

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Л. М. Карпуков, О. В. Щекотихін, В.О. Воскобойник

# **ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ**

Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за спеціальностями  
«Кібербезпека» і «Телекомунікації та радіотехніка»

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2020

УДК 621.391.029.7(075.8)  
К 26

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Запорізького національного технічного університету  
(протокол № 4/20 від 02.03.2020)*

### **Рецензенти:**

*Євсєєв С.П.* – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Харківського національного університету ім. С.Кузнеця.

*Андрущак А.С.* – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій національного університету «Львівська політехніка».

**К26 Карпуков Л.М**

Волоконно-оптичні лінії зв'язку: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Л. М. Карпуков, О. В. Щекотихін, В.О. Воскобойник – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 153с.

ISBN 978-617-529-290-7

Викладено основні відомості про волоконно-оптичні лінії зв'язку. Наведено опис компонентів оптичних систем передачі, структур цифрових ієрархій, технологій часового та хвильового ущільнення оптичного сигналу. Розглянуто основи променевої та електромагнітної теорій поширення світла, описано механізми, що визначають загасання, дисперсію світла і нелінійні ефекти в оптоволокну. Представлено характеристики типів волокон, застосованих в оптичному зв'язку. Дається опис конструкцій і характеристик волоконно-оптичного кабелю та способів його прокладки.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями «Кібербезпека» і «Телекомунікації та радіотехніка».

УДК 621.391.029.7(075.8)

ISBN 978-617-529-290-7

© Національний університет  
«Запорізька політехніка», 2020  
© Карпуков Л. М., 2020  
© Щекотихін О. В., 2020  
© Воскобойник В.О., 2020

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b> .....	8
<b>1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ</b> .....	12
1.1 РОБОЧИЙ ДІАПАЗОН ДОВЖИН ХВИЛЬ. ВІКНА ПРОЗОРОСТІ .....	12
1.2 СТРУКТУРНА СХЕМА ВОСП.....	14
1.3 ТЕХНОЛОГІЇ УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ .....	15
1.3.1 Часове ущільнення .....	16
1.3.2 Хвильове ущільнення.....	18
1.4 СИСТЕМИ ЦИФРОВИХ ІЄРАРХІЙ .....	20
1.4.1 Плезіохронна цифрова ієрархія .....	21
1.4.2 Синхронна цифрова ієрархія.....	23
1.5 ОПТИЧНА ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА.....	28
1.6 ЕВОЛЮЦІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ.....	30
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	36
<b>2 ОПТИЧНІ ВОЛОКНА</b> .....	38
2.1 КОНСТРУКЦІЇ ОПТОВОЛОКОН .....	38
2.2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В ОПТОВОЛОКНІ.....	40
2.2.1 Променева теорія поширення світла в оптоволоконі .....	41
2.2.1.1 Числова апертура оптоволоконна .....	44
2.2.1.2 Різновиди променів в оптоволоконі.....	45
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	46
2.2.2 Електромагнітна теорія поширення світла в оптоволоконі ..	47
2.2.2.1 Характеристичне рівняння і типи мод ступінчастого оптоволоконна.....	47
2.2.2.2 Число мод в оптичному хвилеводі .....	53
2.2.2.3 Моді слабо направляючого оптичного хвилеводу.....	55
2.2.2.4 Діаметр модового поля одномодового оптоволоконна ..	60
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	61
2.3 ПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОВОЛОКНА.....	62
2.3.1 Дисперсійні характеристики оптоволоконна .....	62
2.3.1.1 Міжмодова дисперсія .....	63
2.3.1.2 Хроматична дисперсія .....	65
2.3.1.3 Поляризаційна модова дисперсія .....	67
2.3.2 Загасання сигналу в оптоволоконі .....	68
2.3.2.1 Власні і кабельні втрати .....	68
2.3.2.1.1 Втрати розсіювання .....	69

2.3.2.1.2 Втрати поглинання.....	69
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	71
2.4 НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В ОПТОВОЛОКНІ.....	71
2.4.1 Ефекти внаслідок нелінійності показника заломлення.....	72
2.4.1.1 Фазова самомодуляція.....	72
2.4.1.2 Перехресна фазова модуляція.....	74
2.4.2 Нелінійні ефекти внаслідок вимушеного розсіювання хвиль.....	75
2.4.2.1 Вимушене розсіювання Мандельштама – Бріллюена ..	76
2.4.2.2 Вимушене раманівське розсіювання.....	77
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	78
2.5 ОСНОВНІ ТИПИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОВОЛОКОН ДЛЯ ВОСП ..	78
2.5.1 Характеристики багатомодових оптичних волокон.....	79
2.5.2 Характеристики одномодових оптичних волокон.....	81
2.5.2.1 Волокна G.652.....	82
2.5.2.2 Волокна G.653.....	84
2.5.2.3 Волокна G.654.....	85
2.5.2.4 Волокна G.655.....	86
2.5.2.5 Волокна G.656.....	89
2.5.2.6 Волокна G.657.....	90
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	91
<b>3 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ КАБЕЛІ.....</b>	<b>92</b>
3.1 ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ.....	93
3.1.1 Конструкції оптичних модулів.....	93
3.1.2 Елементи конструкції сердечників кабелю.....	94
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	98
3.2 ТИПИ І КОНСТРУКЦІ КАБЕЛІВ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПРОКЛАДКИ.....	98
3.2.1 Кабелі повітряної прокладки.....	99
3.2.1.1 Підвісні кабелі з виносним силовим елементом.....	99
3.2.1.2 Самонесучі діелектричні кабелі.....	101
3.2.1.3 Самонесучі металеві кабелі, вбудовані в грозозахисний трос.....	103
3.2.2 Кабелі підземної прокладки.....	104
3.2.2.1 Кабелі для прокладки в пластмасових трубах.....	105
3.2.2.2 Кабелі оптичні для прокладки в кабельній каналізації.....	106
3.2.2.3 Кабелі оптичні для прокладки в ґрунті.....	108
3.2.2.4 Кабелі підводної прокладки.....	111
3.2.3 Кабелі внутрішньої прокладки.....	114
3.2.3.1 Кабелі оптичні абонентські.....	115

3.2.3.2 Розподільні внутрішньооб'єктові кабелі .....	117
3.3 ОПТИЧНІ МІКРОКАБЕЛІ .....	119
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ .....	122
<b>4 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ .....</b>	<b>123</b>
4.1 ЗАХИСНІ ПЛАСТМАСОВІ ТРУБКИ І ТЕХНОГІЇ ЇХ ПРОКЛАДКИ .....	123
4.1.1. Інсталяція кабелю в захисні пластмасові трубки .....	124
4.1.2. Малорозмірні захисні пластикові трубки .....	125
4.1.3 МікрОВОЛОКОННІ КАБЕЛЬНІ СИСТЕМИ .....	126
4.2 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ В ҐРУНТІ .....	127
4.3 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ ЧЕРЕЗ ВОДНІ ПЕРЕШКОДИ .....	129
4.4 ПІДВІСКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ .....	131
4.5 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ В КАБЕЛЬНІЙ КАНАЛІЗАЦІЇ .....	133
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ .....	134
4.6 ОПТИЧНІ МУФТИ .....	134
4.6.1 Касети оптичних муфт .....	135
4.6.2 Муфти оптичні міські .....	136
4.6.3 Муфти тупикові оптичні .....	138
4.6.4 Розміщення змонтованих оптичних муфт .....	143
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ .....	147
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....</b>	<b>148</b>

## ВСТУП

Сучасна епоха характеризується формуванням глобального інформаційного суспільства. Передумовами цього процесу з'явилися досягнення в області цифрових комп'ютерних технологій обробки інформації і використання оптичного волокна для створення надшвидкісних телекомунікаційних систем із практично необмеженою пропускнуою здатністю та високою дальністю передачі.

Слід зазначити, що оптоволокну, як фізичне середовище передачі інформації, не має конкурентів. До основних переваг оптоволоконних ліній зв'язку слід віднести:

- широка смуга пропускання, що дозволяє передавати сигнали зі швидкістю в одиниці та десятки ТБіт/с, а в найближчій перспективі - до одиниць ПБіт/с<sup>1</sup>;
- низький рівень втрат сигналу в оптоволокну, що дозволяє передавати сигнали без регенерації на відстань до сотень кілометрів;
- відмова від дорогих і дефіцитних кольорових металів, оскільки основу оптоволокну складає кремній, запаси якого на планеті практично не обмежені;
- малі маса і розміри - діаметр оптоволокну в межах 8 – 60 мікронів;
- нечутливість до електромагнітних перешкод;
- висока захищеність від несанкціонованого доступу до переданої інформації.

Незважаючи на високу захищеність оптоволокну від несанкціонованого доступу, існує принципова можливість створення каналів витоку інформації, що передається по оптоволокну. Щоб виявити канали витоку інформації і застосувати методи їх закриття необхідно володіти знаннями та компетенціями в області одержання, обробки і передачі інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

---

<sup>1</sup> Дианов Е.М. От тера эры до пета эры. - Фотон – экспрес, 2006, №1, с. 6 – 8.

У цьому навчальному посібнику наведені основні відомості з теорії та практичного застосування волоконно-оптичного зв'язку.

Посібник складається із чотирьох розділів. У першому розділі приведено опис основних компонентів волоконно-оптичних систем передачі інформації, розглянуте її часове ущільнення і пов'язані з ним технології цифрової ієрархії, викладено принципи хвильового ущільнення сигналу та надано опис оптичної транспортної мережі.

У другому розділі наведено опис конструкції оптоволокна і аналіз поширення в ньому світла на основі променевої та електродинамічної теорій. Розглянуто механізми загасання, дисперсії і нелінійних викривлень сигналу в оптоволоконні. Представлено опис характеристик і призначення типів оптоволокон, що рекомендуються для застосування в оптичному зв'язку.

У третьому розділі розглянуто різновиди конструкцій і характеристики волоконно-оптичних кабелів, які застосовуються для зовнішньої і внутрішньої прокладки.

Четвертий розділ присвячено способам прокладки волоконно-оптичного кабелю, конструкціям кабельних муфт та особливостям їх застосування.

Розділи навчального посібника супроводжуються контрольними питаннями, відповіді на які сприяють кращому засвоєнню матеріалу, що викладається.

Навчальний посібник являє собою введення в теорію і практику волоконно-оптичного зв'язку. Більш детально принципи організації і технології волоконно-оптичного зв'язку викладено у бібліографічних джерелах, що цитуються у посібнику. Волоконно-оптичний зв'язок стрімко розвивається – росте швидкість передачі оптичного сигналу і пропускна здатність каналів зв'язку, розробляються більш досконалі технології модуляції, передачі і приймання оптичного сигналу, впроваджуються нові типи оптоволокна і волоконно-оптичного кабелю. Тому, щоб бути компетентним в області оптичного зв'язку, необхідно постійно стежити за досягненнями в цій області, поповнюючи свої компетенції новими знаннями і вміннями.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

**АСП** - аналогова система передачі;  
**АЦП** – аналого-цифровий перетворювач;  
**ПЛП** - повітряна лінія передачі;  
**ВОЗ** - волоконно-оптичний зв'язок;  
**ВОК** – волоконно-оптичний кабель;  
**ВОЛЗ** – волоконно-оптична лінія зв'язку;  
**ВОЛТ** - волоконно-оптичний лінійний тракт;  
**ВОСП** – волоконно-оптична система передачі;  
**ВРМБ** - змушене розсіювання світла Мандельштама – Бріллюена;  
**ВРР** - змушене рамановське розсіювання світла;  
**ГГІ** - генератор тактових імпульсів;  
**ЗПТ** - захисна пластмасова трубка;  
**ІК** - інфрачервоний діапазон хвиль;  
**ІКМ** - імпульсно-кодова модуляція;  
**КВП** - контрольно-вимірювальний пункт;  
**КДЗ** - контейнер дротів заземлення;  
**КДЗЗ** - комплект для захисту зварювання;  
**ККЗ** - кабельний колодязь зв'язку;  
**ККТ** - кабельний колодязь телекомунікаційний;  
**КОД** - колодязь оперативного доступу;  
**ЛЕП** – лінія електропередачі;  
**МЗПТ** - малорозмірна захисна пластикова трубка;  
**МКС** - мікрОВОЛОКОННА кабельна система;  
**МСЕ-Т** - Міжнародний союз електрОЗВ'ЯЗКУ – Сектор Стандартизації телекомунікацій;  
**МОМ** - муфта оптична міська;  
**МТО** - муфта тупикова оптична;  
**ОВ** – оптичне волокно;  
**ОМ** - оптичний модулятор;  
**Опер** - оптичний передавач;  
**ОПр** - оптичний приймач;  
**ОЦК** - основний цифровий канал;  
**ПерОЕМ** - передавальний оптоелектронний модуль;  
**ПЛЗ** – повітряні лінії зв'язку;  
**ПрОЕМ** - прийомний оптоелектронний модуль;  
**ППЗ** - профіль показника заломлення;  
**ПЩ** - плезіохронна цифрова ієрархія;

**ППМК** - пристрій підвіски муфт і кабелів;  
**СЦІ** - синхронна цифрова ієрархія;  
**ЦАП** – цифро-аналоговий перетворювач;  
**ЦСП** - цифрові системи передачі;  
**ЦСЕ** - центральний силовий елемент;  
**ЧХЗ** - чотирьоххвильове зміщення;  
**AU**- Administrative Unit - адміністративний блок;  
**С** – Container – контейнер;  
**CPM** - Cross-Phase Modulation - перехресна фазова модуляція;  
**CWDM** - Coarse WDM -грубе хвильове ущільнення;  
**DEMUX** – демультіплексор;  
**DB** - Direct burial micro-duct – мікротрубка для прокладання в ґрунт;  
**DBR** - Direct burial reinforced micro-duct– посилена мікротрубка для прокладання в ґрунт;  
**DP-QPSK** - Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying - квадратурно-фазова модуляція у двох площинах поляризації;  
**DSF** - Dispersion Shifted Fiber - одномодовое волокно зі зміщеною нульовою хроматичною дисперсією;  
**Duplex** - абонентський двоволоконний міні кабель;  
**DWDM** - Dense WDM – щільне хвильове ущільнення;  
**EDFA**- Erbium doped fiber amplifier - легований ербієм оптичний підсилювач;  
**ETDM** - Electronic Time Division Multiplexing - часове ущільнення на рівні електричних сигналів;  
**FTTH** - Fiber To The Home— волокно до помешкання;  
**FWM** - Four Wave Mixing - чотирьоххвильове зміщення;  
**HDPE** -high density polyethylene - поліетилен високої щільності;  
**HDWDM** - High Dense WDM – високощільне хвильове ущільнення;  
**ITU-T** - Міжнародний союз електрозв'язку – Сектор стандартизації телекомунікацій;  
**LSZH** - Low Smoke Zero Halogen - не поширює горіння, не виділяє диму та галогенів при горінні;  
**Micro-trenching** - мікро-траншейна технологія прокладки;  
**MMF** - Multi Mode Fiber - багатомодовое оптоволокно;  
**MSOH** - Multiplexer Section Over Head - заголовок мультиплексної секції;  
**MUX** – мультиплексор;  
**NA**- numerical aperture - числова апертура;

**NZDSF** - Non Zero Dispersion Shifted Fiber - одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією;

**OAM&P** – Operations, Administration, Maintenance and Provisioning - можливість адміністрування, розширюваність і надійність;

**ODU** - Optical Data Unit - оптичний блок даних;

**OPU** - Optical Payload Unit - оптичний блок корисного завантаження;

**OTDM** - Optical Time Division Multiplexing - часове ущільнення на рівні оптичних сигналів;

**OTN** - Optical Transport Network - оптична транспортна мережа;

**OTU** - Optical Transport Unit - оптичний транспортний блок;

**PCM** - Pulse Code Modulation -- імпульсно-кодова модуляція;

**PDH** - Plesiochronous Digital Hierarchy - плезіохронна цифрова ієрархія;

**POH** - Path Over Head - маршрутний заголовок;

**PON** - Passive Optical Network - пасивна оптична мережа;

**RG** – Regeneration – регенератор;

**ROPA** - Remote Optically Pumped Amplifier - підсилювач із віддаленим накачуванням волокна, легованого ербієм;

**RSOH** - Regenerator Section Over Head - заголовок регенераційної секції;

**PTR** – Pointer – показник;

**RX** – Receiver - оптичний приймач;

**SBS** - Stimulated Brillouin Scattering -змушене розсіювання світла  
Мандельштама – Бріллюена;

**SDH**- Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія;

**SF** - Standard Fiber - стандартне волокно;

**SMF** - Single Mode Fiber- одномодове волокно;

**SOH** - Section Over Head - поле секційних заголовків;

**SONET** - Synchronous Optical Network - північноамериканська синхронна цифрова ієрархія;

**SONET/SDH** – спільна європейська і північноамериканська синхронна цифрова ієрархія;

**SPM** - Self-Phase Modulation - фазова самомодуляція;

**SRS** - Stimulated Raman Scattering - змушене рамановське розсіювання світла;

**SSMF** - Standard Single Mode Fiber - стандартне одномодове волокно;

**STM-N** - Synchronous Transport Module of level N - синхронний транспортний модуль рівня N;

**TDM** - Time Division Multiplexing - часове ущільнення;

**TU** - Tributary Unit – блок первинних потоків;  
**TUG** - Tributary Unit Group - груповий блок первинних потоків;  
**TX** – Transmitter - оптичний передавач;  
**VC** - Virtual Container - віртуальний контейнер;  
**WDM** - Wavelength Division Multiplexing – хвильове ущільнення;  
**ZWPF** - Zero Water Peak Fiber – волокно з подавленням водним піком.

# 1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Науково-технічний прогрес в області телекомунікацій пов'язаний з використанням усе більш коротких довжин хвиль із метою збільшення пропускної здатності каналів зв'язку. Ця тенденція обумовила закономірний перехід від електромагнітного діапазону довжин хвиль до освоєння оптичного діапазону зі створенням волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП).

ВОСП - це сукупність оптичних пристроїв і оптичних ліній передачі, що забезпечує формування, обробку і передачу оптичних сигналів. Передача сигналу у ВОСП здійснюється по волоконно-оптичному кабелю (ВОК), основою якого є оптичне волокно (ОВ) у вигляді тонкої прозорої багатоплощинної діелектричної нитки з надчистого кварцового скла [1 – 10].

## 1.1 РОБОЧИЙ ДІАПАЗОН ДОВЖИН ХВИЛЬ. ВІКНА ПРОЗОРОСТІ

У цей час у якості оптичного сигналу, переданого по ОВ, використовується електромагнітне випромінювання, яке лежить у близькому до інфрачервоного (ІЧ) діапазону хвиль. ОВ у цьому діапазоні характеризується нерівномірністю загасання, утворюючи на деяких ділянках ІЧ-діапазону вікна прозорості, де загасання мінімальне. Неоднорідність загасання світла в ОВ обумовлене не ідеальністю середовища і наявністю домішок. Причому найбільший внесок до втрати вносять водні іони гідроксильної групи (ОН-), які, резонуючи, створюють піки поглинання. На рис. 1.1 наведена типова залежність загасання  $\alpha$ , дБ/км від довжини хвилі  $\lambda$ , мкм для стандартного ОВ на основі кварцового скла. Пунктирна лінія на малюнку відповідає ОВ з подавленим водневим піком на  $\lambda=1.383$  мкм.

Вікна прозорості ОВ визначили робочі довжини хвиль для ВОСП. Для першого вікна робоча довжина хвилі становить 850 нм. Для цієї довжини хвилі були розроблені технології виготовлення і конструкції ОВ із загасанням до 3 дБ/км. Для другого вікна при робочій довжині хвилі 1310 нм отримано ОВ із загасанням до 0.35 дБ/км. Використання третього вікна на довжині хвилі 1550 нм дозволило знизити загасання в ОВ до 0,22 дБ/км. У зв'язку з розширенням робочого діапазону оптичних волокон Сектором Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного союзу електров'язку

– МСЕ-Т (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization - ITU-T*) були затверджені додаткові спектральні діапазони в інтервалі 1260...1675 нм, які показані на рис.1.1 та перераховані в табл. 1.1

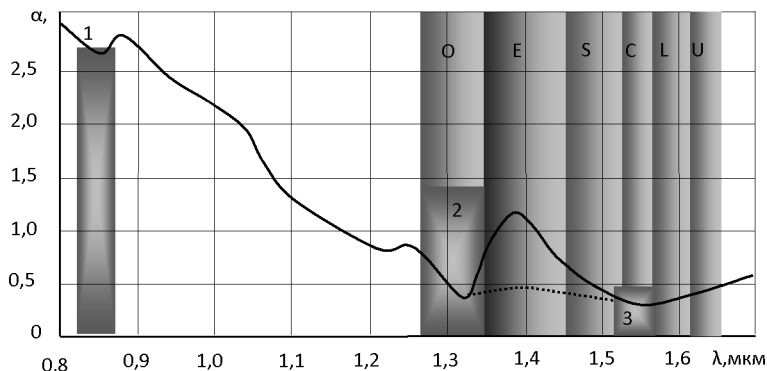


Рисунок 1.1 – Типова залежність загасання у кварцовому оптоволоконні: цифрами 1,2,3 відзначено вікна прозорості, буквами O,E,S,C,L,U - робочі діапазони довжин хвиль в інтервалі 1,260 мкм -1 ,675 мкм

Таблиця 1.1 - Робочі діапазони довжин хвиль в інтервалі 1260... 1675 нм

Позначення діапазону	Смуга хвиль і частот діапазону	Найменування діапазону
O	1260... 1360 нм (237,931... 220,436 ТГц)	Основний (Original)
E	1360... 1460 нм (220,436... 205,337 ТГц)	Розширений (Extended)
S	1460... 1530 нм (205,337... 195,943 ТГц)	Короткохвильовий (Short wavelength)
C	1530... 1565 нм (195,943... 191,561 ТГц)	Стандартний (Conventional)
L	1565... 1625 нм (191,561... 184,488 ТГц)	Довгохвильовий (Long wavelength)
U	1625... 1675 нм (184,488... 178,981 ТГц)	Наддовгий (Ultra-long wavelength)

Частота  $f$  і довжина хвилі  $\lambda$  зв'язані співвідношенням:

$$\lambda = c_0 / f, \quad (1.1)$$

де  $c_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі.

## 1.2 СТРУКТУРНА СХЕМА ВОСП

Спрощена структурна схема ВОСП наведена на рис. 1.2 [1 – 10]. Її основними компонентами є:

- передавальний оптоелектронний модуль (ПерОЕМ), що перетворює вхідний електричний сигнал в оптичний сигнал;
- волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ), що забезпечує передачу оптичного сигналу по лінії зв'язку;
- прийомний оптоелектронний модуль (ПрОЕМ), що перетворює оптичний сигнал в електричний вихідний сигнал.

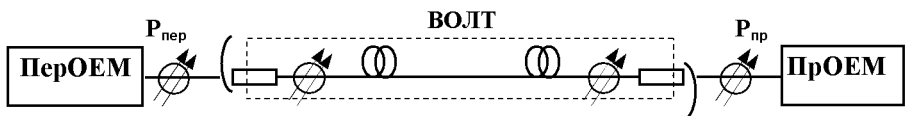


Рисунок 1.2 – Структурна схема ВОСП

У ПерОЕМ електронна схема забезпечує обробку вхідного електричного сигналу з перетворенням його у форму, необхідну для керування джерелом оптичного випромінювання. У якості джерела оптичного випромінювання використовується світло випромінюючий діод, або лазерний діод.

Зворотнє перетворення оптичного сигналу в електричний сигнал проводиться в ПрОЕМ з використанням р-і-п фотодіода або лавинного фотодіода. Електрична схема ПрОЕМ здійснює обробку отриманого від фотодіода електричного сигналу з поданням його у формі, тотожній сигналу, введеному в систему передачі.

Оптичний сигнал передається по ВОЛТ, який при значному віддаленні приймальної і передавальної станцій може містити оптичні підсилювачі, компенсатори дисперсії і регенератори, що відновлюють форму і синхронізацію оптичних сигналів.

Залежно від виду переданих по ВОЛТ сигналів системи передачі підрозділяються на аналогові і цифрові. В аналогових

системах передачі (АСП) інформація передається за допомогою аналогових сигналів. У цей час оптичні АСП знаходять обмежене застосування, в основному, для передачі аналогового телевізійного сигналу і даних телеметрії. Сучасні ВОСП будуються у вигляді цифрових систем передачі (ЦСП) з імпульсно-ковою модуляцією – ІКМ (*Pulse Code Modulation - PCM*). Імпульсно-кова модуляція заснована на дискретизації з постійним кроком у часі переданого аналогового сигналу. Отримані вибірки сигналу квантуються за рівнем. Величини рівнів сигналу представляються у двійковому коді. Послідовності двійкових нулів і одиниць кодуються в лініях зв'язку послідовностями оптичних імпульсів. Деякі з можливих форматів подання двійкової інформації в цифрових системах зв'язку показані на рис. 1.3 [11, 12].

