_m} z\right) \right] \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (68)$$

- **sinusoidalna z modulacją częstotliwości (FM)** z dewiacją  $f_m$  oraz okresem modulacji  $\Lambda_m$ :

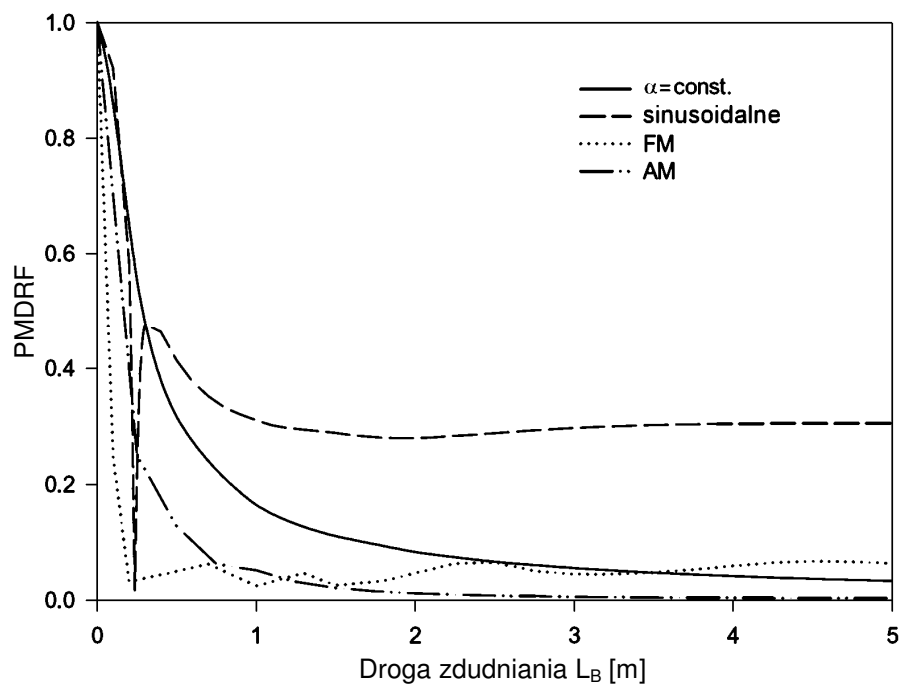
$$a(z) = a_0 \sin\left\{ 2\pi \left[ \frac{z}{\Lambda} + f_m \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda_m} z\right) \right] \right\} \quad (69)$$

Wirowanie opisane funkcjami okresowymi z modulacją FM i AM jest w literaturze przedstawiane jako najbardziej efektywne, ponieważ przy odpowiednim doborze parametrów gwarantuje względnie niską wartość PMDRF w szerokim zakresie zmian  $L_B$ .

Rys. 46 i 47 zaczerpnięte z publikacji firmy Corning [117] przedstawiają porównanie skuteczności najczęściej używanych sposobów wirowania; wyniki te częściowo uzyskano metodą symulacji numerycznych.



Rys. 46. Zależność PMDRF od  $L_B$  dla wirowania z prędkościami: stałą i sinusoidalnie zmienną [117].



Rys. 47. Zależność PMDRF od  $L_B$  dla typowych rodzajów wirowania [117].

Ważną cechą włókien wirowanych deklarowaną przez ekspertów formy Corning (Li, Chen i Nolan) jest identyczny jak w przypadku włókien nie wirowanych rozkład statystyczny DGD i zależność PMD od długości [110], co umożliwia zastosowanie tych samych metod do projektowania łączy z włóknami tego typu.

Należy zaznaczyć, że teoria opisująca wpływ wirowania na PMD włókien jednomodowych jest dopiero we wczesnej fazie rozwoju i wyniki przedstawiane przez poszczególne grupy badaczy często są odmienne.

Przykładem są zaprzeczające ogólnemu stosowaniu zależności (59) i (63) do włókien skręcanych jednokierunkowo ze stałą szybkością pomiary wykonane w 2004 r. przez badaczy z firmy Pirelli [125]. Według nich, w linii powstałej w wyniku łączenia wielu odcinków włókien o identycznym kierunku skrętu następuje znacznie szybszy niż określony klasycznym wzorem (58) wzrost PMD z długością linii, aż do ustalenia się wartości  $k_{PMD}$  typowej dla włókna nie wirowanego. Efekt ten zanika, jeśli łączy się naprzemiennie odcinki włókien o podobnej długości, ale przeciwnych kierunkach wirowania. Jeśli zależność ta potwierdzi się z włóknami innego typu i od innych producentów, będzie niezbędne przestrzeganie nowych zasad w znakowaniu i montażu kabli światłowodowych.

Druga nie rozstrzygnięta przez teoretyków, a istotna dla niniejszej pracy kwestia, to czy poprzeczny do osi włókna nacisk na włókno wirowane zwiększa jego PMD tak samo jak we włóknie nie wirowanym czy też następuje osłabienie tej wrażliwości opisywane przez współczynnik PMDRF. Autorzy publikacji [110] przedstawiają analizę dowodzącą, że indukowana dwójłomność jest identyczna, a jedyna różnica brak jej losowego sumowania się z własną dwójłomnością włókna. W artykule [119] wyrażono natomiast przekonanie, że wirowanie i skręcanie powinno być efektywne również w redukowaniu PMD indukowanej mechanicznie, lecz nie przedstawiono żadnych rezultatów analiz matematycznych lub symulacji numerycznych i stwierdzenie to jest mniej wiarygodne.

### 3.1.7. Wpływ skręcenia włókna światłowodowego na PMD

#### 3.1.7.1. Obrót płaszczyzny polaryzacji po skręceniu włókna

Skręcenie włókna światłowodowego pod działaniem siły zewnętrznej prowadzi podobnie jak wirowanie do periodycznej zmiany orientacji niekołowego rdzenia włókna.

W odróżnieniu od wirowania, w literaturze rozpatrywane jest zasadniczo skręcanie w jednym kierunku ze stałą szybkością  $\gamma = \text{const.}$  [rad/m]. Utrzymanie celowo wprowadzonego skrętu oscylacyjnego wymaga obecności sztywnego pokrycia ścisłego, zdolnego do trwałego wywierania na włókno momentu skręcającego. Rozwiązanie takie jest niemożliwe w kablach z ośrodkiem o budowie luźnej, gdzie włókno może swobodnie obracać się (prócz końców) i wyrównać naprężenia skręcające na znacznej długości.

Deformacji włókna towarzyszą skręcające naprężenia mechaniczne i indukowana przez nie dwójłomność kołowa włókna, polegająca na obrocie płaszczyzny polaryzacji promieniowania z szybkością proporcjonalną do szybkości skręcania włókna:

$$\delta = g_s \gamma z \quad (70)$$

gdzie:  $\delta$  - kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji względem stanu na początku włókna,  $g_s$  - obrotowy współczynnik elastoptyczny włókna,  $z$  - odległość od początku włókna.

Powstają dwa kołowe mody polaryzacyjne o przeciwnych kierunkach obrotu i dwójłomność kołowa włókna jest wówczas określona przez zależność:

$$\Delta\beta_c = 2g_s \gamma = g \gamma \quad (71)$$

Współczynniki elastoptyczne  $g$  i  $g_s$  są funkcją parametrów materiału rdzenia włókna:

$$g_s = -\frac{E_{SF} \cdot R}{n_2} \quad (72)$$

Oznaczenia:  $E_{SF}$  - moduł sztywności materiału, z którego wykonano rdzeń włókna,  $R$  - współczynnik elastoptyczny dwójłomności przedstawiony w rozdziale 3.1.3.1,

$n_2$  - współczynnik załamania materiału rdzenia włókna. Przyjmując następujące wartości typowe dla włókna pracującego przy długości fali 1,55  $\mu\text{m}$ :  $E_{SF} = 31000$  MPa,  $R = -3,15 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  i  $n_2 = 1,47$ , otrzymujemy  $g_s = 0,665$  i  $g = 0,133$ . Parametry te mało zmieniają się w funkcji temperatury i długości fali [104].

Pomiary przedstawione w publikacjach [104,105,128] wykazały, że jednomodowe włókna telekomunikacyjne (ITU-T G.652, G.653, G.655) mają  $g_s \approx 0,07$  i  $g \approx 0,14$ . W niektórych publikacjach podaje się nieco wyższe wartości  $g$ , w zakresie 0,14-0,16.

Dwójłomność kołowa wywołwana przez skręcenie włókna powoduje odpowiednią dyspersję polaryzacyjną, której współczynnik  $p$  można obliczyć modyfikując zależność (31):

$$p = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d(\Delta\beta_c)}{d\lambda} \quad (73)$$

i wstawiając do niej wzór (71):

$$p = -\frac{\lambda^2 \gamma}{2\pi c} \cdot \frac{dg}{d\lambda} \quad (74)$$

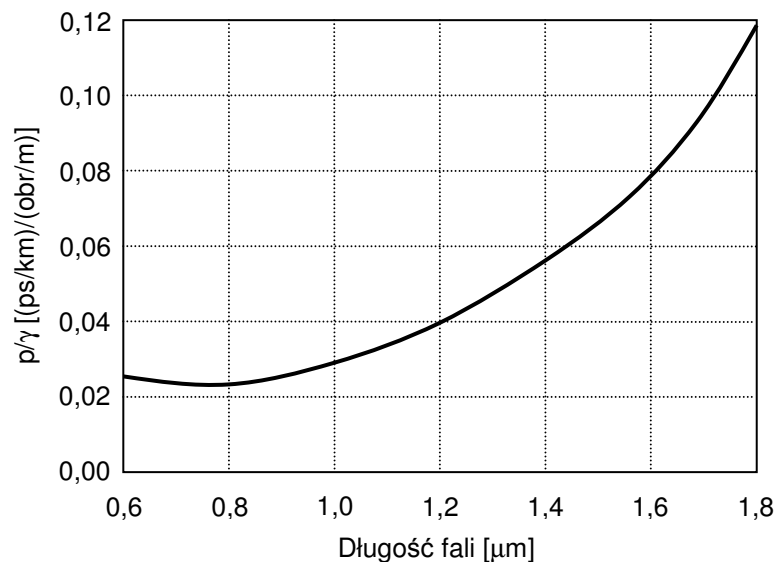
a dalej wprowadzając z pomocą wzoru (72) znany z rozdziału 3.1.3.1 parametr  $dR/d\lambda$ :

$$p = -\frac{\lambda^2 E_{SF} \gamma}{\pi c n_2} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \quad (75)$$

Przyjawszy  $dR/d\lambda = 2,1 \times 10^{-7}$  m/N i pozostałe parametry jak wyżej, otrzymujemy, że DGD indukowana przez skręcenie włókna o 1 obr/m ( $\gamma = 6,283$  rad/m) wynosi:

$$p = 7,09 \times 10^{-17} \text{ s/m} = 0,071 \text{ ps/km.}$$

Obliczona tak DGD (rys. 48) jest bliska wyznaczonej doświadczalnie, która wynosi około 0,065 ps/km dla identycznie skręconego włókna NZDSF (rozdział 3.1.7.3).



Rys. 48. DGD wprowadzana przez skręcenie włókna światłowodowego. Charakterystyka obliczona na podstawie danych szkła z czystego  $\text{SiO}_2$ .

Do względnie silnego skręcania włókna może dochodzić w czasie nawijania na szpulę odbiorczą włókna wirowanego przez pokrycie (rys. 43), formowania skręconych jednostek optycznych o budowie ściślejszej (rys. 26) lub przewijania włókien. Skręcanie może stanowić uboczny wynik określonego procesu technologicznego i używanych maszyn kablowych,

bądź być wprowadzone celowo dla redukcji PMD lub uzyskania wymaganych własności mechanicznych włókna umieszczonego w kablu. Opis przedstawiony przez Itoha, Saitoha i Ohtsukę [128] w związku z projektowaniem światłowodowych czujników rotacji sugeruje, że skręcanie włókien może być powszechnie i nieświadomie wprowadzane w wielu procesach produkcji kabli światłowodowych ze spiralnym skręcaniem elementów ośrodka.

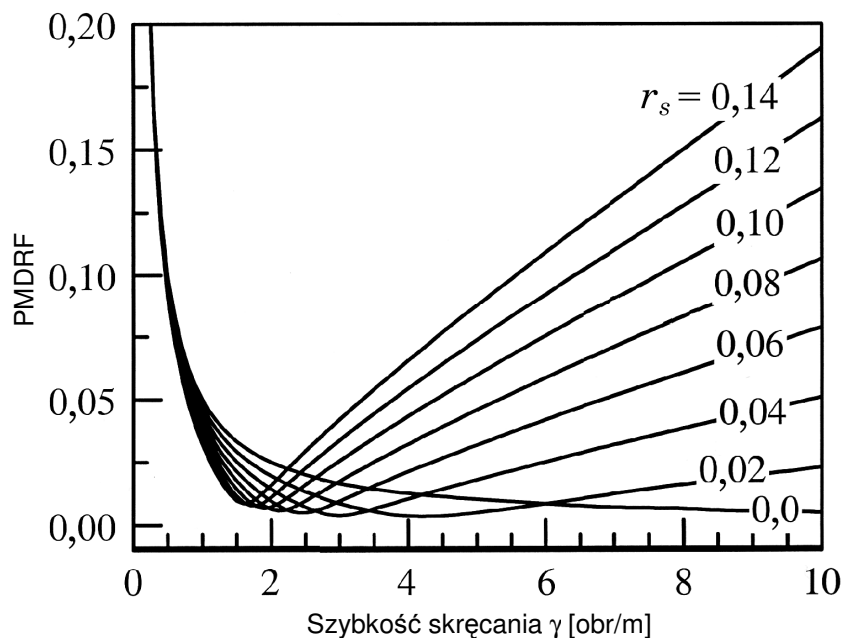
### 3.1.7.2. Niepożądane skręcenie włókna w czasie wirowania

Wirowanie włókna w czasie jego wyciągania prowadzi do powstawania w obszarze rdzenia niewielkich naprężeń skręcających, spowodowanych przez różnice charakterystyk termicznych lepkości szkieł tworzących rdzeń i płaszcz tego włókna. Poziom tych naprężeń zależy od temperatury rozciąganej końcówki preformy i lepkości szkła w tej strefie. Zjawisko resztkowego skręcenia stało się w ostatnich latach obiektem analiz, ponieważ zmniejsza ono skuteczność redukcji PMD metodą wirowania jednokierunkowego we włóknach o niskiej naturalnej dwójłomności; natomiast w przypadku włókien o wysokiej dwójłomności ( $L_B \leq 5$  m) jego wpływ można pominąć [110]. Opis przedstawiony w [110,118] zakłada, że szybkość skrętu resztkowego rośnie proporcjonalnie do szybkości wirowania, a wynikający obrót płaszczyzny polaryzacji opisuje zależność:

$$\delta = r_s g_s \gamma \quad (76)$$

w której  $r_s$  to współczynnik naprężeń resztkowych, zmienny w zakresie od 0 (brak naprężeń tego typu) do 1 (skręcenie włókna na zimno).

Na rys. 49 przedstawiono wynik symulacji komputerowej wpływu resztkowych naprężeń skręcających na efektywność redukcji PMD przez skręt jednokierunkowy o stałej szybkości. Bez resztkowych naprężeń skręcających, obliczony ze wzoru (64) dla  $\alpha = 10$  obr/m (62,8 rad/m) współczynnik redukcji PMD  $\zeta_w = 0,005$ . Nawet minimalny stopień skręcenia włókna drastycznie pogarsza korzystny efekt wirowania [118,129].



Rys. 49. Zależność PMDRF od poziomu resztkowych naprężeń skręcających we włóknie wirowanym ze stałą prędkością.  $L_B = 10$  m [118].

Podobna symulacja wykazała, że naprężenia resztkowe praktycznie nie wpływają na skuteczność redukcji PMD przez wirowanie oscylacyjne, na przykład sinusoidalne.



### 3.1.7.3. Zmiany PMD we włóknie poddanym skręcaniu

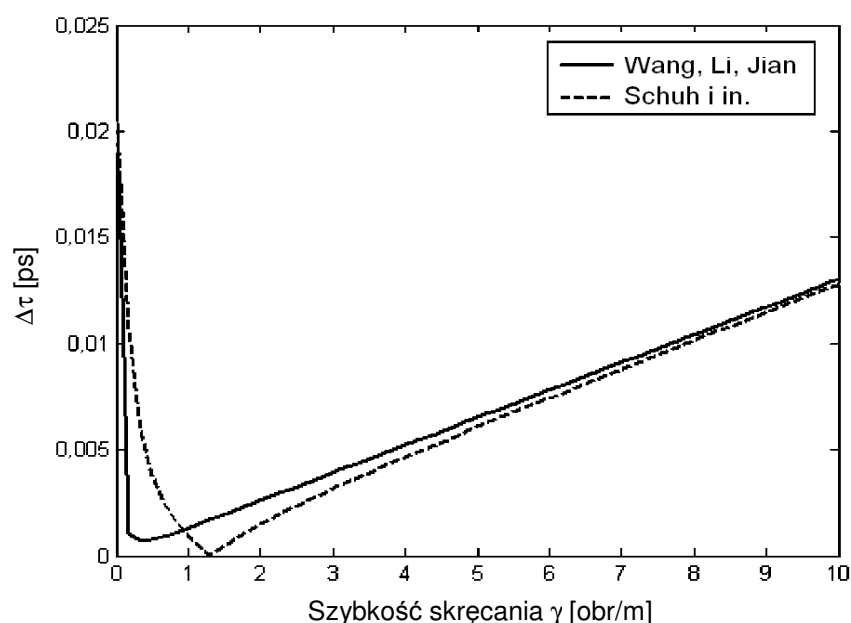
DGD włókna światłowodowego nie wirowanego, które poddano skręcaniu na zimno zmienia się w charakterystyczny sposób, opisany w kilku publikacjach [110,120,121]:

- przy słabym i stopniowo zwiększonym skręcaniu oryginalna DGD włókna (zmierzona w stanie bez skręcenia) początkowo zmniejsza się – teoretycznie do zera, praktycznie do pewnej wartości minimalnej. Istnieje optymalna wartość  $\gamma$ , dla której DGD osiąga minimum, w przybliżeniu proporcjonalna do początkowej wartości DGD.
- Silniejsze skręcanie ponownie zwiększa DGD, gdyż po zlikwidowaniu oryginalnej DGD, dwójłomność kołowa wywołana przez naprężenia skręcające wprowadza  $\Delta\tau$  rosnącą proporcjonalnie do  $\gamma$ .

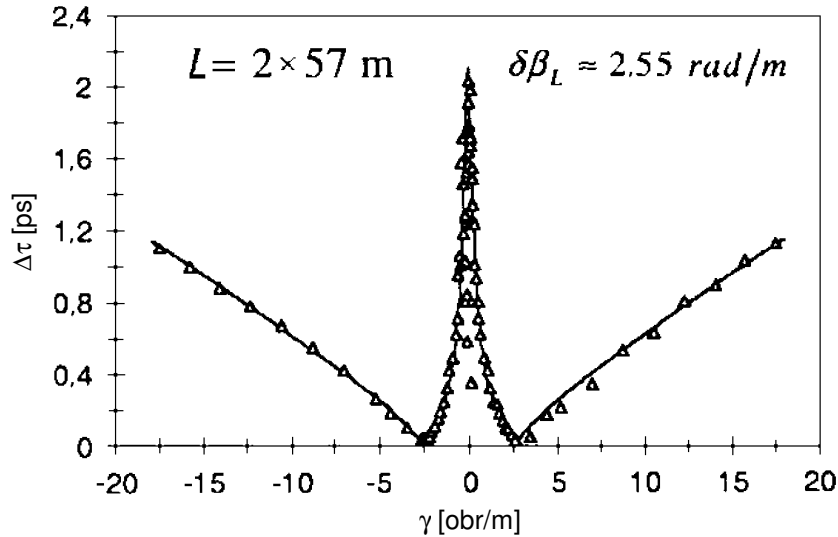
W przeciwieństwie do wirowania, nie można dobrać jednakowej prędkości skręcania włókna  $\gamma$ , gwarantującej skuteczną redukcję PMD we włókniach o bardzo różniących się parametrach. Skręcanie włókna wysokiej jakości o bardzo niskiej wartości początkowej PMD, praktycznie od początku powoduje wzrost PMD. O ile poszczególni autorzy zgadzają się odnośnie ogólnego charakteru zależności  $\Delta\tau(\gamma)$ , to szczegółowe charakterystyki obliczone teoretycznie znacznie różnią się, czego przykładem artykuły [121] i [130](rys. 50). Przy skręcaniu włókien wirowanych przebieg charakterystyki  $\Delta\tau(\gamma)$  jest w początkowym odcinku zależny od rodzaju i kierunku wirowania, następnie obserwuje się proporcjonalny wzrost.

Zależności te potwierdzono doświadczalnie na próbkach włókien DSF długości około 100 m [120,121,131], co przedstawia rys. 51.

Eksperymentatorzy nie podnosili kwestii, w jaki sposób skręcanie wpływa na zmiany PMD w długich odcinkach włókien.



Rys. 50. Zmiany DGD włókna poddanego skręcaniu - wyniki analiz wykonanych przez dwa zespoły innymi metodami.  $L_B = 5$  m [121]. Zależność pokazaną linią przerywaną zweryfikowano doświadczalnie – patrz rys. 51.



Rys. 51. Wyniki obliczeń (linia ciągła) i pomiarów (trójkąty) DGD w nie wirowanym włóknie DSF skręcanym w obu kierunkach [120].

Schuh, Sikora i in. przedstawili i zweryfikowali doświadczalnie [120,130] poniższą zależność opisującą zmiany DGD w skręconym włóknie mającym dwójłomność liniową:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\beta_L \frac{d(\Delta\beta_L)}{d\omega} + (\Delta\beta_C - 2\gamma) \frac{d(\Delta\beta_C)}{d\omega}}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + (\Delta\beta_C - 2\gamma)^2}} z \quad (77)$$

gdzie:  $\Delta\beta_L$  – dwójłomność liniowa, odpowiedzialna za powstawanie PMD we włóknie światłowodowym nie skręcanym,  $\omega$  - pulsacja fali świetlnej,  $\Delta\beta_C$  – dwójłomność kołowa wywołana przez skręcenie włókna,  $\gamma$  - szybkość skręcania wyrażona w [rad/m],  $z$  – odległość propagacji we włóknie. Pierwszy człon w liczniku opisuje DGD wynikającą z dwójłomności liniowej („zwykła” PMD), drugi – DGD wywołaną przez sprężyste odkształcenia skręcające, przy czym:

$$\Delta\beta_C = g\gamma \quad (78)$$

Wzór (77) można sprowadzić do prostszej postaci uwzględniając zależności ustalone w wyniku pomiarów DGD w skręconych włóknach DSF i NZDSF przez tych samych autorów:

$$\frac{\omega}{\beta_L} \cdot \frac{d\beta_L}{d\omega} \approx 1 \quad \text{oraz} \quad \frac{\omega}{g} \cdot \frac{dg}{d\omega} \approx 0,090 \quad (79)$$

Przekształcając zależności (77-79) otrzymujemy:

$$\Delta\tau \approx \frac{\Delta\beta_L^2 + 0,09g(g-2)\gamma^2}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + (g-2)^2\gamma^2}} z \quad (80)$$

Wartość współczynnika elastoptycznego wyznaczonego z badań włókien NZDSF i DSF przez tych samych autorów oraz Chartiera i in. [105] wynosi  $g \approx 0,14$ , stąd dostajemy:

$$\Delta\tau \approx \frac{\Delta\beta_L^2 - 0,0234\gamma^2}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + 3,46\gamma^2}} z \quad (81)$$

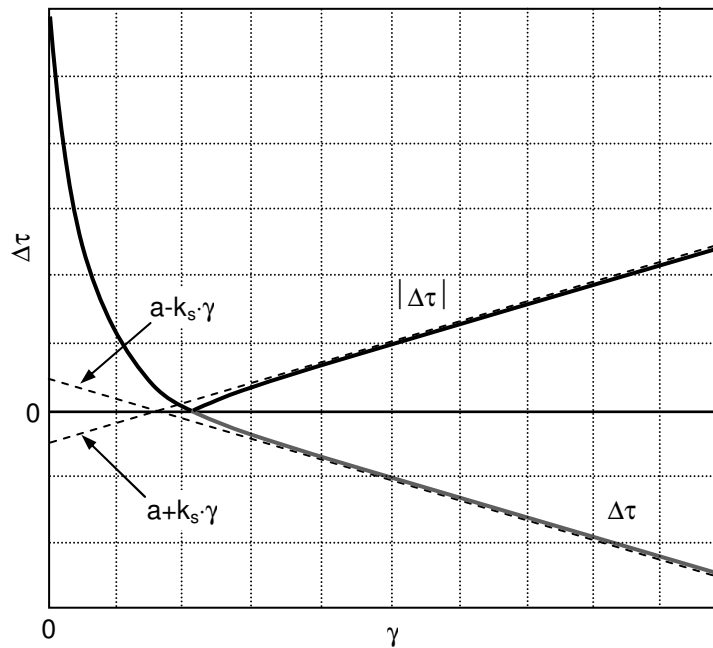
Ujemny współczynnik proporcjonalności stojący przy składniku związanym z dwójłomnością kołową wyjaśnia, dlaczego mierzona DGD skręcanego włókna po osiągnięciu pewnej szybkości skręcenia  $\gamma$  spada do zera. Ujemna wartość  $\Delta\tau$  ma ten sens fizyczny, że nastąpiła zamiana ról przez „szybki” i „powolny” PSP (rys. 52). Zmiana znaku  $\Delta\tau$  nie ma znaczenia dla pracy łącza światłowodowego, istotna jest **wartość bezwzględna**  $\Delta\tau$ :

$$\Delta\tau \approx \frac{\Delta\beta_L^2 - 0,0234\gamma^2}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + 3,46\gamma^2}} z \quad (82)$$

Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej  $p$ , używany dla obliczeń PMD przy założeniu braku sprzęgania modów (rozdział 3.1.4) określa wówczas formuła:

$$p = \frac{\Delta\tau}{z} \approx \frac{|\Delta\beta_L^2 + 0,09g(g-2)\gamma^2|}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + (g-2)^2\gamma^2}} \approx \frac{|\Delta\beta_L^2 - 0,0234\gamma^2|}{\sqrt{\Delta\beta_L^2 + 3,46\gamma^2}} \quad (83)$$

Warunkiem redukcji DGD przy optymalnej szybkości skręcenia do zera jest spełnienie warunku  $\Delta\beta_L/\gamma \approx 0,153$  na całej długości włókna. Kiedy na części długości włókna tak nie jest, na przykład istnieją odcinki nie skręcane, nastąpi spadek DGD do niezerowej wartości minimalnej, co potwierdza eksperyment opisany w artykule [130].



Rys. 52. Zmiany DGD skręcanego włókna światłowodowego: „teoretyczna” i „praktyczna” charakterystyka  $\Delta\tau(\gamma)$ . Porównaj rys. 50-51.

Jeśli pominąć naturalną PMD włókna, zakładając  $\Delta\beta_L = 0$  i uwzględnic, że  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , otrzymujemy następujący wzór określający wartość DGD indukowanej przez jego skręcenie:

$$\Delta\tau = \frac{0,090g}{\omega} \gamma z = \frac{0,090g\lambda}{2\pi c} \gamma z \quad (84)$$

oraz współczynniki: dyspersji polaryzacyjnej  $p$  i podatności skręcenkowej DGD  $k_s$ :

$$p = \frac{\Delta\tau}{z} = \frac{0,090 g \lambda}{2\pi c} \gamma = k_s \gamma \quad (85)$$

$$k_s = \frac{0,0020 \lambda}{c} \gamma \quad (86)$$

Obliczona ze wzoru (85) wartość  $k_s$  dla  $\lambda = 1550$  nm wynosi  $1,033 \times 10^{-17}$  rad/s w przypadku używania następujących jednostek:  $\lambda$  [m],  $c$  [m/s],  $\Delta\tau$  [s],  $\gamma$  [rad/m],  $z$  [m],  $p$  [s/m]. Używając  $p$  [ps/km] i  $z$  [km], dostajemy zależność:

$$p = 1,033 \cdot 10^{-2} \gamma \quad (87)$$

Jeśli ponadto szybkość skręcania  $\gamma$  wyraża się w [obr/m], otrzymujemy:

$$p = 0,065 \gamma \quad (88)$$

Skręcenie włókna z szybkością 1 obr/m wprowadza  $p = 0,065$  ps/km. Wartość obliczona z parametrów szkła kwarcowego (rozdział 3.1.7.1) dla  $\lambda = 1550$  nm jest bardzo zbliżona:  $p = 0,071$  ps/km, lecz zależność od długości fali jest kwadratowa, a nie proporcjonalna. Różnica wynika z faktu, że parametry empiryczne (79) też zależą od długości fali.

Skręcenie włókna nie usuwa jego niejednorodności i sprzęgania modów. Propagacja impulsu w długim włóknie o średniej długości drogi korelacji  $h$  [m] pozostaje opisana przez współczynnik  $k_{PMD}$  określony zależnością otrzymaną z przekształcenia wzorów (51,58):

$$k_{PMD} = p \sqrt{\frac{h}{1000}} \quad (89)$$

Dla typowych w literaturze  $h = 10$  m i  $h = 50$  m, następuje odpowiednio 10-krotna i 4,47-krotna redukcja PMD w odcinku włókna o długości 1 km, stąd rzeczywista podatność skręcenia PMD w długim odcinku jest odpowiednio mniejsza niż  $k_s$  obliczona ze wzoru (86). Współczynnik podatności skręcenia PMD indukowanej przez skręcenie w długim odcinku włókna opisują zależność:

$$k_{SPMD} = \frac{0,0020 \lambda}{c} \sqrt{\frac{h}{1000}} \quad (90)$$

lub, przy założeniach i jednostkach miar przyjętych dla wyprowadzenia wzoru (88):

$$k_{SPMD} = 0,065 \sqrt{\frac{h}{1000}} \quad (91)$$

#### 3.1.7.4. Skręcanie włókna a mechaniczne indukowanie PMD

Z opisów zmian PMD we włóknach skręcanych (i nie wirowanych) przedstawionych w pp. 3.1.7.1-3.1.7.3, a bazujących na dostępnych publikacjach można wysunąć ważny dla niniejszej pracy wniosek: skręcenie włókna i wywołane przez nie okresowe sprzęganie modów polaryzacyjnych powinno redukować także DGD wynikającą z dwójłomności indukowanej mechanicznie, która ma stałą orientację na odcinku dłuższym od okresu skrętu i zachowuje się analogicznie jak „naturalna” dwójłomność danego włókna.

Jak zaznaczono w rozdziale 3.1.6.2, wirowanie włókna nie pozostawiające naprężeń wewnętrznych ( $r_s = 0$ ) prawdopodobnie nie daje tego samego efektu. Obecność resztkowych naprężeń skręcających ( $r_s > 0$ ) powinna być w tym przypadku korzystna, redukując PMD indukowaną przez poprzeczny nacisk na włókno.

Rozpatrując sytuację we włóknie nie wirowanym i nie skręconym, bez własnej dwójłomności, na które działa poprzeczna (w kierunku stycznym obwodu rdzenia) siła ściskająca  $F$  i zakładając dla uproszczenia istnienie tylko naprężenia poprzecznego  $\sigma_x$ , otrzymujemy po przekształceniu zależności (41), że występuje dwójłomność liniowa proporcjonalna do tego naprężenia:

$$B = n_x - n_y = R(\sigma_x - \sigma_y) = R\sigma_x \quad (41)$$

oraz DGD również proporcjonalna do naprężenia:

$$\Delta\tau_s = \frac{B}{c} z = \frac{R\sigma_x}{c} z \quad (92)$$

Naprężenie poprzeczne  $\sigma_x$  jest z kolei proporcjonalne do siły ściskającej włókno, przypadającej na jednostkę jego długości:

$$\sigma_x = q \frac{F}{z} = qF_s \quad (93)$$

gdzie:  $F$  - siła ściskająca,  $z$  - długość włókna,  $q$  - współczynnik proporcjonalności zależny od średnicy włókna oraz konstrukcji jego pokrycia ochronnego,  $F_s = F/z$ .

Otrzymujemy prostą zależność określającą DGD indukowaną przez siłę ściskającą:

$$\Delta\tau_s = \frac{qF_s R}{c} z \quad (94)$$

Li, Evans i in. przedstawili wyniki badań potwierdzające tę zależność [131]. Obliczony teoretycznie współczynnik proporcjonalności DGD przy ściskaniu włókna NZDSF umieszczonego w pokryciu pierwotnym  $\varnothing 250 \mu\text{m}$  wynosi 0,14 (ps/km)/(N/m) przy  $L_B = 6 \text{ m}$ ; charakterystyki pomiarowe pozwalają wywnioskować około 0,08 (ps/km)/(N/m).

Orientacja dwójłomności indukowanej przez zewnętrzną siłę ściskającą jest identyczna z kierunkiem działania tej siły i niezależna od ewentualnego wirowania lub skręcenia włókna. W najczęściej spotykanych przypadkach sił ściskających pochodzących od eliptycznego bądź niecentrycznego pokrycia ochronnego lub oddziaływania z kurczącymi się w niskiej temperaturze elementami konstrukcyjnymi jednostki ściślej pokazanej na rys. 25 lub 27, orientacja ta jest względnie niezmienna na długim odcinku włókna.

Własna dwójłomność włókna, na przykład wywołana przez eliptyczność rdzenia sumuje się z dwójłomnością wymuszoną przez siłę zewnętrzną. Analizy w pracach [110,131] pokazują, że zależnie od względnej orientacji, dwójłomności te mogą dodawać się lub znosić się nawzajem. Wirowanie włókna redukuje jego własną PMD i powoduje, że efekt działania siły ściskającej zaczyna dominować znacznie wcześniej, natomiast współczynnik proporcjonalności między tą siłą a indukowaną DGD pozostaje bez zmian. Wniosek ten jest intuicyjny, gdyż wirowanie zmienia okresowo (moduluje) orientację własnej dwójłomności włókna i zapobiega akumulacji związanej z nią DGD, lecz nie wpływa na dwójłomność spowodowaną przez siły zewnętrzne o stałej orientacji, dla której jest „przezroczyście”.

Całkowitą PMD ściskanego włókna wirowanego określa zależność:

$$PMD = \sqrt{(\zeta_w PMD_0)^2 + PMD_s^2} \quad (95)$$

gdzie:  $\zeta_w$  - współczynnik redukcji PMD wskutek wirowania,  $PMD_0$  - PMD włókna światłowodowego nie wirowanego i nie skręcanego,  $PMD_s$  - PMD indukowana przez ściskanie włókna. Porównaj wzór (53). Dla włókna nie wirowanego  $\zeta_w = 1$ .

We włóknie skręcanym sytuacja jest inna. Jeśli włókno skręcono ze stałą szybkością kątową  $\gamma$ , w wyniku efektu elastooptycznego płaszczyzna polaryzacji światła obraca się

z szybkością równą  $g_s\gamma = g\gamma/2$  (rozdział 3.1.7.1). Tak samo zmienia się orientacja dwójłomności powstałej w dowolnym punkcie włókna wskutek nacisku zewnętrznego, widziana w punkcie oddalonym o  $z$ . Dla akumulacji DGD indukowanej przez siłę ściskającą o stałej orientacji daje to identyczny efekt, jak wirowanie włókna z prędkością  $g\gamma$  dla akumulacji DGD wynikającej z eliptyczności rdzenia. Współczynnik redukcji PMD w wyniku skręcania opisują zmodyfikowane formuły (63-64), w których dla ujednoczenia zapisu będziemy używać tylko współczynnika elastooptycznego  $g$ :

$$\zeta_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{g\mathcal{L}_{BS}}{2\pi}\right)^2}} \quad (96)$$

oraz:

$$\zeta_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{gL_{BS}}{\Lambda_s}\right)^2}} \quad (97)$$

gdzie:  $\zeta_s$  to współczynnik redukcji PMD wskutek skręcania,  $\gamma$  - szybkość skręcania włókna światłowodowego,  $L_{BS}$  – droga zdudniania we włóknie skręcanym,  $\Lambda_s$  – okres skręcania włókna, wyznaczony przez zależność:  $\Lambda_s = 2\pi/\gamma$ .

Drogę  $L_{BS}$  można wyznaczyć, uwzględniając, że efektywne wirowanie struktury rdzenia względem własnej (czyli głównie geometrycznej) dwójłomności włókna odbywa się z szybkością  $(1-g/2)\gamma$ , co prowadzi do redukcji związanej z nią PMD włókna opisanej zmodyfikowanym współczynnikiem PMDRF:

$$\zeta_{SN} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{(1-g/2)L_B}{\Lambda_s}\right)^2}} \quad (98)$$

i że następuje wydłużenie „naturalnej”  $L_B$  włókna opisywane zależnością:

$$L_{BS} = \frac{L_B}{\zeta_{SN}} \quad (99)$$

z której wynika, że:

$$L_{BS} = L_B \sqrt{1 + \left(\frac{(1-g/2)L_B}{\Lambda_s}\right)^2} \quad (100)$$

Wstawiając wzór (100) do wzoru (97) otrzymujemy, że związany ze skrętem włókna współczynnik redukcji PMD indukowanej przez zewnętrzną siłę ściskającą wynosi:

$$\zeta_s = \frac{1}{\sqrt{1 + g^2 \left[ \left(\frac{L_B}{\Lambda_s}\right)^2 + \left(1 - \frac{g}{2}\right) \left(\frac{L_B}{\Lambda_s}\right)^4 \right]}} \quad (101)$$

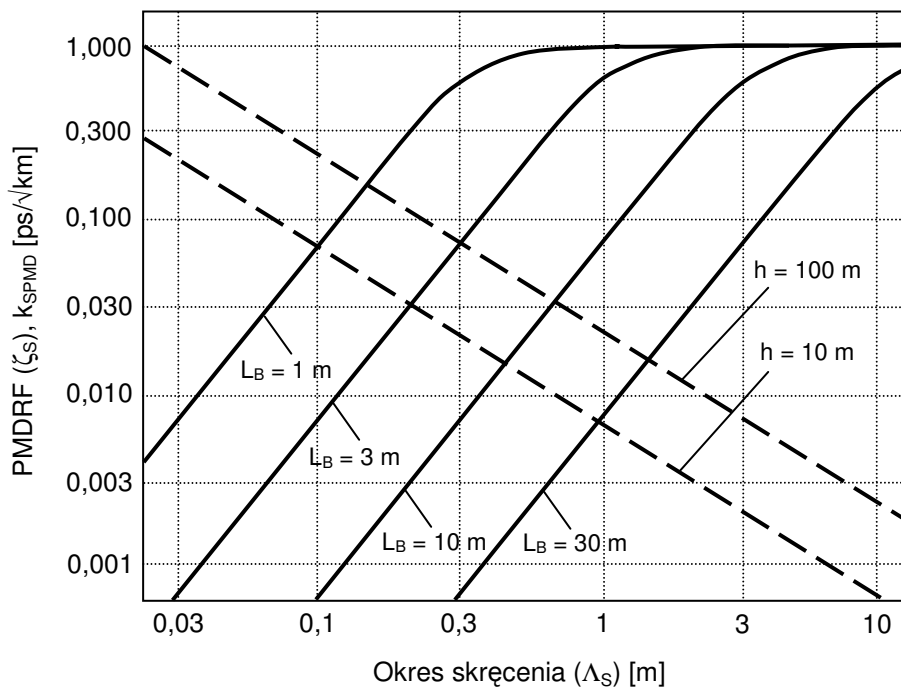
Zależność powyżej można uprościć, wstawiając  $g = 0,14$ . Otrzymujemy:

$$\zeta_s \approx \frac{1}{\sqrt{1 + 0,0196 \left(\frac{L_B}{\Lambda_S}\right)^2 + 0,0182 \left(\frac{L_B}{\Lambda_S}\right)^4}} \quad (102)$$

Przy silnym skręcaniu, kiedy  $L_B/\Lambda_S \geq 5$ , PMDRF będzie malał proporcjonalnie do kwadratu stosunku  $L_B/\Lambda_S$ :

$$\zeta_s \approx 7,4 \left(\frac{\Lambda_S}{L_B}\right)^2 \quad (103)$$

Przyjmując, że we włóknach telekomunikacyjnych obecnie wytwarzanych  $L_B \geq 5$  m, dla 100-krotnej redukcji PMD indukowanej przez zewnętrzne siły ściskające wystarcza skręcanie z okresem (skokiem skrętu)  $\Lambda_S = 183$  mm ( $\gamma = 5,44$  obr/m lub 34,2 rad/m). Odpowiednie charakterystyki przedstawiono na rys. 53.



Rys. 53. Charakterystyki współczynnika redukcji PMD indukowanego przez siły ściskające o stałej orientacji ( $\zeta_s$ ) (linie ciągłe) i PMD wprowadzanej przez skręcanie włókna NZDSF ( $k_{SPMD}$ ) ( $\lambda = 1550$  nm, linie przerywane) w funkcji okresu skrętu.

Skręcanie powoduje powstanie we włóknie dwójłomności kołowej i związanej z nią PMD, zgodnie z zależnością (87). Zgodnie z opisem w rozdziale 3.1.7.3, skręcanie krótkiego, jednorodnego włókna może prowadzić zarówno do wzrostu jak i do redukcji całkowitej PMD, zależnie od proporcji dwójłomności kołowej i liniowej. W długim włóknie o niejednorodnej budowie i dwójłomności zjawisko wzajemnej kompensacji efektów dwójłomności liniowej i kołowej będzie jednak zachodziło w ograniczonym stopniu. Pesymistyczne oszacowanie całkowitej PMD ściskanego włókna skręcanego określa następująca zależność:

$$PMD = \sqrt{(\xi_{SN} PMD_0)^2 + (\xi_S PMD_S)^2 + (k_{SPMD} \gamma)^2} \quad (104)$$

którą po podstawieniu wzoru (90) można przekształcić do postaci:

$$PMD = \sqrt{(\xi_{SN} PMD_0)^2 + (\xi_S PMD_S)^2 + 4 \times 10^{-9} \frac{h\lambda^2}{c^2} L\gamma^2} \quad (105)$$

gdzie:  $\xi_{SN}$  - współczynnik redukcji własnej PMD włókna wskutek skręcenia włókna,  $\xi_S$  - współczynnik redukcji PMD indukowanej przez siłę ściskającą wskutek skręcenia,  $PMD_0$  - własna PMD identycznego włókna nie skręcanego i nie ściskanego,  $PMD_S$  - PMD indukowana przez siłę ściskającą we włóknie nie skręconym,  $\lambda$  - długość fali,  $\gamma$  - szybkość skręcania [rad/m],  $L$  - długość włókna [km],  $h$  - droga korelacji [m].

Dla  $\gamma = 34,2$  rad/m otrzymujemy wartość PMD indukowanej przez skręcenie krótkiego odcinka włókna  $p = 0,36$  ps/km. Dla  $h = 10$  m otrzymujemy współczynnik indukowanej PMD do obliczeń długich linii kablowych  $k_{SPMD} = 0,036$  ps/ $\sqrt{\text{km}}$ .

**Jest możliwe takie skręcenie włókna światłowodowego, które daje skuteczną ochronę przed indukowaniem PMD przez siły ściskające, a nie podwyższa znacznie własnej PMD tego włókna.**

Podobny, choć słabszy efekt daje „zamrożone” w wirowanym włóknie światłowodowym naprężenie skręcające rdzeń, omówione w rozdziale 3.1.7.2. Rdzeń włókna wirowanego z prędkością  $\alpha$  [obr/m] i posiadającego współczynnik naprężeń resztkowych  $r_s$  jest poddany naprężeniom skręcającym równoważnym skręceniu z okresem  $\Lambda_s$  określonym wzorem:

$$\Lambda_s = \frac{1}{\alpha \cdot r_s} \quad (106)$$

Sarchi i Roba z firmy Pirelli [132] opublikowali wyniki badań skręcanych jednokierunkowo włókien G.652, które sugerują  $r_s \approx 0,10$  dla  $\alpha = 3,6-7,3$  obr/m. Zakładając następujące parametry, podawane często w analizach teoretycznych:  $r_s = 0,10$  (rys. 48) oraz  $\alpha = 5$  obr/m, otrzymujemy  $\Lambda_s = 2$  m, który (rys. 53) zapewnia minimum 10-krotną redukcję PMD we włóknie jednomodowym o typowej obecnie jakości. Takie skręcenie byłoby jednak niewystarczające dla redukcji PMD we włóknie jednomodowym z lat 80-tych.

## 3.2. Wpływ PMD na pracę łącza cyfrowego

### 3.2.1. Degradacja transmisji cyfrowej w łączu z kodem liniowym NRZ

Prosty kod liniowy NRZ, w którym stan „0” jest odwzorowany jako minimalna moc promieniowania emitowanego z nadajnika, a stan „1” jako moc maksymalna stanowi obecnie standard przemysłowy dla prawie wszystkich urządzeń do cyfrowej transmisji optycznej, w tym SDH, SONET i Gigabit Ethernet o przepływności do 10 Gbit/s włącznie. Standard ten opracowano głównie z myślą o uproszczeniu konstrukcji i ograniczeniu kosztów urządzeń przy założeniu, że dyspersja toru światłowodowego nie stanowi podstawowego problemu.

Dokładne analizy wpływu dyspersji znajdują się w bogatej literaturze i standardach, m.in. w zaleceniu ITU-T G.691 [133] i poradniku IEC TR 61282 [114]; opis zostanie ograniczony do podstawowych wniosków związanych z tolerancją PMD w łączach cyfrowych.

Oddziaływanie dyspersji, zarówno chromatycznej (CD) jak i polaryzacyjnej (PMD) prowadzi do interferencji międzysymbolowej, zamykania oka odbieranego impulsu optycznego i wzrostu elementowej stopy błędów transmisji (BER). Szkodliwe efekty PMD i CD dodają się przy tym do wpływu szumów fotodetektora i wzmacniacza, szumów wzmacniaczy optycznych, nieidealnej charakterystyki częstotliwościowej odbiornika, nieoptymalnego ustawienia napięcia progowego układu decyzyjnego, fluktuacji fazowych i błędów statycznego układu odtwarzającego taktowanie i in. Dla pracy odbiornika ważna jest chwilowa wartość DGD, więc losowa zmienność tego parametru przenosi się na losowe



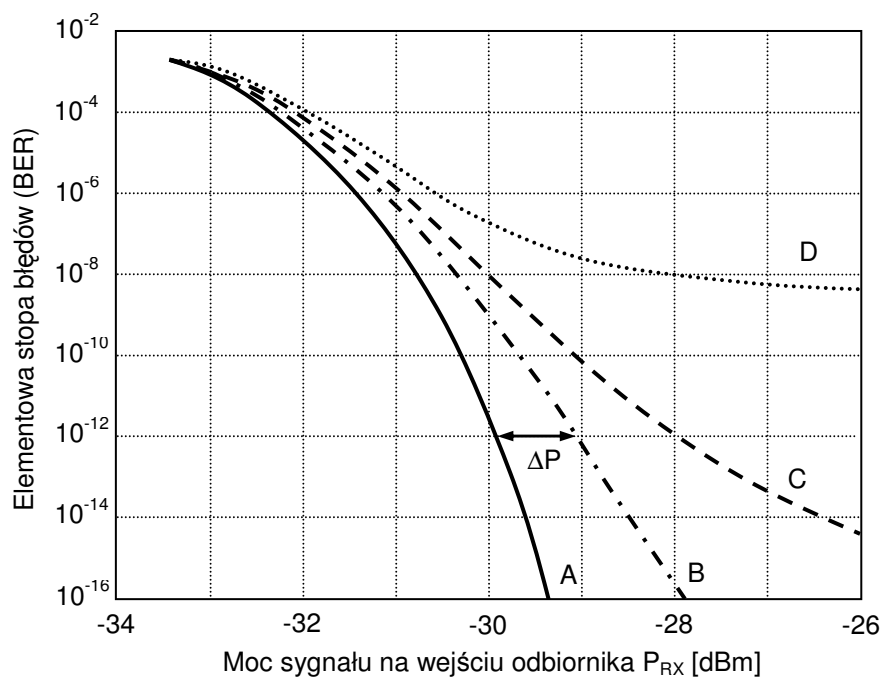
zmiany BER. Każde urządzenie reaguje nieco inaczej na wpływ dyspersji, ale ogólne charakterystyki i granice tolerancji DGD pozostają podobne.

Charakterystyka stopy błędów odbiornika zmienia się w obecności tych czynników w sposób pokazany na rys. 54 [20]. W celu zachowania wymaganej stopy błędów, ustalonej w przypadku systemów SDH i DWDM na  $10^{-12}$ , a w systemach PDH i GbE na  $10^{-9}$  niezbędne jest zwiększenie mocy sygnału, tym większe, im silniejsza jego degradacja. Parametr ten, wyrażany w dB określa się jako „stratę czułości odbiornika” (ang. *Receiver Power Penalty*), uwzględnianą w kalkulacjach budżetu mocy łącza cyfrowego i obliczaną według zależności:

$$\Delta P = P_{RX} - P_{RX0} \quad (107)$$

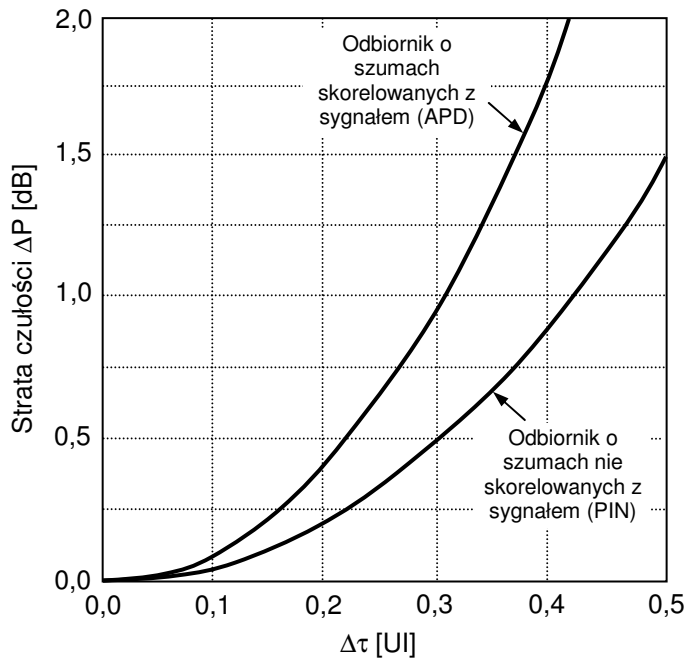
gdzie  $\Delta P$  – strata czułości odbiornika,  $P_{RX}$  – moc sygnału wymagana dla uzyskania wymaganej wartości BER w warunkach degradacji sygnału w torze optycznym, na przykład przez oddziaływanie dyspersji,  $P_{RX0}$  – moc sygnału wymagana dla uzyskania wymaganej BER przy braku degradacji sygnału - po połączeniu nadajnika z odbiornikiem przez tłumik.

Silna degradacja sygnału prowadzi do powstania „podłogi” – stanu, kiedy BER nie spada poniżej pewnej wartości mimo doprowadzania do wejścia odbiornika coraz silniejszego sygnału i praktycznego wyeliminowania wpływu szumów odbiornika, co przedstawia krzywa D na rys. 54. Jeszcze silniejsza – do przerwy w transmisji.



Rys. 54. Wpływ dyspersji i innych zakłóceń na charakterystyki stopy błędów odbiornika STM-16. Krzywe A,B,C i D odpowiadają coraz silniejszej degradacji sygnału.

Jeżeli PMD stanowi dominujące źródło degradacji sygnału, strata czułości  $\Delta P$  rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie do kwadratu DGD, co pokazano na rys. 55. Wpływ PMD jest najsilniejszy, kiedy moc nadajnika dzieli się po 50% na oba PSP i najslabszy, kiedy pobudzony jest tylko jeden z PSP. Orientacja liniowej polaryzacji promieniowania z nadajnika względem PSP jest nieznaną, więc zawsze zakłada się najbardziej niekorzystny wariant.



Rys. 55. Zależność straty czułości odbiornika sygnału NRZ od DGD [133].

### 3.2.2. Obliczenia łącza cyfrowego związane z PMD

Zalecenia ITU-T dla interfejsów optycznych urządzeń SDH [19,134] dopuszczają w większości wersji  $\Delta P = 1$  dB. Wyższą wartość  $\Delta P = 2$  dB dopuszczono w urządzeniach dla łączy o większych długościach, gdzie dyspersja stanowi dominujące ograniczenie.

Według zalecenia ITU-T G.691 [133], strata czułości dla  $BER = 10^{-12}$  nie przekracza 1 dB, jeżeli DGD toru optycznego spełnia warunek:

$$\Delta\tau \leq 0,3UI \quad (108)$$

gdzie  $UI$  to szerokość impulsu jednostkowego sygnału cyfrowego. Zależność tę można przekształcić do postaci:

$$\Delta\tau \leq \frac{0,3}{B} \quad (109)$$

gdzie  $B$  to częstotliwość taktowania sygnału liniowego, równa 9,95328 GHz w łączy STM-64 bez kodowania FEC i 10,619608 GHz w łączy STM-64 z kodowaniem FEC. Obliczony limit należy zmniejszyć o DGD wnoszone przez pasywne elementy optyczne, na przykład demultiplexery WDM, w sposób określony przez poradnik IEC TR 61282 [114].

$UI$  i maksymalna wartość tolerowanej DGD zmieniają się odwrotnie proporcjonalnie do przepływności sygnału; ta zależność wyjaśnia, dlaczego PMD stanowi problem głównie w przypadku łączy w sieciach szkieletowych o najwyższych przepływnościach.

DGD zmienia się w sposób losowy, omówiony w rozdziale 3.1.5. Nie ma absolutnej gwarancji, że określony wzorem (109) limit nie będzie nigdy przekroczony. Można tylko ograniczyć prawdopodobieństwo wypadnięcia łącza z pracy wskutek przekroczenia dozwolonej DGD do wartości zgodnej z wymaganym poziomem jakości usługi (QoS). Kontrakt QoS określa tradycyjnie dozwoloną liczbę minut w roku, kiedy następuje przerwa lub degradacja jakości transmisji.

Większość łączy służy do transmisji w obu kierunkach i awarię stanowi wypadnięcie z pracy dowolnego z nich. W łączy złożonym z wielu sekcji regeneracji, awarię stanowi wypadnięcie z pracy dowolnej pojedynczej sekcji. Uwzględniając te założenia, dozwolone

prawdopodobieństwo przekroczenia tolerowanej DGD określa formuła, stanowiąca pochodną znanego wzoru z dokumentu IEC TR 61282:

$$P_{DGD} = \frac{N_{MIN}}{365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot N_K \cdot N_{SR}} \quad (110)$$

gdzie:  $P_{DGD}$  – prawdopodobieństwo przekroczenia dozwolonej DGD,  $N_{MIN}$  – liczba minut niedostępności łącza w roku,  $N_K$  – liczba kierunków transmisji (1 lub 2),  $N_{SR}$  – liczba sekcji.

Znając  $P_{DGD}$  można określić współczynnik krotności  $S = \Delta\tau/PMD$ . Charakterystykę wiążącą te parametry przedstawia rys. 41, a zestawienie wartości  $S$  i  $P_{DGD}$  znajduje się w tabeli 13. Jeśli pominać DGD pochodzące od elementów pasywnych i wzmacniaczy EDFA, dozwolona PMD toru optycznego wynosi:

$$PMD \leq \frac{0,3}{B \cdot S} \quad (111)$$

W literaturze podaje się jako typową dla pojedynczego łącza  $S = 3,0$ , czemu odpowiada  $P_{DGD} = 4,2 \times 10^{-5}$  oraz  $N_{MIN} = 22/\text{rok}$ . Wówczas dostajemy następujące proste zależności:

$$PMD \leq \frac{0,1}{B} \quad (112)$$

oraz:

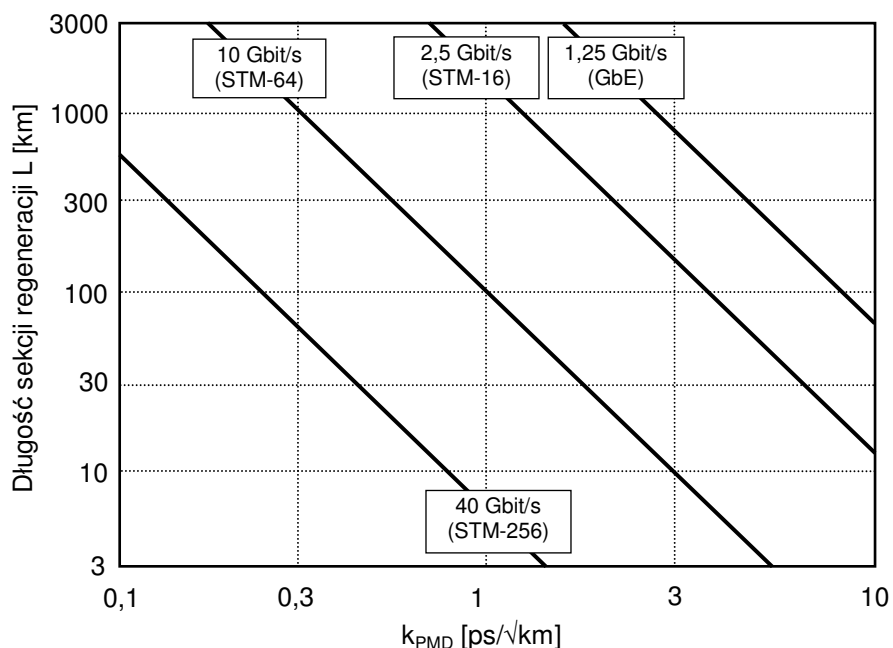
$$k_{PMD} \leq \frac{0,1}{B\sqrt{L}} \quad (113)$$

gdzie  $k_{PMD}$  – współczynnik PMD włókna światłowodowego w kablu,  $L$  - długość linii. Zależności te dla najczęściej spotykanych systemów transmisyjnych przedstawia rys. 56.

Tabela 13. Prawdopodobieństwo przekroczenia przez DGD S-krotnej wartości PMD (wyznaczonej jako wartość średnia DGD) zgodnie z rozkładem Maxwella [114].

S	$P_{DGD}$	S	$P_{DGD}$
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$	3,8	$5,1 \times 10^{-8}$
3,1	$2,0 \times 10^{-5}$	3,9	$2,0 \times 10^{-8}$
3,2	$9,2 \times 10^{-6}$	4,0	$7,4 \times 10^{-9}$
3,3	$4,1 \times 10^{-6}$	4,1	$2,7 \times 10^{-9}$
3,4	$1,8 \times 10^{-6}$	4,2	$9,6 \times 10^{-10}$
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$	4,3	$3,3 \times 10^{-10}$
3,6	$3,2 \times 10^{-7}$	4,4	$1,1 \times 10^{-10}$
3,7	$1,3 \times 10^{-7}$	4,5	$3,7 \times 10^{-11}$

Zamieszczone w tym rozdziale wzory i charakterystyki dotyczą sytuacji, kiedy PMD jest dominującym zjawiskiem ograniczającym parametry systemu transmisyjnego. W obecności takich szkodliwych efektów, jak dyspersja chromatyczna, zakłócenia spowodowane przez mieszanie czterofalowe (FWM) lub szумы pochodzące ze wzmacniaczy optycznych zakres tolerancji PMD odpowiednio zmniejsza się. Przykład przedstawiono na rys. 62.



Rys. 56. Maksymalny współczynnik PMD kabla światłowodowego w funkcji przepływności i długości sekcji regeneracji łącza cyfrowego z kodem liniowym NRZ.

### 3.2.3. Metody ograniczania wpływu PMD

Telekomunikacyjne sieci kablowe to kosztowna i kłopotliwa w budowie infrastruktura o długim okresie eksploatacji, mieszczącym się normalnie w zakresie od 8 lat dla sieci napowietrznych z kabli dielektrycznych podczepianych do 40 lat dla sieci podziemnych. Fizyczna żywotność wysokiej jakości kabli kanałowych jest szacowana na około 100 lat.

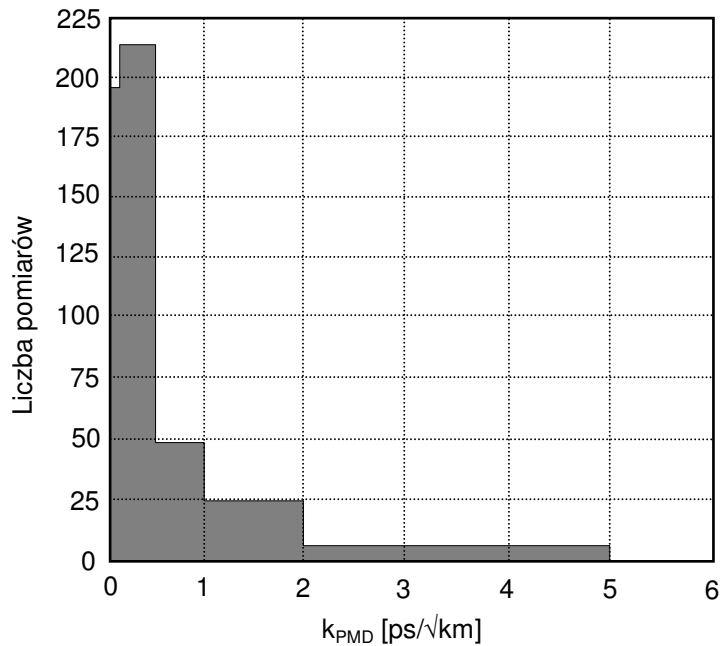
W tych warunkach występuje problem starzenia moralnego sieci kablowych i współpracy kolejnych generacji urządzeń transmisyjnych z siecią zaprojektowaną oryginalnie według zupełnie innych wymagań technicznych. Dobrze znane przykłady to:

- ✓ Wycofanie włókien wielomodowych z sieci telekomunikacyjnych i częściowa ich eliminacja z sieci LAN lub wymiana na nowe po wprowadzeniu urządzeń Gigabit Ethernet.
- ✓ Nadmierna tłumienność części linii światłowodowych zaprojektowanych i przetestowanych dla transmisji sygnałów o  $\lambda \approx 1310$  nm w innych zakresach, szczególnie 1550 nm, a także 1360-1400 nm i powyżej 1600 nm.
- ✓ Niekompatybilność urządzeń DWDM pracujących w zakresie C z włóknami DSF, a nawet NZDSF pierwszej generacji wskutek mieszania czterofalowego.
- ✓ Wrażliwość urządzeń transmisyjnych DWDM i CATV z wzmacniaczami EDFA na odbicia promieniowania w złączach światłowodowych starszych generacji, bez konstrukcji APC.
- ✓ Wysoka PMD części włókien w kablach jednomodowych zainstalowanych przed 1997 r. (rys. 1), ograniczająca ich przydatność dla łączy o przepływności  $\geq 10$  Gbit/s.

Wprowadzanie kolejnych technologii transmisji optycznej z pewnością wydłuży przedstawioną listę. Dalsze rozdziały będą poświęcone remediom dla ostatniego wymienionego problemu.

#### 3.2.3.1. Pomiary, selekcja i realokacja włókien światłowodowych

Pomiary PMD torów optycznych w sieciach kablowych zbudowanych przed 2000 r. [16-18,135,136] wykazują, że skrajne wartości współczynnika PMD wśród kilkudziesięciu torów w tej samej linii pozostają z zasady w proporcji 10:1 lub wyższej, co widać na rysunkach 1 i 57.



