

Sposób na kable światłowodowe

Zenon Drabik
Telekomunikacja Polska SA
OTO Lublin

Kable optotelekomunikacyjne stanowią zabezpieczenie włókien światłowodowych przed niekorzystnym oddziaływaniem zewnętrznych czynników mechanicznych i środowiskowych zarówno w trakcie instalacji, jak i przez cały okres ich użytkowania, zapewniając stabilność charakterystyk transmisyjnych światłowodów.

Najważniejsze zalety kabli optotelekomunikacyjnych to:

- brak oddziaływania zewnętrznych pól elektromagnetycznych na funkcjonowanie systemów transmisyjnych
- doskonała jakość transmisji optycznej na duże odległości
- duża pojemność informacyjna i szybkość transmisji
- mała średnica kabla
- mały dopuszczalny promień gięcia
- mały ciężar
- przenoszenie dużych obciążeń mechanicznych
- długości odcinków na życzenie odbiorcy
- stabilność pracy w różnych warunkach otoczenia
- łatwa instalacja (bębny kablowe niewielkich rozmiarów)
- standardowy osprzęt i wyposażenie
- szybkość instalowania.

Kable optotelekomunikacyjne są przeznaczone między innymi do stosowania w sieciach telekomunikacyjnych i teleinformatycznych, w kolejnictwie, górnictwie, energetyce i sieciach telewizji kablowej.

Włókna światłowodowe

Współczesne włókna światłowodowe są wytwarzane na bazie ultraczystego szkła kwarcowego, domieszkowanego w obszarze rdzenia głównie tlenkami germanu i fluoru. W procesie wyciągania, włókna przyjmują formę cylindrycznie symetrycznych falowodów. Średnica obszaru rdzenia oraz poziom domieszkania określają jeden z podstawowych parametrów transmisyjnych światłowodu – jego pojemność modową, czyli liczbę propagujących, stabilnych rozkładów pola elektromagnetycznego. Ze względu na pojemność modową światłowody dzielimy na wielo- i jednomodowe. Obydwa rodzaje włókien istotnie różni zarówno tłumienność, jak i pasmo przenoszenia, co rozgranicza obszary ich zastosowań.

Włókna światłowodowe wielomodowe

Podstawowe rodzaje włókien wielomodowych stosowanych w systemach transmisyjnych to włókna światłowodowe wielomodowe o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła w rdzeniu GI-MMF (Graded-Index Multi Mode Fibre). Światłowody te występują w dwóch wariantach średnicy rdzenia:

- 50 μm , średnica płaszczka 125 μm
- 62,5 μm , średnica płaszczka 125 μm .

Światłowody te stosowane są w I i II oknie transmisyjnym (850 i 1300 nm). Przykładowe charakterystyki transmisyjne tych światłowodów przedstawia tabela:

Rodzaj światłowodu	Tłumiennosc		Zasięg transmisji Gigabit Ethernet	
	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm
50/125	2,4 dB/km	0,7 dB/km	600 m	2000 m
62,5/125	2,9 dB/km	0,7 dB/km	600 m	2000 m

Włókna światłowodowe jednomodowe

Zalecenia ITU-T serii G klasyfikują włókna światłowodowe jednomodowe ze względu na wykorzystywane pasmo transmisyjne:

1. Podstawową kategorię stanowią tak zwane włókna światłowodowe jednomodowe o nieprzesuniętej charakterystyce dyspersyjnej DU-SMF (Dispersion-Unshifted Single Mode Fibre). Światłowody te, mimo że optymalizowane są dla II okna transmisji - 1310 nm, doskonale nadają się do stosowania w III oknie - 1550 nm, jak i do pracy w systemach ze zwielokrotnianiem w dziedzinie długości fali. Parametry tych światłowodów określają zalecenia ITU-T G.652, w ramach których zdefiniowano następujące podkategorie:
 - A. Światłowody przeznaczone dla systemów transmisyjnych o maksymalnej przepływności 2,5 GBit/s (STM-16)
 - B. Światłowody przeznaczone dla systemów transmisyjnych o maksymalnej przepływności 10 GBit/s (STM-64)
 - C. Światłowody przeznaczone dla systemów transmisyjnych o maksymalnej przepływności 10 GBit/s (STM-64).Światłowody te, zwane też światłowodami z obniżonym tłumieniem na jonach OH⁻ LWP-SMF (Low Water Peak Single Mode Fibre), umożliwiają również wykorzystanie pasma 1360-1530 nm.
2. Kategoria światłowodów o przesuniętej charakterystyce dyspersyjnej DS-SMF (Dispersion Shifted Single Mode Fibre), o parametrach zgodnych z zaleceniami ITU-T G.653. Ze względu na zerową wartość dyspersji w III oknie transmisji i zjawiska nieliniowe występujące w przypadku stosowania wzmacniaczy optycznych, jest to schyłkowa kategoria światłowodów jednomodowych. Mogą być one z powodzeniem stosowane w systemach transmisyjnych pracujących z nierównym odstępem kanałów w paśmie fal dłuższych niż 1550 nm.
3. Kategoria światłowodów jednomodowych o tak zwanej przesuniętej długości fali odcięcia CS-SMF (Cut-off Shifted Single Mode Fibre) o parametrach zgodnych z zaleceniami ITU-T G.654 A i B ma zastosowanie w liniach transoceanicznych i transkontynentalnych.
4. Światłowody o przesuniętej, niezerowej dyspersji NZDS-SMF (Non Zero Dispersion Shifted Single Mode Fibre) o parametrach zgodnych z zaleceniami ITU-T G.655:
 - A. Podstawowa kategoria światłowodów jednomodowych o przesuniętej, niezerowej dyspersji przeznaczonych dla systemów transmisyjnych z tzw. gęstym zwielokrotnianiem w dziedzinie długości fali DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).
 - B. Kategoria światłowodów jednomodowych o przesuniętej, niezerowej dyspersji przeznaczonych dla wielokanałowych systemów transmisyjnych o zredukowanym

odstępem między kanałami. Wymagania na dyspersję polaryzacyjną PMD (Polarization Mode Dispersion) dopuszczają pracę systemu przy przepływności binarnej 10 Gbit/s na dystansie 400 km.

Stabilność charakterystyk transmisyjnych światłowodów

Wszelkie odchylenia osi światłowodu od linii prostej powodują zaburzenia propagowanej fali elektromagnetycznej, skutkiem czego część niesionej w rdzeniu światłowodu energii jest tracona. Zjawisko to odgrywa ogromną rolę przy określaniu sprawności światłowodu w kablu. Zwykle odchyłki osi światłowodu od linii prostej wyraża się przez jego krzywiznę i klasyfikuje zależnie od jej częstotliwości przestrzennej na:

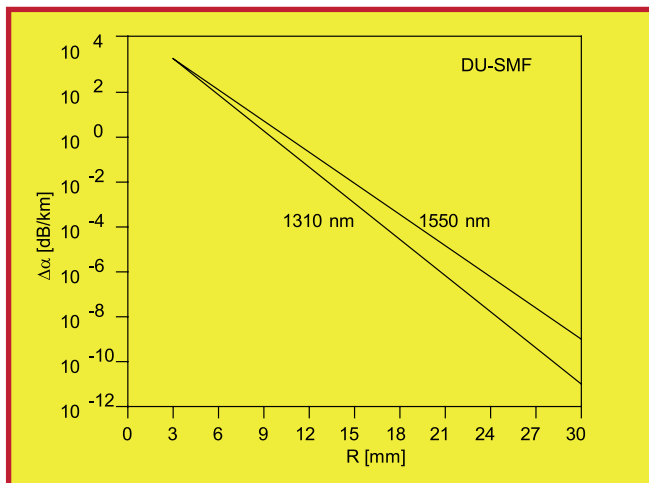
stałe lub wolnozmiennie o okresie > 10 mm - makrozgięcia (zgięcia)
szybkoszmiennie o okresie < 10 mm - mikrozgięcia

Straty na makrozgięciach

Głównymi źródłami powstawania makrozgięć światłowodów są:

- konstrukcja kabla
- ułożenie kabla
- ułożenie światłowodów w mufach łączących odcinki kabli.