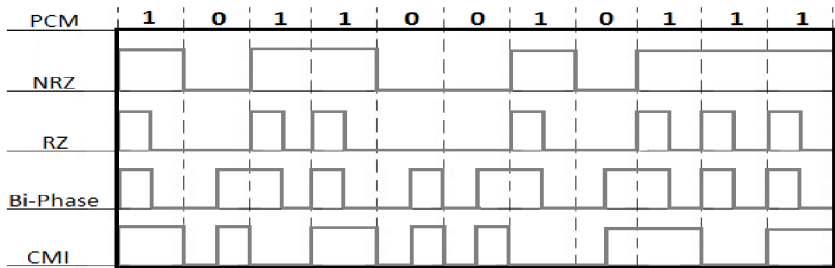


Рисунок 1.3 - Формати подання двійкової інформації в цифрових системах зв'язку з імпульсно-ковою модуляцією: без повернення до нуля (NRZ), з поверненням до нуля (RZ), двофазний, або Манчестер-Код (Bi-Phase), Смі-Код (CMI)

У зв'язку з усе більш зростаючими обсягами переданої інформації ВОСП будуються як багатоканальні цифрові системи, здатні по одному оптоволокну за допомогою ущільнення каналу зв'язку передавати, у тому числі в дуплексному режимі, цифрові потоки від декількох джерел сигналу.

### 1.3 ТЕХНОЛОГІЇ УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

Ущільнення (мультиплексування) каналу зв'язку – це організація передачі даних від декількох каналів з меншою

пропускною здатністю по каналу, що володіє більшою пропускною здатністю.

У ВОСП набуло застосування часове і хвильове ущільнення каналів з побудовою багатоканальних ЦСП, що забезпечують одночасну і незалежну передачу даних від безлічі джерел по одній оптоволоконній лінії [4, 7, 9 – 17].

### 1.3.1 Часове ущільнення

Часове ущільнення (*Time Division Multiplexing – TDM*) засновано на об'єднанні декількох вхідних низько швидкісних цифрових сигналів, які надходять з різних каналів, в один груповий високошвидкісний цифровий сигнал, що передається по лінії зв'язку. Об'єднання може бути здійснено на рівні електричних сигналів (*ETDM - Electronic Time Division Multiplexing*) або на рівні оптичних сигналів (*OTDM - Optical Time Division Multiplexing*).

Структурна схема багатоканальної ВОСП із часовим ущільненням на рівні електричних сигналів наведена на рис. 1.4. На схемі каналні аналогові сигнали  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)$  надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і перетворюються в цифрові сигнали у вигляді бітових потоків.

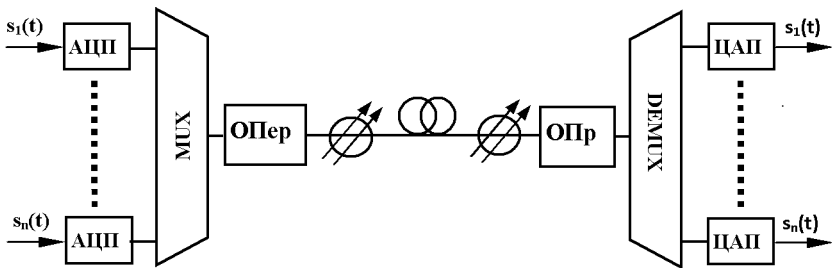


Рисунок 1.4 – Структурна схема багатоканальної ВОСП із тимчасовим ущільненням на рівні електричних сигналів

Комутатор мультиплексора MUX по черзі відбирає з  $n$  каналних потоків послідовності біт заданого розміру, так звані каналні інтервали (тайм-слоти). Послідовності, складені з тайм-слотів по одному від кожного з  $n$  каналів, утворюють цикли.

Чергування (*interleaving*) бітів у тайм-слотах може виконуватися за різними схемами. Найбільше часто застосовуються схеми мультиплексування з байт-інтерлівінгом, коли тайм-слот складається з 8 біт, або з біт-інтерлівінгом, коли на вихід послідовно комутирується по одному біту з кожного каналу.

Сформований електричний груповий бітовий сигнал модулює в оптичному передавачі ОП<sub>ер</sub> оптичну несучу. Оптичне випромінювання поширюється по оптоволокну і в оптичному приймачу ОП<sub>р</sub> знову перетворюється в електричний бітовий сигнал, який надходить на вхід демультиплексора DEMUX. Демультиплексор за допомогою комутатора розділяє груповий бітовий сигнал на окремі каналні бітові потоки, які надходять на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і перетворюються в аналогові сигнали.

У технології ETDM пропускна здатність залежить від застосованих електронних компонентів, швидкодія яких визначає швидкість передачі бітового потоку по каналу зв'язку. Величина цієї швидкості непомірно менше тієї швидкості, яку може забезпечити оптоволокну. У цей час електронні компоненти здатні забезпечувати пропускну здатність каналу зв'язку до 10 Гбіт/с [9]. Подальше збільшення пропускної здатності можливо за рахунок заміни електронних компонентів оптичними засобами часового ущільнення цифрового сигналу.

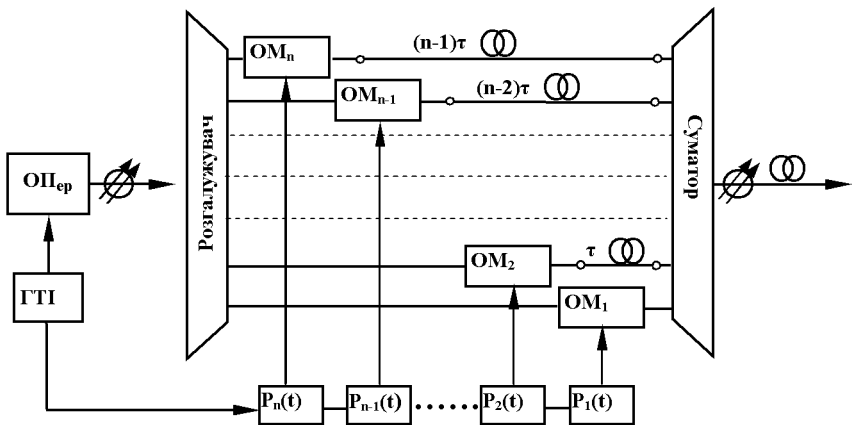


Рисунок 1.5- Структурна схема передавального кінця ВОСП із часовим ущільненням на рівні оптичних сигналів

На рис. 1.5 наведена структурна схема пристрою для оптичного ущільнення сигналів. Оптичний передавач ОПер модулюється періодичним імпульсним сигналом від генератора тактових імпульсів ГТІ. Потік наносекундних оптичних імпульсів з періодом проходження  $T$  подається на оптичний розгалужувач, що розділяє світловий потік на  $n$  потоків по числу каналів, що ущільнюються. Кожний  $i$ -й з  $n$  потоків проходить через оптичний модулятор  $ОМ_i$ , на який синхронно з тактовими імпульсами надходить бітовий цифровий потік  $P_i(t)$  від відповідного каналу, що ущільнюється. На виході модулаторів модульовані оптичні потоки проходять через оптичні лінії затримки у вигляді відрізків оптичних волокон певної довжини, кратної  $\tau = T/n$ . Після ліній затримки оптичні бітові потоки, зміщені в часі відносно один одного на крок  $\tau$  надходять на оптичний суматор, на виході якого формується об'єднаний груповий оптичний потік, що надходить в оптичну лінію передачі.

У цей час системи OTDM широко використовуються у ВОСП, що працюють із каналною швидкістю в 40, 100 і більш Гбіт/с [9].

### 1.3.2 Хвильове ущільнення

Хвильове ущільнення (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*) засновано на одночасній передачі по одному оптоволокну декількох незалежних рознесених по довжині хвилі оптичних несучих, кожна з яких модулюється багатоканальним сигналом, сформованим відповідним каналотворюючим обладнанням.

Структурна схема ВОСП із хвильовим ущільненням каналів представлена на рис. 1.6 На схемі  $i$ -й багатоканальний електричний сигнал  $K_i$  модулює в оптичному передавачі ОПер $_i$  оптичну несучу з довжиною хвилі  $\lambda_i$ . В оптичному мультиплексорі М оптичні несучі  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  різних каналів об'єднуються в загальний оптичний потік, який вводиться в оптоволокну. На прийомній стороні за допомогою оптичного демультіплексора проводиться поділ загального оптичного потоку на окремі оптичні несучі з довжиною хвилі  $\lambda_i$ , які, надходячи в оптичні приймачі ОПр $_i$ , перетворюються у вихідні каналні електричні сигнали  $K_i$ .

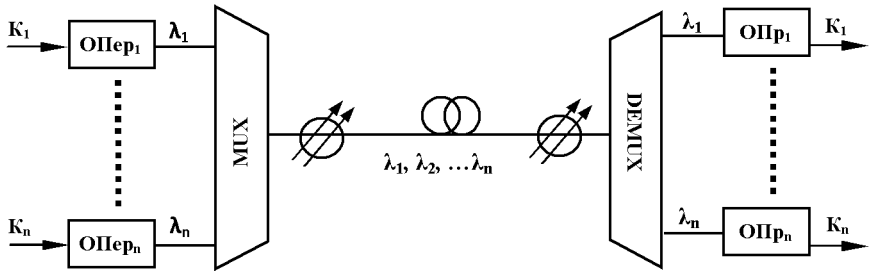


Рисунок 1.6 – Структурна схема багатоканальної ВОСП із хвильовим ущільненням

Перші WDM-системи, що знайшли практичне застосування, поєднували в одному ОВ дві оптичні несучі з довжинами хвиль 1310 нм і 1550 нм із 2-го і 3-го вікон прозорості. Двохвильові WDM-системи дозволили подвоїти швидкість передачі сигналів, а також створити дуплексні системи на одному волокні.

Сучасні багато хвильові WDM технології відповідно до рекомендацій ІТУ-Т підрозділяються на три групи [6, 7, 17]:

- грубі WDM (*Coarse WDM - CWDM*) — системи з розносом каналів по довжині хвилі, рівним 20 нм;
- щільні WDM (*Dense WDM - DWDM*) - системи з розносом каналів по частоті від 200 ГГц до 50 ГГц;
- високощільні WDM (*High Dense WDM - HDWDM*) - системи з розносом каналів від 50 ГГц і менш.

Технологія CWDM припускає використання ОВ з подавленим водним піком у районі довжини хвилі 1389 нм, що дозволяє мультиплексувати 18 каналів у смузі довжин хвиль від 1270 нм до 1610 нм (діапазони O, E, S, C, L) з фіксованим кроком між каналами в 20 нм (крок по частоті більш 2000 ГГц). Стандартний частотний план CWDM – систем представлено в таблиці 1.2.

Завдяки великому розносу каналів оптичні компоненти CWDM – систем відрізняються простотою, надійністю, низьким споживанням енергії і невисокою вартістю. Область застосування технології CWDM - міські і регіональні мережі, де не потрібні високі потоки інформації.

Таблиця 1.2 - Стандартний частотний план CWDM – систем

№ п.п	1	2	3	4	5	...	17	18
$\lambda$ , нм	1270	1290	1310	1330	1350	...	1590	1610
f, ТГц	236,06	232,39	228,85	225,41	222,07	...	188,55	186,21

Технології DWDM і HDWDM застосовуються в діапазонах С и L, де загасання кварцового ОБ мінімальне, а також можливе використання оптичних підсилювачів на основі оптичних волокон, легованих ербієм (*Erbium doped fiber amplifier - EDFA*).

Регламентована сітка частот каналів задається із кроком 200, 100, 50, 25, 12,5 ГГц. У таблиці 1.3 представлений стандартний частотний план для С діапазону в смузі 192,10 - 196,10 ТГц (1528,77 - 1560,61 нм) з розносом оптичних несучих каналів в 50 ГГц (крок по довжині хвилі близько 0.4 нм) і числом каналів, рівним 81.

Таблиця 1.3 – Стандартний частотний план із кроком несучих 50 ГГц

№, п.п	1	2	3	4	...	80	81
f, ТГц	196,10	196,05	196,00	195,95	...	192,15	192,10
$\lambda$ , нм	1528,77	1529,16	1529,55	1529,94	...	1560,20	1560,61

Сітка частот каналів з більшим кроком по частоті формується за значеннями частот з таблиці 1.3. Наприклад, для кроку 100 ГГц береться кожне друге значення частоти. Відповідно, для кроку 25 ГГц крок по частоті в таблиці 1.3 зменшується у два рази. У цей час знайшли практичне застосування HDWDM – системи з розносом каналів в 12,5 ГГц при їхній кількості, рівним 320.

Область застосування технологій DWDM і HDWDM – лінії далекого зв'язку з великими потоками інформації.

#### 1.4 СИСТЕМИ ЦИФРОВИХ ІЕРАРХІЙ

У сучасних багатоканальних ВОСП при часовому ущільненні каналів використовуються цифрові системи, які об'єднують канали по ієрархічному принципу. Відповідно до цього принципу число каналів передачі даного рівня ієрархії в ціле число раз більше числа каналів попереднього рівня, що спрощує об'єднання, транзит і поділ переданих цифрових потоків.

У рекомендаціях МСЕ-Т представлено два типи ієрархій ЦСП:

- плезіохронна цифрова ієрархія – ПЦД (*Plesiochronous Digital Hierarchy- PDH*);

- синхронна цифрова ієрархія – СЦД (*Synchronous Digital Hierarchy – SDH*).

Нижчий рівень ієрархії в цих системах - це основний цифровий канал (ОЦК) зі швидкістю передачі 64 Кбіт/с, призначений для передачі первинних цифрових сигналів. Для об'єднання сигналів ОЦК у групі високошвидкісні цифрові сигнали використовується часове мультиплексування каналів [4, 5, 9, 11, 13 - 15].

### 1.4.1 Плезіохронна цифрова ієрархія

У мережах із ПЦД цифрові потоки в каналах одного рівня ієрархії плезіохронні (майже синхронні) через невеликі припустимі відмінності в їхній швидкості. При об'єднанні потоків у потік більш високого рівня ієрархії ці відмінності усуваються додаванням вирівнюючого біта або групи бітів.

ПЦД має європейський, північноамериканський і японський різновиди, які наведені в таблиці 1.4, де зазначені позначення рівнів ієрархій, число основних цифрових каналів  $N_{\text{ОЦК}}$ , коефіцієнти мультиплексування  $N_M$  і швидкості потоків.

Таблиця 1.4 – Плезіохронні цифрові ієрархії

Рівень ієрархії	Європа				Північна Америка				Японія			
	Позначення	$N_{\text{ОЦК}}$	$N_M$	Швидкість, Біт/с	Позначення	$N_{\text{ОЦК}}$	$N_M$	Швидкість, Біт/с	Позначення	$N_{\text{ОЦК}}$	$N_M$	Швидкість, Біт/с
0	E0	1	-	0,064	DS0	1	-	0,064	DSJ0	1	-	0,064
1	E1	30	30	2,048	DS1	24	24	1,554	DSJ1	24	24	1,554
2	E2	120	4	8,448	DS2	96	4	6,312	DSJ2	96	4	6,312

3	E3	480	4	34,368	DS3	672	7	44,736	DSJ3	480	5	32,064
4	E4	1920	4	139,264	DS4	4032	6	274,176	DSJ4	1440	3	97,728
5	E5	7680	4	564,992	-		-	-	DSJ5	5760	4	397,200

Цифрова система передачі, що відповідає першому рівню ієрархії, називається первинною. У ній формується первинний цифровий потік за рахунок по-байтного об'єднання первинних цифрових сигналів. На наступних рівнях ієрархії об'єднання відбувається на основі побітного мультиплексування цифрових потоків. Для узгодження швидкостей поєднаних цифрових потоків проводиться вирівнювання їх швидкостей (*стаффинг*) шляхом уведення в потоки з меншими швидкостями додаткових бітів на передавальному кінці і виключення їх на прийомному. Крім того цифровий потік доповнюється службовими сигналами і сигналами синхронізації.

Первинний цифровий потік E1 європейського різновиду ПЦІ формується із циклів і надциклів. Цикл тривалістю 125 мкс складається з 32 однобайтових канальних інтервалів (КІ) тривалістю по 3,906 мкс, з яких нульовий (КІ-0) і шістнадцятий (КІ-16) є службовими, а інші 30 — інформаційними. Надцикл складається з 16 циклів і має тривалість 2 мс. КІ-0 використовується для передачі циклового синхросигналу і службових сигналів контролю, керування та оповіщення про втрати циклової синхронізації. КІ-16 служить для передачі сигналу синхронізації по надциклу і службових сигналів аварійного стану, індикації, керування та взаємодії.

Потік E2 складається із чотирьох первинних потоків E1 і формується із циклів, тривалість 125 мкс. Цикл складається із чотирьох субциклів, тривалістю 31,25 мкс. Субцикл складений з 264 однобітових КІ тривалістю по 0,1184 мкс. У субциклах 8 КІ відведені для синхроімпульсів, вставок і службових сигналів, інші КІ є інформаційними. Аналогічно потоку E2 формуються потоки більш високих ієрархій.

На рис. 1.7 приведена схема мультиплексування потоків у європейській, північноамериканській і японській ПЦІ, знаком «x N» на схемі позначено число мультиплексованих потоків.

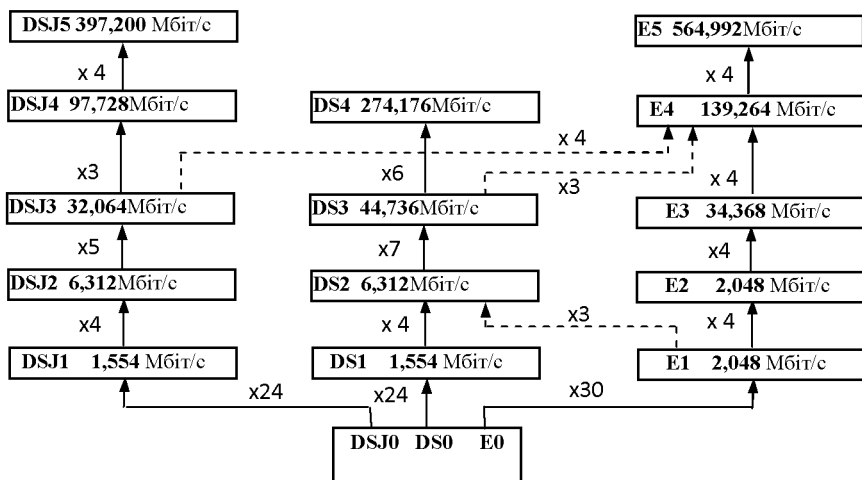


Рисунок 1.7 - Схема мультиплексування потоків у європейській, північноамериканській і японській ПЦЦ

Головним недоліком ПЦЦ є неможливість, через наявність вирівнюючих бітів, прямого доступу до каналів без багаторазового повторення процедур демультимплексування і мультиплексування. Наприклад, щоб вставити первинний потік у третинний, необхідно спочатку демультимплексувати третинний потік до вторинних потоків, потім кожний вторинний потік до первинних потоків. Потім, додавши новий первинний потік, зробити мультиплексування потоків заново, увівши додаткові біти вирівнювання швидкостей, службові сигнали і сигнали синхронізації. Іншим вузьким місцем технології ПЦЦ є обмежені можливості по організації мережного моніторингу і керування.

#### 1.4.2 Синхронна цифрова ієрархія

Розвиток швидкісних телекомунікацій на основі оптоволоконних ліній зв'язку і необхідність усунення недоліків ПЦЦ привело до створення синхронної цифрової ієрархії *SONET/SDH*, що об'єднала північноамериканську ієрархію синхронної оптичної мережі *SONET (Synchronous Optical Network)* і європейську синхронну цифрову ієрархію *SDH*.

Основними особливостями ієрархії SONET/SDH є: використання синхронної технології передачі разом з байт-інтерлівінгом при мультиплексуванні та реалізація контейнерного принципу упакування і транспортування сигналів. Завдяки цьому забезпечуються:

- пряме введення - виведення потоків, що дозволяє на будь-якому рівні ієрархії SONET/SDH вилучати і вставляти потоки нижчого рівня ієрархії без процедури покрокового демультимплексування - мультиплексування;
- сумісність із системою ПЦІ а також прозорість для трафіка, сформованого іншими цифровими технологіями;
- широкі можливості автоматизованого контролю, керування і обслуговування елементів мережі.

Структуру цифрових потоків SONET/SDH характеризують транспортні модулі STM-N (*Synchronous Transport Module of level N*), де N визначається рівнем ієрархії швидкостей, які кратні швидкості 51,84 Мбіт/с, відповідній рівню ієрархії STS-1 (*Synchronous Transport Signal of level 1*) технології SONET. Синхронна цифрова ієрархія SONET/SDH представлена в таблиці 1.5, де  $N_{STS-1}$  – коефіцієнт мультиплексування швидкості сигналу STS-1.

Таблиця 1.5 - Синхронна цифрова ієрархія

Рівень модуля	Швидкість, Мбіт/с	$N_{STS-1}$
STM-1	155,520	3
STM-4	622,080	12
STM-16	2488,320	48
STM-64	9953,280	192
STM-256	39813,12	768

Упакування і транспортування в STM-N цифрових потоків здійснюється за допомогою контейнерів (*Container*) C-n, де n рівень контейнера. Усі операції з контейнерами проводяться незалежно від їхнього змісту, завдяки чому досягається прозорість мережі SONET/SDH. Рівні контейнерів установлені відповідно до рівнів ієрархії європейської і північноамериканської ПЦІ та представлені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Ієрархія конвеєрів технології SONET/SDH

Контейнер	Швидкість потоку, Мбіт/с	Рівень ієрархії ПЦІ
C-11	1,554	DS1
C-12	2,048	E1
C-2	6,312	DS2
C-3	34,368	E3
	44,736	DS3
C-4	139,264	E4

Обсяг контейнерів перевищує обсяг корисного навантаження, залишкові біти використовуються для узгодження швидкості плезіохронних сигналів з більш високою швидкістю контейнерів

На рис. 1.8 наведена схема мультиплексування трибутарних сигналів, тобто цифрових потоків зі швидкістю, відповідною до ієрархії СЦІ в технології SONET/SDH. Знаком «x N» на схемі позначене число мультиплексованих потоків.

Синхронний транспортний модуль STM-1 прийнятий в якості базового формату. Він являє собою блокову циклічну структуру з періодом повторення 125 мкс (частота повторення 8000 Гц) і формується у вигляді масиву даних обсягом 2430 байт, що передаються зі швидкістю 155,52 Мбіт/с ( $2430 \cdot 8 \cdot 8000 = 155,52 \cdot 10^6$  біт/с). Для наочності опису технології SONET/SDH цей масив даних представляється у вигляді прямокутної таблиці, яка складається з 9 рядків по 270 одnobайтових стовпців. Один цикл передачі тривалістю 125 мкс відповідає рядковому зчитуванню з ліворуч на праворуч і зверху вниз даних з таблиці. Структура синхронного транспортного модуля STM-1 наведена на рис. 1.9.

У структурі модуля STM-1 перші 9 стовпців утворюють поле секційних заголовків SOH (*Section Over Head*), інші 261 стовпців призначені для інформаційного навантаження (*PAYLOAD*), що втримується в контейнерах. У полі заголовків рядки з 1-го по 3-й займає заголовок регенераційної секції RSOH (*Regenerator Section Over Head*), що містить сигнали керування, контролю і циклової синхронізації для забезпечення працездатності ділянок регенерації. Рядки з 5-го по 9-й містять заголовок мультиплексованої секції MSOH (*Multiplexer Section Over Head*), яка забезпечує взаємодію між мультиплексорами. В 4-му рядку записуються покажчики PTR (*Pointer*) адміністративних блоків AU (*Administrative Unit*), що

визначають положення корисного навантаження контейнерів разом з додатковими службовими сигналами в загальному полі навантаження модуля STM-1.