Rys. 57. Rozkład statystyczny PMD w liniach kablowych Deutsche Telekom AG (1998 r.). Włókna G.652,  $\lambda = 1321$  nm. Średnia długość linii 27,34 km. [136].

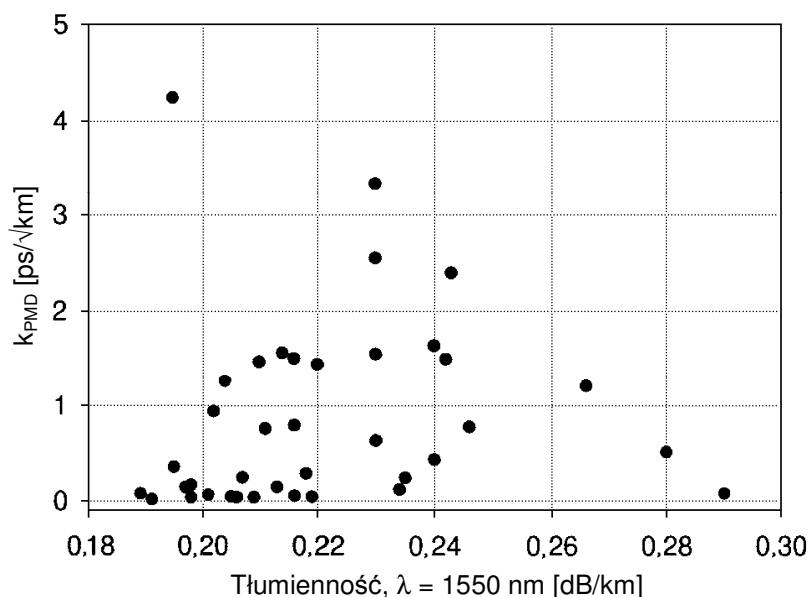
Rys. 57 pokazuje reprezentatywne dane z pomiarów w RFN. Najwyższe wartości PMD dochodzą do 5 ps/√km i takie włókna są mało przydatne nawet dla łączy 2,5 Gbit/s (rys. 54), ale około 80% linii ma  $k_{PMD} \leq 0,5$  ps/√km, wystarczająco niski dla budowy łączy międzymiastowych 10 Gbit/s o długości sekcji regeneracji ponad 300 km. Opublikowane przez różnych badaczy wyniki pomiarów linii kablowych [135-138] i wyniki badań wykonanych przez autora [139-142] przedstawione w rozdziale 6 wykazują równocześnie, że PMD zwykle nie jest skorelowana z tłumiennością włókna w kablu.

Pomiary kabli światłowodowych w sieci firmy New Brunswick Telephone Co. (NBTEL) zaprezentowane szczegółowo w opracowaniach [135,137] dostarczyły dodatkowych danych potencjalnie przydatnych w kraju. Operator ten budował swą sieć w latach 1985-89 z kabli rozetowych z włóknami jednomodowymi G.652, a od 1990 r. wprowadził zamiast nich kable tubowe. Brak informacji o dostawcy kabli rozetowych, ale była nim prawdopodobnie amerykańska firma Superior Optics. Podobna zmiana miała miejsce w Polsce w sieci PKP, instalującej kable rozetowe do 1998 r.

Wyniki przedstawione na rys. 58 potwierdzają brak korelacji między tłumiennością a PMD włókien światłowodowych, niezależnie od konstrukcji kabla. Zaskoczeniem są jednak rezultaty pomiarów PMD uszeregowane w funkcji daty instalacji kabla, pokazane na rys. 59.

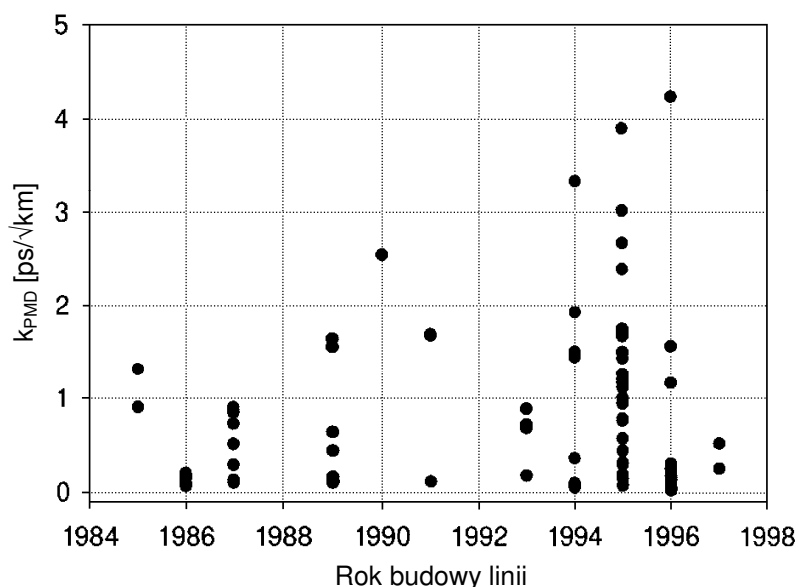
Po wprowadzeniu w 1990 r. kabli tubowych, mimo poprawy jakości umieszczanych w nich włókien światłowodowych nastąpił wzrost maksymalnych wartości PMD i wyraźne rozszerzenie zakresu zmienności tego parametru. Porównanie z rys. 1 prezentującym wyniki pomiarów w sieci TP S.A., zbudowanej prawie w całości z kabli tubowych prowadzi do wniosku, że skuteczne izolowanie włókien światłowodowych od mikrozgieć i innych zewnętrznych oddziaływań mechanicznych zapewnione w luźnej tubie wypełnionej żelazem wysokiej jakości, korzystne dla tłumienności i żywotności włókien nie jest sposobem na zagwarantowanie niskiej i powtarzalnej PMD – efekt bywa wręcz przeciwny.

Dlaczego? Mikrozmęczenia, defekty pokrycia i ściskanie włókien typowe dla ośrodka rozetowego produkowanego około 1990 r. zwiększają intensywność mieszania modów polaryzacyjnych i skracają drogę korelacji  $h$  [111], a zgodnie ze wzorem (51), PMD włókna o danej dwójłomności geometrycznej rośnie proporcjonalnie do  $\sqrt{h}$  - patrz rozdział 3.1.4.



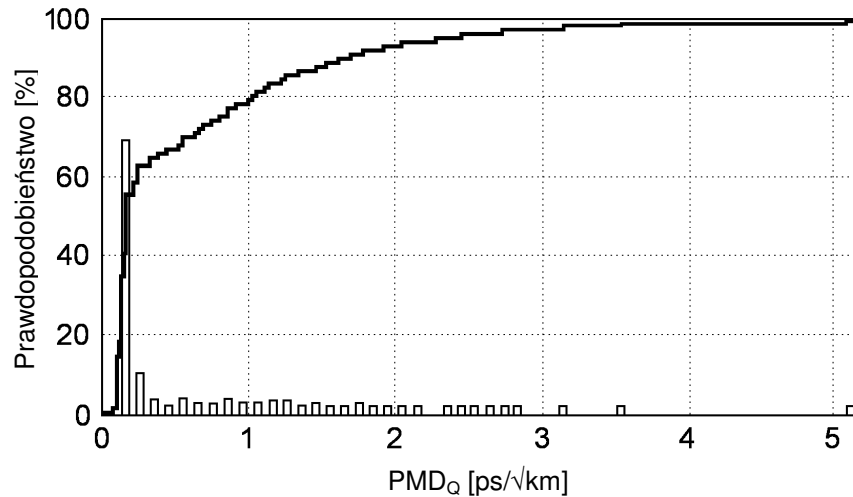
Rys. 58. Rozkład PMD i tłumienności 40 włókien światłowodowych w sieci NBTel [137].

Można sformułować wniosek, że (umiarkowanie) niska jakość kabla, cechującego się dość wysokim i powtarzalnym poziomem mikrozgieć włókien przyczynia się do częściowej poprawy PMD umieszczonego w kablu włókna światłowodowego.



Rys. 59. PMD włókien w liniach kablowych NBTel w funkcji daty budowy [137].

Opinia, że produkowane po 1996 r. kable mają niską PMD nie zawsze potwierdza się w praktyce, gdyż niedoskonałe technologie, ubogie wyposażenie fabryk kabli w aparaturę pomiarową, a przede wszystkim naciski na cięcie kosztów prowadzą nadal do budowy linii kablowych o zaskakująco wysokiej PMD. Opublikowane przez Barcelosa [138] zbiorcze wyniki pomiarów PMD w 2140 liniach zbudowanych w latach 1997--2002 w Brazylii, pokazane na rys. 60 wykazały, że aż 30% z nich ma  $PMD_Q > 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , wyższe niż dozwolone przez zalecenie ITU-T G.652 [10] i inne dokumenty normalizacyjne; dla wyrobów najgorszego producenta odsetek ten wynosił 77%. Nie stwierdzono też poprawy w przypadku linii budowanych w latach 2001-2002.



Rys. 60. Rozkład statystyczny i skumulowane prawdopodobieństwo PMD w liniach kablowych w Brazylii [138].

Liczba torów optycznych potrzebnych dla systemów 10 Gbit/s i 40 Gbit/s, wrażliwych na wpływ PMD jest zwykle niewielka w porównaniu do całkowitej ich liczby. W większości sieci pracuje równocześnie duża liczba łączy o przepływnościach do 2,5 Gbit/s: E4, D1, STM-1/4/16, OC-1/3/12/48, GbE i in., również krótkie łącza 10 Gbit/s w sieci miejskiej nie stawiają ostrych wymagań odnośnie współczynnika PMD włókna. Ponadto operator sieci dysponuje przeważnie pewną liczbą wolnych włókien.

Pomiary PMD w torów optycznych w liniach kablowych i ich alokacja do systemów transmisyjnych o różnych długościach i przepływnościach zależnie od PMD są w tej sytuacji efektywnym i tanim rozwiązaniem. Pomiary linii kablowych w sieci miejskiej FastWeb w Turynie [139] wykonane przez autora wykazały, że charakterystyka spektralna DGD i wartość PMD nie zależą od kierunku transmisji, więc dla pełnej charakteryzacji toru światłowodowego wystarcza pojedynczy pomiar.

Inny sposób uzyskania torów optycznych o niskiej PMD polega na lokalizacji odcinków włókien o wysokiej PMD za pomocą reflektometru POTDR i zastąpieniu ich lepszymi włóknami wybranymi z tych samych odcinków fabrykacyjnych kabli. Włókna o wysokiej PMD są wycofywane z eksploatacji lub łączone w tory niskiej jakości dla drugorzędnych zastosowań. Ta metoda wymaga zastosowania mało znanego przyrządu pomiarowego, ponownego spawania włókien światłowodowych i końcowych pomiarów PMD, jest droższa i bardziej czasochłonna, ale nadal tańsza od instalacji nowego kabla.

Linie optotelekomunikacyjne buduje się łącząc odcinki fabrykacyjne kabli światłowodowych o długości zawierającej się na ogół w granicach 1-3 km. Tor optyczny o typowej długości 60 km składa się przeciętnie z 20-30 odcinków włókien. Każdy z nich może pochodzić z innej preformy i znacznie różnić się wartością PMD. Całkowitą PMD toru wykonanego z  $m$  odcinków włókien światłowodowych opisuje zależność:

$$PMD = \sqrt{\sum_{n=1}^m PMD_n^2} \quad (114)$$

gdzie:  $n$  – numer odcinka włókna,  $PMD_n$  – PMD tegoż odcinka. Zależność ta ma charakterystyczną cechę: pojedynczy odcinek włókna o bardzo wysokim współczynniku PMD wnosi praktycznie bez zmian dominujący wkład do PMD całego toru, natomiast w przypadku połączenia odcinków o zbliżonej PMD całkowita dyspersja jest znacznie mniejsza.

W tabeli 14 zaprezentowano trzy obliczenia PMD dla linii długości 50 km złożonej z 25 odcinków po 2 km każdy. We wszystkich przypadkach średnia wartość współczynnika dyspersji polaryzacyjnej dostarczonych włókien jest identyczna: 0,10 ps/√km. Obecność niewielkiej liczby odcinków o wysokiej PMD jest bardzo szkodliwa; ich znalezienie i wymiana

na nowe lub realokacja jest w stanie zasadniczo poprawić parametry całej linii. Widać, że średni współczynnik PMD nie opisuje dobrze zachowania linii zbudowanej z wielu odcinków.

Tabela 14. PMD linii kablowej w funkcji rozkładu PMD odcinków fabrykacyjnych kabli.

Kompozycja linii optotelekomunikacyjnej	PMD	$k_{PMD}$
Liczba odcinków i współczynnik PMD włókna światłowodowego	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$
25 odcinków z $k_{PMD} = 0,10$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$	0,500	0,100
20 odcinków z $k_{PMD} = 0,05$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ + 5 odcinków z $k_{PMD} = 0,30$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$	1,000	0,200
24 odcinki z $k_{PMD} = 0,025$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ + 1 odcinek z $k_{PMD} = 1,90$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$	1,907	0,382

Przedstawione wyżej metody postępowania są nieskuteczne, kiedy mamy do czynienia z podobnym wzrostem PMD wszystkich włókien w danym kablu, pod działaniem takich czynników jak zmiana temperatury lub starzenie materiałów [140-142].

### 3.2.3.2. Optyczna kompensacja PMD

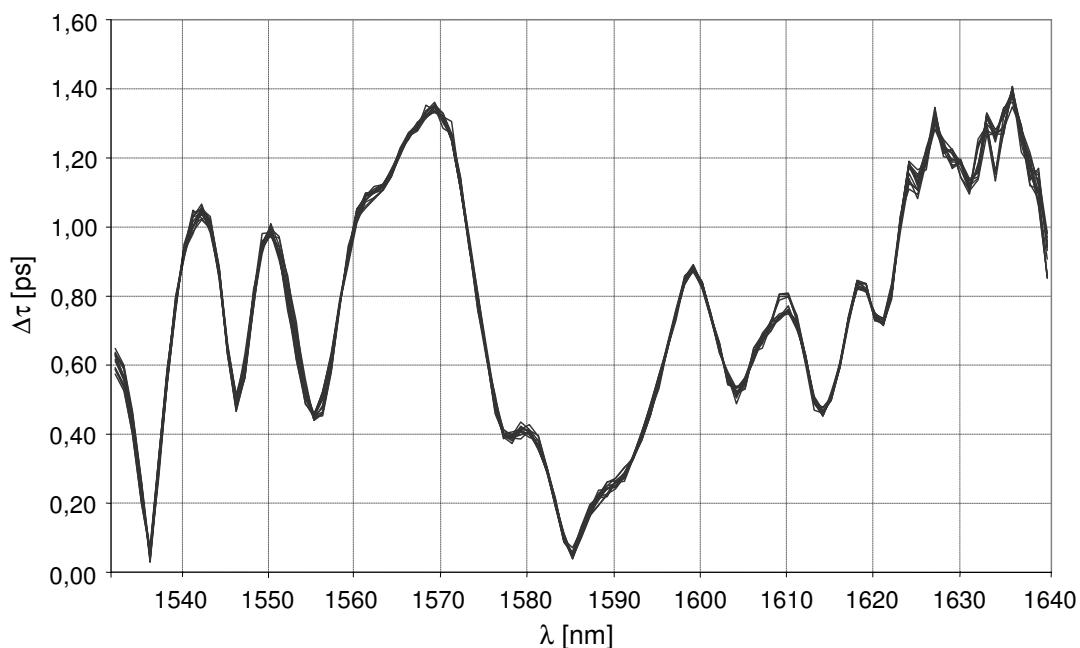
Metodom optycznego redukowania PMD linii kablowych poświęcono od około 10 lat szereg prac badawczych i publikacji, jednak efektywność proponowanych i przetestowanych rozwiązań jest ograniczona, a kompensacja PMD bardzo rzadko stosowana w praktyce. W przeciwieństwie do dyspersji chromatycznej, której kompensacja za pomocą włókien DCF i siatek Bragga (FBG) o zmiennym okresie jest szeroko stosowana, na przeszkodzie w opracowaniu podobnego rozwiązania dla PMD stoją:

1. Losowa zmienność DGD w funkcji czasu, przy czym w zależności od rodzaju sieci kablowej i warunków jej eksploatacji szybkość zmian zawiera się w bardzo szerokim zakresie. Zmiana DGD może nastąpić w skrajnych przypadkach w czasie od 10 ms (poruszenie włóknem, uderzenie w osłonę złączową) do 6 miesięcy (linia kablowa ułożona pod ziemią na głębokości ponad 1 m, oddalona od miast i dróg). Skuteczna kompensacja PMD musi być **adaptacyjna**, wykonywana przez urządzenie aktywne wyposażone w mechanizm pomiaru DGD lub innego parametru z DGD związanego. Istnieje tu problem kosztów i szybkości reakcji na nagłe zmiany DGD włókna, powodowane przykładowo wibracjami kabla napowietrznego lub poruszaniem włókien podczas robót montażowych na linii. Przykłady zmian charakterystyk DGD w czasie pokazano na rys. 61 i 62.
2. Silna zależność DGD od długości fali, też częściowo losowo zmienna (rys. 61). Kompensacja PMD w systemie wielofalowym musi być na ogół wykonywana **indywidualnie dla każdego kanału** lub nielicznej ich grupy zajmującej wąski przedział spektralny. W ten sposób traci się podstawowy atut ekonomiczny transmisji DWDM, którym jest podział kosztów drogich elementów takich jak tor światłowodowy, wzmacniacze EDFA, kompensatory dyspersji chromatycznej oraz multipleksery i demultipleksery optyczne między 16-80 kanałów.

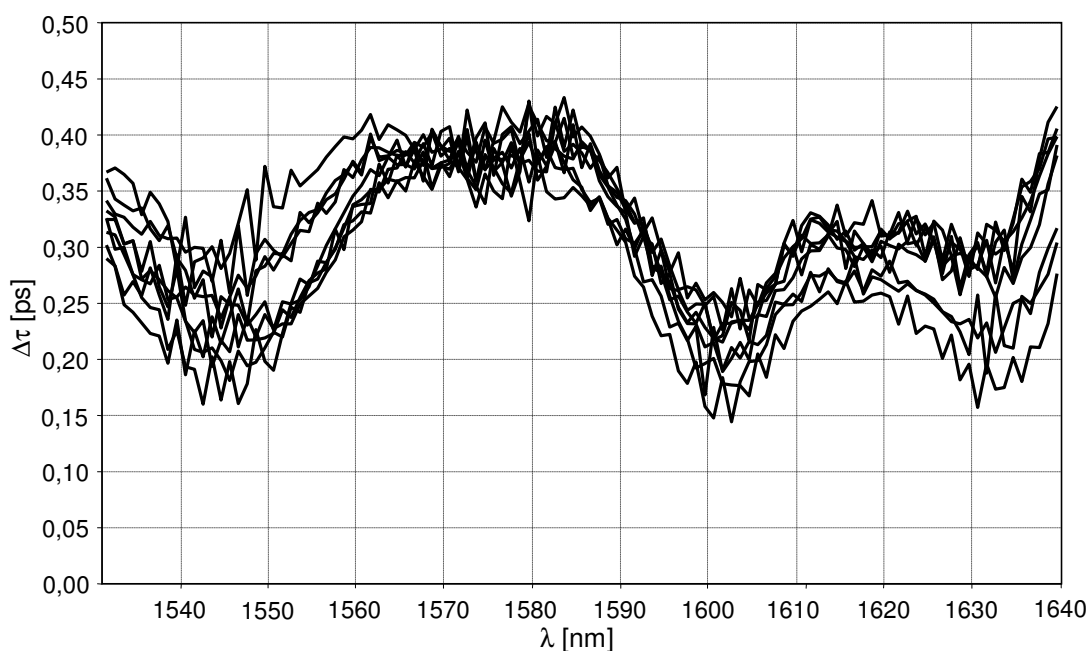
Ilustrację problemu (2) daje charakterystyka spektralna z rys. 61, gdzie DGD zmienia się w stosunku prawie 1:40, a minima i maksima dzieli około 6 nm.

Dyspersja polegająca na samej DGD jest określana jako PMD pierwszego rzędu (ang. *First Order PMD*). Oprócz niej występuje PMD drugiego rzędu (ang. *Second Order PMD*, SOPMD), związana ze zmiennością wektora PMD (którego amplitudą jest DGD) z częstością falową  $\omega$ , posiadająca dwie składowe, wywołujące (a) zależną od polaryzacji dyspersję chromatyczną i (b) stopniowy obrót PSP oraz depolaryzację promieniowania.



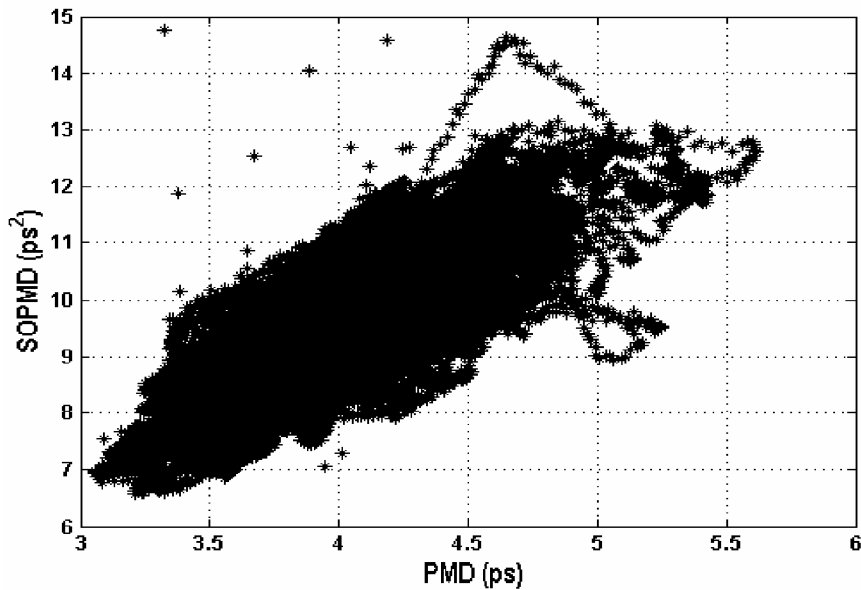


Rys. 61. Charakterystyki DGD linii światłowodowej zbudowanej z około 20 odcinków kabli tubowych z włóknami G.652, ułożonych w kanalizacji kablowej w mieście. Długość linii: 31,8 km. 5 pomiarów wykonanych w odstępie 1 h [139].



Rys. 62. Charakterystyki DGD linii światłowodowej zbudowanej z około 20 odcinków kabli tubowych z włóknami G.652, ułożonych w kanalizacji kablowej w mieście. Długość linii: 34,7 km. 9 pomiarów wykonanych w odstępie 3 h [139].

PMD drugiego rzędu nabiera znaczenia przy transmisji sygnałów o przepływności 40 Gbit/s i wyższej, wprowadzając m.in. losowe zmiany dyspersji chromatycznej toru optycznego, nie usuwane przez pasywne, statyczne kompensatory DCF i FBG. Większość opracowanych dotąd metod kompensacji dotyczy wyłącznie PMD pierwszego rzędu; wpływ PMD wyższych rzędów ogranicza ich efektywność. Teoria i pomiary linii kablowych [143] wskazują, że proporcja PMD i SOPMD jest w przybliżeniu stała, co przedstawiono na rys. 63. Ta zależność wyznacza granicę redukcji PMD metodą kompensacji PMD pierwszego rzędu.



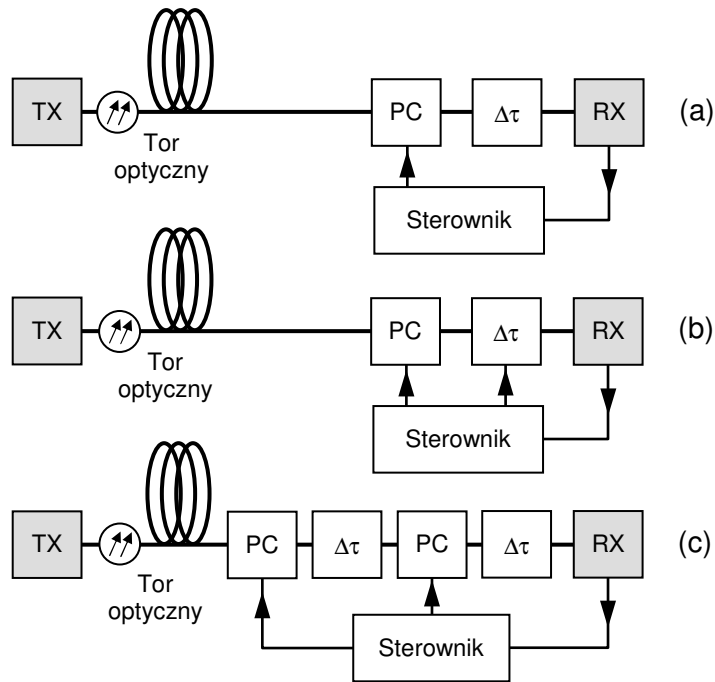
Rys. 63. Korelacja wartości PMD i SOPMD zarejestrowanych w czasie 90 dni pomiarów podziemnej linii kablowej długości 268 km z włóknami G.652. Wartości średnie dla przedziału widma o szerokości 70 nm [143].

Typowe rozwiązanie kompensatora PMD (rys. 64) polega na wstawieniu na końcu toru światłowodowego elementu optycznego o znanej dwójłomności (stałej lub regulowanej), na przykład odcinka włókna jednopolarizacyjnego PANDA, poprzedzonego przez kontroler polaryzacji, sterowany tak, by dwójłomności toru światłowodowego i wymienionego elementu znosiły się (rys. 64a,b). Nieco lepszą skuteczność mają układy 2-stopniowe (rys. 64c), dokładniej odtwarzające zachowanie światłowodu. Bardzo skuteczną redukcję PMD daje wstawienie kontrolera polaryzacji przed torem optycznym w celu dopasowania polaryzacji promieniowania z nadajnika do jednego z głównych stanów polaryzacji (PSP) na wejściu włókna, ale kontroler musi być zdalnie sterowany na podstawie oceny stopnia polaryzacji sygnału na drugim końcu linii, co jest niedogodne i obniża niezawodność łącza.

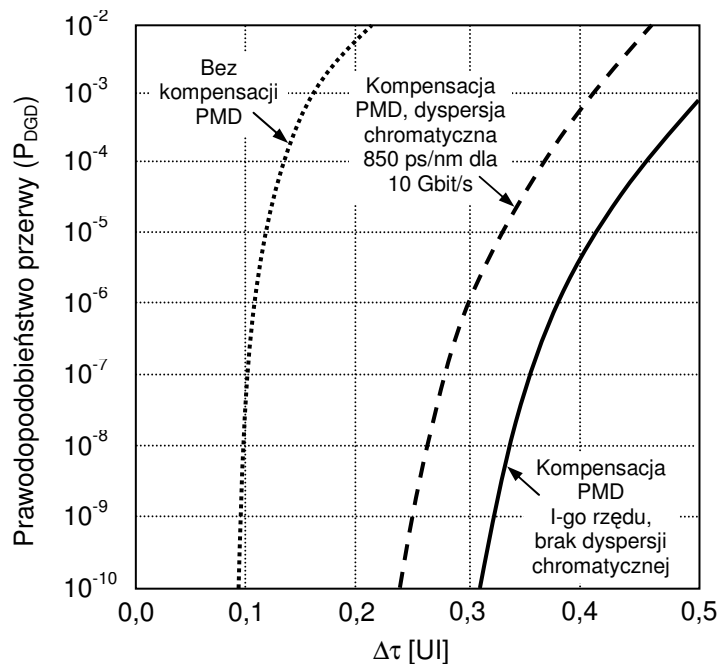
Optymalny układ tego typu daje teoretycznie 3,7-krotną redukcję PMD [144], przedstawioną na rys. 65. W opisywanych w literaturze doświadczeniach zdołano doprowadzić do około 3-krotnego zmniejszenia PMD, co umożliwia zwiększenie przepływności sygnału przesyłanego linią światłowodową w tej samej proporcji lub 9-krotne wydłużenie linii z włóknem światłowodowym o identycznej jakości.

Kompensacja PMD pozostaje niestety zbyt kosztowna, z wyjątkiem budowy łącza 40 Gbit/s po istniejących włóknach dzierżawionych i eliminacji „wąskich gardeł” tworzonych przez niskiej jakości linie kablowe, których wymiana jest niemożliwa, bardzo droga lub zbyt czasochłonna. Nie jest to obecnie rozwiązanie dla sieci LAN i MAN, w których kable z włóknami w pokryciach ścisłych są często spotykane.

Kompensacja PMD w łączu DWDM jest tańsza, jeśli zostanie ograniczona do kanału o najwyższej w danym momencie wartości DGD. Elementy optyczne kompensatora są umieszczone przed demultiplekserem. Sterownik otrzymuje dane ze wszystkich odbiorników i dobiera parametry kompensacji tak, by minimalizować najwyższą raportowaną DGD.



Rys. 64. Wybrane układy kompensatorów PMD instalowanych przed odbiornikiem. Oznaczenia: TX – nadajnik, RX – odbiornik, PC – kontroler polaryzacji,  $\Delta\tau$  - element wnoszący dwójłomność optyczną. Na podstawie [145].



Rys. 65. Prawdopodobieństwo degradacji lub przerwy transmisji ( $P_{DGD}$ ) w funkcji DGD toru optycznego dla łączy bez kompensacji PMD i z kompensacją PMD pierwszego rzędu. Obliczenia teoretyczne wykonane dla łączy z kodem NRZ [144].

### 3.2.3.3. Elektroniczna kompensacja dyspersji

Jest to nowa technologia, wprowadzona na rynek w 2002 r. Wykorzystuje się tu obróbkę za pomocą filtra cyfrowego analogowego sygnału z fotodetektora, do którego dociera sygnał zniekształcony przez dyspersję, w celu przywrócenia oryginalnego przebiegu sygnału przed wprowadzeniem do układu decyzyjnego.

Sygnal dostarczony przez detektor i przedwzmacniacz o szerokości pasma 3-4-krotnie większej niż normalnie przyjęta ( $\approx 0,8/B$ ) jest próbkowany z częstotliwością kilkakrotnie wyższą od częstotliwości taktowania  $B$  i wprowadzany do filtru cyfrowego w formie linii opóźniającej z 3-4 odczepami. Układ sterujący tworzy na podstawie analizy sygnału model dyspersji w dziedzinie czasu, wykorzystywany do regulacji współczynników sprzężenia z poszczególnych sekcji linii opóźniającej. Kryterium oceny jest maksymalne rozwarście wykresu oka sygnału na wyjściu filtru cyfrowego. Na wyjściu filtru cyfrowego pasmo sygnału zostaje ograniczone do typowej wartości. Pozostałe elementy odbiornika i dekodera sygnału pozostają niezmienione, co czyni opisane rozwiązanie dogodnym do implementacji w sprzęcie transmisyjnym bez poważniejszych zmian jego konstrukcji.

Kompensator elektroniczny może równocześnie korygować zniekształcenia wprowadzane przez dyspersję polaryzacyjną i chromatyczną. Efektywność redukcji PMD jest nieco niższa od zapewnianej przez optyczny kompensator PMD pierwszego rzędu, którego pracy w niektórych przypadkach nie udaje się emulować. Drugą zaletą jest możliwość integracji z innymi elementami elektronicznymi odbiornika w pojedynczy układ scalony.

Wady kompensatorów elektronicznych to wymagane bardzo szerokie pasmo fotodetektora, przekraczające 30 GHz w odbiorniku 10 Gbit/s, konieczność wyposażenia każdego transpondera w urządzeniu DWDM w osobny korektor, mała liczba dostawców i minimalne doświadczenia eksploatacyjne.

#### 3.2.3.4. Korekcja błędów transmisji (FEC)

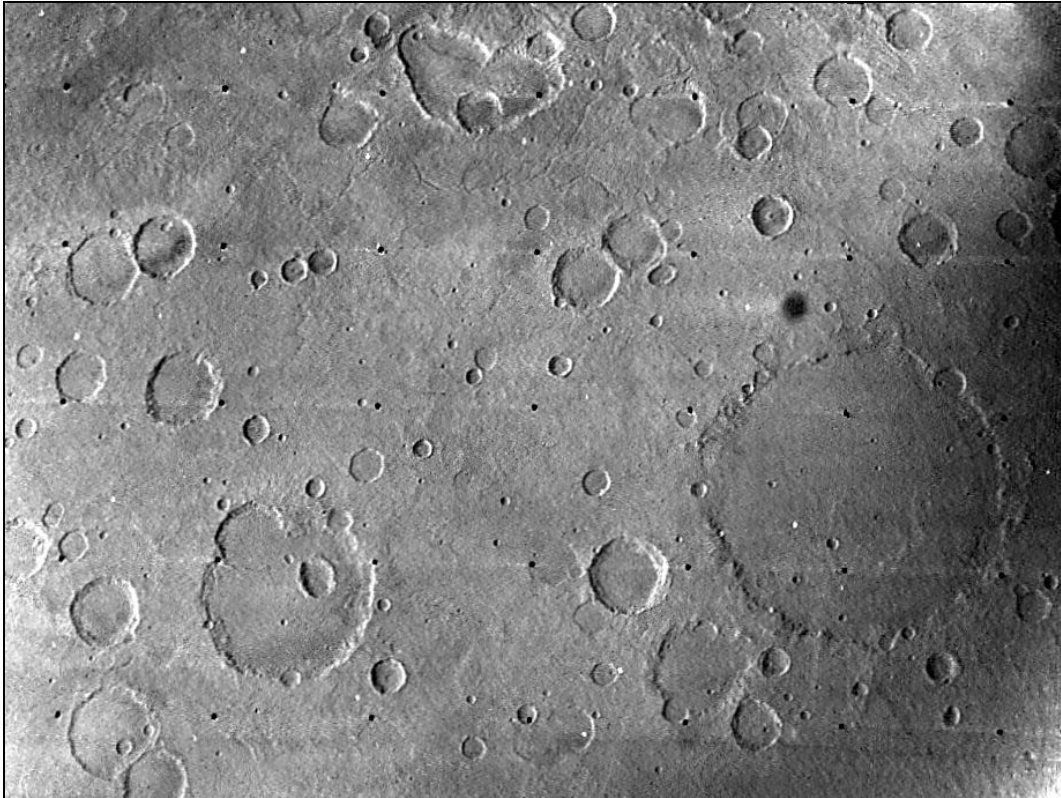
Kody z informacją nadmiarową wykorzystywaną do detekcji i korygowania błędów lub odtwarzania brakujących danych są stosowane od ponad 60 lat do transmisji lub zapisu informacji w formie cyfrowej przy wykorzystaniu mediów o wysokim poziomie zakłóceń.

Kody korekcyjne wprowadził w 1943 r. G. R. Stibitz z Bell Laboratories dla usuwania błędów powstających przy zapisie danych na kartach perforowanych używanych w elektromechanicznym kalkulatorze Bell Labs Model II. Systematycznej analizie problemu dokonał Richard Hamming, również z Bell Laboratories, który w 1950 r. opublikował artykuł z opisem teorii kodów korekcyjnych znanych odtąd jako kody Hamminga.

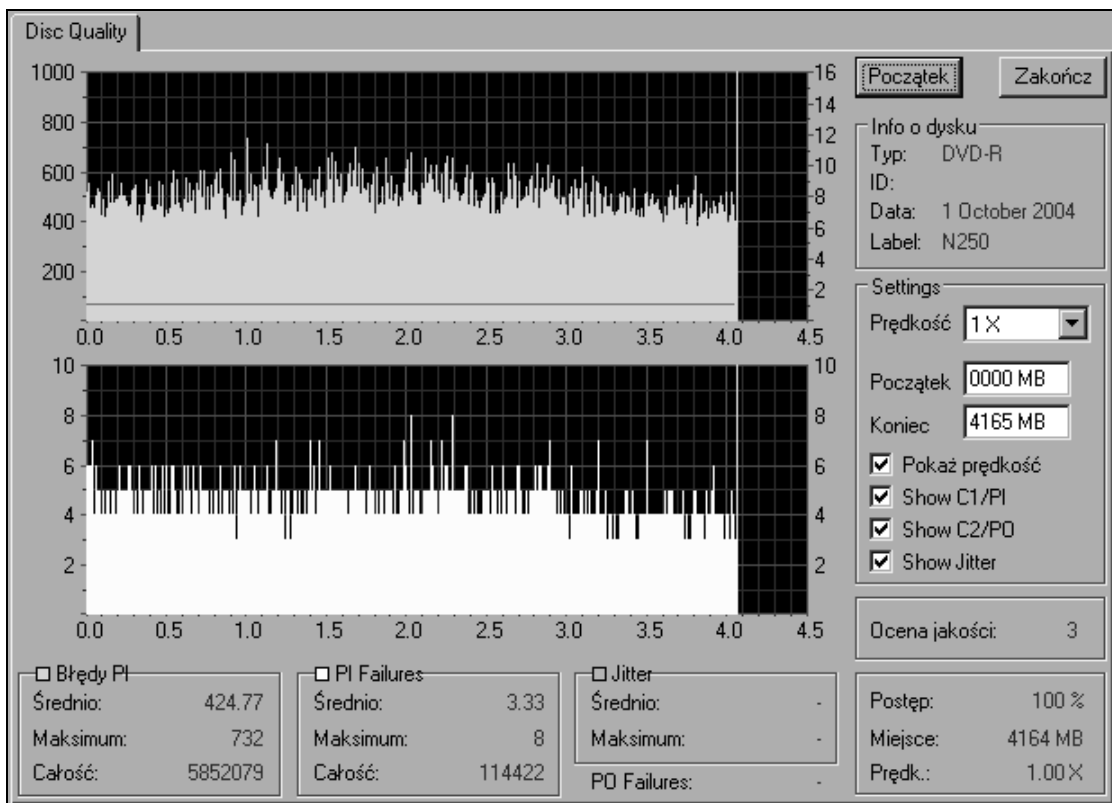
Pierwsze ważne zastosowanie FEC w teletransmisji dotyczyło odbioru fotografii i danych telemetrycznych z sond marsjańskich Mariner 6 i 7 w 1969 r. przy użyciu kodu Reeda-Mullera 26/32. Jedną z odebranych fotografii przedstawiono na rys. 66. Jasne poziome smugi to efekt zniekształceń linii zawierających znaczniki, widoczne jako regularnie rozmieszczone czarne kropki, wprowadzanych przez nierównomierną charakterystykę częstotliwościową obwodów kamery TV, a nie błędów.

Technika korekcji błędów „w przód” (ang. *Forward Error Correction*) jest dzisiaj szeroko używana m.in. w radioliniach cyfrowych naziemnych i satelitarnych, zapisie danych na dyskach optycznych CD, DVD, MD, DV, HD-DVD i BlueRay, cyfrowym zapisie sygnałów audio i wideo na taśmach magnetycznych (DAT, D1), radiofonii i telewizji cyfrowej (DVB) i w dyskach twardej o wysokiej gęstości zapisu.

Dysk CD lub DVD ma stopę błędów odczytu około  $10^{-4}$ ; jego wykorzystanie jako nośnika danych w systemach komputerowych umożliwia tylko 2-stopniowa korekcja redukująca stopę błędów do około  $10^{-15}$ . Skuteczność tych zabiegów pokazują dane z pomiarów typowego napędu optycznego, pokazane na rys. 67 i w tabeli 15. Przy odczycie dysku CD-Audio stosuje się mniej skuteczną korekcję 1-stopniową oraz interpolację i wyciszenie sygnału audio po wykryciu bloków danych z nie skorygowanymi błędami.



Rys. 66. Fotografia Marsa przesłana przez sondę Mariner 6 [NASA - Nr 6N21].  
BER przed korekcją:  $\approx 0,05$ .



Rys. 67. Typowy wynik badania jakości dysku optycznego DVD.  
Nośnik: Verbatim DVD-R 4x. Napęd: Samsung SM-348B.

Tabela 15. Elementowa stopa błędów odczytu danych z dysku DVD (rys. 67):

Parametr	Wynik pomiaru	Uwagi
BER przed korekcją I stopnia	$1,76 \times 10^{-4}$	Błędy fizycznego odczytu z nośnika
BER po korekcji I stopnia	$3,43 \times 10^{-6}$	
BER po korekcji II stopnia	$< 3,0 \times 10^{-11}$	Brak błędów wśród 4164 MB danych

Korekcja błędów w sieciach optycznych jest najbardziej przydatna w systemach dalekosiężnych o przepływności kanału  $\geq 10$  Gbit/s, gdzie wskutek akumulacji szumów ze wzmacniaczy przelotowych i wpływu zjawisk nieliniowych (rys. 54) osiągnięcie wymaganej BER  $\leq 10^{-12}$  jest niewykonalne bez stosowania FEC. Problem jest szczególnie ostro odczuwany w systemach transoceanicznych i transkontynentalnych, zawierających nawet 200 wzmacniaczy EDFA. Pierwszymi systemami transoceanicznymi z EDFA i korekcją FEC były transatlantycki TAT-12/13 i transpacyficzny TPC-5, oba uruchomione w 1996 r.

Najbardziej rozpowszechniony w telekomunikacji algorytm FEC opracowali w 1960 r. badacze z Massachusetts Institute of Technology (MIT) Irving S. Reed i Gus Solomon. Kod Reeda-Salomona (n,k) jest kodem blokowym; każdy blok zawiera k 8-bitowych bajtów informacji i n-k bajtów danych korekcyjnych. W ramach bloku można skorygować maksymalnie (n-k)/2 bajtów z błędami znajdujących się w nieznanymi miejscach. Zdolność korekcji błędów jest proporcjonalna do nadmiarowości kodu, wyrażonej proporcją (n-k)/k.

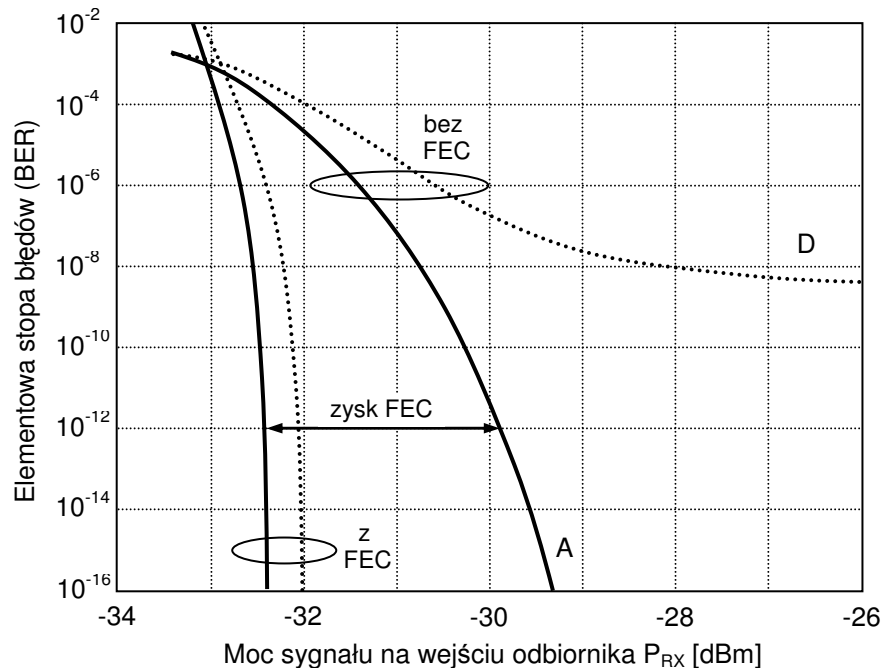
W lądowych sieciach optycznych dominuje znormalizowany w zaleceniu ITU-T G.975 [146] kod Reeda-Salomona (255,239). Kod ten był już wcześniej wprowadzony do radiolinii cyfrowych i znormalizowany w zaleceniu CCIR 723.

Według zalecenia G.975, kodowanie i dekodowanie korekcyjne odbywa się niezależnie dla każdego strumienia STM-16. Ramka kodu RS(255,239) ma długość 2040 bitów (255 bajtów), z czego 1912 (238 bajtów) przypada na strumień STM-16, wprowadzany do ramki bez modyfikacji, 8 (1 bajt) na wzór synchronizacji i 256 (16 bajtów) na dane korekcyjne obliczone przez koder. Kodowanie FEC podwyższa przepływność sygnału liniowego w proporcji  $255/238 = 15/14$ , co dla strumienia STM-16 oznacza wzrost z 2488 Mbit/s do 2666 Mbit/s. Wzrost przepływności obniża czułość odbiornika przed korekcją o 0,3 dB, a równa 2 dB strata czułości pod wpływem PMD toru optycznego rośnie o dalsze 0,3 dB.

W niestandardowych rozwiązaniach firmowych dla sieci SDH do przesyłania danych korekcyjnych używa się alternatywnie wolnych bajtów nagłówka.

Kod Reeda-Salomona jest najbardziej efektywny w usuwaniu błędów pojawiających się z względnie stałą częstotliwością, również w „paczkach” o długości krótszej od bloku. Taki rozkład mają błędy powstające przy odbiorze sygnału zdegradowanego przez szum wzmacniacza optycznego, dyspersję chromatyczną lub przesłuchy między kanałami w łączy DWDM. Dekodowanie korekcyjne RS(255,239) bez przeplatania pozwala usunąć do 64 błędów w bloku o długości 255 elementów. Wprowadzenie przeplatania 16-krotnego zwiększa długość korygowanego ciągu błędów do 1024. Dekoder FEC umożliwia też dokładny pomiar stopy błędów przed korekcją dla monitorowania jakości kanału. Dane takie wykorzystuje się w niektórych kompensatorach PMD.

Teoretycznie, w systemie z kodowaniem RS(255,239) można uzyskać BER =  $10^{-15}$  przy BER w kanale transmisyjnym około  $9,5 \times 10^{-5}$  (rys. 68). W miarę wzrostu BER przed korekcją skuteczność korekcji szybko spada i dekodery FEC przestają działać dla BER  $\approx 10^{-3}$ , przede wszystkim z powodu częstego zrywania synchronizacji. Zysk z kodowania FEC to wzrost czułości odbiornika, tym wyższy im niższa wymagana elementowa stopa błędów po korekcji i osiągający 3-6 dB dla BER =  $10^{-15}$ . Efektem jest zmniejszenie wymaganego odstępów sygnału od szumu (S/N) i likwidacja ewentualnej „podłogi” na charakterystyce BER, a ściślej przesunięcie jej do niemierzalnego poziomu.



Rys. 68. Wpływ FEC na charakterystykę stopy błędów odbiornika optycznego STM-16.

FEC znacznie zwiększa nachylenie charakterystyki BER w funkcji każdego parametru określającego jakość sygnału: mocy, stosunku sygnału do szumu (S/N, Q) lub dyspersji. Stanowi to problem w eksploatacji łącza pracującego na kablu o wysokiej PMD, gdyż niewielki wzrost DGD ponad granicę tolerancji prowadzi do przerwy w transmisji. Wzrost tolerowanej PMD dzięki wprowadzeniu FEC jest ograniczony i trudny do oszacowania.

### 3.2.3.5. Alternatywne kody liniowe

Kod liniowy NRZ nie zapewnia oszczędności widma ani odporności na wpływ dyspersji toru światłowodowego. Został zaproponowany dla sieci SONET w 1984 r., kiedy włókno jednomodowe uważano za medium o nieograniczonym paśmie transmisyjnym. Wcześniejsze systemy optyczne PDH wykorzystywały różne kody blokowe, przeważnie 5B6B lub 1B2B, często wybrane pod kątem redukcji efektów dyspersji modowej.

Kopiowanie znanych z sieci radiowych i systemów cyfrowych współpracujących kablami miedzianymi (PCM, ISDN, xDSL) kodów liniowych i technik modulacji wielopoziomowych, opracowanych głównie pod kątem oszczędności widma, a nie odporności na dyspersję i zniekształcenia nieliniowe nie jest rozwiązaniem optymalnym, ponieważ zmniejszenie odstępu pomiędzy poziomami logicznymi podwyższa wrażliwość na PMD.

Zalecenie ITU-T G.959.1 [134] określa, że w optycznych sieciach transportowych 40 Gbit/s będą używane alternatywnie kody liniowe NRZ i RZ. Kod RZ ma mniejszą długość impulsu w porównaniu do kodu NRZ - najczęściej do 50%. Odstępy pomiędzy skróconymi impulsami zmniejszają spowodowaną przez DGD interferencję międzysymbolową i tolerowana wartość nie kompensowanej PMD wzrasta około 1,5-krotnie w porównaniu do określonej ze wzoru (110) i charakterystyki pokazanej linią kropkowaną na rys. 64 [145].

Skrócenie impulsów powoduje, że sygnał RZ ma większą szerokość spektralną, co niestety prowadzi do silniejszego wpływu PMD drugiego rzędu. W łączach wyposażonych w kompensator PMD pierwszego rzędu (rozdział 3.3.3.2) lepiej używać urządzeń końcowych z kodem NRZ [145].

Inne kody dla sieci optycznych nie doczekały się jeszcze akceptacji przez ITU-T i IEEE.

### 3.3. Wybrane problemy pomiarów PMD

W tym rozdziale będą przedstawione zagadnienia ważne dla wykonanych w Instytucie Łączności badań laboratoryjnych zmian PMD we włóknach i kablach światłowodowych podczas badań klimatycznych oraz interpretacji ich wyników, a niekoniecznie poruszane w powszechnie dostępnej literaturze i opisach przyrządów pomiarowych. Wymienione pomiary PMD były wykonywane metodą stałego analizatora i dalsze rozważania są z nią związane. Nieco uwagi poświęcono też pomiarom POTDR, unikalnej technice umożliwiającej lokalizację odcinków kabli o wysokiej PMD w istniejących sieciach światłowodowych.

Nie jest celem tej pracy ogólna prezentacja metod pomiarowych PMD. Definicje PMD i znormalizowanych metod pomiaru tego parametru znajdują się m.in. w zaleceniu ITU-T G.650.2 [97] i dokumencie IEC 61282-9 [98]. W dostępnej w Internecie rozprawie doktorskiej Hendrika Sunneruda z Chalmers University w Göteborgu (Szwecja) [99] znajduje się przegląd i matematyczna analiza PMD, metod jej pomiaru i wpływu PMD na pracę łączny cyfrowych. Brakuje niestety porównywalnych opracowań w języku polskim.

#### 3.3.1. Wpływ skończonego zakresu spektralnego

W odróżnieniu od takich parametrów włókna światłowodowego jak tłumienność i dyspersja chromatyczna, które są deterministyczne, określenie PMD jako parametru statystycznego wiąże się z dodatkową niepewnością wynikającą z wykonywania pomiarów w skończonym zakresie spektralnym, niezależnie od jakości używanej aparatury pomiarowej. Problem polega na tym, że wektor PMD i jego moduł - DGD wykazują zawsze ograniczoną zmienność z długością fali (rys. 61); wartości  $\Delta\tau$  są tym bardziej skorelowane ze sobą, im węższy zakres widma, w którym je zmierzono. W pracy Gisina i in. [147] przedstawiono następujące oszacowanie związanego zakresu niepewności pomiaru PMD:

$$\Delta\tau_{pom} \approx \langle \Delta\tau \rangle \left( 1 \pm \frac{0,9}{\sqrt{\langle \Delta\tau \rangle \Delta\omega}} \right) \quad (115)$$

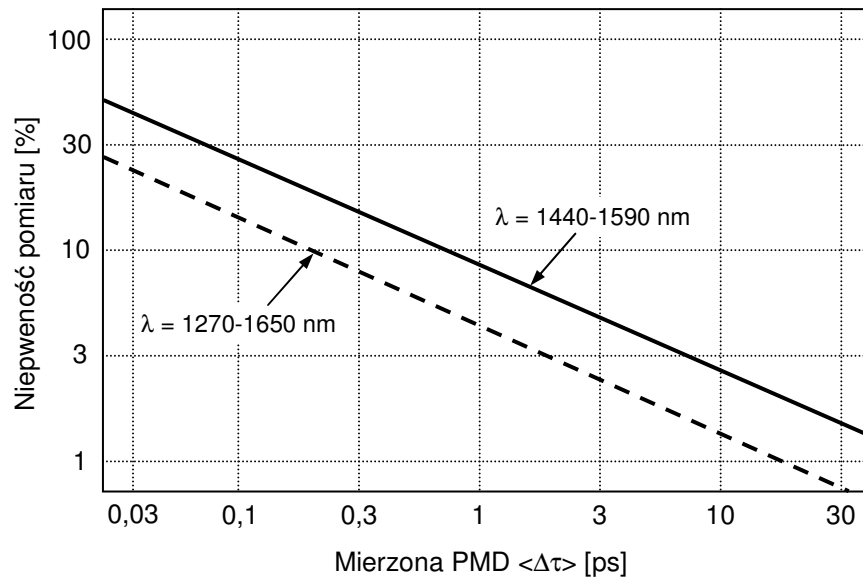
gdzie:

$$\Delta\omega = 2\pi \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (116)$$

Długości fal  $\lambda_1 > \lambda_2$  wyznaczają granice przedziału spektralnego, w którym wykonano pomiar PMD, wyrażonej jako wartość średnia DGD:  $\langle \Delta\tau \rangle$  (patrz rozdział 3.1.5). Niepewność pomiaru wzrasta odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z wartości PMD. Zależność ta przejawia się wprost w czasie pomiarów metodą stałego analizatora, gdzie pomiar spektralny dostarcza jako wynik całkowitą liczbę ekstremów i to zaokrąglenie bezpośrednio wymusza minimalną niepewność uzyskanego wyniku.

Charakterystykę wyznaczonej z zależności (115) minimalnej niepewności pomiarów PMD za pomocą używanego w IŁ zestawu ze źródłem pracującym w zakresie 1440-1590 nm przedstawia rys. 69.





Rys. 69. Minimalna niepewność pomiaru PMD obliczona ze wzoru (115).

PMD włókien i kabli badanych w IŁ zawierała się w granicach 0,05-0,70 ps. Fundamentalna niepewność pomiaru tak niskiej PMD osiąga 10-38%, co stanowi cenę płaconą za używanie krótkich próbek. Z zależności (115) i (58) wynika, że względna niepewność pomiaru PMD jest w przypadku długich odcinków włókna określona zależnością:

$$\frac{\Delta\tau_{pom}}{\langle \Delta\tau \rangle} \approx \frac{0,9}{\sqrt{\Delta\omega}} k_{PMD}^{-0,5} L^{-0,25} \quad (117)$$

gdzie:  $k_{PMD}$  – współczynnik PMD włókna światłowodowego,  $L$  – długość próbki. W przypadku włókna o określonej wartości współczynnika PMD, niepewność pomiaru spada z długością bardzo powoli. 2-krotna redukcja niepewności pomiaru wymaga testowania aż 16-krotnie dłuższych próbek, co wiąże się z wysokimi kosztami ich zakupu, około 2,5-krotnie zwiększoną bezwładnością termiczną badanego obiektu oraz trudnościami w operowaniu bębniami kablowymi o dużych gabarytach i masie.

Drugim sposobem zmniejszenia niepewności pomiaru PMD jest rozszerzanie zakresu spektralnego, lecz zakres długości fal, w jakim pracuje jednomodowe włókno światłowodowe i specyfikowane są jego parametry nie przekracza 1270-1650 nm (rozdział 2.3). Odpowiednią charakterystykę przedstawiono na rys. 69. Wykorzystanie całego zakresu widma zmniejsza teoretyczną niepewność pomiaru w proporcji 1:2,05 – względnie niewiele.

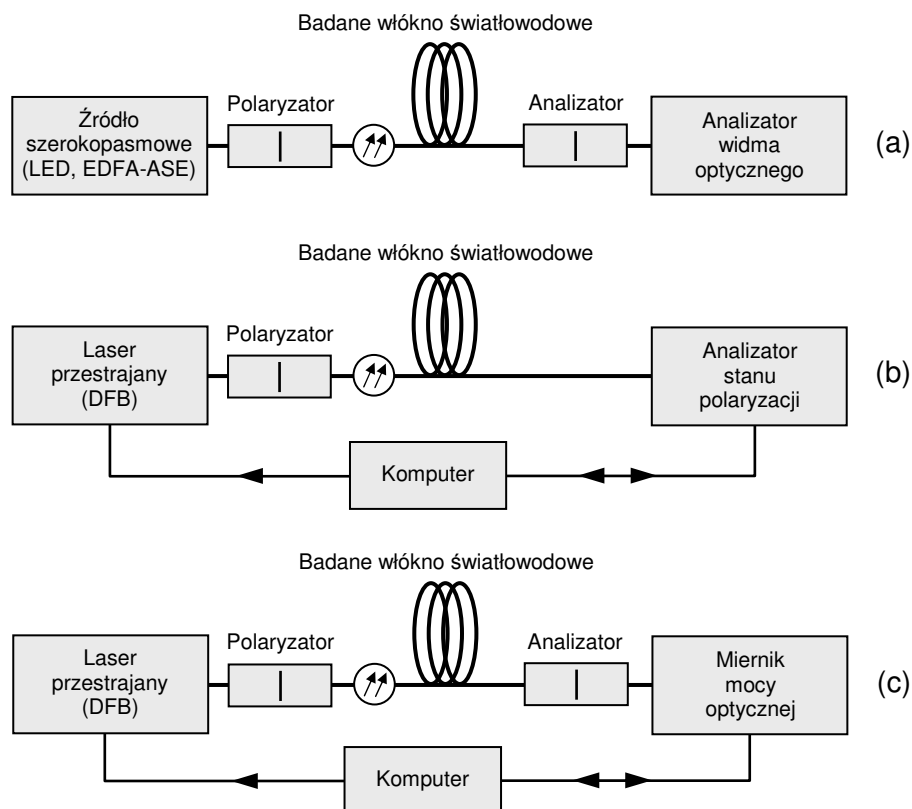
Inną kwestią pozostaje, w jakim stopniu pomiary PMD wykonane w zakresie znacznie szerszym od zajmowanego przez obecne systemy transmisyjne są przydatne dla obliczeń PMD w konkretnym, wąskim przedziale widma, na przykład 1530-1560 nm?

Pomiary PMD ułożonych w sieci Deutsche Telekom kabli tubowych z włóknami G.652 [136], w których włókna są dobrze odseparowane od zewnętrznych oddziaływań mechanicznych i PMD zawiera głównie składową geometryczną (rozdział 3.1.1) ujawniły prawie identyczne średnie wartości PMD w zakresach 1550 nm i 1310 nm.

Dobrej zgodności można oczekiwać również, kiedy PMD lub jej zmiany wynikają z nacisku na włókno i dominuje składowa mechaniczna (rozdział 3.1.3) zależna od współczynnika elastoptycznego  $R$ , niewiele zmieniający się w funkcji długości fali (rys. 35). Wyjątek stanowi PMD wprowadzana przez skręcenie włókna, która szybko rośnie z długością fali (rys. 48).

### 3.3.2. Pomiary PMD metodą stałego analizatora

Cechą wyróżniającą metodę stałego analizatora (ang. *Fixed Analyzer* - FA) jest fakt, że dostarcza ona tylko informacji o średniej wartości DGD w określonym przedziale długości fal. Opis metody pomiaru, używanej aparatury (rys. 70) i sposobu obróbki wyników znajduje się m.in. w zaleceniu ITU-T G.650.2 [97].

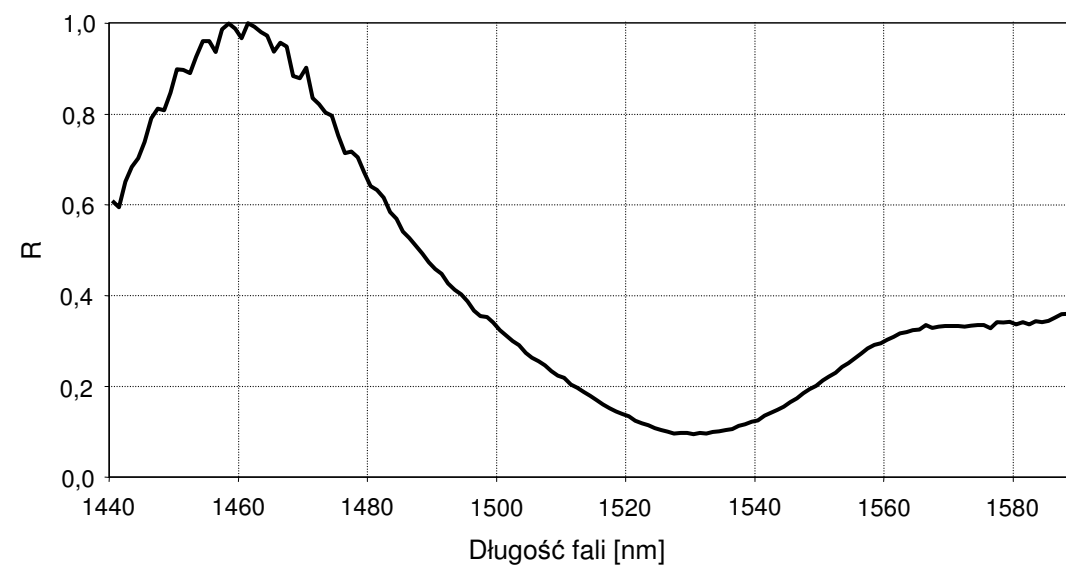
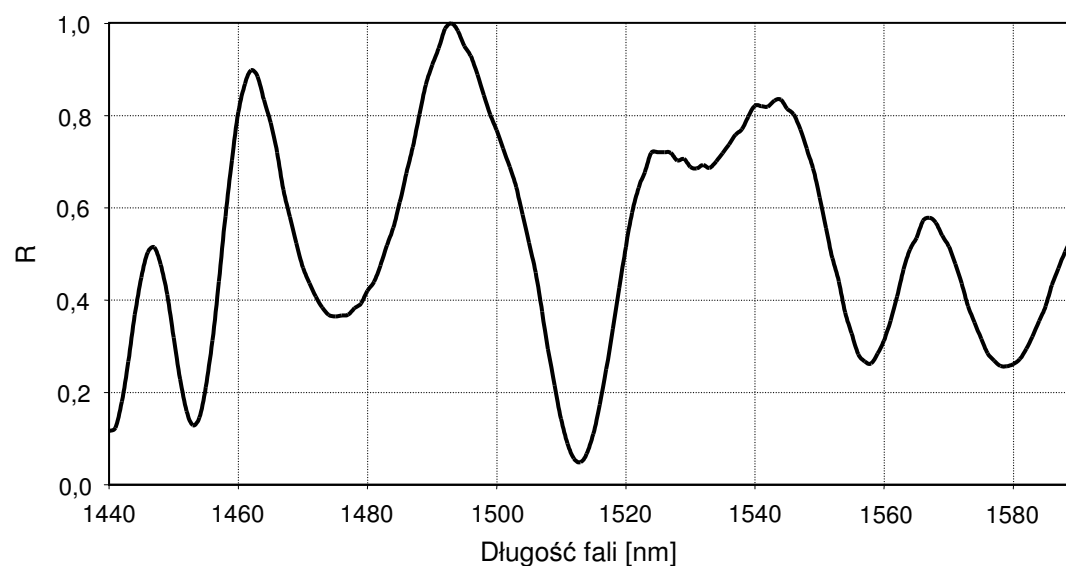
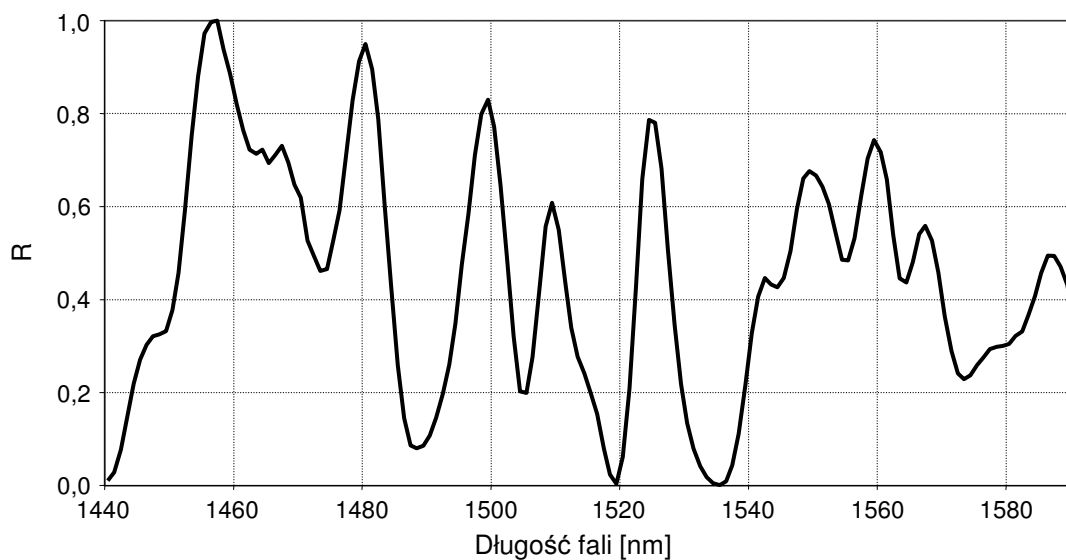


Rys. 70. Typowe zestawy do pomiarów PMD metodą stałego analizatora (FA).