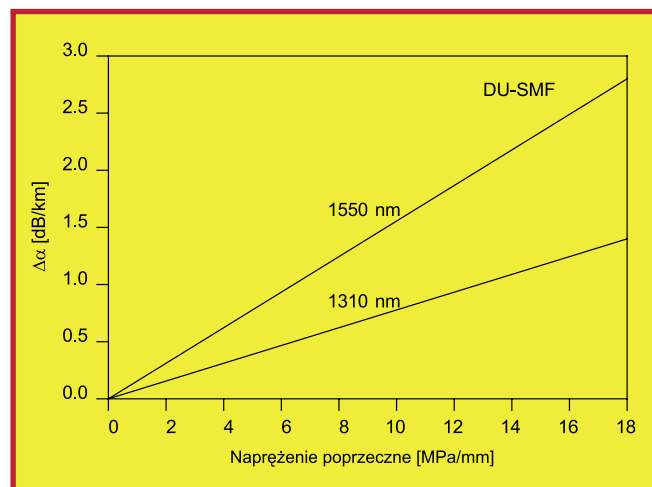
Przyczyną powstawania strat na makrozgięciach w światłowodach jednomodowych jest konwersja modu podstawowego w mody wyższego rzędu tracone dla transmisji.



Zależność wzrostu tłumienności od promienia gięcia światłowodu dla II i III okna transmisyjnego

Straty na mikrozgięciach

Mikrozgięcia światłowodu w kablu powstają wtedy, gdy elementy konstrukcyjne kabla zaczynają oddziaływać na niego. Powstałe wskutek tego mikrokrzywizny osi światłowodu wytwarzają w nim rozłożone statystycznie wzdłuż długości naprężenia poprzeczne powodujące wzrost jego tłumienności.



Zależność wzrostu tłumienności od naprężenia poprzecznego przypadającego na jednostkę długości światłowodu dla II i III okna transmisyjnego

Przy stratach mocy transmitowanej w światłowodzie powstających zarówno wskutek makro-, jak i mikrozgięć, „papierkiem lakmusowym” wskazującym na ich obecność jest pomiar reflektometryczny przy długości fali 1550 lub 1625 nm, gdzie wrażliwość światłowodów w obydwu przypadkach jest znacznie większa niż dla 1310 nm, kiedy ich obecność może być niezauważalna.

Wytrzymałość światłowodów

Dotychczasowe doświadczenia wskazują na bardzo dużą odporność światłowodów na pęknięcia. Nie oznacza to jednak, że nawet te wytwarzane na bazie najnowocześniejszych technologii pozbawione są defektów - mikropęknięć. Ponieważ w praktyce nie jest możliwe określenie położenia i wielkości wszystkich mikropęknięć we włóknie, informacje o jego wytrzymałości uzyskujemy z danych statystycznych otrzymanych z wytrzymałościowego testu przesiewczego (proof-test). Proof-test jest przeprowadzany w procesie wytwarzania



Firma produkcyjno-usługowa OTO Lublin działa w sektorze IT. Produkuje kable światłowodowe:

- napowietrzne
- przeznaczone do sieci lokalnych i obszarów zurbanizowanych
- wewnątrzobiektywne, w tym tzw. kable stacyjne
- połączeniowe i zakończeniowe.