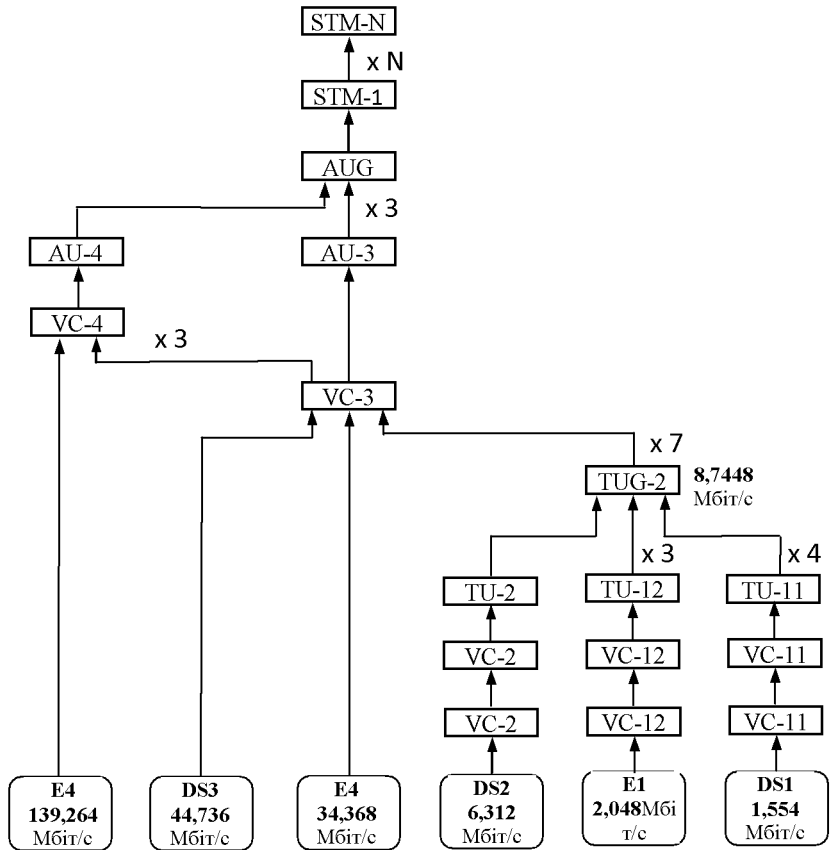


Рисунок 1.8 – Схема мультиплексування трибутарних сигналів ПЦІ в технології SONET/SDH

Структура синхронного транспортного модуля STM-N формується шляхом побайтного об'єднання N транспортних потоків STM-1, із заголовків яких складається загальне поле заголовків розміром 9 рядків на  $9 \times N$  однобайтових стовпців і загальне поле інформаційного навантаження розміром 9 рядків на  $261 \times N$

однобайтових стовпців. Як відзначалось раніше, порядкове зчитування з ліворуч на праворуч і зверху вниз байтів з таблиці відповідає одному циклу передачі тривалістю 125 мкс.

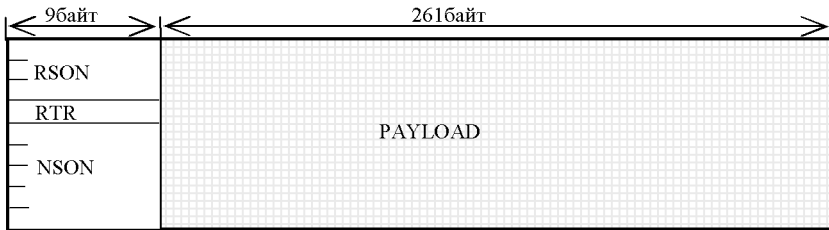


Рисунок 1.9 - Структура синхронного транспортного модуля STM-1

У відповідності зі схемою на рис. 1.8 процедура завантаження транспортного модуля STM-1 складається з декількох кроків.

До поля корисного навантаження, що втримується в контейнері С-п, додається маршрутний заголовок РОН (*Path Over Head*). В результаті формується віртуальний контейнер (*Virtual Container*) VC-п, заголовок якого містить службову інформацію, що включає в себе тип контейнера, дані контролю якості і надійності транспортування контейнера, статистику про проходження контейнера по мережі.

До віртуального контейнера VC-п додається показчик PTR, що визначає положення першого байта навантаження контейнера. У результаті формується адміністративний блок AU-п (*Administrative Unit*) для контейнерів високого рівня VC-4 і VC-3 або трибутарний блок TU-п (*Tributary Unit*) для контейнерів низького рівня VC-2, VC-12, VC-11.

Мультиплексування трьох блоків AU-3 утворює структуру групового адміністративного блоку AUG. Блок AU-4 безпосередньо заноситься в AUG. У результаті додавання до блоку AUG поля секційних заголовків SON утворюється структура STM-1.

Мультиплексування блоків AU-3 може бути виконано двома способами. По першому способу з показчиків контейнерів складається загальний показчик, який разом з контейнерами VC-3 утворює адміністративний блок AU-3 у циклі STM-1. По другому способу контейнери VC-3 перетворюються в трибутарні блоки

(*Tributary Unit*) TU-3, з яких складається структура контейнера VC-4, що надалі завантажуються в STM-1.

Мультиплексування трибутарних блоків TC-2, TC-12, TC-11 утворює структуру групового блоку TUG-2 (*Tributary Unit Group*), покажчик якого містить дані про розміщення контейнерів блоків у віртуальному блоці VC-4, куди проводиться їхнє завантаження.

Сучасне мережне обладнання дозволяє інтегрувати технологію СЦІ з іншими технологіями, забезпечуючи транспортування різних видів трафіка.

## 1.5 ОПТИЧНА ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА

Плезіохронні PDH і синхронні SDH мережі початково проектували для передачі голосового трафіка. В SDH/SONET був прийнятий ряд рішень для об'єднання інформаційного і голосового трафіка в єдину транспортну мережу, у якій елементи мережі даних використовували інтерфейси і протоколи передачі голосового трафіка. Однак у зв'язку з інтенсивним зростанням додатків, що базуються на Ethernet і інших технологіях пакетної передачі, використання мереж SDH/SONET стало малоефективним.

Технологія оптичної транспортної мережі OTN (*Optical Transport Network*) розроблена для передачі швидкісного трафіка у форматі, традиційному для мереж передачі даних, що використовують фіксовані розміри кадрів замість фіксованих швидкостей передачі кадрів [4, 11, 18]. Гнучкі можливості мультиплексування в технології OTN забезпечують упакування голосового і інформаційного трафіків різного формату в стандартні контейнери з передачею їх по волоконно-оптичній мережі з використанням хвильового DWDM – ущільнення в транспортних потоках. При проектуванні OTN були використані принципи побудови мереж SDH/SONET, що дозволили забезпечити в DWDM - мережах високу якість характеристик обслуговування, таких як керованість, можливість адміністрування, розширюваність і надійність (*Operations, Administration, Maintenance and Provisioning - OAM&P*).

При формуванні контейнерів OTN клієнтський трафік розбивається на оптичні блоки корисного навантаження OPU (*Optical Payload Unit*), що містять клієнтські дані і заголовок, який визначає тип трафіка. До блоку OPU додається службова інформація, необхідна для моніторингу проходження сигналу по мережі і керування

процесом передачі сигналу. Сформований блок інформації - це оптичний блок даних ODU (*Optical Data Unit*). До блоку ODU додається надлишкове кодування і додаткова службова інформація для моніторингу, контролю і відновлення трафіка на окремому сегменті мережі між двома транспондерами, тобто пунктами, де сигнал перетвориться в електронний вид для регенерації. Отриманий блок інформації - це оптичний транспортний блок OTU (*Optical Transport Unit*). Блоки OPU і ODU передаються в незмінному виді від краю до краю мережі, від пункту приймання клієнтських даних до пункту видачі цих даних клієнтові. Блок OTU передається в незмінному виді в межах ділянки мережі, обмеженого транспондерами. Ієрархія контейнерів OTN у спрощеному виді представлено в таблиці 1.5 [18].

Таблиця 1.5 – Ієрархія конвеєрів технології OTN

Отн-Контейнер	Корисна швидкість	Застосування	
		Транспорт	Мультиплексування
ODU-0	1,25 Гбіт/с	STM-1/4, Gigabit Ethernet, Fibre Channel	-
ODU-1	2,5 Гбіт/с	STM-16, 2 Gigabit Fibre Channe	2 ODU-0
ODU-2	10 Гбіт/с	STM-64, 10 Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Fibre Channel	8 ODU-0 4 ODU-1
ODU-3	40 Гбіт/с	STM-256, 40 Gigabit Ethernet	32 ODU-0 16 ODU-1 4 ODU-2
ODU-4	100 Гбіт/с	100 Gigabit Ethernet	80 ODU-0 40 ODU-1 10 ODU-2 2 ODU-3
ODU-FLEX	N*1,25 Гбіт/с	EPON, GPON, Infiniband, CPRI і ін.	

Технологія OTN прийшла на зміну SDH/SONET і розглядається як основна транспортна технологія магістральних оптичних мереж зв'язку. Технологія OTN разом з технологією хвильового DWDM- мультиплексування дозволяє організувати лінії зв'язку із пропускнуою здатністю до 10 Тбіт/с по парі волокон, а в перспективі, – до 100 Тбіт/с [18].

### 1.6 ЕВОЛЮЦІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

У своєму розвитку ВОСП пройшли кілька етапів у міру розв'язання ряду фундаментальних наукових, технічних і технологічних проблем з метою збільшення швидкості і дальності передачі інформації при одночасному зниженні витрат на виробництво і експлуатацію оптоволоконних ліній зв'язку при їхнім комерційному застосуванні.

Комерційне застосування волоконно-оптичних цифрових систем передачі почалося на початку 80-х років ХХ століття. У системах першого покоління використовувалися багатомодове оптоволокно *MMF (Multi Mode Fber)* і напівпровідникові лазери на арсеніді галію GaAs, що працюють у першому вікні прозорості (850 нм). Багатомодове волокно мало загасання в декілька дБ/км і мало велику міжмодову дисперсію, яка обмежувала швидкість передачі значеннями в 34 - 45 Мбіт/с при максимально припустимій довжині регенераційної ділянки 10 км. Працювали ВОСП на швидкостях плезіохронної цифрової ієрархії. Для збільшення дальності передачі в оптичному тракті розміщали опто-електро-оптичні регенератори (*O-E-ORegeneration*), які забезпечували відновлення форми, амплітуди та синхронізації оптичних сигналів. На рис. 1.10 представлена структурна схема протяжних ВОСП першого покоління, де використані наступні позначення: TX -оптичний передавач (*Transmitter*), RX – оптичний приймач (*Receiver*), RG –регенератор (*Regeneration*).

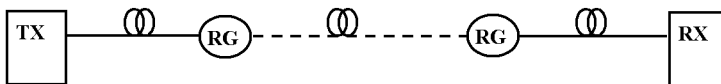


Рисунок 1.10 – Структурна схема протяжної ВОСП із використанням регенераторів

Перша комерційна волоконно-оптична лінія далекого зв'язку була введена в експлуатацію в 1980 році в США, з'єднавши міста Бостон і Ричмонд.

Подальше вдосконалення ВОСП пов'язане з використанням другого вікна прозорості (1300 нм), для якого були розроблені напівпровідникові InGaAsP лазери на основі фосфід-арсенід індію-галію. У раних ВОСП другого покоління застосовувалися багатомодові волокна, загасання яких у цім вікні становить менш 1 дБ/км. Одночасно була зменшена міжмодова дисперсія за рахунок переходу від ступінчастого до градієнтного профілю показника заломлення в багатомодовому волокні, що дозволило підвищити швидкість передачі до 100 Мбіт/с. Наступне збільшення швидкості передачі у ВОСП було досягнуте за рахунок використання одномодових волокон *SMF (Single Mode Fiber)*. В одномодових волокнах відсутня міжмодова дисперсія, а можливими причинами, що обмежують швидкість передачі, є хроматична і поляризаційна дисперсії, набагато менші за рівнем, чим міжмодова в багатомодовому волокні. Стандартне одномодове волокно *SSMF (Standard Single Mode Fiber)* має нульову хроматичну дисперсію на довжині хвилі 1310 нм при загасанні близько 0,35 дБ/км. Його використання у ВОСП другого покоління дозволило збільшити швидкість передачі до 2,5 Гбіт/с, а довжину регенераційної ділянки до 40 км. Стала практично здійсненою реалізація міжконтинентальних ліній зв'язку з використанням опто-електро-оптичних регенераторів. У свою чергу, нові розроблені можливості по збільшенню швидкості і дальності передачі, стали стимулом для розробки та впровадження високошвидкісної технології синхронної цифрової ієрархії (СЦ), яка прийшла на зміну плезіохронної цифрової ієрархії. Комерційне застосування ВОСП для далекого зв'язку, що працюють із одномодовим волокном у другому вікні прозорості зі швидкостями СЦ, відноситься до кінця 80-х років. Перша трансатлантична ВОСП (ТАТ-8) довжиною 4.5 тис. км, що з'єднала підводним кабелем Північну Америку і Європу, була введена в експлуатацію в 1988 році.

Третє покоління ВОСП сформувалося на початку 90-х років у результаті освоєння третього вікна прозорості (1550 нм), у якому одномодове волокно має мінімальне загасання - близько 0,2 дБ/км. Для цього вікна було розроблено одномодове волокно *DSF (Dispersion Shifted Fiber)* зі зміщеною в область 1550 нм нульовою хроматичною дисперсією, а також створені лазери, що працюють у

режимі єдиної поздовжньої моди. Комерційно доступні ВОСП третього покоління мали швидкість передачі до 10 Гбіт/с (рівень STM-64 технології СЦ) при довжині регенераційної ділянки близько 50 км.

Наступний прогрес в області оптоволоконних систем передачі пов'язаний з використанням легованих ербієм оптичних підсилювачів *EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)*, які дозволили суттєво збільшити довжину регенераційних ділянок та технології хвильового мультиплексування (WDM-технології). Це забезпечило багаторазове підвищення пропускної здатності оптоволоконних ліній. ВОСП четвертого покоління з технологією WDM і підсилювачами EDFA працювали в С-діпазоні (1530 – 1565 нм), який збігався з робочою смугою посилення легованого ербієм підсилювача. Для передачі сигналів в WDM - системах стало використовуватися одномодове волокно *NZDSF* з ненульовою зміщеною дисперсією (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*), у якому були ослаблені нелінійні ефекти, що виникають при великій сумарній потужності від мультиплексованих оптичних несучих, що веде до появи у волокні паразитних хвиль.

На рис.1.11 представлена структурна схема однопрогонової WDM-системи передачі, яка містить у собі: мультиплексор (*MUX*) оптичних несучих, які надходять від передавачів *TX*; ербієвий підсилювач потужності – бустер (*BoosterEDFA*); проміжні ербієві підсилювачі - лінійні підсилювачі (*Line EDFA*); ербієвий попередній підсилювач (*Pre-AmplifierEDF*); демультиплексор (*DEMUX*), що виділяє оптичні несучі, які надходять на приймачі *RX*.

Оснащення WDM- систем ербієвими підсилювачами дозволило збільшити довжину прольотів між регенераторами до 600 км при відстанях між підсилювачами 60-120 км.

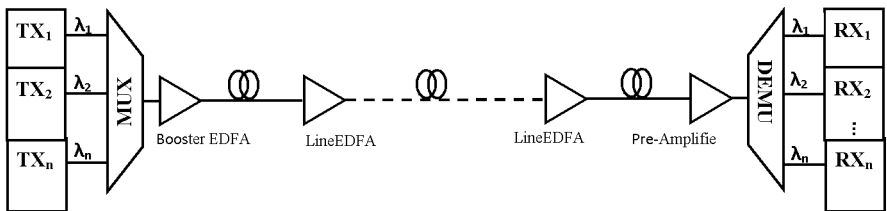


Рисунок 1.11 – Структурна схема однопрогонової ВОСП із ербієвими підсилювачами

Перші комерційні WDM- системи з'явилися в середині 90-х років. Вони дозволяли передавати по одному волокну від 4-х до 16-ти цифрових потоків з каналною швидкістю 2,5 Гбіт/с рівня STM-16. До кінця 90-х років стали комерційно доступними системи передачі з технологією щільного (DWDM) хвильового ущільнення, забезпечуючи пропускну здатність одного оптоволокна 400 Гбіт/с (40 оптичних несучих з каналною швидкістю 10 Гбіт/с рівня STM-64 і розносом між сусідніми каналами 100 ГГц).

На початку двохтисячних років тривав стрімкий розвиток технологій щільного (DWDM) і надщільного (HDWDM) ущільнення з одночасним розширенням робочої смуги довжин хвиль. Були розроблені леговані ербієм підсилювачі *LWEDFA* (*Long Wavelength EDFA*) з розширеним робочим діапазоном від 1570 нм до 1605 нм (смуга С і L діапазонів). Почали використовуватися в комерційних системах підсилювачі *ROPA* (*Remote Optically Pumped Amplifier*) з віддаленим накачуванням легованого ербієм волокна, а також рамановські підсилювачі (*Raman amplifiers*), що забезпечували підсилення оптичного сигналу за рахунок стимульованого ефекту розсіювання Рамана безпосередньо у кварцовому телекомунікаційному волокні. На рис. 1.12 представлені типові структурні схеми однопрогонових ВОСП п'ятого покоління з ROPA та рамановським накачуванням.

Схема на рис. 1.12,а містить рамановський підсилювач, випромінювання накачування якого, наприклад, на довжині хвилі 1450 нм вводиться в оптоволокну у зустрічному напрямку. Шляхом введення в цій схемі випромінювання накачування в попутному напрямку можна одержати додаткове посилення. На рис. 1.12,б оптоволоконний тракт містить відрізок волокна, легованого ербієм, який використовується як підсилювач ROPA, накачування для якого на довжині хвилі 1480 нм вводиться у волокну в зустрічному напрямку. Аналогічно, на передавальному кінці може бути включений легований ербієм відрізок волокна, що забезпечує посилення при накачуванні у попутному напрямку. У схемі на рис. 1.12,в накачування для більшої ефективності доставляється в оптоволоконний тракт по додаткових волокнах.

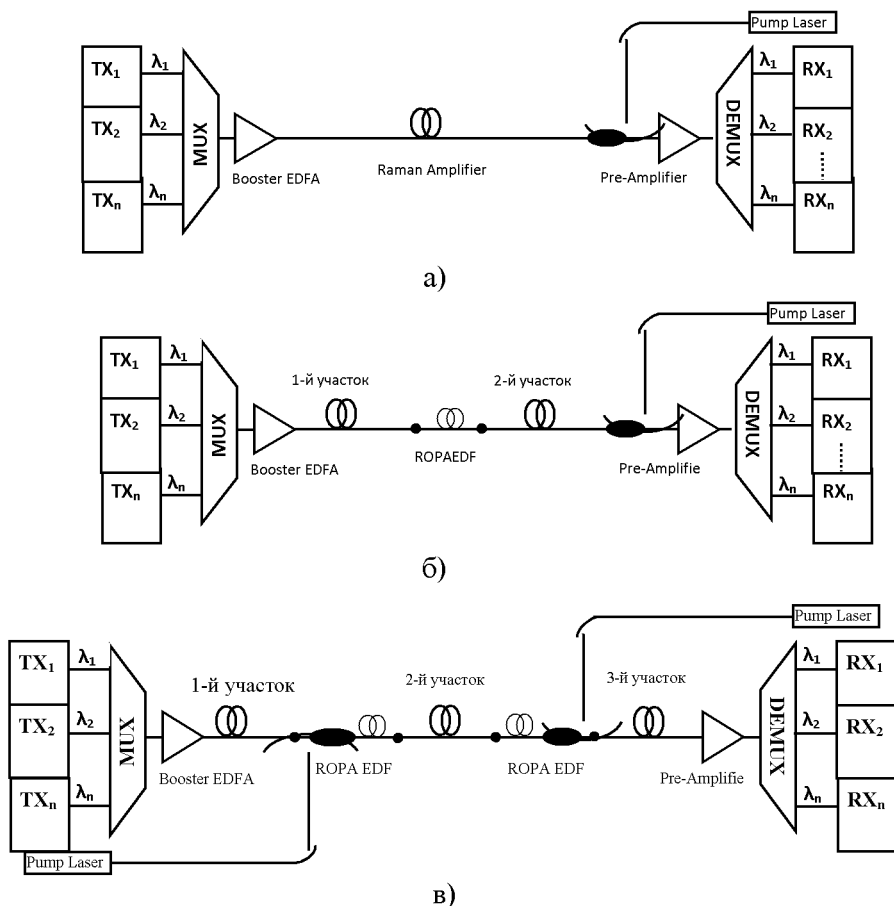


Рисунок 1.12 – Типові структурні схеми однопрогонових ВОСП із ROPA і рамановським накачуванням

На початку двохтисячних років стало комерційно доступне оптоелектронне обладнання п'ятого покоління ВОСП, що забезпечує в смузі, що охоплює С і L діапазони, ємність з розрахунку на одне волокно 1,6–3,2 Тбіт/с (до 320 оптичних несучих з каналною швидкістю 10 Гбіт/с та розносом між сусідніми каналами 50 ГГц) [19]. Подальший ріст каналної швидкості був забезпечений, по-перше, за рахунок розробки і впровадження повністю оптичних WDM- систем, у яких усі операції в пристроях введення-виведення, мультиплексування, посилення і внутрішньої комутації здійснюється

оптичними засобами, а, по-друге, шляхом використання більш ефективних методів кодування, модуляції і детектування інформаційних сигналів. З 2011 року на існуючих і знову створених мережах розпочалося широкомасштабне впровадження систем з каналною швидкістю 40 Гбіт/с і 100 Гбіт/с, у яких замість простої амплітудної модуляції стала застосовуватися більш захищена від завад і стійка до хроматичної дисперсії модуляція формату *DP-QPSK (Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying* - квадратурно-фазова модуляція у двох площинах поляризації) сумісно з когерентним прийманням оптичного сигналу. Наприкінці 2013 року була продемонстрована передача десяти каналів 100 Гбітс на 500 км в однопрогоновій лінії з використанням приймально-передавальної системи на основі модуляції формату DP-QPSK, технології когерентного приймання та ербієвих підсилювачів з віддаленим накачуванням [20, 21].

Останнім часом в WDM-системах почала застосовуватися технологія, заснована на агрегуванні груп з декількох щільно розташованих оптичних несучих у суперканали (*Super-Channel*). Суперканали по довжині хвилі відділені друг від друга досить протяжними розділовими смугами, що уможлиблює робити мережеві операції із суперканалом як з єдиним оптичним каналом з використанням оптичних маршрутизаторів і комутаторів. Рядом фірм на існуючих мережах уже протестували суперканали 200, 400, 500 і 800 Гбіт/с, а на початку 2013 року після успішного завершення польових випробувань введена в експлуатацію оптоволоконна лінія між Парижем і Ліоном із загальною ємністю 17,6 Тбіт/с (44 оптичних несучих з каналною швидкістю 400 Гбіт/с) [21].

Розробка для діапазону 1270–1610 нм широкосмугового оптоволоконна *ZWPF (Zero Water Peak Fiber)* з подавленим водним піком в області 1383 нм стимулювала створення і впровадження розріджених CWDM-систем. Завдяки великому розносу оптичних несучих ці системи відрізняються від DWDM-систем простотою, малим споживанням енергії та низькою вартістю застосованого оптичного обладнання. Перші комерційні CWDM-системи з'явилися на початку 2000-х років і використовувалися в регіональних і міських мережах на відстанях до 50 км.

Останнім часом у системах зв'язку почав застосовуватися новий тип оптичних світловодів – фотонно-кристалічні волокна. Властивостями фотонного кристала володіє оболонка, що оточує

серцевину волокна. Оболонку конструюють у вигляді періодичної структури, складеної з діелектриків з одмінним показником заломлення, наприклад, шляхом створення у кремнієвій оболонці періодично розташованих отворів. Унікальною властивістю фотонно-кристалічного волокна є залежність його дисперсійних властивостей від конфігурації і геометричних параметрів структури оболонки. Підбір конфігурації і геометрії оболонки волокна дозволяє реалізувати позитивну, негативну і нульову дисперсії, а також варіювати нахилом дисперсійної кривої. Ця властивість фотонно-кристалічних волокон використовується в компенсаторах дисперсії, які дозволяють ефективно відновлювати форму сигналів, переданих по лініях далекого зв'язку.

Протягом останніх років спостерігається інтенсивний розвиток оптичних мереж доступу, що реалізують технологію *FTTH (Fiber to the Home – кабель до будинку)*, які припускають прокладку кабелю до будинку (квартири) абонента з наданням широкосмугового каналу зв'язку. Оптичне обладнання для цієї технології і вартість його установки за ціною практично зрівнялося із традиційною технологією, що використовує мідний кабель. Вже розроблено оптоволокно, яке можна згинати як мідні дроти, не викликаючи істотного росту втрат. Стали доступними дешеві коннектори, що дозволяють виключити зварювання оптоволокна.