Metoda FA jest względnie łatwa do implementacji przy użyciu ogólnie dostępnej aparatury używanej dla innych pomiarów w technice światłowodowej i nie wymaga skomplikowanego oprogramowania do obróbki wyników. Do badanego włókna wprowadza się promieniowanie o stałej polaryzacji liniowej, którego długość fali zmienia się płynnie w określonym zakresie. Jeśli badane włókno wykazuje PMD, na jego drugim końcu obserwuje się cykliczne zmiany stanu polaryzacji, których częstotliwość jest proporcjonalna do DGD. Ich reprezentację stanowi charakterystyka stosunku mocy składowej promieniowania o wybranej polaryzacji liniowej do całkowitej mocy opuszczającej włókno, wyrażona w funkcji długości fali lub częstotliwości promieniowania:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (118)$$

gdzie:  $P_A(\lambda)$  – moc promieniowania o polaryzacji liniowej przepuszczanej przez analizator (polaryzator liniowy o stałej orientacji),  $P(\lambda)$  - całkowita moc promieniowania na wyjściu badanego obiektu. W zestawach pokazanych na rys. 70a,c pomiar charakterystyki spektralnej mocy całkowitej  $P(\lambda)$  wykonuje się usuwając z zestawu analizator polaryzacji. Procedura ta jest określana jako kalibracja tłumienności badanego obiektu. W zestawie z rys. 70b odpowiednią obróbkę wyników przeprowadza analizator stanu polaryzacji, co jest bardzo korzystne przy testowaniu obiektów o szybko zmieniającej się tłumienności. Przykłady charakterystyk  $R(\lambda)$  przedstawiono na rys. 71.



Rys. 71. Charakterystyki  $R(\lambda)$ . Od góry: włókno G.652 w półścistej tubie (6177 m), kabel stacyjny W-NOTKSdD 1J z włóknem G.652 w ścistej tubie (4040 m), kabel stacyjny W-NOTKSdD 1J5A z włóknem G.655 w ścistej tubie (4083 m).

Metoda FA wyznacza PMD definiowaną jako średnia wartość DGD, zgodnie ze wzorem:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k N_{EX} \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (119)$$

gdzie:  $N_{EX}$  – liczba ekstremów (minimów i maksimów) znalezionych na charakterystyce  $R(\lambda)$ ,  $\lambda_1 < \lambda_2$  – graniczne długości fal przedziału spektralnego, w jakim wykonano pomiar,  $c$  - prędkość światła w próżni,  $k$  – współczynnik korekcyjny:  $k = 1,00$  w przypadku braku sprzęgania modów polaryzacyjnych,  $k = 0,82$  w przypadku silnego sprzęgania modów.

Ekstremum to punkt, w którym pochodna funkcji  $R(\lambda)$  zmienia znak. Dla usunięcia wpływu zakłóceń ignoruje się słabe ekstrema. Takie pomijalne ekstrema widać na krzywych z rys. 71 w zakresach 1463-1466 nm (górną), 1525-1548 nm (środkową) i 1440-1485 nm oraz 1566-1590 nm (dolną). Granica akceptacji jest ustalana indywidualnie dla konkretnego zestawu pomiarowego, w zależności od doświadczeń z jego użytkowaniem. Przyczyną pojawiania się fałszywych ekstremów o niskiej amplitudzie są np. wibracje badanego włókna lub kabla, wywołujące chwilowe zmiany polaryzacji światła. Inne typowe źródła zakłóceń to niestabilność stanu polaryzacji lub mocy wyjściowej źródła promieniowania.

Używany w IŁ zestaw pomiarowy w układzie z rys. 70c zawiera źródło HP 8168F o zakresie przestrajania 1440-1590 nm. Wykonując pomiar w całym tym przedziale, wartość PMD oblicza się dla przypadku silnego sprzęgania modów polaryzacyjnych według wzoru:

$$PMD = 0,0209 \cdot N_{EX} \text{ [ps]} \quad (120)$$

Ograniczona liczba ekstremów  $N_{EX}$  wprowadza statystyczną niepewność wyniku, którą można oszacować na podstawie zależności:

$$\frac{\Delta PMD}{PMD} \approx \frac{1}{\sqrt{N_{EX}}} \cdot 100\% \quad (121)$$

Dokładność małych wartości PMD można poprawić, przyjmując za  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  długości fal odpowiadające położeniu pierwszego i ostatniego ekstremum i wstawiając do wzoru (115) liczbę  $N_{EX}$  zmniejszoną o 1 [97]. Położenia skrajnych ekstremów niosą dodatkową informację o ich gęstości spektralnej, traconą po przyjęciu stałego przedziału długości fal. Poprawa efektywnej zdolności rozdzielczej jest okupiona wyższą pracochłonnością obróbki wyników. Rozmiary korekty wprowadzanej w ten sposób zależą od  $N_{EX}$  i lokalizacji ekstremów. Wyniki uzyskane dla danych z rys. 71 pokazano w tabeli 16.

Tabela 16. Rezultaty interpretacji wyników pomiarów z rys. 71 dwoma metodami.

Metoda analizy	$N_{EX}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	PMD
Zliczanie ekstremów	21	1440 nm	1590 nm	0,438 ps
Jw. + korekta zakresu widma	20	1457 nm	1586 nm	0,490 ps

Metoda analizy	$N_{EX}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	PMD
Zliczanie ekstremów	13	1440 nm	1590 nm	0,271 ps
Jw. + korekta zakresu widma	12	1440 nm	1578 nm	0,270 ps

Metoda analizy	$N_{EX}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	PMD
Zliczanie ekstremów	2	1440 nm	1590 nm	0,042 ps
Jw. + korekta zakresu widma	1	1460 nm	1531 nm	0,040 ps

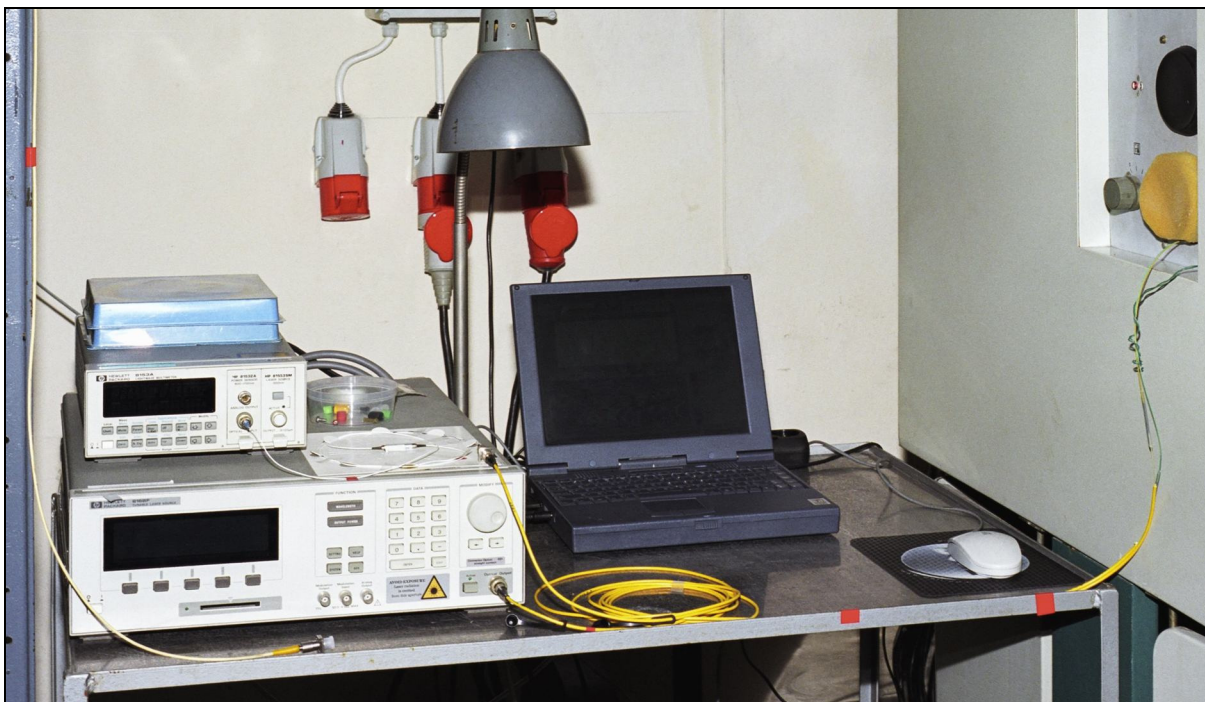
Największa korekta, o prawie 11,8% dotyczy wbrew intuicji przypadku z największą liczbą ekstremów (rys. 71 - wykres górny), kiedy oczekiwana niepewność pomiaru jest najniższa. Wyznaczona z zależności (117) niepewność pomiaru dla  $N_{EX} = 21$  wynosi jednak nadal 21,8%.

Prosty, ale mniej efektywny sposób podwyższenia dokładności pomiaru to zwiększanie liczby ekstremów o  $\frac{1}{2}$  w sytuacji, kiedy na skraju zakresu pomiarowego charakterystyka prawie osiąga minimum lub maksimum. Taka sytuacja występuje dla pomiaru wymienionego powyżej w pobliżu długości fali 1440 nm. Przyjmując  $N_{EX} = 21,5$ , dostajemy  $PMD = 0,449$  ps.

Powyższego sposobu korygowania wyników używano dla  $N_{EX} \leq 10$ . Zwiększenie efektywnej liczby ekstremów (połówek) o 100% teoretycznie redukuje niepewność pomiaru określoną przez zależność (117) w proporcji  $1/\sqrt{2}$ , niestety możliwe są dodatkowe błędy wynikające z subiektywnej oceny przebiegu krzywej  $R(\lambda)$ .

Zestaw ze źródłem LED (rys. 70a) odznacza się szerokim zakresem spektralnym pomiaru,  $\geq 200$  nm i najlepszą zdolnością rozdzielczą ( $\approx 0,01$  ps), ale ograniczonym zakresem dynamiki, gdyż LED sprzężona z włóknem jednomodowym ma niską gęstość spektralną mocy promieniowania. Zastosowanie wzmacniacza EDFA jako źródła promieniowania pochodzącego ze wzmocnionej emisji spontanicznej (ang. *Amplified Spontaneous Emission* – ASE) pozwala badać włókna o wyższej tłumienności, lecz zakres spektralny jest wąski ( $\approx 30$  nm) i najmniejsza wykrywalna PMD wynosi około 0,1 ps.

Zestaw pomiarowy w wersji z rys. 70c umożliwia badania torów optycznych o wysokiej tłumienności, nawet powyżej 60 dB i długości przekraczającej 200 km. Można też wykonywać pomiary linii kablowych łączących oddalone miejsca, gdyż potrzebne jest tylko przekazanie polecenia o rozpoczęciu pomiaru. Większość handlowych przyrządów opartych na innych metodach nie ma takich możliwości. Jeżeli używany laser zapewnia stabilną liniową polaryzację promieniowania, umieszczanie polaryzatora przed badanym obiektem jest zbędne. Zestaw przyrządów używany w Ł (rys. 72) ma zakres przestrajania 150 nm i pozwala wykryć  $PMD \approx 0,02$  ps. Podstawowy problem stanowi długi czas pomiaru, zawierający się w granicach 1-3 minut przy przestrajaniu lasera z krokiem 1 nm.



Rys. 72. Zestaw pomiarowy PMD ze źródłem HP 8168F

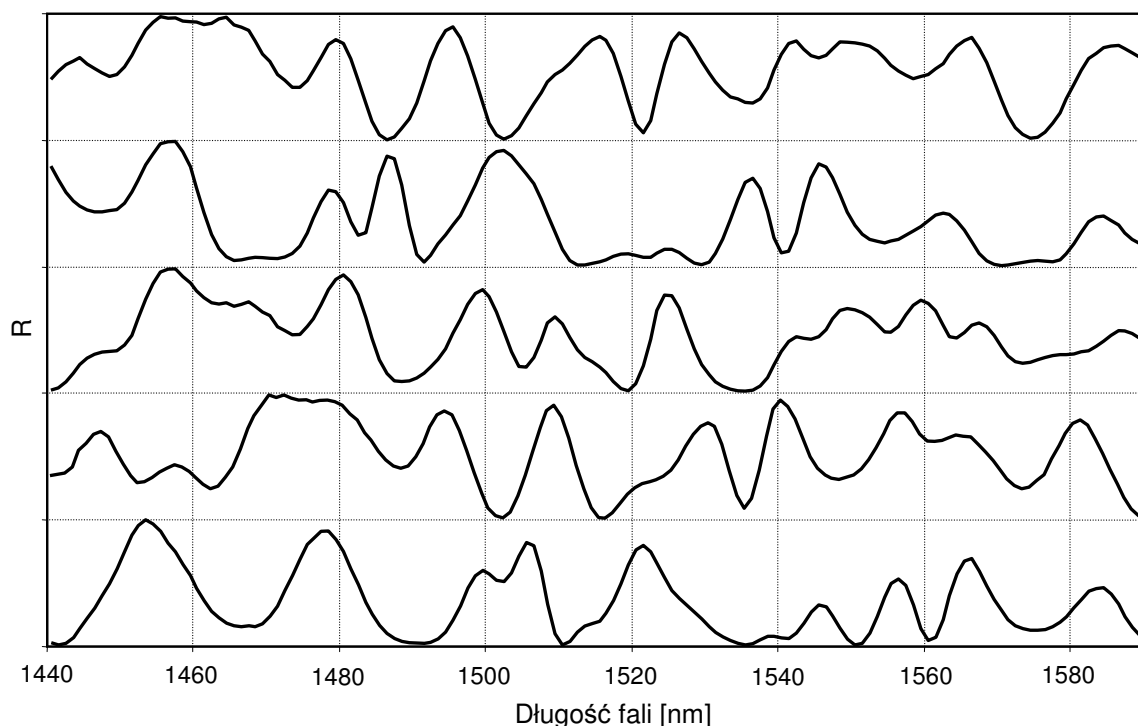
Pomiar metodą stałego analizatora nie dostarcza niestety danych o charakterystyce spektralnej DGD i metoda ta jest uznawana przez ITU-T za dodatkową. Zmodyfikowaną metodę FA można wykorzystać do reflektometrycznych pomiarów, a raczej oszacowań, rozkładu PMD wzdłuż linii kablowych [99]. Patrz rozdział 3.3.4.

Metodą odniesienia według ITU-T G.650.2 jest metoda analizy parametrów Stokesa, przeważnie w odmianie z analizą macierzy Jonesa (ang. *Jones Matrix Eigenanalysis* - JME), często spotykana w precyzyjnych przyrządach laboratoryjnych. Metody alternatywne to metoda analizy stanów polaryzacji (SOP) i metoda interferometryczna (ang. *Interferometric Method* – IM), odznaczająca się krótkim czasem pomiaru i odpowiednia do testowania PMD w kablach napowietrznych lub podczas badań klimatycznych i mechanicznych, kiedy zachodzą szybkie zmiany PMD. Większość mierników przenośnych wykorzystuje metodę IM.

### 3.3.3. Wpływ zaburzeń zewnętrznych

Niezależnie od niepewności pomiaru PMD związanych z samą zasadą pomiaru i parametrami używanej aparatury, podczas badań laboratoryjnych PMD włókien i kabli światłowodowych występują dodatkowe źródła błędów związane z wpływem niepożądanych czynników zewnętrznych. Mogą one zarówno wprowadzać zakłócenia w pracy przyrządów pomiarowych, jak też zmieniać w niekontrolowany sposób PMD badanych próbek.

Stan polaryzacji promieniowania we włóknie światłowodowym łączącym aparaturę pomiarową z próbką ulega łatwo zmianom pod wpływem naprężeń i odkształceń, co przypadkowo zmienia stan polaryzacji na wejściu badanego włókna i przebieg charakterystyki  $R(\lambda)$  generowanej przez zestaw pomiarowy, mimo że PMD badanego obiektu nie zmienia się. Największe znaczenie mają zgięcia bądź skręcenia sznurów połączeniowych i luźnych włókien, których unieruchomienie jest bardzo trudne. W czasie pomiarów włókien światłowodowych umieszczonych w komorze klimatycznej z wymuszonym obiegiem powietrza często obserwuje się przypadkowe zmiany przebiegu charakterystyki  $R(\lambda)$  i liczby ekstremów spowodowane drganiami pochodzącymi od pracy wentylatora i agregatu chłodniczego komory klimatycznej. Skrajny przykład takiej zmienności pokazano na rys. 73.



Rys. 73. Krzywe  $R(\lambda)$  z 5 pomiarów wykonanych w odstępach 5 minut.  
 $N_{EX} = 20, 21, 22, 24, 21$ . Włókno G.652 w półścistej tubie,  $L = 6177$  m.

Również temperatura powietrza w komorze ulega cyklicznym zmianom w granicach do  $\pm 2^\circ\text{C}$ , najsilniejszym w przypadku chłodzenia do temperatury poniżej  $-30^\circ\text{C}$ , co prowadzi do niewielkich zmian PMD próbek znajdujących się w komorze.

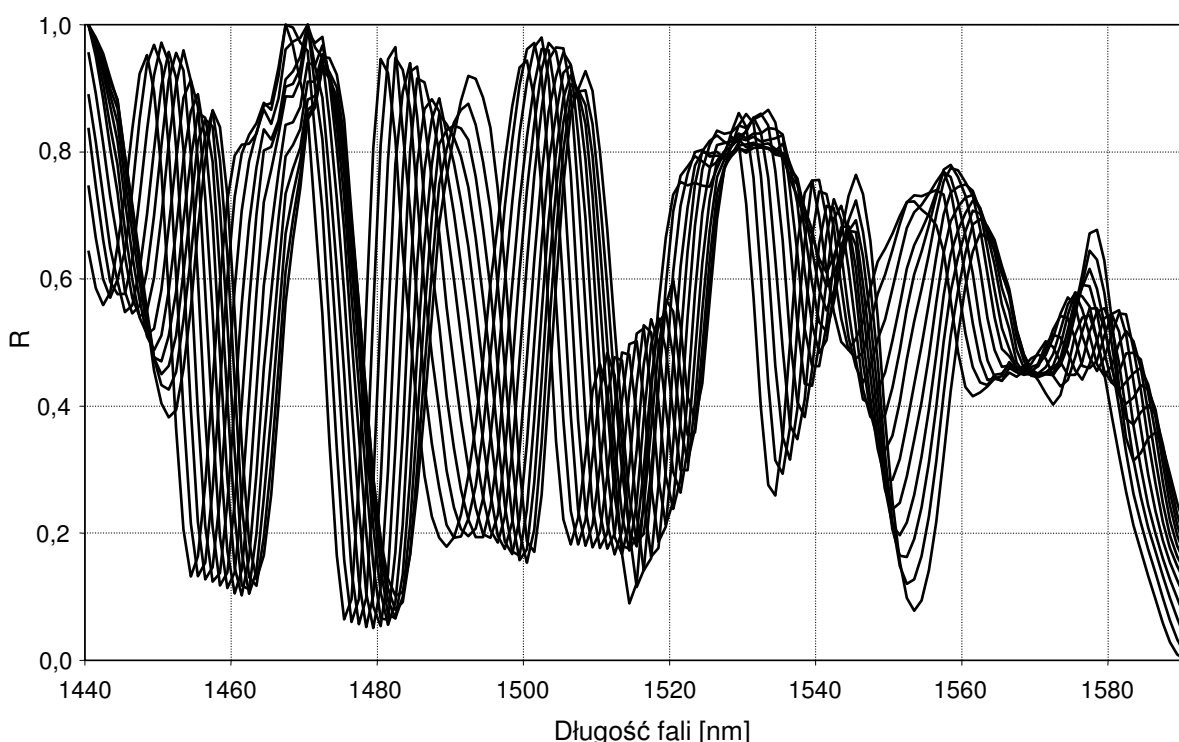
Rodzinę krzywych  $R(\lambda)$  zarejestrowanych dla włókna powoli zmieniającego temperaturę przedstawia rys. 74. W odróżnieniu od sytuacji przedstawionej wyżej, tutaj mamy do czynienia ze zmianami PMD badanej próbki, a nie z artefaktem pomiarowym. W takiej sytuacji obserwuje się zwykle płynne przesuwanie i przeginięcie charakterystyk, co prowadzi do zmian liczby ekstremów wewnątrz zakresu pomiarowego.

Wpływ tych zjawisk można ograniczyć, wykonując wielokrotne pomiary PMD przez cały czas badania, w odstępach 5-60 minut, wybieranych zależnie od bezwładności termicznej obiektu i czasu ekspozycji na każdą z temperatur. Wyniki m pomiarów PMD wykonanych w okresie, w którym próbka osiągnęła stałą temperaturę są uśredniane według zależności:

$$PMD = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{n=m} PMD_n \quad (122)$$

gdzie:  $PMD_n$  – kolejny wynik pomiaru PMD,  $n$  – numer pomiaru,  $m$  – liczba pomiarów w serii, zwykle mieszcząca się w granicach 8-20.

Uśrednianie szeregu wyników zmieniających się w sposób pokazany na rys. 73-74, kiedy  $N_{EX}$  zmienia się w granicach  $\pm 1-2$  ekstremów, redukuje też niepewności związane z zaokrągleniem  $N_{EX}$  do liczb całkowitych i ograniczonym zakresem stanów polaryzacji na wejściu włókna światłowodowego. Warunkiem powodzenia jest utrzymywanie stałej (nominalnie) temperatury w komorze i wykonanie możliwie długiej serii pomiarów.



Rys. 74. Krzywe  $R(\lambda)$  z 12 pomiarów w odstępie 5 minut.  $N_{EX} = 20-24$ . Temperatura próbki wzrosła w tym czasie o około  $1^\circ\text{C}$ . Włókno G.652 w półścislej tubie,  $L = 6177$  m. Wentylator komory klimatycznej był wyłączony.

Skuteczność powyższej metody ilustrują średnie wyniki z serii 12 pomiarów wykonanych w ciągu 60 minut, których krzywe  $R(\lambda)$  pokazano na rys. 73 (pomiary Nr 1-5) i 74. Wyniosły one odpowiednio 0,446 ps i 0,454 ps, różniąc się o zaledwie 1,6%.

### 3.3.4. Efekty dynamiczne w badaniach termicznych

Badanie termiczne mające na celu wyznaczenie statycznej zależności parametrów badanego obiektu od temperatury odbywa się przy założeniu, że obiekt ten osiąga jako całość wymuszaną w komorze klimatycznej temperaturę, a jego stan wewnętrzny (wymiary i położenie elementów składowych, rozkład naprężeń wewnętrznych, ciśnienie żelu w tubie i inne) ulega stabilizacji w każdych kolejnych warunkach wytwarzanych podczas badania.

Czas rzeczywistego badania jest ograniczony i osiągnięcie zupełnej stabilizacji temperatury obiektu, odznaczającego się skończoną stałą czasową wymiany ciepła z otoczeniem (powietrzem cyrkulującym w komorze klimatycznej)  $\tau_c$  jest niemożliwe. Badanie termiczne wspomnianego wyżej typu polega na ekspozycji testowanego obiektu na szereg temperatur przez założony okres czasu, dobrany tak, by doszło do ustalenia się temperatury i własności obiektu z zakładaną dokładnością na czas wystarczający dla wykonania pomiarów. Szybkość zmian temperatury jest ograniczona do 20°C/h, by uniknąć szoku termicznego. Czas niezbędny dla zmiany temperatury powietrza wewnątrz komory klimatycznej jest normalnie pomijalny w porównaniu do  $\tau_c$ .

Kabel światłowodowy nie wytwarza ciepła i przebieg zmian temperatury próbki po skokowej zmianie temperatury otaczającego powietrza opisuje w przybliżeniu zależność:

$$T(t) = T_1 + (T_2 - T_1)e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (123)$$

gdzie:  $T_1$  – temperatura początkowa,  $T_2$  – temperatura docelowa,  $\tau_c$  - stała czasowa wymiany ciepła z otoczeniem. Przyjmując, że  $T_2 - T_1 = 20$  K i wymagana jest stabilizacja temperatury obiektu z tolerancją  $\pm 1$  K, czas stabilizacji wynosi  $3 \tau_c$ . Stała czasowa figurująca we wzorze (121) jest wartością efektywną, uwzględniającą ograniczenia szybkości transferu ciepła wewnątrz próbki, np. długiego odcinka kabla stacyjnego nawiniętego na szpuli.

Zmiana PMD badanego włókna lub kabla z temperaturą jest na ogół efektem wielu zachodzących równolegle, ale niekoniecznie z jednakową szybkością zjawisk, których wpływ potrafi znosić się nawzajem. Mogą to być wymienione w kolejności szybkości procesu:

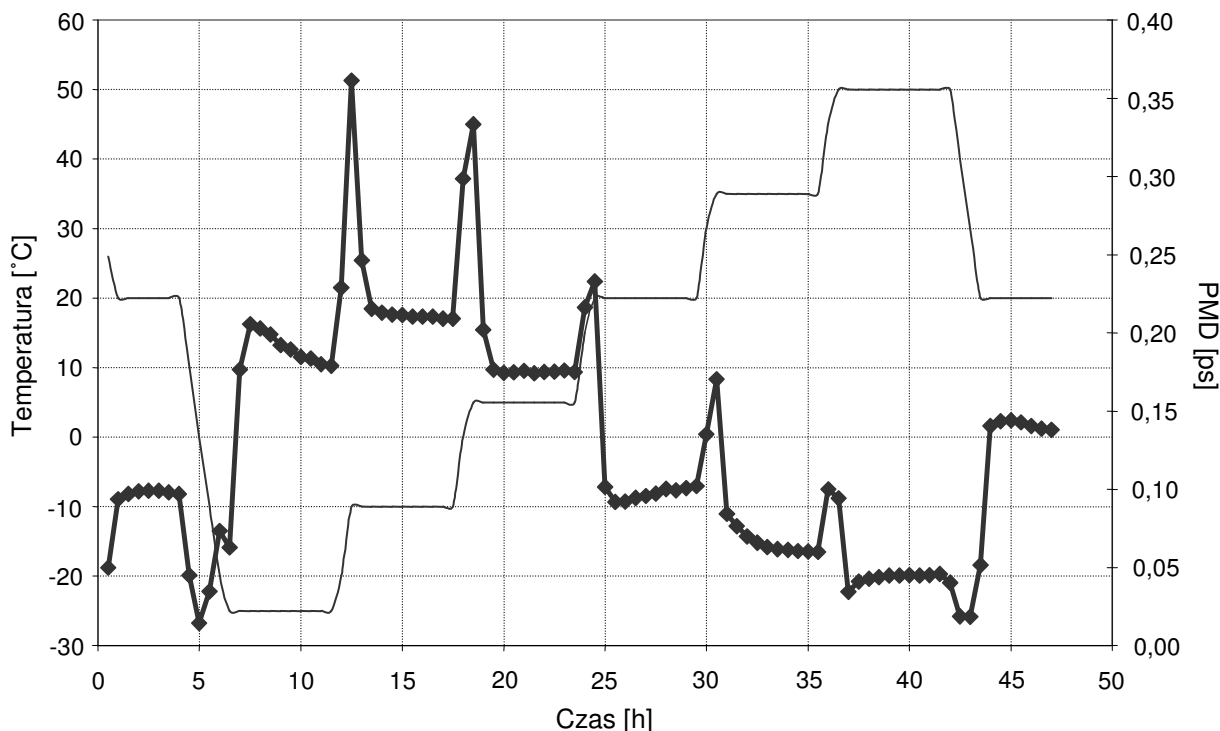
- ✓ zmiana ciśnienia wywieranego przez pokrycie ściśle na włókno światłowodowe,
- ✓ zmiana ułożenia włókien razem z nałożonym pokryciem,
- ✓ nowe ułożenie włókna światłowodowego wewnątrz pokrycia
- ✓ relaksacja lub rekrytalizacja materiału pokrycia (patrz rozdział 4.7).

Jeśli wpływ poszczególnych zjawisk znosi się, obserwuje się silne zmiany PMD towarzyszące stanom przejściowym i mniejsze różnice między wartościami PMD w warunkach termicznie ustalonych. Sytuacja taka wystąpiła w badaniu, którego wynik pokazano na rys. 75: podwyższanie temperatury powodowało w pierwszej chwili wzrost PMD, a później jej spadek; prawdopodobną przyczyną była relaksacja tworzywa ściślej tuby.

Relaksacja polega na ograniczonym przesuwaniu się względem siebie łańcuchów polimeru pod wpływem naprężeń wewnętrznych. Proces ten prowadzi do dodatkowego odkształcenia materiału i zmniejszenia efektywnego modułu sprężystości w warunkach długotrwałego obciążenia [78]. Z opisów w literaturze [148,149] wynika, że relaksacja materiałów używanych na pokrycia włókien światłowodowych następuje w czasie poniżej 1 h. Jeśli stała czasowa relaksacji jest znacznie krótsza niż czas, w którym następuje zmiana temperatury, występuje składowa naprężenia proporcjonalna do szybkości zmian temperatury, zanikająca w stanie termicznie ustalonym [149].

Procesy wymienione powyżej doprowadzają do wydłużenia czasu stabilizacji PMD w porównaniu do określonego przez stałą czasową  $\tau_c$ , przy czym czas ten może różnić się w zależności od kierunku zmian temperatury. Odpowiednie zależności określa się doświadczalnie, przez okresowe monitorowanie PMD w czasie badania.





Rys. 75. Zmiany temperatury w komorze (cienka linia) i PMD (gruba linia) podczas badania włókna G.652 w ścisłej tubie  $\varnothing 0,9$  mm (SUM-1, L = 460 m) [139].

Czasy stabilizacji PMD obserwowane w trakcie badań przeprowadzonych w ŁŁ zawierały się w granicach 1-20 h. Maksymalne wartości dotyczyły bębnow z przewodami OPGW o masie około 300 kg i szpul z kablami stacyjnymi. Masa całkowita 4 km kabla stacyjnego  $\varnothing 2$  mm wynosi wprawdzie zaledwie 15-18 kg, lecz większość przekroju kabla stanowi włókna aramidowa o bardzo niskiej przewodności termicznej, a nawinięcie na szpuli około 20 warstw bardzo utrudnia transfer ciepła w głąb próbki.

Zakres niniejszej pracy ogranicza się zasadniczo do analizy stanów ustalonych termicznie, ponieważ względnie długi czas pomiaru PMD za pomocą zestawu posiadanego w ŁŁ i konieczność uśredniania wyników z ciągu pomiarów nie pozwalały na zgromadzenie szczegółowych danych z doświadczeń. Charakterystyka pokazana na rys. 75 pochodzi z pomiarów w laboratorium ISMB w Turynie [139].

Większość badań włókien i kabli wymagała czasu ekspozycji w granicach 8-48 h, z czego na pomiary PMD w stanie ustalonym było dostępne 25-50% wymienionego czasu.

Kryształizacja zachodząca w podwyższonej temperaturze powoduje trwały skurcz tworzywa pokrycia ścisłego po badaniu, wielokrotnie obserwowany przez autora [140].

### 3.3.5. Reflektometryczne pomiary PMD

Impulsowy reflektometr polaryzacyjny (ang. *Polarization Optical Time Domain Reflectometer* – POTDR) wykorzystuje zjawisko rozproszenia wstecznego Rayleigha w ciągłym włóknie światłowodowym [150-152] lub odbicia Fresnela od końca włókna [153] i analizę zmian stanu polaryzacji powracającego promieniowania. Dostępny w handlu przyrząd POTDR-1100 firmy EXFO [154] wykorzystuje analizę stopnia polaryzacji (ang. *Degree of Polarization* - DOP) promieniowania powracającego z miejsca rozproszenia wstecznego.

Promieniowanie powracające do reflektometru po przebyciu drogi w obie strony zmienia stan polaryzacji w zależności od zakumulowanej dwójtomności liniowej włókna, natomiast wpływ dwójtomności kołowej włókna podczas propagacji w obu kierunkach znosi się. Z tego

powodu metody reflektometryczne nadają się do oszacowania PMD wyłącznie we włóknach światłowodowych nie wirowanych i nie poddawanych w kablu skręcaniu, które to zabiegi wprowadzają znaczną dwójłomność kołową i mogą być dominującym źródłem PMD lub PMD redukować. Zastrzeżenie powyższe praktycznie wyklucza stosowanie metody POTDR do badania włókien o przesuniętej dyspersji (ITU-T G.655, G.656).

Opóźnienie pomiędzy momentem wysłania impulsu, a momentem odbioru sygnału dostarcza informacji o odległości przebytej przez impuls we włóknie według znanego wzoru:

$$\Delta t = \frac{2z}{n_{eff}c} \quad (124)$$

w którym:  $\Delta t$  – opóźnienie,  $z$  – droga propagacji w światłowodzie w jedną stronę,  $n_{eff}$  - efektywny współczynnik załamania, podawany jako katalogowy parametr włókna światłowodowego,  $c$  – prędkość światła w próżni.

W przypadku linii kablowej, w obliczeniach odległości należy uwzględnić współczynniki nadmiaru długości włókna w kablu ( $\Delta L_K$ ) i nadmiaru długości kabla w linii ( $\Delta L_{LIN}$ ):

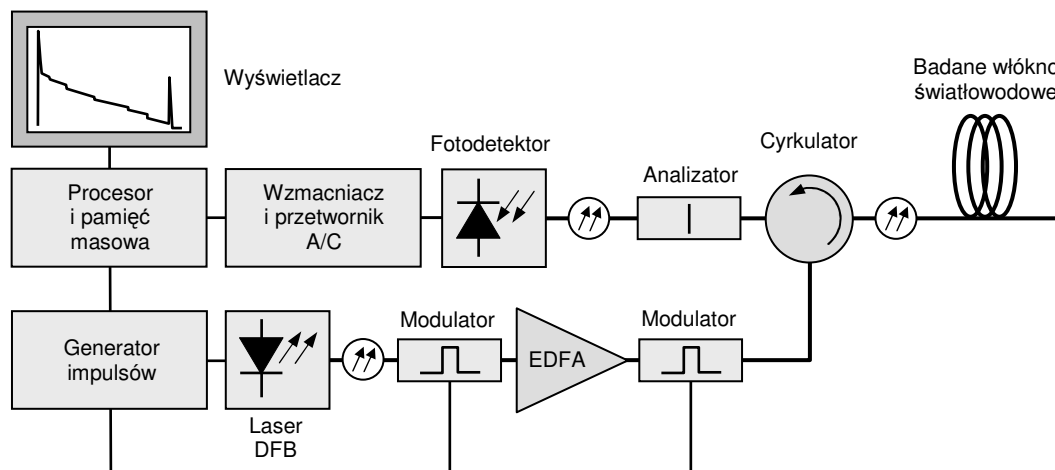
$$\Delta t = \frac{2z}{n_{eff}c} \left(1 + \frac{\Delta L_K}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta L_{LIN}}{100}\right) \quad (125)$$

Problem korekcji odległości przedstawiono w rozdziale 2.6.4.1.

Schemat blokowy POTDR wykorzystującego rozproszenie wsteczne przedstawia rys. 76. Do włókna wprowadza się impulsy promieniowania o długości  $L_P$  ze źródła o wąskim widmie (FWHM  $\leq 0,2$  nm), wysokim stopniu polaryzacji liniowej i mocy szczytowej  $\approx 50$  mW, na przykład lasera DFB współpracującego ze wzmacniaczem optycznym EDFA. Promieniowanie powracające z włókna jest wprowadzane do analizatora polaryzacji, którym w najprostszym przypadku jest pojedynczy polaryzator umieszczony przed fotodetektorem. Układy bardziej rozbudowane dokonują pełnej analizy DOP metodą Stokesa, do czego potrzeba 3 detektorów odbierających składowe  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ . Pozostałe elementy przyrządu są podobne jak w zwykłych reflektometrach OTDR, za wyjątkiem odmiennego oprogramowania do uśredniania i analizy krzywych reflektometrycznych.

Po usunięciu analizatora polaryzacji (lub zsumowaniu sygnałów z detektorów) przyrząd umożliwia pomiar tłumienności i odległości pracując jako normalny OTDR.

W czasie pomiarów reflektometrycznych PMD niezbędne jest wyznaczenie rozkładu dwóch parametrów włókna światłowodowego wzdłuż testowanej linii: drogi zdudniania  $L_B$  i drogi korelacji  $h$ .



Rys. 76. Schemat blokowy typowego reflektometru POTDR.

Wyznaczenie rozkładu współczynnika PMD umożliwia zależność [108]:

$$k_{PMD} = \frac{\lambda}{L_B c} \sqrt{h} \quad (126)$$

w której:  $k_{PMD}$  – współczynnik PMD włókna światłowodowego [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ],  $L_B$  - droga zdudniania,  $\lambda$  - długość fali promieniowania [m],  $c$  – prędkość światła [m/s],  $h$  – droga korelacji [km].

Surowym wynikiem pomiaru jest charakterystyka stanu polaryzacji odbieranego promieniowania w funkcji odległości, do której dotarł impuls sondujący, DOP(z). Jeśli POTDR posiada pojedynczy fotodetektor dołączony do badanego włókna przez polaryzator liniowy, otrzymujemy charakterystykę stanowiącą iloczyn krzywej reflektometrycznej i współczynnika  $R(z)$  definiowanego jako stosunek mocy składowej promieniowania o wybranej polaryzacji liniowej do całkowitej mocy opuszczającej włókno:

$$R(z) = \frac{P_A(z)}{P(z)} \quad (127)$$

gdzie:  $P_A(z)$  – moc promieniowania o polaryzacji liniowej przepuszczanej przez analizator,  $P(z)$  - całkowita moc promieniowania powracającego z badanego włókna i przepuszczonego przez cyrkulator lub sprzęgacz kierunkowy,  $z$  – odległość na jaką dotarł impuls wysłany z reflektometru (rys. 76). Parametr ten wykazuje analogie do  $R(\lambda)$  znanego z pomiarów PMD metodą stałego analizatora. Porównaj rozdział 3.3.1.2 i wzór (118).

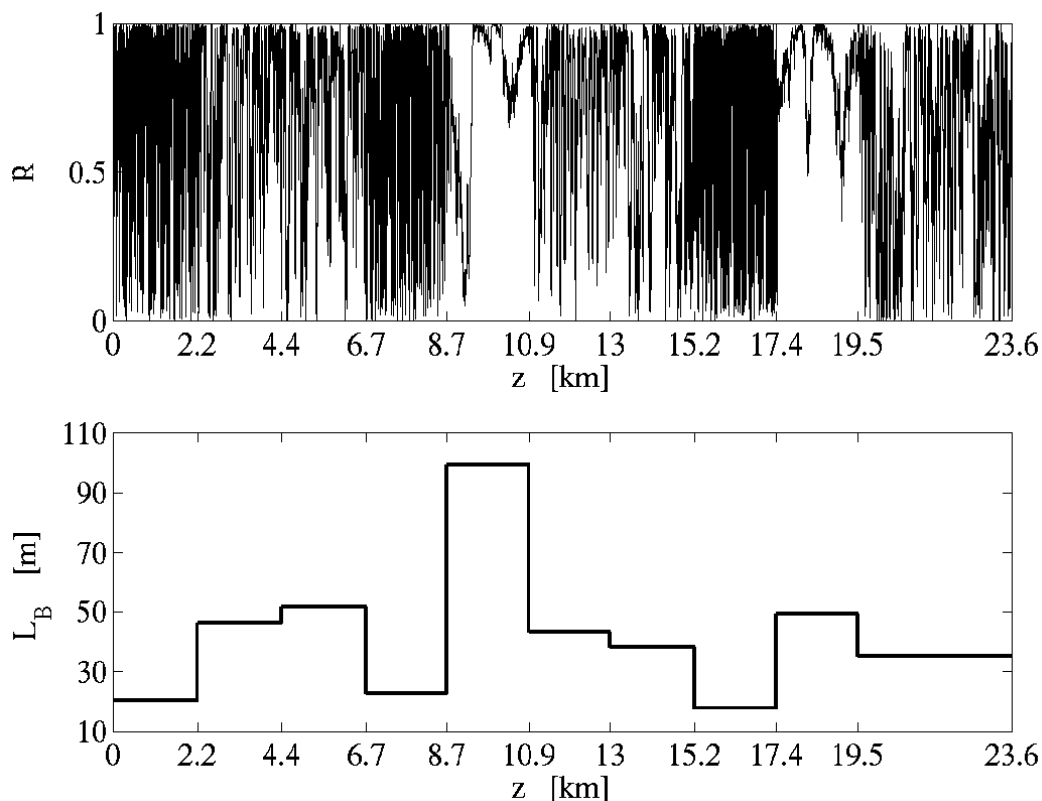
Przy odpowiedniej konfiguracji i oprogramowaniu zestawu można otrzymać charakterystykę  $R(z)$ , wykonując dodatkowy pomiar bez analizatora, dający w wyniku charakterystykę  $P(z)$ , lub z analizatorem obróconym o 90°. Bardziej rozbudowane przyrządy z wielokanałowym analizatorem polaryzacji mierzą charakterystyki stopnia polaryzacji DOP(z) lub stanu polaryzacji SOP(z).

Z dwóch niezbędnych do oszacowania PMD parametrów, łatwiej jest wyznaczyć drogę zdudniania  $L_B$ . Po przebyciu przez impuls sondujący we włóknie o polaryzacji liniowej w jedną stronę drogi wydłużonej o  $L_B/2$  (i o tyle samo z powrotem) następuje w przybliżeniu powrót do poprzedniego stanu polaryzacji. W efekcie na charakterystyce DOP(z) lub  $R(z)$  widać oscylacje z okresem równym  $L_B/2$  (rys. 77).

Okresowy powrót do oryginalnego stanu polaryzacji nie jest zupełny po przebyciu przez impuls dodatkowej drogi, ponieważ następuje również (na ogół powolniejsza) zmiana stanu polaryzacji z szybkością odwrotnie proporcjonalną do długości drogi korelacji (depolaryzacji)  $h$ . Kiedy  $L_B \ll h$ , wartość drugiego parametru można w przybliżeniu wyznaczyć analizując obwiednię przebiegu  $R(z)$  i widmo jej modulacji metodą szybkiej transformaty Fouriera [150]. Przypadek, kiedy  $L_B \approx h$  jest trudny do dokładnej analizy.

Kolejne ograniczenie wynika z podstaw metody reflektometrycznej. Jeśli długość impulsu sondującego  $L_P$  jest większa od  $L_B$ , nie można rozróżnić zmian stanu polaryzacji, gdyż na początku drogi impulsu rozproszonego wstecznie miesza się promieniowanie o wszystkich możliwych orientacjach polaryzacji. Odbierane przez fotodetektor promieniowanie ma prawie stałą wartość DOP  $\approx 1/3$ , wynikającą tylko z polaryzacji zachodzącej w czasie propagacji w kierunku powrotnym i nie zawiera informacji o dokładnej wartości  $L_B$  [150].

Podsumowując, pomiary reflektometryczne dostarczają tylko zgrubnych danych o zmienności PMD wzdłuż badanej linii kablowej. Reflektometr EXFO POTDR-1100 [154] sygnalizuje wyłącznie „niską”, „średnią” i „wysoką” PMD, bez wskazywania wartości liczbowych.



Rys. 77. Charakterystyka  $R(z)$  linii kablowej z włóknami G.652 (wykres górny) i oszacowanie zmienności  $L_B(z)$  na jej podstawie (wykres dolny) [155].

Doświadczony operator może wyróżnić odcinki o wysokiej PMD na krzywej  $DOP(z)$  lub  $R(z)$  (rys. 77), wskazywanej przez reflektometr o konstrukcji z rys. 75. Typowy objaw to jednoczesny zanik szybkich, regularnych oscylacji, sygnalizujący krótką  $L_B$  i silną dwójłomność liniową, oraz równocześnie pojawienie się powolnych, płynnych zmian  $DOP$  o nieco mniejszej amplitudzie, wskazujących na długą drogę korelacji  $h$  i powolne zmiany orientacji dwójłomności. Zgodnie ze wzorem (126) ta kombinacja własności włókna oznacza wysoką wartość PMD, co niestety dość często spotyka się w kablach tubowych [111].

## 4. Oddziaływanie pokryć ochronnych na włókno szklane

### 4.1. Podstawy

#### 4.1.1. Wprowadzenie

Rozdział ten jest poświęcony mechanizmom mechanicznego sprzężenia włókna szklanego z wielowarstwowymi pokryciami ochronnymi wykonywanymi z polimerów oraz powstawania naprężeń mechanicznych i odkształceń włókna światłowodowego pracującego w zmiennych temperaturach. Szczególną uwagę poświęcono zjawiskom prowadzącym do zmian parametrów transmisyjnych: PMD lub tłumienności, pomijając inne kwestie, na przykład wpływ pokrycia ochronnego i naprężeń na żywotność włókna światłowodowego.

Analizy dotyczą rozwiązań i materiałów szeroko stosowanych w produkcji kabli telekomunikacyjnych z włóknami jednomodowymi dla sieci lądowych; pominięto pokrycia specjalne – metalowe, grafitowe itp.

Artykuł opisujący mechaniczną interakcję włókna światłowodowego ze szkła  $\text{SiO}_2$  z polimerowym pokryciem ochronnym i problem mikrozgięć włókna ukazał się w Bell System Technical Journal już w 1975 r. [156]. Bardziej dokładne i częściowo nadal użyteczne opisy metod projektowania pokrycia pierwotnego i używanych materiałów opublikowano w połowie lat 80-tych [68,157-158]. Wówczas też przyjęto pokrycie 2-warstwowe jako standardowe dla włókien telekomunikacyjnych; pokrycia 1-warstwowe używane są znacznie rzadziej, głównie we włóknach specjalnych.

Przedmiotem publikacji jest głównie rozkład naprężeń mechanicznych, ich zależność od wymiarów pokrycia i parametrów używanych materiałów oraz zmiany z temperaturą, a także związane z tymi naprężeniami odkształcenia i wynikający z nich wzrost tłumienności włókna światłowodowego. Autorami znaczących serii opracowań teoretycznych są dr Efraim Suhir z AT&T Bell Laboratories (USA) i prof. Shiam-Tsong Shiue z Feng Chia University (Tajwan).

Problem mechanicznego oddziaływania pokrycia ochronnego na włókno światłowodowe pojawił się w ostrej formie około 1984 r., po uruchomieniu produkcji kabli światłowodowych liniowych z włóknami jednomodowymi odznaczającymi się niską tłumiennością i równocześnie wysoką wrażliwością na zginanie, które były narażone na działanie niskich temperatur otoczenia, do  $-40^\circ\text{C}$  włącznie. Obserwowany silny wzrost tłumienności włókien w niskiej temperaturze powiązano z deformacją włókna szklanego przez kurczące się pokrycie polimerowe [157]. W szczególności, skrócenie pokrycia wywiera na włókno szklane osiową siłę ściskającą, pod której działaniem włókno ulega początkowo skróceniu, a po zwiększeniu siły i utracie stabilności mechanicznej – wyboczeniu.

Wyboczenie włókna polega na ułożeniu falistym lub w spiralę rewersyjną, tj. z cykliczną zmianą kierunku skrętu. Ułożenie w spiralę o stałym kierunku skrętu jest niemożliwe, gdyż włókno unieruchomione na końcach i w wielu punktach pośrednich nie może się swobodnie obracać. Wprowadzane przy tym makro- i mikrozgięcia zwiększają tłumienność włókna i ograniczają zakres temperatur pracy. Przykład deformacji tego typu pokazano na rys. 78.



Rys. 78. Włókno w pokryciu ścisłym  $\varnothing 0,9$  mm odkształcone w spiralę rewersyjną. Obraz skrócony w osi poziomej w stosunku 1:4. Parametry skrętu:  $p \approx 8$  mm,  $d \approx 1$  mm. Strzałka pokazuje miejsce odwrócenia kierunku skrętu.

Optymalizacja pokrycia metodą prób i błędów, polegająca na wykonywaniu i testowaniu serii wyrobów o różnej budowie jest pracochłonna i kosztowna. Dodatkowy problem stanowi rosnąca szybkość wyciągania włókna światłowodowego: z około 40 m/min w 1980 r. do 1000 m/min w 2000 r.; proporcjonalnie do niej skraca się czas utwardzania materiału pokrycia, co zmusiło do wprowadzania nowych kopolimerów i silniejszych źródeł promieniowania ultrafioletowego. Używane materiały muszą równocześnie spełniać szereg innych wymagań, dotyczących m.in. stabilności chemicznej i termicznej, kompatybilności z żelami używanymi do wzdułżnego uszczelniania kabli, dobrej adhezji do włókna szklanego, gładkości powierzchni, możliwości barwienia, łatwości mechanicznego usuwania z włókna, kosztów produkcji, niskiej toksyczności i braku emisji wodoru.

Publikacje omawiające wyniki badań laboratoryjnych wymienionych zjawisk są nieliczne i pochodzą głównie z Japonii, co wynika z szerokiego stosowania przez tamtejszych producentów ścisłych pokryw ochronnych w kablach liniowych, podczas gdy firmy europejskie i amerykańskie zdecydowanie preferują kable tubowe. Inny powód to utajnianie technologii i charakterystyk używanych materiałów przez konkurujących producentów.

Istnieje ponadto literatura poświęcona mechanicznemu i termicznemu indukowaniu dwójłomności optycznej we włóknach jednopolarizacyjnych z wkładkami ze szkła  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  wymuszającymi naprężenia mechaniczne, typu PANDA lub Bow-Tie, związana z projektowaniem światłowodowych czujników ciśnienia i fal akustycznych.

Autor nie trafił natomiast na opracowania, w których analizowano wprost wpływ pokrycia ochronnego pracującego w zmiennych temperaturach na PMD w zwykłym jednomodowym włóknie telekomunikacyjnym. Prace określające standardowe obecnie konstrukcje i zasady projektowania pokryw ochronnych włókien światłowodowych powstały w latach 1975-1990, kiedy PMD nie budziła zainteresowania, natomiast dominował problem zachowania niskiej tłumienności kabla światłowodowego w szerokim zakresie warunków pracy.

#### **4.1.2. Zakres analizy**

Rozważania przedstawione dalej obejmują następujące zagadnienia:

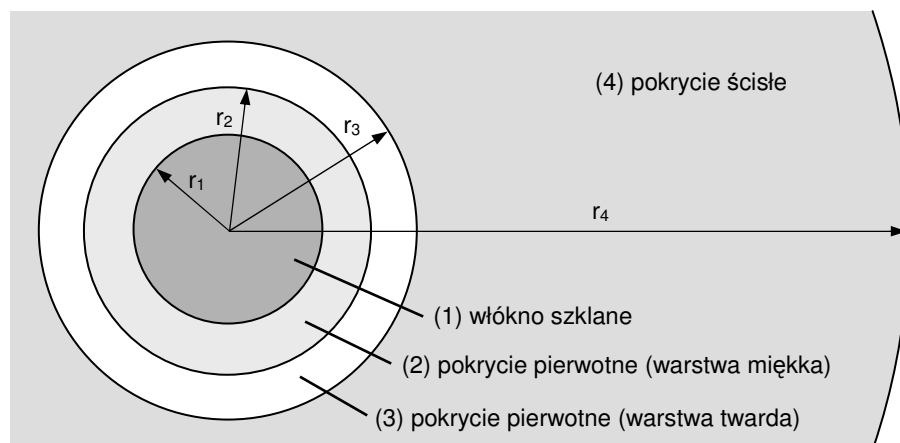
- ✓ Własności mechaniczne i termiczne materiałów na pokrycia (rozdział 4.2).
- ✓ Wzdłużna rozszerzalność termiczna włókien światłowodowych (4.3).
- ✓ Oddziaływanie pokrycia pierwotnego na włókno szklane (4.4).
- ✓ Oddziaływanie pokrycia ścisłego na włókno szklane (4.5).
- ✓ Oddziaływanie pokrycia półścisłego na włókno szklane (4.6).
- ✓ Wpływ relaksacji i rekrytalizacji materiałów polimerowych (4.7).

Przed analizą zachowania włókien w pokryciach ścisłych, zostaną przedstawione oddziaływania pomiędzy włóknem szklanym, a jego pierwotnym pokryciem ochronnym. Praktycznie wszystkie włókna w pokryciach ścisłych stosowane w kablach telekomunikacyjnych są produkowane przez nakładanie 1 lub 2 dodatkowych warstw polimerów na włókno posiadające standardowe pokrycie pierwotne, które jest zawsze obecne i ma zasadnicze znaczenie dla zachowania się gotowego wyrobu.

#### **4.1.3. Oznaczenia wymiarów włókna i założenia upraszczające**

Budowę pokryw: pierwotnego i ścisłego przedstawiono w rozdziałach 2.4.2 i 2.8-2.10.

Używane dalej oznaczenia wymiarów włókna szklanego i jego pokrycia zaprezentowano na rys. 79. Liczba warstw zmienia się w zależności od typu pokrycia i metody jego wytwarzania, lecz z zasady nie przekracza trzech. Wprowadzanie dodatkowych warstw, na przykład poślizgowej poprawia wprawdzie własności wyrobu, ale oznacza kolejne operacje technologiczne i wyższy koszt produkcji kabla światłowodowego. Warstwy barwne i poślizgowe o grubości zaledwie 3-5  $\mu\text{m}$  mają bardzo ograniczony wpływ na zachowanie włókna i w wielu rozważaniach ich obecność pomija się.



Rys. 79. Wymiary włókna światłowodowego w pokryciu wielowarstwowym. Zachowane proporcje wymiarów.

Dla potrzeb analiz przedstawionych dalej założono, że włókno szklane i wszystkie warstwy pokrycia mają przekrój kołowy oraz są współosiowe. To założenie eliminuje oczywiste źródło dwójłomności, jakim jest anizotropowy nacisk na włókno szklane pochodzący od eliptycznego lub niecentrycznego pokrycia. Powstaje wówczas nierównomierny rozkład naprężeń w rdzeniu włókna ( $\sigma_x - \sigma_y \neq 0$ ) i zgodnie ze wzorem (41) pojawia się wymuszona mechanicznie dwójłomność liniowa. Dalsze rozważania wykażą jednak, że powstające w tych warunkach DGD ma zwykle drugorzędne znaczenie.

Moduł sprężystości szkła kwarcowego jest przeciętnie o 4 rzędy wielkości większy niż tworzyw, którymi jest ono otoczone (tabele 7,17,18), a współczynnik rozszerzalności termicznej o 2-3 rzędy wielkości. Można pominąć odkształcenia promieniowe włókna szklanego i zmiany jego wymiarów z temperaturą bez szkody dla dokładności obliczeń.

## 4.2. Własności termiczno-mechaniczne materiałów pokrycia

### 4.2.1. Nakładanie pokrycia i temperatura równowagi

Najczęściej spotykane materiały pokrycia pierwotnego i ściśłego przedstawiono w rozdziałach 2.4.3, 2.6.3 i 2.8.2. Formowanie pokrycia z polimeru odbywa się metodami:

- wytłaczania z materiału termoplastycznego,
- utwardzania promieniowaniem ultrafioletowym,
- utwardzania termicznego (technologia rzadko stosowana).

Wytłaczanie pokrycia następuje w temperaturze ponad  $+200^\circ\text{C}$  i wiąże ze skurczem po utwardzeniu i ochłodzeniu do temperatury, w której włókno później pracuje. Skurcz po wytłaczaniu zależy od typu tworzywa i warunków jego chłodzenia oraz późniejszej klimatyzacji. Szybkie chłodzenie i niska temperatura końcowa zmniejszają skurcz, gdyż nie ma czasu na relaksację i krystalizację polimeru, lecz tak wykonane pokrycie łatwo ulega dalszemu kurczeniu podczas pracy w podwyższonej temperaturze ( $T > T_g$ ), czego efektem jest często niestabilność długości, PMD lub tłumienności włókna. Większość producentów stosuje szybkie chłodzenie ściśłej tuby w wodzie o temperaturze około  $+20^\circ\text{C}$ .

Pokrycie polimerowe nałożone w ten sposób na prawie nieściśliwe i nieznacznie zmieniające swe wymiary z temperaturą włókno szklane (tabela 17) pozostaje w całym zakresie temperatur pracy rozciągnięte, wywierając naciski wzdłużne i promieniowe na włókno. Dla opisu oddziaływań między włóknem a pokryciem wprowadza się temperaturę równowagi  $T_R$ , w której średnica wewnętrzna swobodnie ułożonego pokrycia jest identyczna ze średnicą włókna szklanego, a naprężenia na granicy włókno-pokrycie równe zero.

Temperatura równowagi to wielkość umowna i niemożliwa do bezpośredniego pomiaru. Przyjmowanie za  $T_R$  temperatury topnienia tworzywa, zawierającej się w granicach  $+214...+232^\circ\text{C}$  dla PBT, a tym bardziej temperatury stopionego polimeru w wylączarce, bliskiej  $+250^\circ\text{C}$  dla tego samego materiału jest nierealistyczne, gdyż w tych warunkach polimer jest jeszcze płynny i niezdolny do przekazywania nacisku na włókno. Za orientacyjną  $T_R$  tuby ściślej szybko chłodzonej po wylóczeniu i nie poddawanej klimatyzacji w temperaturze powyżej  $T_g$  można przyjąć temperaturę, w której polimer zaczyna twardnieć i krystalizować - o ile krystalizacja w nim zachodzi. Wyniki pomiarów podane w [159] i [80] określają średnią temperaturę krystalizacji PBT na odpowiednio  $+183^\circ\text{C}$  i  $+189^\circ\text{C}$ , a dolną granicę przedziału krystalizacji na  $+173^\circ\text{C}$  i  $+169^\circ\text{C}$ . W przypadku tuby ściślej trzeba wprowadzić poprawkę na relaksację w początkowej fazie chłodzenia, likwidującą część naprężeń wewnątrz kurczącego się pokrycia.

Można szacować, że  $T_R$  wylączanego ściśłego pokrycia z PBT leży pomiędzy  $+140^\circ\text{C}$  a  $+180^\circ\text{C}$ . Faktyczna wartość zależy od gatunku tworzywa, sposobu chłodzenia i klimatyzacji po wylóczeniu oraz historii próbki: ogrzewanie powyżej  $+60^\circ\text{C}$  prowadzi do wzrostu stopnia krystalizacji, skurczu polimeru i podwyższenia  $T_R$ . Rozpatrywana w rozdziale 2.6.3 krystalizacja 40% masy PBT i skurcz liniowy o 0,16% podwyższają temperaturę równowagi o 20 K ( $\alpha = 0,8 \times 10^{-4}/\text{K}$ ). Autor wielokrotnie obserwował ten efekt po trwającej kilka godzin ekspozycji fabrycznie nowych włókien na temperaturę nie przekraczającą  $+70^\circ\text{C}$ .

W przypadku pokryć utwardzanych za pomocą promieniowania UV w niższej niż wylączanie temperaturze,  $T_R$  oznacza temperaturę, w której powinno nastąpić rozszerzenie materiału pokrycia równe łącznemu skurczowi po utwardzeniu (usieciowaniu) i ewentualnym ochłodzeniu, gdyż silny strumień promieniowania, w tym podczerwonego z lamp rtęciowych lub metalohalogenkowych nagrzewa włókno. Nagrzewaniu można zapobiec chodząc włókno zimnym azotem. Informacje na temat temperatury włókna w czasie utwardzania oraz  $T_R$  są skąpe i rozbieżne. W pracy [158] temperaturę utwardzania oszacowano na ponad  $+130^\circ\text{C}$ , natomiast pomiar (rys. 87) opisany w artykule [157] wykazał  $T_R \approx +50^\circ\text{C}$ .

Obciążenie włókna siłą rozciągającą w czasie nakładania pokrycia obniża  $T_R$ , gdyż skurcz pokrycia musi początkowo wyrównać wydłużenie włókna. Jest to dogodna metoda kontrolowania własności mechaniczno-termicznych pokrycia prostymi środkami.

#### 4.2.2. Zmiany własności polimerów z temperaturą

Polimery termoplastyczne wykazują charakterystyczny, kilkustopniowy przebieg zmian własności mechanicznych w funkcji temperatury [78], opisywany przez następujące temperatury specyficzne dla danego materiału: kruchości ( $T_k$ ), zeszklenia ( $T_g$ ), mięknienia ( $T_m$ ) i płynięcia ( $T_p$ ) oraz rozkładu ( $T_r$ ). Zachowanie materiału zależy od tego, w którym z przedziałów między temperaturami charakterystycznymi wypada temperatura pracy  $T$ :

- ✓  **$T < T_k$ : stan sprężysty kruchy.** Energia drgań termicznych jest zbyt niska, by wywołać przestawienie segmentów lub przemieszczenia całych łańcuchów polimeru względem siebie. Polimer pozostaje kruchy i odkształca się wyłącznie sprężysto przez zmiany odległości między atomami, a po zwiększeniu odkształcenia powyżej 3-15% pęka. Moduł sprężystości ( $E$ ) ma wartość maksymalną, a współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ ) minimalną; oba słabo zależą od temperatury. Termoplasty używane do produkcji kabli powinny być elastyczne i zasadniczo nie mogą pracować w tym zakresie temperatury; wymóg ten nie dotyczy transportu i składowania.
- ✓  **$T_k < T < T_g$ : stan sprężysty z wymuszoną elastycznością.** Energia drgań termicznych wystarcza dla przeformowania (obrót merów i segmentów, prostowanie makrocząsteczek, zrywanie wiązań i tworzenie nowych) lub przemieszczenia łańcuchów polimeru względem siebie tylko wtedy, jeżeli naprężenie przekracza granicę sprężystości. Polimer odkształca się pod obciążeniem początkowo sprężysto, a następnie plastycznie bez powrotu do oryginalnych wymiarów.  $E$  spada, a  $\alpha$  wzrasta z temperaturą przy zbliżaniu się do

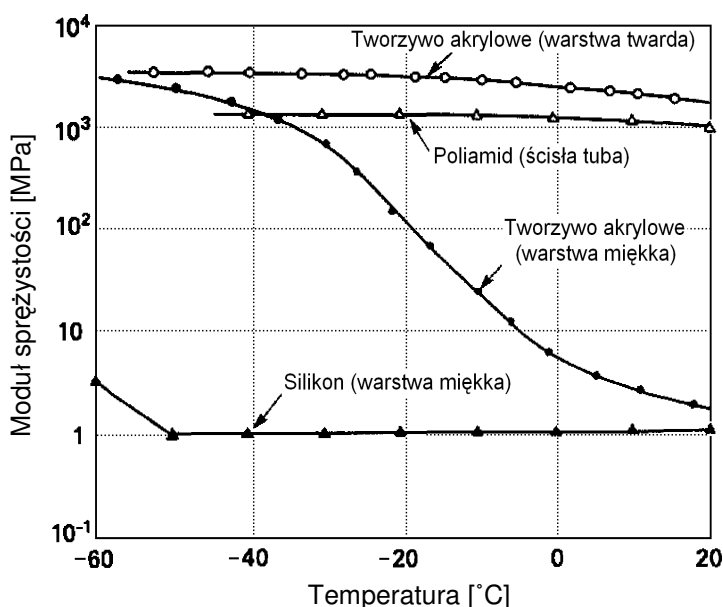


$T_g$ ; w niższych temperaturach oba parametry są dość stabilne. Najbardziej korzystny zakres pracy dla materiałów pokrycia włókien światłowodowych przenoszących naprężenia mechaniczne przy ograniczonych odkształceniach.