W zależności od przeznaczenia (wytrzymałość mechaniczna, odporność na czynniki środowiskowe, liczba światłowodów) są one dostępne w różnych wariantach. Firma oferuje również osprzęt kablowy.

Jako jedyny krajowy producent oferuje karty elektroniczne:

- pamięciowe
- procesorowe i kryptoprocessorowe



- bezstykowe
 - hybrydowe (stykowo-bezstykowe).
- Roczna produkcja OTO Lublin to 5000 km kabla światłowodowego i 15 milionów kart elektronicznych. Ponadto Laboratorium Badawcze OTO Lublin zajmuje się badaniami i diagnostyką, wykonuje:
- pomiary i badania włókien
 - pomiary i badania kabli światłowodowych
 - ekspertyzy techniczne
 - ocenę przydatności linii optotelekomunikacyjnych do systemów transmisyjnych nowej generacji.

Telekomunikacja Polska SA
OTO Lublin
ul. Energetyków 23, 20-468 Lublin
tel. (081) 744-75-20, faks (081) 524-47-37



światłowodu, a jego celem jest eliminacja mikropęknięć określonego rozmiaru oraz dostarczenie informacji o „czasie życia” włókna w określonych warunkach eksploatacji. W praktyce proof-test polega na przewijaniu całej długości włókna z naprężeniem 0,73 GPa, co odpowiada względnemu wydłużeniu światłowodu o 1%. W przybliżeniu 1/3 wartości tego naprężenia określa tak zwane naprężenie bezpieczne, czyli takie, które pozwoli na bezawaryjną eksploatację światłowodu przez 30 lat. Przykładowo poddanie światłowodu działaniu naprężeniu rozciągającemu o wartości 2/3 proof-testu w czasie kilku godzin skraca „czas życia” światłowodów kilkadziesiąt razy.

Reguły wyboru włókien światłowodowych

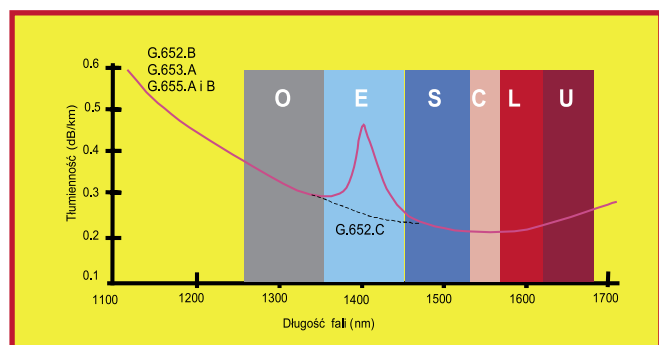
Światłowody jednomodowe, w zasadzie niezależnie od typu, mają podobne charakterystyki spektralne oraz podobną, niską wartość tłumienności. Powszechne stosowanie światłowodowych wzmacniaczy EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) czy też wzmacniaczy Ramana istotnie zmniejszyło znaczenie tłumienności linii czy wybór pasma transmisji. Umowną konwencję nazywania poszczególnych pasm transmisji oraz odpowiadające im zakresy długości fal w światłowodach jednomodowych zestawiono w tabeli.

O (original) 1260-1360 nm	E (extended) 1360-1460 nm	S (short) 1460-1530 nm
C (conventional) 1530-1565 nm	L (long) 1565-1625 nm	U (ultra-long) 1625-1675 nm

Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna w swoich zaleceniach dla systemów DWDM – ITU-T G.694.1 definiuje precyzyjnie pasmo C, przydzielając mu zakres długości fal: 1528,77-1560,61 nm oraz liczbę kanałów i odstęp między kanałami:

- 40 kanałów z odstępem 100 GHz
- 80 kanałów z odstępem 50 GHz
- 160 kanałów z odstępem 25 GHz
- 320 kanałów z odstępem 12,5 GHz

Ponadto dla sieci metropolitalnych i systemów zwielokrotniania DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), w zaleceniach ITU-T G.694.2 przydziela pasmo 1270-1610 nm dla 18 kanałów transmisyjnych z odstępem 20 nm.