Подальший науково-технічний прогрес в області волоконно-оптичних систем передачі пов'язаний з необхідністю розробки нових поколінь високопродуктивних комерційних систем, що відповідають зростаючим вимогам за обсягом і швидкості обробки і передачі інформації, які володіють пониженим споживанням енергії, високою надійністю та малою вартістю.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Скільки вікон прозорості має кварцове оптоволокно і які довжини хвиль їм відповідають ?
2. Як зв'язані частота і довжина хвилі ?
3. Намалуйте і поясніть структурну схему ВОСП.
4. В чому полягає технологія часового ущільнення сигналу ?
5. В чому полягає технологія хвильового ущільнення каналу ?
6. На які групи підрозділяються технології хвильового ущільнення і який їхній рознос по довжині хвилі ?

7. Які системи цифрових ієрархій використовуються у ВОСП ?
8. Який вид ущільнення використовується в системах цифрової ієрархії ПЦД і СЦД ?
9. Яка швидкість передачі каналу, відповідного до нижчого рівня цифрової ієрархії ПЦД і СЦД?
10. По якому принципу поєднуються канали в системах цифрової ієрархії ?
11. Основні недоліки технологій цифрової ієрархії.
12. В чому основна відмінність технології оптичної транспортної мережі OTN від технологій цифрових ієрархій ПЦД і СЦД?

## 2 ОПТИЧНІ ВОЛОКНА

Оптоволокна (ОВ), які застосовуються в системах зв'язку, виготовляються з надчистого кварцового скла ( $\text{SiO}_2$ ), і являють собою нитку циліндричної форми, складену з двох концентричних шарів скла з різними показниками заломлення. Центральний шар ОВ називається серцевиною, шар, що оточує серцевину, називається оболонкою. Залежність величини показника заломлення від радіальної осі у поперечному перерізі ОВ називається *профілем показника заломлення*. Профіль показника заломлення (ППЗ) є найважливішою характеристикою, що визначає властивості ОВ [1-11, 13-16].

### 2.1 КОНСТРУКЦІЇ ОПТОВОЛОКОН

Стандартне оптоволоконно складається з трьох шарів - з серцевини, оболонки і захисного пластмасового покриття, яке наноситься на волокно для підвищення його механічної міцності. Конструкція ОВ і його профіль показника заломлення представлені на рис. 2.1.

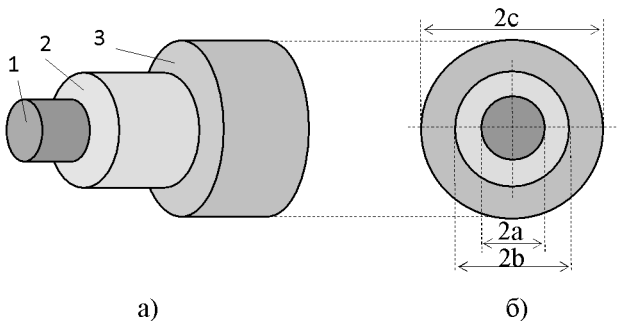


Рисунок 2.1 - Оптичне волокно:

а) конструкція ОВ, 1 – серцевина, 2 – оболонка, 3 – захисне покриття; б) розподіл профілю показника заломлення

Діаметри серцевини, оболонки і покриття позначають відповідно  $2a$ ,  $2b$ ,  $2c$ , мкм. Розміри поперечного перетину ОВ записуються у вигляді дробу  $2a/2b$ , наприклад, запис  $50/125$  означає, що  $2a = 50$  мкм,  $2b = 125$  мкм.

На рис. 2.1,б зображено розподіл профілю показника заломлення у серцевині, оболонці і у захисному покритті. Відношення показників заломлення невелике і становить 0,2...1%. Змінюють величину показників заломлення шляхом легування скла спеціальними домішками. Типові значення показників: серцевина  $n_1=1,48$ ; оболонка  $n_2=1,46$ ; покриття  $n_3=1,52$ .

Під захисними покриттями розуміються шари, які наносяться прямим контактним способом на поверхню оболонки. Покриття може складатися з одного або декількох пластмасових шарів і має бути рівномірним і цілісним по всій довжині без істотних змін товщини. Показники заломлення покриття більше показників заломлення оболонки, за рахунок чого небажані світлові хвилі, введені в оболонку, поглинаються пластмасою. Діаметр кварцового ОВ з первинним покриттям зазвичай складає 0,15 - 0,25 мм.

Якщо в ОВ збуджується і поширюється одна мода (тип хвилі), то таке оптоволокну називається *одномодовим (Single Mode Fiber - SMF)*, якщо одночасно кілька мод - то *багатомодовим (Multi Mode Fber - MMF)*. Розміри серцевини багатомодового волокна набагато більше розмірів одномодового волокна. При збудженні багатомодового волокна зовнішнім джерелом світла в ньому можуть поширюватися одночасно кілька променів світла. Ці промені формують інтерференційні структури, відповідні модам (типам хвиль).

У ВОЛЗ найбільш широко використовуються такі нормативні стандарти волокон з кварцового скла:

- багатомодове волокно *MMF* 50/125;
- багатомодове волокно *MMF* 62,5/125;
- одномодове стандартне волокно *SMF* 8-10/125.

Кварцові ОВ розрізняються формою профілю показника заломлення серцевини і оболонки.

У багатомодових волокнах знаходять застосування ступінчасті (*Step Index Multi Mode Fber*) і градієнтні (*Graded Index Multi Mode Fber*) профілі показника заломлення, які зображені на рис. 2.2.

Волокна з градієнтним профілем показника заломлення використовуються для зменшення числа збуджених мод.

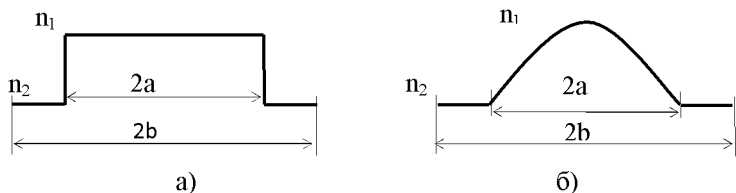


Рисунок 2.2 – Профілі показника заломлення багатомодових ОВ:  
а - ступінчастий, б - градієнтний

Залежно від характеру зміни профілю показника заломлення одномодові волокна поділяються на три основні типи:

- волокна з незміщеною дисперсією, або стандартні волокна (*SF - Standard Fiber*);
- волокна зі зміщеною дисперсією (*DSF - Dispersion Shifted Fiber*);
- волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (*NZDSF - Non Zero Dispersion Shifted Fiber*).

На рис. 2.3 зображені приклади типових ППЗ одномодового ОВ.

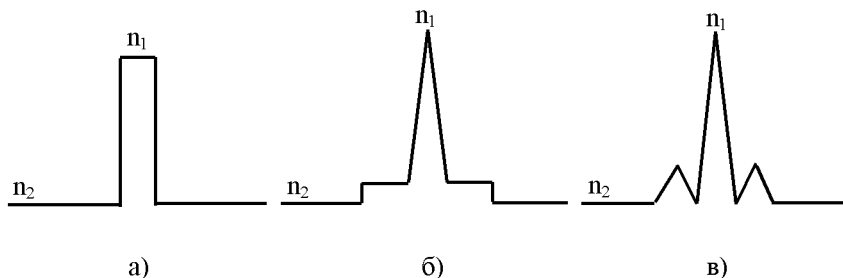


Рисунок 2.3 – Профілі показника заломлення одномодового ОВ:  
а - з незміщеною дисперсією; б, в - зі зміщеною дисперсією

Форма ППЗ, чистота кварцового скла і його легування спеціальними домішками визначають передаточні характеристики ОВ.

## 2.2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В ОПТОВОЛОКНІ

Якісний опис процесу поширення хвиль в ОВ дає променева теорія, яка дозволяє також одержати деякі важливі кількісні

результати. Більш повний і строгий опис хвиль в ОВ забезпечує теорія електромагнітного поля [23 - 30].

### 2.2.1 Променева теорія поширення світла в оптоволокну

Відповідно до законів оптики при падінні променя світла з середовища з показниками заломлення  $n_1$  на кордон розділу з середовищем, що має показник заломлення  $n_2$ , виникають відбитий і, за певної умови, заломлений промені. При цьому падаючий, відбитий і заломлений промені лежать в одній площині, кут відбиття дорівнює куту падіння  $\alpha$ , а кут заломлення  $\beta$  підпорядковується закону заломлення Снелліуса:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.1)$$

де  $c_1 = c_0/n_1$ ,  $c_2 = c_0/n_2$  - швидкість світла в середовищі з показником заломлення  $n_1$  і  $n_2$ ;

$c_0$  - швидкість світла у вакуумі,  $3 \cdot 10^8$  км/с.

Нехай промінь світла падає на поверхню розділу між оптично щільним середовищем з показником заломлення  $n_1$  і оптично менш щільним середовищем з показником заломлення  $n_2$ , ( $n_2 < n_1$ ) під кутом падіння  $\alpha$ . Якщо збільшувати кут падіння починаючи з нуля градусів, то при певному значенні кута падіння  $\alpha = \alpha_0$  кут заломлення  $\beta_0$  стає рівним  $90^\circ$ . У цьому випадку промінь світла поширюється паралельно поверхні розділу двох середовищ.

На рис. 2.4 вказані траєкторії падаючих променів на межу розділу середовищ при  $n_2 < n_1$ :

- промінь 1 падає під кутом  $\alpha < \alpha_0$  і розпадається на відбитий і заломлений під кутом  $\beta$  промені,

- промінь 2 падає під кутом  $\alpha = \alpha_0$  і поширюється паралельно поверхні розділу двох середовищ  $\beta = \beta_0 = 90^\circ$ ,

- промінь 3 падає під кутом  $\alpha > \alpha_0$  і повністю відбивається від межі розділу середовищ.

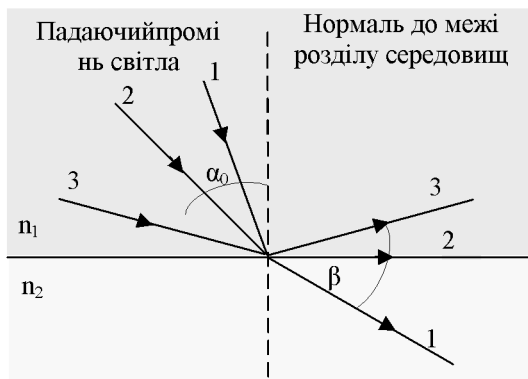


Рисунок 2.4 – Траєкторії променів при різних кутах падіння  $\alpha$ : промінь 1 при  $\alpha < \alpha_0$ , промінь 2 при  $\alpha = \alpha_0$ , промінь 3 при  $\alpha > \alpha_0$

Кут падіння  $\alpha_0$  називається **критичним** (граничним) кутом двох середовищ. Для критичного кута  $\alpha_0$  при  $\sin \beta_0 = 1$  має силу наступне відношення:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Наприклад, для критичного кута між склом з  $n_2 = 1,46$  і повітрям з  $n_1 = 1$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{1,46} = 0,685; \quad \alpha_0 = \arcsin \frac{1}{1,46} = 43^\circ.$$

Для всіх променів, у яких кут падіння  $\alpha$  більше критичного кута  $\alpha_0$ , відсутні відповідні заломлений промені в оптично менш щільному середовищі. Ці промені світла відбиваються на поверхні розділу в оптично більш щільне середовище під кутом відбиття, що дорівнює куту падіння. Таке явище називається **повним внутрішнім віддзеркаленням**.

Повне внутрішнє віддзеркалення може відбуватися на поверхні розділу середовищ тільки тоді, коли промінь світла поширюється з оптично більш щільного середовища (наприклад, скло

$n_1=1,48$ ) в оптично менш щільне середовище (наприклад, повітря  $n_0=1$ ) і ніколи не відбувається у зворотному напрямку.

На рис. 2.5 приведено приклад структури, яка має практичне використання у волоконній оптиці. Структура складається з трьох шарів кварцового скла. Центральний шар має показник заломлення  $n_1 = 1.48$ , у крайніх шарів показники заломлення однакові і рівні,  $n_2 = n_3 = 1.46$ . Використовуючи закон Снелліуса, можна обчислити значення критичного кута:

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1,46}{1,48}\right) = 80,6^\circ.$$

Світло, що падає на кордон між  $n_1$  і  $n_2$  та кордон між  $n_1$  і  $n_3$  під кутом більше ніж  $80,6^\circ$ , буде відображатися назад у центральний шар. При цьому кут відображення буде дорівнювати куту падіння.

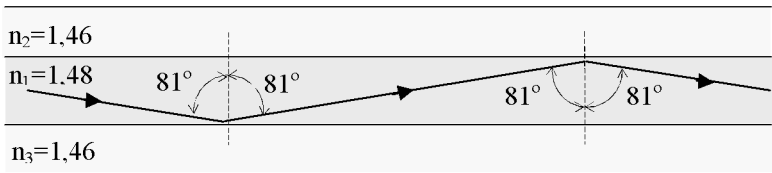


Рисунок 2.5 – Поширення променя світла в структурі на основі кварцового скла при куті падіння більшому критичного кута

На рис. 2.5 показано приклад траєкторії поширення променя світла при куті падіння  $\alpha = 81^\circ$ , більшому критичного кута  $\alpha_0 = 80,6^\circ$ . На рисунку промінь, відбитий від  $n_3$ , знову повертається і стає падаючим променем для середовища  $n_2$ . Ситуація повторюється. Ми маємо справу з променем, який захоплено між шарами  $n_2$  і  $n_3$ . До тих пір, поки кут падіння більше  $80,6$ , промінь буде повертатися назад у центральний шар. Таким чином, світло буде поширюватися вздовж центрального шару завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню.

Аналогічний принцип лежить в основі роботи оптичного волокна. Основна відмінність полягає в тому, що шари ОВ мають циліндричну форму. Центральний шар (серцевина) має показник заломлення  $n_1$ , зовнішній шар (оболонка) з показником заломлення  $n_2$  оточує сердцевину з усіх сторін, при цьому  $n_1$  трохи більше ніж  $n_2$ .

### 2.2.1.1 Числова апертура оптоволоконна

Числова апертура  $NA$  (*numerical aperture - NA*) визначає інтервал кутів падіння променів світла на вхідний торець оптоволоконна, при яких світло буде поширюватися у волокні, завдяки виконанню умови повного внутрішнього відображення.

На рис. 2.6 зображені траєкторії променів, падаючих під різними кутами на вхідний торець найпростішого ОВ, складеного з двох концентричних шарів діелектрика - з серцевини з показником заломлення  $n_1$  і оболонки з показником  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ).

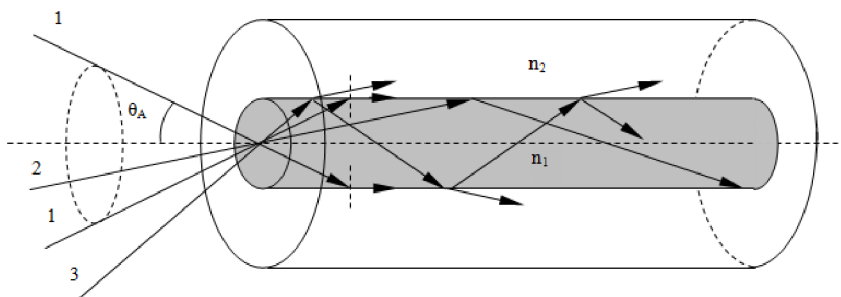


Рисунок 2.6 – Поширення світла в оптичному волокні

Першому променю відповідає кут  $\theta_A$ , при якому промінь входячи в серцевину ОВ падає на кордон розділу діелектриків під критичним кутом  $\alpha_0$ . Кут  $\theta_A$  називається *апертурним кутом*.

При обертанні променя 1 навколо осі ОВ утворюється конус, який називається *апертурним конусом*. Умовою поширення променів в ОВ є їхнє потрапляння всередину апертурного конуса (промінь 2,  $\theta < \theta_A$ ). В цьому випадку для променів у серцевині ОВ буде виконуватися умова повного внутрішнього відображення, так як  $\alpha > \alpha_0$ . При цьому, промені, послідовно перевідображаючись від межі розділу діелектриків, будуть поширюватися по світловоду на великі відстані. Якщо промені не потрапляють в середину апертурного конуса (промінь 3,  $\theta > \theta_A$ ), то в ОВ умову повного внутрішнього відображення не буде виконано, так як  $\alpha < \alpha_0$ . У цьому випадку в процесі перевідбиття падаючих променів з'являться заломлені промені, які будуть передавати частину оптичної енергії в оболонку,

що призведе до швидкого загасання енергії променів у серцевині світловода.

Величина апертурного кута визначається із закону заломлення (2.1) для вхідного торця ОВ:

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{\sin \theta_A}{\cos \alpha_0} = \frac{\sin \theta_A}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0}} = \frac{n_1}{n_0}, \quad (2.3)$$

де  $n_0$  – показник заломлення середовища, що межує з вхідним торцем ОВ.

За (2.3) з урахуванням (2.2) для критичного кута вводиться числова апертура:

$$NA = n_0 \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Наприклад, при введенні світла в ОВ з повітря  $n_0 = 1,0$  і при  $n_1 = 1,48$ ,  $n_2 = 1,46$  з (2.4) отримуємо  $NA = 0,242$ ,  $\theta_A = 14^\circ$ .

### 2.2.1.2 Різновиди променів в оптоволокну

Промені, що поширюються уздовж оптичного волокна, підрозділяються на *меридіональні і косі*, їх траєкторії зображені на рис. 2.7.

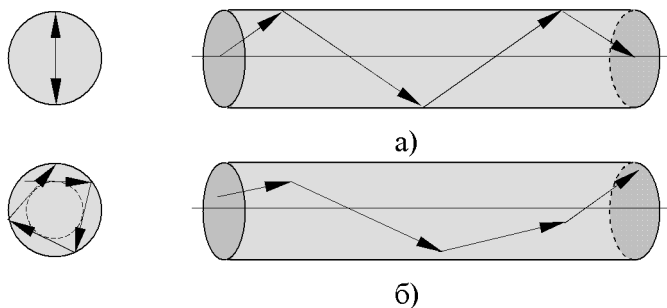


Рисунок 2.7 – Траєкторії променів і їх проекції на площину поперечного перерізу серцевини оптичного волокна:

- а – зигзагоподібна траєкторія меридіонального променя,
- б – спіралеподібна звивиста траєкторія косого променя

Траєкторія руху меридіонального променя лежить у площині, що проходить через вісь волокна. Косі промені поширюються по спіралеподібними траєкторіями, які не перетинають вісь волокна. Проекція траєкторії косих променів на площину поперечного перерізу серцевини ОВ визначає окружність циліндра (на малюнку вона позначена пунктирною лінією), поверхні якого торкаються промені при поширенні уздовж волокна.

Оптоволокно з одномодовим режимом роботи має малі розміри серцевини, тому структуру моди формують промені світла, що поширюються безпосередньо уздовж поздовжньої осі. У багатомодовому оптоволокні, що має більші розміри серцевини, з'являються моди, утворені меридіональними променями, і моди виникаючі через поширення косих променів. Детальну картину про типи мод в ОВ і умовах їх поширення дає теорія електромагнітного поля.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Намалюйте і поясніть конструкцію ОВ.
2. На які типи підрозділяються ОВ?
3. Намалюйте і поясніть профілі показників заломлення ОВ.
4. Сформулюйте і запишіть закон Снелліуса.
5. Для показників заломлення  $n_1=1,47$  і  $n_2=1,46$  визначте критичний кут падіння.
6. Для яких кутів падіння променя світла виникає повне внутрішнє відбиття?
7. Поясніть процес поширення променів світла по ОВ.
8. Дайте визначення числової апертури.
9. Розрахуйте апертурний кут для показників заломлення  $n_0=1$ ,  $n_1=1,47$  і  $n_2=1,46$ .
10. Як поширюються косі і меридіональні промені світла в ОВ?

## 2.2.2 Електромагнітна теорія поширення світла в оптоволокні

Відповідно до електромагнітної теорії, поширення світла в ОВ описується за допомогою електромагнітних хвиль, які характеризуються напруженістю електричного  $\mathbf{E}$  та магнітного  $\mathbf{H}$  полів. Поля представляються у вигляді суперпозиції мод (типів хвиль), які можуть існувати в ОВ. Постійні поширення мод і їх структура визначаються з характеристичного рівняння, що впливає з розв'язання граничного завдання, сформульованого для досліджуваної структури ОВ [23 – 26].

### 2.2.2.1 Характеристичне рівняння і типи мод ступінчастого оптоволоконна

Основні закономірності поширення хвиль світла в оптоволокні можуть бути отримані в результаті електродинамічного аналізу його спрощеної моделі у вигляді серцевини зі ступінчастим профілем показника заломлення і оболонкою з необмеженими розмірами.

В силу циліндричної симетрії ОВ для опису поля в ньому доцільно використовувати циліндричну систему координат  $(\rho, \varphi, z)$ . На рис. 2.8 представлені поперечний переріз ОВ і розподіл  $n(\rho)$ , що характеризує профіль його показника заломлення.

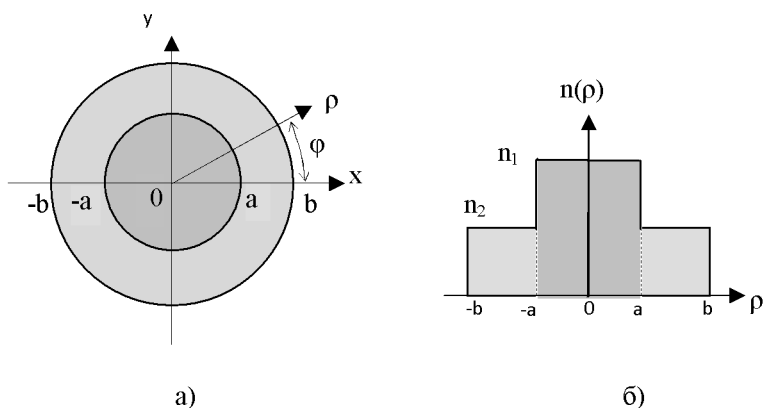


Рисунок 2.8 - Поперечний переріз (а) і профіль показника заломлення (б) ступінчастого ОВ

На межі розподілу середовищ при  $\rho = a$  мають виконуватися умови безперервності дотичних складових електричного і магнітного полів:

$$E_{z1} = E_{z2}, H_{z1} = H_{z2}, \quad (2.5)$$

$$E_{\varphi 1} = E_{\varphi 2}, H_{\varphi 1} = H_{\varphi 2}. \quad (2.6)$$

Тут індекс 1 ставиться до поля в серцевині з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_1 = n_1^2$ , індекс 2 – до поля в оболонці з відносною проникністю  $\epsilon_2 = n_2^2$ . Магнітна проникність середовищ рівна магнітній постійній  $\mu_0$ .

Відповідно до методу поділу змінних поздовжні складові полів у циліндричній системі координат записуються у вигляді:

$$E_z = A F(\rho) \Phi(\varphi) e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (2.7)$$

$$H_z = B F(\rho) \Phi(\varphi) e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (2.8)$$

де  $\omega$  – кутова частота;

$\beta$  постійна поширення;

$A, B$  – постійні;

$F(\rho), \Phi(\varphi)$  – функції радіальної та азимутальної залежностей поля;

$j = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця.

Підставлення (2.7), (2.8) у хвильове рівняння в циліндричній системі координат дає наступне співвідношення для функцій  $F(\rho)$  і  $\Phi(\varphi)$  [23 - 30]:

$$\frac{\rho^2}{F(\rho)} \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{\rho}{F(\rho)} \cdot \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\Phi(\varphi)} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} + \rho^2 \chi^2 = 0, \quad (2.9)$$

де  $\chi = \sqrt{k^2 - \beta^2}$  - поперечне хвильове число;

$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r} = k_0 n$  - хвильове число середовища з показником заломлення  $n$ ;

$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 2\pi/\lambda$  - хвильове число вакууму;

$\varepsilon_0, \mu_0$  - електрична і магнітна постійні;

$\lambda$  - довжина хвилі.

Рівняння (2.9) розпадається на два рівняння:

$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dF}{d\rho} + \left(\chi^2 - \frac{m^2}{\rho^2}\right) \cdot F = 0, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} + m^2 \Phi(\varphi) = 0. \quad (2.11)$$

Вираження (2.10) є рівнянням Бесселя, його розв'язування – це циліндричні функції  $Z_m(\chi\rho)$   $m$ -го порядку.

У якості розв'язування гармонійного рівняння (2.11) скористаємося функціями  $\cos(m\varphi), \sin(m\varphi)$ , де  $m$  – ціле число. Представимо (2.7), (2.8) у такому вигляді:

$$\dot{E}_z = A Z_m(\chi\rho) \cos(m\varphi), \quad (2.12)$$

$$\dot{H}_z = B Z_m(\chi\rho) \sin(m\varphi). \quad (2.13)$$

Тут і далі введено комплексні амплітуди щодо множника  $\exp(j\omega t)$  та опущений множник  $\exp(-j\beta z)$ .