- ✓  $T_g < T < T_m$  lub  $T_g < T < T_p$  (przy dominacji fazy krystalicznej): **stan wysokoelastyczny**. Energia drgań termicznych wystarcza dla odkształcenia lub przemieszczenia łańcuchów polimeru. Polimer odkształca się pod obciążeniem głównie elastycznie, prawie bez zmian objętości ( $\nu \approx 0,5$ ).  $E$  szybko spada, zbliżając się do zera w okolicy  $T_m$  ( $T_p$ ), a  $\alpha$  wzrasta z temperaturą. Istniejące naprężenia wewnętrzne zanikają wskutek **relaksacji** i **rekrytalizacji** materiału, czemu towarzyszy trwała zmiana wymiarów. Zakres temperatur odpowiedni dla miękkich materiałów powłok kabli i warstw buforowych pokrycia włókien światłowodowych, poddawanych znacznym odkształceniom.
- ✓  $T_m < T < T_r$  lub  $T_p < T < T_r$ : **stan płynny**. Polimer stanowi ciecz o wysokiej lepkości i daje się dowolnie formować. W tym zakresie temperatur znajduje się tworzywo w trakcie wytłaczania. Ogrzanie pokrycia włókna do takiej temperatury powoduje jego stopienie.

**Elastomery usieciowane** wykazują **stan wysokoelastyczny** w przedziale  $T_g - T_r$ . Miękkie materiały pokrycia włókien światłowodowych sieciowane za pomocą inicjatorów aktywowanych promieniowaniem ultrafioletowym należą do tej grupy.

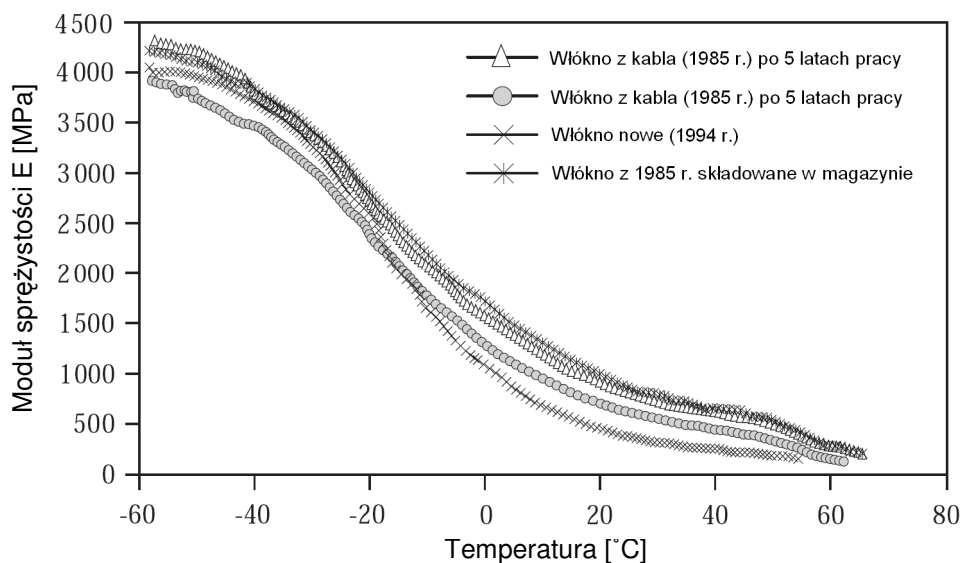
Wzrost współczynnika rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ ) i spadek modułu sprężystości ( $E$ ) polimeru powyżej  $T_g$  następują stopniowo w dość szerokim przedziale temperatur, na przykład 80 K. W temperaturach znacznie niższych i znacznie wyższych od  $T_g$   $\alpha$  prawie nie zmienia się. Moduł sprężystości polimeru ochłodzonego znacznie poniżej  $T_g$  osiąga asymptotycznie prawie stałą wartość (rys. 13,14,80,83,87). Polimery o łańcuchu z wieloma podstawnikami mogą mieć rozszerzony zakres temperatur, w których następuje zeszklenie, a materiały wielofazowe dwie lub więcej  $T_g$  specyficznych dla poszczególnych składników [78]. Zmiany własności tworzywa z temperaturą są wtedy łagodniejsze, co jest korzystne dla stabilności parametrów transmisyjnych włókna nim pokrytego [91].



Rys. 80. Charakterystyki termiczne modułu sprężystości podstawowych tworzyw na pokrycia włókien telekomunikacyjnych [157].

Tworzywami, których  $T_g$  wypada wewnątrz zakresu temperatur pracy kabli liniowych (-40...+70°C) są kopolimery akrylowe używane na pokrycie pierwotne (rys. 80,81,83) oraz PBT i PA stosowane na tuby ściste i luźne (rys. 13,14). Doskonale własności termiczne i mechaniczne mają elastomery silikonowe (rys. 80,93), które niestety nie nadają się do

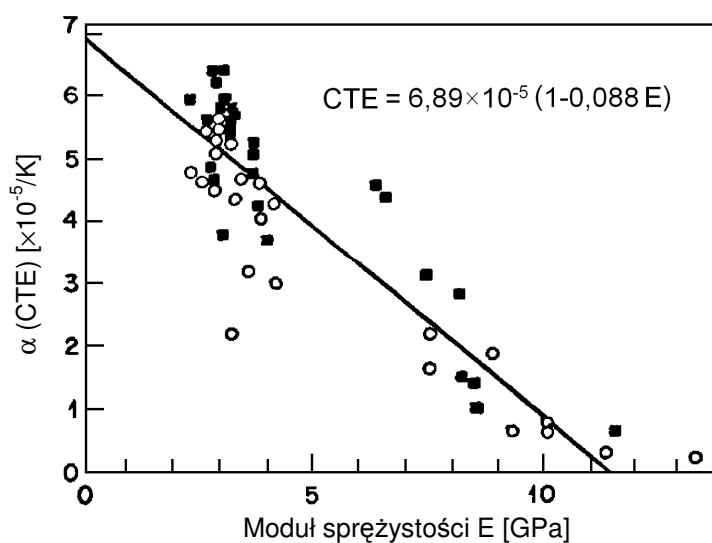
pokrywania włókien światłowodowych wyciąganych z wysokimi szybkościami [158], często wydzielają wodór, a ponadto trudno je dokładnie usunąć z włókna.



Rys. 81. Zmiany modułu sprężystości zewnętrznej warstwy pokrycia włókna Corning SMF-28 z temperaturą. Wyniki badań próbek nowych i starzonych [160].

Według [161] średnie wartości współczynnika rozszerzalności termicznej tego samego materiału wynoszą  $2,1 \times 10^{-4}/K$  ( $-60^{\circ}C \dots +23^{\circ}C$ ) i  $9,1 \times 10^{-4}/K$  ( $+23^{\circ}C \dots +80^{\circ}C$ ).

Suhir [162] przedstawił interesującą i cytowaną później tezę, że istnieje generalna zależność pomiędzy współczynnikiem rozszerzalności termicznej  $\alpha$ , a modułem sprężystości polimerów konstrukcyjnych, co poparto danymi tworzyw (rys. 82). W opinii autora wniosek ten jest oparto na niereprezentatywnym dla przemysłu kablowego zestawie materiałów, prawdopodobnie poliestrów ciekłokrystalicznych, pomijając elastomery i miękkie tworzywa o  $E < 2$  GPa. Szereg polimerów pracujących powyżej  $T_g$  ma znacznie wyższy  $\alpha$  niż  $7 \times 10^{-5}/K$  przyjęte za maksimum. W opracowaniach [91,157,161] podawano dla różnych tworzyw pokrycia miękkiego  $\alpha = 1,8-9,1 \times 10^{-4}/K$ . Podobny przykład przedstawia rys. 85.



Rys. 82. Zależność pomiędzy współczynnikiem liniowej rozszerzalności termicznej i modułem sprężystości polimerów konstrukcyjnych [162].

Znanym sposobem poprawienia sztywności i stabilności wymiarów polimeru jest wprowadzenie napełniaczy nieorganicznych o wysokim module sprężystości i niskim  $\alpha$ , najczęściej ciętego włókna szklanego lub mikro-kulek szklanych. Istnieją modyfikowane w ten sposób odmiany PBT [77,79,163]. Materiałów tego rodzaju nie stosuje się do jednak do pokrywania włókien światłowodowych: twarde cząstki napełniacza uszkadzają powierzchnię szkła, a napełniane tworzywo nierównomiernie kurczy się po wytłoczeniu lub utwardzeniu, wprowadzając mikrozmętnienia włókna. Twardy i nietopliwy napełniacz uniemożliwia też mechaniczne i termiczne usuwanie pokrycia obecnymi metodami.

Liniową rozszerzalność termiczną polimeru określa następująca zależność uwzględniająca zmiany współczynnika rozszerzalności termicznej materiału z temperaturą:

$$\frac{\Delta L}{L} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (128)$$

w której:  $T_1$ ,  $T_2$  – granice przedziału temperatur,  $\Delta L$  – zmiana długości próbki,  $L$  – długość początkowa próbki,  $\alpha$  – liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej.

Do uproszczonych obliczeń odkształceń i naprężeń wykorzystuje się efektywny współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha_{eff}$  stanowiący wartość średnią wyznaczoną dla wybranego przedziału temperatur  $T_1$ - $T_2$  zgodnie ze wzorem:

$$\alpha_{eff} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (129)$$

W tabeli 17 zestawiono parametry głównych materiałów używanych do produkcji telekomunikacyjnych włókien światłowodowych, istotne dla analiz w rozdziałach 4.1.4-4.1.5.

Tabela 17. Parametry materiałów włókien światłowodowych w temperaturze +20°C.

Materiał	Moduł sprężystości (E)	Współczynnik Poissona ( $\nu$ )	Temperatura zeszklenia ( $T_g$ )	Współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ )
----	MPa	---	°C	K <sup>-1</sup>
Szko kwarcowe (100% SiO <sub>2</sub> )	73000	0,17	nie dotyczy	$5,5 \times 10^{-7}$
Szko kwarcowe (90% SiO <sub>2</sub> +10% GeO <sub>2</sub> )	72000	0,18	nie dotyczy	$1,2 \times 10^{-6}$
Kopolimer akrylowy (miękki)	1-4	0,47-0,50	-40...-10	$1,5-4,5 \times 10^{-4}$
Kopolimer akrylowy (średnio twardy)	≈ 50	≈ 0,45	≈ +20	≈ $1,5 \times 10^{-4}$
Kopolimer akrylowy (twardy)	500-3000	0,42-0,47	+60...+80	$0,5-2,5 \times 10^{-4}$
Elastomer silikonowy (miękki)	1-4	0,495-0,50	-100...-50	$5,0-8,0 \times 10^{-5}$
Poliamid 12 (PA 12)	900-1400	0,38-0,41	+35...+45	$0,9-1,5 \times 10^{-4}$
PBT	2200-2800	0,32-0,38	+20...+68	$0,7-1,3 \times 10^{-4}$

### 4.3. Wzdłużna rozszerzalność termiczna włókien światłowodowych

Obliczenia współczynnika rozszerzalności termicznej włókna szklanego umieszczonego w pokryciu pierwotnym i ściśłym pokryciu wtórnym przedstawione poniżej wykonano zakładając, że włókno światłowodowe jest ułożone prostoliniowo i ściśle sprzężone mechanicznie ze wszystkimi warstwami pokrycia. Obowiązuje wówczas zależność (6):

$$\alpha_k = \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot E_n \cdot A_n}{\sum_{n=1}^N E_n \cdot A_n} \quad (6)$$

Przyjmując wymiary włókna i dane materiałów określone na rys. 79 i w tabeli 18 oraz określając pole przekroju każdej kolejnej warstwy pokrycia z zależności:

$$A_n = \frac{\pi(d_n^2 - d_{n-1}^2)}{4} \quad (130)$$

Tabela 18. Parametry elementów włókna światłowodowego Corning SMF-28 i wytłaczanego pokrycia ścisłego w temperaturze +20 °C. Oznaczenia wymiarów według rys. 79.

Warstwa tworząca włókno światłowodowe	Moduł sprężystości (E)	Średnica zewnętrzna warstwy (d)	Przekrój warstwy (A)	Współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha$ )
----	MPa	mm	mm <sup>2</sup>	K <sup>-1</sup>
1: włókno szklane	73000	0,125	0,01227	$5,5 \times 10^{-7}$
2: pokrycie pierwotne miękkie	1,4	0,190	0,01608	$2,2 \times 10^{-4}$
3: pokrycie pierwotne twarde	700	0,250	0,02073	$8,0 \times 10^{-5}$
4: pokrycie ściste z PBT (*)	2500	0,900	0,58709	$1,3 \times 10^{-4}$

(\*) Pokrycie 1-warstwowe z tworzywa Grilpet B24 firmy EMS [33]. Przekrój pokazany na rys. 22a.

otrzymujemy współczynniki liniowej rozszerzalności termicznej w kierunku osiowym:

- włókna w pokryciu pierwotnym:  $\alpha_p = 1,90 \times 10^{-6}/K$ , 3,5-krotnie wyższy niż szkła kwarcowego. Decydujący wpływ ma tu zewnętrzna warstwa pokrycia.
- włókna w ścisłej tubie:  $\alpha_s = 8,22 \times 10^{-5}/K$ . Jest to 63%  $\alpha$  materiału ścisłej tuby, która z kolei wnosi 62,6% całkowitej sprężystości wzdłużnej włókna światłowodowego.

Nieoficjalnie ujawniony  $\alpha$  włókna SMF-28 firmy Corning to  $1,8 \times 10^{-6}/K$ . Firmowa publikacja [161] podaje ponad 2-krotnie wyższe  $\alpha$  pokrycia pierwotnego twardego i kompletnego włókna niż przedstawione wyżej oraz zmierzony współczynnik temperaturowy opóźnienia transmisyjnego włókna SMF-28:  $8,0 \times 10^{-6}/K$ . Jest on inny niż  $\alpha_p$ , gdyż współczynnik załamania światła szkła zależy od temperatury i naprężenia.

W sytuacji wyboczenia włókna światłowodowego opisaną w rozdziale 4.4.3 powyższe zależności przestają obowiązywać. Wartość  $\alpha$  wzrasta, ponieważ włókno szklane układa się spiralnie ze znacznie zredukowanym odkształceniem sprężystym, a stała powstałej sprężyny jest mniejsza niż moduł sprężystości prostego pręta szklanego.

Należy uwzględnić znaczną zmienność własności mechanicznych polimerów z temperaturą i praktyczny jej brak u szkła kwarcowego. Ze wzrostem temperatury spada moduł sprężystości i rośnie współczynnik rozszerzalności termicznej polimeru (rozdział 4.2.2). Efekty tych zmian częściowo znoszą się [161].

#### 4.4. Oddziaływanie pokrycia pierwotnego na włókno szklane

Szczegółowe analizy rozkładu naprężeń we włóknie światłowodowym ze szkła SiO<sub>2</sub> w pokryciu pierwotnym przedstawiono w szeregu publikacji, w tym wczesnych [164,165]

z 1988 r. i [162] z 1990 r., których autorem był Efraim Suhir z AT&T Bell Laboratories. Przedstawione tam wyniki nie były wolne od błędów, wynikających m.in. z pominięcia wzdłużnych odkształceń włókna szklanego. Prace te później korygowano i rozwijano, na przykład w artykułach [166-170], dodając m.in. rozważania nad wpływem ciśnienia zewnętrznego. Inny temat stanowi skurcz materiału pokrycia podczas utwardzania, dający efekt podobny jak obniżenie temperatury, rozważany w pracach [171] i [68].

#### 4.4.1. Oddziaływanie pokrycia 1-warstwowego

W tym przypadku włókno szklane jest otoczone cylindryczną warstwą jednorodnego materiału, co stanowi najtańszą opcję wykonania pokrycia ochronnego. Często używane są elastyczne polimery o średnim module sprężystości  $E_2 \approx 50$  MPa [63].

W uproszczonych rozważaniach przyjmuje się  $\alpha_{eff}$  obliczoną według wzoru (129) dla zakresu temperatur  $T - T_R$ , gdzie  $T$  jest temperaturą pracy włókna. Można ponadto pominąć ściśliwość i rozszerzalność termiczną szkła kwarcowego. W każdej temperaturze pracy mamy do czynienia ze spadkiem temperatury względem  $T_R$  o

$$\Delta T = T_R - T \quad (131)$$

Kurczące się pokrycie wywiera na powierzchnię włókna ciśnienie promieniowe  $\sigma_r$  określone przez zależność, którą sformułował King [166]:

$$\sigma_r = E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T \frac{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}{1 + (1 - 2\nu) \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (132)$$

Ciśnienie to jest zawsze dodatnie i rośnie z obniżaniem temperatury szybciej niż proporcjonalnie, gdyż iloczyn  $E_2 \cdot \alpha_{eff}$  we wzorze (132) spada z temperaturą, jeśli jest ona zbliżona lub wyższa od  $T_g$ . Naprężenie osiowe wewnątrz pokrycia  $\sigma_z$  jest zawsze rozciągające i równe  $\sigma_r$ . Na włókno szklane działa osiowa siła ściskająca:

$$P = \pi(r_2^2 - r_1^2)\sigma_z \quad (133)$$

Po wstawieniu wzoru (132) do wzoru (133) otrzymujemy, że:

$$P = E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T \pi(r_2^2 - r_1^2) \frac{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}{1 + (1 - 2\nu) \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (134)$$

Przyjmując, że większość odpowiednich na pokrycie ochronne materiałów polimerowych ma  $\nu = 0,4-0,5$ , zależność (134) można uprościć do postaci przedstawionej niżej:

$$P \approx 3,2E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T (r_2^2 - r_1^2) \left[ 1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \right] \quad (135)$$

Opisy techniczne włókien światłowodowych podają zawsze średnice pokrycia, stąd bardziej przydatna jest inna forma wzoru (135):

$$P \approx 0,8E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T (d_2^2 - d_1^2) \left[ 1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \right] \quad (136)$$

Suhir [162] i Shiue [169] podali prostszą zależność, w której pominięto nierównomierny rozkład naprężeń wewnątrz pokrycia, identycznie jak obliczeniach wydłużenia w rozdziale 4.3:

$$P = E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (137)$$

Analogicznie jak wzór (135), można ją przekształcić do postaci:

$$P = E_2 \cdot \alpha_{2eff} \cdot \Delta T \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \quad (138)$$

Pokrycia 1-warstwowe spotyka się we włóknach specjalnych, mikrostrukturalnych i czujnikowych; ich wymiary zmieniają się w szerokim zakresie. Wstawiając do wzoru (136) parametry włókna telekomunikacyjnego z SiO<sub>2</sub> w pokryciu o średniej twardości utwardzanym promieniowaniem ultrafioletowym: E<sub>2</sub> = 50 MPa, α<sub>2eff</sub> = 1,0 × 10<sup>-3</sup>/K, ΔT = 150 K, d<sub>1</sub> = 125 μm, d<sub>2</sub> = 250 μm, otrzymujemy P = 0,35 N. Zgodnie z zależnością:

$$\varepsilon = \frac{4P}{\pi d_1^2 E_1} \quad (139)$$

siła ta powoduje skrócenie włókna o ε = 0,04%, co jest bez znaczenia dla niezawodności eksploatacyjnej i obliczeń okna wydłużenia kabli.

Siła obliczona z uproszczonego wzoru (138) wynosi 0,28 N – o 21% mniej. W przypadku bardzo cienkich pokryć (d<sub>1</sub>/d<sub>2</sub> ≈ 1) różnica osiąga 1:2, ale włókien telekomunikacyjnych nie konstruuje się w ten sposób i zależność (138) wystarcza. Parametry materiałów pokrycia E i α rzadko znane są z tolerancją lepszą niż ±20%, również dokładność pomiaru własności pokrycia na włóknie jest niska [63] i precyzja obliczeń traci znaczenie.

Jednorodne ściskanie osiowe włókna szklanego nie wprowadza dwójłomności optycznej o orientacji wymaganej do powstania PMD. Pojawia się ona wyłącznie, kiedy pokrycie jest eliptyczne lub niecentryczne względem włókna szklanego. Wobec braku odniesienia do włókien telekomunikacyjnych przypadek taki nie będzie rozpatrywany.

#### 4.4.2. Oddziaływanie pokrycia 2-warstwowego

Jak zaznaczono w rozdziale 2.4.2, pokrycie 2-warstwowe jest w uproszczeniu rurą z twardego materiału, przejmującą poprzeczne naciski zewnętrzne, oddzieloną od włókna szklanego bardzo miękkim, gumowatym wypełniaczem. Ze względów technologicznych korzystne jest stosowanie polimerów z tej samej grupy, kompatybilnych chemicznie, przetwarzanych identycznymi metodami i zachowujących dobrą adhezję do siebie.

Warstwę wewnętrzną tworzy elastomer akrylowy lub silikonowy o minimalnej sztywności (E = 1-4 MPa) i współczynniku Poissona bliskim teoretycznego maksimum (ν = 0,5). Jego temperatura zeszklenia T<sub>g</sub> powinna leżeć poniżej zakresu temperatur pracy włókna światłowodowego, by zawsze zachowywać stan wysokoelastyczny.

Materiał warstwy zewnętrznej to tworzywo maksymalnie twarde (E = 500-2500 MPa) i odporne na przecinanie, przy zachowaniu elastyczności niezbędnej dla uniknięcia pęknięć podczas zginania włókna. Materiał ten pracuje w stanie sprężystym z wymuszoną elastycznością i jego temperatura zeszklenia T<sub>g</sub> powinna leżeć powyżej zakresu temperatur pracy kabla. Przy identycznych wymiarach, skuteczność zapewnianej przez pokrycie 2-warstwowe redukcji nacisków poprzecznych jest w przybliżeniu proporcjonalna do stosunku modułów sprężystości materiałów obu warstw E<sub>3</sub>/E<sub>2</sub>. Odpowiednią zależność dla włókna, na które działa zewnętrzne ciśnienie hydrostatyczne p podał Shiue [167], który dla uproszczenia pominął ściśliwość włókna szklanego:

$$\sigma_r = \frac{4(1-\nu_2)(1-\nu_3)p}{\frac{E_3}{E_2} \frac{1+\nu_2}{1+\nu_3} (1-2\nu_2) \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right) + \left(1 + (1-2\nu_2) \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right) \left(1 + (1-2\nu_3) \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right)}$$

(140)

Uwzględniając, że  $\nu_2 \approx 0,5$ , można ją dalej uprościć do postaci:

$$\sigma_r = \frac{2(1-\nu_3)p}{\frac{E_3}{E_2} (1-2\nu_2) \frac{1,5}{1+\nu_3} \left(1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2\right) + 1} = kp$$

(141)

Obniżanie modułu sprężystości warstwy wewnętrznej  $E_2$  jest korzystne, natomiast cechująca „idealne” elastomery wartość  $\nu_2$  bliska 0,5 bardzo niepożądana. Zestawienie współczynników redukcji ciśnienia zewnętrznego  $k$  dla kilku kombinacji materiałów pokrycia w tabeli 19 wskazuje kolejny powód, dla którego ograniczono stosowanie silikonów.

Tabela 19. Efektywność redukcji ciśnienia zewnętrznego przez pokrycie pierwotne włókna światłowodowego w temperaturze +20°C w zależności od własności materiałów.

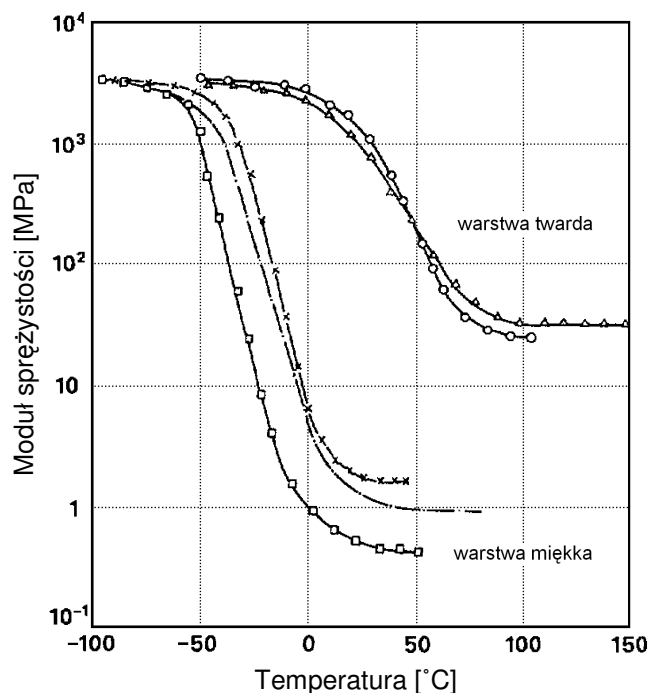
Poz.	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$E_2$	$\nu_2$	$E_3$	$\nu_3$	$k$
---	mm	mm	mm	MPa	---	MPa	---	---
1	0,125	0,190	0,250	1,4	0,485	800	0,44	0,1895
2	0,125	0,190	0,250	1,7	0,47	800	0,44	0,1243
3	0,125	0,190	0,250	1	0,49947	800	0,44	0,8253
4	0,125	0,180	0,250	3,5	0,49947	1700	0,44	0,8861
5	0,125	0,500	0,900	3,5	0,49947	1700	0,39	0,7352

Uwagi: (1-2): pokrycie pierwotne włókna Corning SMF-28, (3-4): pokrycia silikon/akryl i silikon/nylon  $\varnothing 0,25$  mm, (5) pokrycie silikon/nylon  $\varnothing 0,9$  mm.

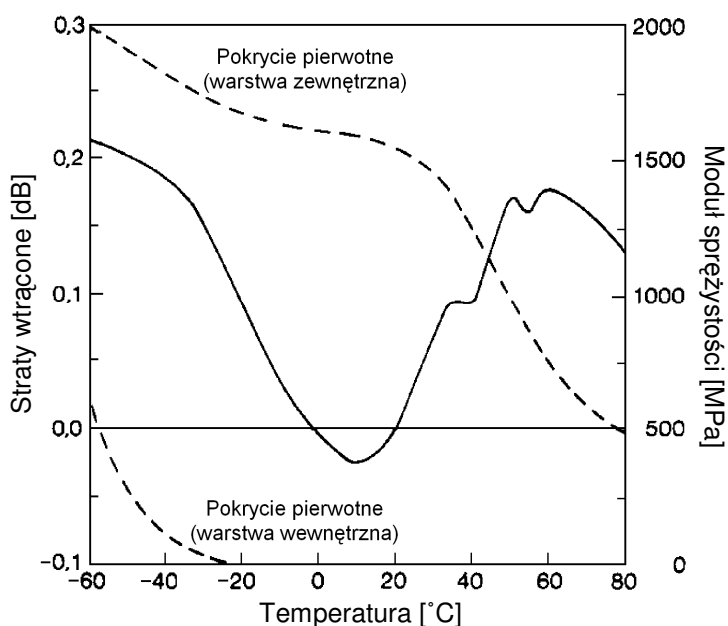
Pokrycie silikonowe nie zapewnia wprawdzie efektywnej redukcji zewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego, ale skutecznie zapobiega lokalnym deformacjom włókna pod wpływem punktowych nacisków na pokrycie zewnętrzne, „odpływając” do sąsiednich sekcji włókna.

Własności materiałów pokrycia zależą od temperatury (rozdział 4.2.2) i zachowanie optymalnej proporcji  $E_3/E_2$  jest możliwe tylko w ograniczonym przedziale temperatur, który niestety jest węższy od wymaganego dla kabli liniowych. Przykłady odpowiednich charakterystyk  $E(T)$  pokazano na rys. 83. Maksymalna proporcja  $E_3/E_2$  dla wszystkich kombinacji testowanych polimerów przekracza 1000, lecz wymaganie by  $E_3/E_2 > 100$  w całym przedziale temperatur pracy kabli kanałowych, rozciągającym się od -30°C do +60°C spełnia tylko jedna z nich. W pozostałych przypadkach skuteczność ochrony wyraźnie pogorszy się w temperaturach poniżej -10°C. Nawet najlepszy badany zestaw nie jest optymalny dla kabli napowietrznych pracujących w temperaturach do -40°C.

Zależność tę ilustruje to charakterystyka temperaturowa strat mikrozgięciowych przedstawiona na rys. 84; przedstawione tam dane dotyczą innego pokrycia niż na rys 82.



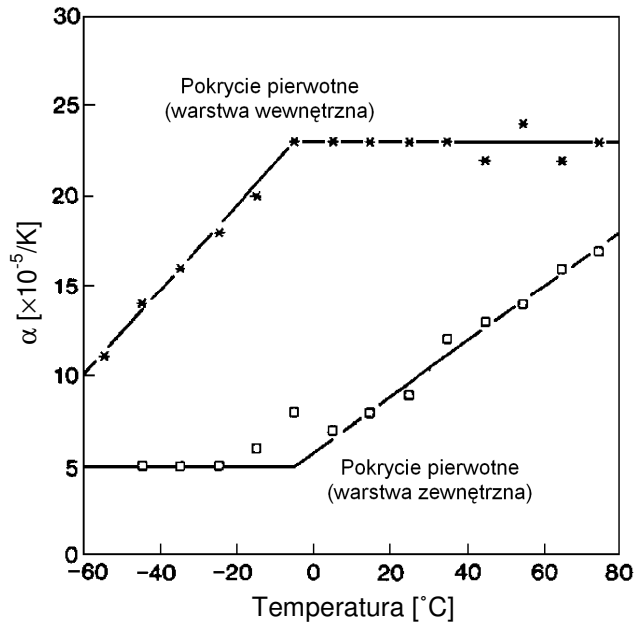
Rys. 83. Zmiany modułu sprężystości 5 tworzyw akrylo-uretanowych pokrycia pierwotnego z temperaturą [157].



Rys. 84. Moduł sprężystości tworzyw akrylo-uretanowych pokrycia pierwotnego (linie przerywane) i straty wprowadzane przez mikroźnięcia włókna w tym pokryciu (linia ciągła) w funkcji temperatury [158].

Zróznicowanie temperatur zeszklenia materiałów dwóch warstw pokrycia pierwotnego owocuje odmiennymi charakterystykami rozszerzalności termicznej (rys. 85). W przypadku kopolimerów akrylowych współczynnik rozszerzalności materiału warstwy wewnętrznej jest znacznie wyższy niż warstwy zewnętrznej, natomiast miękka guma silikonowa ma podobny lub niższy  $\alpha$  niż materiały akrylowe używane do wykonania warstwy twardej lub termoplasty do wytłaczania zewnętrznej części 2-warstwowego pokrycia ścisłego (tabela 18).





Rys. 85. Rozszerzalność termiczna kopolimerów akrylowych utwardzanych promieniowaniem UV w funkcji temperatury – optymalny system pokrycia włókna [158].

Formuła określająca ciśnienie promieniowe wywierane przez pokrycie 2-warstwowe na powierzchnię włókna szklanego, podana przez Shiue [169] jest dość skomplikowana nawet po uproszczeniu przez pominięcie ścisłości i rozszerzalności termicznej włókna szklanego. Używając przyjętych w tej pracy oznaczeń, można ją przedstawić jak niżej:

$$\sigma_r = E_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \frac{\frac{E_2}{E_3} \left[ \frac{1 + (1 - 2\nu_3) \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2}{1 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2} \right] - \frac{1 + \nu_2}{1 + \nu_3} + \frac{2\alpha_3}{\alpha_2} \left( \frac{1 - \nu_2}{1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2} \right)}{\frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{1 + \nu_3} + \frac{E_2}{E_3} \left( \frac{1 + (1 - 2\nu_2) \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2}{1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2} \right) \left( \frac{1 + (1 - 2\nu_3) \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2}{1 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2} \right)} \quad (142)$$

Figurujące powyżej wartości E dotyczą temperatury pracy T, natomiast  $\alpha$  to wartości efektywne obliczone zgodnie z formułą (129) dla przedziału temperatur od T do  $T_R$ .

Kiedy rozszerzalność termiczna warstwy wewnętrznej pokrycia pierwotnego jest znacznie niższa niż warstwy zewnętrznej (oraz ewentualnej ścisłej tuby nad nią), a jej grubość wystarczająco duża, przy spadku temperatury poniżej  $T_R$  wywiera ona ujemne ciśnienie na powierzchnię włókna szklanego, odwrotnie niż w przypadku włókna w pokryciu 1-warstwowym. Swobodna (mierzona w stanie bez naprężeń) objętość warstwy wewnętrznej maleje szybciej, niż swobodna objętość przestrzeni między włóknem szklanym a pokryciem twardym; powstający „deficyt” materiału zostaje wyrównany jego rozciąganiem. Modyfikując wzór (136) i zakładając współczynnik Poissona tworzywa wewnętrznej, miękkiej warstwy  $\nu_2 = 0,5$ , otrzymujemy, że ściskanie promieniowe włókna szklanego nie następuje, kiedy spełniona jest następująca zależność [169]:

$$\frac{E_2}{E_3} \left[ \frac{1 + (1 - 2\nu_3) \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2}{1 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2} \right] + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} \left( \frac{1}{1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2} \right) \leq \frac{1,5}{1 + \nu_3} \quad (143)$$

Pokrycia włókien telekomunikacyjnych są projektowane tak, by  $E_2/E_3 < 0,01$  (patrz tabele 17-18 i rys. 83), więc – o ile nie analizujemy pracy włókna w skrajnie niskich temperaturach, kiedy można oczekiwać wzrostu  $E_2$ , zależność (143) daje się dalej uprościć:

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_2} \leq 1,5 \frac{1 - \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2}{1 + \nu_3} \quad (144)$$

Wstawiając do wzoru (143) dane pokrycia włókna Corning SMF-28 [63]:  $d_1 = 125 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 190 \mu\text{m}$  i  $\nu_3 = 0,44$ , dostajemy:  $\alpha_3/\alpha_2 < 0,59$ . Dane przedstawione w tabeli 17 i na rys. 85 wskazują, że w przypadku pokryć z kopolimerów akrylowych warunek ten jest spełniony w dość szerokim zakresie temperatur. Natomiast warstwa wewnętrzna wykonana z bardziej stabilnego wymiarowo elastomeru silikonowego zawsze będzie wywierała dodatnie ciśnienie na włókno, gdyż wówczas  $\alpha_3/\alpha_2 \approx 1$ .

Opisane przez Suhira [162] doświadczenie sugeruje, że ciśnienie promieniowe (quasi-hydrostatyczne) wywierane na powierzchnię włókna światłowodowego podwyższa tłumienność i należy dążyć do jego eliminacji. Współczynnik proporcjonalności wyniósł około  $0,0029 \text{ dB/km}\cdot\text{MPa}$ ; typu włókna jednomodowego i długości fali nie podano. Wzrost tłumienności wynikał najprawdopodobniej z mikrozgieć wywołanych nierównomiernym przekazywaniem nacisku na włókno szklane przez niejednorodne pokrycie.

Z drugiej strony, nadmierne ujemne ciśnienie pokrycia jest szkodliwe dla pracy włókna światłowodowego w niskich temperaturach. Silne naprężenia rozciągające w warstwie wewnętrznej mogą spowodować jej pękanie lub odrywanie od włókna szklanego, co ogranicza dolną temperaturę pracy kabla. Oba uszkodzenia pokrycia wywołują mikrozgiecia i wzrost tłumienności włókna, natomiast PMD może zmniejszyć się wskutek dodatkowego sprzęgnięcia modów polaryzacyjnych.

Kurczące się pokrycie dwuwarstwowe zawsze działa na włókno szklane osiową siłą ściskającą, którą można obliczyć z zależności [169]:

$$P = \Delta T \frac{C_1(\alpha_{3\text{eff}} - \alpha_1) + C_2(\alpha_{2\text{eff}} - \alpha_1)}{C_1C_2 + C_2C_1 + C_1C_3} \quad (145)$$

$C_1 \dots C_3$  oznaczają podatności sprężyste elementów włókna wyznaczone ze wzoru:

$$C_n = \frac{4}{\pi(d_n^2 - d_{n-1}^2)E_n} \quad (146)$$

Po pominięciu rozszerzalności termicznej i ściśliwości szkła oraz założeniu, że  $E_3 \gg E_2$ , otrzymujemy zależność taką jak dla włókna z pokryciem 1-warstwowym, ale zawierającą dane zewnętrznej warstwy pokrycia:

$$P = E_3 \cdot \alpha_{3\text{eff}} \cdot \Delta T \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2) \quad (147)$$

Przyjmując opublikowane przez producenta [62,161] i badaczy niezależnych [63] następujące dane włókna Corning SMF-28:  $E_3 = 800 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_{3\text{eff}} = 9,5 \times 10^{-4}/\text{K}$ ,  $d_2 = 190 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 250 \mu\text{m}$  i zakładając maksymalną spodziewaną wartość  $\Delta T = 150 \text{ K}$  otrzymujemy

$P = 3,00$  N. Zgodnie ze wzorem (139), wymieniona siła spowoduje znaczące skrócenie włókna szklanego o 0,33%, o ile nie nastąpi wcześniej jego wyboczenie.

W powyższym rachunku niewiadomą jest  $\Delta T$  zależna od ukrywanych szczegółów technologicznych. Jeśli proces nakładania pokrycia jest optymalnie kontrolowany, jego  $T_R$  powinna leżeć pośrodku gwarantowanego zakresu temperatur pracy włókna:  $-60^\circ\text{C}$  do  $+80^\circ\text{C}$  [29], o szerokości 140 K. Wówczas:  $T_R = +10^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 75$  K,  $P = 1,50$  N i  $\varepsilon = 0,17\%$ . Już w publikacji NTT z 1985 r. [157] przedstawiono wyniki badań włókna o  $T_R \approx +50^\circ\text{C}$ .

Dla pracy włókna światłowodowego w kablu opisane skrócenie jest równocześnie korzystne, gdyż nastąpi redukcja wydłużenia pod działaniem sił rozciągających kabel, i szkodliwe – w niskiej temperaturze może nastąpić wyboczenie i silne mikrozdgięcia włókna, prowadzące do szybkiego wzrostu tłumienności i utraty własności użytkowych. Problem wyboczenia włókna został przeanalizowany w rozdziale 4.4.3.

Włókno światłowodowe w pokryciu pierwotnym stanowi półprodukt używany do produkcji kabli telekomunikacyjnych, informatycznych, energetycznych i wojskowych eksploatowanych w bardzo szerokim zakresie warunków klimatycznych spotykanych na całym świecie. Specyfikowane przez różnych użytkowników temperatury pracy ciągłej obejmują zakres od  $-60^\circ\text{C}$  do  $+85^\circ\text{C}$ , a krótkotrwałej do  $+250^\circ\text{C}$  łącznie. Zachowanie optymalnych warunków pracy włókna szklanego w każdej temperaturze jest niemożliwe. Jedyne ogólnie przyjęte wymaganie to brak wyboczenia i mikrozdgięć włókna oraz ograniczenie zmian tłumienności włókien jednomodowych do  $\pm 0,05$  dB/km [29,37].

Wykonany w firmie Sumitomo eksperyment z pomiarami PMD przed i po usunięciu pokrycia pierwotnego z odcinków włókien światłowodowych NZDSF (G.655) i PSCF (G.654) za pomocą gorącego kwasu siarkowego [172] wykazał, że pokrycie to praktycznie nie zmienia PMD włókna w temperaturze pokojowej.

#### 4.4.3. Wyboczenie włókna światłowodowego

Osiowa siła ściskająca wytwarzana przez pokrycie 2-warstwowe jest znaczna z powodu wysokiego modułu sprężystości polimeru tworzącego warstwę zewnętrzną, a równocześnie długie włókno szklane jest otoczone miękkim materiałem nie dającym sztywnego oparcia.

Po przekroczeniu przez siłę ściskającą określonej wartości granicznej  $P_w$  następuje utrata stateczności mechanicznej włókna szklanego, jego wyboczenie i rewersyjne ułożenie spiralne w granicach wyznaczonych (początkowo) przez grubość miękkiego pokrycia ochronnego. W wyniku wyboczenia następują:

- zginanie włókna światłowodowego i asymetryczne naciski ze strony odkształcanego pokrycia, co podwyższa PMD, a później również tłumienność,
- wprowadzenie nadmiaru długości włókna w pokryciu i zmniejszenie naprężeń osiowych,
- formowanie sprężyny z włókna szklanego, która ma niższy moduł sprężystości wzdłużnej niż proste włókno; rośnie współczynnik rozszerzalności termicznej włókna.

Opisy poniżej bazują na zależnościach, które sformułowali Vangheluwe i Suhir [164,165]. Graniczną siłę ściskającą określa formuła:

$$P_w = \frac{d_1^2}{4} \sqrt{\pi K E_1} \quad (148)$$

w której:  $P_w$  – minimalna siła ściskająca powodująca wyboczenie włókna,  $d_1$  – średnica włókna szklanego,  $E_1$  – moduł sprężystości szkła,  $K$  – stała sprężyny obliczona ze wzoru:

$$K = \frac{4\pi(1-\nu_2)(3-4\nu_2)}{(1+\nu_2) \left[ (3-4\nu_2)^2 \ln \frac{d_2}{d_1} - \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_2^2 + d_1^2} \right]} E_2 \quad (149)$$

gdzie:  $E_2$  i  $\nu_2$  – moduł sprężystości i współczynnik Poissona materiału wewnętrznej warstwy pokrycia otaczającej szkło,  $d_2$  – średnica zewnętrzna wewnętrznej warstwy pokrycia.

Spotyka się upraszczanie wzoru (149) polegające na wstawieniu  $\nu_2 = 0,5$ , gdyż współczynnik Poissona dla materiałów na pokrycia włókien telekomunikacyjnych zawiera się w granicach 0,47-0,50. To nadaje zależności (149) znacznie wygodniejszą postać:

$$K = - \frac{4\pi}{3 \left[ \ln \frac{d_2}{d_1} - \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_2^2 + d_1^2} \right]} E_2 \quad (150)$$

Niestety, odejmowane człony w mianowniku mają często zbliżone wartości i przedstawione uproszczenie prowadzi do poważnych błędów. Z obliczeń dla włókna Corning SMF-28 o następujących danych:  $d_1 = 125 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 190 \mu\text{m}$ ,  $E_1 = 73 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 1,4 \text{ MPa}$ ,  $\nu_2 = 0,485$  wykonanych na podstawie zależności (149) i (150) otrzymujemy odpowiednio  $P_W = 17,42 \text{ N}$  i  $P_W = 29,96 \text{ N}$ , czyli wzór (150) zawyża granicę wybożenia aż o 72%. Daje on prawidłowe wyniki jedynie dla włókien z pokryciem silikonowym.

Inne uproszczenie jest zawarte w samym wzorze (150), opisującym sytuację, kiedy pokrycie pierwotne jest otoczone idealnie sztywnym materiałem nie poddającym się odkształceniom ( $E_3 = \infty$ ). Skończona wartość  $E_3$  prowadzi do zmniejszenia stałej  $K$  i siły krytycznej. Skomplikowane zależności opisujące taki przypadek podali Suhir [164] dla pokrycia 2-warstwowego i Shiue [173] dla pokrycia 3-warstwowego. Wynika z nich, że przy typowych dla włókien telekomunikacyjnych wymiarach pokrycia i proporcji  $E_3/E_2 > 100$ , przeszacowanie  $P_W$  przy posługiwaniu się zależnością (149) nie przekracza kilku procent. Błąd obliczeń szybko wzrasta, jeśli  $E_2$  rośnie powyżej 10%  $E_3$ ; taka sytuacja często ma miejsce w minimalnej temperaturze pracy włókna (rys. 82-83).

Porównanie wartości siły krytycznej obliczonej wyżej (17,42 N) z oszacowaniem siły ściskającej przedstawionym w rozdziale 4.4.2 (1,5-3,0 N) wskazuje, że włókno w pokryciu pierwotnym ma duży zapas stabilności mechanicznej.

## 4.5. Oddziaływanie pokrycia ścisłego na włókno światłowodowe

Ścisła tuba ze sztywnego materiału o dużym przekroju ma znacznie silniejszy wpływ na zachowanie włókna światłowodowego niż pokrycie pierwotne. W szczególności pokrycie ściśle nakładane metodą wytłaczania ma wysoką temperaturę równowagi, dochodzącą do  $+200^\circ\text{C}$  (patrz rozdział 4.2.1) i zawsze powstają w nim silne naprężenia wewnętrzne. Powszechnie używane polimery termoplastyczne mają ponadto skłonność do krystalizacji i relaksacji w podwyższonej temperaturze, co komplikuje zachowanie włókna w stanach termicznie nieustalonych i zdecydowanie pogarsza stabilność jego parametrów.

### 4.5.1. Siły działające na włókno w ścisłej tubie

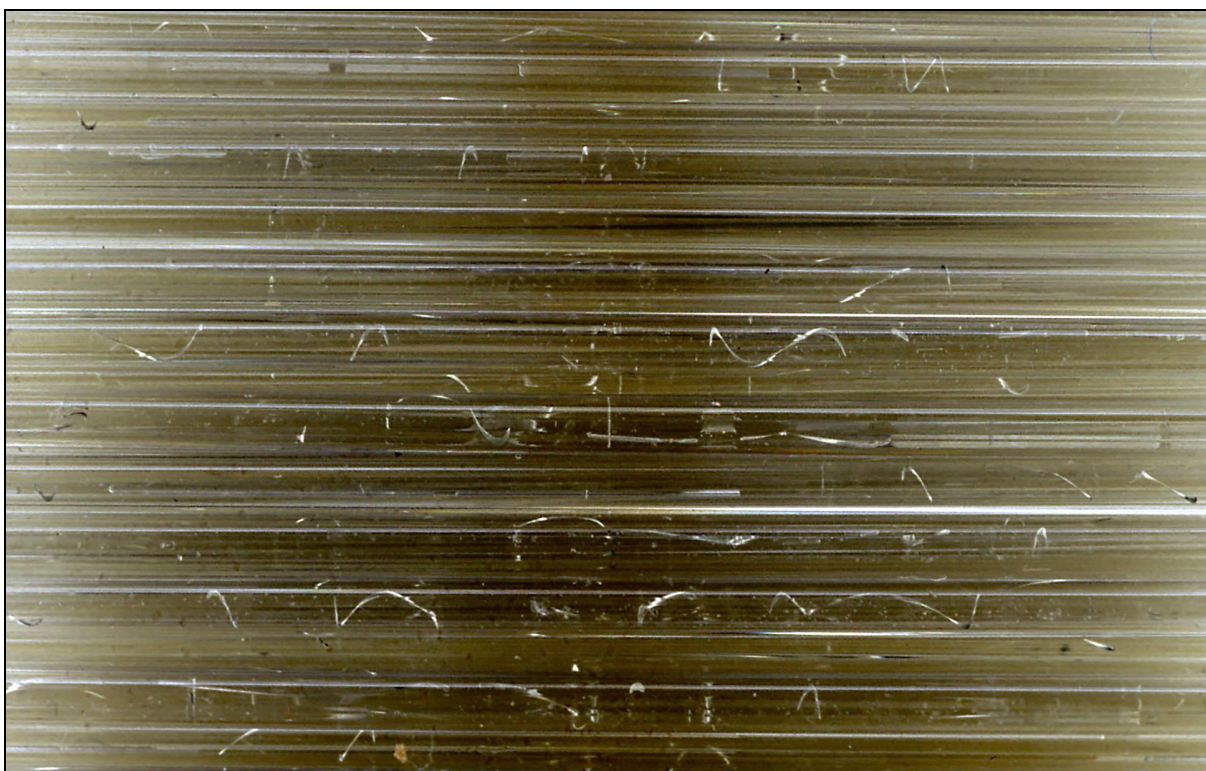
Ochrona włókna szklanego przed ciśnieniem hydrostatycznym nie ma istotnego znaczenia w przypadku zastosowania włókien w ścisłej tubie w kablach stacyjnych i polowych, gdzie włókno jest otoczone luźną włókniną, a nie żelem. Duże znaczenie ma natomiast ochrona przed działaniem zewnętrznych, poprzecznie do osi włókna skierowanych sił ściskających, ponieważ cienka powłoka kabla stacyjnego i włóknina aramidowa (rys. 24-25) nie dają tak skutecznej ochrony przed nimi jak sztywna powłoka i luźna tuba kabla liniowego. Dodatkowa warstwa twardego tworzywa działa jak pogrubienie twardego pokrycia pierwotnego – patrz wzór (136) i poprawia skuteczność redukcji nacisków promieniowych.

Rozszerzalność termiczna materiałów tuby ścisłej jest podobna jak zewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego (tabele 17-18), więc i w tym przypadku można wyeliminować

promieniowe ciśnienie działające na włókno szklane w temperaturze niższej od temperatury równowagi. Odpowiednie zależności są dużo bardziej skomplikowane niż dla pokrycia 2-warstwowego i nie będą tu zamieszczone. Przedstawił je Shiue w pracy [174].

Z faktu, że wewnętrzne ciśnienie quasi-hydrostatyczne jest ujemne dla PMD włókna światłowodowego nic nie wynika, gdyż wywołana eliptycznością lub niejednorodnością pokrycia asymetria rozkładu ciśnienia ujemnego i dodatniego prowadzi do powstawania identycznej dwójłomności. Potrzebne jest sprowadzenie do minimum bezwzględnej wartości średniego ciśnienia, gdyż wówczas jego „modulacja” przez asymetrię geometryczną pokrycia skutkuje minimalną różnicą naprężeń i mechaniczną składową PMD, zgodnie ze wzorem (39) oraz podwyższenie współczynnika Poissona materiału wewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego ( $\nu_2$ ), by po deformacji następowało jego pęcznienie na boki i wyrównanie rozkładu nacisków na całym obwodzie włókna szklanego. Wymaganie to lepiej spełniają elastomery silikonowe niż akrylowe.

Naprężenia rozciągające wewnątrz wewnętrznej warstwy pokrycia grożą jej rozerwaniem w niskiej temperaturze. Obecność ścisłej tuby pogarsza tu sytuację w porównaniu do 2-warstwowego pokrycia pierwotnego, ponieważ uniemożliwia ona odkształcenie leżącej pod nią warstwy zewnętrznej pokrycia pierwotnego nawet, kiedy warstwa wewnętrzna sztywnieje w niskiej temperaturze i wytwarza znaczne siły dążące do skurczenia warstwy zewnętrznej. Taka sytuacja (rys. 86) nastąpiła po ochłodzeniu do  $-40^\circ\text{C}$  włókna w ścisłej tubie wykonanej z sieciowanego tworzywa akrylowego, które miało dozwoloną temperaturę składowania  $-30^\circ\text{C}$ .



Rys. 86. Pęknięcia pokrycia włókna światłowodowego umieszczonego w przezroczystej ścisłej tubie po ekspozycji na temperaturę  $-40^\circ\text{C}$ .

Dominującym źródłem osiowej siły ściskającej przekazywanej na włókno szklane jest pokrycie ściste. Materiał zewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego posiada moduł sprężystości i współczynnik rozszerzalności termicznej tylko nieco niższe niż tworzywo ścisłej tuby, lecz jej przekrój poprzeczny (tabela 17) jest około 30-krotnie mniejszy i błąd wynikający z pominięcia pokrycia pierwotnego nie przekracza 3%. Można tu pominąć

rozszerzalność termiczną włókna szklanego. Należy natomiast uwzględnić jego ściśliwość, zbliżoną do ściśliwości pokrycia, co prowadzi do zależności podanej niżej:

$$P = \frac{A_1 E_1 \cdot A_4 E_4}{A_1 E_1 + A_4 E_4} \alpha_{4eff} \cdot \Delta T \quad (151)$$

gdzie  $A_1$ ,  $A_4$  to przekroje odpowiednio włókna szklanego i ścisłej tuby obliczone ze wzoru (130) i zestawione w tabeli 18, a  $\alpha_{4eff}$  to wartość zastępcza współczynnika rozszerzalności termicznej dla zakresu temperatur  $T_R$ - $T$  obliczona według formuły (129). Alternatywna postać tej zależności uwzględniająca katalogowe wymiary włókna jest następująca:

$$P = \frac{\pi d_1^2 E_1 \cdot (d_4^2 - d_3^2) E_4}{4[d_1^2 E_1 + (d_4^2 - d_3^2) E_4]} \alpha_{4eff} \cdot (T_R - T) \quad (152)$$

Osiowe odkształcenie włókna określone wzorem:

$$\varepsilon_1 = \frac{(d_4^2 - d_3^2) E_4}{d_1^2 E_1 + (d_4^2 - d_3^2) E_4} \alpha_{4eff} \cdot (T - T_R) \quad (153)$$

jest w temperaturach niższych od temperatury zeszklenia materiału ścisłej tuby prawie liniową funkcją temperatury, co widać na rys. 87 i 88.

Względnie skrócenie ścisłej tuby z włóknem wewnątrz ( $\varepsilon_S$ ) i jej współczynnik rozszerzalności termicznej ( $\alpha_S$ ) można obliczyć ze wzorów:

$$\varepsilon_S = \frac{A_4 E_4}{A_1 E_1 + A_4 E_4} \alpha_{4eff} \cdot \Delta T \quad (154)$$

$$\varepsilon_S = \frac{(d_4^2 - d_3^2) E_4}{d_1^2 E_1 + (d_4^2 - d_3^2) E_4} \alpha_{4eff} \cdot (T_R - T) \quad (155)$$

oraz:

$$CTE_S = \frac{A_4 E_4}{A_1 E_1 + A_4 E_4} \alpha_4 \quad (156)$$

$$CTE_S = \frac{(d_4^2 - d_3^2) E_4}{d_1^2 E_1 + (d_4^2 - d_3^2) E_4} \alpha_4 \quad (157)$$

W obliczeniach dotyczących stanów przejściowych i pracy w temperaturze znacznie niższej od  $T_g$  materiału ścisłej tuby jako  $E_4$  należy przyjmować moduł sprężystości, natomiast do opisu zachowania w stanie ustalonym w temperaturach zbliżonych do  $T_g$  - moduł pełzania tworzywa. Bliższy opis znajduje się w rozdziale 4.7. Trzeba tu uwzględnić zależność parametrów polimeru od temperatury (rys. 14-15).

Zakładając:  $E_4 = 2500$  MPa,  $\alpha_{4eff} = 1,2 \times 10^{-4}/K$ ,  $d_3 = 250$   $\mu$ m,  $d_4 = 900$   $\mu$ m i najwyższą oczekiwaną  $\Delta T = 180$  K ( $T_R = +160^\circ C$ ,  $T = -20^\circ C$ ) otrzymujemy  $P = 31,7$  N. Ścisła tuba kurcząca się w niskiej temperaturze wytwarza poważną siłę osiową, która przekracza krytyczną wartość  $P_w = 17,4$  N obliczoną z zależności (148) i (149) dla włókna z pokryciem Corning CPC pracującego w temperaturze  $+20^\circ C$ . Nastąpi to w temperaturze:

$$T_w = T_R - \frac{(A_1 E_1 + A_4 E_4) P_w}{A_1 E_1 A_4 E_4 \alpha_{4eff}} \quad (158)$$

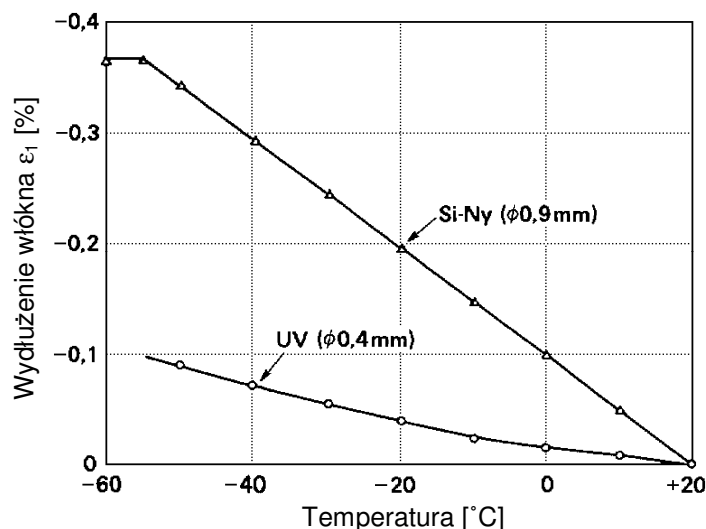
Obliczenia według zależności (158) są kłopotliwe:  $E_4$  i  $\alpha_{4\text{eff}}$  zależą od oczekiwanej temperatury  $T_W$ , to samo dotyczy  $E_1$  i zależnej od niej  $P_W$ . Trzeba posługiwać się metodą kolejnych przybliżeń, wychodząc od arbitralnie przyjętej wartości  $T_W$ .

Przyjmując następujące dane:  $d_1 = 125 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 250 \mu\text{m}$ ,  $d_4 = 900 \mu\text{m}$ ,  $E_1 = 73 \text{ GPa}$ ,  $T_R = +180^\circ\text{C}$  i charakterystyki PBT z rys. 13, otrzymujemy, że wyboczenie przy szybkim spadku temperatury nastąpi w  $T_W \approx +23^\circ\text{C}$  ( $E_4 = 2500 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_{4\text{eff}} = 2,0 \times 10^{-4}/\text{K}$ ). Obliczenia dla stanu mechanicznie ustalonego i niższej wartości modułu pełzania dają w wyniku  $T_W \approx -5^\circ\text{C}$  ( $E_4 = 1700 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_{4\text{eff}} = 2,0 \times 10^{-4}/\text{K}$ ). Z powodu przybliżonych danych polimeru, zależności jego zachowania od metody przetwórstwa i historii termicznej (rozdział 4.7) oraz nieznamości dokładnej  $T_R$  są to wyniki jedynie orientacyjne.

Charakterystyki  $E(T)$  termoplastów do produkcji ścisłych tub bywają podawane przez niektórych producentów [77,79], natomiast analogiczne dane wewnętrznej warstwy pokrycia są rzadko publikowane i dotyczą raczej materiałów eksperymentalnych [69].

Większość opisów w literaturze podaje, że po przekroczeniu przez siłę osiową wartości krytycznej następuje nagłe wyboczenie prostego dotąd włókna szklanego i jego zginanie. Wyboczenie powoduje zmniejszenie siły osiowej przenoszonej przez włókno i naprężenia ściskającego w szkle. Wyniki odpowiednich badań włókien w pokryciach: akrylowym o średnicy 0,4 mm i silikonowo-poliamidowym o średnicy 0,5/0,9 mm pokazano na rys. 86. Widać wyraźnie różnicę pomiędzy siłami wywieranymi przez pokrycie pierwotne i ścisłą tubę, mimo że różnice ich przekrojów są mniejsze niż w wyrobach normalnie spotykanych w kraju.

Wartości wydłużenia pokazane na rys. 87 są odniesione do arbitralnie ustalonej temperatury  $+20^\circ\text{C}$ , a nie temperatury równowagi  $T_R$ . Ta ostatnia jest dla ścisłej tuby znacznie wyższa, czego dowodzi liniowy przebieg charakterystyki  $\varepsilon(T)$ . Przebieg tej samej charakterystyki włókna w pokryciu pierwotnym utwardzanym promieniowaniem ultrafioletowym sugeruje, że jego  $T_R$  jest znacznie niższa, prawdopodobnie bliska  $+50^\circ\text{C}$ .



Rys. 87. Zmiany długości włókien światłowodowych  $\varnothing 0,125 \text{ mm}$  w pokryciach 2-warstwowych: akrylowych (UV) i silikonowo-poliamidowych (Si-Ny) z temperaturą [157].

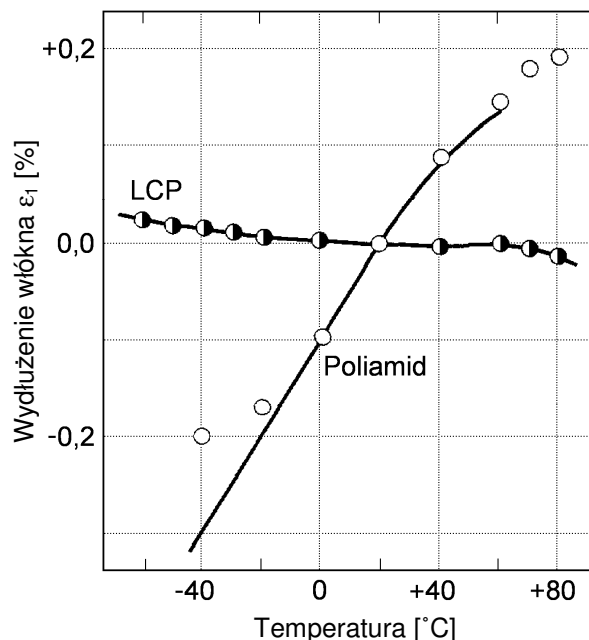
Naprężenie ściskające włókno pozostałe po wytłoczeniu ścisłej tuby można zredukować przez szybkie chłodzenie, zapobiegające krystalizacji polimeru (rys. 93) i rozciągając włókno podczas tego procesu, co odpowiednio przesuwając charakterystykę  $\varepsilon_1(T)$ . Pomiar opisany w literaturze z lat 80-tych wykazały średnie odkształcenie osiowe w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ :

- ✓ włókna w 1-warstwowej ścisłej tubie poliamidowej  $\varnothing 0,85 \text{ mm}$ :  $-0,215\%$  [175],
- ✓ włókna w pokryciu ścisłym silikonowo-nylonowym  $\varnothing 0,40/0,90 \text{ mm}$ :  $-0,053\%$  [176],
- ✓ włókna w pokryciu ścisłym silikonowo-nylonowym  $\varnothing 0,44/0,91 \text{ mm}$ :  $-0,090\%$  [177].

Pewne naprężenia skracające są korzystne dla żywotności włókna, ograniczając jego wydłużenie związane z rozciąganiem kabla podczas instalacji i eksploatacji [175,83].