Umiejscowienie poszczególnych pasm transmisyjnych na charakterystyce spektralnej tłumienności światłowodu jednomodowego

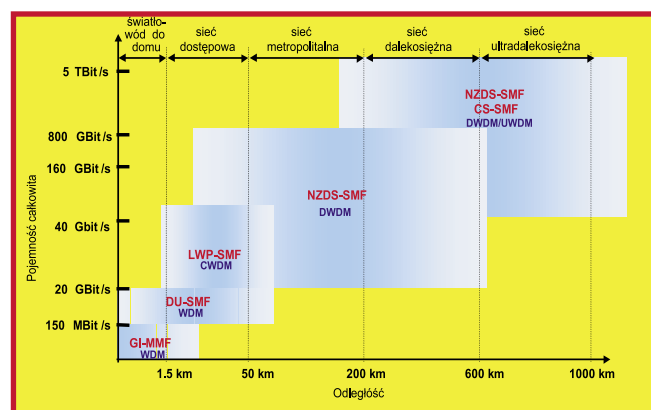
Wzrastająca szybkość transmisji sygnałów oraz wprowadzanie systemów transmisyjnych z tzw. gęstym zwielokrotnianiem w dziedzinie długości fali DWDM z rosnącą liczbą długości fali powodują, że coraz ważniejszą rolę zaczyna odgrywać dyspersja chromatyczna – poszerzenie propagującego impulsu

su wskutek różnicy prędkości grupowych jego składowych spektralnych. Stanowi ona jedno z ważniejszych ograniczeń zasięgu transmisji w systemach światłowodowych.

Tolerancję na dyspersję chromatyczną i ograniczenia zasięgu transmisji ilustruje tabela poniżej, na przykładzie standardowego światłowodu jednomodowego G.652.B lub C, o dyspersji chromatycznej $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ dla długości fali $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Parametr	System transmisji		
	STM-16	STM-64	STM-256
Szybkość transmisji [Gbit/s]	2,5	10	40
Maksymalna dyspersja [ps/nm]	16 000	1 000	63
Maksymalna długość linii [km]	941	59	4

Ogólne kryteria wyboru światłowodu w zależności od zasięgu i szybkości transmisji przedstawia poniższy rysunek.



Włókna światłowodowe w systemach transmisyjnych

Kable optotelekomunikacyjne

W większości zastosowań światłowody nie mogą być używane bez dodatkowych zabezpieczeń ze względu na ich relatywnie małe wydłużenie zrywające oraz wzrost tłumienności wskutek działania naprężeń rozciągających, zginających i skręcających. Zabezpieczenie światłowodów przed wpływami otoczenia osiągamy poprzez odpowiednią konstrukcję pokrycia wtórnego, jak i metodę zestawienia wszystkich elementów kabla w strukturę spełniającą wszystkie stawiane jej wymagania.

Stosujemy dwa rodzaje pokrycia wtórnego światłowodu:

1. luźna tuba – (kable do zastosowań zewnętrznych) – rurka z tworzywa zabezpieczającego światłowody przed wpływem czynników zewnętrznych. Może zawierać do 12 światłowodów i jest wypełniona żelem o właściwościach: hydrofobowych – blokujących dostęp wody do jej wnętrza i tiksotropowych – właściwości cieczy w sytuacji dynamicznej i ciała stałego w statycznej, co skutecznie zmniejsza wrażliwość światłowodu w tubie na mikrozgięcia.

2. Ścisła tuba (kable do zastosowań wewnątrzobektowych) – pokrycie wtórne światłowodu, wykonane w postaci elastycznej, jedno- lub dwuwarstwowej rurki z tworzywa, nałożonej bezpośrednio na światłowód w pokryciu pierwotnym.