Азимутальні і радіальні складові поля пов'язані з поздовжніми складовими рівняннями Максвелла [23 - 28]:

$$\dot{E}_\rho = -\frac{j}{\chi^2} \left( \beta \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \rho} + \frac{\omega \mu_0}{\rho} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} \right), \quad (2.14)$$

$$\dot{E}_\varphi = \frac{-j}{\chi^2} \left( \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} - \omega \mu_0 \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \rho} \right), \quad (2.15)$$

$$\dot{H}_\rho = \frac{j}{\chi^2} \left( \frac{\omega \varepsilon_0 n^2}{\rho} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \rho} \right), \quad (2.16)$$

$$\dot{H}_\varphi = -\frac{j}{\chi^2} \left( \omega \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \rho} + \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} \right). \quad (2.17)$$

На підставі (2.12), (2.13) ці співвідношення перетворюються в наступний вид:

$$\dot{E}_\rho = -\frac{j}{\chi^2} \left[ \beta \chi Z'_m(\chi \rho) A + \omega \mu_0 m \frac{Z_m(\chi \rho)}{\rho} B \right] \cos(m\varphi), \quad (2.18)$$

$$\dot{E}_\varphi = \frac{j}{\chi^2} \left[ \beta m \frac{Z_m(\chi \rho)}{\rho} A + \omega \mu_0 \chi Z'_m(\chi \rho) B \right] \sin(m\varphi), \quad (2.19)$$

$$\dot{H}_\rho = \frac{-j}{\chi^2} \left[ \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r m \frac{Z_m(\chi \rho)}{\rho} A + \beta \chi Z'_m(\chi \rho) B \right] \sin(m\varphi), \quad (2.20)$$

$$\dot{H}_\varphi = -\frac{j}{\chi^2} \left[ \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \chi Z'_m(\chi \rho) A + \beta m \frac{Z_m(\chi \rho)}{\rho} B \right] \cos(m\varphi). \quad (2.21)$$

Штрихом позначені похідні від циліндричних функцій по аргументу  $\chi \rho$ .

Поле в сердечнику повинне збувати при  $\rho \rightarrow 0$ , тому для цього середовища в якості розв'язування (2.10) береться функція Бесселя, тобто  $Z_m(\chi \rho) = J_m(\chi_1 \rho)$ , де  $\chi_1 = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$ . Поле в оболонці повинне загасати при  $\rho \rightarrow \infty$ , тому для другого середовища береться  $Z_m(\chi \rho) = K_m(\chi_2 \rho)$ , де  $K_m$  – функція Кельвіна при  $\chi_2 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}$ . Із цих умов випливає обмеження на величину постійної поширення  $\beta$ :

$$k_0 n_2 \leq \beta \leq k_0 n_1. \quad (2.22)$$

Підставлення (2.12), (2.13) і (2.19), (2.21) у граничні умови (2.5), (2.6) приводить до наступних співвідношень щодо постійних  $A_1$ ,  $B_1$  для поля в сердцевині і постійних  $A_2$ ,  $B_2$  для поля в оболонці:

$$A_2/A_1 = B_2/B_1 = J_m(\bar{\chi}_1)/K_m(\bar{\chi}_2), \quad (2.23)$$

$$\frac{A_1}{B_1} = \frac{-k_0 Z_0}{m\beta} \frac{\bar{\chi}_1^2 \bar{\chi}_2^2}{V^2} \left[ \frac{J'_m(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} + \frac{K'_m(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)} \right], \quad (2.24)$$

$$\frac{A_1}{B_1} = \frac{-m\beta Z_0}{k_0} \frac{V^2}{(\bar{\chi}_1^2 \bar{\chi}_2^2)} \left[ n_1^2 \frac{J'_m(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} + n_2^2 \frac{K'_m(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)} \right]^{-1}, \quad (2.25)$$

де  $\bar{\chi}_1 = a\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$ ,  $\bar{\chi}_2 = a\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}$  - нормовані поперечні хвильові числа серцевини і оболонки, відповідно;

$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  - хвильовий опір вакууму;

$V$  - характеристичний параметр хвилеводу (нормована частота)

$$V = \sqrt{\bar{\chi}_1^2 + \bar{\chi}_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.26)$$

Співвідношення (2.24), (2.25) визначають характеристичне (дисперсійне) рівняння розглянутого оптичного хвилеводу:

$$\left[ n_1^2 \frac{J'_m(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} + n_2^2 \frac{K'_m(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)} \right] \times \left[ \frac{J'_m(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} + \frac{K'_m(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)} \right] = m^2 \left( \frac{\beta}{k_0} \right)^2 \left[ \frac{V^2}{\bar{\chi}_1^2 \bar{\chi}_2^2} \right]^2. \quad (2.27)$$

Корінням  $\beta_q, (q=1,2,3...)$  характеристичного рівняння при заданому порядку циліндричних функцій ( $m=0,1,2,3...)$  відповідають постійні поширення мод (власних типів хвиль) в ОБ.

Постійні поширення мод повинні задовольняти умові (2.22). Нижня границя цієї умови,  $\chi_2 = 0$ , відповідає частоті відсічення моди. Поле мод з постійними поширення  $\beta$ , далекими від відсічення, щільно сконцентроване усередині серцевини і частково у вузькому шарі біля серцевини. Зі зменшенням  $\chi_2$  інтенсивність поля, що проникає із серцевини в оболонку, зростає. При  $\chi_2 = 0$  мода перестає поширюватись - поле виходить із хвилеводу.

Рівняння (2.27) при  $m=0$  розпадається на два рівняння, одне з них відповідає поперечно-магнітним модам типу  $E_{0q}$  ( $E_z \neq 0, H_z = 0$ ), інше – поперечно-електричним модам типу  $H_{0q}$  ( $E_z = 0, H_z \neq 0$ ). При  $m=1, 2, \dots$  ( $m > 0$ ) коріння (2.27) будуть відповідати гібридним модам типу  $EH_{mq}$  або  $HE_{mq}$  ( $E_z \neq 0, H_z \neq 0$ ), першим записується символ поля з більшою інтенсивністю.

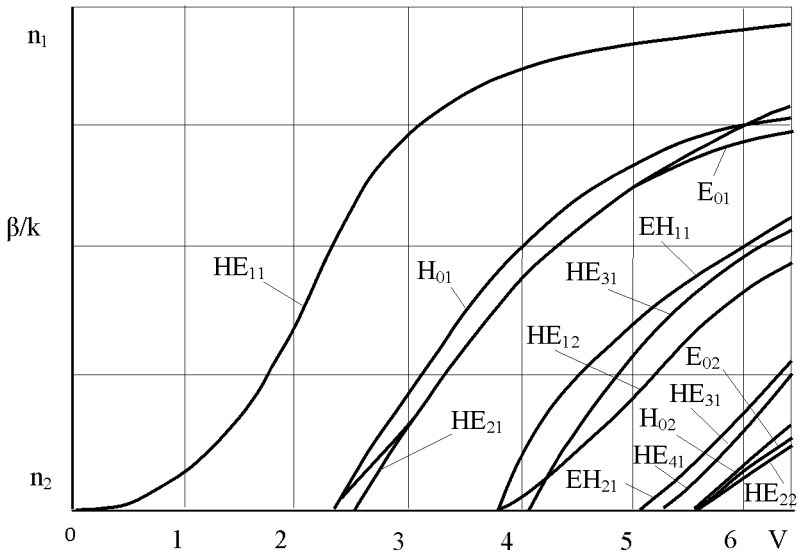


Рисунок 2.9 - Дисперсійні характеристики для мод нижчих порядків у ступінчастому ОВ

На рис. 2.9 наведені типові дисперсійні характеристики для декількох перших мод в ОВ залежно від характеристичного параметра  $V$ . Мода  $HE_{11}$  є основною модою ОВ, вона поширюється при будь-якій частоті і будь-яких параметрах структури волокна.

Основна мода  $HE_{11}$  асоціюється із променем світла, що поширюється строго уздовж осі хвилеводу. Моді поперечно-магнітні  $E_{0q}$  і поперечно-електричні  $H_{0q}$  формуються меридіональними променями. Косі промені формують в оптоволокну гібридні моди  $EH_{mq}$  і  $HE_{mq}$ .

### 2.2.2.2 Число мод в оптичному хвилеводі

В ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення, якщо забезпечена умова

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405, \quad (2.28)$$

то поширюється тільки основна мода  $HE_{11}$ , що відповідає одномодовому режиму роботи. При порушенні умови (2.28) буде мати місце багатомодовий режим роботи. У таблиці 2.1 наведені інтервали значень параметра  $V$  і перелік типів мод нижчого порядку, які поширюються в ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення.

Таблиця 2.1 – Перелік типів мод нижчого порядку, які поширюються у ступінчастому ОВ

Характеристичний параметр, $V$	Число мод, $N_{ст}$	Типи мод
0 - 2.405	1	$HE_{11}$
2.405 – 3. 832	4	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}$
3.832 – 4.136	7	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}$
4.136 – 4.52	9	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}$
4.52 – 6.38	12	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}$
6.38 – 7.02	14	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}$
7.02 – 7.59	17	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}, HE_{13}, EH_{12}, HE_{32}$
7.59 – 8.42	19	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}, HE_{13}, EH_{12}, HE_{32}, EH_{41}, HE_{61}$

Для великих значень характеристичного параметру  $V$  число мод  $N_{\text{ст}}$ , що поширюються у ступінчастому ОВ, можна оцінити по формулі [29, 30]:

$$N_{\text{ст}} \approx \frac{V^2}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (2.29)$$

З (2.29) випливає, що зменшення радіуса серцевини ОВ і різниці показників заломлення серцевини та оболонки веде до зменшення кількості типів мод, що поширюються.

У багатомодових волокнах поряд зі ступінчастим профілем знаходить застосування градієнтний профіль показника заломлення, який представлено на рис. 2.2,б.

Характер зміни профілю в загальному випадку описується нормалізованою функцією:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^q}, \quad (2.30)$$

де  $a$  — радіус серцевини;

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2.$$

Граничне значення  $q = \infty$  в (2.30) відповідає ступінчастому профілю, кінцеве значення  $q$  — градієнтному профілю.

Волокна із градієнтним профілем показника заломлення використовуються для зменшення числа мод, що поширюються, і, відповідно, для зменшення міжмодової дисперсії. У градієнтному волокні промені світла, завдяки безперервній зміні показника заломлення, поширюються по складним хвилеподібним траєкторіям, як показано на рис. 2.10.

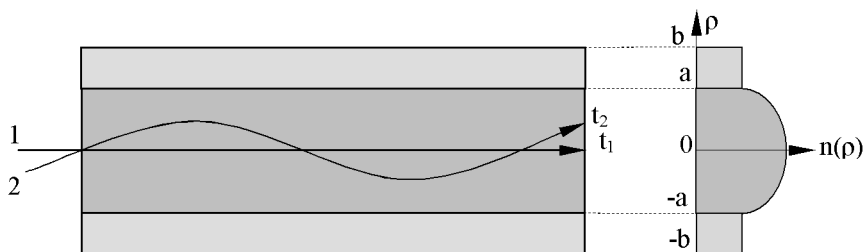


Рисунок 2.10 -- Траекторія руху променя в багатомодовому ОВ с градієнтним профілем показника заломлення

При цьому, по мірі видалення променів від осі волокна, їх шлях збільшується, але одночасно збільшується їхня швидкість через зменшення показника заломлення. У результаті тимчасові затримки променів різних мод вирівнюються. На рис. 2.10 час  $t_1$  проходження оптоволокна променем світла 1, що поширюється уздовж поздовжньої осі, буде приблизно рівним часу  $t_2$  для променя 2, що поширюється під кутом до поздовжньої осі ( $t_1 \approx t_2$ ). Число мод, що поширюються у градієнтному волокні, оцінюється формулою [29, 30]:

$$N_{\text{гр}} = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{q}{q+2} \quad (2.31)$$

Найбільший ефект досягається при параболічному профілі ( $q=2$ ), при якому число мод у два рази менше числа мод для ступінчастого профілю.

### 2.2.2.3 Моді слабо направляючого оптичного хвилеводу

Оптичні волокна з малою різницею показників заломлення серцевини і оболонки відносяться до класу слабо направляючих оптичних хвилеводів [23 - 25, 29, 30]. У таких волокнах мала, але відмінна від нуля різниця показників заломлення, забезпечує повне внутрішнє відбиття при поширенні світла. Але, оскільки середовище майже однорідне ( $n_1 \approx n_2$ ), то поздовжні компоненти мод слабо направляючого оптичного хвилеводу виявляються надзвичайно

малими в порівнянні з поперечними компонентами, тобто по своїй структурі моди стають близькими до ТЕМ-хвиль.

У наближенні слабкої спрямованості

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1 \quad (2.32)$$

характеристичне рівняння (2.26) суттєво спрощується, перетворюючись у лівій частині в повний квадрат. У результаті спрощене характеристичне рівняння для слабо направляючого оптичного волокна здобуває наступний вид:

$$\frac{J'_m(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} + \frac{K'_m(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)} = \pm \frac{mV^2}{\bar{\chi}_1^2 \bar{\chi}_2^2}. \quad (2.33)$$

Це рівняння, на підставі співвідношень для похідних від циліндричних функцій [31], може бути записане у вигляді наступних двох рівнянь:

$$\frac{J_{m-1}(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} = \frac{K_{m-1}(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)}, \quad (2.34)$$

$$\frac{J_{m+1}(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_m(\bar{\chi}_1)} = -\frac{K_{m+1}(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_m(\bar{\chi}_2)}. \quad (2.35)$$

Співвідношення (2.34) відповідає знаку мінус в (2.33) і є характеристичним рівнянням для HE-мод. Знаку плюс в (2.33) відповідає характеристичне рівняння (2.35) для EH-мод [23 – 25, 30]. Погрішність цих рівнянь не перевищує 1% для  $\Delta \leq 0,1$  та 10% для  $\Delta \leq 0,25$  [30].

У свою чергу співвідношення (2.24), (2.25) на підставі (2.33) спрощуються і здобувають наступний вид:

$$\frac{A_1}{B_1} = \pm \frac{k_0}{\beta} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \pm \frac{Z_0}{n}. \quad (2.36)$$

Тут знак плюс відповідає HE-модам, знак мінус – EH-модам;  $n = \beta/k_0 \approx n_1 \approx n_2$ .

Підставлення (2.34), (2.35) в (2.18) – (2.21) визначає групи  $HE_{m-1,q}$  і  $EH_{m+1,q}$  мод. Ці групи можна об'єднати і одержати розподіли у вигляді майже лінійно-поляризованих мод (LP-мод) зі структурою, близькою до TEM-хвилі [23 – 25, 29, 30].

Характеристичне рівняння для LP-мод, при підставленні  $p = m - 1$  в (2.34) для  $HE_{m-1,q}$ -мод і підставленні  $p = m + 1$  в (2.35) для  $EH_{m+1,q}$ -мод, здобуває наступний вид:

$$\frac{J_p(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_{p\pm 1}(\bar{\chi}_1)} = \pm \frac{K_p(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_{p\pm 1}(\bar{\chi}_2)}, \quad (2.37)$$

де знак плюс береться для HE-мод, а знак мінус - для EH-мод [23 - 25]. Моді  $LP_{01}$  з індексом  $p=0$  буде відповідати індекс  $m=1$  і, отже, основна мода  $HE_{11}$ . Аналогічно, модам  $LP_{0q}$  будуть еквівалентні моди  $HE_{1q}$ . Значенню  $p=1$  відповідають значення  $m=0$  і  $m=2$ , тому моді  $LP_{1q}$  еквівалентна суперпозиція мод  $HE_{2q}$  і  $H_{0q}$  або  $E_{0q}$ . Моді  $LP_{pq}$ , ( $p=2,3,\dots$ ) еквівалентні суперпозиції мод  $HE_{p-1,q}$  і  $EH_{p+1,q}$ .

Для основної  $LP_{01}$ -моди характеристичне рівняння (2.37) запишеться у вигляді:

$$\frac{J_0(\bar{\chi}_1)}{\bar{\chi}_1 J_1(\bar{\chi}_1)} = \frac{K_0(\bar{\chi}_2)}{\bar{\chi}_2 K_1(\bar{\chi}_2)}. \quad (2.38)$$

Складові полів  $LP_{pq}$ -мод визначаються шляхом підсумовування або вирахування поперечних складових  $HE_{m-1,q}$  і  $EH_{m+1,q}$ -мод. Результат цих комбінацій записується в декартовій системі координат, що наочно демонструє вид поляризації  $L_p$ -мод [23 – 25, 29, 30]. Вирахування  $HE_{m-1,q}$  і  $EH_{m+1,q}$ -мод дає наступні залежності для поперечних складових  $L_p$ -мод:

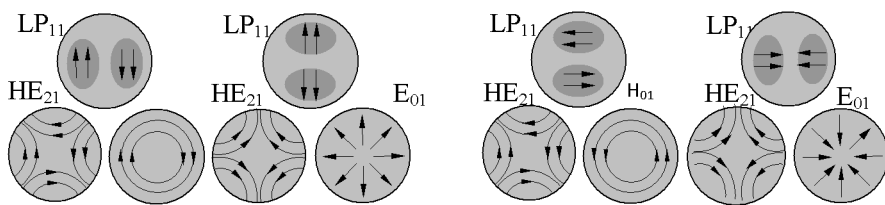
$$\dot{E}_x = -j2A\beta a \cos(p\varphi) \cdot \begin{cases} J_p(\bar{\chi}_1 \rho/a)/J_p(\bar{\chi}_1), \rho \leq a, \\ K_p(\bar{\chi}_2 \rho/a)/K_p(\bar{\chi}_2), \rho \geq a; \end{cases} \quad (2.39)$$

$$E_y = H_x = 0, \quad (2.40)$$

$$\dot{H}_y = -j2A\beta a n Z_0^{-1} \cos(p\varphi) \cdot \begin{cases} J_p(\bar{\chi}_1 \rho/a)/J_p(\bar{\chi}_1), \rho \leq a, \\ K_p(\bar{\chi}_2 \rho/a)/K_p(\bar{\chi}_2), \rho \geq a. \end{cases} \quad (2.41)$$

Складання  $HE_{m-1,q}$  і  $EH_{m+1,q}$ -мод визначає LP-моди з  $E_x = H_y = 0$  та з залежностями (2.39), (2.41) для  $E_y$  і  $H_x$ , у яких функція  $\cos(p\varphi)$  заміняється на  $\sin(p\varphi)$ .

Заміна у формулах для LP-мод функції  $\cos(m\varphi)$  на  $\sin(m\varphi)$  і, навпаки,  $\sin(m\varphi)$  на  $\cos(m\varphi)$ , приводить до повороту інтенсивності поля на кут  $\varphi = \pi/2p$  при незмінній площині поляризації. Отже, у загальному випадку LP-мода може бути представлена двома ортогональними поляризаціями, а кожна поляризація – двома різними розподілами інтенсивності поля. На рис. 2.11, як приклад, наведено чотири варіанти формування  $LP_{11}$ -моди.



а)

б)

Рисунок 2.11 – Розподіл поперечного електричного поля і інтенсивності чотирьох  $LP_{11}$ -мод шляхом суперпозиції  $HE_{21}$ ,  $H_{01}$  і  $E_{01}$ -мод: а – для вертикальної, б – для горизонтальної поляризації

У таблиці 2.2 наведені значення параметра відсічення  $V_c$  ( $V_c = \bar{\chi}_1$ , при  $\bar{\chi}_2 = 0$ ) і відповідність між LP-модю і E, H, HE, EH-модями нижчого порядку, що поширюються в ОБ зі ступінчастим профілем показника заломлення.

Таблиця 2.2 – Перелік типів LP-мод нижчого порядку, що поширюються у ступінчастому ОБ

Значення параметра відсічення, $V_c$	Типи LP-мод	Типи еквівалентних E, H, HE, EH-мод
0	LP <sub>01</sub>	HE <sub>11</sub>
2.405	LP <sub>11</sub>	H <sub>01</sub> , E <sub>01</sub> , HE <sub>21</sub>
3.832	LP <sub>02</sub> , LP <sub>21</sub>	HE <sub>12</sub> , EH <sub>11</sub> , HE <sub>31</sub>
4.136	LP <sub>31</sub>	EH <sub>21</sub> , HE <sub>41</sub>
4.520	LP <sub>12</sub>	H <sub>02</sub> , E <sub>02</sub> , HE <sub>22</sub>
6.380	LP <sub>41</sub>	EH <sub>31</sub> , HE <sub>51</sub>
7.016	LP <sub>03</sub> , LP <sub>22</sub>	HE <sub>13</sub> , EH <sub>12</sub> , HE <sub>32</sub>
7.588	LP <sub>51</sub>	EH <sub>41</sub> , HE <sub>61</sub>

На рис. 2.12 для декількох LP-мод нижчого порядку представлені розподіли в поперечному перерізі ОБ інтенсивності електричного поля.

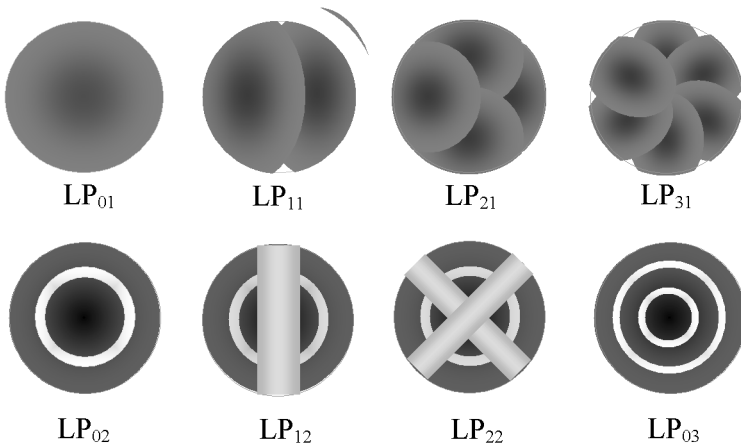


Рисунок 2.12 – Приклади розподілу інтенсивності поперечного електричного поля LP- мод, чорний колір відповідає максимальній інтенсивності

Слід зазначити, що когерентні джерела оптичного випромінювання генерують лінійно-поляризоване світло, тому при введенні світла в оптичне волокно в ньому спочатку збуджуються LP-моди. У процесі поширення світла по волокну LP<sub>pq</sub>-моди поступово розпадаються на HE<sub>p-1,q</sub> і EH<sub>p+1,q</sub>-моди завдяки існуючій невеликій відмінності у їхній фазовій швидкості. Потім по мірі поширення вони знову поєднуються в LP<sub>pq</sub>-моди в той момент, коли стають синфазними або протифазними. Ці перетворення відбуваються на всьому протязі оптичної лінії зв'язку [9, 24, 25].

#### 2.2.2.4 Діаметр модового поля одномодового оптоволокна

Енергія мод, що поширюються по ОВ, зосереджена як у серцевині, так і в тонкому прилягаючому до неї шарі. Для багатомодових ОВ, що мають досить товсту серцевину, товщиною цього шару зневажають, а розмір серцевини оцінюють діаметром ( $2a$ ). Для одномодового ОВ через малий розмір діаметра серцевини для оцінки розміру поперечного розподілу енергії основної моди вводиться діаметр модового поля  $D_{мп}$ . На рис. 2.13 наведена отримана експериментально залежність розподілу в поперечному перерізі одномодового ОВ потужності випромінювання основної хвилі.

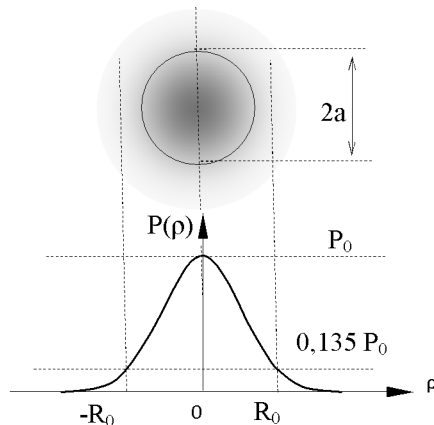


Рисунок 2.13 - Залежність розподілу потужності випромінювання основної моди одномодового ОВ

Дана залежність досить точно апроксимується функцією Гауса:

$$P(\rho) = P_0 \exp\left(-\frac{\rho}{R_0}\right)^2, \quad (2.42)$$

де  $P_0$ - потужність випромінювання на осі ОВ при  $r=0$ ;

$R_0$ -радіус модового поля, який визначається за рівнем  $1/e^2 = 0,135$  від  $P_0$ .