Problemy związane z wzdłużnymi odkształceniami włókna w pokryciu ścisłym można usunąć stosując pokrycie z termotropowego poliestru ciekłokrystalicznego (ang. *Liquid Crystal Polymer* - LCP). Stopiony LCP zachowuje silne oddziaływania międzycząsteczkowe, tworząc ciekły kryształ [78]. Po wytłoczeniu i rozciągnięciu pokrycia ma ono uporządkowaną budowę i anizotropowe własności. W ściśle kontrolowanych warunkach uzyskuje się minimalny skurcz po wytłaczaniu - około 0,05%, bardzo wysoki moduł sprężystości i niewielki ujemny współczynnik rozszerzalności termicznej pokrycia; wartości podawane w publikacji NTT [178] to odpowiednio  $E = 6-30 \text{ GPa}$  i  $CTE = 0...-6,0 \times 10^{-6}/K$ .

Włókno światłowodowe w ścisłej tubie z LCP zachowuje w zakresie temperatur od  $-60^\circ\text{C}$  do  $+80^\circ\text{C}$  stabilne parametry i  $\alpha_s \approx -5,0 \times 10^{-6}/K$  [178](rys. 88). Włókna w pokryciu LCP są używane do celów specjalnych, na przykład budowy łączy synchronizacyjnych, gdzie ich wielką zaletą jest minimalna zależność opóźnienia transmisyjnego od temperatury. Powszechne użycie jest niemożliwe z powodu bardzo wysokich kosztów produkcji.

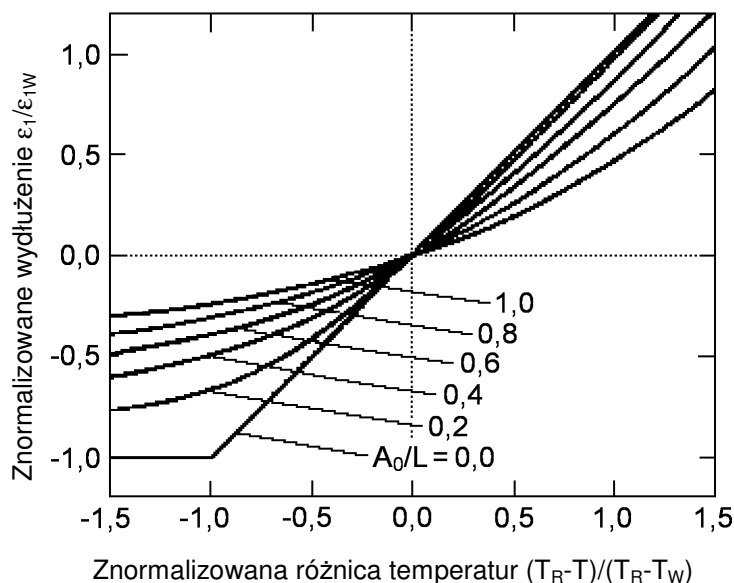


Rys. 88. Zmiany długości włókien światłowodowych  $\varnothing 0,125 \text{ mm}$  w pokryciach ścisłych z poliamidu PA 12 i poliestru LCP z temperaturą [178].

Rzeczywiste włókno w ścisłej tubie posiada zawsze różne odkształcenia, na przykład związane z niecentrycznością pokrycia (rozdział 4.5.3), które przy wzroście osiowej siły ściskającej stopniowo powiększają swą amplitudę [177]. Zginanie włókna zachodzi wtedy już przy mniejszym skurczu ścisłego pokrycia i nie ma wyraźnie określonej temperatury progowej  $T_w$ , co widać na rys. 89. Tolerancje produkcyjne parametrów włókna powodują ponadto, że wyboczenie poszczególnych części dłuższego odcinka rozpoczyna się w różnych temperaturach. Wydłużenie ścisłej tuby związane z działaniem na kabel siły rozciągającej obniża  $T_w$ .

Siła krytyczna  $P_w$  zależy od pierwiastka kwadratowego z modułu sprężystości tworzywa pokrycia miękkiego  $E_1$ , który po obniżeniu temperatury w pobliżu  $T_g$  szybko zwiększa się (rys. 83,92). Siła krytyczna  $P_w$  rośnie wówczas z obniżeniem temperatury szybciej niż osiowa siła ściskająca  $P$ . Wyboczenie zachodzi najłatwiej w temperaturze wyższej o 20-40 K od  $T_g$ , w której  $E_1$  jest jeszcze niski, a włókno łatwe do deformacji.





Rys. 89. Charakterystyki wydłużenie – zmiana temperatury dla włókien o różnych amplitudach deformacji początkowych. Zmiany temperatury i długości są odniesione do wartości odpowiadających progowi wybożenia włókna [177].

$A_0$ ,  $L$  – amplituda i okres początkowych zgięć włókna szklanego.

#### 4.5.2. Zmiany PMD po wybożeniu włókna w ścisłej tubie

Po wybożeniu włókno szklane formuje spiralę rewersyjną o średnicy porównywalnej ze średnicą ścisłej tuby. Taka deformacja pokazana na rys. 77 jest często obserwowana w temperaturze poniżej  $-20^{\circ}\text{C}$  w luźno ułożonych włóknach. Umieszczenie włókna w kablu stacynym o budowie podobnej do pokazanej na rys. 24 i 25 lub nawinięcie włókna na szpulę częściowo ogranicza podobne odkształcenia, jednak luźna włóknina aramidowa nie blokuje całkowicie jego ruchu. Luźno ułożony kabel 1-włóknowy może ulec deformacji w całości.

Sprężyna z włókna szklanego ma niższy zastępczy moduł sprężystości wzdłużnej niż proste włókno, ulega więc silniejszemu skróceniu pod działaniem siły osiowej. Towarzyszy temu wzrost współczynnika temperaturowego długości ścisłej tuby  $\alpha_s$ , gdyż w zależności (157) zamiast  $E_1$  należy umieścić moduł zastępczy  $E_s$  określony z parametrów sprężyny.

Stałą sprężyny ściskanej utworzonej przez jeden zwój włókna wyraża zależność [179]:

$$k_s = \frac{E_1 d_1^4}{16(1 + \nu_1) d_{TS}^3} \quad (159)$$

w której:  $E_1$  - moduł sprężystości szkła,  $d_1$  – średnica włókna,  $d_{TS}$  – średnica zwoju mierzona po osi włókna,  $\nu$  - współczynnik Poissona szkła.

Efektywny moduł sprężystości włókna ułożonego w sprężynie wynosi:

$$E_s = \frac{4k_s p}{\pi d_1^2} \quad (160)$$

gdzie  $p$  to skok skrętu. Po podstawieniu zależności (159) do (160) otrzymujemy:

$$E_s = \frac{d_1^2 p}{4\pi(1 + \nu) d_{TS}^3} E_1 \quad (161)$$

Obserwowane w doświadczeniach (rys. 87) załamanie wzrostu naprężeń osiowych we włóknie wymaga, aby  $E_s < E_1$ . Ze wzoru (161) wynika warunek:

$$d_{TS} \geq \sqrt[3]{\frac{d_1^2 p}{4\pi(1+\nu)}} \quad (162)$$

Dla  $d_1 = 0,125$  mm i  $p = 10$  mm otrzymujemy  $d_{TS} \geq 0,22$  mm; 10-krotna redukcja modułu sprężystości pociętego włókna następuje przy  $d_{TS} = 0,47$  mm.

Zmniejszanie temperatury poniżej  $T_w$  powoduje coraz silniejsze zginanie włókna i szybkie zmniejszanie  $E_s$ , współczynnik temperaturowy ścisłej tuby  $\alpha_s$  szybko osiąga wartość prawie identyczną jak  $\alpha$  tworzywa ścisłej tuby.

Spiralnie ułożone włókno światłowodowe jest dociśnięte swą zewnętrzną powierzchnią do twardej warstwy pokrycia, z siłą rosnącą wraz z obniżeniem temperatury. Taki nacisk generuje wymuszoną dwójłomność optyczną szkła i prowadzi do wzrostu PMD. W dalszych rozważaniach przyjmujemy, że:

- ✓ Średnica deformacji włókna  $d_{TS} = 0,3$  mm jest stała i ograniczona przez wymiary ścisłej tuby lub konstrukcję ośrodka kabla.
- ✓ Włókno ma pomijalne odkształcenia początkowe, wyboczenie następuje skokowo, a formowanie i skracanie skoku spirali służy wyłącznie do kompensacji dalszego skracania ścisłej tuby poniżej temperatury wyboczenia  $T_w$  określonej wzorem (158)[177].
- ✓ Współczynnik temperaturowy wydłużenia ścisłej tuby w temperaturze niższej od  $T_w$  jest taki sam, jak tworzywa pokrycia ścisłego:  $\alpha_s = \alpha_4$ .

Układanie się włókna szklanego w spiralę wprowadza nadmiar długości:

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{d_{TS}}{p} \right)^2 \quad (163)$$

a równocześnie spełniona jest zależność:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_4 \cdot (T_w - T) \quad (164)$$

w której:  $p$  – skok spirali,  $T_w$  – temperatura wyboczenia,  $T$  – temperatura pracy włókna.

Skok spirali zmniejsza się przy obniżaniu temperatury włókna:

$$p \approx \frac{\pi d_{TS}}{\sqrt{2\alpha_4 \cdot (T_w - T)}} \quad (165)$$

Zdeformowane włókno jest zginane na promieniu  $r_g$  określonym przez zależność:

$$r_g = \frac{p^2}{2\pi^2 d_{TS}} + \frac{d_{TS}}{2} \quad (166)$$

którą można przekształcić do postaci:

$$r_g = \frac{d_{TS}}{4\alpha_4 \cdot (T_w - T)} + \frac{d_{TS}}{2} \quad (167)$$

Zginanie wprowadza naprężenia we włóknie, dwójłomność i PMD określoną wzorem Ulricha (rozdział 3.1.3.3):

$$k_{PMD} = \frac{k}{r_g^2} \quad (47)$$

gdzie:  $k_{PMD}$  – współczynnik indukowanej zginaniem dyspersji polaryzacyjnej [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ],  $k$  - współczynnik zależny od budowy i warunków pracy włókna światłowodowego. Włókno

G.652 ma  $k \approx 200-800 \text{ ps}\cdot\text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$  (rozdział 3.1.3.3). Powstaje dodatkowa składowa PMD rosnąca w przybliżeniu proporcjonalnie do kwadratu różnicy temperatur  $T_w - T$ .

Pomijając drugi, znacznie mniejszy składnik we wzorze (167) i wstawiając pierwszy składnik do wzoru (47), uzyskujemy przybliżoną zależność określającą PMD indukowaną przez zmiany temperatury i towarzyszące im zginanie włókna w ścisłym pokryciu:

$$k_{PMDT} \approx \frac{16k \cdot \alpha_4^2 \cdot (T_w - T)^2}{d_{TS}^2} \quad (168)$$

Współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha_4$  takich tworzyw jak PBT i PA 12 jest w istotnym tu zakresie temperatur od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+40^\circ\text{C}$  prawie stały. Zależność (168) można uprościć do postaci zawierającej jeden współczynnik proporcjonalności:

$$k_{PMDT} \approx C(T_w - T)^2 \quad (169)$$

Całkowitą PMD włókna światłowodowego określa wzór:

$$k_{PMD} = \sqrt{k_{PMDG}^2 + k_{PMDT}^2} \quad (170)$$

w którym  $k_{PMDG}$  to naturalna („geometryczna”) PMD włókna nie poddanego żadnym naciskom i deformacjom związanym z oddziaływaniem pokrycia ścisłego.

Dla następujących parametrów:  $k = 500 \text{ ps}\cdot\text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$ ,  $T_w - T = 30 \text{ K}$ ,  $d_{TS} = 0,3 \text{ mm}$ ,  $\alpha_4 = 1,0 \times 10^{-4}/\text{K}$  otrzymujemy:  $p = 12,2 \text{ mm}$ ,  $r_g = 25 \text{ mm}$  oraz  $k_{PMDT} = 0,80 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ . W przypadku dobrej jakości włókna G.652 o wartości początkowej  $k_{PMDG} = 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  nastąpi ponad 4-krotny wzrost PMD. Jednocześnie wynikający ze zginania przyrost tłumienności wyniesie około  $0,01 \text{ dB/km}$  (rys. 5), czyli będzie praktycznie niewykrywalny.

Badania laboratoryjne [177] ujawniły, że deformacje włókien w pokryciu ścisłym silikonowo-poliamidowym  $\varnothing 0,44/0,91 \text{ mm}$  skróconych o  $= 0,09\%$  miały okres około  $8 \text{ mm}$  i amplitudę w granicach  $0,03-0,06 \text{ mm}$ .

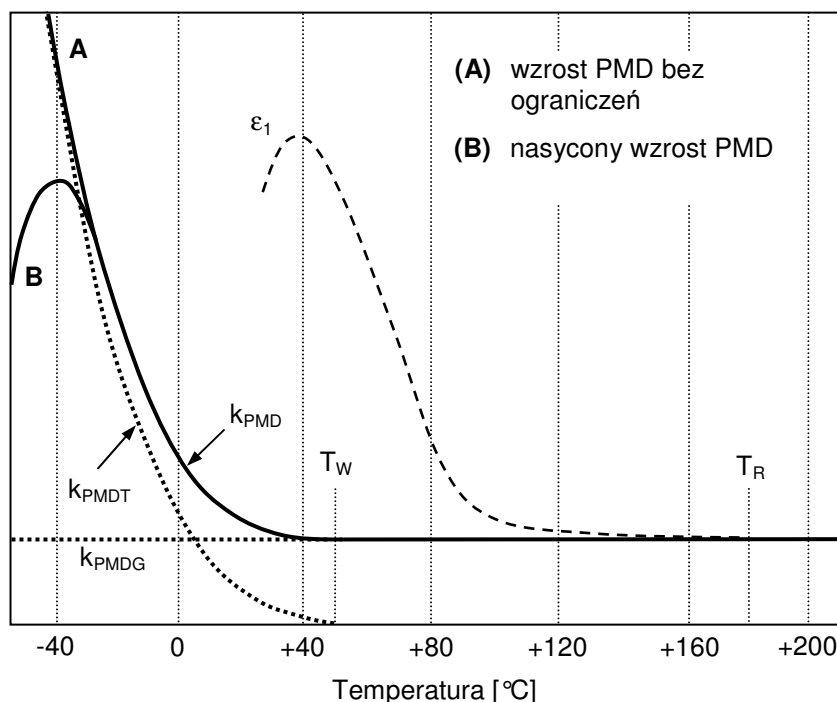
Zależność (163) ujawnia, dlaczego producenci kabli z włóknami w pokryciach ścisłych dla instalacji zewnętrznych i dla celów militarnych wprowadzili pokrycia 2-warstwowe (rys. 22b) mające między włóknem szklanym, a ścisłą tubą tylko miękką ( $E_2 \approx 1-3 \text{ MPa}$ ) bufor z elastomeru silikonowego lub akrylowego  $\varnothing 0,4-0,5 \text{ mm}$ . Taka budowa pokrycia pozwala na układanie się włókna w spiralę o większej średnicy, co ogranicza niepożądane zginanie włókna i wzrost PMD w niskich temperaturach.

We włóknie jednomodowym bez specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych przeciwdziałających akumulacji dwójmności optycznej będzie zachodził wzrost PMD, najczęściej proporcjonalny do kwadratu różnicy temperatur. Taka sytuacja ma miejsce w kablu z prosto ułożonym włóknem G.652 wolnym od naprężeń skręcających.

W części eksperymentów wykonanych w IŁ obserwowano nasycenie, a nawet pewne cofnięcie wzrostu PMD w bardzo niskich temperaturach. Przyczyną może być sztywnienie materiału wewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego w temperaturze niższej od temperatury zeszklenia, co blokuje poważniejsze przemieszczenia włókna i dalsze skracanie skoku tworzonej przez włókno spirali. Skracanie ścisłej tuby prowadzi wówczas do zwiększania średnicy spirali, nawet przez odkształcenie całej ścisłej tuby i zwiększenie  $d_{TS}$ , prowadzące do redukcji indukowanej PMD, oraz do wzrostu naprężeń osiowych, które nie zmieniają PMD. Ponieważ zjawisko to zależy od własności innego niż ścisła tuba elementu, jego temperatura graniczna nie ma związku z  $T_w$  i zmienia się w szerokich granicach.

Odpowiednie zależności PMD włókna w ścisłej tubie od temperatury prezentuje rys. 90. Charakterystyki uzyskane w czasie badań wszystkich próbek włókien G.652 w pokryciach ścisłych, przedstawione w rozdziale 6, były bardzo zbliżone, jeżeli sposób przygotowania próbki zminimalizował siły ściskające pomiędzy sąsiednimi zwojami włókna. Poszczególne

badane wyroby różnią się wartościami temperatury progowej, nachyleniem rosnącego odcinka charakterystyki i położeniem punktu nasycenia.



Rys. 90. Zmiany PMD włókna w ścisłej tubie w funkcji temperatury.  
 $T_R$  – temperatura równowagi,  $T_W$  – temperatura wybożenia.

Kurczenie się materiału ścisłej tuby z innych przyczyn, z których można wymienić:

- ✓ Krystalizację polimeru (rozdział 4.7),
- ✓ Ubytek plastyfikatorów lub innych składników tworzywa – szczególnie z PVC,

ma podobne skutki jak obniżenie temperatury i przesuwania charakterystyki pokazane na rys. 90 w kierunku wyższych temperatur.

#### 4.5.3. Inne przyczyny wzrostu PMD w niskich temperaturach

Prócz zginania spowodowanego wybożeniem włókna, istnieją kolejne mechanizmy indukowania PMD we włóknie światłowodowym pracującym w obniżonej temperaturze:

- 1) Dociskanie spiralnie ułożonego włókna szklanego zewnętrzną powierzchnią do twardej warstwy pokrycia, z siłą rosnącą wraz z obniżeniem temperatury.
- 2) Niecentryczność ścisłej tuby i innych warstw pokrycia, prowadząca do zginania włókna (rys. 90), gdyż rozkład sił osiowych od kurczącego się pokrycia jest asymetryczny.
- 3) Anizotropowy rozkład ciśnienia wywieranego na włókno przez eliptyczne pokrycie pierwotne, które to ciśnienie rośnie proporcjonalnie do modułu sprężystości wewnętrznej warstwy pokrycia pierwotnego. Ten ostatni z kolei wzrasta w  $T \leq T_g$ . (rys. 83,85).

Mechanizmy (2) i (3) działają również we włóknie umieszczonym wyłącznie w pokryciu pierwotnym, co skutkuje mierzalnym wzrostem jego PMD w niskich temperaturach.

##### Mechanizm (1)

Po wybożeniu na włókno naciska jednostronnie na twardą warstwę pokrycia i powstaje w nim naprężenie poprzeczne ( $\sigma_x$ ) skierowane zgodnie z promieniem spirali. Równocześnie naciski wywierane przez pokrycie w kierunku obwodu spirali i wynikające z nich naprężenie

w szkłe ( $\sigma_y$ ) są znacznie mniejsze. Powstaje wymuszona mechanicznie dwójłomność optyczna szkła i związana z nią PMD określona wzorem:

$$k_{PMDM} = \frac{R}{c} \sqrt{\frac{h}{1000}} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (44)$$

Według obliczeń i pomiarów przedstawionych w pracy [131], PMD indukowana w telekomunikacyjnym włóknie światłowodowym umieszczonym w pokryciu pierwotnym  $\varnothing 0,25$  mm przez poprzeczną siłę ściskającą jest proporcjonalna do siły przypadającej na jednostkę długości włókna, a zmierzony współczynnik proporcjonalności DGD indukowanej przy ściskaniu włókna G.655 wynosi około 0,08 (ps/km)/(N/m). Przyjmując, że nacisk rozkłada się równomiernie na powierzchnię boczną włókna o szerokości 0,125 mm, otrzymujemy, że ciśnienie 1 MPa generuje DGD równą 10 ps/km. Obliczenie według wzoru (43) daje 10,5 ps/km: różnica nie przekracza błędu pomiaru. To dowodzi, że pokrycie 2-warstwowe praktycznie nie redukuje anizotropowego ciśnienia zewnętrznego, w przeciwieństwie do ciśnienia izotropowego, co omówiono w rozdziale 4.4.2.

Zależność naprężenia różnicowego  $\sigma_x - \sigma_y$  od temperatury jest trudna do ścisłej analizy. Można oczekiwać, że jest ono zerowe powyżej temperatury wybożenia  $T_w$ , pojawia się po przekroczeniu  $T_w$  i dalej rośnie proporcjonalnie do krzywizny włókna ( $1/r_g$ ), która z kolei jest prawie proporcjonalna do różnicy temperatur  $T_w - T$ , zgodnie ze wzorem (167). Uproszczona zależność opisująca indukowaną przez docisk włókna składową PMD to:

$$k_{PMDD} \approx D(T_w - T) \quad (171)$$

## Mechanizm (2)

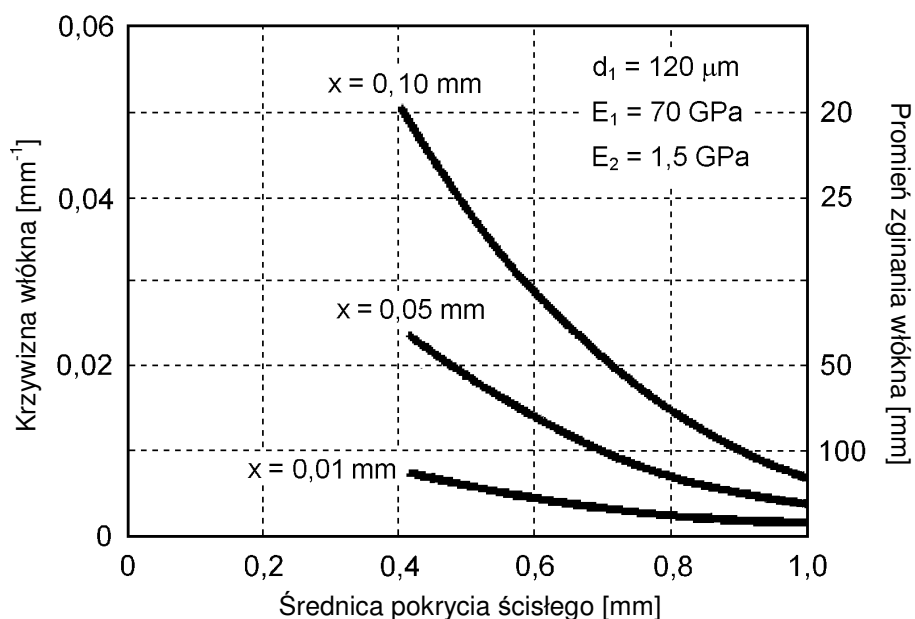
Niecentryczne nałożenie pokrycia na włókno szklane pokrycie powoduje, że działająca na włókno wzdłużna siła ściskająca  $P$  wytwarzana przez kurczące się pokrycie (rozdział 4.4.3) jest asymetrycznie rozłożona: siła działająca na jedną stronę włókna jest większa niż na drugą, proporcjonalnie do części przekroju pokrycia twardego znajdujących się po obu stronach osi włókna. Zjawisko to przejawia się tym silniej, im większa jest średnica pokrycia i wytwarzana przez nie siła  $P$ . W przypadku włókna w ścisłej tubie, różnica sił jest w przybliżeniu określona przez zależność:

$$\Delta P \approx \frac{4}{\pi} \frac{x}{d_4} P \quad (172)$$

w której:  $x$  – niecentryczność ułożenia włókna względem osi pokrycia ścisłego,  $d_4$  – średnica zewnętrzna pokrycia ścisłego,  $P$  – siła osiowa wyznaczona z zależności (152).

Typowe wytłaczane pokrycie ściste ma  $T_R > +150^\circ\text{C}$  (rozdział 4.2.1) i wysoki moduł sprężystości w temperaturze do około  $+80^\circ\text{C}$ . Obniżenie temperatury z  $+60^\circ\text{C}$  do  $-30^\circ\text{C}$  zwiększa wtedy  $\Delta P$  w proporcji  $\geq 5:1$ . Wzrost  $\Delta P$  zmniejsza promień zginania i podwyższa indukowaną PMD, zgodnie ze wzorem (47). Maksymalne wygięcie włókna umieszczonego w kablu stacyjnym jest wprawdzie ograniczone oporem stawianym przez włóknisty element wytrzymałościowy i powłokę kabla, ale powstają początkowe deformacje włókna prowadzące do wybożenia pod działaniem względnie małej siły ściskającej, mniejszej niż obliczona dla prostego włókna  $P_w$  (rozdział 4.3).

Orientacyjne parametry krzywizny włókna wprowadzanej przez niecentryczne pokrycie ściste z PA 12 przedstawia rys. 91. Prezentowane obliczenia dotyczą hipotetycznego przypadku włókna w jednorodnym pokryciu z twardego polimeru, ale mniejszy przekrój współcześnie produkowanych tub ścisłych kompensuje wyższą sztywność materiału (PBT).



Rys. 91. Krzywizna i promień zginania włókna światłowodowego w niecentrycznym pokryciu ścisłym z PA 12 skurczonym o 1,5% [180].  $x$  - przesunięcie osi włókna i pokrycia.

### Mechanizm (3)

Ciśnienie promieniowe pokrycia 2-warstwowego na włókno szklane opisuje zależność (142) przedstawiona w rozdziale 4.4.2. Wstawiając dane włókna telekomunikacyjnego w pokryciu Corning CPC z tabeli 19 – poz. 1, można ją sprowadzić do postaci:

$$\sigma_r = E_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_R - T) \frac{-1,0313 + 2,5315 \frac{E_2}{E_3} + 1,8161 \frac{\alpha_3}{\alpha_2}}{0,03094 + 4,5213 \frac{E_2}{E_3}} \quad (173)$$

Dla  $T_R - T = 50$  K oraz parametrów materiałów w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$  przedstawionych w tabelach 18-19 ciśnienie obliczone z zależności (173) wynosi 145 kPa.

Indukowaną PMD można obliczyć posługując się zależnością:

$$k_{PMDM} = \frac{R}{c} \sqrt{\frac{h}{1000}} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (144)$$

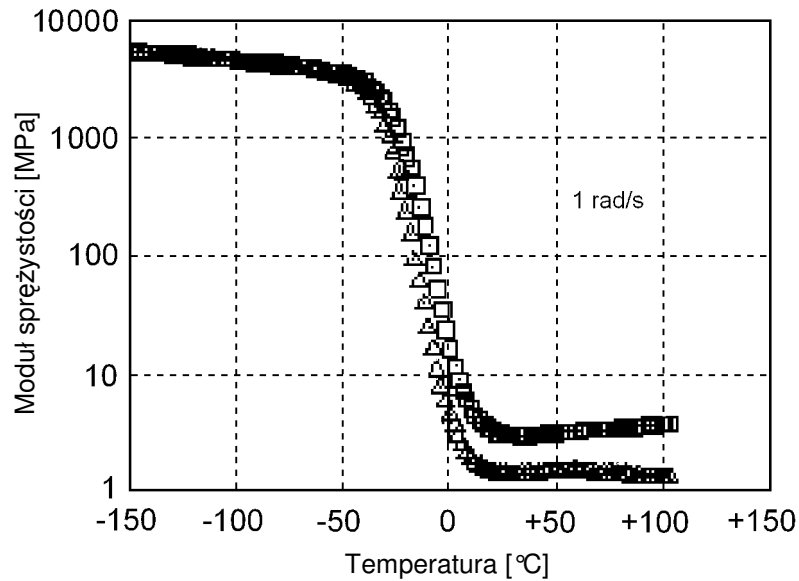
Pesymistyczne oszacowanie różnicowego naprężenia, ignorujące redystrybucję naprężeń wskutek poprzecznego odkształcenia pokrycia prowadzi do zależności:

$$k_{PMDE} = \frac{R}{c} \sqrt{\frac{h}{1000}} e \sigma_r \quad (174)$$

gdzie  $e$  – eliptyczność pokrycia. Dla  $e = 0,1$ ,  $h = 10$  m oraz  $\sigma_r = 0,145$  MPa, indukowana PMD wynosi około 0,015 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Współczynnik proporcjonalności ciśnienie - PMD wynosi w tych warunkach 0,105 ps/ $\sqrt{\text{km}} \cdot \text{MPa}$ . Wynik obliczenia sugeruje minimalny wpływ mechanizmu (3) i pewien margines bezpieczeństwa.

W rzeczywistości jest inaczej: wzrost modułu sprężystości  $E_2$  tworzywa pokrycia miękkiego otaczającego włókno w niskiej temperaturze prowadzi do prawie proporcjonalnego wzrostu ciśnienia i indukowanego PMD, zgodnie ze wzorami (173) i (174). Jak widać na rys. 83 i 92, wzrost  $E_2$  poniżej temperatury zeszklenia elastomeru  $T_g$  może być bardzo szybki

i przy  $T < T_g$  należy oczekiwać wzrostu PMD. Publikowane dane wskazują, że wersje pokrycia pierwotnego obecne na rynku mają  $T_g$  zróżnicowaną w granicach od 0°C do -80°C.



Rys. 92. Charakterystyki  $E(T)$  dwóch wersji tworzywa akrylowego utwardzanego promieniowaniem ultrafioletowym dla warstwy wewnętrznej pokrycia pierwotnego [69].

### Podsumowanie

Istnieją aż cztery źródła dwójłomności optycznej przyczyniające się do wzrostu PMD we włóknie światłowodowym umieszczonym w ścisłym pokryciu wraz z obniżeniem temperatury. We wszystkich przypadkach indukowana dwójłomność optyczna posiada względnie stałą orientację, wynikającą z ułożenia włókna w jego pokryciu i prostopadłą do osi włókna. Efekty wymienionych zjawisk dodają się do siebie, a całkowita indukowana przez zmiany temperatury PMD jest opisywana uogólnioną zależnością:

$$k_{PMDT} \approx a(T_R - T) + b(T_W - T) + c(T_W - T)^2 \quad (175)$$

w której odpowiednie składniki przyjmują wartości zerowe w przypadku, kiedy zawarte w nich różnice temperatur są ujemne.

### 4.6. Oddziaływanie pokrycia półściskłego na włókno światłowodowe

Tuba półściska jest zawsze wytłaczana na gorąco z tworzywa termoplastycznego, najczęściej PBT i ulega skurczeniu wzdłużnemu  $\Delta L = 0,05-0,4\%$  (dane szacunkowe). Część tego skurczu nie skompensowana przez rozciąganie podawanego włókna musi być wyrównana przez wprowadzenie nadmiaru długości włókna w gotowej tubie. Włókno układa się wewnątrz tuby w spiralę rewersyjną, czemu towarzyszy zginanie i dociśnięcie włókna do ścianek tuby. Nie ma temperatury wyboczenia.

Skok spirali, promień zginania włókna i PMD wprowadzane przez zginanie można obliczyć z zależności (165), (167) i (168). Wyniki uzyskane dla  $k = 500 \text{ ps}\cdot\text{mm}^2/\sqrt{\text{km}}$  zestawiono w tabeli 13; te prawdopodobne dla włókna badanego w IŁ (p. 6.4.3) wyróżniono tłustym drukiem. Obniżenie temperatury powoduje skurcz wzdłużny tuby i wzrost  $\Delta L$  o około 0,005%/K i wzrost indukowanego PMD w przybliżeniu proporcjonalny do kwadratu zmiany temperatury, co powinno skutkować charakterystyką zbliżoną do pokazanej na rys. 90.

W odróżnieniu od pracy włókna w ścisłej tubie, tarcie włókna o wewnętrzne ścianki tuby powoduje histerezę jego przemieszczeń i zmian PMD. Możliwe są też przemieszczenia

naprężonych i blokowanych przez siły tarcia włókien wskutek wstrząsów i wibracji, prowadzące do skokowych zmian PMD.

Tabela 20. Parametry opisujące ułożenie włókna światłowodowego w pokryciu półścistym.

Nadmiar długości włókna ( $\Delta L$ )	Średnica spirali ( $d_s$ )	Skok spirali ( $p$ )	Promień zginania włókna ( $r_g$ )	PMD indukowana przez zginanie włókna
%	mm	mm	mm	ps/√km
<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>9,93</b>	<b>50,00</b>	<b>0,20</b>
0,10	0,10	7,02	25,03	0,80
0,20	0,10	4,96	12,53	3,18
0,05	0,20	19,86	100,00	0,05
<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>14,04</b>	<b>50,05</b>	<b>0,20</b>
0,20	0,20	9,93	25,08	0,79

## 4.7. Relaksacja i krystalizacja materiałów pokrycia

W rozważaniach w rozdziałach 4.2-4.6 założono, że własności mechaniczne wszystkich materiałów są statyczne – tj. odkształcenia i naprężenia wewnętrzne wywołane pojawieniem się określonego obciążenia mechanicznego lub zmiany temperatury następują natychmiast i dalej nie zmieniają się w czasie, jeśli nie ma zmian wymienionych bodźców.

Szkło kwarcowe stanowiące przechłodzoną ciecz o bardzo wysokiej lepkości zachowuje się w sposób bardzo bliski powyższemu założeniu, natomiast polimery używane w przemyśle kablowym wykazują poważne odstępstwa, głównie relaksację i krystalizację.

### 4.7.1. Relaksacja

Relaksacja polimeru polega na zmianie ułożenia i przesuwaniu się względem siebie łańcuchów polimeru pod wpływem naprężeń wewnętrznych. Proces relaksacji zachodzi przede wszystkim w stanie wysokoelastycznym i sprężystym z wymuszoną elastycznością (rozdział 4.2.2), prowadząc do zmniejszenia naprężeń wewnętrznych (stąd nazwa) oraz dodatkowego odkształcenia i redukcji modułu sprężystości w warunkach długotrwałego obciążenia o stałej wartości. Charakterystyczną cechą tego zjawiska jest stosunkowo długi czas niezbędny dla likwidacji naprężeń, którą w jednolitym materiale opisuje formuła [149]:

$$R(t) = R_0 e^{-t/\tau} \quad (176)$$

gdzie:  $R$  – przejściowe naprężenie mechaniczne pojawiające się po skokowej zmianie odkształcenia,  $t$  – czas liczony od momentu pojawienia się odkształcenia,  $R_0$  – naprężenie początkowe ( $t = 0$ ),  $\tau$  - stała czasowa relaksacji, zwana w skrócie „czasem relaksacji”.

Czas relaksacji mechanicznej polimeru zmienia się w funkcji temperatury i początkowego naprężenia zgodnie ze wzorem [78]:

$$\tau = \tau_0 e^{(U_0 - \alpha\sigma)/kT} \quad (177)$$

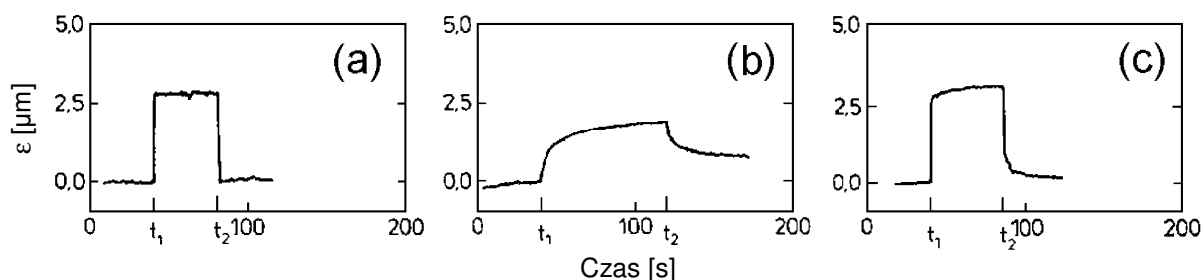
w którym:  $U_0$  – energia bariery obrotu wiązania w cząsteczce polimeru,  $\tau_0$  – okres drgań atomowych ( $\approx 0,1$  ps),  $\sigma$  - początkowe naprężenie mechaniczne,  $\alpha$  – stała zależna od budowy cząsteczek polimeru,  $k$  – stała termodynamiczna Boltzmanna,  $T$  – temperatura.



Zachowanie tworzywa o skomplikowanej budowie cząsteczek lub niejednorodnego jest bardziej złożone i opisywane przez kilka czasów relaksacji.

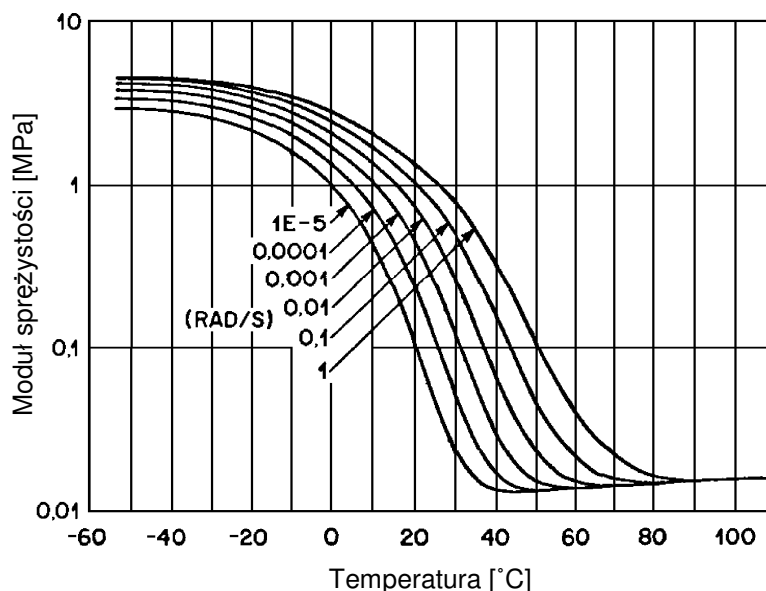
Dla typowych polimerów zakres  $\tau$  rozciąga się od sekund do miesięcy i odpowiada przedziałowi szybkości zmian temperatury w eksploatacji kabli światłowodowych.

Silne usieciowanie tworzywa blokuje przemieszczenia łańcuchów i uniemożliwia relaksację. Tak jest w używanych do wykonywania pokryć włókien światłowodowych elastomerach silikonowych, ale nie akrylowych (rys. 93). Relaksacji nie ulegają także polimery krystaliczne. W materiale częściowo krystalicznym, takim jak PBT, PA 12 lub PET relaksacja dotyczy tylko fazy amorficznej i jej zewnętrzne efekty słabną ze wzrostem zawartości fazy krystalicznej. Relaksacja najsilniej przejawia się w tworzywach pracujących w temperaturach zbliżonych do lub wyższych od temperatury zeszklenia ( $T_g$ ), do których należą przede wszystkim miękkie i słabo usieciowane kopolimery akrylowe używane na wewnętrzną warstwę pokrycia pierwotnego włókien światłowodowych.



Rys. 93. Charakterystyki deformacji pod obciążeniem impulsowym kopolimerów silikonowych (a) i akrylowych utwardzanych promieniowaniem UV (b-c) [68].

Przy obciążeniu przez czas  $t \geq \tau$  moduł sprężystości polimeru spada. Proces ten jest w niskiej temperaturze powolny, co widać na rys. 94: najdłuższy okres zmian obciążenia w czasie badania był równy 4,5 h i nie wystarczył dla stabilizacji własności tworzywa w temperaturach niższych od  $+40^\circ\text{C}$ .



Rys. 94. Moduł sprężystości materiału twardego pokrycia pierwotnego w funkcji temperatury i częstotliwości. Pomiar metodą dynamicznej analizy mechanicznej (DMA)[162].

Dane katalogowe PBT Bayer B1800 zalecanego do wytłaczania ścisłych tub [163] określają moduł sprężystości mierzony w temperaturze pokojowej w czasie standardowego

testu trwającego 4 minuty do osiągnięcia granicy plastyczności (4%) na 2500 MPa. Moduł pełzania w czasie prób trwających 1 h i 1000 h to odpowiednio 2200 MPa i 1400 MPa. Po 42 dniach stałego obciążenia PBT zachowuje już tylko 56% początkowej sztywności.

Ekstrapolacja danych z rys. 94 pozwala szacować czas pełnej relaksacji w temperaturach  $+20^{\circ}\text{C}$  i  $0^{\circ}\text{C}$  na odpowiednio 500 h i 10000 h. To jednak stoi w sprzeczności z wynikami badań laboratoryjnych włókien światłowodowych, u których przeważnie obserwowano stabilizację własności w przeciągu 0,5-3 h. Należy przyjąć, że za przejściowe zmiany PMD podczas badań klimatycznych odpowiada głównie zachowanie się miękkiej warstwy pokrycia pierwotnego. Czasy relaksacji używanych do jej wykonania tworzyw akrylowych zawierają się zwykle w granicach 1-100 s [69,149].

Dla stabilności PMD włókna światłowodowego narażonego na działanie zmieniających się temperatur, zjawisko relaksacji jest generalnie korzystne, gdyż redukuje siły działające na włókno szklane oraz związane z nimi zmiany PMD podczas powolnych zmian temperatur, na przykład w cyklu dobowym, a zwłaszcza rocznym, kiedy  $t < \tau$  [148]. Bez wpływu relaksacji, zmiany PMD obserwowane krótkotrwale w stanach przejściowych byłyby trwałe.

Z drugiej strony, relaksacja materiałów tub i powłok kabli osłabia ochronę włókien światłowodowych przed dłuższym działaniem zewnętrznych sił zgniatających. W temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$  spadek sztywności powłoki z MDPE następuje po upływie 5-10 minut.

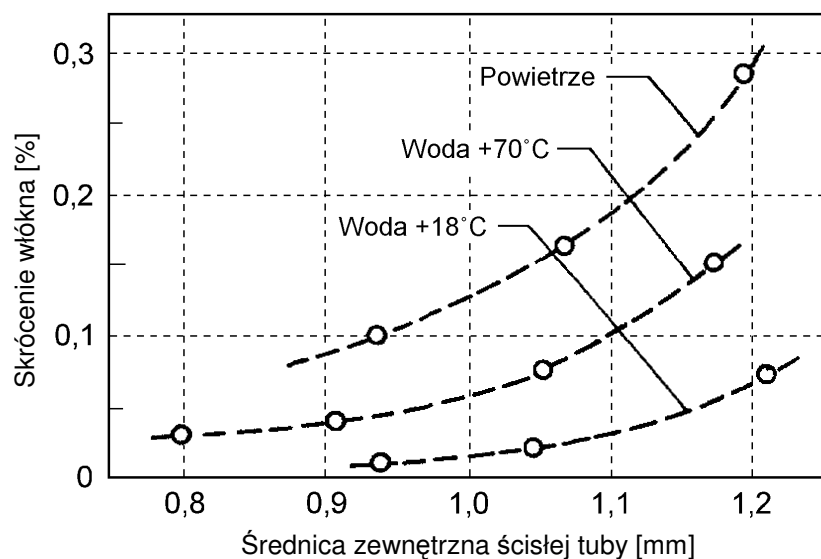
#### 4.7.2. Krystalizacja

Problem ten dotyczy tworzyw zbudowanych w zmiennym stopniu z faz: amorficznej i krystalicznej, różniących się gęstością o około 2,5% [78], modułem sprężystości i innymi własnościami. Do tej grupy zaliczają się PBT i poliamidy. Nie dotyczy m.in. poliwęglanu (PC), który jest amorficzny i elastomerów. Kwestię tę poruszano już w rozdziałach 2.6.3. i 4.2.1.

Technolodzy odpowiedzialni za produkcję wytłaczanych tub ścisłych i luźnych mają trudny wybór: szybkie chłodzenie po wytłoczeniu zapewnia minimalną zawartość fazy krystalicznej i skurcz oraz  $T_R$ , ale w tak wykonanym pokryciu zachodzi rozrost istniejących już krystalitów i dalszy skurcz po podgrzaniu powyżej temperatury zeszklenia ( $T_g$ ). Stopień krystalizacji i wymiary pokrycia stabilizują się przeważnie po kilku cyklach zmian temperatury. Powolne chłodzenie skutkuje silniejszą krystalizacją i skurczem (rys. 95), za to wymiary pokrycia są w trakcie późniejszej pracy w podwyższonych temperaturach bardziej stabilne. Temperaturę równowagi włókna w tubie ścisłej można obniżyć, rozciągając włókno światłowodowe podawane do wytłaczarki. Analogiczny zabieg stosuje się podczas nakładania powłok kabli telekomunikacyjnych ósemkowych wzmacnianych linką stalową, która bez wstępnego rozciągania ulega sfalowaniu po skurczeniu się tworzywa powłoki.

Producenci kabli lotniczych i kosmicznych stosują niekiedy przyspieszone starzenie wyrobów przez cykliczną ekspozycję na zmienne temperatury, przy czym największe znaczenie ma osiąganie w każdym cyklu górnej temperatury znacznie wyższej od temperatury zeszklenia używanych polimerów, bez potrzeby jej utrzymywania przez jakikolwiek czas. Testy wykonane w NASA [181,182] z ekspozycją na temperatury w zakresie od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+140^{\circ}\text{C}$  wykazały jednak, że nawet 50 cykli w tak ostrych warunkach nie zawsze gwarantuje stabilizację długości i tłumienności kabla. Badania te dotyczyły kabli produkowanych głównie z polimerów fluorowych i wniosków nie można automatycznie przenosić na konstrukcje dominujące w telekomunikacji. Koszt i czasochłonność podobnego procesu wykluczają jego powszechne używanie.

W przeciwieństwie do relaksacji, wpływ dodatkowej krystalizacji materiału pokrycia ścisłego na warunki pracy i parametry transmisyjne (PMD, tłumienność) włókna światłowodowego jest zawsze negatywny: rośnie osiowa siła ściskająca, łatwiej dochodzi do wyboczenia włókna w niskiej temperaturze, wzrasta jego PMD. Zmiany te są trwałe.



Rys. 95. Wzdłużny skurcz włókna w ścisłej tubie wytłoczonej z poliamidu w zależności od jej średnicy i metody chłodzenia [176].

W czasie wykonywanych przez autora badań termicznych z czasami ekspozycji 6-24 h wyraźne objawy skurczu pokrycia ścisłego pojawiały się w próbkach wystawionych na działanie temperatur +60...+70°C.

## 5. Wpływ temperatury na PMD – dane literaturowe

### 5.1. Zmiany PMD z temperaturą w ułożonych kablach światłowodowych

Problem zmienności PMD w eksploatowanych liniach kablowych podziemnych i napowietrznych oraz korelacji zmian PMD ze zmianami temperatury otoczenia oraz innymi czynnikami zewnętrznymi budzi od początku duże zainteresowanie firm telekomunikacyjnych oraz badaczy. Literatura na ten temat PMD linii kablowych jest dość liczna i obejmuje:

- ✓ Pomiary PMD w liniach kablowych eksploatowanych przez określonego operatora dla oceny stanu infrastruktury [16-18,135-137], przy czym wielu autorów szuka zależności między konstrukcją kabla, datą jego produkcji i technologią instalacji, a PMD. Pomiary wykonuje się zwykle jeden raz dla danej linii, co wyklucza analizę wpływu czynników zmiennych w czasie, takich jak temperatura. Patrz rozdział 3.2.3.1.
- ✓ Pomiary reflektometryczne PMD w celu identyfikacji sekcji kablowych o wysokim  $k_{PMD}$ , związane z próbami poprawy jakości sieci przed wprowadzeniem systemów 10 Gbit/s lub 40 Gbit/s [151,155]. Metodę POTDR przedstawiono w rozdziale 3.3.5.
- ✓ Monitorowanie PMD torów optycznych przez dłuższy okres czasu (dni-miesiące) dla określenia zakresu zmienności DGD w funkcji czasu i długości fali oraz rozkładu statystycznego DGD [17,18,113,143,183,184]. Uzyskane wyniki dostarczają parametrów rozkładu statystycznego DGD użytecznych dla projektowania łączy cyfrowych lub kompensacji PMD [183,190]. Porównaj rozdziały 3.1.5 i 3.2.2.
- ✓ Równoczesne monitorowanie PMD torów optycznych w rzeczywistej sieci i warunków zewnętrznych takich jak wiatr, temperatura powietrza lub gruntu i nasłonecznienie oraz próby korelacji zmian DGD z ich oddziaływaniem [184-189].

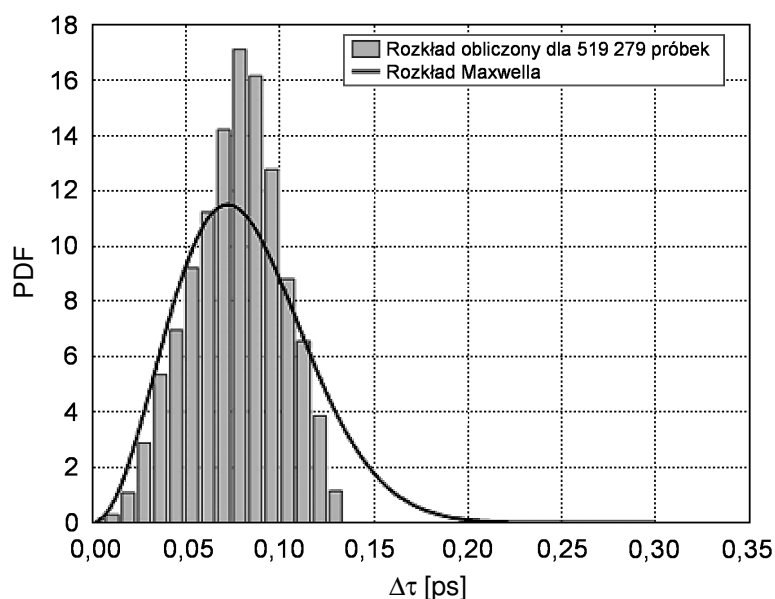
Dostępne opracowania z dwóch ostatniej grup dotyczą we wszystkich przypadkach linii zbudowanych z kabli światłowodowych o luźnej konstrukcji ośrodka – tubowej [184-186] lub rozetowej [113,143,183,187]. Część opracowań, w tym [188,189] nie zawiera informacji na ten temat, ani innych danych pozwalających na pośrednią identyfikację, co bardzo obniża ich wartość.

Na pierwszy plan wyłaniają się dwa zagadnienia:

- 1) Czy DGD włókien pracujących w rzeczywistej sieci ma rozkład statystyczny Maxwella (rozdział 3.1.5), powszechnie przyjmowany dla projektowania łączy (rozdział 3.2.2)?
- 2) Jaka jest zależność PMD od warunków pracy kabla światłowodowego?

Odpowiedzi na pytanie (1) są sprzeczne. Publikacje [113,143,183,187] bazujące na wynikach trwających 14-86 dni pomiarów 3 linii długości 95 km zbudowanych z doziemnych kabli rozetowych z włóknami G.652 w sieci międzymiastowej firmy Sprint (Kansas, USA) prezentują niemal idealną zgodność zmian DGD z rozkładem Maxwella (rys. 40). Ten sam wynik dały pomiary 57 km linii firmy AT&T zbudowanej kabli doziemnych o nieujawnionej konstrukcji z włóknami G.652 [190].

Tymczasem trwające 25 dni [184] i 73 dni [191] pomiary włókien G.652 w kablach tubowych ze skręcanymi tubami ułożonych w kanalizacji w sieci firmy FastWeb (Turyn, Włochy) wykazały, że istnieje sztywna granica, którego DGD nigdy nie przekracza i jest ona niska:  $1,55-2,1 \langle \Delta \tau \rangle$  dla dwóch linii długości 37 km (rys. 96). W tej sytuacji bazujące na dokumencie IEC 61282-9 [98] projektowanie łączy cyfrowych przy założeniu maksymalnej wartości DGD na poziomie  $3-4 \langle \tau \rangle$ , przedstawione w rozdziale 3.2.2 stanowi ewidentny nadmiar ostrożności. Podobne rezultaty dały pomiary włókna G.652 na szpuli [192], gdzie górna granica DGD wynosiła około  $2,5 \langle \Delta \tau \rangle$ .



Rys. 96. Rozkład statystyczny DGD w linii kablowej długości 37,07 km z kabli tubowych z włóknami G.652 [191]. Czas pomiaru: 73 dni. Porównaj z rys. 40.

Warunki termiczne i mechaniczne oraz włókna światłowodowe były we wszystkich przypadkach podobne, stąd różnice w rozkładzie statystycznym DGD można wyjaśnić tylko inną konstrukcją kabli. Pomiary w USA dotyczyły prawdopodobnie kabli z włóknami klejonymi w taśmy (opisu kabla w żadnej z prac nie ma), co znacznie ogranicza swobodę ich ruchu, wprowadza dodatkowe naprężenia mechaniczne zależne od temperatury i wymaga związane z nimi sprzężanie modów polaryzacyjnych, poszerzając zakres zmienności DGD.

W kablu tubowym ze skręcanymi tubami włókno jest lepiej odseparowane od czynników zewnętrznych, co niestety prowadzi do wydłużenia drogi korelacji i wyraźnego wzrostu PMD w porównaniu do wartości typowej dla włókna na szpuli lub w kablu rozetowym [111,135,137], ale bardzo utrudnia dalsze osłabienie sprzężania modów i zwiększenie DGD w wyniku przypadkowej kombinacji oddziaływań zewnętrznych.

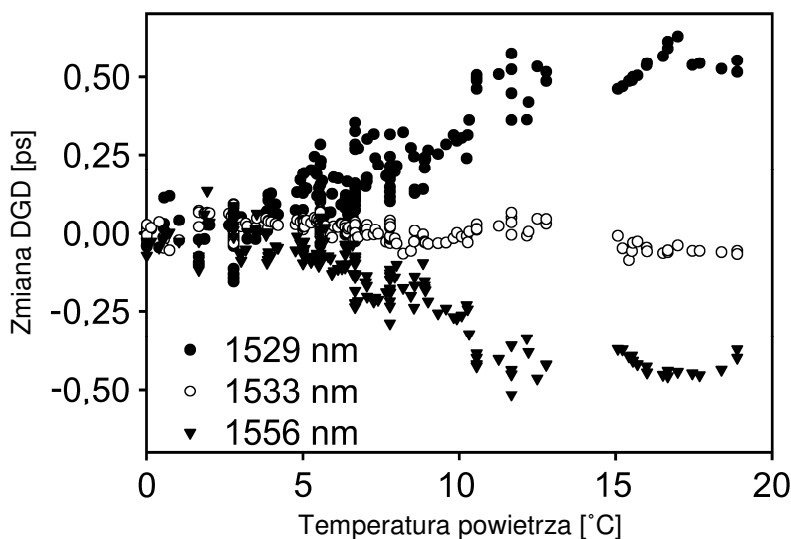
Wyniki pomiarów linii kablowych firmy Sprint o stopniowanej długości 95-190-285 km [183] prowadzą do wniosku, że ze wzrostem długości linii szybko rośnie częstość zmian PMD i zdarzeń związanych z wysoką wartością DGD, prowadzących do przerw w pracy łącza. O ile dla trzech linii długości 95 km wzrost DGD powyżej  $3\langle\Delta\tau\rangle$  następuje zgodnie z dopasowaną charakterystyką zmienności DGD przeciętnie co 3,25-6,39 lat i trwa 69-136 min, to identyczne parametry tych samych linii połączonych w jedną o długości 285 km wynoszą odpowiednio 0,27 roku i 6 min.

Odpowiedzi na pytanie (2) były podobne we wszystkich wymienionych powyżej publikacjach. Zawsze obserwowano dobową zmienność DGD, częściowo skorelowaną ze zmianami temperatury powietrza, wyraźną nawet w przypadku linii podziemnych układanych na głębokości przekraczającej 1 m [183,188,191]. Stała czasowa wymiany ciepła z atmosferą przez warstwę gruntu grubości 1 m przekracza 40 dni [193] i amplituda dobowych wahań temperatury w kablu doziemnym lub kanałowym jest znacznie mniejsza od 1 K, co dowodzi wrażliwości PMD włókien w kablu nawet na niewielkie zmiany temperatury. Drugie wyjaśnienie to zmiany PMD w krótkich odcinkach kabli zainstalowanych nad ziemią, na przykład na mostach i wystawionych na działanie zmiennych temperatur.

Żaden z badaczy nie zaobserwował powtarzalnej, monotonicznej zależności PMD od temperatury, obowiązującej w szerszym zakresie temperatur. Charakterystyki pomiarowe sugerują raczej nieregularną, łamaną krzywą.

Pomiary spektralne DGD kabli doziemnych z włóknami ułożonymi około 2000 r., prawdopodobnie wirowanymi włóknami NZDSF przedstawione w pracy [188] wykryły

wyraźną zależność DGD - temperatura, lecz jej przebieg zmieniał się zasadniczo z długością fali (rys. 97) już w obrębie zakresu C zajmowanego przez typowe łącze DWDM.



Rys. 97. Zmiany DGD włókna w kablu z temperaturą otoczenia [188].  
Linia z podziemna długości 150 km mająca odsłonięte sekcje nadziemne. PMD = 0,64 ps.

Wyraźne zmiany PMD następują często w odpowiedzi na termiczne stany przejściowe o wysokiej szybkości zmian temperatury  $dT/dt$ , na przykład po wschodzie Słońca oświetlającego linię napowietrzną z przewodem OPGW [189]. Nespola, Abrate i in. [184] przedstawili zależność opisującą dobowe zmiany PMD w ułożonym w kanalizacji kablu tubowym z włóknami G.652:

$$\frac{d\langle\Delta\tau\rangle}{dt} = a + bT \quad (178)$$

gdzie T - temperatura powietrza atmosferycznego.

Odpowiednia zależność znaleziona w artykule [185] dla włókna G.652 na szpuli oraz przewodu OPGW z ośrodkiem tubowym z tubami skręcanymi i włóknami G.652 to:

$$\left(\frac{d\langle\Delta\tau\rangle}{dt}\right)^2 = a^2 + b^2\left(\frac{dT}{dt}\right)^2 \quad (179)$$

Obowiązywała ona dla ograniczonej szybkości zmian temperatury, której limit w przypadku przewodu OPGW wynosił  $0,7^\circ\text{C}/\text{h}$ . Główną przyczyną obserwowanych oscylacyjnych zmian PMD była najprawdopodobniej rozszerzalność termiczna i relaksacja pokrycia pierwotnego włókien światłowodowych.

## 5.2. Badania laboratoryjne wpływu temperatury i czynników mechanicznych na PMD

Literatura zagraniczna na ten temat jest zaskakująco uboga. Większość publikacji opisuje wykonane z inicjatywy producentów badania kabli liniowych firm: OFS Fitel, która przejęła działy kablów koncernów Furukawa i Lucent Technologies, oraz Sumitomo. Przedstawiono w nich zmiany PMD w trakcie standardowych badań mechanicznych i klimatycznych wymaganych dla certyfikacji kabli. Pomiary PMD nie są normalnie elementem testów mechanicznych i klimatycznych; obecne standardy [12-15,22] uznają zmiany tłumienności za jedyne kryterium oceny warunków pracy włókien w kablu.

Artykuł [194] omawia testy jednostek ścisłych o konstrukcji opisanej w p. 2.8, ważnych ze względu na ich stosowanie w przewodach OPGW instalowanych w Polsce. Mogą istnieć dalsze opracowania w języku japońskim - firmy japońskie mają zwyczaj opisywania ważnych problemów technicznych wyłącznie w ojczystym języku.

Literatury opisującej pomiary PMD włókien w pokryciach ścisłych typowych dla kabli stacyjnych i polowych autor pracy brak. Jedyną informacją ustną dotyczyła sporadycznych pomiarów PMD we włóknach G.652 w ścisłej tubie, wykonywanych w FK „Ożarów”. Wykryto 2-3-krotny wzrost PMD włókna w ścisłej tubie Ø900 µm w porównaniu do tego samego włókna w pokryciu pierwotnym, w temperaturze +20 °C.

### 5.2.1. Włókna jednomodowe w pokryciu pierwotnym

Artykuły [192] i [185] prezentują wyniki badań termicznych jednomodowych włókien światłowodowych G.652 umieszczonych w pokryciu pierwotnym, nawiniętych na typowych szpulach z tworzywa sztucznego, połączonych z pomiarami zmian PMD. Pomiary włókien G.653 skrótowo przedstawione w pracy [192] dotyczyły wybrakowanych odcinków o bardzo wysokich wartościach PMD i można je pominąć. Zakresy temperatur: +10 °C...+58 °C [192] i +23 °C...+48 °C [185] były typowe dla eksploatacji i badań kabli stacyjnych.

Badanie opisane w pracy [185] wykazało brak zmian PMD z temperaturą w stanie ustalonym, a jedynie zmiany PMD w stanach przejściowych, opisywane przez wzór (179), który przypadku szybkich zmian temperatury można uprościć do postaci:

$$\left| \frac{dPMD}{dt} \right| \approx b \left| \frac{dT}{dt} \right| \quad (180)$$

Obserwowano oscylacje PMD w ograniczonym zakresie, których częstotliwość była proporcjonalna do szybkości narastania lub opadania temperatury.

Wydana przez firmę Siecor broszura [67] zawiera wyniki wykonanych w stanie ustalonym pomiarów PMD we włóknach G.652 typu SMF-1528, stanowiących wersję licencyjną włókna Corning SMF-28, eksponowanych na zmiany temperatury w zakresie od -60 °C do +70 °C, przy czym testowano włókna bezbarwne oraz kolorowane przez nałożenie dodatkowej warstwy tworzywa zawierającego barwnik.

Włókna bezbarwne i prawidłowo kolorowane wykazywały ograniczone zmiany PMD z temperaturą i brak prostej zależności, natomiast niecentryczne nałożenie warstwy zabarwionej i zaburzenie symetrii pokrycia skutkowało nawet 4-krotnym wzrostem PMD w temperaturze -60 °C. Zmienność tę tłumaczy mechanizm (2) opisany w rozdziale 4.5.3.

Najmniejszą zmienność PMD obserwowano w najwyższej temperaturze pracy (+70 °C), kiedy zgodnie z opisami w rozdziałach 4.2.1, 4.2.2 i 4.5.3 siły wywierane przez pokrycie na włókno szklane są minimalne, a indukowanie dwójłomności przez ewentualną niejednorodność, eliptyczność lub niecentryczność pokrycia najslabsze.

Praca [192] poświęcona była analizie zmienności statystycznej PMD w zależności od termicznych warunków pracy włókna światłowodowego. Wyróżniono w niej dwa reżimy:

- ✓ **Adiabatyczny:** zmiany temperatury są zbyt szybkie, by zaszła pełna relaksacja naprężeń wewnętrznych pokrycia. Rozkład statystyczny Maxwella dobrze opisuje obserwowane zmiany DGD. Korelacja PMD z temperaturą jest słaba.
- ✓ **Izotermiczny:** następuje pełna relaksacja pokrycia włókna w danej temperaturze. Zakres zmienności DGD jest niezgodny z rozkładem Maxwella - wartości DGD są ograniczone od góry do około  $2,5 \langle \Delta \tau \rangle$ . Odchylenie standardowe wartości DGD mierzonych dla  $\lambda = \text{const}$  jest znacznie mniejsze od normalnie spotykanego  $0,422 \langle \Delta \tau \rangle$ .

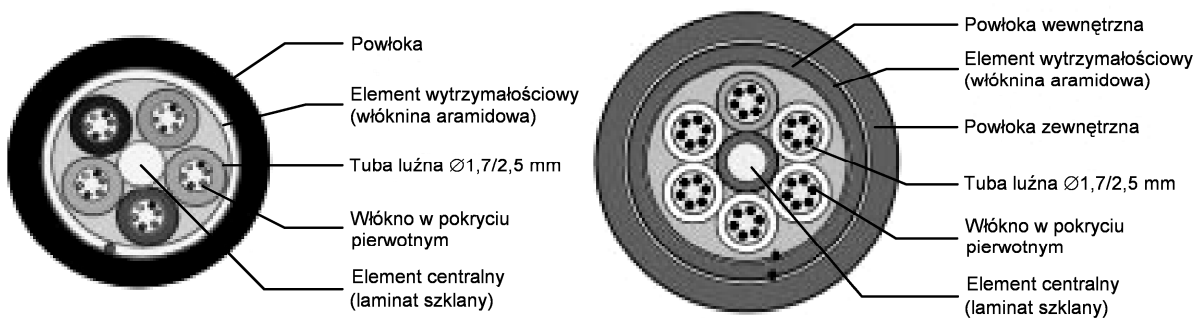
Obserwacje dotyczące reżimu izotermicznego pokrywają się z wynikami pomiarów kabli podziemnych tubowych z publikacji [183] i [184], przedstawionymi w rozdziale 5.1.