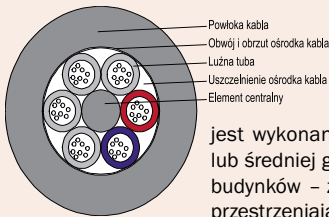
Tuby skręcone wokół centralnego elementu konstrukcyjnego tworzą wraz z nim ośrodek kabla.

Wszystkie kable do zastosowań zewnętrznych, produkowane w OTO Lublin, są wykonywane na bazie ośrodków kabli zawierającego maksymalnie 6, 8, 12 lub 18 luźnych tub.

Kable kanalowe

Do stosowania w miejscowych i dalekosiężnych liniach optotelekomunikacyjnych, są też układane w kanalizacji kablowej.

temperatura eksploatacji: $-40 \div +70 \text{ }^\circ\text{C}$
minimalny promień gięcia: 20 średnic kabla
maksymalna siła instalacji: ciężar 2 km kabla
maksymalna liczba włókien: 144

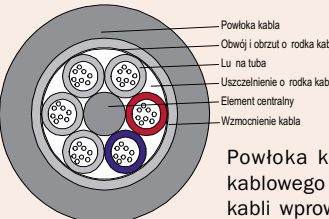


Kabel dielektryczny o konstrukcji skręcanej SZ na dielektrycznym elemencie centralnym, wzdłużnie wodoszczelny. Światłowody w luźnej tubie. Powłoka kabla jest wykonana z polietylenu kablowego wysokiej lub średniej gęstości, dla kabli wprowadzanych do budynków – z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH (Low Smoke Zero Halogen).

Kable kanalowe wzmacniane

Do stosowania w miejscowych i dalekosiężnych liniach optotelekomunikacyjnych, kable tego typu układane są w kanalizacji kablowej, szczególnie gdy warunki instalacji i eksploatacji wymagają większej odporności kabla na naprężenia rozciągające.

temperatura eksploatacji: $-40 \div +70 \text{ }^\circ\text{C}$
minimalny promień gięcia: 20 średnic kabla
maksymalna siła instalacji: ciężar 2 km kabla
maksymalna liczba włókien: 216

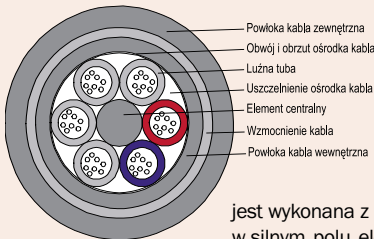


Kabel dielektryczny o konstrukcji skręcanej SZ na dielektrycznym elemencie centralnym, wzdłużnie wodoszczelny. Światłowody w luźnej tubie. Kabel wzmocniony opłotem z włókniny aramidowej. Powłoka kabla jest wykonana z polietylenu kablowego wysokiej lub średniej gęstości, dla kabli wprowadzanych do budynków – z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH.

Kable samonośne

Do stosowania w miejscowych i dalekosiężnych liniach optotelekomunikacyjnych, instalowane za pomocą specjalnego osprzętu na podporach słupowych lub słupach linii energetycznych. Podstawowe parametry kabla zależą od wariantu konstrukcji określanej przez maksymalną odległość punktów podwieszenia kabla od 50 do 300 m.

temperatura eksploatacji: $-40 \div +70 \text{ }^\circ\text{C}$
dopuszczalny promień gięcia (wielokrotnego): $20 \times$ średnica kabla
maksymalna dopuszczalna siła rozciągająca – zależnie od wariantu konstrukcji – do 13 kN
maksymalna liczba włókien: 96



Kabel dielektryczny o konstrukcji skręcanej SZ na dielektrycznym elemencie centralnym, wzdłużnie wodoszczelny. Światłowody w luźnej tubie. Kabel jedno- lub dwupowłokowy wzmocniony opłotem z włókniny aramidowej. Powłoka kabla jest wykonana z polietylenu odpornego na korozję w silnym polu elektrycznym lub w powłoce z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH.