При відомих значеннях параметра  $V$  і радіуса  $a$  серцевини одномодового ОВ діаметр модового поля  $D_{\text{мп}}$  у мкм можна оцінити при  $1,2 < V < 2,4$  по формулі [4, 9]:

$$D_{\text{мп}} = 2a(0,65 + 1,619V^{-1,5} + 2,879V^{-6}). \quad (2.43)$$

Наприклад, при діаметрі оптичного сердечника  $2a = 10$  мкм і параметрі  $V = 2$ , діаметр модового поля  $D_{\text{мп}} = 12,67$  мкм.

З ростом параметра  $V$  росте частка потужності, яка переноситься в серцевині. Наприклад, для хвилі  $H_{11}$  при  $V=1$  частка потужності в серцевині становить близько 30%, інша потужність зосереджена в оболонці. При збільшенні  $V$  до значення 2,405 частка потужності в серцевині зростає приблизно до 84% [24, 29, 30].

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як визначається хвильове число середовища з врахуванням показника заломлення  $n$ ?
2. Якими функціями описується поле в серцевині і оболонці ОВ?
3. Як визначаються поперечні хвильові функції серцевини і оболонки ОВ?
4. Запишіть і поясніть умову, що обмежує величину постійної поширення  $\beta$ .
5. Запишіть і поясніть формулу для характеристичного параметра  $V$ .
6. Які типи мод можуть збуджуватися в ОВ?
7. Основна мода ОВ і її особливості.

8. Умови одномодового і багатомодового режимів в ОВ.
9. Умова слабкої спрямованості і основний тип моди та її властивості в слабо направляючим ОВ.
10. Дайте визначення модового поля одномодового ОВ.

## 2.3 ПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОВОЛОКНА

До основних передавальних характеристик ОВ відносяться рівень загасання світлової енергії та величина дисперсії хвиль світла. Загасання та дисперсії є основними причинами, що обмежують дальність і швидкість передачі оптичного сигналу по оптичному кабелю.

Передавальні характеристики оптоволоконна суттєво залежать від режиму його роботи – багатомодового або одномодового, профілю показника заломлення, чистоти кварцового скла та використовуваного робочого діапазону довжин хвиль.

### 2.3.1 Дисперсійні характеристики оптоволоконна

В оптичному зв'язку під дисперсією розуміється розширення імпульсів світла, що складають цифрові інформаційні потоки, які поширюються по оптоволоконку. Розширення імпульсів у потоці приводить до зміни їх форми та взаємному накладенню, що тягне появлення помилок при розпізнаванні прийнятого сигналу. Причиною дисперсії є розсіювання в часі спектральних і модових складових імпульсу світла по мірі поширення його по оптоволоконку.

Кількісну величину дисперсії визначають як квадратичну різницю тривалостей імпульсу на вході  $\tau_1$  і на виході  $\tau_2$  ОВ довжиною  $L$  [1 - 11]:

$$\tau = \sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2} \quad (2.44)$$

Тривалості імпульсів на вході і виході ОВ розраховують, як зазначено на рис. 2.14, по половині їх висоти. Результат нормується до одного кілометра і вимірюється в пікосекундах на км (пс·км) [1, 2].

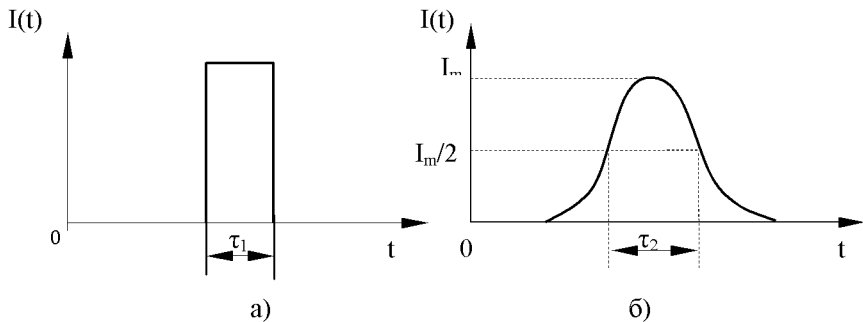


Рисунок 2.14 – Розширення імпульсу за рахунок дисперсії в ОВ:  
а – вхідний імпульс; б – вихідний імпульс

З величиною дисперсії пов'язана смуга пропускання  $\Delta F$  оптоволокна:  $\Delta F \approx 1/\tau$  [1, 2]. Смуга пропускання нормується до одного кілометра і вимірюється в мегагерцах на км (МГц·км).

Загальна дисперсія  $\tau$  містить у собі наступні складові:

- міжмодову дисперсію,  $\tau_{\text{mod}}$ ;
- хроматичну дисперсію,  $\tau_{\text{chr}}$ ;
- поляризаційно-модову дисперсію,  $\tau_{\text{pol}}$ .

Розрахунок загальної дисперсії здійснюється згідно формули [1 - 11]:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 + \tau_{\text{pol}}^2} . \quad (2.45)$$

Для багатомодових ОВ основний внесок у дисперсію вносить міжмодова дисперсія, для одномодових – хроматична.

### 2.3.1.1 Міжмодова дисперсія

Міжмодова дисперсія виникає в багатомодових ОВ за рахунок відмінності у швидкості поширення світлових променів різних мод, які досягають вихід в різний час, що приводить до розширення переданого імпульсу [1 - 11]. Моді утворюють групи променів, що перетинають поздовжню вісь з ОВ під кутом дотику  $\theta$ . Кожний промінь поширюється у середині серцевини ОВ зигзагоподібно з фазовою швидкістю  $v_{\phi} = c_0 / \sqrt{\epsilon_1} = c_0 / n_1$ ,  $c_0$  – швидкість світла у

вакуумі. Тоді, згідно з рис. 2.15, час, пройдений променем відстань  $L$  уздовж поздовжньої осі  $OB$ , буде рівний

$$t(\theta) = \frac{n_1}{\cos(\theta)} \frac{L}{c_0}. \quad (2.46)$$

Межі зміни кута  $\theta: 0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$ , де  $\theta_{\max} = 90^\circ - \alpha_0$ ,  $\alpha_0$  - критичне значення кута падіння. Звідси  $\cos(\theta_{\max}) = \sin(\alpha_0) = n_1 / n_2$ .

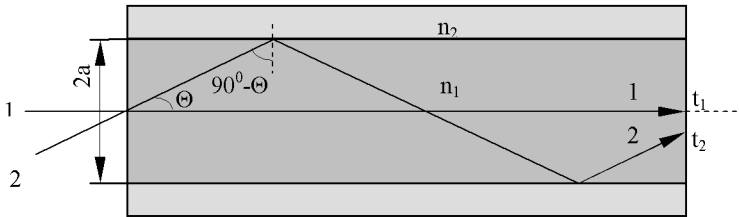


Рисунок 2.15 – Траєкторія поширення променя в  $OB$  зі ступінчатим профілем показника заломлення.

Таким чином, для оцінки модової дисперсії слід використовувати різницю між максимальним і мінімальним часом проходження променів відстані  $L$ :

$$\tau_{\text{mod}} = t(\theta_{\max}) - t(0) = \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_2} \frac{L}{c_0} = n_1 \delta_n \frac{L}{c_0}, \quad (2.47)$$

де  $\delta_n = (n_1 - n_2) / n_2$ .

Більш строгий аналіз приводить до наступних формул [5, 7 -9]:

$$\tau_{\text{mod}} = \begin{cases} n_1 \delta_n \frac{L}{c_0}, & L < L_c, \\ n_1 \delta_n \frac{\sqrt{L_c L}}{c_0}, & L \geq L_c. \end{cases} \quad (2.48)$$

де  $L_c$  – довжина міжмодового зв'язку, порядку – 5 - 10 км.

Формула (2.48) ураховує перерозподіл енергії між модами в процесі встановлення стаціонарного режиму, що настає при  $L > L_c$ .

Слід зазначити, що розширення імпульсів за рахунок модової дисперсії тим менші, чим менша різниця коефіцієнтів заломлення серцевини та оболонки ОВ.

У багатомодових ОВ зі ступінчатим профілем показники заломлення значення міжмодової дисперсії лежать у межах 20 – 50 нс/км.

### 2.3.1.2 Хроматична дисперсія

Хроматична дисперсія виникає через не монохроматичність джерел світла, оскільки ширина спектра  $\Delta\lambda$  випромінювання для світлодіода становить 15 – 80 нм, а для лазера - 0.1 – 4 нм. Хроматична дисперсія  $\tau_{chr}$  містить у собі матеріальну  $\tau_{mat}$  та хвильову дисперсії  $\tau_{wav}$  [1 - 11]:

$$\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_{wav}. \quad (2.49)$$

**Матеріальна дисперсія.** Матеріальна дисперсія обумовлена залежністю показника заломлення  $n(\lambda)$  матеріалу ОВ від довжини хвилі  $\lambda$  оптичного випромінювання. Ця залежність приводить до зміни групової швидкості пакета хвиль:

$$v_g = \frac{1}{\frac{d}{d\omega} \left[ \frac{\omega}{c_0} n_1(\lambda) \right]} = \frac{c_0}{n_1(\lambda) - \lambda \frac{dn_1(\lambda)}{d\lambda}}. \quad (2.50)$$

Якщо  $\Delta\lambda$  - ширина спектра випромінювання, то розширення імпульсу на відстані  $L$  за рахунок матеріальної дисперсії можна оцінити за формулою [1 - 11]:

$$\tau_{mat} = \left| \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{L}{v_{gp}} \right) \right| \Delta\lambda = \Delta\lambda L \left| \frac{\lambda}{c_0} \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d^2 \lambda} \right| = \Delta\lambda L M(\lambda), \quad (2.51)$$

де  $M(\lambda) = \frac{\lambda}{c_0} \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d^2 \lambda}$  - питома дисперсія матеріалу, пс/нм км.

Значення матеріальної дисперсії лежать у межах 1 – 4 нс/км.

**Хвильова дисперсія.** Хвильова дисперсія обумовлена впливом хвилеведучої структури ОВ на швидкість поширення мод. Оцінити величину хвилеведучої дисперсії можна по формулі [1, 2, 5, 7 - 11]

$$\tau_{\text{вол}} = \Delta\lambda L \frac{2n_1^2 \Delta}{c_0 \lambda} = \Delta\lambda L B(\lambda), \quad (2.52)$$

де  $B(\lambda)$  – питома хвильова дисперсія.

У загальному випадку для ОВ зі складним профілем показника заломлення коефіцієнт  $B(\lambda)$  визначається експериментально.

На рис. 2.16 наведені залежності питомих матеріальної  $M(\lambda)$  та хвильової  $B(\lambda)$  дисперсій від довжини хвилі для чистого кварцового скла.

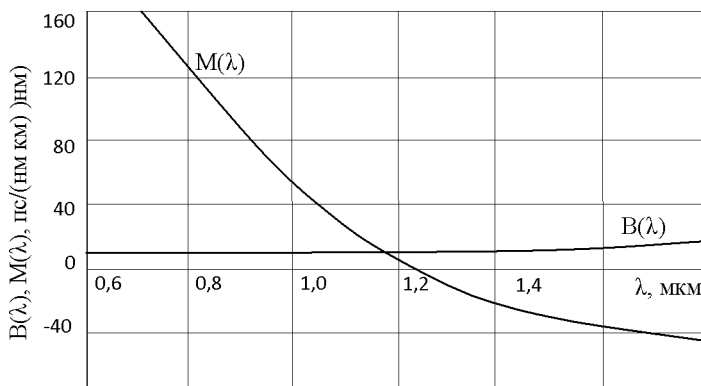


Рисунок 2.16 – Залежність питомих матеріальної  $M(\lambda)$  та хвильової  $B(\lambda)$  дисперсій від довжини хвилі для чистого кварцового скла.

Із залежностей коефіцієнтів  $M(\lambda)$  і  $B(\lambda)$  від довжини хвилі випливає, що коефіцієнт  $B(\lambda)$  завжди позитивний, а коефіцієнт  $M(\lambda)$

на довжині хвилі  $\lambda_{\text{омг}} = 1.276$  мкм, яка називається хвилею нульової матеріальної дисперсії, змінює знак. Коефіцієнт питомої хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  дорівнює сумі цих коефіцієнтів:  $D(\lambda) = M(\lambda) + B(\lambda)$ . Тому на довжині хвилі  $\lambda_0 = 1.310$  мкм, яка називається хвилею нульової повної дисперсії одномодового ОВ, хроматична дисперсія стає рівною нулю, завдяки взаємній компенсації коефіцієнтів  $M(\lambda)$  і  $B(\lambda)$ .

Введення добавок у кварцове скло дозволяє змінювати показник заломлення матеріалу ОВ і тим самим зміщати довжину хвилі нульової матеріальної дисперсії. Наприклад, введення фтору знижує показник заломлення чистого кварцу, а введення германія підвищує його. У свою чергу, зміна хвилеведучої структури ОВ, зокрема, профілю показника заломлення та розмірів оболонки, впливає на хвильову дисперсію.

### 2.3.1.3 Поляризаційна модова дисперсія

В оптоволокну вектор  $E$  напруженості електричного поля хвилі, що поширюється, може приймати завдяки круговій симетрії хвилеведучої структури будь-який напрямок у площині, перпендикулярній поздовжній осі. Тому в ОВ збуджуються і одночасно поширюються пари мод із взаємно ортогональними поляризаціями. В ідеальному ОВ моди з різними поляризаціями поширювались би з однаковою швидкістю. У реальному ОВ через погрішності при виготовленні та механічних напругах завжди має місце порушення кругової симетрії геометричних і фізичних характеристик волокна, що приводить до відмінності у швидкості ортогонально поляризованих мод. Фактори, що впливають на швидкість, носять випадковий характер. Усереднення статистичних даних дає наступну формулу для оцінки розширення імпульсів через поляризаційну дисперсію [5, 7-11]:

$$\tau_{\text{пол}} \approx D_{\text{PMD}} \sqrt{L}, \quad (2.53)$$

де  $D_{\text{PMD}}$  - коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії, типові значення якого  $0.1 - 1$  пс/ $\sqrt{\text{км}}$

### 2.3.2 Загасання сигналу в оптоволоконні

Загасання є основним, крім дисперсії, фактором, що обмежує дальність передачі сигналу по ОВ. Загасання характеризується експонентним ослабленням потужності сигналу при його поширенні уздовж волокна. Якщо  $P_{\text{вх}}$  – потужність сигналу на вході ОВ довжиною  $L$  у км, то потужність на виході

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{вх}} \exp(-\alpha L), \quad (2.54)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання волокна, що має розмірність 1/км.

Величину коефіцієнта загасання прийнято вимірювати в дБ/км за формулою:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \left( \frac{P_{\text{ввих}}}{P_{\text{вх}}} \right), \text{ дБ/км} \quad (2.55)$$

Зв'язок між коефіцієнтом загасання  $\alpha$  з розмірністю дБ/км і коефіцієнтом  $\alpha$  з розмірністю 1/км на підставі (2.54), (2.55) визначається співвідношенням:

$$\alpha_{\text{дБ/км}} = 10 \lg(e) \alpha_{1/\text{км}} \approx -4.343 \alpha_{1/\text{км}}. \quad (2.56)$$

Значення коефіцієнтів загасання ОВ звичайно представляють позитивними числами, опускаючи знак мінус. Наприклад, загасанню 0,2 дБ/км буде відповідати загасання 0,046 1/км.

#### 2.3.2.1 Власні і кабельні втрати

Загальне загасання визначається власними втратами  $\alpha_{\text{вл}}$  і кабельними втратами  $\alpha_{\text{каб}}$  [1 - 11]:

$$\alpha = \alpha_{\text{вл}} + \alpha_{\text{каб}}. \quad (2.57)$$

Власні втрати визначаються чистотою використовуваних матеріалів та досконалістю технології виробництва волокна і складаються із втрат розсіювання  $\alpha_{\text{роз}}$  і втрат поглинання  $\alpha_{\text{пог}}$ :

$$\alpha_{\text{вл}} = \alpha_{\text{роз}} + \alpha_{\text{пог}} \quad (2.58)$$

Кабельні втрати обумовлені деформацією ОВ при накладенні захисних оболонок у процесі виготовлення оптоволоконного кабелю. До них можуть додаватися втрати, що виникають через деформації при прокладці кабелю.

### 2.3.2.1.1 Втрати розсіювання

В оптоволокні переважають втрати на розсіювання Релея. Воно обумовлене мікроскопічними неоднорідностями, що виникають внаслідок випадкового характеру розподілу щільності розміщення молекул і атомів при формуванні матеріалу волокна. Світло, потрапляючи на такі неоднорідності, розсіюється в різних напрямках, при цьому частина його втрачається в оболонці. Сумарні втрати на релеєвське розсіювання залежать від довжини хвилі за законом  $\lambda^{-4}$  і кількісно можуть бути оцінені за формулою [1 - 11]:

$$\alpha_{\text{роз}} = \frac{k_{\text{роз}}}{\lambda^4}, \text{ дБ/км} \quad (2.59)$$

де  $k_{\text{роз}}$  – коефіцієнт розсіювання,  $\text{мкм}^4 \text{ дБ/км}$ ;

$\lambda$  – довжина хвилі,  $\text{мкм}$ .

Для кварцу  $k_{\text{роз}} \approx 07 - 0,9 \text{ мкм}^4 \text{ дБ/км}$ .

### 2.3.2.1.2 Втрати поглинання

Втрати через поглинання складаються із втрат поглинання в матеріалі  $\alpha_{\text{пм}}$  і втрат поглинання в домішках  $\alpha_{\text{пд}}$ :

$$\alpha_{\text{пог}} = \alpha_{\text{пм}} + \alpha_{\text{пд}} \quad (2.60)$$

Втрати поглинання обумовлені властивостями молекулярної структури речовини поглинати світло з перетворенням енергії світла в теплову енергію.

**Втрати поглинання в матеріалі.** Втрати поглинання в матеріалі визначаються властивостями чистого матеріалу. Наприклад, для кварцу в області довжин хвиль більш 1,7 – 1,8 мкм починають проявлятися втрати через інфрачервоне поглинання, що викликано резонансами атомів у кристалічних ґратах  $\text{SiO}_2$ . Величина загасання при інфрачервоному поглинанні може бути оцінена за формулою [2 - 11]:

$$\alpha_{\text{інч}} = C_{\text{інч}} \exp\left(-\frac{k_{\text{інч}}}{\lambda}\right), \quad (2.61)$$

де  $C_{\text{інч}}$ ,  $k_{\text{інч}}$  – константи.

Для чистого кварцу  $C_{\text{інч}} \approx 0,9$  дБ/км,  $k_{\text{інч}} \approx 0,8$  мкм.

В області малих довжин хвиль проявляються втрати через ультрафіолетове поглинання, викликаного резонансами, пов'язаними з електронними структурами атомів кристалічних ґрат.

**Втрати поглинання в домішках.** Втрати поглинання в домішках  $\alpha_{\text{пд}}$  обумовлені наявністю домішок, серед яких найбільший внесок у втрати вносять іони гідроксильної групи (ОН-), які резонуючи, створюють піки поглинання. У міру вдосконалювання технології виробництва чистих матеріалів втрати на поглинання в домішках поступово знижуються.

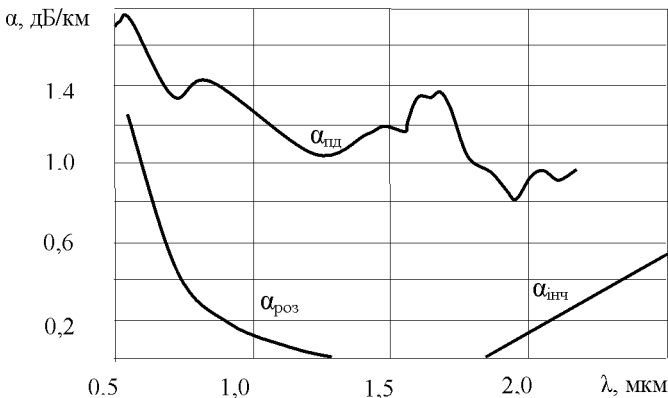


Рисунок 2.17 – Залежності коефіцієнтів загасання від довжини хвилі:  $\alpha_{\text{роз}}$  - втрати на розсіювання Релея,  $\alpha_{\text{інч}}$  - втрати при інфрачервоному поглинанні,  $\alpha_{\text{пд}}$  - втрати поглинання в домішках

Фундаментальною причиною, що обмежує рівень загасання в області коротких довжин хвиль є розсіювання Релея, а в області довгих хвиль – інфрачервоне поглинання. На рис. 2.17 наведені залежності коефіцієнтів загасання від довжини хвилі для кварцового волокна [1, 2].

Як впливає з рисунка, релеевське розсіювання і інфрачервоне поглинання визначають діапазон хвиль (0,8-1,6 мкм), у якому розташовані вікна прозорості кварцових оптичних волокон.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як визначається  $\alpha$  і у яких одиницях виражається дисперсія в ОВ?
2. Як визначається загальна дисперсія?
3. Причини виникнення міжмодової дисперсії.
4. Причини виникнення хроматичної дисперсії і її складові.
5. Причини виникнення поляризаційної модової дисперсії.
6. Як вимірюється загасання?
7. Причини виникнення власних і кабельних втрат.
8. Причини виникнення втрат розсіювання.
9. Причини виникнення втрат поглинання і їх складові.

### 2.4 НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В ОПТОВОЛОКНІ

Нелінійні явища в оптичному волокні виникають при великій потужності оптичного сигналу в оптоволоконі. Величину оптичної потужності  $P$  прийнято визначати за формулою

$$P = 10 \lg(P/P_0) \text{ дБм} \quad (2.62)$$

відносно потужності  $P_0$  в 1 мВт (одиниця виміру дБм).

Починають проявлятися нелінійні явища при потужності оптичного сигналу в 8-10 мВт (9 - 10 дБм) [14].

Найбільший вплив на оптичний сигнал здійснюють нелінійні явища, пов'язані з нелінійною залежністю показника заломлення

оптоволоконна від величини оптичної потужності (ефект Керра), а також нелінійні явища, які обумовлені вимушеним розсіюванням світла в оптоволоконні [3, 4, 32 - 34].

#### 2.4.1 Ефекти внаслідок нелінійності показника заломлення

Вплив інтенсивності світла на показник заломлення може бути представлений наступною залежністю [4, 32 - 34]:

$$n = n_l + n_n \frac{P}{A_e}, \quad (2.63)$$

де  $n_l$  – лінійна,  $n_n$  – нелінійна складові показника заломлення;

$P/A_e$  – інтенсивність світла;

$P$  – оптична потужність у Вт;

$A_e$  – ефективна площа серцевини оптоволоконна в  $m^2$ .

Для кварцу з показником заломлення  $n_l \approx 1,47$ , величина нелінійної складової  $n_n \approx (2,2 - 3,4)10^{-20} m^2/Вт$  [4].

Основні нелінійні явища внаслідок нелінійності показника заломлення містять у собі: фазову самомодуляцію ФСМ (*Self-Phase Modulation - SPM*), перехресну фазову модуляцію ПФМ (*Cross-Phase Modulation - XPM*), чотирьоххвильове змішування ЧХЗ (*Four Wave Mixing - FWM*).

##### 2.4.1.1 Фазова самомодуляція

Фазова самомодуляція (ФСМ) обумовлена залежністю фази оптичного сигналу від рівня його потужності. Фаза сигналу з несучою частотою  $\omega_0$  після проходження відстані  $L$  визначиться наступним вираженням:

$$\varphi = \omega_0 (t - Ln_l/c_0) + \varphi_{SPM}, \quad (2.64)$$

де  $\varphi_{\text{SPM}} = -\frac{2\pi n_{\text{н}}}{\lambda} L \cdot I$  - додатковий набіг фази, викликаний фазовою самомодуляцією,  $I = P/A_e$  - інтенсивність світлового потоку.

Інтенсивність імпульсу світла, що поширюється по волокну, є функцією часу. На передньому фронті імпульсу інтенсивність мінімальна, на задньому фронті максимальна. Відповідно до зміни інтенсивності в межах імпульсу буде мінятися фаза  $\varphi_{\text{SPM}}$ , що у свою чергу викличе зміну частоти на величину

$$\Delta\omega = \frac{d\varphi_{\text{SPM}}}{dt} = -\frac{2\pi n_{\text{н}} L}{\lambda} \frac{dI}{dt}. \quad (2.65)$$

Наприклад, при поширенні по волокну оптичного імпульсу гаусової форми з інтенсивністю

$$I(t) = I_0 e^{-(t/\tau)^2} \quad (2.66)$$

додаткове частотне зрушення буде визначатися наступним вираженням:

$$\Delta\omega = \Delta\omega_0 \frac{t}{\tau} e^{-(t/\tau)^2}, \quad (2.67)$$

де  $\Delta\omega_0 = \frac{4\pi n_{\text{н}}}{\lambda \tau} L I_0$  - частотне зрушення для центру імпульсу,  $I_0$  - інтенсивність у центрі імпульсу із тривалістю  $2\tau$ .