## 5.2.2. Kable tubowe z tubami skręcanymi

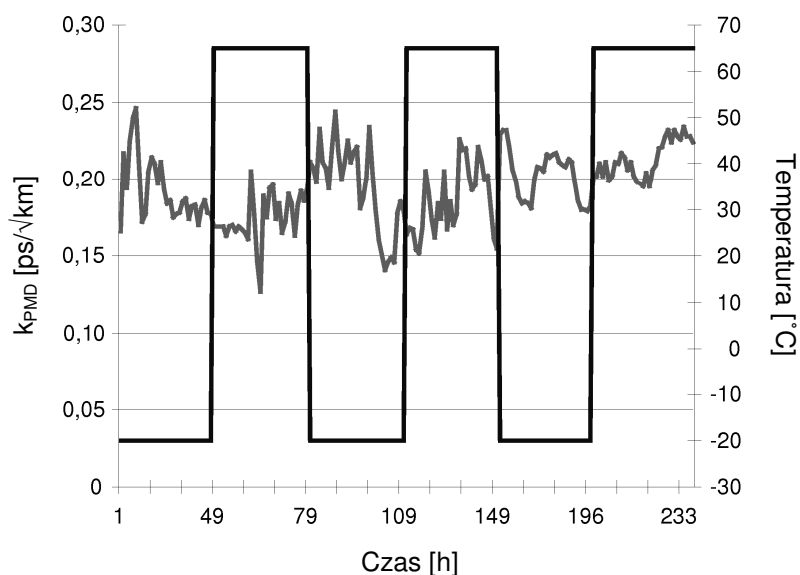
Referaty [195] i [196] opublikowane przez Furukawa Industrial S.A. (Brazylia) i [172] zaprezentowany przez Sumitomo Electric Industries (Japonia) opisują badania zmian PMD w kablach tubowych z tubami skręcanymi (rys. 97,100) i włóknami jednomodowymi różnego rodzaju w cyklicznie zmiennych temperaturach. Przedstawiono też pomiary zmian PMD w czasie kolejnych faz produkcji kabli [172] oraz standardowych dla certyfikacji kabli badań mechanicznych [195]. Informacje te są mają szczególną wartość, ponieważ konstrukcje testowanych kabli kanałowych i napowietrznych (ADSS) są tu dokładnie przedstawione i podobne do używanych w kraju. Zakres temperatur podczas testów kabli był zgodny z wymaganiami przyjętymi w kraju [12] dla kabli kanałowych [172] i napowietrznych [196].

Rezultaty badań zmienności PMD w kablach liniowych z ośrodkiem tubowym poddawanych działaniu cyklicznie zmiennych temperatur są bardzo zbliżone. We wszystkich przypadkach obserwowano bardzo ograniczone i w zasadzie losowe zmiany  $k_{PMD}$  w całym zakresie temperatur, bez wyraźnej deterministycznej zależności  $k_{PMD}(T)$  lub trwałego wzrostu PMD po zakończeniu badania. Widoczne na rys. 98 i 99 skokowe zmiany  $k_{PMD}$  w odpowiedzi na skokową zmianę temperatury świadczą, że dominujący wpływ na PMD mają naciski związane z rozszerzalnością termiczną i relaksacją materiałów pokrycia pierwotnego.

Zachowanie włókien jednomodowych różnych rodzajów: G.652 (SMF), G.654 (PSCF), G.655 (NZDSF), a nawet włókien kompensacyjnych (DCF) było podobne. Odpowiednie charakterystyki oraz konstrukcje badanych kabli przedstawiono na rysunkach 97-101.

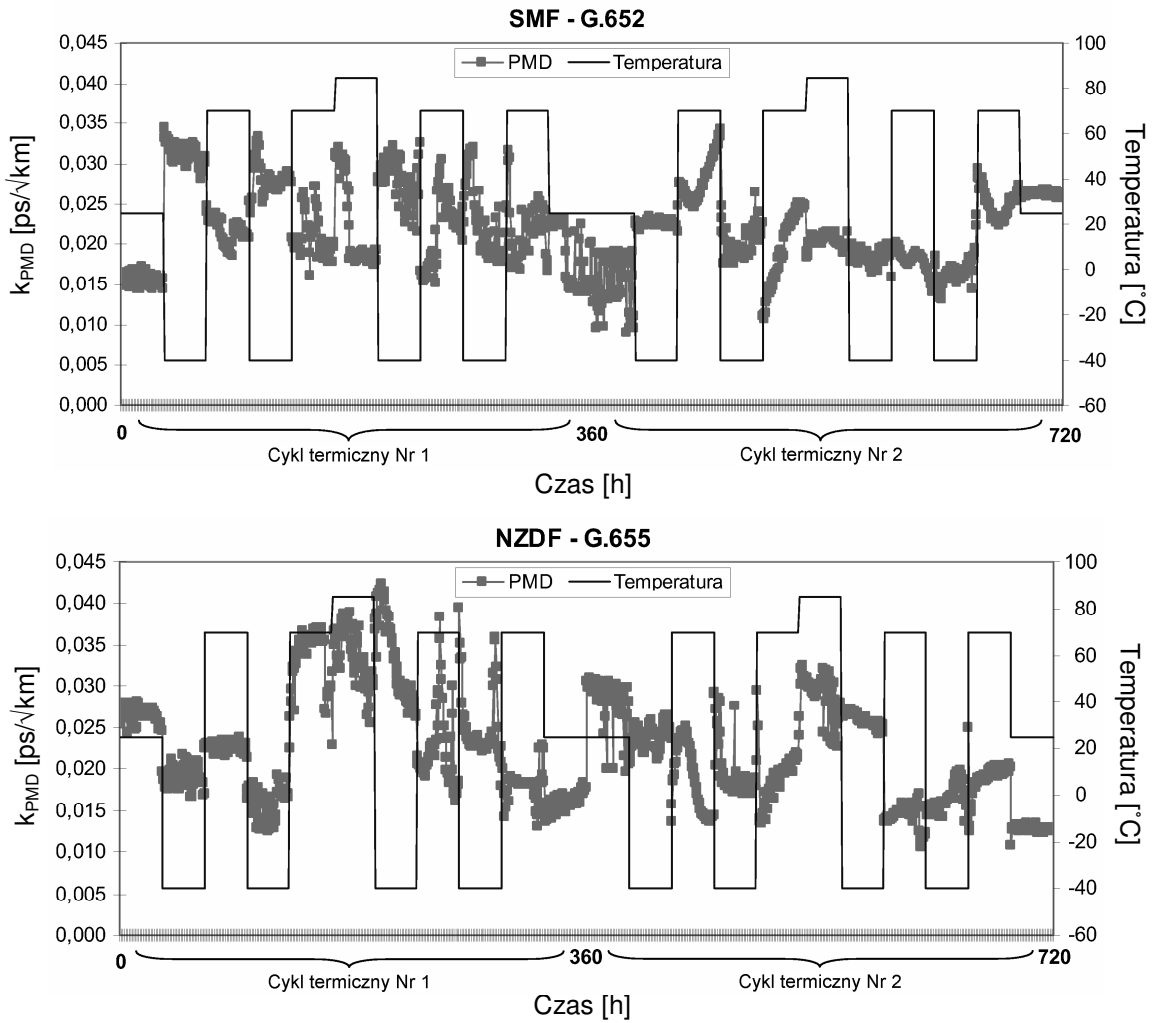


Rys. 97. Budowa kabli tubowych firmy Furukawa: 30-włóknowego kanałowego i 36-włóknowego napowietrznego ADSS [195].

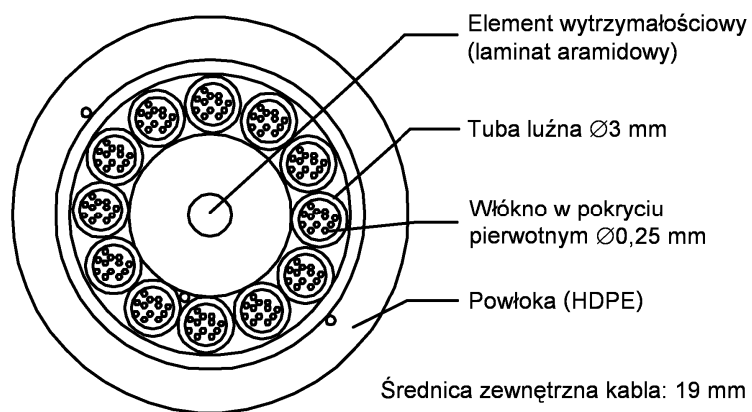


Rys. 98. Zmiany PMD włókien G.652 w kablu tubowym ADSS firmy Furukawa w czasie badania odporności na cykliczne zmiany temperatury [195].

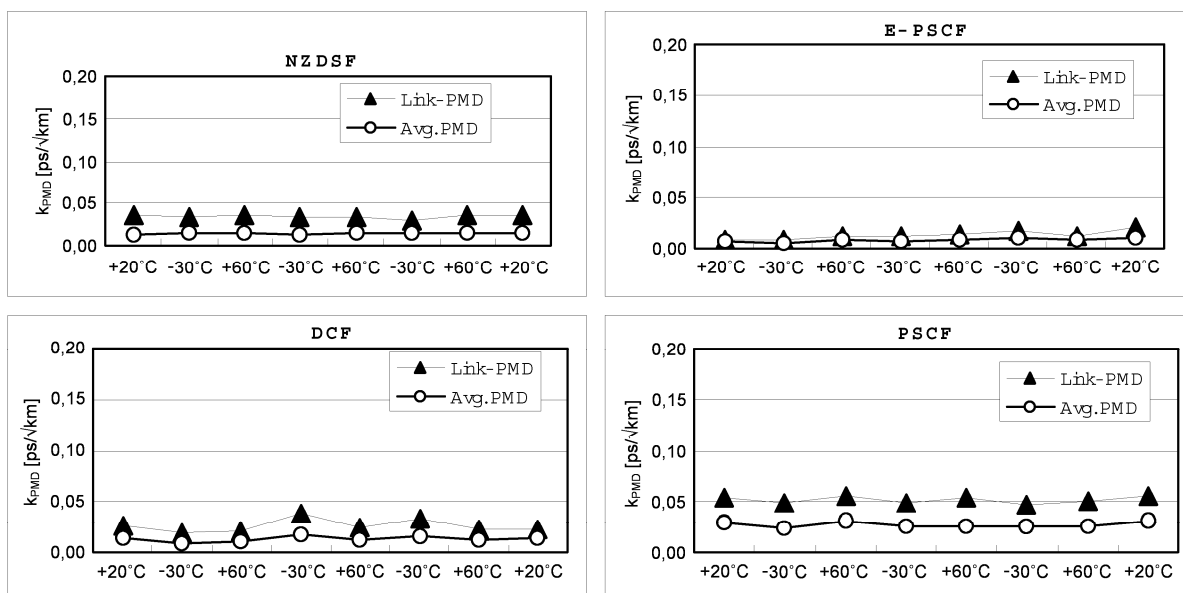




Rys. 99. Zmiany PMD włókien światłowodowych G.652 i G.655 w kablu kanałowym tubowym firmy Furukawa w czasie badania termicznego [196].



Rys. 100. Przekrój 144-włóknowego tubowego kabla kanałowego firmy Sumitomo [172].



Rys. 101. Zmiany PMD włókien światłowodowych w kablu z rys. 100 w czasie badania termicznego [172]. E-PSCF – włókno PSCF o powiększonym przekroju rdzenia.  
Oznaczenia: Avg. PMD:  $\langle \Delta\tau \rangle$ , Link-PMD:  $PMD_Q$ .

Powyższe wyniki badań termicznych pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- ✓ Kable kanałowe ze skręcanym ośrodkiem tubowym zapewniają dobrą ochronę włókien światłowodowych przed zginaniem i ścisaniem prowadzącym do wzrostu PMD,
- ✓ Widoczna na rys. 98 histereza zmian PMD z temperaturą jest najprawdopodobniej wynikiem tarcia włókien o ścianki tub, które uniemożliwia układanie się włókien po zmianie długości kabla bez naprężeń. Zjawisko to prawie nie występowało w kablu ADSS z większym nadmiarem długości włókien w tubach (1,0% wobec 0,4%) - rys. 98.
- ✓ Szybkie zmiany temperatury prowadzą do krótkotrwałych zmian PMD, zanikających w czasie  $\leq 10$  h wskutek relaksacji materiału miękkiego pokrycia pierwotnego.

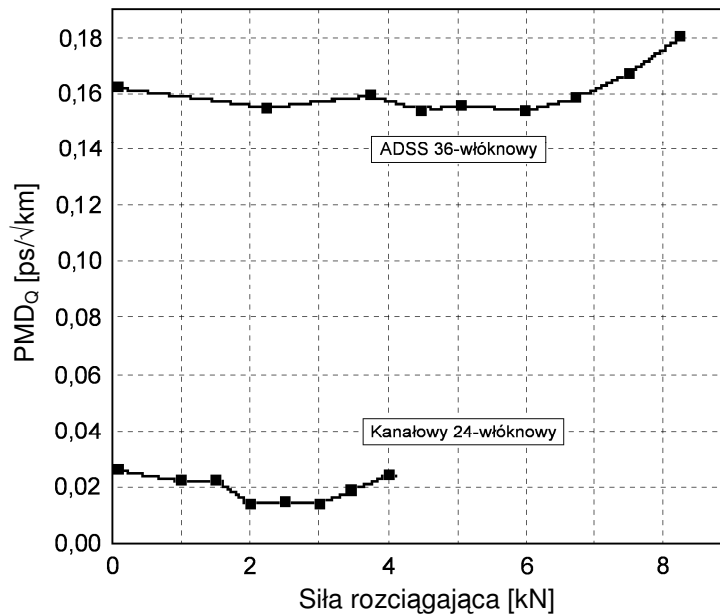
Wnioski te dotyczą zachowania wyrobów zaledwie dwóch producentów, z których OFS był w latach 1990-2005 dużym dostawcą włókien światłowodowych dla kablowni w kraju.

Artykuł [195] opisuje też pomiary zmian PMD w kablach tubowych firmy Furukawa narażonych na działanie sił rozciągających (rys. 101). Maksymalne siły odpowiadały w przybliżeniu ciężarowi 3 km kabla kanałowego i 5 km kabla ADSS; obie były znacznie wyższe od specyfikowanych przez producenta dla instalacji i eksploatacji obu kabli.

Charakterystyki z rys. 102 sugerują dobrą stabilność PMD, zwłaszcza w kablu ADSS, ale trzeba uwzględnić, że rozciąganiu poddawano 3,75% całej długości kabla, a parametry pozostałego odcinka w czasie badania nie zmieniały się. Obserwowany dla ADSS wzrost PMD łączy o 12% po zwiększeniu obciążenia z 6 kN do 8 kN wymaga, by PMD włókien znajdujących się w rozciągającym odcinku wzrosło aż 13-krotnie przy założeniu, że każde włókno jest wzdłużnie jednorodne.

Tak silny wzrost PMD to efekt dociskania włókien do ścianek tub (rys. 20c) po wykorzystaniu czynnego nadmiaru długości włókien w kablu – patrz rozdział 2.6.6.

Krzywe PMD – siła rozciągająca mają wyraźne minimum przy średnim obciążeniu, kiedy włókna światłowodowe w tubach nie są jeszcze dociskane do ścianek, ale nadmiar ich długości jest już niewielki, czemu towarzyszy minimalne zginanie i indukowana PMD.

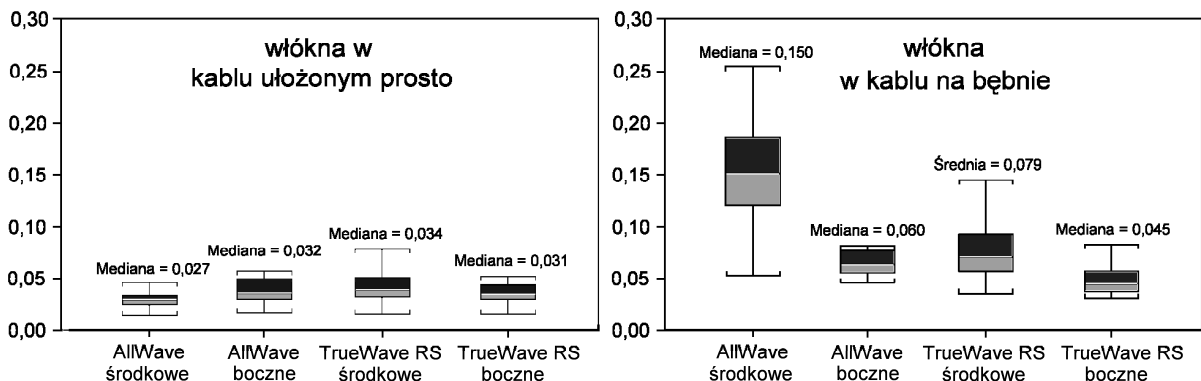


Rys. 102. Zmiany współczynnika PMD<sub>Q</sub> połączonych włókien G.652 w kablach z rys. 97 pod wpływem siły rozciągającej. Rozciąganiu poddawano 150 m spośród 4000 m kabla. Pomiary PMD wykonywano przez 1 h po każdorazowej zmianie obciążenia [195].

### 5.2.3. Kable z taśmami światłowodowymi w tubie centralnej

Firma OFS opublikowała w 2001 r. wyniki pomiarów PMD w 432-włóknowym kablu o budowie podobnej do przedstawionej na rys. 31, z 24-włóknowymi taśmami umieszczonymi w tubie centralnej [73]. Kabel ten zawierał włókna G.652 typu AllWave [46] i G.655 typu TrueWave RS [48]. Referat ten przynosi kilka interesujących obserwacji:

- 1) Nawinięcie kabla na bęben transportowy powoduje wzrost PMD włókien światłowodowych i wyraźne rozszerzenie zakresu zmienności tego parametru. Efekt ten jest słabszy we włóknach NZDSF TrueWave RS i we włóknach umieszczonych na skrajnych pozycjach w taśmie (rys. 103).
- 2) Włókna znajdujące się na skrajnych pozycjach w taśmie mają zawsze mniejszą PMD niż pozostałe, jeśli kabel nawinięto na bębnie. W kablu ułożonym prosto, na przykład zaciągniętym do kanalizacji zjawisko to nie występuje.
- 3) Po usunięciu skrajnego włókna z taśmy, PMD „nowego” włókna skrajnego wzrasta kilkakrotnie w porównaniu do wartości zmierzonej przed tą operacją. Pomiary dotyczyły taśm światłowodowych nawiniętych na szpulach.



Rys. 103. Zależność PMD włókien światłowodowych w kablu z tubą centralną od miejsca włókna w taśmie i sposobu ułożenia kabla [73].

Autorzy referatu uważają, że wzrost PMD wynika z dociśnięcia do siebie sąsiednich taśm, które są w kablu ułożone w ścisły pakiet i sfalowane dla wprowadzenia nadmiaru długości. Dla odpowiedniego zgięcia taśmy jest wymagane poprzeczne ciśnienie na jej powierzchnię, co generuje we włóknach światłowodowych dwójłomność optyczną i PMD w sposób przedstawiony w rozdziale 4.5.3 jako mechanizm (1). Ponieważ sąsiednie taśmy są nieco poprzesuwane poprzecznie względem siebie, skrajne włókna są często wolne od takich nacisków i nie powstaje w nich indukowana mechanicznie dwójłomność.

Inna możliwa przyczyna to asymetryczny rozkład naprężeń wytwarzanych przez spoiwo taśmy, przedstawiony w rozdziale 2.11.

Mniejsza podatność włókien NZDSF na indukowanie dodatkowej PMD w taśmach światłowodowych wynika prawdopodobnie z tego, że są one wirowane podczas wyciągania z preformy, natomiast wirowanie włókien G.652 stosuje się rzadziej lub wykonuje z mniejszą prędkością. Opisy wirowania i wpływu pozostałych po nim naprężeń skręcających na redukcję mechanicznie indukowanej PMD znajdują się w rozdziałach 3.1.6 i 3.1.7.

Zjawisko (1) powoduje, że pomiary PMD włókien w taśmach światłowodowych lub kablach je zawierających nawijanych na szpulach i bębnach transportowych, co stanowi ogólnie przyjętą praktykę w przemyśle kablowym, dają zawyżone wyniki nie odzwierciedlające faktycznego zachowania kabla po jego instalacji.

#### 5.2.4. Kable podmorskie i przewody OPGW z jednostkami ścisłymi

W krajowej sieci telekomunikacyjnej prawie nie używa się typowych głębokowodnych kabli podmorskich. Wyniki testów kabla tego typu wytwarzanego w Japonii przez nieujawnioną firmę [194] są jednak interesujące, gdyż zawiera on 12-włóknową jednostkę optyczną o konstrukcji ścisłej, podobną do używanej w rozpowszechnionych w Polsce przewodach OPGW (rys. 26-27). Przewody OPGW i OPT-PC firmy AFL Telecommunications są produkowane w USA od 1985 r. na licencji japońskiej firmy Fujikura, wykorzystującej technologie opracowane przez koncern NTT. Badany kabel zawierał jednak włókna DSF (G.653) rzadko spotykane w Polsce.

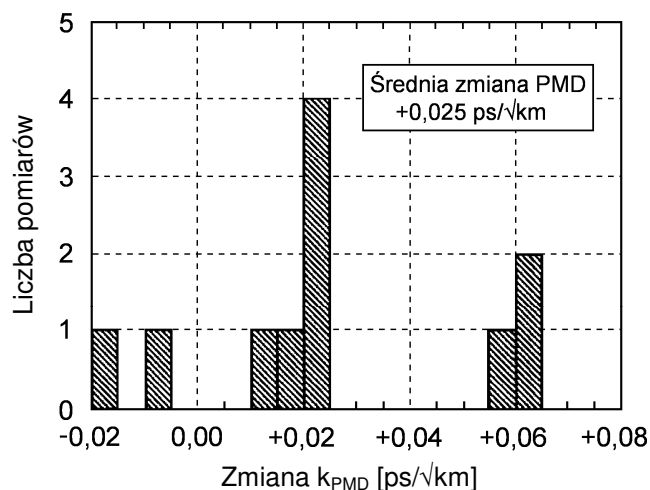
Tabela 21. Porównanie wymiarów i parametrów jednostek optycznych z przewodu OPGW firmy AFL Telecommunications i kabla podmorskiego [194].

Parametr	Jednostka	Przewód OPGW	Kabel podmorski
Liczba włókien światłowodowych	----	12	12
Średnica pręta centralnego (FRP)	mm	0,75	≈1
Średnica spiralnego ułożenia włókien ( $d_s$ )	mm	1,5	1,7
Skok skrzywienia spirali ( $p = \Lambda_s$ )	mm	125	300
Prędkość skręcania ( $\gamma$ )	obr/m	8,00	3,33
PMD indukowana wskutek skręcania ( $k_{SPMD}$ ) *	ps/ $\sqrt{km}$	0,052	0,022
Średnica zewnętrzna jednostki	mm	2,5	3,0

(\*) Wartość obliczona z zależności (87) przy założeniu  $h = 10$  m.

Przeprowadzono:

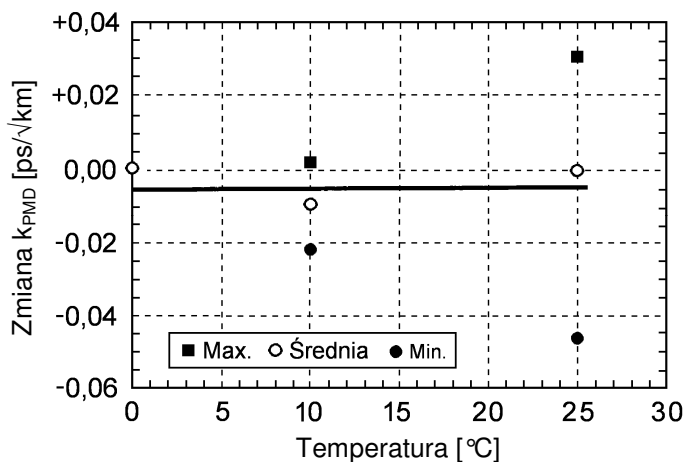
- Pomiary zmian PMD i tłumienności ( $\lambda = 1550$  nm) włókien po wykonaniu jednostki 12-włóknowej (rys. 104) i kolejnych elementów kabla. Stwierdzono ich ujemną korelację.
- Pomiary naprężeń wewnętrznych włókien światłowodowych w warunkach podanych wyżej. Naprężenie wprowadzone po wykonaniu jednostki optycznej wynosiło 0,07%.
- Badanie termiczne kabla połączone z pomiarami tłumienności i PMD.



Rys. 104. Zmiany PMD włókien G.653 w czasie produkcji jednostki 12-włóknowej [194].

Przeciętny wzrost PMD w czasie formowania jednostki optycznej wyniósł 0,025 ps/√km; podczas produkcji kabla zmniejszył się on do 0,013 ps/√km. To zgadza się z wartością PMD indukowanej przez skręcenie oczekiwaną dla podanych parametrów skręcania, jednak ze względu na sposób sumowania PMD „geometrycznej” i mechanicznej włókna oraz nieznaną długość drogi korelacji  $h$  zgodność ta może być przypadkowa. Autorzy artykułu przypisują wzrost PMD działaniu na włókna bocznych sił ściskających powstałych wskutek nawijania jednostki optycznej na szpulę  $\varnothing 1,2$  m; przewinięcie kompletnego kabla na bęben  $\varnothing 1,8$  m faktycznie zaowocowało redukcją współczynnika PMD.

Badany kabel podmorski miał elementy wytrzymałościowe wykonane z drutów stalowych i zmiany jego długości z temperaturą są podobne jak w OPGW. Uwzględniając warunki pracy na dnie morskim, pomiary zmian PMD i tłumienności włókien w kablu wykonano zmieniając temperaturę w zakresie 0...+25 °C, niestety znacznie węższym niż zakresy przyjmowane dla kabli napowietrznych. Kabel wykazał dobrą stabilność PMD (rys. 105), analogicznie jak badane w IŁ i ISMB przewody OPGW oraz ich jednostki optyczne.



Rys. 105. Zmiany PMD włókien G.653 w kablu podmorskim w funkcji temperatury [194].  
Pomiary PMD wykonywano po 3 razy metodą stałego analizatora.

Firmy Corning i Alcoa Fujikura Ltd. opublikowały raport [197] z wynikami badań eksploatacyjnego w latach 1985-95 przewodu OPGW o średnicy 11,9 mm zawierającego 12 włókien G.652 typu Corning SMF-28 w jednostce ściskanej. Przewody tego rodzaju są używane również w Polsce. Pochodził on z jednej z wczesnych partii produkcyjnych i został

zainstalowany w stanie Wisconsin (USA), gdzie pracował w temperaturach od -33°C do +39°C i w warunkach silnego opadu śniegu zimą.

Dla zdjętego z linii energetycznej 138 kV przewodu długości 3,7 km wykonano:

- badanie szczelności aluminiowej tuby centralnej pod ciśnieniem 450 kPa,
- pomiary tłumienności włókien światłowodowych ( $\lambda = 1310$  nm i 1550 nm),
- badanie termiczne w zakresie -40°C do +85°C połączone z pomiarami tłumienności,
- pomiary siły niezbędnej do usunięcia pokrycia pierwotnego z włókna,
- badania wytrzymałości mechanicznej włókien światłowodowych,
- kontrolę barw włókien kolorowanych.

Wyniki były każdorazowo pozytywne i mieściły się z zapasem w granicach ustalonych w specyfikacjach producentów z 1985 r. Nie mierzono natomiast PMD, gdyż parametr ten w 1985 r. nie był objęty żadnymi wymaganiami.

## 6. Wpływ temperatury na PMD - badania laboratoryjne

Doświadczenia przedstawione dalej wykonano w ramach udziału IŁ w europejskich programach badawczych COST-270 „Reliability of Optical Components and Devices in Communications Systems and Networks” i COST-291 „Towards Digital Optical Networks” w latach 2003-2005. Uruchomiono w tym celu specjalny program badawczy „Badania wpływu zmiennych temperatur i przyspieszonego starzenia na zmiany modowej dyspersji polaryzacyjnej (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych (ITU-T G.652 i G.655) w pokryciach ochronnych o konstrukcji ścisłej i kabli z takimi włóknami dla potrzeb udziału IŁ w europejskim projekcie badawczym COST-270” dofinansowany przez KBN na mocy decyzji Nr 632/E-242/SPB/COST/T-11/DZ198/2003-2005. Rozprawa powstała przed planowanym na czerwiec 2006 r. zakończeniem programu i nie prezentuje pełnych jego wyników.

Uzupełnieniem badań i pomiarów w laboratorium IŁ w Warszawie były dwie misje naukowe (ang. *Short Term Scientific Mission* - STSM), podczas których testowano próbki włókien i kabli dostarczonych z kraju w laboratoriach:

- ✓ Federalnego Instytutu Badań Materiałów (EMPA) w Dübendorf (Szwajcaria). STSM odbyła się w maju 2003 r. w ramach COST-270 [198].
- ✓ Politechniki w Turynie (Politecnico di Torino) i powiązanego instytutu badawczego ISMB (Istituto Superiore Mario Boella)(Włochy). STSM przeprowadzono w czerwcu 2005 r. w ramach COST-291 [139].

Obie STSM pozwoliły przeprowadzić doświadczenia analogiczne jak w IŁ za pomocą odmiennego i bardziej zautomatyzowanego sprzętu, zwłaszcza pomiary PMD przyrządami wykorzystującymi inne niż FA metody pomiarowe: IM w EMPA oraz JME w ISMB.

### 6.1. Zakres i metodyka badań

Doświadczenia przedstawione w tym rozdziale miały na celu określenie:

- ✓ zależności PMD różnych włókien w pokryciach ścisłych i kabli z nimi od temperatury,
- ✓ wpływu starzenia pokrycia ścisłego na PMD włókna oraz identyfikację jego objawów,
- ✓ korelacji między zmianami PMD i tłumienności włókien i kabli w warunkach zmiennych temperatur lub przyspieszonego starzenia

oraz weryfikację rezultatów analiz teoretycznych i danych pochodzących z literatury specjalistycznej. W tym celu wykonano:

1. Badania klimatyczne próbek w zakresie odpowiednim dla danego typu kabla lub jednostki, połączone z pomiarami PMD i tłumienności oraz obserwacją ewentualnej degradacji materiałów, na przykład deformacji, kurczenia się lub pęknięcia pokrycia. Zadaniem badań było wykrycie, czy dany obiekt wykazuje powtarzalną, deterministyczną zależność PMD od temperatury pracy i swej historii termicznej.
2. Przyspieszone starzenie próbek w wysokiej temperaturze z okresowymi pomiarami PMD i tłumienności oraz obserwacją ewentualnej ich degradacji.

Pominięto tu inne elementy programu badawczego i prac z nim powiązanych, jak przygotowanie procedur badawczych, walidacja metody i wyposażenia do pomiarów PMD, pomiary porównawcze PMD włókien światłowodowych i testowanie próbek kabli pochodzących z wadliwych partii produkcyjnych. Szczegółowe opisy większości badań znajdują się w sprawozdaniach IŁ [141] i [142] oraz publikacjach [140,198-201].

#### 6.1.1. Przygotowanie próbek do badania

Przygotowania próbki włókna lub kabla obejmowały następujące czynności:

1. Rozpakowanie, oględziny, oznakowanie próbki i sprawdzenie dostarczonej przez producenta metryczki wyrobu, w tym wyników pomiarów fabrycznych.
2. Transfer włókna lub kabla ze szpuli na rurę podporową (opcjonalnie).
3. Spawanie włókien światłowodowych oraz sznurów z wtykami FC/PC dla przyłączenia przyrządów pomiarowych i zabezpieczenie złączy w kasetach.
4. Umieszczenie próbek w komorze klimatycznej i klimatyzacja w temperaturze +20°C.
5. Pomiary tłumienności obwodu optycznego za pomocą reflektometru w temperaturze +20°C ( $\lambda = 1310 \text{ nm}$  i  $1550 \text{ nm}$ ). Weryfikacja długości optycznej próbki.
6. Pomiar kontrolny PMD w temperaturze +20°C. Minimalna akceptowana wartość PMD w przypadku badań wykonywanych w laboratorium IŁ: 0,05 ps.

Luźne zawieszanie próbek na rurach o średnicy 110-160 mm wprowadzono po wykryciu, że PMD włókien w ścisłej tubie na szpuli transportowej rośnie w temperaturach powyżej +30°C, gdyż rozszerzanie pokrycia w podwyższonej temperaturze wywołuje naciski między sąsiednimi warstwami włókna na szpuli i generuje dodatkową dwójłomność optyczną.

Tę samą metodę zastosowano do kabli stacyjnych, mimo że w ich przypadku siły działające między warstwami są mniejsze. Rurę z kablem stacyjnym zawieszano w komorze na wysokości 80 cm nad podłogą (rys. 125). Luźne zawieszenie kabla umożliwiło przepływ powietrza między zwojami i ponad 2-krotnie skróciło czas potrzebny na uzyskanie docelowej temperatury próbki. Włóknisty element wytrzymałościowy kabla stacyjnego jest doskonałym izolatorem termicznym, co przejawia się szczególnie w przypadku nawinięcia na szpuli warstwy o grubości 5-10 cm. Czas stabilizacji PMD po zmianie temperatury sięga 20 h przy badaniu odcinka o długości 4 km i masie 17 kg nawiniętego na szpuli ze sklejki [141].

Stan polaryzacji promieniowania we włóknie światłowodowym zmienia się pod wpływem zginania lub wibracji (rys. 73), co zmuszało do unieruchomienia włókien i sznurów połączeniowych na czas badania (5-20 dni). Wprowadzono w tym celu:

- Zabezpieczanie złączy spawanych i zapasów włókien w kasetach z blachy aluminiowej, sztywno mocowanych zaciskami do końców przewodu OPGW, kabla lub stołu,
- Mocowanie sznurów połączeniowych za pomocą taśm izolacyjnych samoprzylepnych lub owijania izolowanym drutem miedzianym  $\varnothing 0,5 \text{ mm}$ .
- Unieruchamianie włókien i cienkich jednostek optycznych za pomocą drutów podporowych, jeśli drgały pod wpływem strumienia powietrza z wentylatora komory.
- Umieszczanie wszystkich złączy rozłącznych, a w miarę możliwości i spawanych poza komorą klimatyczną, unieruchomionych w miejscach o stabilnej temperaturze.

### 6.1.2. Przebieg badania

Podstawowy sposób testowania polegał na ekspozycji próbki na pojedynczy cykl zmian temperatury w indywidualnie ustalonym zakresie, zmienianej z krokiem 10-20°C/h. Czas ekspozycji w każdej temperaturze (3,5-48 h) wystarczał do stabilizacji PMD w próbce. Wyjątkiem było badanie kabla stacyjnego przedstawione w p. 6.4.4.2 - Nr 2.

Badanie klimatyczne, w którym temperatura w komorze zmieniana jest w sposób skokowy lub quasi-skokowy w czasie znacznie krótszym od stałej czasowej wymiany ciepła pomiędzy próbką, a otoczeniem dostarcza danych o zachowaniu się testowanego obiektu:

1. **Statycznym:** w każdej ustalonej temperaturze otoczenia,
2. **Dynamicznym:** zanim ustali się stan próbki w nowej temperaturze.

Odpowiadają im reżimy „izotermiczny” i „adiabatyczny” opisane w rozdziale 5.2.1.

Czas przejścia z jednej temperatury do drugiej ze standardową dla badań klimatycznych kabli szybkością 20°C/h wynosi 0,5-3 h i jest zawsze krótszy od czasu stabilizacji PMD, który dla włókien i kabli stacyjnych luzem wynosi 1-8 h, a dla OPGW przeciętnie 12 h.



Dla potrzeb niniejszej pracy testowano przede wszystkim efekty statyczne, w celu ustalenia wpływu odkształceń termicznych pokrycia na parametry transmisyjne włókien.

Przebieg badania zależności PMD od temperatury był następujący:

1. Klimatyzacja próbki w komorze w temperaturze +20°C przez minimum 24 h.
2. Pomiary tłumienności i PMD w temperaturze +20°C, służące za odniesienie. PMD mierzono w okresie 1-6 h co 10-20 minut i obliczano średnią z 6-20 wyników.
3. Ekspozycja próbki na szereg temperatur obejmujących cały zakres temperatur pracy danego wyrobu, np. -40/-20/0/+20/+40/+60/+80°C dla przewodu OPGW, oraz na koniec +20°C, przez czas minimum 2-krotnie dłuższy od niezbędnego dla stabilizacji PMD włókien w próbce. Komora Feutron KPK umożliwiała tylko skokowe zmiany temperatury.
4. Pomiary PMD w odstępach 10-60 minut. Po 1 pomiarze w jednej temperaturze zmieniano nastawę komory i pomiary trwały przez prawie cały czas kolejnej fazy badania. Następnie wykonywano pojedynczy pomiar tłumienności włókien światłowodowych.
5. Po przeglądzie wyników i charakterystyk spektralnych określano, jak długo trwała stabilizacja własności obiektu i odrzucano wyniki pomiarów PMD pochodzące z tego okresu. Z pozostałych obliczano wartość średnią (rozdział 3.3.3), porównywaną do wartości początkowej zmierzonej w temperaturze +20°C (p. 2).

Wykonano też badania wpływu temperatur cyklicznie zmiennych i przyspieszonego starzenia w temperaturze +85°C z pomiarami PMD. Ich opisy znajdują się w rozdziałach 6.4.4.2 i 6.4.6.3.

### **Pomiary tłumienności włókien światłowodowych**

Tłumienność włókna światłowodowego, szczególnie mierzona dla  $\lambda \geq 1550$  nm wzrasta łatwo pod wpływem zgieć, na przykład po wyboczeniu włókna wewnątrz pokrycia ścisłego lub uszkodzeniu ośrodka kabla, dostarczając informacji o stanie włókna światłowodowego w kablu pracującym w zmiennych warunkach. Badania włókien w tubach ścisłych i półścisłych wykonywane w ramach pracy odbywały się często w rozszerzonym w porównaniu do określonego przez producenta zakresie temperatur, co może spowodować degradację pokrycia włókna i poważny wzrost tłumienności względem wartości początkowej.

Pomiar PMD metodą stałego analizatora opisany w rozdziale 3.2.2 wymaga kalibracji charakterystyki spektralnej tłumienności włókna; należy kontrolować tłumienność próbki w trakcie badania termicznego lub starzeniowego i powtórzyć kalibrację, jeśli zmieni się ona o więcej niż 2 dB. Nie sposób góry określić, który z parametrów badanego obiektu ulegnie zmianie, gdyż na ogół nie ma korelacji między zmianami tłumienności i PMD.

## **6.2. Aparatura pomiarowa**

### **6.2.1. Instytut Łączności**

Stanowisko badawcze umożliwiało pomiary PMD i tłumienności badanych próbek poddawanych działaniu zmiennych temperatur lub przyspieszonego starzenia w komorze klimatycznej. PMD mierzono cyklicznie przez ustalony przedział czasu, natomiast pomiary tłumienności za pomocą reflektometru (OTDR) wymagały ręcznego przełączenia światłowodów i wykonywano je jednorazowo w wybranych temperaturach.

Pomiary PMD prowadzono metodą stałego analizatora (FA). Metodę pomiaru i sposoby obróbki danych pomiarowych są przedstawione w rozdziałach 3.3.2 i 3.3.3.

Do sterowania źródłem promieniowania, gromadzenia wyników pomiarów z miernika mocy optycznej, zliczania ekstremów i wstępnej prezentacji wyników służył komputer z oprogramowaniem w języku LabView 6. Wyniki zapisywano w formie plików tekstowych importowanych do arkusza kalkulacyjnego Excel 2002. Pomiar trwał 1-3 minut przy przestrajaniu źródła z krokiem 1 nm. Minimalna wykrywana wartość PMD wynosiła 0,02 ps.

Reflektometr (OTDR) Tektronix TFP2 Fiber Master z wkładką FS1315, wyposażony w odcinek wstępny włókna długości 500 m dla zredukowania strefy martwej pomiaru umożliwił pomiary tłumienności dla długości fal 1310 nm i 1550 nm oraz długości włókien światłowodowych i strat złączy w czasie przygotowań próbek przed badaniem. Podawana przez producenta dokładność pomiaru tłumienności przy pomocy wkładki FS1315 wynosi  $\pm 5\%$ , zakres długości impulsów optycznych 10 ns - 10  $\mu$ s, a dynamika pomiaru do 29 dB. Wyniki pomiarów zapisywano na dyskietkach w postaci plików .wfm, odczytywanych i analizowanych na komputerze PC z programem Tektronix FM-TAP 3.1.

Używano dwóch komór klimatycznych:

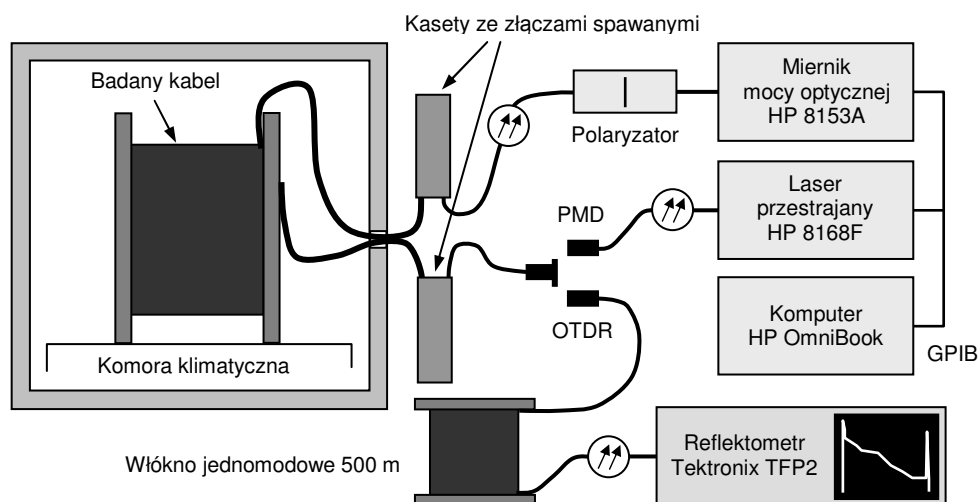
1. Feutron KPK 3524/58 o wymiarach przestrzeni roboczej 60x60x60 cm i zakresie temperatur od  $-55^{\circ}\text{C}$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ ,
2. Heraeus-Voetsch NEMA HCZ 3005 N o przestrzeni roboczej 150x200x180 cm. Po założeniu dodatkowej izolacji termicznej zakres temperatur wynosił od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ .

Komora (1) służyła do testowania włókien i jednostek optycznych na szpulach, zawieszonych na poziomej rurze podporowej lub układanych luzem w zwojach. Jest to urządzenie starszego typu, bez rozbudowanego programowania cykli temperaturowych. Testowanie bębnow z przewodami OPGW i kabli stacyjnych odbywało się w komorze (2), przystosowanej do testowania ciężkich obiektów o dużych wymiarach i wyposażonej w programator cyfrowy. Stosowano zawsze wymuszony wentylatorem obieg powietrza w komorze dla szybszego ustabilizowania temperatury próbki, którą umieszczano w sposób zapewniający obieg powietrza ze wszystkich stron.

Wykaz przyrządów:

1. Przeszrajane źródło promieniowania: Hewlett-Packard HP8168F.
2. Polaryzator: Advanced Fiber Resources (AFR) ILP-55-1-L-2-Q.
3. Miernik mocy optycznej: Hewlett-Packard HP8153A z wkładką HP81532A.
4. Komputer: Hewlett-Packard OmniBook 2100 z Windows 98SE PL i LabView 6.0.
5. Reflektometr światłowodowy: Tektronix TFP2 Fiber Master z wkładką FS 1315.
6. Odcinek wstępny światłowodu do reflektometru: kabel YOTKS 1J długości 502 m.
7. Komory klimatyczne: Heraeus-Voetsch NEMA HCZ 3005 N, Feutron KPK 3524/58.

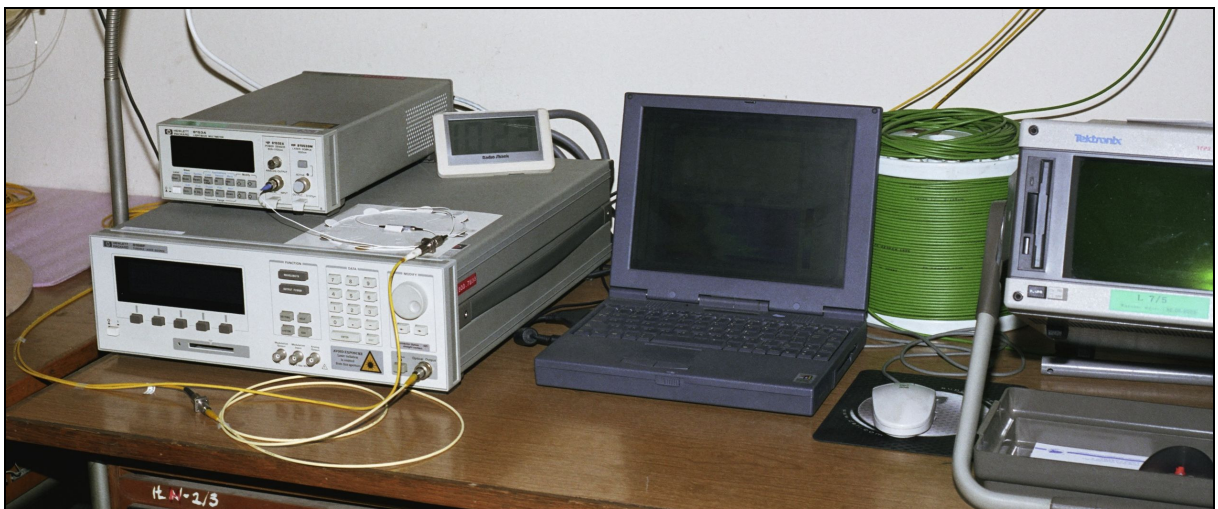
Schemat blokowy stanowiska przedstawia rys. 106, a widok aparatury rys. 107 i 108.



Rys. 106. Stanowisko do badań wpływu czynników klimatycznych na PMD i tłumienność kabli światłowodowych w 1 $\lambda$ .



Rys. 107. Badanie termiczne włókna światłowodowego OTO-3 na szpuli w komorze Feutron KPK.



Rys. 108. Światłowodowe przyrządy pomiarowe w laboratorium IŁ. Od lewej: źródło promieniowania HP 8168F, miernik mocy HP 8153A (na górze), polaryzator, komputer, odcinek wstępny kabla YOTKS 1J (z tyłu), reflektometr TFP2.

### 6.2.2. EMPA

Laboratorium dysponowało komorami klimatycznymi z programowaniem cyfrowym i miernikiem PMD EXFO FTB-5500 PMD pracującym metodą interferometryczną (IM). Zaletą tego przyrządu był krótki czas pomiaru i rejestracja wyników za pomocą komputera PC, wadą – wąski zakres pomiarowy, w szczególności minimalne wskazanie równe 0,05 ps.

Szpule z włóknami i kablami ustawiono w komorze klimatycznej z wymuszonym obiegiem powietrza. Co 5 minut mierzono temperatury powietrza i próbek za pomocą termopar i PMD jednej próbki; PMD innych mierzono ręcznie w wybranych temperaturach.

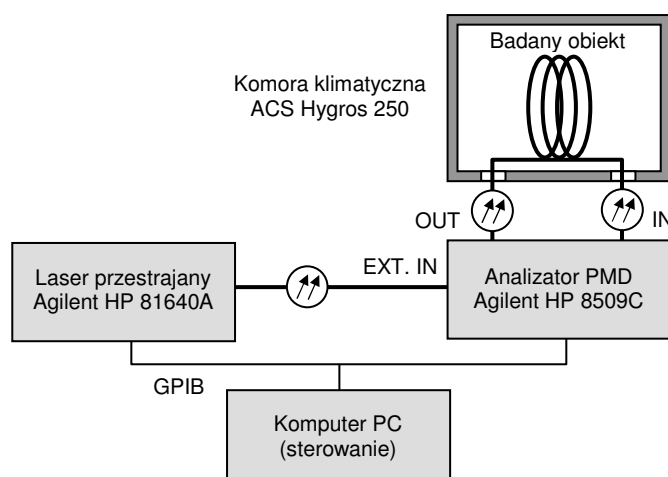
Wykaz przyrządów:

1. Komora klimatyczna: Weiss Umwelttechnik SB2/300/80.
2. Źródło promieniowania LED 1550 nm: EXFO FLS-110 Single Fiberoptic Source model FLS-110-03P-EA.
3. Miernik PMD: EXFO FTB-300 Universal Test System model FTB-300-D2M1N4 z wkładką miernika PMD: FTB-5500 PMD - model FTB-5523 PMD 1310-1550 nm.
4. Multimetr cyfrowy (do pomiarów temperatury): Keithley 2000-20 Multimeter.
5. Komputery: Compaq DeskPro XL5133, Olivetti M6-460.

### 6.2.3. ISMB - PhotonLab

Laboratorium PhotonLab w ISMB posiadało aparaturę firmy Agilent do pomiarów PMD metodą analizy macierzy Jonesa (ang. *Jones Matrix Eigenanalysis* - JME), uznaną w zaleceniu ITU-T G.650.2 [97] za metodę odniesienia. Próbki umieszczano w komorze klimatycznej z wymuszonym obiegiem powietrza. Schemat zestawu przedstawia rys. 109.

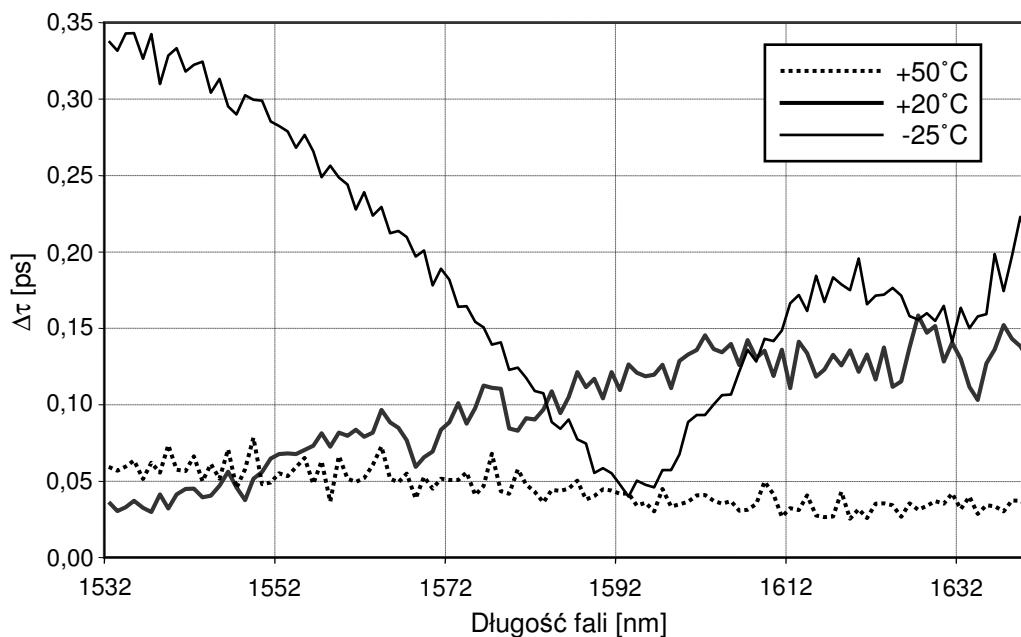
Pomiary wykonywano w zakresie długości fal 1531-1640 nm. Zaletą zestawu w porównaniu do aparatury w ŁL była wyższa zdolność rozdzielcza DGD, lepsza niż 0,005 ps i pomiar charakterystyki  $\Delta\tau(\lambda)$ , zamiast określenia wyłącznie  $\langle\Delta\tau\rangle$  dla całego przedziału spektralnego (PMD) jak w metodzie stałego analizatora. Długość fali zmieniano z krokiem 1 nm. Program sterujący zapisywał wyniki w formie plików tekstowych z ciągiem wartości DGD. Przykłady charakterystyk DGD( $\lambda$ ) z testów w ISMB przedstawiają rys. 110 i 111.



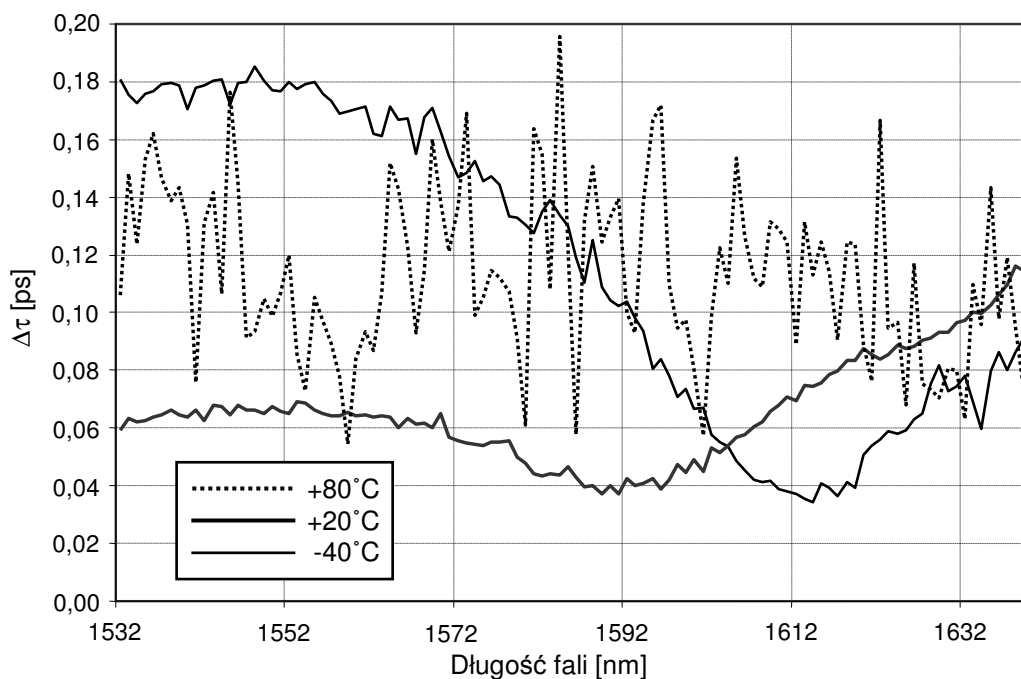
Rys. 109. Zestaw przyrządów używany w laboratorium ISMB – PhotonLab.

Wykaz urządzeń:

- Przeszrajane źródło promieniowania: Agilent HP 8164A z wkładką HP 81640A.
- Analizator PMD: Agilent HP 8509C.
- Oprogramowanie: MATLAB + sterowniki przyrządów Agilent.
- Komora klimatyczna: Angelantoni Industrie ACS – Hygros 250.



Rys. 110. Charakterystyki DGD( $\lambda$ ) włókna G.652 w ścisłym pokryciu (SUM-1).



Rys. 111. Charakterystyki DGD( $\lambda$ ) jednostki optycznej OPGW z 12 włóknami G.652 (J-4).

### 6.3. Testowane włókna i kable światłowodowe

Przedmiotem badań były:

- ✓ Włókna światłowodowe G.652 w pokryciu pierwotnym  $\varnothing 0,245$  mm.
- ✓ Włókna światłowodowe G.652 i G.655 w pokryciu ścisłym  $\varnothing 0,9$  mm.
- ✓ Kable stacyjne z włóknami G.652 i G.655 w pokryciu ścisłym  $\varnothing 0,9$  mm.
- ✓ Włókno światłowodowe G.652 w pokryciu półścisłym  $\varnothing 0,9$  mm.
- ✓ Przewód OPGW z jednostką optyczną  $\varnothing 2,5$  mm zawierającą 12 włókien G.652.

- ✓ Jednostki optyczne wydobyte z przewodu OPGW j.w.
- ✓ Jednostka optyczna z 4 włóknami G.652 przeznaczona dla kabli „pustych”.

Włókna w pokryciu pierwotnym stanowiły obiekt porównawczy, pozwalający określić wpływ pokrycia ścisłego lub półścisłego na zmiany zachowania włókien światłowodowych. Wszystkie testowane włókna i kable należą do typów używanych w Polsce; większość z nich pochodziła od producentów krajowych. Za wyjątkiem OPGW, próbki uzyskano fabrycznie nowe i składowano przed badaniem w temperaturze pokojowej.

### 6.3.1. Włókna światłowodowe w pokryciu pierwotnym

Włókna bezbarwne, nawinięte na fabrycznych szpulach z tworzywa sztucznego.

- Włókno światłowodowe G.652 typu SM-02R. Producent: Optical Fibres Ltd. Długość: 6400 m. Rok produkcji: 1997. Oznaczenie próbki: OTO-1.
- Włókno światłowodowe G.652 typu SM-02R. Producent: Optical Fibres Ltd. Długość: 6450 m. Rok produkcji: 1997. Oznaczenie: OTO-2.

### 6.3.2. Włókna światłowodowe w ścisłej tubie

Włókna takie stanowią półprodukt do wytwarzania kabli stacyjnych.

- Włókno w pokryciu ścisłym z tworzywa akrylowego utwardzanego promieniowaniem ultrafioletowym  $\varnothing 0,9$  mm, typu J2B. Dostawca: TP S.A. - OTO Lublin. Włókno G.652.B typu SMF-MC firmy OFS [45]. Długość: 4555 m. Rok produkcji: 2001. Oznaczenie: OTO-3.
- Włókno w pokryciu ścisłym z tworzywa akrylowego utwardzanego promieniowaniem ultrafioletowym  $\varnothing 0,9$  mm, typu J2B. Dostawca: TP S.A. - OTO Lublin. Włókno G.652.B typu SMF-MC firmy OFS. Długość: 1645 m. Rok produkcji: 2004. Oznaczenie: OTO-4.
- Włókno światłowodowe w pokryciu ścisłym z tworzywa akrylowego utwardzanego promieniowaniem ultrafioletowym, o średnicy zewnętrznej 0,9 mm, typu J5A. Dostawca: TP S.A. - OTO Lublin. Włókno G.655.A typu TrueWave RS firmy OFS [48]. Długość: 5034 m. Rok produkcji: 2005. Oznaczenie: OTO-5.
- Włókno światłowodowe G.652 w 2-warstwowym pokryciu ścisłym z silikonu i poliamidu  $\varnothing 0,4/0,9$  mm. Producent: Sumitomo (Japonia). Długość 460 m. Rok produkcji: 1997. Oznaczenie: SUM-1.

### 6.3.3. Włókna światłowodowe w półścisłej tubie

Półprodukt do wytwarzania kabli stacyjnych alternatywny wobec włókien w ścisłej tubie.

- Włókno w pokryciu półścisłym  $\varnothing 0,9$  mm, typu 1J. Dostawca: Tele-Fonika Kable S.A. Włókno G.652.D typu SMF-28e firmy Corning [29]. Długość: 3113 m. Rok produkcji: 2005. Oznaczenie: TFK-2.
- Włókno w pokryciu półścisłym  $\varnothing 0,9$  mm, typu 1J. Dostawca: Tele-Fonika Kable S.A. Włókno G.652.D typu SMF-28e firmy Corning. Długość: 3067 m. Rok produkcji: 2005. Oznaczenie: TFK-3.

Oba odcinki połączono i testowano razem. Długość po montażu wynosiła 6177 m.

### 6.3.4. Kable stacyjne z włóknami w ścisłej tubie

- Kabel stacyjny W-NOTKSd 1J-2,0 firmy Tele-Fonika Kable S.A., w powłoce z tworzywa trudnopalnego bezhalogenowego  $\varnothing 2$  mm. Włókno G.652.D typu E-SMF firmy Alcatel [39]. Długość: 4040 m. Rok produkcji: 2004. Oznaczenie: NOTKS-1.
- Kabel stacyjny W-NOTKSdD 1J5A, w powłoce z tworzywa trudnopalnego bezhalogenowego  $\varnothing 2$  mm. Producent: TP S.A. - OTO Lublin. Włókno G.655.A typu

TrueWave RS firmy OFS [48]. Długość: 4083 m. Rok produkcji: 2005. Oznaczenie: OTO-7.

- Kabel stacyjny 2-włóknowy 2NXOTKS 2Jm (rys. 24), w powłoce z tworzywa trudnopalnego bezhalogenowego o przekroju 2,8x5,6 mm. Producent: TP S.A. - OTO Lublin. Włókna G.652 typu SMF-MC firmy OFS. Długość: 890 m. Rok produkcji: 1997. Oznaczenie: OTO-E.

Włókna światłowodowe w próbce OTO-E zespawano razem, uzyskując długość 1780 m.

### 6.3.5. Jednostka optyczna dla kabli pustych

- 4-włóknowa jednostka optyczna typu EPFU  $\varnothing 1,0$  mm z miękkim tworzywem wiążącym i mikrokulkami szklanymi na powierzchni zewnętrznej, bez elementu wytrzymałościowego (rys. 28). Włókna G.652 typu SM-02R. Producent: Optical Fibres Ltd. Długość: 3325 m. Rok produkcji: 1997. Oznaczenie próbki: EPFU.

Włókna w próbce zespawano razem, uzyskując odcinek długości 13300 m.

### 6.3.6. Przewody OPGW i jednostki optyczne OPGW

Badano przewody AlumaCore firmy Alcoa Fujikura Ltd. (USA) z pancerzem jednowarstwowym zawierające jednostki optyczne  $\varnothing 2,5$  mm o budowie ściślejszej z 12 włóknami G.652 Corning SMF-28, umieszczone luźno w centralnej rurce aluminiowej  $\varnothing 4,5/6,5$  mm bez żelu uszczelniającego. Konstrukcję OPGW i jego ośrodka pokazano na rys. 26 i 27.

OPGW miały za sobą kilkuletnią eksploatację na napowietrznych liniach energetycznych 110 kV lub 220 kV i wykazywały objawy zużycia: powierzchniową korozję drutów opancerzenia i rurki aluminiowej, zanieczyszczenia i wyblaknięcie kolorowego znakowania włókien światłowodowych. Dane identyfikacyjne nie są dostępne, ale konstrukcja przewodów wskazuje, że wyprodukowano je najprawdopodobniej w latach 1993-96. Zostały zdjęte w czasie remontów i uzyskane przez IŁ jako złom w 2004 r. [141]. Stan próbek reprezentuje najbardziej zużyte fragmenty sieci energetycznych w kraju.

Otrzymało 4 odcinki o użytecznych długościach: 460 m (Nr 1), 570 m (Nr 2), 400 m (Nr 3) i 170 m (Nr 4). Przewody należały do typów: OPT-GW 30/38 mm<sup>2</sup>/496 o średnicy 12,7 mm (Nr 1,2,4) i OPT-GW 14/37 mm<sup>2</sup>/443 o średnicy 11,2 mm (Nr 3). Odcinki Nr 3 i Nr 4 miały zawilgoconą rurkę z ośrodkiem światłowodowym wskutek składowania bez kapturków uszczelniających i nie było możliwości ich osuszenia.