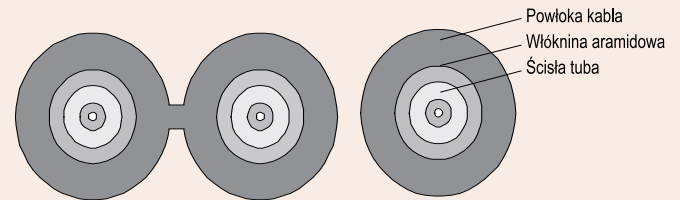
Instalacja kabli

W procesie produkcji kabli optotelekomunikacyjnych, w OTO Lublin jest monitorowane naprężenie wprowadzane do włókien światłowodowych bezpośrednio, jak i pośrednio – poprzez elementy konstrukcyjne kabla. Pozwala to utrzymać prawdopodobieństwo zerwania włókna na poziomie gwarantowanym przez producenta światłowodu. Badania wytrzymałościowe kabli prowadzone w akredytowanym laboratorium badawczym pozwalają określić maksymalne siły, jakie mogą być stosowane przy instalacji i eksploatacji kabli bez wpływu na „czas życia” światłowodów. Znajomość

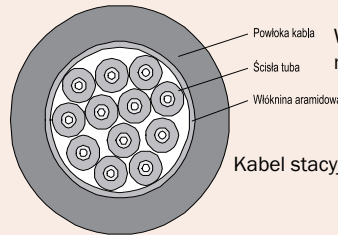
Kable stacyjne

Do zastosowań wewnątrzobiektywnych. Na bazie kabli pojedynczych i podwójnych są wytwarzane kable połączeniowe (Patchcord) i zakończeniowe (Pigtail). W zależności od zastosowania, kable pojedyncze i podwójne są wytwarzane w wariantach średnicy: 1,6 mm, 2,0 mm, 2,4 mm i 3,0 mm. Temperatura eksploatacji tych kabli wynosi: $-5 \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kabel dielektryczny. Światłowód w ścisłym pokryciu opleciony włókniną aramidową. Powłoka kabla wykonana z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH.



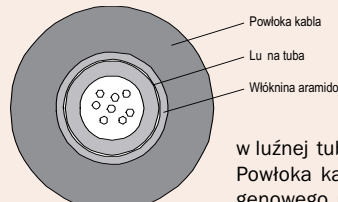
Kable stacyjne pojedyncze i podwójne



W wersji wielowłokowej kabel stacyjny może zawierać do 12 światłowodów.

Kabel stacyjny wielowłokowy

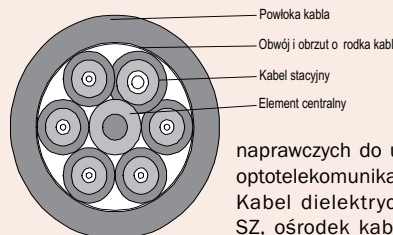
Kable z tubą centralną



Do zastosowań wewnątrzobiektywnych z wykorzystaniem osprzętu stosowanego do kabli liniowych o konstrukcji luźnej tuby. Temperatura eksploatacji: $-5 \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kabel dielektryczny. Światłowody w luźnej tubie oplecionej włókniną aramidową. Powłoka kabla wykonana z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH.