На рис. 2.18 для випадку  $n_{\text{н}} > 0$  представлені залежності від часу для імпульсу гаусової форми та для миттєвої частоти в системі координат, що рухається разом з імпульсом.

Залежності на рис. 2.18 ілюструють збільшення миттєвого значення частоти відносно  $\omega_0$  на задньому фронті імпульсу (синій зсув) і зменшення частоти на передньому фронті імпульсу (червоний зсув). У міру поширення імпульсу по оптоволокну відбувається безперервна генерація нових частот, що веде до симетричного розширення спектра. Характер зміни частотного зрушення і ступінь спектрального розширення залежить від форми імпульсу.

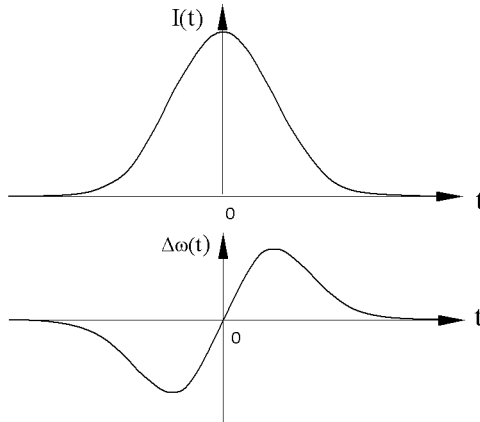


Рисунок 2.18 – Зрушення частоти при зміні інтенсивності імпульсу, викликаний ефектом фазової самомодуляції

Ефект фазової самомодуляції зменшується при нульовій або невеликій позитивній дисперсії, збільшенні ефективної площі серцевини оптоволокна, зменшенні нелінійності показника заломлення.

#### 2.4.1.2 Перехресна фазова модуляція

Ефект перехресної фазової модуляції (ПФМ) спостерігається в оптоволокні при хвильовому мультиплексуванні (WDM) каналів передачі. Причиною виникнення ПФМ, як і фазової самомодуляції, є нелінійність залежності показника заломлення від інтенсивності оптичних імпульсів, що поширюються по каналах. У процесі їх взаємодії зрушення несучої частоти імпульсу в кожному з каналів буде викликаний зміною фази за рахунок спільного впливу ефектів самомодуляції та перехресної модуляції.

У відмінності від самомодуляції перехресна модуляція викликає асиметричне спектральне розширення імпульсів, що спільно поширюються. Ефект ПФМ підсилюється з ростом числа хвильових каналів в оптоволокні. Заходу щодо зниження ефекту ПФМ аналогічні заходам, застосовуваним при фазовій самомодуляції.

**Чотирьоххвильове змішання.** Ефект чотирьоххвильового змішання (ЧХЗ) виникає в оптоволокні при хвильовому

мультиплексуванні каналів передачі. Внаслідок нелінійності показника заломлення відбувається взаємодія хвиль, що поширюються по каналах, результатом якого є генерація нових хвиль на частотах, що представляють собою комбінації частот взаємодіючих хвиль. Частоти нових хвиль можуть виявитися близькими і навіть співпадаючими із частотами взаємодіючих хвиль. Наприклад, при взаємодії двох хвиль із частотами  $f_1$  і  $f_2$  з'являються хвилі з комбінаційними частотами  $2f_1 - f_2$  і  $2f_2 - f_1$ . При взаємодії трьох хвиль із частотами  $f_1, f_2, f_3$  з'являються дев'ять хвиль із частотами у вигляді комбінацій  $2f_i - f_k$  та  $f_i + f - f_j$ . Зі збільшенням в оптоволокну числа каналів  $N$  число комбінаційних частот  $n_{кч}$ , близьких до частот хвильових каналів, швидко росте і визначається співвідношенням [4, 32 - 34]:

$$n_{кч} = N^2(N - 1) / 2. \quad (2.68)$$

Наприклад, у чотирьохканальній WDM – системі виникає 24 нові хвилі, а в 16-канальній системі - 1920 нових хвиль.

Нові хвилі, що з'являються внаслідок ефекту ЧХЗ, потрапляючи в робочі смуги каналів, викликають перехресні перешкоди, відбір потужності в корисних сигналів і їх деградацію.

Ефект ЧХЗ може бути ослаблений при нерівномірному розносі каналів по довжині хвилі, збільшенні міжканального інтервалу і використанні оптоволокон з ненульовою хроматичною дисперсією. Завдяки хроматичній дисперсії корисні хвилі в каналах поширюються з різною швидкістю, тим самим порушується погодженість їх фаз, що веде до зменшення їх взаємодії.

#### 2.4.2 Нелінійні ефекти внаслідок вимушеного розсіювання хвиль

Нелінійні явища в оптоволокну, які викликані ефектами розсіювання світлової хвилі, пов'язані зі вимушеним розсіюванням Мандельштама - Бріллюена (*Stimulated Brillouin Scattering - SBS*) і вимушеним раманівським розсіюванням (*Stimulated Raman Scattering - SRS*).

### 2.4.2.1 Вимушене розсіювання Манделъштама – Бріллюена

Вимушене розсіювання світла Манделъштама - Бріллюена (ВРМБ) виникає в оптоволокну в результаті нелінійної взаємодії падаючої хвилі світла з акустичною хвилею, порушеної світлом за рахунок ефекту електрострикції. При взаємодії фотона світла з акустичною хвилею виникає стоксове розсіювання, що проявляється у виникненні нового акустичного фонона при одночасному зменшенні частоти світлової хвилі внаслідок зменшення її енергії. З умови збереження енергії і імпульсу випливають наступні співвідношення [32]:

$$\left. \begin{aligned} \omega_A &= \omega_P - \omega_S, \\ \mathbf{k}_A &= \mathbf{k}_P - \mathbf{k}_S, \end{aligned} \right\}, \quad (2.69)$$

де  $\omega_A$  - частота акустичної хвилі;

$\omega_P$  - частота падаючої хвилі світла;

$\omega_S$  - частота розсіюваної (стоксової) хвилі;

$\mathbf{k}_A, \mathbf{k}_P, \mathbf{k}_S$  - хвильові вектори, відповідні до перерахованих хвиль.

Якщо не враховувати спонтанне теплове розсіювання Манделъштама - Бріллюена, то частота  $\omega_A$  акустичної хвилі буде задовольняти дисперсійному рівнянню [32]:

$$\omega_A = |\mathbf{k}_A| v_A = 2v_A |\mathbf{k}_P| \sin(\theta/2), \quad (2.70)$$

де  $\theta$  - кут між напрямками поширення падаючої та стоксової хвиль;

$v_A$  - швидкість акустичного фонона.

Зміщення частоти  $f_{\text{ВРМБ}} = f_P - f_A$  за рахунок ефекту ВРМБ залежить від кута розсіювання  $\theta$ . В оптоволокну воно максимальне для зворотного напрямку ( $\theta = \pi$ ) і характеризується співвідношенням [32]:

$$f_{\text{ВРМБ}} = \omega_A / 2\pi = 2nv_A / \lambda_P, \quad (2.71)$$

де  $n$  - показник заломлення серцевини волокна;

$\lambda_P = 2\pi n / |\mathbf{k}_P|$  - довжина падаючої хвилі.

Наприклад, для  $\lambda_p = 1550$  нм при швидкості акустичної хвилі у кварцовому ОВ з  $n=1,45$ , рівній  $v_A \approx 5,96$  мм/мкс, частотне зміщення становить  $f_{\text{ВРМБ}} \approx 11,1$  ГГц, тобто близько 0,1 нм.

Ефект ВРМБ виникає при певному рівні оптичної потужності, іменованим порогом ВРМБ, при якому розсіювання починає перевершувати загасання світла в оптоволокну, що викликає лавиноподібне наростання інтенсивності стоксового випромінювання і швидке зменшення інтенсивності падаючого випромінювання. При потужностях, менших граничного рівня, взаємодія світла з оптичним середовищем прямо пропорційно потужності світла. Типове значення порога ВРМБ для лінії довжиною в 10 км становить 6...10 дБм. Ширина смуги випромінювання ВРМБ вузька – не перевищує 60 МГц. Крім ефекту зниження корисної потужності виникає нестабільність сигналу, при якій поширюється та росте рівень шуму.

Один з розповсюджених простих способів підвищення граничного рівня ВРМБ полягає в модуляції випромінювання лазера низькочастотним тональним сигналом, що веде до розширення спектра сигналу за рахунок появи двох спектральних смуг, енергетичний рівень яких буде нижче порогу ВРМБ.

#### 2.4.2.2 Вимушене раманівське розсіювання

Вимушене раманівське розсіювання (ВРР) виникає при взаємодії падаючої хвилі світла великої інтенсивності з молекулами матеріалу оптоволокну. У результаті взаємодії фотон падаючої хвилі може передати частину своєї енергії молекулярному коливанню мікрочастинок волокна (оптичному фонону), що викличе зниження частоти фотона (стоксове розсіювання), або навпаки частина енергії оптичного фонуна може передатися фотону світла зі збільшенням його частоти (антистоксове розсіювання). Спектри стоксового і антистоксового випромінювання широкі, близько 7 ТГц, і зміщені симетрично на величину порядку 10 - 13 ТГц відносно частоти падаючої хвилі. Інтенсивність антистоксового випромінювання на кілька порядків менше інтенсивності стоксового випромінювання. Поріг виникнення ВРР набагато вище порога ВРМБ і лежить у межах 0,6 – 1,0 Вт.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як прийнято визначати величину оптичної потужності і у яких одиницях?
2. Поясніть явище виникнення фазової самомодуляції?
3. Поясніть явище виникнення перехресної фазової модуляції.
4. Поясніть причину виникнення змушеного розсіювання світла Мандельштама – Бріллюена.
5. Поясніть причину виникнення змушеного раманівського розсіювання

### 2.5 ОСНОВНІ ТИПИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОВОЛОКОН ДЛЯ ВОСП

Характеристики оптичних волокон прийнято ділити на наступні основні групи: передатні, геометричні і механічні [35 – 41].

Передатні характеристики визначають властивості оптоволоконна як каналу передачі оптичного сигналу. Геометричні характеристики визначають розміри і допуски на відхилення розмірів елементів конструкції оптоволоконна. Механічні характеристики відображають стійкість оптоволоконна до різних механічних впливів, а також до впливу температури.

Основні типи і характеристики оптоволокон, що застосовуються у лініях зв'язку, регламентуються стандартами Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC) серії IEC 60793-1 і Рекомендаціями Сектору Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU-T) серії G.65x. До таких документів зокрема відноситься сім Рекомендацій ITU-T, перерахованих у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Рекомендації Сектору Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU-T)

Рекомендація ITU-T	Тип оптичних волокон
G.651.1	багатомодові волокна 50/125 мкм із градієнтним профілем показника заломлення
G.652	одномодові волокна з незміщеною дисперсією (SF волокна) з довжиною хвилі нульової

	дисперсії і довжиною хвилі відсічення в районі 1310 нм
G.653	одномодові волокна зі зміщеною дисперсією (DSF волокна) з довжиною хвилі нульової дисперсії в районі 1550 нм і довжиною хвилі відсічення в районі 1310 нм.
G.654	одномодові волокна з незміщеною дисперсією (SF волокна) з довжиною хвилі нульової дисперсії в районі 1310 нм і довжиною хвилі відсічення в районі 1550 нм
G.655	волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією (NZDSF волокна), що володіють малою дисперсією в діапазоні довжин хвиль 1530..1565 нм
G.656	одномодові волокна з ненульовою дисперсією для ширококутових транспортних мереж
G.657	одномодові волокна, малочутливі до втрат на макровигинах

### 2.5.1 Характеристики багатомодових оптичних волокон

У діючих стандартах регламентовано характеристики багатомодових волокон із градієнтним профілем показника заломлення. Стандарт ІЕС 60793-2-10 поширюється на багатомодове волокно з діаметрами серцевини 60 мкм і оболонки 125 мкм. Рекомендації ІТУ-Т G.651.1 - на багатомодове волокно з діаметрами серцевини 50 мкм і оболонки 125 мкм [35]. На рис.2.19 наведені залежності коефіцієнта загасання для стандартних багатомодових градієнтних волокон, а в таблиці 2.4 представлені вимоги і рекомендації на їхні основні характеристики.

Цей тип волокна застосовується в оптичних мережах доступу, включаючи технологію FTTH. Забезпечує підтримку систем передачі SDH рівнів STM-16 (2,5 Гбіт/с), STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с). На швидкості 40 Гбіт/с дальність передачі до 150 метрів.

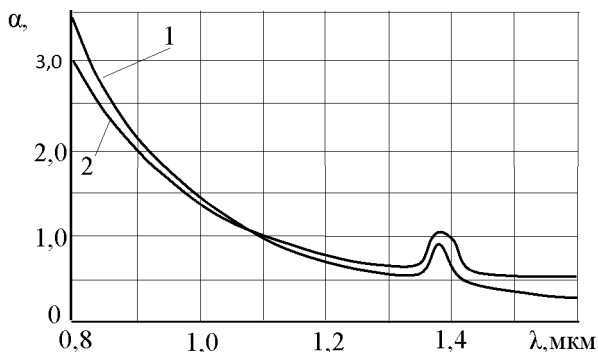


Рисунок 2.19 – Типові залежності коефіцієнта загасання для багатомодового градієнтного волокна: крива 1 - серцевина діаметром 60 мкм (вимога ІЕС 60793-2-10); крива 2 – серцевина діаметром 50 мкм (рекомендація ІТУ-Т G.651.1)

Таблиця 2.4 - Основні характеристики бвгатомодових градієнтних волокон.

Характеристики		Вимоги ІЕС 60793-2-10		Рекомендації ІТУ-Т G.651.1	
		ОМ-1	ОМ-2	ОМ-3	ОМ-4
Клас волокна		ОМ-1	ОМ-2	ОМ-3	ОМ-4
Робочі довжини хвиль, нм		850 1300	850 1300	850 1300	850 1300
Коефіцієнт загасання на опорній довжині хвилі, дБ/км, не більш	850нм	3,0	2,4	-	-
	1300нм	0,7	0,7	0,7	0,7
Смуга пропускання, МГц	850нм	200	400	400	400
	1300нм	600	1000	2000	2500
Діаметр серцевини, мкм		62,5±3,0	50±2,5	50±2,5	50±2,5

Діаметр оболонки, мкм	125,0±2,0	125,0 ±1,0	125,0 ±1,0	125,0 ±1,0
Погрішність концентричності серцевини і оболонки, мкм	3,0	3,0	3,0	3,0
Погрішність концентричності серцевини і оболонки, мкм	0,275±0,015	0,200 ±0,015	0,200 ±0,015	0,200 ±0,015

### 2.5.2 Характеристики одномодових оптичних волокон

У таблиці 2.5 представлені виписки з рекомендацій ІТУ-Т на одномодові волокна [36 - 41].

Таблиця 2.5 - Основні характеристики одномодових волокон.

Характеристик и	Тип волокна						
	G652. A	G653. A	G654. A	G655. A	G656	G657.A 1	
Діаметр модової плями, мкм	8,6- 9,0 ±0,6	7,8- 8,5 ±0,8	9,5- 10,5 ± 0,7	8,0- 11,0 ±0,7	7-11 ± 0,7	8,6-9,5 ±0,4	
Довжина хвилі, НП.	1310	1550	1550	1550	1550	1310	
Коефіцієнт хроматичної дисперсії пс/(нм×км), не більш, в інтервалі довжин хвиль, нм							
ДОВЖИНА ХВИЛЬ	1285- 1330	3,5				3,5	
	1525- 1575	18	3,5	20	0,1- 0,6	18	
Довжина хвилі відсічення кабелю, нм	1260	1270	1530	1450	1450	1260	
Коефіцієнт загасання, дБ/км, на довжині хвилі, нм							
ДОВЖИНА ХВИЛЬ	1310	0,5				0,4	
	1385					0,4	
	1460				0,4	0,4	
	1550	0,4	0,35	0,22	0,35	0,35	0,3
	1625				0,4	0,4	0,4

Коефіцієнт PMD, пс/нм×км		0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2
Максимальні втрати на макровигині, дБ, на довжині хвилі, нм							
радіус, мм		30	30	30	30	30	15
кількість витків		100	100	100	100	100	10
ДОВЖИНА ХВИЛІ	1550	0,1	0,5				0,25
	1625			0,5		0,5	1,0
Діаметр оболонки, мкм		125,0 ±1	125,0 ±1	125,0±1	125,0±1	125,0±1	125,0±1
Максимальний ексцентриситет серцевини, мкм		0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5
Максимальна сплюсненість оболонки, %		1	1	2	2	2	1
Максимальна перевірна напруга на розрив, ГПа		0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69

### 2.5.2.1 Волокна G.652

Волокна G.652 оптимізовані для діапазону довжин хвиль 1310 нм, в якому волокно має нульову хроматичну дисперсію. Підрозділяються на класи G.652.A, G.652.B, G.652.C, які відрізняються по параметрах і призначенню.

Коефіцієнт хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  волокон в області 1310 нм лежить у межах:

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right], \quad (2.72)$$

де  $\lambda_{0\min} = 1300$  нм,  $\lambda_{0\max} = 1324$  нм,  $S_{0\max} = 0,092$  пс/нм<sup>2</sup>×км.

Для області 1550 нм рекомендується формула

$$D(\lambda) = D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550) \quad (2.73)$$

з параметрами:  $D_{1550} = 17$  пс/нм× км,  $S_{1550} = 0,056$  пс/нм<sup>2</sup>×км.

На рис. 2.20 представлені типові залежності коефіцієнтів загасання  $\alpha(\lambda)$  і хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  від довжини хвилі для волокон G.652.

Пунктирною лінією на рис. 2.20 позначене загасання для волокна G.652.C і G.652.D з подавленим водним піком на довжині хвилі 1383 нм

Волокна G.652 знаходять широке застосування на мережах різного призначення через свою технологічність, невисоку вартість, придатність для роботи у всіх діапазонах довжин хвиль із можливістю використання технологій WDM при обмеженому числі несучих. Забезпечують підтримку систем передачі SDH рівнів STM-16 (2,5 Гбіт/с), STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с).

Волокно G.652.A представлено в таблиці 2.5 На швидкості 10 Гбіт/с забезпечує дальність передачі близько 40 км.

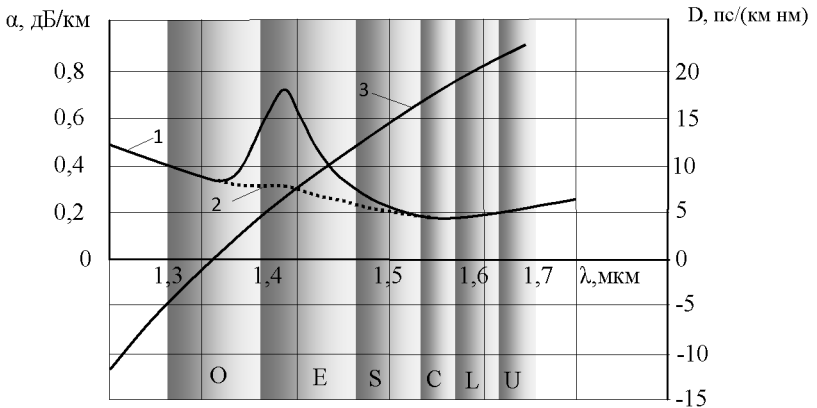


Рисунок 2.20 - Типові залежності коефіцієнтів загасання і хроматичної дисперсії від довжини хвилі для волокон G.652: крива 1 – залежність для коефіцієнта загасання; 2 - область загасання з подавленим водним піком; 3 – залежність для хроматичної дисперсії

Волокно G.652.B аналогічно за своїми характеристиками і призначенню волокну G.652.A, але має менший коефіцієнт хроматичної дисперсії (0,4 пс/нм×км на 1310 нм, 0,35 пс/нм×км на 1550 нм) і менший коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (не більше 0,2 пс/√км), забезпечуючи більш високу дальність передачі.

Волокна G.652.C і G.652.D мають подавлений водний пік на довжині хвилі 1383 нм, забезпечуючи передачу інформаційних потоків у розширеному діапазоні довжин хвиль 1360-1530 нм. За величиною коефіцієнтів загасання і поляризаційної дисперсії волокно G.652.C аналогічно волокну G.652.A, а волокно G.652.D - волокну G.652.B. Знаходять широке застосування в технології CWDM.

### 2.5.2.2 Волокна G.653

Волокна G.653 мають нульову дисперсію, зміщену в область 1550 нм, де має місце мінімальне загасання (не більш 0,35 дБ/км). Підрозділяються на класи G.653.A і G.653.B.

Застосовуються в протяжних лініях зв'язку разом з ербієвими волоконно-оптичними підсилювачами. Можливе використання WDM-технології з обмеженим числом оптичних несучих. Рекомендується для підтримки SDH- технологій рівня STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с). На швидкості 40 Гбіт/с забезпечує дальність передачі до 400 км.

Волокно G.653.A представлено в таблиці 2.5. Волокно G.653.B відрізняється від G.653.A зменшеним коефіцієнтом поляризаційної модової дисперсії (не більш 0,2 пс/√км).

Для хроматичної дисперсії волокна G.653.B використовуються двосторонні обмеження:

$$D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda), \quad (2.74)$$

$$\text{де } D_{\min}(\lambda) = \begin{cases} 0,085(\lambda - 1525) - 3,5 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1525 \text{ нм,} \\ \frac{3,5}{75}(\lambda - 1600) & \text{для } 1525 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм,} \end{cases}$$

$$D_{\max}(\lambda) = \begin{cases} \frac{3,5}{75}(\lambda - 1500) & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1575 \text{ нм,} \\ 0,085(\lambda - 1575) + 3,5 & \text{для } 1575 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм.} \end{cases}$$

На рис. 2.21 представлені типові залежності коефіцієнтів загасання  $\alpha(\lambda)$  і хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  від довжини хвилі для волокон G.653.

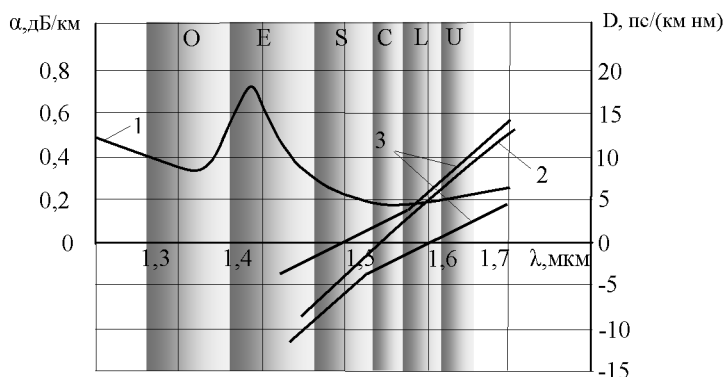


Рисунок 2.21 - Типові залежності коефіцієнта загасання і хроматичної дисперсії від довжини хвилі для волокон G.653: крива 1 – залежність для коефіцієнта загасання; 2 – залежність для хроматичної дисперсії волокна G.653A; 3 – границі припустимої області для хроматичної дисперсії волокна G.653B

### 2.5.2.3 Волокна G.654

Волокна G.654 мають зміщену в область 1530 нм довжину хвилі відсічення. Завдяки цьому забезпечується електродинамічний режим роботи, при якому більша частина оптичної енергії зосереджується в серцевині, виготовленій для зменшення втрат з надчистого кварцу. В області 1550 нм коефіцієнт загасання волокон не більш 0,22 дБ/км. У волокон збільшений поперечний переріз серцевини, що дозволило передавати більш високі рівні оптичної потужності, однак це привело до росту хроматичної дисперсії до 20-22 пс/нм×км. Застосовуються волокна G.654 для прокладки морських і

океанських підводних ліній зв'язку. Мале загасання дозволяє збільшити довжину безрегенерацийних ділянок. Можливе використання WDM-технологій і оптичних підсилювачів. Підрозділяються на класи G.654.A, G.654.B, G.654.C.

Для визначення коефіцієнта хроматичної дисперсії волокон в області 1550 нм рекомендується формула (2.73) з параметрами:  $S_{1550} = 0,070$  пс/нм<sup>2</sup>×км при  $D_{1550} = 20$  для волокон G.654.A, G.654.C і при  $D_{1550} = 22$  пс/нм×км для волокна G.654.B.