Odcinki Nr 1 i Nr 2 testowano na bębnach drewnianych, po zespawaniu wszystkich włókien światłowodowych. Oznaczenia próbek: AFL-1, AFL-2.

Z odcinka Nr 3 wydobyto w dwóch częściach (170+230 m) jednostkę optyczną bez obwoju. Włókna z obu części połączono razem. Próbką otrzymała oznaczenie J-3. Z odcinka Nr 4 wyciągnięto jednostkę optyczną, zachowując obwój z folii polimidowej (Kapton firmy DuPont) i wzmocnienie z włókniny aramidowej (Kevlar firmy DuPont) i poddano suszeniu i klimatyzacji przez 6 miesięcy. Oznaczenie próbki: J-4.

Wydobycie jednostki optycznej ułatwiło badania dzięki radykalnemu zredukowaniu bezwładności termicznej. Masa 400 m jednostki 12-włóknowej wynosi około 4 kg, a bębna drewnianego z 400 m przewodu OPGW o średnicy 12,7 mm ponad 200 kg.

Pomiary reflektometryczne wykazały ciągłość i prawie normalną tłumienność włókien światłowodowych, uwzględniając margines błędów przy pomiarach krótkich odcinków.



## 6.4. Wyniki badań

### 6.4.1. Włókna światłowodowe G.652 w pokryciu pierwotnym

Miejsce i data badania: Instytut Łączności, 18-27.05.2004 r.

Komora termiczna: Feutron KPK 3524/58

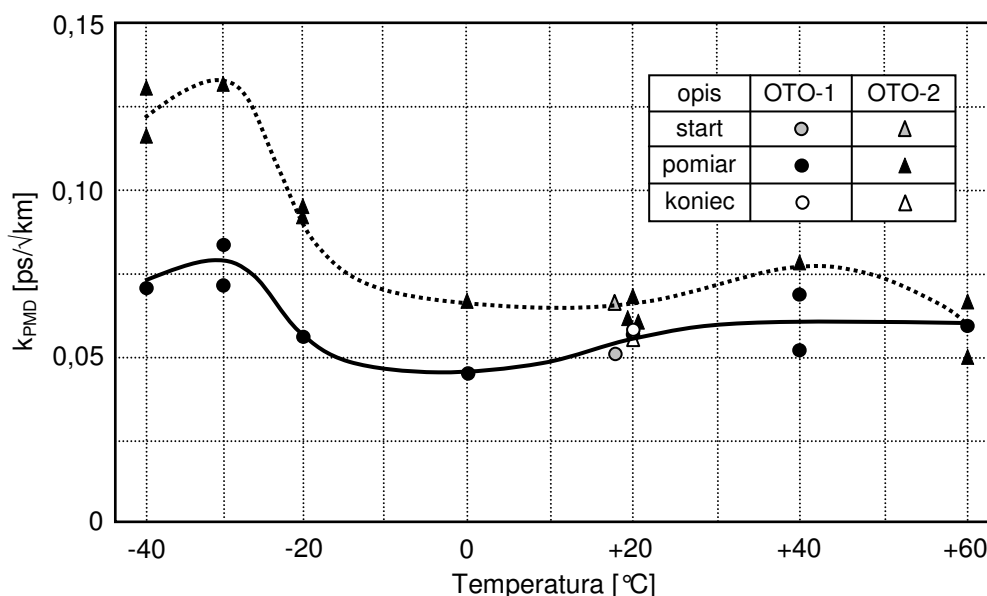
Zakres temperatur: -40...+60 °C

Czas ekspozycji:  $\geq 24$  h

Nawinięcie próbek: na szpulach transportowych z ABS.

Długości włókien: OTO-1: 6409 m, OTO-2: 6458 m.

Oba odcinki badano razem. Wyniki pomiarów w stanie termicznie ustalonym przedstawiono w tabelach 22-23 i na rys. 112.



Rys. 112. Charakterystyki PMD – temperatura włókien G.652 OTO-1 i OTO-2.

#### Uwagi:

1. PMD wzrasta w temperaturze poniżej -10°C i osiąga maksimum przy -30°C.
2. Próbkę różnią się wartością PMD indukowanej w niskiej temperaturze, natomiast charakter zależności PMD - temperatura jest identyczny.
3. Zmiany tłumienności mieściły się w granicach niepewności pomiarów.



Tabela 22. Wyniki pomiarów włókna światłowodowego G.652 w pokryciu pierwotnym OTO-1.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumiennosc $\lambda = 1310$ nm	Tłumiennosc $\lambda = 1550$ nm
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	%	dB/km	dB/km
+17	<b>0,130</b>	<b>0,051</b>	<b>100</b>	<b>0,305</b>	<b>0,191</b>
0	0,116	0,046	89	0,308	0,191
-20	0,144	0,057	108	0,313	0,190
-20	-----	-----	-----	0,309	0,192
-30	0,215	0,085	165	0,306	0,193
-30	0,182	0,072	140	0,306	0,192
-40	0,180	0,071	138	0,304	0,199
-40	-----	-----	-----	0,308	0,193
+20	0,145	0,057	112	0,310	0,195
+20	-----	-----	-----	0,312	0,194
+40	0,132	0,052	102	0,314	0,189
+40	0,173	0,068	133	0,323	0,193
+60	0,152	0,060	117	0,320	0,192
+60	-----	-----	-----	0,314	0,193
+20	0,148	0,058	114	0,307	0,193

Tabela 23. Wyniki pomiarów włókna światłowodowego G.652 w pokryciu pierwotnym OTO-2.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumiennosc $\lambda = 1310$ nm	Tłumiennosc $\lambda = 1550$ nm
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	%	dB/km	dB/km
+17	0,164	0,065	109	<b>0,309</b>	<b>0,195</b>
+20	<b>0,151</b>	<b>0,059</b>	<b>100</b>	-----	-----
0	0,174	0,068	115	0,312	0,194
-20	0,236	0,093	156	0,313	0,192
-20	0,243	0,096	161	0,309	0,193
-30	0,338	0,133	224	0,311	0,195
-30	-----	-----	-----	0,313	0,191
-40	0,292	0,115	193	0,319	0,200
-40	0,333	0,131	221	0,321	0,197
+20	0,152	0,060	101	0,316	0,193
+20	0,172	0,068	114	0,319	0,195
+40	0,199	0,078	132	0,318	0,199
+40	-----	-----	-----	0,322	0,194
+60	0,124	0,049	82	0,324	0,197
+60	0,168	0,066	111	0,320	0,199
+20	0,143	0,056	95	0,317	0,190

## 6.4.2. Włókna światłowodowe w ścisłej tubie

### 6.4.2.1. Włókna G.652 w ścisłej tubie – próbki OTO-3 i OTO-4

Miejsce badania: Instytut Łączności, Warszawa  
 Data badania: 4-15.10.2004 (1), 3-10.04.2005 r. (2), 10-17.04.2005 r. (3).  
 Komora klimatyczna: Feutron KPK 3524/58  
 Zakres temperatur: -40...+50 °C  
 Czas ekspozycji: 12 h.  
 Nawinięcie: na szpuli z ABS o średnicy bieżni 180 mm (badania Nr 1-2),  
 zawieszenie na rurze HDPE o średnicy 160 mm (badanie Nr 3).  
 Długość włókna: 6200 m (badanie Nr 1), 4555 m (badania Nr 2-3).

W czasie badań Nr 1-2 włókien nawiniętych na szpuli wystąpił niezgodny z przewidywaniami wzrost PMD w temperaturze powyżej +25 °C, który przypisano naciskom pomiędzy warstwami włókien, kiedy ich pokrycie rozszerza się w temperaturach wyższych od tej, w jakiej włókno przewijano. Test Nr 3 wykonany na włóknie zawieszonym swobodnie na rurze (rys. 116) potwierdził to przypuszczenie i ujawnił charakterystykę termiczną PMD wolną od artefaktów pochodzących od oddziaływań między zwojami włókna. Wyniki doświadczeń zestawiono w tabelach 24-26 i na rys. 113-115.

Tabela 24. Wyniki pomiarów włókien G.652 w ścisłej tubie OTO-3 i OTO-4: badanie Nr 1.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność $\lambda = 1310$ nm	Tłumienność $\lambda = 1550$ nm
°C	ps	ps/km	%	dB/km	dB/km
+20	0,086	<b>0,035</b>	100	<b>0,297</b>	<b>0,192</b>
-40	0,408	0,164	474	-----	-----
+20	0,095	0,038	110	-----	-----
+10	0,101	0,041	117	-----	-----
0	0,133	0,053	154	-----	-----
-18	0,196	0,079	228	-----	-----
-10	0,134	0,054	156	-----	-----
-20	0,138	0,055	161	-----	-----
+30	0,109	0,044	127	-----	-----
+50	0,123	0,049	143	-----	-----
+40	0,097	0,039	113	-----	-----
+35	0,127	0,051	148	-----	-----
+20	0,104	0,042	121	-----	-----

#### Uwagi:

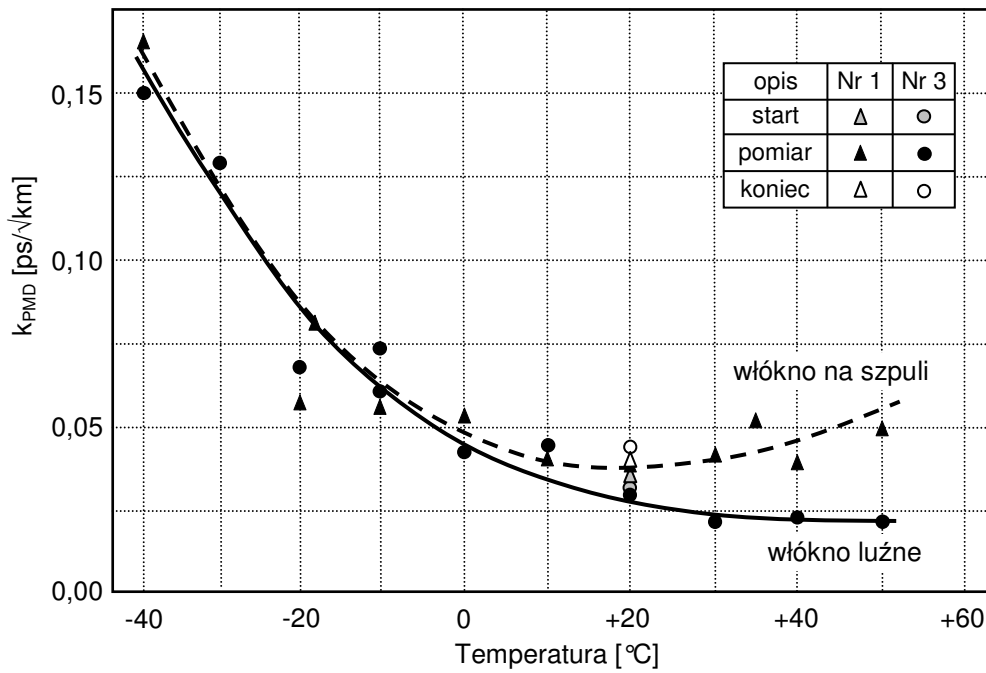
1. Badane włókno w pokryciu ścisłym wykazuje silny, deterministyczny wzrost PMD przy obniżeniu temperatury. Zakres zmienności PMD osiąga 7:1.
2. Porównanie wyników badań Nr 1 i 2 wykazuje, że zmiany PMD we włóknie na szpuli wyraźnie zależą od historii termicznej próbki.
3. Tłumienność włókna podczas wszystkich testów była stabilna ( $<\pm 0,02$  dB/km).
4. Charakter i skala zmian długości włókna z temperaturą (rys. 116) są zgodne z danymi dostępnymi w literaturze (rys. 88) i wynikami obliczeń w rozdziale 4.3. W temperaturach do -40 °C włącznie brak objawów wybożenia włókna światłowodowego, które ogranicza maksymalne skrócenie włókna (rys. 87-89).

Tabela 25. Wyniki pomiarów włókna G.652 w ścisłej tubie OTO-3: badanie Nr 2.

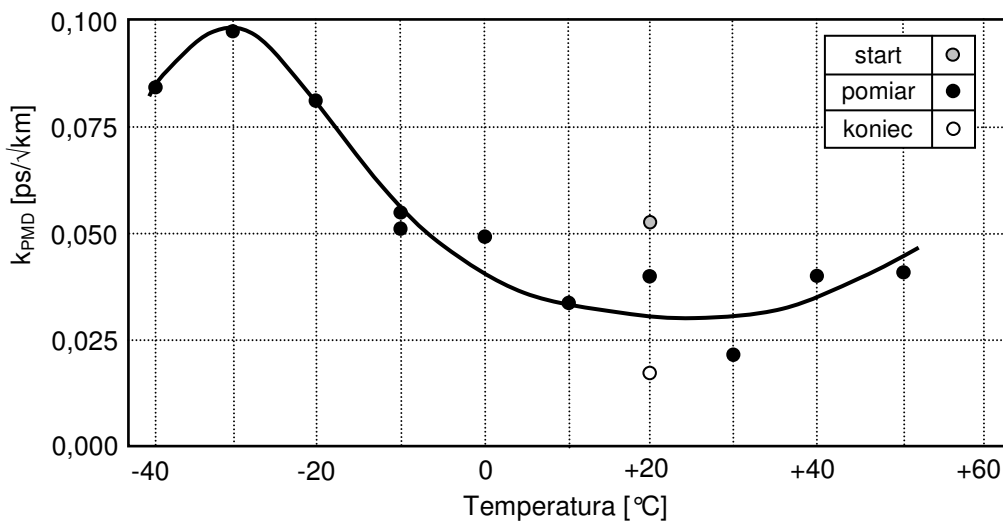
Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność $\lambda = 1310$ nm	Tłumienność $\lambda = 1550$ nm
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	[%]	dB/km	dB/km
<b>+20</b>	<b>0,110</b>	<b>0,052</b>	<b>100</b>	<b>0,319</b>	<b>0,189</b>
+50	0,086	0,040	78	-----	-----
+40	0,083	0,039	75	-----	-----
+30	0,047	0,022	43	-----	-----
+20	0,083	0,039	75	-----	-----
+10	0,072	0,034	65	-----	-----
0	0,104	0,049	95	0,323	0,189
-10	0,115	0,054	105	-----	-----
-20	0,173	0,081	157	0,305	0,179
-30	0,209	0,098	190	-----	-----
-40	0,184	0,086	167	0,313	0,182
-10	0,108	0,051	98	-----	-----
+20	0,032	0,015	29	0,312	0,186

Tabela 26. Wyniki pomiarów włókna G.652 w ścisłej tubie OTO-3 luzem: badanie Nr 3.

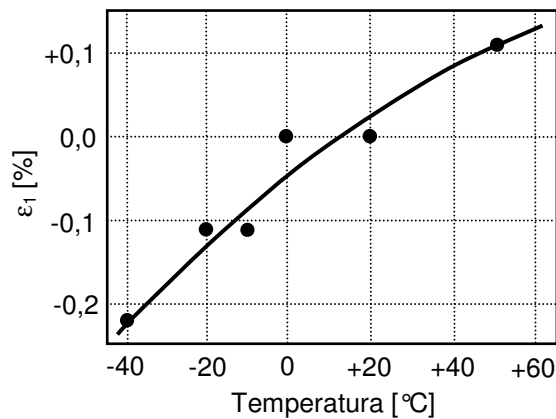
Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność $\lambda = 1310$ nm	Tłumienność $\lambda = 1550$ nm
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	[%]	dB/km	dB/km
<b>+20</b>	<b>0,068</b>	<b>0,032</b>	<b>100</b>	<b>0,307</b>	<b>0,177</b>
+50	0,047	0,022	68	0,320	0,185
+40	0,049	0,023	71	-----	-----
+30	0,046	0,022	67	-----	-----
+20	0,064	0,030	93	-----	-----
+10	0,095	0,045	138	-----	-----
0	0,089	0,042	130	-----	-----
-10	0,157	0,074	229	0,317	0,186
-20	0,142	0,067	207	-----	-----
-30	0,273	0,128	399	-----	-----
-40	0,321	0,150	470	-----	-----
-10	0,127	0,060	186	-----	-----
+20	0,091	0,043	133	0,318	0,185



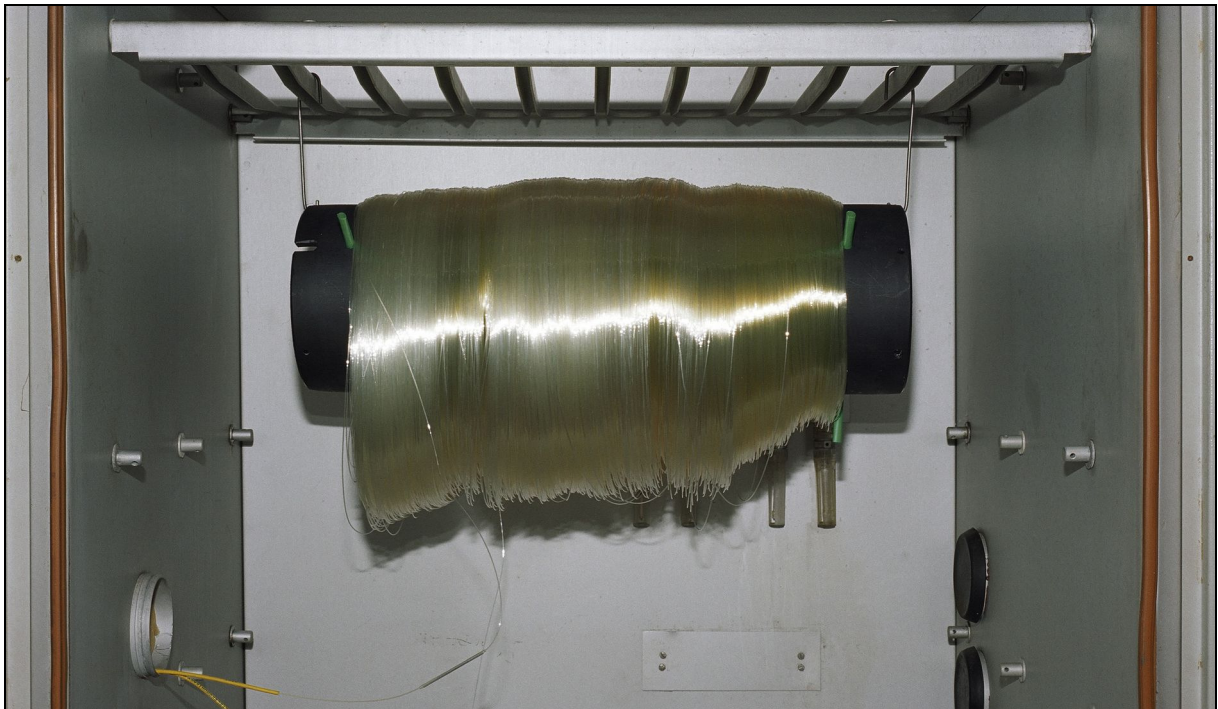
Rys. 113. Charakterystyki PMD - temperatura włókna OTO-3 na szpuli (Nr 1) i luźne (Nr 3).



Rys. 114. Charakterystyka PMD - temperatura włókna OTO-3. Badanie Nr 2.



Rys. 115. Zmiany długości włókna OTO-3 z temperaturą. Dane z pomiarów reflektometrycznych.  $\alpha \approx 4,5 \times 10^{-5}/K$  (-40...+20°C).



Rys. 116. Włókno w ścisłej tubie (OTO-3) zawieszono luźno w komorze Feutron KPK.

#### 6.4.2.2. Włókna G.652 w ścisłej tubie - próbka SUM-1

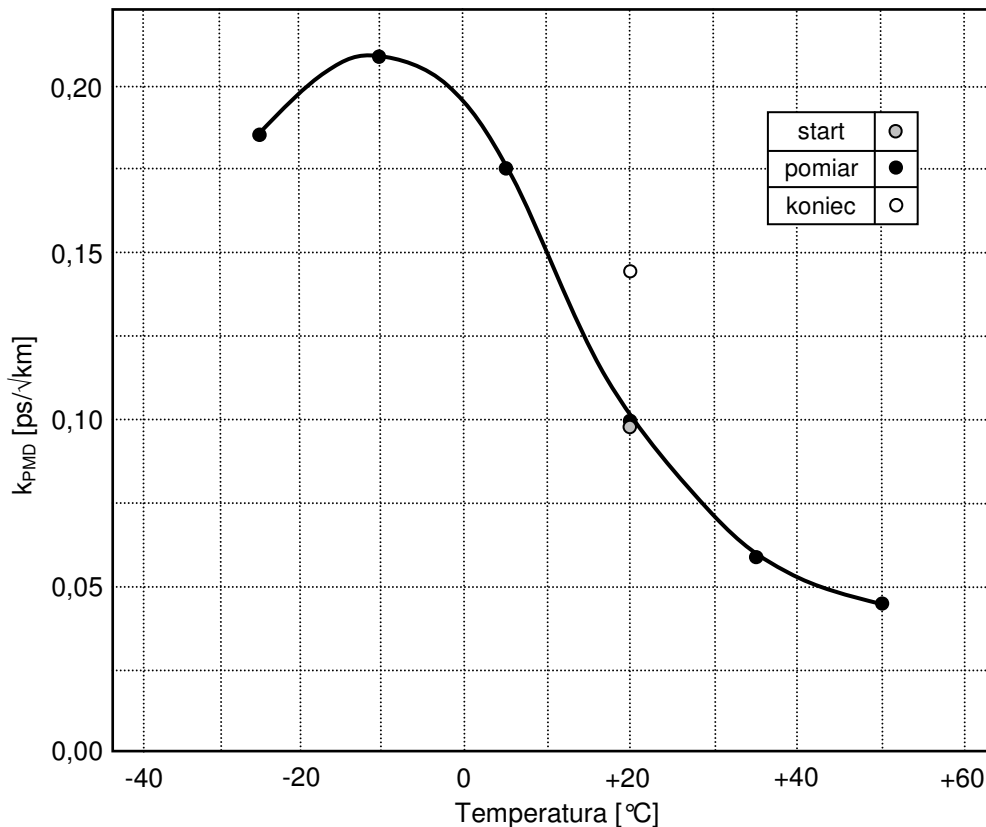
Miejsce badania:	ISMB, Turyn
Data badania:	21-23.06.2005 r.
Zakres temperatur:	-25...+50 °C.
Szybkość zmian temperatury:	20 °C/h.
Czas ekspozycji:	5,25 h.
Nawinięcie próbki:	włókno ułożone luzem w zwoje Ø300 mm.
Długość włókna:	460 m.

W czasie badania wykryto silne efekty relaksacyjne, powodujące charakterystyczne zmiany PMD w stanach termicznie nieustalonych. Odpowiednie charakterystyki przedstawia rys. 75. Omówienie mechanizmów tego zjawiska znajduje się w rozdziałach 3.3.4 i 4.7.1.

W tabeli 27 i na rys. 117 zaprezentowano dane dotyczące zmian PMD w stanach termicznie ustalonych. Nie wykonywano pomiarów tłumienności.

Tabela 27 PMD włókna w ścisłej tubie (SUM-1) w czasie badania termicznego.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Względna wartość PMD
°C	ps	ps/√km	%
+20	<b>0,098</b>	<b>0,144</b>	<b>100</b>
-25	0,185	0,273	189
-10	0,211	0,311	215
+5	0,175	0,258	179
+20	0,100	0,147	102
+35	0,060	0,088	61
+50	0,045	0,066	46
+20	0,144	0,212	147



Rys. 117. Charakterystyka PMD - temperatura włókna SUM-1.

#### Uwagi:

1. PMD silnie wzrasta z obniżeniem temperatury; zakres zmian PMD sięga 5:1.
2. PMD przestaje rosnać poniżej  $-15^{\circ}\text{C}$ . Przyczyną może być deformacja ścisłej tuby po wyboczeniu włókna i zwiększone mieszanie modów polaryzacyjnych.
3. Trwały wzrost PMD wynika prawdopodobnie z krystalizacji tworzywa pokrycia ścisłego. Jest to jedyny przypadek obserwacji takiego zjawiska w temperaturze poniżej  $+60^{\circ}\text{C}$ .

#### **6.4.2.3. Włókno G.655 w ścisłej tubie – próbka OTO-5**

Miejsce badania:	Instytut Łączności, Warszawa
Data badania:	15.04-15.05.2005 r.
Komora klimatyczna:	Feutron KPK 3524/58
Zakres temperatur:	$-40\dots+50^{\circ}\text{C}$ .
Wilgotność względna powietrza:	50%.
Czas ekspozycji:	12 h.
Nawinięcie próbki:	na szpuli z ABS o średnicy bieżni 180 mm.
Długość włókna:	5034 m.

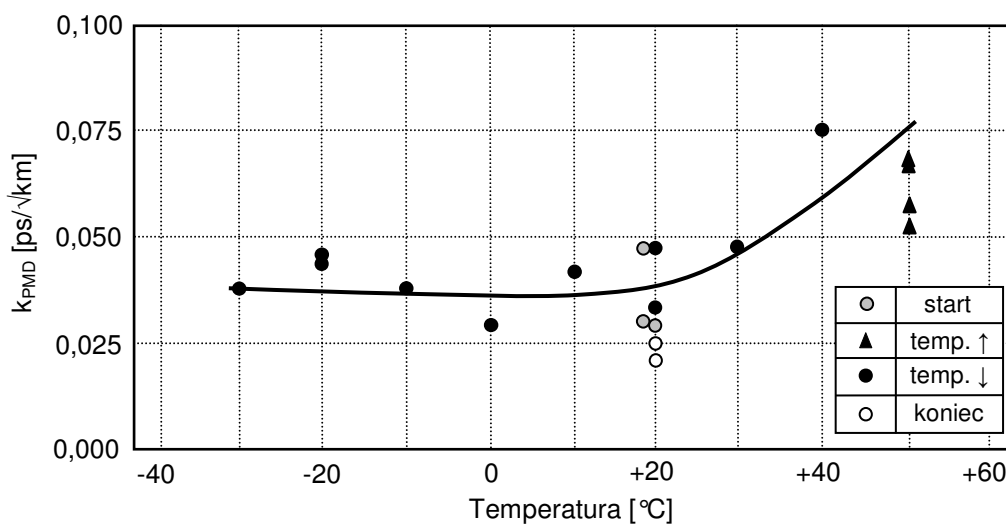
Testowane włókno NZDSF miało identyczne pokrycie jak włókno G.652, którego badanie opisano w p. 6.4.2.1. Plan badania był analogiczny, by porównać ich zachowanie. W temperaturze poniżej  $-30^{\circ}\text{C}$  nastąpiło uszkodzenie pokrycia pokazane na rys. 86 i wzrost tłumienności włókna, co uniemożliwiło powtórzenie badania na włóknie luźnym. Badanie zostało przerwane z powodu przerwy w zasilaniu i wyłączenia się źródła promieniowania HP 8168F. Pomiaru PMD w niektórych temperaturach powtarzano.

Rezultaty pomiarów przedstawiono w tabeli 28 i na rys. 118. Rys. 119 pokazuje krzywe reflektometryczne zdegradowanej próbki.

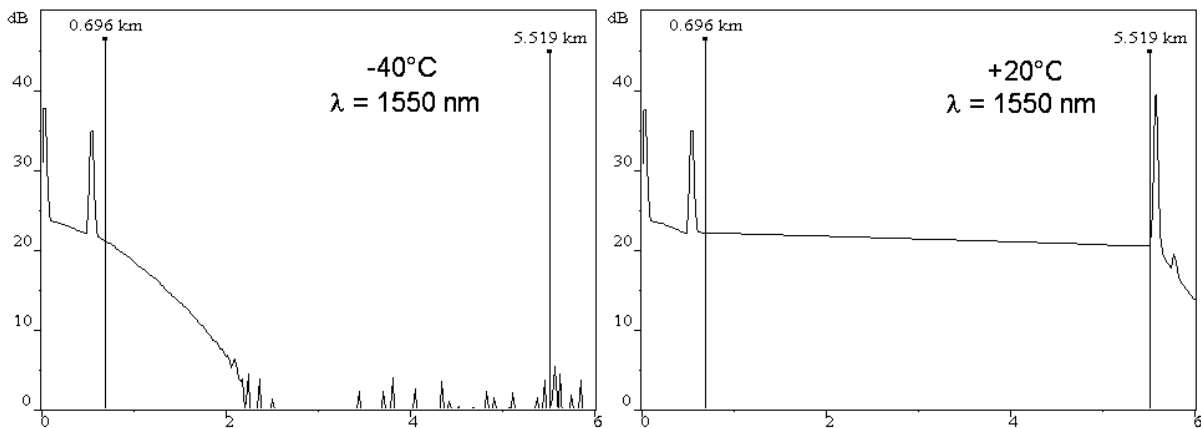
Tabela 28. Wyniki pomiarów włókna G.655 w ścisłej tubie OTO-5 podczas badania termicznego.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Względna wartość PMD	Łmieniność (1310 nm)	Łmieniność (1550 nm)
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	[%]	dB/km	dB/km
+18	0,108	0,048	159	0,330	0,181
<b>+18</b>	<b>0,068</b>	<b>0,030</b>	<b>100</b>	<b>0,332</b>	<b>0,187</b>
+20	0,065	0,029	95	-----	-----
+50	0,148	0,066	217	-----	-----
+20	0,073	0,033	108	-----	-----
+50	0,117	0,052	171	0,336	0,189
+50	0,151	0,067	222	-----	-----
+50	0,130	0,058	190	-----	-----
+40	0,169	0,075	249	-----	-----
+30	0,108	0,048	159	-----	-----
+20	0,108	0,048	159	-----	-----
+10	0,091	0,041	134	-----	-----
0	0,065	0,029	95	-----	-----
0	0,065	0,029	95	-----	-----
-10	0,084	0,037	124	-----	-----
-20	0,102	0,045	149	-----	-----
-20	0,097	0,043	143	-----	-----
-30	0,082	0,037	121	-----	-----
-40	**	**	**	-----	>8
+20	0,056	0,025	82	0,347	0,338
+20	0,047	0,021	69	-----	-----

\*\* : Pomiar PMD był niemożliwy z powodu wysokiej łmieniności włókna (rys. 119).



Rys. 118. Charakterystyka PMD - temperatura włókna G.655 w ścisłej tubie OTO-5.



Rys. 119. Krzywe reflektometryczne uszkodzonego włókna OTO-5.

#### Uwagi:

1. Badane włókno w pokryciu ścisłym zachowuje prawie stałą PMD przy obniżeniu temperatury z +20°C do -30°C włącznie, inaczej niż włókna G.652 (rys. 113,114,117).
2. Wzrost PMD z temperaturą w zakresie od +20°C do +50°C jest podobny jak podczas badania włókien G.652 z tym samym pokryciem ścisłym (p. 6.4.2.1) i prawdopodobnie tak samo wywołany naciskami między warstwami rozszerzających się włókien.
3. Pęknięcia w wewnętrznej warstwie pokrycia ścisłego spowodowały mikrozgięcia włókna, wzrost tłumienności powyżej 8 dB/km dla długości fali 1550 nm w temperaturze -40°C i spadek PMD w wyniku wzmożonego mieszania modów polaryzacyjnych.

### 6.4.3. Włókna światłowodowe G.652 w półścislej tubie

Miejsce badania:	Instytut Łączności, Warszawa
Data badania:	10.06.2005 r. (pomiar wstępny włókien na szpulach), 27.09-03.10.2005 r. (badanie termiczne).
Komora klimatyczna:	Feutron KPK 3524/58
Zakres temperatur:	-20...+60°C.
Czas ekspozycji:	12 h.
Nawinięcie:	na szpuli z ABS z bieżnią Ø160 mm (pomiar wstępny), zawieszenie na rurze z HDPE Ø140 mm (badanie).
Długość włókien:	6177 m.

Dwa odcinki włókna G.652 w półścislej tubie zespawano i poddano razem badaniu termicznemu połączonemu z pomiarami PMD. Sposób zawieszenia włókien na poziomej rurze przedstawia rys. 120. Rezultaty pomiarów przedstawiono w tabeli 29 i na rys. 121.

#### Uwagi:

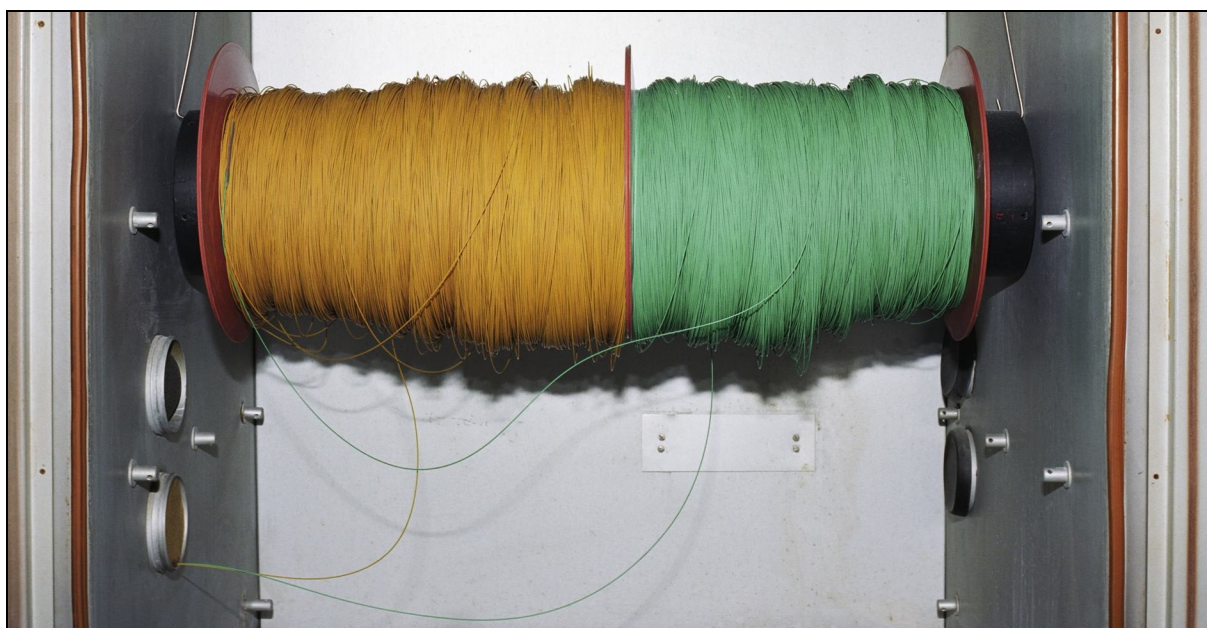
1. Włókno G.652 w pokryciu półścislej ma **wysoką PMD w każdej temperaturze**. PMD dalej wzrasta po obniżeniu temperatury poniżej 0°C. Zakres zmian PMD sięga 3:1.
2. Zmiany PMD wykazują histerezę – tarcie o ścianki hamuje ruch włókien w tubie.
3. Włókna zachowały względnie stabilną tłumienność w całym zakresie temperatur. Wzrost tłumienności po badaniu ( $\approx 0,02$  dB/km) niewiele przekracza granicę niepewności pomiaru.



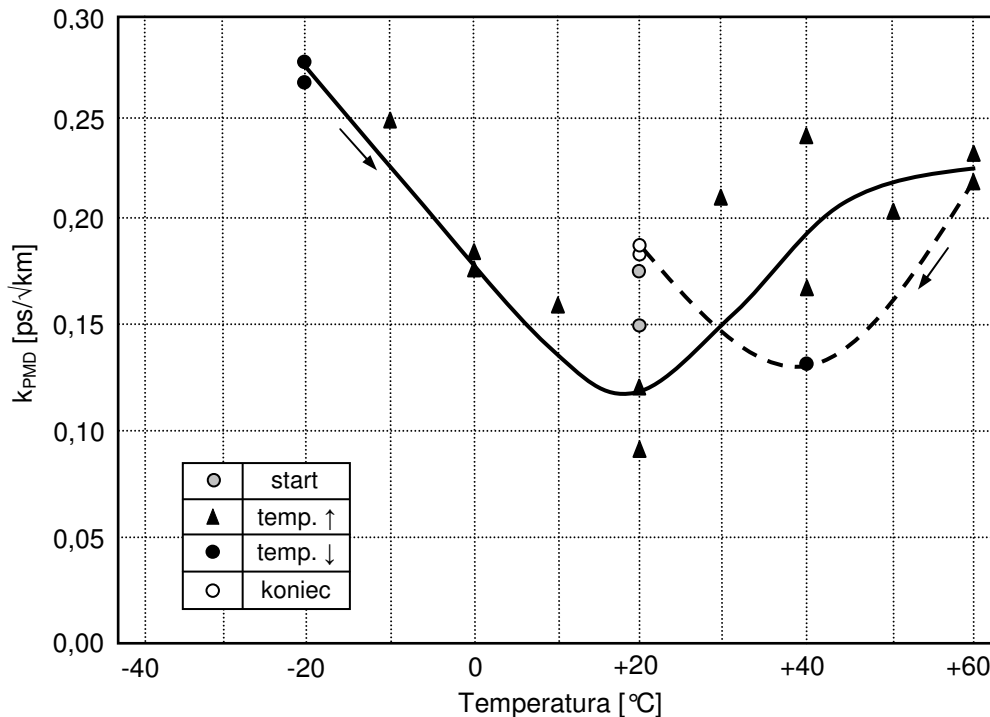
Tabela 29. Wyniki pomiarów włókien TFK-2 i TFK-3 podczas badania termicznego.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność (1310 nm)	Tłumienność (1550 nm)
°C	ps	ps/√km	[%]	dB	dB
** +23	0,648	0,261	173	1,903	1,191
** +23	----	----	----	1,885	1,191
+20	0,432	0,174	116	----	----
<b>+20</b>	<b>0,374</b>	<b>0,150</b>	<b>100</b>	<b>1,797</b>	<b>1,131</b>
-20	0,666	0,268	178	1,873	1,277
-20	0,691	0,278	185	----	----
-10	0,616	0,248	165	----	----
0	0,438	0,176	117	----	----
0	0,454	0,183	121	----	----
+10	0,391	0,157	105	----	----
+20	0,302	0,122	81	1,871	1,172
+20	0,227	0,091	61	----	----
+30	0,523	0,210	140	----	----
+40	0,596	0,240	160	----	----
+40	0,410	0,165	110	----	----
+50	0,503	0,202	135	----	----
+60	0,569	0,229	152	1,915	1,192
+60	0,540	0,217	145	----	----
+40	0,200	0,080	53	----	----
+20	0,456	0,183	122	----	----
+20	0,446	0,179	120	1,896	1,238
+20	0,454	0,183	121	----	----

\*\* : Pomiary włókien nawiniętych na oryginalnych szpulach transportowych.



Rys. 120. Włókna TFK-2 i TFK-3 na rurze podporowej w komorze Feutron KPK.



Rys. 121. Charakterystyka PMD - temperatura włókien G.652 w półścisej tubie. Połączone odcinki TFK-2 i TFK-3.

#### 6.4.4. Kable stacyjne z włóknami w ścisłej tubie

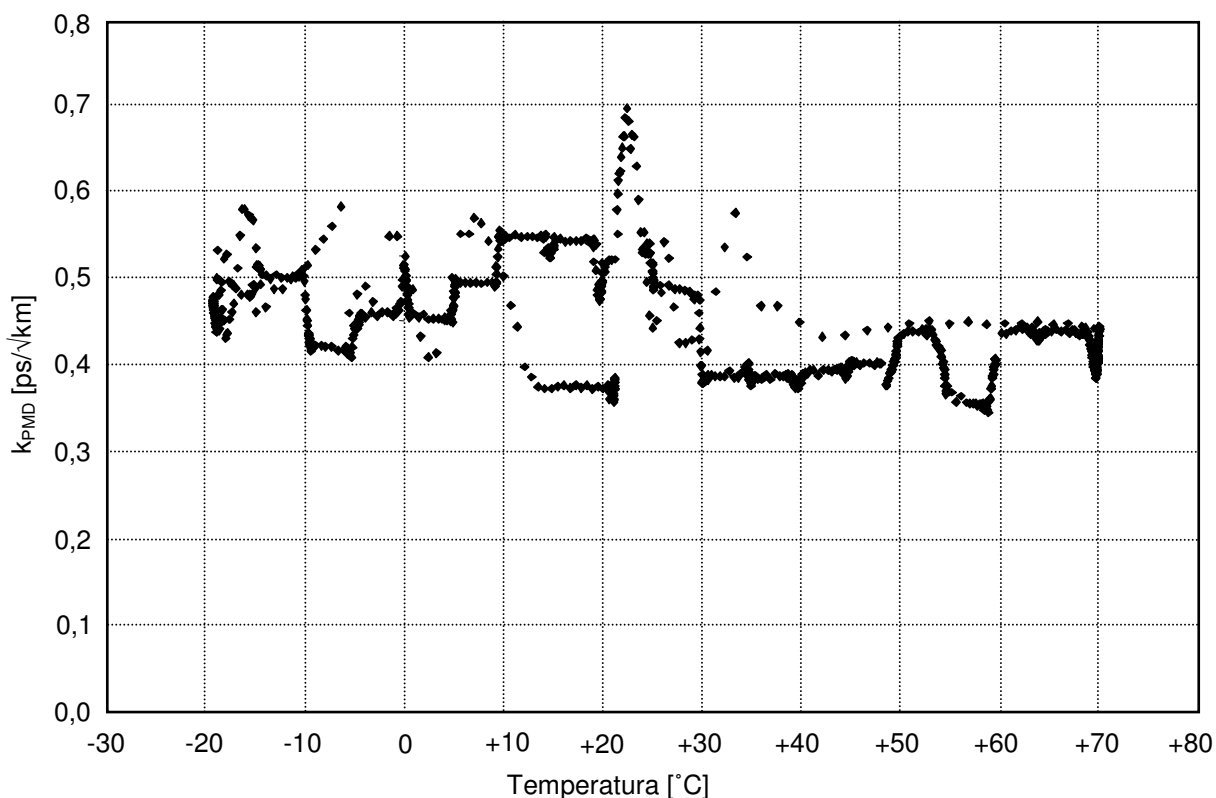
##### 6.4.4.1. Kabel 2NXOTKS 2Jm z włóknami G.652 w ścisłej tubie – próbka OTO-E

Miejsce badania: EMPA, Dübendorf  
 Data badania: 19-23.05.2003 r.  
 Zakres temperatur: -20...+70 °C.  
 Szybkość zmian temperatury: 20 °C/h.  
 Czas ekspozycji: 3,5 h.  
 Nawinięcie próbki: na szpuli ze sklejki  
 Długość włókna: 1780 m.

Wyniki pomiarów przedstawia rys. 122. Nie wykonywano pomiarów tłumienności.

#### **Uwagi:**

1. PMD próbki zawierającej włókno światłowodowe G.652 starego typu była wysoka i tylko minimalnie wzrastała w temperaturach poniżej +10 °C.
2. Indukowana termicznie PMD według danych z badania włókna G.652 tego samego producenta wynosi poniżej 0,10 ps/√km w temperaturze -20 °C (p. 6.4.2.1). Obecność tej składowej PMD prawie nie zmienia całkowitej PMD próbki.
3. Badany kabel wykazywał przypadkowe zmiany PMD w dość wąskim zakresie, związane prawdopodobnie z naprężeniami termicznymi i przemieszczeniami włókien względem otaczającego je włóknistego elementu wytrzymałościowego.



Rys. 122. Charakterystyka PMD – temperatura kabla stacyjnego OTO-E.

#### 6.4.4.2. Kabel W-NOTKSdD 1J-2,0 z włóknem G.652 w ścisłej tubie – próbka NOTKS-1

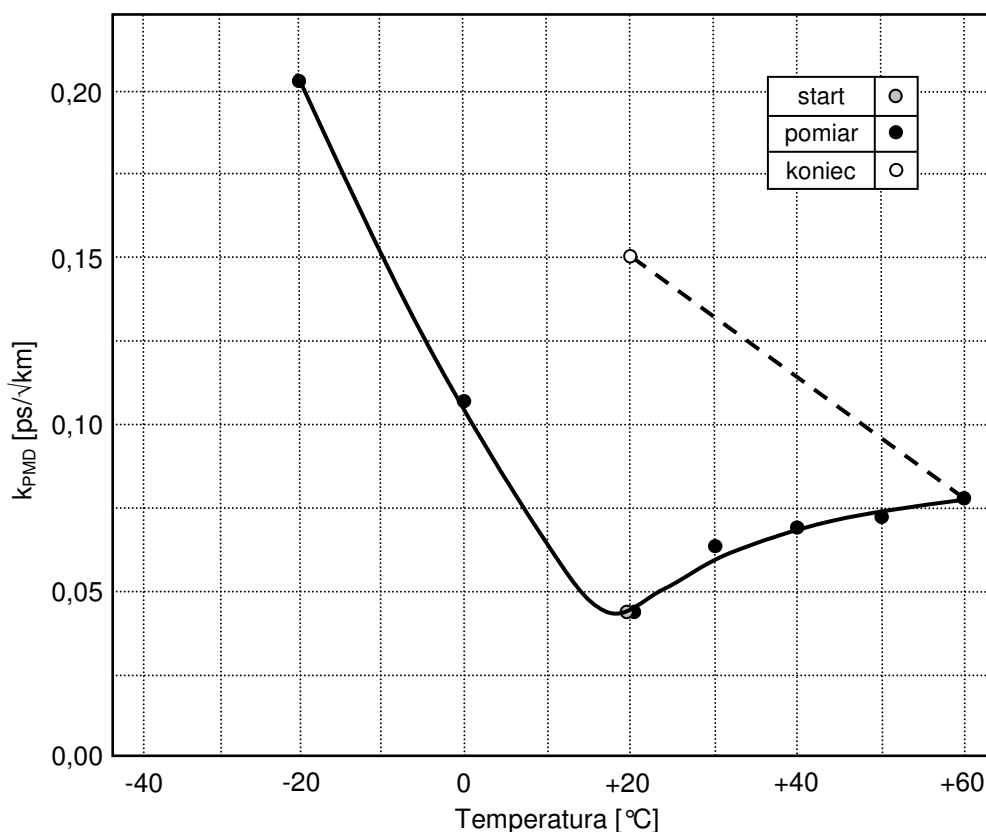
##### Badanie Nr 1

Miejsce badania: Instytut Łączności, Warszawa  
 Data badania: 03-15.11.2004 r.  
 Komora termiczna: Heraeus-Vötsch NEMA HCZ 3005 N  
 Zakres temperatur: -20...+60°C  
 Czas ekspozycji: ≥22 h  
 Nawinięcie próbki: na szpuli ze sklejki  
 Długość włókna: 4040 m

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 30 i na rys. 123.

Tabela 30 Wyniki pomiarów kabla stacyjnego z włóknem G.652 NOTKS-1 - badanie Nr 1.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność $\lambda = 1310 \text{ nm}$	Tłumienność $\lambda = 1550 \text{ nm}$
°C	ps	ps/√km	%	dB/km	dB/km
<b>+20</b>	<b>0,086</b>	<b>0,043</b>	<b>100</b>	<b>0,323</b>	<b>0,182</b>
-20	0,410	0,204	477	0,299	0,206
0	0,216	0,107	250	0,294	0,203
+20	0,086	0,043	100	0,298	0,204
+30	0,126	0,063	147	---	---
+40	0,136	0,068	158	---	---
+50	0,144	0,072	167	---	---
+60	0,159	0,079	185	---	---
+20	0,302	0,150	351	0,296	0,189



Rys. 123. Charakterystyki PMD - temperatura kabla stacyjnego NOTKS-1. Badanie Nr 1.

#### Uwagi:

1. Stabilizacja PMD po zmianie temperatury w komorze z +20°C na -20°C była powolna i trwała około 25 h. W pozostałych przypadkach proces ten zajmował 5-15 h.
2. Badany kabel wykazuje minimalną wartość PMD w temperaturze pokojowej i **silny wzrost PMD przy obniżaniu temperatury**: prawie 5-krotny w -20°C.
3. Po zakończeniu badania zaobserwowano **trwały wzrost PMD** – aż 3,5-krotny, prawdopodobnie skutek krystalizacji tworzywa ścisłej tuby i jej skrócenia się.
4. Zmiany tłumienności włókna w kablu były niewielkie.

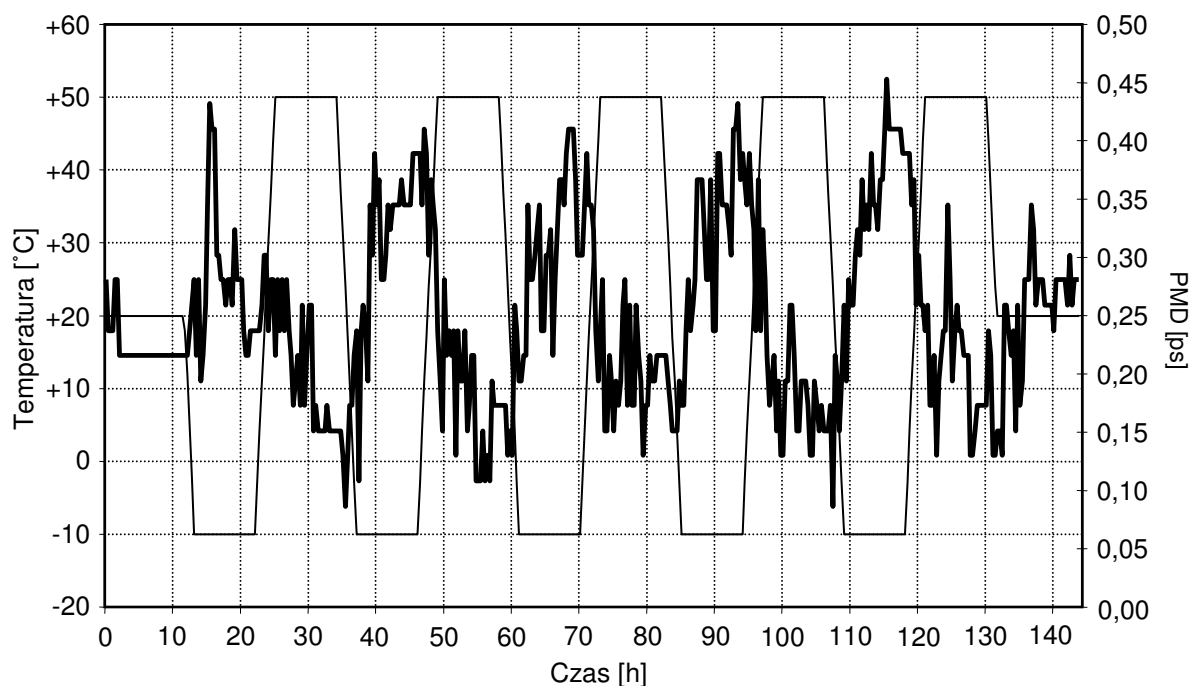
#### **Badanie Nr 2**

Miejsce badania:	Instytut Łączności, Warszawa
Data badania:	07-14.10.2005 r.
Komora termiczna:	Heraeus-Vötsch NEMA HCZ 3005 N
Zakres temperatur:	-10...+50°C.
Liczba cykli termicznych:	5
Długość cyklu:	24 h
Czas ekspozycji:	9 h.
Szybkość zmian temperatury:	20°C/h.
Nawinięcie próbki:	zawieszenie luzem na rurze PVC Ø110 mm.
Długość włókna:	4040 m

Celem testu było sprawdzenie, czy wielokrotna ekspozycja na skrajne temperatury pracy w zakresie gwarantowanym przez producenta nie spowoduje trwałego wzrostu PMD. Ponieważ badania włókien udowodniły, że ciasne nawijanie na szpuli zmienia PMD, nie odwzorowuje normalnych warunków pracy i utrudnia wymianę ciepła, kabel został zdjęty ze szpuli transportowej i zawieszony luzno w sposób pokazany na rys. 125. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 31 i na rys. 124.

Tabela 31. Wyniki pomiarów tłumienności włókna w kablu W-NOTKSdD 1J-2,0 (NOTKS-1) przed i po badaniu odporności na cykliczne zmiany temperatury.

Temperatura °C	Uwagi	Tłumienność (1310 nm) dB/km	Tłumienność (1550 nm) dB/km
+20	pomiar przed badaniem	0,300	0,198
+20	pomiar po badaniu	0,307	0,198



Rys. 124. Zmiany temperatury (cienka linia) i PMD (gruba linia) w funkcji czasu. Próbką NOTKS-1 – Badanie Nr 2.



Rys. 125. Zawieszenie kabla na rurze podporowej. Próbką NOTKS-1 – badanie Nr 2.

### Uwagi:

1. Czas ekspozycji równy 9 h był za krótki dla stabilizacji PMD w minimalnej temperaturze.
2. W kolejnych cyklach nastąpił systematyczny wzrost PMD, przede wszystkim wartości w najniższej temperaturze. Kabel ulega stopniowemu starzeniu, prawdopodobnie wskutek kurczenia się pokrycia ścisłego włókna światłowodowego.

#### 6.4.4.3. Kabel W-NOTKSd 1J-2,0 z włóknem G.655 w ścisłej tubie – próbka OTO-7

Miejsce badania: Instytut Łączności, Warszawa  
Data badania: 08.03.2005 r. (pomiar wstępny), 17-23.05.2005 r. (test).  
Komora termiczna: Heraeus-Vötsch NEMA HCZ 3005 N  
Zakres temperatur: -10...+50°C  
Czas ekspozycji: 11,5 h.  
Nawinięcie próbki: zawieszenie na rurze z twardego PVC Ø110 mm.  
Długość włókna: 4083 m

Włókno w kablu posiadało identyczne pokrycie ściśle Ø0,9 mm jak włókna i kable tego samego producenta testowane wcześniej (pp. 6.4.2.1 i 6.4.4.1). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 32 i na rys. 126.

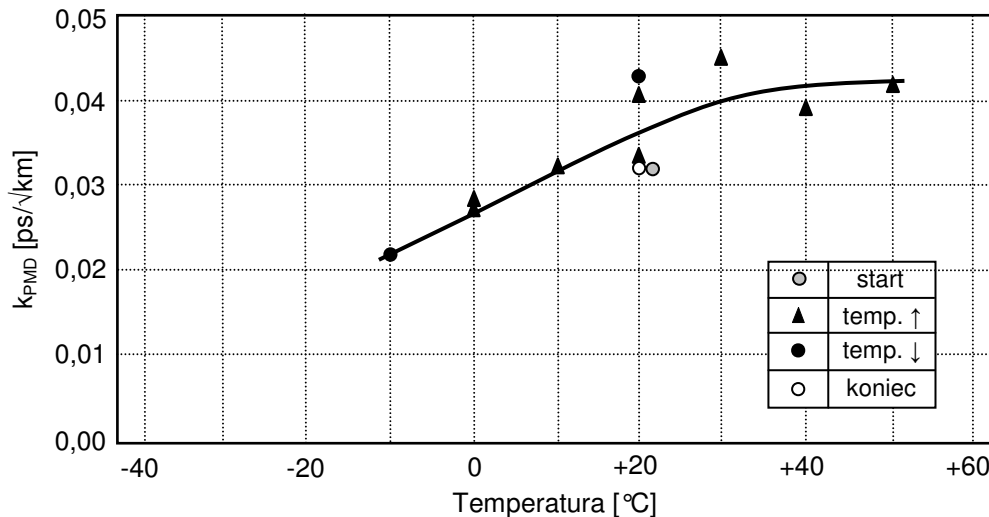
Tabela 32. Wyniki pomiarów włókna G.655 w kablu stacyjnym W-NOTKSd 1J5A (OTO-7).

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność (1310 nm)	Tłumienność (1550 nm)
°C	ps	ps/√km	[%]	dB/km	dB/km
** +18	0,027	0,054	83	0,339	0,187
** +22	0,032	0,065	100	0,326	0,204
<b>+22</b>	<b>0,032</b>	<b>0,065</b>	<b>100</b>	<b>0,325</b>	<b>0,198</b>
+20	0,043	0,086	133	-----	-----
+20	0,043	0,086	133	-----	-----
-10	0,022	0,044	68	-----	-----
0	0,028	0,057	88	-----	-----
0	0,027	0,054	83	0,308	0,213
+10	0,032	0,065	100	-----	-----
+20	0,033	0,067	103	-----	-----
+20	0,041	0,082	127	0,311	0,205
+30	0,045	0,091	140	-----	-----
+40	0,039	0,078	120	-----	-----
+50	0,042	0,084	130	-----	-----
+20	0,033	0,066	102	-----	-----
+20	0,032	0,065	100	0,307	0,195

\*\* Pomiary kabla na szpuli transportowej.

### Uwagi:

1. Kabel stacyjny z włóknem G.655 **zmniejszył PMD przy obniżeniu temperatury** poniżej +20°C i zachował stałą PMD w temperaturach wyższych. Zmiany PMD w całym zakresie temperatur były wielokrotnie mniejsze niż w podobnych próbkach z włóknami G.652.
2. Kabel zachował stabilną tłumienność podczas badania.

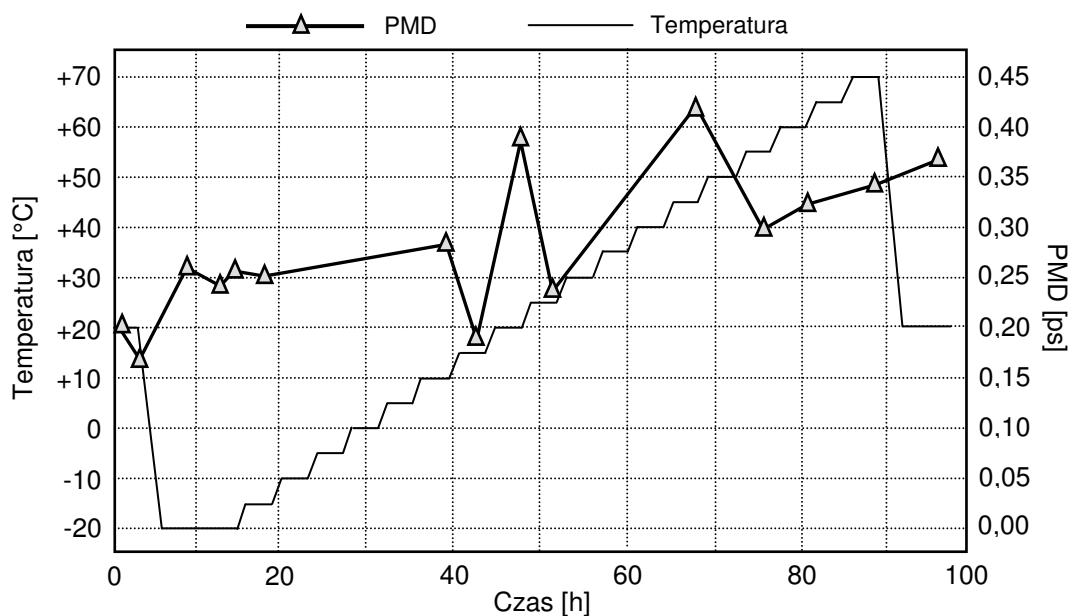


Rys. 126. Charakterystyka PMD - temperatura kabla stacyjnego W-NOTKSdD 1J5A z włóknem G.655 w ścisłej tubie (OTO-7).

#### 6.4.5. Jednostka optyczna dla kabli pustych

Miejsce badania: EMPA, Dübendorf  
 Data badania: 19-23.05.2003 r.  
 Zakres temperatur: -20...+70 °C.  
 Szybkość zmian temperatury: 20°C/h.  
 Czas ekspozycji: 3,5 h.  
 Nawinięcie próbki: na szpuli z ABS  
 Długość włókna: 13300 m.

Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 127.



Rys. 127. Zmiany PMD włókien G.652 w jednostce EPFU w trakcie badania termicznego.

#### Uwagi:

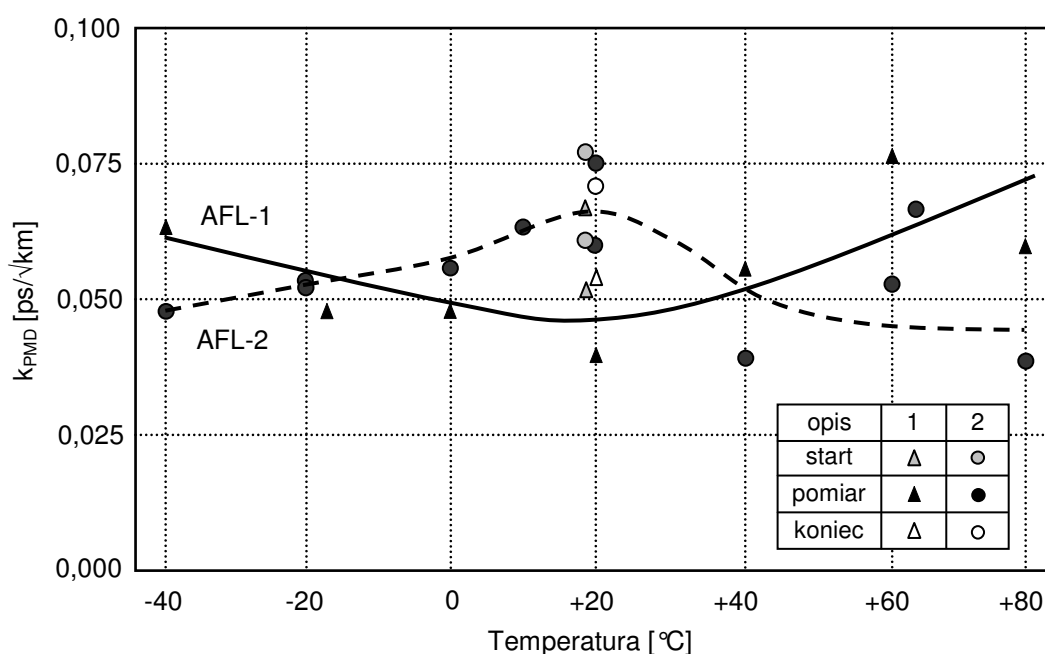
1. PMD praktycznie nie zmieniała się w funkcji temperatury. Wzrost PMD po badaniu to wynik skurczenia powłoki jednostki, widocznego w czasie oględzin próbki.

## 6.4.6. Przewody OPGW i jednostki optyczne OPGW

### 6.4.6.1. Kompletnie przewody OPGW – próbki AFL-1 i AFL-2

Miejsce badania: Instytut Łączności, Warszawa  
Data badania: 1-11.04.2005 r. (AFL-1),  
25.05-13.06.2004 r. i 22.09-04.10.2004 r. (AFL-2).  
Komora termiczna: Heraeus-Vötsch NEMA HCZ 3005 N  
Zakres temperatur: -40...+80°C  
Czas ekspozycji:  $\geq 24$  h.  
Nawinięcie próbki: na bębnie drewnianym z bieżnią  $\varnothing 550$  mm.  
Długość włókien: 5360 m (AFL-1), 6280 m (AFL-2).

Wyniki badania przedstawiono w tabelach 33-34 i na rys. 128. Wartości tłumienności w tabeli dotyczą pomiarów obwodu optycznego zawierającego wszystkie włókna światłowodowe z przewodu i złącza spawane.



Rys. 128. Zmiany PMD włókien światłowodowych w przewodach odgromowych AlumaCore OPT-GW 30/38 mm<sup>2</sup>/496 (odcinki AFL-1 i AFL-2) w funkcji temperatury.