Kable dystrybucyjne



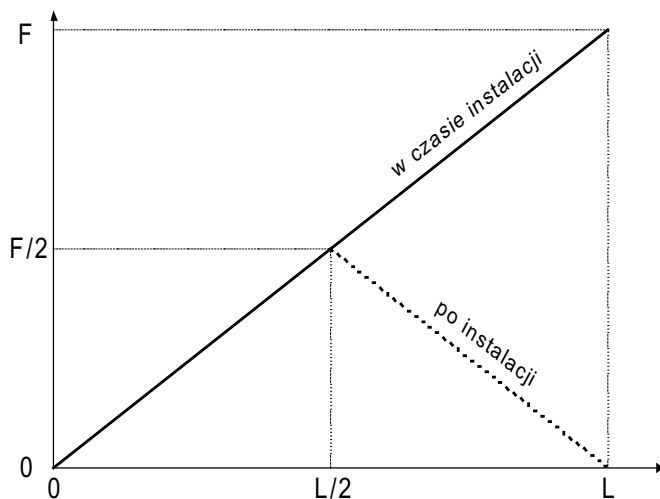
Do zastosowań wewnątrzobiektywnych, w przypadku konieczności doprowadzenia do danego punktu większej liczby kabli stacyjnych. Mogą również pełnić rolę kabli naprawczych do usuwania awarii dowolnej linii optotelekomunikacyjnej.

Kabel dielektryczny o konstrukcji skręcanej SZ, ośrodek kabla stanowi 6, 8 lub 12 kabli stacyjnych pojedynczych, skręconych wokół dielektrycznego elementu centralnego, we wspólnej powłoce z tworzywa bezhalogenowego nierozprzestrzeniającego płomienia – LSZH.

tych sił powinna stanowić podstawę instalacji i eksploatacji kabli.

Kanalizacja prosta

Siła rozciągająca działająca na kabel instalowany w kanalizacji jest wprost proporcjonalna do jego ciężaru przypadającego na jednostkę długości W , współczynnika tarcia μ oraz długości aktualnie zainstalowanego odcinka x i wynosi $F = \mu Wx$ oraz osiąga maksymalną wartość $F = \mu WL$ na końcu instalowanego odcinka kabla L . Rozkład tej siły jest liniowy wzdłuż całego odcinka kabla, co przedstawia rysunek na następnej stronie.



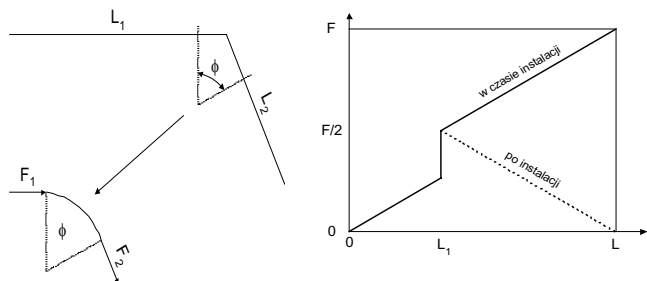
Wartość resztkowa sił rozciągających po instalacji wyniesie maksymalnie $F/2$

Kanalizacja z zakrętem

W miejscu zakrętu kanalizacji stosunek sił przed i po zakręcie określa zależność: $F_2/F_1 = e^{\mu\phi}$, tak więc maksymalna wartość siły zaciągania kabla w kanalizacji z jednym zakrętem wyniesie:

$$F = \mu WL_1 e^{\mu\phi} + \mu WL_2 \quad L = L_1 + L_2$$

a rozkład siły zaciągania kabla przedstawia się następująco:



Zmiana kierunku i wartości siły rozciągającej kabel w kanalizacji z zakrętem

Rozkład naprężeń w kablu w trakcie instalacji kabla oraz naprężeń resztkowych – po jego zainstalowaniu

Można wykazać, że naprężenie resztkowe w kanale o dowolnej konfiguracji nie przekroczy 1/2 maksymalnej siły przykładowej do kabla w trakcie jego instalacji. Warunkiem koniecznym jest zapewnienie maksymalnego wydłużenia włókna nieprzekraczającego 33 % wartości proof-testu.

We wszystkich omawianych w artykule kwestiach dotyczących włókien światłowodowych, kabli optotelekomunikacyjnych, badań i pomiarów oraz innych, związanych z techniką światłowodową znajdują Państwo pomoc w OTO Lublin.

Zenon Drabik
e-mail zenon.drabik@telekomunikacja.pl