#### **Uwagi:**

1. Testowany przewód OPGW zachowuje stabilną PMD bliską 0,05 ps/√km w bardzo szerokim zakresie temperatur. Zmiany PMD z temperaturą mają charakter w dużym stopniu losowy.
2. PMD badanego przewodu jest zdominowana przez składową indukowaną wskutek skręcenia włókien światłowodowych w jednostce optycznej, obliczoną teoretycznie zgodnie ze wzorem (87) dla jej parametrów skrętu oraz typowej drogi korelacji  $h = 10$  m jako 0,052 ps/√km (tabela 21).
3. Tłumienność włókien światłowodowych była stabilna; zmiany nie przekraczały 0,02 dB/km.



Tabela 33. Wyniki pomiarów przewodu OPGW (AFL-1) podczas badania termicznego.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność (1310 nm)	Tłumienność (1550 nm)
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	[%]	dB	dB
+18	0,151	0,065	127	-----	-----
<b>+18</b>	<b>0,119</b>	<b>0,051</b>	<b>100</b>	<b>4,309</b>	<b>2,925</b>
<b>+18</b>	<b>0,119</b>	<b>0,051</b>	<b>100</b>	-----	-----
+80	0,148	0,064	124	4,294	2,933
+60	0,177	0,076	149	4,290	2,939
+40	0,131	0,057	110	-----	-----
+20	0,090	0,039	76	4,262	2,911
0	0,108	0,047	91	-----	-----
-15	0,108	0,047	91	-----	-----
-40	0,146	0,063	123	4,283	2,977
+20	0,126	0,054	106	4,212	2,867

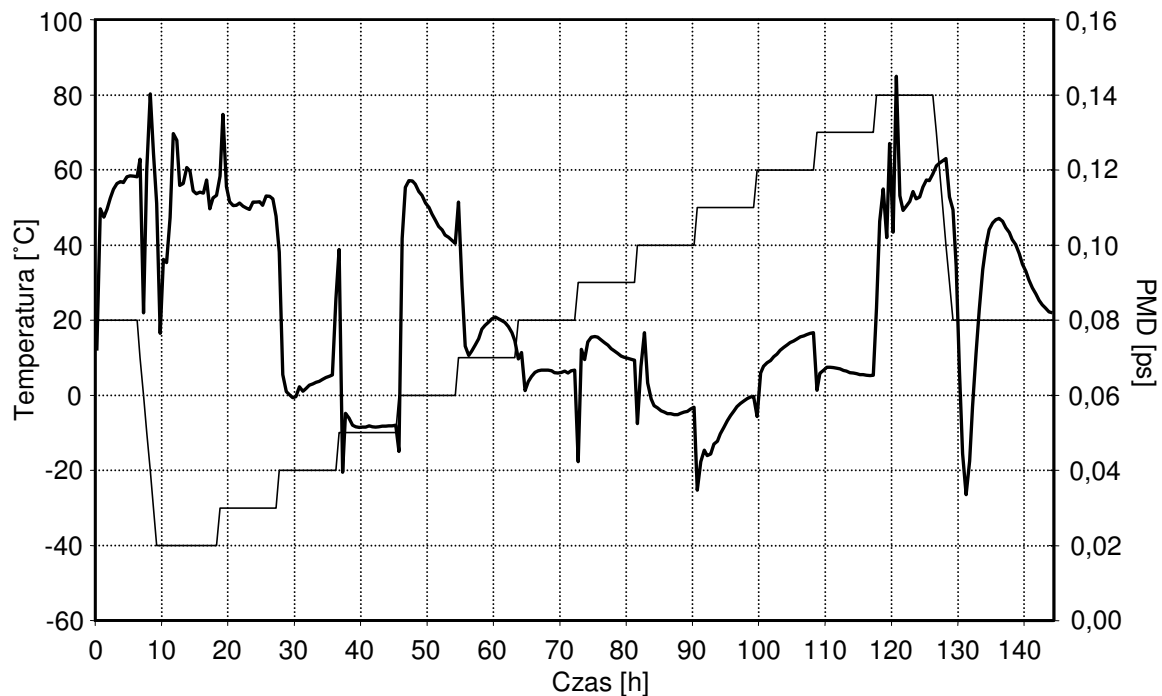
Tabela 34. Wyniki pomiarów przewodu OPGW (AFL-2) podczas badania termicznego.

Temperatura	PMD	$k_{PMD}$	Wartość względna PMD	Tłumienność (1310 nm)	Tłumienność (1550 nm)
°C	ps	ps/ $\sqrt{\text{km}}$	[%]	dB	dB
+18	0,194	0,077	124	----	----
<b>+18</b>	<b>0,156</b>	<b>0,062</b>	<b>100</b>	<b>3,27</b>	<b>2,25</b>
0	0,143	0,057	92	----	----
-20	0,130	0,052	83	----	----
-40	0,121	0,048	78	----	----
-20	0,132	0,053	84	----	----
+10	0,158	0,063	101	----	----
+65	0,099	0,040	63	----	----
+20	0,188	0,075	121	----	----
+20	0,151	0,060	97	3,20	2,15
+40	0,094	0,038	60	3,24	2,17
+60	0,132	0,053	85	3,27	2,22
+80	0,095	0,038	61	3,32	2,26
+60	0,134	0,053	86	3,28	2,21
+20	0,176	0,070	113	3,22	2,18

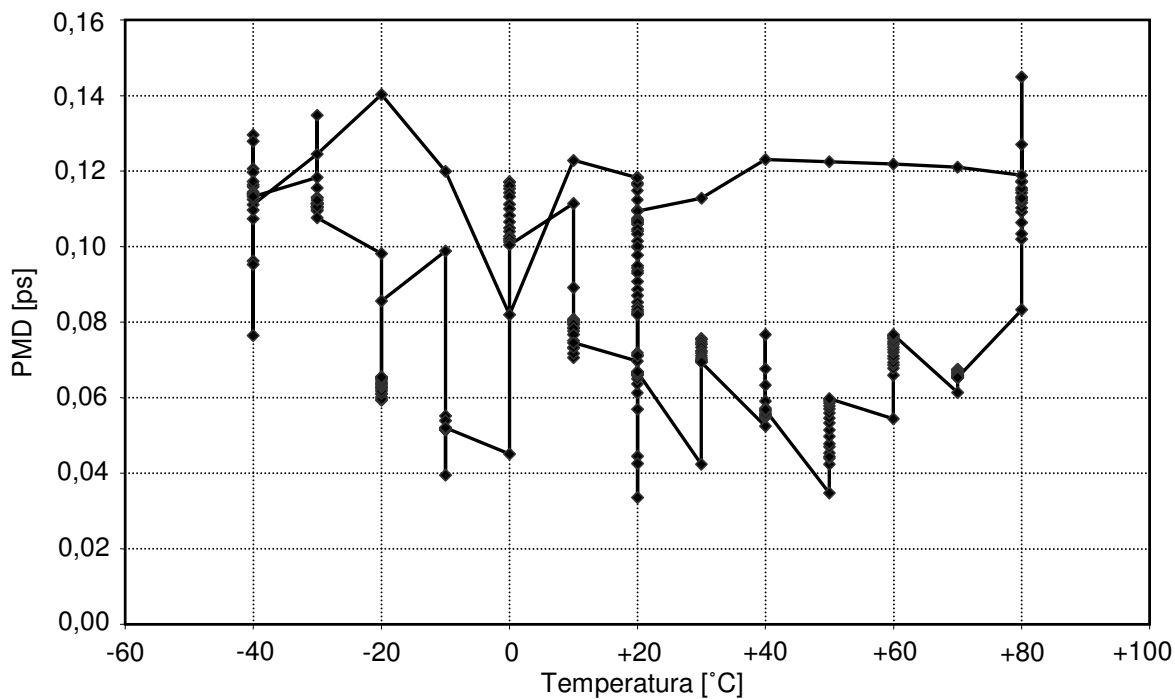
#### 6.4.6.2. Jednostka optyczna OPGW – próbka J-4

Miejsce badania: ISMB, Turyn  
 Data badania: 29.06-05.07.2005 r.  
 Zakres temperatur: -40...+80 °C.  
 Szybkość zmian temperatury: 20 °C/h.  
 Czas ekspozycji: 8,5 h.  
 Nawinięcie próbki: ułożona luzem w zwoje  $\varnothing 450$  mm.  
 Długość włókna: 2040 m.

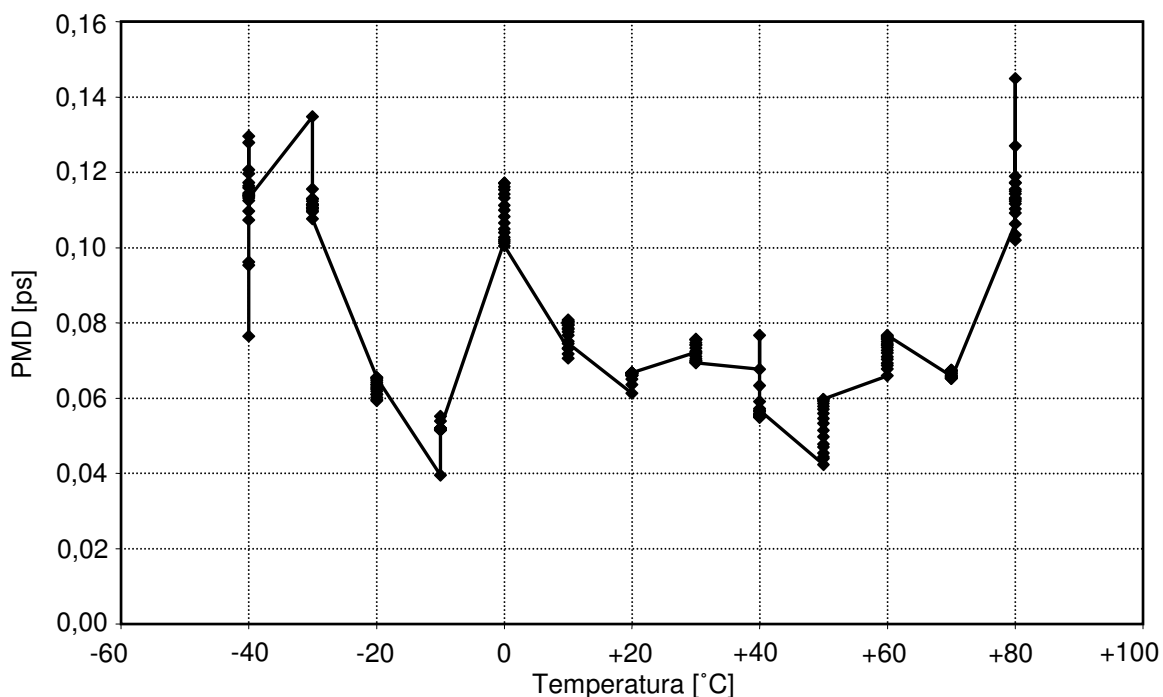
Wyniki badania przedstawiono na rys. 129-131. Badana jednostka optyczna nie ma statycznej charakterystyki PMD – temperatura, tylko losową zmienność PMD w pewnym zakresie, przy czym najsilniejsze zmiany towarzyszą zmieniającej się temperaturze. Rys. 131 przedstawia charakterystykę wykreśloną wyłącznie na podstawie danych z okresów, kiedy w komorze panowała stała temperatura. Nie wykonywano pomiarów tłumienności.



Rys. 129. Zmiany temperatury (cienka linia) i PMD jednostki optycznej OPGW z 12 włóknami G.652 (gruba linia) w funkcji czasu. Próbką J-4.



Rys. 130. Zmiany PMD w funkcji temperatury – wszystkie pomiary. Próbką J-4.



Rys. 131. Zmiany PMD w funkcji temperatury – pomiary w stanie ustalonym. Próbką J-4.

**Uwagi:**

1. PMD włókien w jednostce optycznej zmieniała się w stosunku 3:1, przy czym korelacja z temperaturą ograniczała się do około 2-krotnego wzrostu w obu skrajnych temperaturach.
2. Zmiany PMD wskutek oddziaływania zmiennych temperatur były odwracalne.
3. W jednostce optycznej zachodzi proces silnie redukujący wpływ dwójłomności wymuszonej przez naprężenia ściskające.

**6.4.6.3. Badanie starzeniowe jednostki optycznej OPGW - próbka J-3**

Miejsce badania: Instytut Łączności, Warszawa  
 Data badania: 20.09-05.10.2004 r. (Nr 1), 26.10-10.11.2004 r. (Nr 2).  
 Komora klimatyczna: Feutron KPK 3524/58  
 Temperatura: +85°C  
 Czas ekspozycji: 2 x 336 h (2 x 14 dni)  
 Nawinięcie: ułożenie luzem w zwojach Ø450 mm.  
 Długość włókien: 4400 m.

Dla sprawdzenia, jak starzenie materiałów polimerowych pokrycia wpływa na PMD włókien światłowodowych przeprowadzono przyspieszone starzenie w sposób ustalony w normie Telcordia GR-20-CORE dla badań kabli liniowych. Po stwierdzeniu, że PMD i tłumienność włókien światłowodowych nie zmieniły się po 336 h ekspozycji na działanie wysokiej temperatury, badanie powtórzono. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 35.

**Uwagi:**

1. Zmiany PMD próbki mieściły się w granicach niepewności pomiaru ( $\pm 0,02$  ps).
2. Wyniki pomiarów tłumienności obejmują również złącza pomiędzy kolejnymi włóknami.
3. Niewielki wzrost tłumienności zaobserwowano tylko w badaniu Nr 2. Po dwóch badaniach tłumienność wzrosła o 0,016 dB/km.
4. Oględziny próbki po badaniach nie wykazały odbarwień, pęknięcia powłoki, deformacji ani innych objawów starzenia.

Tabela 35 Wyniki pomiarów jednostki optycznej OPGW z 12 włóknami G.652 (J-3) podczas przyspieszonych badań starzeniowych.

Temperatura	Moment pomiaru	PMD	Wartość względna PMD	Tłumiennosc ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )
°C	-----	ps	%	dB
+20	Przed badaniem Nr 1	<b>0,076</b>	<b>100</b>	<b>3,69</b>
+85	Po 24 h ekspozycji	0,086	114	3,74
+85	Po 336 h ekspozycji	0,076	100	3,72
+20	Po badaniu Nr 1	0,051	71	3,71
+20	Przed badaniem Nr 2	0,051	71	3,69
+85	Po 24 h ekspozycji	0,086	114	3,74
+85	Po 336 h ekspozycji	0,065	86	3,78
+20	Po badaniu Nr 2	0,065	86	3,76

## 6.5. Wnioski

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają wszystkie wnioski wyciągnięte podczas analiz teoretycznych przedstawionych w rozdziałach 4 i 3.1.7. Najważniejsze z nich to:

1. Indukowanie dodatkowej PMD we włóknach G.652 w pokryciu ścisłym o dużym przekroju, szybko rosnącej w miarę obniżania temperatury. Cienka powłoka jednostki EPFU nie wywiera na włókna siły wystarczającej dla uzyskania podobnego efektu.
2. Płynny, rozciągnięty w szerokim zakresie temperatur przebieg zmian PMD u większości próbek wskazuje, że założone w rozdziale 4.5.2 gwałtowne wyobczenie prostego włókna szklanego nie jest jedyną przyczyną wzrostu PMD i dużą rolę grają początkowe odkształcenia włókna oraz mechanizmy dodatkowe opisane w rozdziale 4.5.3.
3. Odmienne charakterystyki temperaturowe PMD włókien G.652 (nie wirowanych) i G.655 (wirowanych) umieszczonych w pokryciach ścisłych oraz kabli stacyjnych z takimi włóknami. PMD włókien nie wirowanych szybko wzrasta z obniżaniem temperatury, przy czym zachowanie to dotyczy nawet włókien w pokryciu pierwotnym, natomiast PMD włókien wirowanych w tych samych warunkach jest stała lub spada. Ten ostatni efekt wynika ze wzmożonego mieszania modów polaryzacyjnych wskutek coraz silniejszych mikrozgięć włókna wywołanych przez kurczące się pokrycie i skróceniem drogi korelacji.
4. Dobra stabilność PMD ścisłego ośrodka optycznego przewodu OPGW, zapewniona głównie przez skręcenie włókien w jednostce optycznej ze skokiem 125 mm. Wymieniony zabieg wprowadza jednak PMD pochodzącą od naprężeń skręcających i dolną granicę całkowitej PMD na poziomie około 0,05 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , co prowadzi do istotnego pogorszenia parametrów obecnie produkowanych włókien jednomodowych.
5. Zauważalny trwały wzrost PMD włókien i kabli w wytłaczanych z PA i PBT pokryciach ścisłych po ekspozycji na podwyższone temperatury wystarczające do krystalizacji tworzywa i jego skurczenia się. Zjawisko to nie wystąpiło podczas badań włókien z pokryciami ścisłymi sieciowanymi za pomocą promieniowania ultrafioletowego.
6. Bardzo wysoka PMD włókien G.652 umieszczonych w półścislej tubie, sygnalizująca zbyt wysoki nadmiar długości i złe warunki pracy włókna w pokryciu tego rodzaju.

Dodatkowy wartościowy rezultat to szereg doświadczeń dotyczących testowania włókien i kabli światłowodowych połączonego z pomiarami PMD, w tym sygnalizujących konieczność rezygnacji z praktyki badania próbek ciasno nawijanych na szpulach.

## 7. Podsumowanie

Praca zawiera analizy mechanizmów powstawania i zmian modowej dyspersji polaryzacyjnej (PMD) w jednomodowych telekomunikacyjnych włóknach światłowodowych umieszczonych w pokryciach ochronnych i w kablach światłowodowych powszechnie używanych rodzajów. Zamieszczono w niej przegląd konstrukcji i własności jednomodowych włókien światłowodowych i kabli telekomunikacyjnych, opis technologii wirowania włókien światłowodowych używanej przez producentów włókien światłowodowych do redukcji PMD i przegląd wpływu PMD na pracę cyfrowego łącza optycznego.

Oryginalny wkład autora stanowi analiza mechanizmów powodujących indukowanie dodatkowej PMD we włóknie jednomodowym umieszczonym w ścisłym pokryciu ochronnym i pracującym w zmiennej temperaturze, opis matematyczny tego zjawiska oraz jego związek z konstrukcją pokrycia ścisłego, technologią jego nakładania i fizycznymi własnościami polimerów używanych do tego celu. Pierwotną przyczyną indukowania PMD jest wzdłużny skurcz materiału pokrycia ścisłego, zachodzący początkowo w czasie nakładania pokrycia na włókno (szczególnie metodą wytłaczania), a następnie powiększany w wyniku pracy włókna lub kabla w niskiej temperaturze oraz ewentualnie starzenia i krystalizacji materiału pokrycia.

Analiza mechanicznych warunków pracy włókna jednomodowego umieszczonego w pokryciu półściskim ujawniła, że jego oddziaływanie prowadzi zwykle do poważnego wzrostu PMD w całym zakresie temperatur pracy. Kable światłowodowe z ośrodkiem o tej konstrukcji są nieodpowiednie dla budowy łączy cyfrowych o wysokich przepływnościach.

Drugi oryginalny element pracy to wykrycie i opis matematyczny zjawiska redukcji PMD indukowanej w wymieniony wyżej sposób, zachodzącego pod wpływem naprężeń skręcających w rdzeniu włókna światłowodowego. Naprężenia te stanowią produkt uboczny procesu wirowania włókna, powszechnie stosowanego w produkcji włókien NZDSF (ITU-T G.655) lub formowania skręcanego ośrodka kabla światłowodowego. Ich obecność może zapobiec indukowaniu PMD wskutek kurczenia się pokrycia lub innych podobnych oddziaływań mechanicznych i zapewnić stabilność PMD kabla światłowodowego o konstrukcji ścisłej w szerokim zakresie temperatur.

Wyniki rozważań teoretycznych zostały potwierdzone doświadczalnie w trakcie wykonanych przez kierowany przez autora zespół badaczy z Instytutu Łączności w Warszawie badań szeregu próbek włókien w pokryciach ścisłych i kabli światłowodowych z nimi. Zamieszczono szczegółowe wyniki tych badań oraz uzupełniających doświadczeń przeprowadzonych przez autora w laboratoriach zagranicznych.

Praca zawiera ponadto opisy metodyki testowania charakterystyk temperaturowych PMD i pomiarów PMD używaną w IŁ metodą stałego analizatora, ze szczególnym uwzględnieniem sposobów poprawy dokładności pomiaru PMD we włóknie poddawany działaniu zmiennych temperatur i eliminowania związanych artefaktów pomiarowych. Część z tych rozwiązań nie była dotychczas opisywana w znanej autorowi literaturze.

Szereg elementów pracy nadaje się do wykorzystania w przemyśle kablowym dla optymalizacji procesów technologicznych oraz prawidłowego doboru konstrukcji kabla i włókien światłowodowych w zależności od warunków klimatycznych i mechanicznych ich użytkowania. Zostanie też przygotowany wniosek patentowy dotyczący metody wytwarzania włókna światłowodowego w pokryciu ścisłym odznaczającego się podwyższoną stabilnością termiczną PMD.

## Literatura

- [1] S.C. Rashleigh, R. Ulrich: *Polarization mode dispersion in single-mode fibers*. Opt. Lett., Vol. 3, No. 2, s. 60-62, 1978.
- [2] M.J. Adams, D.N. Payne, C.M. Ragdale: *Birefringence in optical fibres with elliptical cross-section*. Electron. Lett., Vol. 15, No. 10, s. 298-299, 1979.
- [3] S.R. Norman, D.N. Payne, M.J. Adams: *Fabrication of single-mode fibres exhibiting extremely low polarisation birefringence*. Electron. Lett., Vol. 15, No. 11, s. 309-311, 1979.
- [4] A.J. Barlow, D.N. Payne, M.R. Hadley, R.J. Mansfield: *Production of single-mode fibres with negligible intrinsic birefringence and polarisation mode dispersion*. Electron. Lett., Vol. 17, No. 20, s. 725-726, 1981.
- [5] I.P. Kaminow: *Polarization in Optical Fibers*. IEEE Journ. Quantum Electronics, Vol. QE-17, No. 1, s. 15-22, 1981.
- [6] C. D. Poole, R. E. Wagner: *Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibres*. Electron. Lett., Vol. 22, s. 1029-1030, 1986.
- [7] C. D. Poole, T. E. Darcie: *Distortion related to polarization mode dispersion in analogue lightwave systems*. J. Lightwave Technol., Vol. 11, s. 1749-1759, 1993.
- [8] C. D. Poole, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, D. A. Fishman: *Fading in lightwave systems due to polarization mode dispersion*. IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, s. 68-70, 1991.
- [9] Y. Namihara, T. Kawazawa, H. Taga: *Polarization effects on BER degradation at 10 Gb/s in IM-DD 1520 km optical amplifier systems*. Electron. Lett., Vol. 29, s. 1654-1655, 1993.
- [10] Zalecenie ITU-T G.652: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. (10/1996)
- [11] Zalecenie ITU-T G.655: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. (04/1997)
- [12] *Wymagania Techniczno-Eksploatacyjne dla kabli optotelekomunikacyjnych liniowych*. Załącznik 11 do Zarządzenia Ministra Łączności z dnia 4 września 1997 r.
- [13] *Wymagania Techniczne i Eksploatacyjne dla kabli światłowodowych liniowych*. Instytut Łączności, Warszawa, 1999 r.
- [14] *Wymagania Techniczno-Eksploatacyjne dla kabli światłowodowych w przewodzie odgromowym linii wysokiego napięcia*. Załącznik 12 do Zarządzenia Ministra Łączności z dnia 4 września 1997 r.
- [15] *Wymagania Techniczne PSE S.A. dla przewodów energetycznych skojarzonych z włóknami światłowodowymi (OPGW i MASS) - Wydanie III*. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., 2000 r.
- [16] A. Cąkała, Z. Drabik, Z. Koper, T. Luboń: *Pomiary dyspersji polaryzacyjnej w już istniejących liniach optotelekomunikacyjnych*. Kabel 2001, Zakopane, 21-24 marca 2001 r., s. 69-74.
- [17] Z. Koper, A. Cąkała, Z. Drabik, T. Luboń: *Długoczasowe monitorowanie dyspersji polaryzacyjnej (PMD) w eksploatowanych kablach światłowodowych*. Kabel 2002, Zakopane, 26 lutego - 1 marca 2002 r., s. 25-29.
- [18] Z. Koper, Z. Drabik: *Wyzwania dla sieci optycznej TPSA stawiane przez technikę transmisji 10 Gbit/s*. Publikacja internetowa TP S.A. - OTO Lublin, 2004 r.
- [19] Zalecenie ITU-T G.957: *Optical Interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*. (07/1999)
- [20] K. Borzycki: *Systemy transmisyjne DWDM i CWDM: zasady działania, konstrukcja, parametry i rozwój, włókna światłowodowe dla transmisji WDM, pomiary*. Broszura szkoleniowa, Instytut Łączności, 2004 r.

- [21] K. Borzycki: *Kable światłowodowe: rodzaje, konstrukcje i wymagania*. Broszura szkoleniowa, Instytut Łączności, 2004 r.
- [22] K. Borzycki, J.L. Mikulski: *Budowa, wymagania i badania przewodów odgromowych z włóknami światłowodowymi dla linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia*. Warszawa, Instytut Energetyki, 2001 r.
- [23] Zalecenie ITU-T G.652: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Version 7*. Wersja przed publikacją. (06/2005)
- [24] Zalecenie ITU-T G.653: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable. Version 5*. (12/2003)
- [25] Zalecenie ITU-T G.654: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable. Version 6*. (06/2004)
- [26] Zalecenie ITU-T G.655: *Transmission Media Characteristics: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. Version 3*. (03/2003)
- [27] Zalecenie ITU-T G.656: *Characteristics of fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport. Version 1*. (06/2004)
- [28] Zalecenie ITU-T G.650.1: *Transmission media characteristics – Optical fibre cables: Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable*. (06/2004)
- [29] *Corning SMF-28e Optical Fiber Product Information*. Karta katalogowa PI1344, Corning Inc., January 2005.
- [30] *Design Considerations for Single Mode Fibers*. Siecor GmbH, 1998 r.
- [31] *Depressed Cladding Single-Mode Fiber*. OFS Denmark, 05/2003.
- [32] *Technical Data Sheet - Grilamid L20G*. Karta katalogowa LHT/04.01, EMS Chemie AG, 2001 r.
- [33] *MatWeb Data Sheet – EMS-Grivory Grilpet B24 PBT*. Karta katalogowa z bazy danych MatWeb, 2005 r. <http://www.matweb.com>
- [34] *Vestamid, Vestodur – Engineering Thermoplastics for Secondary Fiber Optic Jacketing*. Karta katalogowa 02/gu/1000/e, Degussa AG, 2002.
- [35] D.K. Mynbaev, L.L. Scheiner: *Fiber-Optic Communications Technology*. Prentice Hall PTR, 2001.
- [36] IEC 60793-2-50: *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*, January 2004.
- [37] *Corning LEAF Optical Fiber Product Information*. Karta katalogowa PI1107, Corning Inc., March 2005.
- [38] *Corning MetroCor Optical Fiber Product Information PI1302*. Corning Inc., August 2002.
- [39] *Alcatel 6901 Enhanced Singlemode Fiber*. Alcatel, Rev. 1, March 2002.
- [40] *Draka Comteq ESMF Type: G.652.D*. Draka Comteq, April 2005.
- [41] *TeraLight Metro Optical Fibre Type: G.655.C / G.656. Coating Type: ColorLock™ and Natural*. Draka Comteq, January 2005.
- [42] *TeraLight Ultra Optical Fibre Type: G.655.C / G.656. Coating Type: ColorLock and Natural*. Draka Comteq, January 2005.
- [43] *BendBright Single Mode Optical Fiber Type: G.652.D. Low Macrobending sensitive, low water peak fiber*. Draka Comteq, August 2005.
- [44] Karty katalogowe:
- ✓ *FutureGuide-SM: Single-Mode Fiber (ITU-T G.652.B)*
  - ✓ *FutureGuide-LWP: Low-Water-Peak Single-Mode Fiber (ITU-T G.652.D)*
  - ✓ *FutureGuide-SR15: Bending-insensitive Small Bending Loss Single-Mode Fiber (ITU-T G.652.B)*
  - ✓ *FutureGuide-SR15E: Bending-insensitive & Low-Water-Peak Small Bending Loss Single-Mode Fiber (ITU-T G.652.D)*

- ✓ *FutureGuide-DS: Dispersion-Shifted Single Mode Fiber (ITU-T G.653)*
  - ✓ *FutureGuide-LA: Large-Effective-Area NZ-DSF (ITU-T G.655)*
  - ✓ *FutureGuide-SS: Small-Dispersion-Slope Non-Zero-Dispersion-Shifted Single Mode Fiber (ITU-T G.655)*
  - ✓ *FutureGuide-ULA: Ultra Large-Effective-Area & Medium-Dispersion Non-Zero-Dispersion-Shifted Single Mode Fiber*
  - ✓ *FutureGuide-USS: Ultra Small-Dispersion-Slope Non-Zero-Dispersion-Shifted Single Mode Fiber (ITU-T G.656)*
- Fujikura Ltd., 11/2005. <http://www.fujikura.co.jp/optcable/ei>
- [45] *Matched Cladding Single-Mode Fiber*. OFS Denmark, 05/2003.
  - [46] *AllWave Fiber: Zero Water Peak*. OFS / Furukawa Electric, 10/2005.
  - [47] *TrueWave REACH Fiber: Low Water Peak*. OFS / Furukawa Electric, 10/2005.
  - [48] *TrueWave RS Fiber*. OFS / Furukawa Electric, 09/2003.
  - [49] Karty katalogowe włókien światłowodowych: *SM Light, FineLight, MagniLight, FreeLight, WideLight*. Pirelli / Prysmian, 11/2005.
  - [50] *Single-Mode Optical Fiber SF-SMF PI-1101*. Samsung Fiberoptics, January 2004.
  - [51] *WidePass Fiber Low Water Peak Fiber SF-LWP PI-1102*. Samsung Fiberoptics, May 2004.
  - [52] *UltraPass Fiber SF-MD PI-1103*. Samsung Fiberoptics, October 2004.
  - [53] *SE-5\*\* PureBand Single-Mode Fiber: Zero Water Peak (ZWP) Attenuation Optical Fiber*. Sumitomo Electric, July 2005.
  - [54] *SE-6\*\* Non-Zero Dispersion Shifted Single-Mode Fiber: PureGuide SM Optical Fiber*. Sumitomo Electric, November 2003.
  - [55] *SE-7\*\* Non-Zero Dispersion Shifted Single-Mode Fiber: PureMetro SM Optical Fiber*. Sumitomo Electric, November 2003.
  - [56] *SE-9\*\* PureAccess Single-Mode Fiber: Reduced Waterpeak, Reduced Bend Radius, SM Optical Fiber*. Sumitomo Electric, November 2003.
  - [57] K. Borzycki: Systemy transmisyjne CWDM i związane z nimi wymagania dla światłowodowych sieci kablowych. Kabel 2004, Zakopane, 2-5 marca 2004 r., s. 84-92.
  - [58] Matthijsse P., Griffioen W.: *Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage*. Optical Fiber Technol., Vol. 11, s. 92-99, 2005.
  - [59] Quoi K.W., Cohen L.G., Reed W.A., Shenk D.S.: *Screening Dispersion-Shifted Fibers for Polarization-Mode Dispersion Due to Core Ellipticity*. J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 11, s. 1684-1687, 1990.
  - [60] M. Tsukitani, M. Matsui, K. Nagayama, E. Sasaoka: *Ultra Low Nonlinearity Pure-Silica-Core Fiber with an Effective Area of 211  $\mu\text{m}^2$  and Transmission Loss of 0.159 dB/km*. Proc. ECOC 2002, referat 3.2.2, Copenhagen, Denmark, September 8-12, 2002.
  - [61] X. Chen, M.-J. Li, J. Meyer, O. Palmer: *Method of making a spun optical fiber with low polarization mode dispersion*. Patent USA Nr 6876804, 2005 r.
  - [62] I. Kouzmina, C.K. Chien, P. Bell, E. Fewkes: *Corning CPC Protective Coating – An Overview*. White Paper WP3703, Corning Inc., July 2003.
  - [63] N.G. Olson, C. Leung, X. Wang: *Stiffness measurement of the external polymeric coating on an optical fiber*. Experimental Techniques, November/December 2002, s. 51-56.
  - [64] *Product Data Sheet: KlearShield 1-001 Primary Fiber Optic Coating*. Borden Chemical, Inc., 05/2003.
  - [65] *Product Data Sheet: KlearShield 2-001 Secondary Fiber Optic Coating*. Borden Chemical, Inc., 05/2003.
  - [66] *Product Data Sheet: KlearShield 2-002 Secondary Fiber Optic Coating*. Borden Chemical, Inc., 05/2003.



- [67] *PMD Measurement Methods*. Siecor GmbH, 1998 r.
- [68] D.J. Broer, G.N. Mol: *Fast Curing Primary Buffer Coatings for High Strength Optical Fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 7, s. 938-941, 1986.
- [69] C. Aloisio, A. Hale, K. Konstadinidis: *Optical Fiber Coating Delamination Using Model Coating Materials*. Proc. 51st IWCS, s. 738-747, Orlando, U.S.A., November 18-21, 2002.
- [70] M.D. Fabian, E.J. Fewkes, G.S. Glaesemann: *Coated optical fiber and curable compositions suitable for coating optical fiber*. Wniosek patentowy USA Nr US2005/0158001 A1, 2005 r.
- [71] J. L. Mrotek, M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian: *Diffusion of Moisture Through Optical Fiber Coatings*. J. Lightwave Technol., Vol. 19, No. 7, July 2001, s. 988-993.
- [72] M. Wegmuller, M. Legré, P. Oberson, O. Guinnard, L. Guinnard, C. Vinegoni, N. Gisin: *Analysis of the polarization evolution in a ribbon cable using high resolution coherent OFDR*. IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 13, No. 2, s. 145-147, February 2001.
- [73] K.W. Jackson, A. Bhat, V. Chandraiah, R.E. Fangmann, L.R. Dunn, A.F. Judy, H.Ly, S.C. Mettler: *Polarization Mode Dispersion in High Fiber Count Outside Plant Cable*. Proc. NFOEC 2001, Baltimore, USA, s. 1333-1341, July 8-12, 2001.
- [74] A. Galtarossa, C. Someda, A. Tommasini, B. Schrefler, M. Schiano: *Stress Distribution in Optical-Fiber Ribbons*. IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 9, No. 3, s. 354-356, 1997.
- [75] B. Malm, M. Lahti, P. Heikkila, R.C. Dammert: *Polypropylene heterophasic copolymer for loose tube buffers*. Proc. 53rd IWCS/Focus, Philadelphia, USA, Nov. 15-17, 2004.
- [76] D. Capanitis, W. Wieleba: *Przegląd tworzyw sztucznych – właściwości i zastosowanie*. Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny (skrypt), 2004 r.
- [77] *Properties of PLANAC PBT*. Informator techniczny firmy Dainippon Ink and Chemicals, Inc., 1998 r. <http://www.dic.co.jp/eng/products/planac/index.html>
- [78] I. Gruin: *Materiały polimerowe*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003 r.
- [79] *Design Information: Crastin PBT and Rynite PET Thermoplastic Polyester Resins*. DuPont Engineering Polymers, Dokument L-10978, May 2000.
- [80] M. Ambroziak, I. Gruin, K. Zdunek, M. Wronikowski: *Effect of Structural Features of Poly(butylene terephthalate) Tubes on the Useful Properties of the Loose Tube/Optical Fibers System in the Tubular Optical Fiber Cables*. Journ. Appl. Polymer Sci., Vol. 86, s. 2124-2129, 2002.
- [81] O.S. Gebizlioglu: *Time- and Temperature-Dependent Material Behavior and Its Impact on Low-Temperature Performance of Fiber Optic Cables*. Materials Research Society Symposium Proceedings Vol. 531, s. 333-345, Symposium DD: Reliability of Photonics Materials and Structures, San Francisco, U.S.A., April 13-16, 1998.
- [82] *OmniReach™ FTTP Solutions: Dramatic Attenuation in Fiber Access Terminals at Low Temperatures - White Paper*. ADC Telecommunications, 2004.
- [83] Wiltshire B., Reeve M.H.: *A Review of the Environmental Factors Affecting Optical Cable Design*. J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 2, s. 179-185, 1988.
- [84] H. Murata: *Handbook of Optical Fibers and Cables – Second Edition*. New York, Marcel Dekker, Inc., 1996.
- [85] A.J. Panuska, P.D. Patel: *Lightweight Optical Fiber Cable*. Patent USA Nr 5125063, 1992 r.
- [86] M. Shimizu, T. Fujii, H. Ishikawa: *Polarization Mode Dispersion Coefficient for Fiber Optic Cables*. Proc. 52nd IWCS/Focus, s. 489-494, Philadelphia, U.S.A., November 17-20, 2003.
- [87] *Kable optotelekomunikacyjne (katalog)*. Fabryka Kabli "Ożarów", wydanie 5, październik 1999 r.
- [88] T. Naruse, Y. Sugawara, K. Masuno: *Nylon-Jacketed Optical Fibre with Silicon Buffer Layer*. Electronics Letters, Vol. 13, No. 6, s. 153-154, 1977.

- [89] P.E. Neveux, Jr., W.M. Newtoni, S.A. Aderogba, M. Nagarajan, C.N. Okafor: *High Modulus Tight Buffer Design with Improved Microbend Resistance and Low Temperature Performance*. Proc. 51st IWCS, s. 37-43, Orlando, U.S.A., November 18-21, 2002.
- [90] *Kable i przewody telekomunikacyjne (katalog)*. Tele-Fonika Kable S.A., luty 2004 r.
- [91] M. Mangold: *Investigations of Temperature Behaviour of 500 $\mu$ m Fibers within the Range of -60°C to +140°C*. Proc. 54th IWCS/Focus, s. 303-306, Providence, U.S.A., November 13-16, 2005.
- [92] *Fiber Optic Cable*. Katalog Nr 3.27.03. AFL Telecommunications, 2002 r.
- [93] Katalog zbiorczy wyrobów światłowodowych. Alcoa Fujikura Ltd., 1993 r.
- [94] *Ribbonet - Air Blown Fiber: System description. Dokument 28701-2/FGB101254 Uen Rev A*. Ericsson Network Technologies AB, 2004 r.
- [95] *Air Blown Fiber on Pan NTM 502+: Air blown fiber for the Ribbonet® system. Dokument 2/28701-FGC 101 732 Uen Rev B*. Ericsson Network Technologies AB.
- [96] *EFIRON Ribbon Coating UVF-R7002NT*. Luvantix, 2003.  
<http://www.luvantix.com/Ribbon%20Coating%20Matrix.htm>
- [97] Zalecenie ITU-T G.650.2: *Transmission media characteristics – Optical fibre cables: Definitions and test methods for statistical and non-linear attributes of single-mode fibre and cable*. Wersja przed publikacją. (01/2005)
- [98] Specyfikacja Techniczna IEC 61282-9: *Fibre optic communication system design guides – Part 9: Guidance on polarization mode dispersion measurements and theory*. Wersja robocza, 15.08.2003.
- [99] H. Sunnerud: *Polarization-Mode Dispersion in Optical Fibers: Characterization, Transmission Impairments and Compensation*. Rozprawa doktorska, Technical Report No. 399, Department of Microelectronics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, March 2001.  
<http://www.elm.chalmers.se/staff/sunnerud/thesisnopapers.pdf>
- [100] M. Marciniak: *Łączność światłowodowa*. Warszawa, WKiŁ, 1998 r.
- [101] A. Smoliński: *Optoelektronika światłowodowa*. Warszawa, WKiŁ, 1985 r.
- [102] S.A. Mastro: *Optomechanical behavior of embedded fiber Bragg grating strain sensors*. Rozprawa doktorska, Drexel University, Philadelphia, USA, July 2005.
- [103] R. Priestley: *Birefringence dispersion in fused silica for DUV lithography*. Proc. SPIE Vol. 4346, s. 1300-1305, Optical Microlithography XIV, September 2001.
- [104] A.J. Barlow, D.N. Payne: *The Stress-Optic Effect in Optical Fibers*. IEEE Journ. Quantum Electronics, Vol. QE-19, No. 5, s. 834-839, 1983.
- [105] T. Chartier, C. Greverie, L. Selle, L. Carlus, G. Bouquest, L.-A. de Montmorillon: *Measurement of the stress-optic coefficient of single-mode fibers using a magneto-optic method*. Optics Express, Vol. 11, No. 20, s. 2561-2566, 2003.
- [106] J.I Sakai, T. Kimura: *Birefringence Caused by Thermal Stress in Elliptically Deformed Core Optical Fibers*. IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-18, No. 11, s. 1899-1909, 1982.
- [107] R. Ulrich, S.C. Rashleigh, W. Eickhoff: *Bending-induced birefringence in single-mode fibers*. Opt. Lett., Vol. 5, No. 6, s. 60-62, 1980.
- [108] N. Gisin, J.P. von der Weid, J.P. Pellaux: *Polarization mode dispersion of short and long single mode fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. 9, No. 7, s. 821-827, 1991.
- [109] D.A. Nolan, X. Chen, M.-J. Li: *Fibers With Low Polarization-Mode Dispersion*. J. Lightwave Technol., Vol. 22, No. 4, s. 1066-1077, 2004.
- [110] M.-J. Li, X. Chen, D.A. Nolan: *Fiber Spinning for Reducing Polarization Mode Dispersion in Single-Mode Fibers: Theory and Applications*. Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II, Proc. SPIE, Vol. 5247, s. 97-110, 2003.

- [111] M.C. de Lignie, H.G.J. Nagel, M.O. van Deventer: *Large Polarization Mode Dispersion in Fiber Optic Cables*. J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 8, s. 1325-1329, 1994.
- [112] A.F. Judy, A.H. McCurdy, R.K. Boncek, S.K. Kakar: *Fiber PMD – Room for Improvement*. Proc. NFOEC 2003, Orlando, U.S.A., s. 1208-1217, September 7-11, 2003.
- [113] C.T. Allen, P.K. Kondamuri, D.L. Richards, D.C. Hague: *Measured Temporal and Spectral PMD Characteristics and Their Implications for Network-Level Mitigation Approaches*. J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 1, s. 79-86, 2003.
- [114] IEC TR 61282: *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion*. (03/2002)
- [115] A. Hart, R. Huff, K. Walker: *Optical fiber fiber having low polarization mode dispersion, due to permanent spin*. Patent USA Nr 5418881, 1995 r.
- [116] A. Smoliński: *The state of the art of optical fiber transmission*. III Krajowe Sympozjum "Światłowody i ich zastosowania", Vol. 2, referat II/1, s. 8-14, Jabłonna, 15-17 lutego 1983 r.
- [117] M.-J. Li, X. Chen, D.A. Nolan: *Ultra Low PMD Fibers by Fiber Spinning*. Optical Fiber Communication Conference, OFC 2004, Los Angeles, U.S.A., referat FA1, February 22-27, 2004.
- [118] M.-J. Li, X. Chen, D. Nolan: *Effects of residual stress on polarization mode dispersion of fibers made with different types of spinning*. Optics Letters, Vol. 29, No. 5, s. 448-450, March 1, 2004.
- [119] A. Galtarossa, L. Palmieri, A. Pizzinat: *Optimized Spinning Design for Low PMD Fibers: An Analytical Approach*. J. Lightwave Technol., Vol. 19, No. 10, s. 1502-1512, 2001.
- [120] R.E. Schuh, X. Shan, A.S. Siddiqui: *Polarization Mode Dispersion in Spun Fibers with Different Linear Birefringence and Spinning Parameters*. J. Lightwave Technol., Vol. 16, No. 9, s. 1583-1588, 1998.
- [121] M. Wang, T. Li, S. Jian: *Analytical theory for polarization mode dispersion of spun and twisted fiber*. Optics Express, Vol. 11, No. 19, s. 2403-2410, 22 September 2003.
- [122] D. Nolan, M.-J. Li, D. Henderson, G. Washburn: *Frequency and amplitude modulated fiber spins for PMD reduction*. Patent USA Nr 5943466, 1999 r.
- [123] R. Geertman: *Method of making a twisted optical fiber with low polarisation mode dispersion*. Patent USA Nr 5897680, 1999 r.
- [124] D. Nolan, M.-J. Li, D. Henderson, G. Washburn: *Frequency and amplitude modulated fiber spins for PMD reduction*. Patent USA Nr 6240748, 2001 r.
- [125] A. Debut, D. Sarchi, F. Sartori, M. Travagnin: *PMD statistical measurements in unidirectionally spun fibers*. Proc. ECOC 2004, referat We4.P.023, Stockholm, Sweden, September 5-9, 2004.
- [126] Y. Wang, Ch.-Q. Xu, V. Izraelian: *Characterization of spun fibers with millimeter spin periods*. Optics Express, Vol. 13, No. 10, s. 3841-3851, 16 May 2005.
- [127] X. Chen, M.-J. Li, D. A. Nolan: *Spun Fibers for Low PMD: Understanding of Fundamental Characteristics*. OFC 2002, Referat TuB1.I., Anaheim, U.S.A., March 17-22, 2002. Prezentacja została odwołana, referat opublikowano w Internecie. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8671/27470/01224301.pdf?arnumber=1224301&htry=5>
- [128] K. Itoh, T. Saitoh, Y. Ohtsuka: *Optical Rotation Sensing by the Geometric Effect of Fiber-Loop Twisting*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 7, s. 916-919, 1987.
- [129] M.-J. Li, X. Chen, and D. A. Nolan: *Effects of residual stress on PMD of spun fibers*. Proc. ECOC 2003, referat Th.1.7.2, Rimini, September 21-25, 2003.
- [130] R.E. Schuh, E.S.R. Sikora, N.G. Walker, A.S. Siddiqui, L.M. Gleeson, D.H.O. Bebbington: *Theoretical analysis and measurement of effects of fibre twist on polarisation mode dispersion of optical fibres*. Electron. Lett., Vol. 31, No. 20, s. 1772-1773, 1995.

- [131] M.J. Li, A.F. Evans, D.W. Allen, D.A. Nolan: *Effects of Lateral Load and External Twist on PMD of Spun and Unspun Fibers*. Proc. ECOC 1999, Vol. II, Referat WeA2.3, September 26-30, Nice, France, s. 62-63.
- [132] D. Sarchi, G. Roba: *PMD Mitigation Through Constant Spinning and Twist Control: Experimental Results*. Proc. OFC'2003, referat WJ2, s. 367-368, Atlanta, U.S.A., March 23-28, 2003.
- [133] Zalecenie ITU-T G.691: *Optical interfaces for single-channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers*. (2003)
- [134] Zalecenie ITU-T G.959.1: *Digital sections and digital line system – Digital line systems: Optical transport network physical layer interfaces*. (12/2003)
- [135] K. Brown: *Characterization of optical fibres for high speed communication systems*. Praca magisterska, University of New Brunswick, Canada, August 2001.
- [136] H. Gruhl, J. Vobian: *Attenuation, Chromatic Dispersion and Polarization Mode Dispersion Parameters of 40 000 km of Standard Monomode Fibers in the Optical Network of "Deutsche Telekom AG"*. Proc. 47th IWCS, Philadelphia, U.S.A., November 16-19, 1998, s. 440-449.
- [137] K. Brown, J. Cameron, J. Stears, W. Hickey, R. Cormier, X. Bao, L. Chen: *Characterization of Fibers in an Existing Network for High Speed System (10 Gb/s or Greater) Compatibility*. Fiber and Integrated Optics, Vol. 20, No. 5, s. 427-442, 2001.
- [138] S. Barcelos: *PMD field audit reveals investment losses*. Lightwave, Vol. 22, No. 2, s. 1-32, 2005.
- [139] K. Borzycki: *Report on COST-291 Short Term Scientific Mission to Politecnico di Torino (Turin, Italy)*. Sprawozdanie dla Komitetu Zarządzającego COST-291, lipiec 2005 r.
- [140] K. Borzycki: *Influence of temperature and aging on Polarization Mode Dispersion of tight-buffered optical fibers and cables*. J. Telecom. Inf. Technol., No. 3/2005, s. 96-104.
- [141] K. Borzycki, M. Jaworski, K. Woyczkowski, A. Zawiślański: *Sprawozdanie z realizacji pracy 14300024 – zadanie 1: Badania wpływu zmiennych temperatur i przyspieszonego starzenia na zmiany modowej dyspersji polaryzacyjnej (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych (ITU-T G.652 i G.655) w pokryciach ochronnych o konstrukcji ścistej i kabli z takimi włóknami dla potrzeb udziału IŁ w europejskim projekcie badawczym COST-270*. Instytut Łączności, Warszawa, listopad 2004 r.
- [142] K. Borzycki, T. Abraham, M. Jaworski, U. Figura, J. Molga, B. Jastrzębska, H. Skrobek, A. Zawiślański: *Sprawozdanie z realizacji pracy 14300025: Badania wpływu zmiennych temperatur i przyspieszonego starzenia na zmiany modowej dyspersji polaryzacyjnej (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych (ITU-T G.652 i G.655) w pokryciach ochronnych o konstrukcji ścistej i kabli z takimi włóknami dla potrzeb udziału IŁ w europejskim projekcie badawczym COST-270*. Instytut Łączności, Warszawa, grudzień 2005 r.
- [143] D.L. Harris, P.K. Kondamuri, R. Huang, J. Pan, C. Allen: *First and second order PMD statistical properties of installed fiber*. Proc. LEOS 2004, referat MJ3, s. 86-87, Puerto Rico, November 4-11, 2004.
- [144] H. Bülow: *Limitation of Optical First-Order PMD Compensation*. OFC and IOOC 1999 Technical Digest, referat WE1-1, s. 74-76, San Diego, USA, February 23-26, 1999.
- [145] M. Karlsson: *Polarization Mode Dispersion Mitigation – Performance of Various Approaches*. Proc. OFC 2002, referat WI.I, s. 231-232, Anaheim, U.S.A., March 17-22, 2002.
- [146] Zalecenie ITU-T G.975: *Forward error correction for submarine systems*. (10/2000).
- [147] N. Gisin, B. Gisin, J.P. von der Weid, R. Passy: *How accurately can one measure a statistical quantity like Polarization Mode Dispersion?* IEEE Photonics Technol. Letters, Vol. 8, s. 1671–1673, 1996.



- [148] S.T. Shiue, C.S. Hsu: *Thermally induced microbending losses in double-coated optical fibers during temperature cycling*. Journ. Appl. Physics, Vol. 88, No. 7, s. 3840-3847, 2000.
- [149] S.T. Shiue, Y.K. Tu: *Relaxation of Thermal Stresses in Double-coated Optical Fibers*. J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 8, s. 4085-4090, 1999.
- [150] B. Huttner, B. Gisin, N. Gisin: *Distributed PMD Measurement with a Polarization-OTDR in Optical Fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. 17, No. 10, s. 1843-1848, 1999.
- [151] A. Conibear, F.J. Visser, F. Audet, R. Salmi, A.W.R. Leitch: *Locating High PMD Sections of an Overhead Cable using Polarization-OTDR*. NIST Symposium on Optical Fiber Measurements, Boulder, USA, s. 149-154, September 26-28, 2000.
- [152] M. Wuilpart, G. Ravet, P. Megret, M. Blondel: *Polarization Mode Dispersion Mapping in Optical Fibers With a Polarization-OTDR*. IEEE Photonics Technol. Letters, Vol. 14, s. 1716-1718, 2002.
- [153] A. Galtarossa, L. Palmieri, M. Schiano, T. Tambosso: *Single-End Polarization Mode Dispersion Measurement Using Backreflected Spectra Through a Linear Polarizer*. J. Lightwave Technol., Vol. 17, No. 10, s. 1835-1842, 1999.
- [154] *DOP Polarization-OTDR POTDR-1100*. EXFO Electro-Optical Engineering Inc., 2005.
- [155] A. Galtarossa, L. Palmieri, A. Pizzinat, M. Schiano, T. Tambosso: *Distributed Birefringence Characterization in Installed Single-Mode Fibers*. Proc. ECOC 2000, Vol. I, referat 3.4.3, s. 139-141, Munich, Germany, September 3-7, 2000.
- [156] D. Gloge: *Optical-Fiber Packaging and Its Influence on Fiber Straightness and Loss*. Bell System Technical Journal, Vol. 54, No. 2, pp. 245-62, 1975.
- [157] N. Yoshizawa, M. Ohnishi, O. Kawata, K. Ishihara, Y. Negishi: *Low Temperature Characteristics of UV-Curable Resin Coated Optical Fiber*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-3, No. 4, s. 779-784, 1985.
- [158] P.C.P. Bouten, D.J. Broer, C.M.G. Jochem, T.P.M. Meeuwssen, H.J.M. Timmermans: *Doubly Coated Optical Fibers with a Low Sensitivity to Temperature and Microbending*. J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 4, s. 680-686, 1989.
- [159] Z. Yunhui, S. Jing: *Synthesis and characterization of poly(butylene terephthalate)-poly(ethylene terephthalate-co-isophthalate-co-sebacate) segmented copolyesters*. Chemical Journal on Internet, vol. 4, No. 2, s. 8, 2004.  
<http://www.chemistrymag.org/cji/2002/042008pe.htm>
- [160] J.L. Smith, A. Dwivedi, P.T. Garvey: *Mechanical Behavior of Optical Fibers Removed From a Field-Aged Cable*. Technical Report TR1088, Corning Inc., 1995.  
<http://www.new.corning.com/docs/opticalfiber/tr1088.pdf> oraz Proc. 44th IWCS, Philadelphia, U.S.A., November 13-16, 1995.
- [161] S.J. Wang, H.C. Tian, R. Yang, E. Baumann, A. Landers: *Thermal Characteristics of the Propagation Delay for Bare and Cabled Single Mode Fibers*. Proc. 43rd IWCS, s. 672, Atlanta, U.S.A., November 14-17, 1994.
- [162] E. Suhir: *Mechanical Approach to the Evaluation of the Low Temperature Threshold of Added Transmission Losses in Single-Coated Optical Fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 6, s. 863-868, 1990.
- [163] *Pocan PBT – Informacje techniczno-użytkowe: przegląd typów, dane techniczne*. Katalog KU29001-9911 pol, Bayer Plastics Business Group, 1999.
- [164] E. Suhir: *Spring Constant in the Buckling of Dual-Coated Optical Fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 7, s. 1240-1244, 1988.
- [165] E. Suhir: *Effect of Initial Curvature on Low Temperature Microbending in Optical Fibers*. J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 8, s. 1321-1327, 1988.
- [166] W. King: *Thermally Induced Stresses in an Optical-Fiber Coating*. J. Lightwave Technol., Vol. 9, No. 8, s. 952-953, 1991.

- [167] S.T. Shiue: *Design of Double-Coated Optical Fibers to Minimize Hydrostatic Pressure Induced Microbending Losses*. IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 4, No. 7, s. 746-748, 1992.
- [168] S.T. Shiue: *Axial Strain-induced Microbending Losses in Double-coated Optical Fibers*. J. Appl. Phys., Vol. 73, No. 2, s. 526-529, 1993.
- [169] S.T. Shiue: *The effects of polymeric coatings on the low-temperature microbending losses in initially curved double-coated optical fibers*. Journ. Appl. Physics, Vol. 78, No. 11, s. 6384-6388, 1995.
- [170] W.J. Chang, H.L. Lee, Y.C. Yang: *Hydrostatic pressure and thermal loading induced optical effects in double-coated optical fibers*. Journ. Appl. Physics, Vol. 88, No. 2, s. 616-620, 2000.
- [171] T. Kokubun, Y. Katsuyama: *Curing Shrinkage Effects of UV-Curable Materials on Fiber Loss Characteristics*. J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 11, s. 1654-1658, 1990.
- [172] H. Ishikawa, K. Nagayama, N. Akasaka, M. Kaino, M. Shimizu, S. Takaoka: *Polarization Mode Dispersion Characteristics of Various High Performance Optical Fibers in Cable*. Proc. 50th IWCS, s. 506-513, Lake Buena Vista, Florida, U.S.A., November 12-15, 2001.
- [173] S.T. Shiue: *The spring constant in the buckling of tightly jacketed double-coated optical fibers*. J. Appl. Phys., Vol. 81, No. 8, s. 3363-3368, 1997.
- [174] S.T. Shiue: *Thermal stresses in tightly jacketed double-coated optical fibers at low temperature*. J. Appl. Phys., Vol. 76, No. 12, s. 7695-7703, 1994.
- [175] S. Hornung, R. Kashyap, M.H. Reeve, J.N. Russell, J.G. Titmarsh: *Axial Strain in Optical-Fiber Cable Manufacture and Duct Installation*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-1, No. 2, s. 359-362, 1983.
- [176] S. Tanaka, Y. Kameo, K. Tsuneishi: *Long-Term Reliability of Layer-Type Tight Structure Cable*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8, s. 1183-1188, 1986.
- [177] Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, Y. Ishida: *Thermal Characteristics of Jacketed Optical Fibers with Initial Imperfection*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-2, No. 1, s. 18-24, 1984.
- [178] Y. Shuto, F. Yamamoto, Y. Takeuchi: *High-Temperature Stability of Optical Transmission Properties Attained by Liquid-Crystal Polymer Jacket*. J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 6, s. 614-618, 1986.
- [179] eFunda Engineering Fundamentals: *Compression Spring Designer Equations*. [http://www.efunda.com/DesignStandards/springs/calc\\_comp\\_designer\\_eqn.cfm](http://www.efunda.com/DesignStandards/springs/calc_comp_designer_eqn.cfm)
- [180] B. Hillerich, D. S. Parmar, P. Schlang: *Criteria for the jacketing of optical fiber*. Proc. 3<sup>rd</sup> ECOC, s. 86-89, Munich, West Germany, September 1977.
- [181] M. Ott: *Fiber Optic Cable Assemblies for Space Flight Applications III: Characterization of Commercial cables for Thermal Effects*. NASA Electronic Parts and Packaging Program Report, 2000. <http://nepp.nasa.gov/photonics/pdf/thermcablerept00.pdf>
- [182] M. Ott: *Fiber optic cable assemblies for space flight II: thermal and radiation effects*. SPIE Proceedings Vol. 3440: Photonics for Space Environments VI, referat Nr 3440-05, 1998.
- [183] P.K. Kondamuri, C. Allen, D.L. Richards: *Variation of PMD-induced Outage Rates and Durations with Link Length on Buried Standard Single-mode Fibers*. Proc. OFC 2005, referat OThX3, Anaheim, U.S.A., March 7-11, 2005. [http://www.itc.ku.edu/publications/documents/kondamuri2005\\_OFConference.pdf](http://www.itc.ku.edu/publications/documents/kondamuri2005_OFConference.pdf)
- [184] A. Nespola, S. Abrate, P. Poggiolini, M. Magri: *Long term PMD characterization of installed G.652 fibers in a metropolitan network*. Proc. OFC 2005, Anaheim, USA, referat JWA1, March 6-11, 2005.
- [185] P.M. Nellen, R. Brönnimann, M. Held, U. Sennhauser: *Long-term monitoring of polarization-mode dispersion of aerial optical cables with respect to line availability*. J. Lightwave Technol., Vol. 22, No. 8, s. 1848-1855, 2004.

- [186] S. Waddy, L. Chen, X. Bao: *Polarization effects in aerial fibers*. Optical Fiber Technology, Vol. 11, s. 1–19, 2005.
- [187] D. L. Harris, P. K. Kondamuri, J. Pan, C. Allen: *Temperature dependence of wavelength-averaged DGD on different buried fibers*. Proc. LEOS 2004, referat MJ2, s. 84-85, Puerto Rico, November 4-11, 2004.
- [188] M. Brodsky, P. Magill, N. Frigo: *Evidence for Parametric Dependence of PMD on Temperature in Installed 0.05 ps/km<sup>1/2</sup> Fiber*. Proc. ECOC 2002, referat 9.3.2, Copenhagen, Denmark, September 8-12, 2002.
- [189] Y. Nahimira, W. Yamasaki, N. Zou, L.V. Massawe, K. Miyagi, K. Kaneshima, T. Arakaki, E. Ikemiyagi, M. Toma: *Simultaneous Measurements of PMD, CD and Polarization Fluctuations in Actual OPGW using WDM Optical Filters*. Proc. ECOC 2004, referat We4.P.027, Stockholm, Sweden, September 5-9, 2004.
- [190] J. A. Nagel, M. W. Chbat, L. D. Garrett, J. P. Soigné, N. A. Weaver, B. M. Desthieux, H. Bülow, A. R. McCormick, R. M. Derosier: *Long-term PMD mitigation at 10 Gb/s and time dynamics over high-PMD installed fiber*. Proc. ECOC 2000, Vol. II, referat 4.2.1, s. 31-32, Munich, Germany, September 3-7, 2000.
- [191] S. Abrate, C. Lezzi, V. Ferrero, A. Nespola, P. Poggiolini: *Long-Term PMD Measurements in a Metropolitan Operational G.652 Cable Plant*. Proc. ECOC 2005, referat We4.P.085, Glasgow, U.K., September 25-29, 2005.
- [192] B.W. Hakki: *Polarization mode dispersion in a single mode fiber*. J. Lightwave Technol. Vol. 14, s. 2202-2208, 1996.
- [193] A. Walter, G. Schaefer: *Chromatic Dispersion Variations in Ultra-Long-Haul Transmission Systems Arising from Seasonal Soil Temperature Variations*. Proc. OFC 2002, Referat WU4, s. 332-333, Anaheim, U.S.A., March 17-22, 2002.
- [194] K. Tsujikawa, M. Ohashi, H. Iwata, M. Tateda, T. Tanifuji: *Polarization Mode Dispersion of a Submarine Cable Containing 12 Fibers*. Electronics and Communications in Japan, Part I, Vol. 83, No. 8, s. 76-84, 2000.
- [195] J. Dotto, J. A. de Medeiros Neto, A. P. Pohl: *Behavior of the PMD Coefficient of Optical Links Under Influence of Mechanical and Thermal Effects*. J. of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 3, No. 5, s. 71-80, July 2004.
- [196] M. M. Simião, J. Dotto, L. F. G. Marques, R. F. Cruz, J. A. de Medeiros Neto: *The Behavior of PMD Parameter in an Optical Cable Link due to Temperature Cycling*. Proc. 51st IWCS, s. 667-674, Orlando, U.S.A., November 18-21, 2002.
- [197] M.L. Lundergan, K.M. Dallas: *Field-aging study shows strength of optical ground wire cable*. Lightwave, Vol. 14, No. 11, 1997.  
<http://www.corning.com/docs/opticalfiber/r1082.pdf>
- [198] K. Borzycki, M. Held, P. Nellen: *Badania wpływu temperatury na dyspersję polaryzacyjną (PMD) jednomodowych włókien światłowodowych w pokryciach ściśłych*. Kabel 2004, s. 74-83, Zakopane, 2-5 marca 2004 r.
- [199] M. Buryk, K. Borzycki, M. Jaworski, M. Marciniak: *Investigation of PMD in old optical fibres and cables and PMD effects on network upgrades to higher bit rates*. Proc. ICTON 2004, referat We.P.24, Vol. 2, s. 240-243, Wrocław, 4-8 lipca 2004 r.
- [200] K. Borzycki: *Temperature Dependence of PMD in Optical Fibres and Cables*. Proc. ICTON 2005, referat Tu.C3.7, Vol. 1, s. 441-444, Barcelona, Hiszpania, 3-7 lipca 2005 r.
- [201] K. Borzycki, M. Jaworski: *Influence of tight buffer on PMD and birefringence of single-mode fibers*. NEMO Scientific Networking Meeting, Poster No. 27, Karlsruhe, Germany, February 9-10, 2006.