Волокно G.654.A представлено в табл. 2.5. Підтримує SDH-технології рівня STM-16 (2,5 Гбіт/с) і STM-64 (10 Гбіт/с) з обмеженням по дальності через дисперсію. Можливе застосування в системах з WDM у діапазонах C та L.

Волокно G.654.B по більшості параметрів і області застосування аналогічно волокну G.654.A, але має більший діаметр модової плями (9,5-13,0 ±0,7 мкм на довжині хвилі 1310 нм) і менше значення поляризаційної модової дисперсії (не більш 0,2 пс/√км). Дозволяє при збільшеному рівні оптичної потужності передавати потоки STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с) на більші відстані за умови компенсації хроматичної дисперсії.

Волокно G.654.C аналогічно волокну G.654.A, але з меншою поляризаційною модовою дисперсією (не більш 0,2 пс/√км). Дозволяє передавати потоки з великою швидкістю (до 40 Гбіт/с) на значні відстані за умови компенсації хроматичної дисперсії.

#### 2.5.2.4 Волокна G.655

Волокна G.655 – це волокна з ненульовою зміщеною хроматичною дисперсією, оптимізовані для використання в діапазоні 1530-1565 нм (C діапазон). У цьому діапазоні вони мають невеликі, відмінні від нуля значення коефіцієнта хроматичної дисперсії, знак якого може бути позитивним або негативним. Наявність ненульової дисперсії сприяє зменшенню нелінійних спотворень при реалізації хвильового мультиплексування оптичних каналів. Волокна G.655 широко застосовуються в C діапазоні при побудові транспортних мереж різного рівня, що використовують технологію щільного хвильового мультиплексування (DWDM-системах) разом з оптичними підсилювачами. Можливе використання розширеної області довжин хвиль 1460-1625 нм, що включає діапазони S, C та L, з метою

збільшення числа несучих DWDM і реалізації грубого ущільнення (CWDM- технології). Волокна G.655 підрозділяються на класи G.655.A, G.655.B, G.655.C, G.655.D, G.655.E, які відрізняються величинами коефіцієнтів хроматичної і поляризаційної модової дисперсії.

Волокно G.655.A представлено в табл. 2.5. Рекомендується застосовувати в С діапазоні на транспортних мережах з WDM-технологією з підтримкою STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с) при невеликому числі несучих (при обмеженій потужності, що подається) і каналному інтервалі 200 ГГц.

Волокно G.655.B має в порівнянні з G.655.A значні величини коефіцієнтів хроматичної дисперсії (1-10 пс/нм км) і поляризаційної модової дисперсії (не більш 0,5 пс/√км), однак допускає більшу потужність, що подається, і більш щільне розміщення оптичних несучих з каналним інтервалом 100 ГГц. При передачі потоків STM-64 (10 Гбіт/с) забезпечує дальність до 400 км.

Волокно G.655.C аналогічно G.655.B, але має зменшену поляризаційну дисперсію (не більш 0,2 пс/√км) і більшу дальність передачі. Застосовуються для передачі потоків STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с).

Волокно G.655.D призначене для застосування в розширеному діапазоні довжин хвиль 1460–1625 нм. Підтримує DWDM і CWDM технології. Рекомендовані значення коефіцієнта хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  характеризуються використанням двосторонніх обмежень:

$$D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda), \quad (2.75)$$

$$\text{де } D_{\min}(\lambda) = \begin{cases} \frac{7,0}{90}(\lambda - 1460) - 4,20 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм,} \\ \frac{2,97}{75}(\lambda - 1550) + 2,80 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм,} \end{cases}$$

$$D_{\max}(\lambda) = \begin{cases} \frac{2,91}{90}(\lambda - 1460) + 3,29 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм,} \\ \frac{5,06}{75}(\lambda - 1550) + 6,20 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм.} \end{cases}$$

Волокно G.655.E по призначенню аналогічно волокну G.655.D, але, завдяки більшому значенню коефіцієнта хроматичної дисперсії, забезпечує менший рознос каналів у системах DWDM.

Рекомендовані значення коефіцієнта хроматичної дисперсії для цього волокна визначаються наступними обмеженнями:

$$D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda), \quad (2.76)$$

$$\text{де } D_{\min}(\lambda) = \begin{cases} \frac{5,42}{90}(\lambda - 1460) + 0,64 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм}, \\ \frac{3,30}{75}(\lambda - 1550) + 6,06 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм}, \end{cases}$$

$$D_{\max}(\lambda) = \begin{cases} \frac{4,65}{90}(\lambda - 1460) + 4,66 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм}, \\ \frac{4,12}{75}(\lambda - 1550) + 9,31 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм}. \end{cases}$$

На рис. 2.22 представлені типові залежності коефіцієнта загасання  $\alpha(\lambda)$  і границі припустимих областей значень хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  для волокон G.655.D, G655.E.

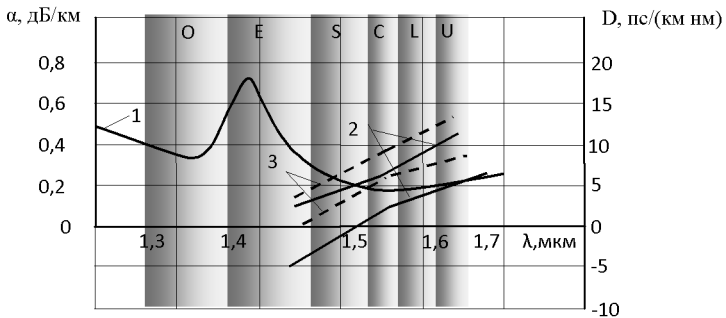


Рисунок 2.22 - Типові залежності коефіцієнтів загасання і хроматичної дисперсії від довжини хвилі для волокон G.655.D, G.655.E: крива 1 – залежність для коефіцієнта загасання; 2 – границі припустимої області для хроматичної дисперсії волокна G.655.D; 3 – для волокна G.655.E

### 2.5.2.5 Волокна G.656

Волокно G.656 – це волокно з ненульовою зміщеною хроматичною дисперсією. Рекомендоване для застосування в діапазоні 1460-1625 нм, у якому має позитивні значення коефіцієнта хроматичної дисперсії, що перевищує деяке ненульове значення. Призначене, як і волокно G.655, для побудови транспортних мереж, що використовують технологію DWDM і CWDM.

Рекомендовані значення коефіцієнта хроматичної дисперсії для цього волокна визначаються наступними обмеженнями:

$$D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda), \quad (2.77)$$

$$\text{де } D_{\min}(\lambda) = \begin{cases} \frac{2,60}{90}(\lambda - 1460) + 1,00 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм,} \\ \frac{0,98}{75}(\lambda - 1550) + 3,60 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм,} \end{cases}$$

$$D_{\max}(\lambda) = \begin{cases} \frac{4,68}{90}(\lambda - 1460) + 4,60 & \text{для } 1460 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1550 \text{ нм,} \\ \frac{4,72}{75}(\lambda - 1550) + 9,28 & \text{для } 1550 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1625 \text{ нм.} \end{cases}$$

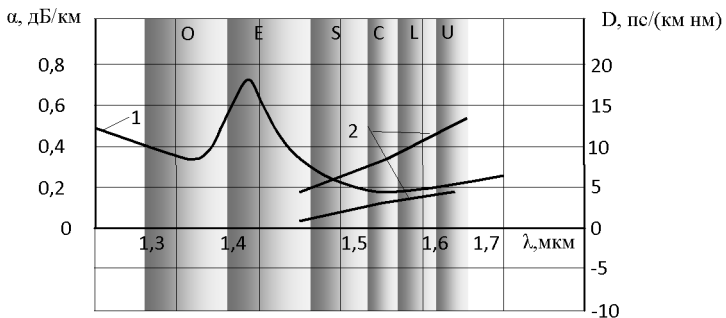


Рисунок 2.23- Типові залежності коефіцієнта загасання (крива 1) і границь (криві 2) припустимої області для коефіцієнта хроматичної дисперсії волокна G.656

На рис. 2.23 представлені типові залежності коефіцієнта загасання  $\alpha(\lambda)$  і границі припустимої області для значень хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  волокон G.656.

### 2.5.2.6 Волокна G.657

Волокно G.657 – одномодове оптичне волокно, малочутливе до втрат на вигинах. Призначене для побудови мереж ФТТН, забезпечуючи прокладку оптоволокна усередині будинків, у кросових і різних сполучних і розподільних пристроях. Підрозділяється на класи А і В, причому клас В має більшу працездатність при вигинах.

Волокна G.657.A підрозділяються на категорії A1 і A2. Волокно G.657.A1 представлено в табл. 2.5. Волокно G.657.A2 по характеристиках аналогічно волокну G.657.A1, але має менші втрати на вигин. Наприклад, при радіусі намотування 15 мм і числі витків, рівним 10, додатково внесені втрати для волокна G.657.A2 становлять 0,03 дБ на довжині хвилі 1550 нм та 0,1 дБ на 1625 нм, а втрати на один виток радіусом 7,5 мм - 0,5 дБ на довжині хвилі 1550 нм та 1,0 дБ на 1625 нм. Інші параметри волокон G.657.A аналогічні параметрам, рекомендованим для стандартного волокна G.652.D, маючого згладжений водний пік.

Волокна G.657.A рекомендуються до використання у випадках, коли необхідна сумісність зі стандартним оптоволокном G.652.

Волокна G.657.B підрозділяються на категорії B2 і B3. Волокно G.657.B2 по втратах на вигин аналогічно волокну G.654.A2. Волокно G.657.B3 більш працездатне при вигинах малого радіуса, його втрати на один виток радіусом 7,5 мм становлять 0,08 дБ на довжині хвилі 1550 нм та 0,25 дБ на 1625 нм. При радіусі витка 5 мм втрати на зазначених довжинах хвиль не перевищують 0,15 і 0,45 дБ, відповідно.

На закінчення необхідно відзначити, що рекомендації ІТУ-Т містять припустимі значення на параметри оптоволокна. Комерційно доступне оптоволокно, що випускається провідними виробниками, володіє, як правило, кращими характеристиками.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Властивості і область застосування багатомодового волокна класів OM.
2. Властивості і область застосування волокон класу G.652.
3. Властивості і область застосування волокон класу G.653.
4. Властивості і область застосування волокон класу G.654.
5. Властивості і область застосування волокон класу G.655.
6. Властивості і область застосування волокон класу G.656.
7. Властивості і область застосування волокон класу G.657.

### 3 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ КАБЕЛІ

Волоконно-оптичний кабель (ВОК) представляє собою структуру, яка складається з одного або декількох оптичних волокон, об'єднаних зі зміцнювальними, заповнюючими і захисними елементами в конструкцію, призначену для передачі світлової енергії при заданих умовах експлуатації кабелю.

Призначення, умови прокладки і експлуатації кабелю визначають його характеристики. Характеристики ВОК розділяються на передатні та механічні. Передатні визначаються властивостями використовуваного в кабелі оптоволокна. Механічні характеризують ступінь захисту оптоволокна від зовнішніх впливів, що забезпечує збереження його передатних властивостей.

Механічні характеристики повинні забезпечувати:

- високу міцність на розрив, стійкість до натягу, вигину, здавлювання, крутіння, ударів, вібрації;
- хімічну і радіаційну стійкість, термостійкість у робочому діапазоні температур, вологонепроникність, грозозахист, захист від гризунів, птахів, комах;
- довгострокову надійну роботу.

Вимоги на механічні характеристики волоконно-оптичного кабелю визначають вибір конструкції і матеріалів для його виготовлення.

Залежно від умов прокладки і експлуатації ВОК підрозділяють на наступні групи [1, 33, 34]:

- кабелі для зовнішньої прокладки;
- кабелі для внутрішньої прокладки;
- спеціальні кабелі.

Кабелі для зовнішньої прокладки застосовуються на лініях магістрального, внутрішньоозонового і місцевого зв'язку.

Кабелі для внутрішньої прокладки використовуються усередині будинків для прокладки внутрішньооб'єктових комунікацій, міжблочного монтажу мережної апаратури і на рухливих об'єктах.

Кабелі спеціального призначення застосовуються для прокладки в місцях з екстремальними умовами експлуатації.

## 3.1 ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ

Основними елементами конструкції ВОК є:

- оптичний модуль;
- сердечник;
- захисні покриття.

При необхідності ВОК може мати струмопровідні металеві жили для передачі електроживлення [1, 33, 34].

### 3.1.1 Конструкції оптичних модулів

Оптичні модулі – це оптичні волокна з первинними захисними покриттями, розташованими усередині полімерних оболонок, що виконують функції вторинного захисного покриття.

Первинне захисне покриття у вигляді шару акрилового лаку або силіконової смоли захищає відбиваючу оболонку ОВ. Первинне покриття, крім хімічного і механічного захисту, поглинає моди випромінювання, усуваючи взаємні перешкоди між ОВ у випадку їх щільного розташування в оптичному модулі. З метою ідентифікації волокон проводиться фарбування первинного покриття. Діаметр ОВ з первинним покриттям звичайно становить 0,15 - 0,25 мм.

Для забезпечення додаткового захисту ОВ з первинним покриттям у конструкціях оптичних модулів зазвичай використовуються способи [1, 2, 14, 33, 34,42 -44], представлені на рис. 3.1:

- щільне полімерне покриття оптоволокна;
- вільне укладання оптоволокна усередині трубки або в пазу;
- стрічка з оптоволокон, вільно розташованих усередині полімерної оболонки.

Оптичний модуль із щільним покриттям на рис. 3.1,а містить оптоволокно 1 з первинним захисним покриттям 2, яке розміщується в буферному шарі 3 з еластичного високоміцного полімеру. Зовнішній діаметр ОВ з врахуванням первинного і буферного покриттів становить 0,2 - 0,4 мм. Вторинне покриття 4 із щільного полімеру послабляє осьові механічні впливи на ОВ. Зовнішній діаметр ОВ по вторинному покриттю становить 0,7 - 1,0 мм.

Оптичний модуль, на рис. 3.1,б містить одне або декілька оптоволокон 5 з первинним покриттям, які вільно розташовуються

усередині полімерної трубки 4, що виконує функції вторинної захисної оболонки. Діаметр трубок становить близько 2 - 3 мм.

В оптичному модулі на рис. 3.1, в одне або декілька оптоволокон 5 з первинним покриттям вільно розташовуються в пазах профілю 6 з полімеру. Профіль і полімерна оболонка 4 утворюють вторинне покриття оптичного модуля.

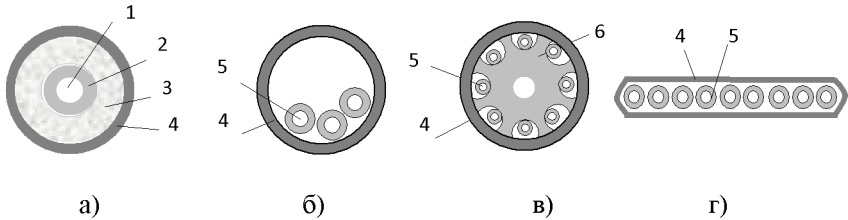


Рисунок 3.1 – Основні види оптичних модулів:

а – модуль із щільним покриттям, б – модуль із вільним укладанням оптоволоконна усередині полімерної трубки, в – модуль із вільним укладанням у пазах профільного сердечника, г – модуль зі стрічковою структурою: 1 – оптоволоконно, 2 - первинне покриття, 3 – буферний шар, 4- вторинна оболонка, 5 – оптоволоконно з первинним покриттям, 6 – пластмасовий профіль із пазами

У стрічковій структурі модуля на рис. 3.1,г декілька оптоволокон 5 у первинних захисних покриттях вільно розташовуються в один ряд у загальній вторинній полімерній оболонці 4.

Буферне еластичне покриття і вільне укладання оптоволокон послабляють зовнішні механічні впливи на ОВ, що приводять до макровигинів. Вторинне покриття забезпечує додатковий захист оптоволоконна від осьових розтягань, вигинів і механічних ушкоджень. Для захисту від вологи внутрішність оптичних модулів з вільним укладанням заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

### 3.1.2 Елементи конструкції сердечників кабелю

Сердечник кабелю представляє собою конструкцію, складену з одного або декількох оптичних модулів, корделей, силових елементів, армуючих, розділових і водоблокуючих оболонок, гідрофобного

заповнення, броньових покривів. Кабельний сердечник додатково захищається зовнішньою оболонкою [1, 2, 14, 33, 34, 42 - 44].

Корделі - гнучкі полімерні стрижні з діаметром, рівним діаметру оптичних модулів, уводяться в конструкцію сердечника на вільні місця замість оптичних модулів. Корделі можуть бути замінені ізолюваними мідними проводами для передачі по кабелю електроенергії.

Центральні і периферійні силові елементи у вигляді склопластикових стрижнів, сталевго оцинкованого дроту або тонких металевих джгутів у пластиковій оболонці забезпечують захист кабелю від поздовжнього вигину і розтягування. Центральний силовий елемент розміщується в центрі по осі кабелю, периферійні – у зовнішній оболонці кабелю.

Армуючі шари у вигляді повивів зі склониток або арамідових ниток і пластикових оболонок забезпечують додатковий захист від механічних впливів.

Броньові покриви виконуються зі склопластикових прутків, металевих гофрованих оболонок або повивів зі сталевго оцинкованого дроту.

Розділові (демпфуючі) шари протистоять стискаючим механічним зусиллям, зменшуючи тиск один на одного різних елементів конструкції кабелю. Виконуються як заповнення з пінопласту.

Для забезпечення водонепроникності волоконно-оптичного кабелю по його довжині вільний простір між його елементами заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю. Використовується також гідрофобна стрічка, якої обмотуються оптичні модулі і сердечники. Стрічка має властивість розбухати при влученні вологи і за рахунок збільшення свого об'єму заповнювати порожнечі і блокувати подальше поширення вологи.

В особливих умовах експлуатації для підвищення герметизації кабелю застосовується алюмополіетиленова оболонка у вигляді трубки з полімеру, нанесеного на повиви з тонких алюмінієвих стрічок. Найкращу герметизацію від вологи забезпечує оболонка з гофрованої сталевго трубки.

Зовнішня оболонка залежно від умов прокладки і експлуатації кабелю може бути пластмасовою, пластмасовою із впресованими силовими елементами, металопластмасовою з металевими стрічками або металевим шаром та броньованою. Пластмасова зовнішня

оболонка найчастіше виготовляється з поліетилену. Захист від ультрафіолетового випромінювання досягається додаванням у поліетилен чорного вугілля.

На рис. 3.2 наведені типові конструкції кабельних сердечників [1, 2, 14, 33, 34, 42 -44].

Сердечник повивної трубчастої скрутки на рис. 3.2,а представляє собою оптичні модулі з конструкцією на рис. 3.1,б, оповиті навколо центрального силового елемента 3. Типова конструкція містить до 12 оптичних модулів. Волокна в оптичних модулях завдяки повивній скрутці мають вільний простір, у межах якого здійснюється компенсація навантажень на розтягання, вигин та стиснення.

Сердечник на рис. 3.2,б представляє собою полімерну структуру 7 з перерізом, відповідним до профілю сердечника оптичного модуля на рис. 3.1,в. Структура гвинтоподібно закручена навколо центрального силового елемента. Вільне укладання оптоволокон у пазах профілю також забезпечує вільний простір, у межах якого здійснюється компенсація механічних навантажень.

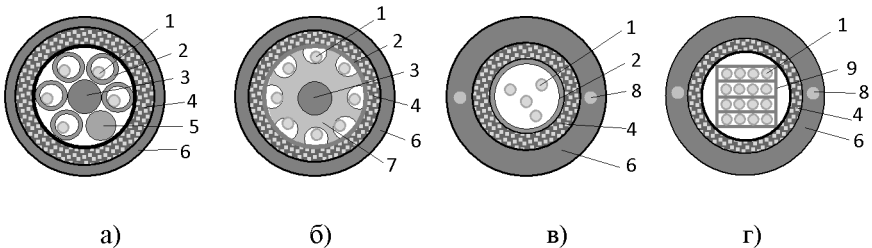


Рисунок 3.2 – Типові конструкції сердечників волоконно-оптичного кабелю:

а – сердечник повивної трубчастої скрутки, б – профільний гвинтоподібний сердечник, в – сердечник із центральним розташуванням модуля, г – сердечник із центральним розташуванням матриці зі стрічкових оптичних модулів: 1 – оптоволокно в первинному покритті, 2- оболонка оптичного модуля, 3 – центральний силовий елемент, 4 –армуючі, розділові, водоблокуючі оболонки і броньові покритви, 5- кордель, 6 - зовнішня оболонка, 7 – полімерний профіль оптичного модуля з пазами, 8 – периферійні силові елементи, 9 – оболонка матриці зі стрічкових модулів

Сердечник на рис. 3.2,в містить у центрі оптичний модуль (див. рис. 3.1,б) із захисною оболонкою з полімерної трубки 2, що

містить одне або кілька оптичних волокон 1 у первинному покритті. По периферії сердечника в зовнішній оболонці розташовуються периферійні силові елементи.

Сердечник із центральним розташуванням модуля на рис. 3.2,г містить у центрі матрицю 9, складену зі стрічкових модулів. Для зниження механічних навантажень на оптоволокно матриця з оптичними модулями закручується уздовж осі сердечника по спіралі. Силові периферійні елементи 8 розміщуються в зовнішній оболонці 6.

Для збільшення ємності кабелю використовується пучкова повивна скрутка сердечників на рис. 3.2 [1, 2, 14, 33, 34, 42 - 44]. Типові конструкції сердечників таких кабелів без елементів захисту наведені на рис. 3.3.

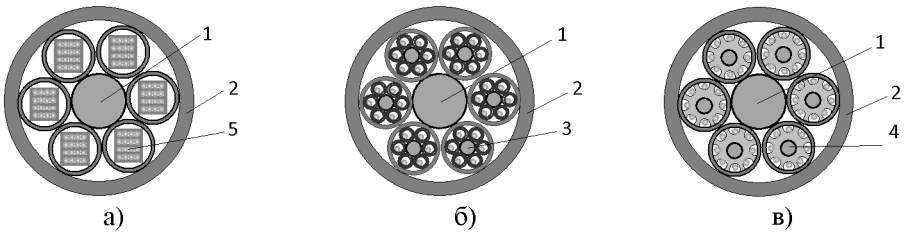


Рисунок 3.3 – Конструкції кабелю з пучковою повивною скруткою сердечників:

а – з повивною скруткою матриць зі стрічкових модулів, б - повивною скруткою сердечників повивної трубчастої скрутки, в – з повивною скруткою профільних гвинтоподібних сердечників: 1 – центральний силовий елемент, 2- оболонка сердечника кабелю, 3 – сердечник повивної трубчастої скрутки, 4 - профільний гвинтоподібний сердечник, 5 – сердечник з матрицею зі стрічкових оптичних модулів

У конструкції на рис. 3.3,а застосовано повив з пучка матриць, складених зі стрічкових оптичних модулів, у конструкції на рис. 3.3,б - повив з пучка сердечників повивної трубчастої скрутки, а в конструкції на рис. 3.3,в - повив з пучка профільних гвинтоподібних сердечників.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Намалювати і пояснити конструкцію оптичного модуля із щільним покриттям.
2. Намалювати і пояснити конструкцію оптичного модуля з вільним укладанням оптоволокна.
3. Намалювати і пояснити конструкцію оптичного модуля з укладанням у пазах профільного сердечника.
4. Намалювати і пояснити конструкцію оптичного модуля зі стрічковою структурою.
5. Намалювати і пояснити конструкцію сердечника повивної трубчастої скрутки.
6. Намалювати і пояснити конструкцію профільного гвинтоподібного сердечника.
7. Намалювати і пояснити конструкцію сердечника із центральним розташуванням модуля.
8. Намалювати і пояснити конструкцію сердечника з матрицею зі стрічкових оптичних модулів:
9. Намалювати і пояснити конструкцію кабелю з пучковою повивною скруткою сердечників.
10. Намалювати і пояснити конструкцію кабелю з повивною скруткою матриць зі стрічкових модулів.
11. Намалювати і пояснити конструкцію кабелю з повивною скруткою сердечників повивної трубчастої скрутки.
12. Намалювати і пояснити конструкцію кабелю з повивною скруткою профільних гвинтоподібних сердечників

### 3.2 ТИПИ І КОНСТРУКЦІЇ КАБЕЛІВ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПРОКЛАДКИ

До кабелів, призначених для зовнішньої прокладки, пред'являються підвищені вимоги по захисту ОВ. Ці кабелі в процесі прокладки та експлуатації зазнають значних механічних навантажень, підлягають різким коливанням температури, шкідливому впливу вологи і різних хімічно агресивних речовин, а також впливу птахів, комах, гризунів. Усі ці фактори визначають основні конструктивні особливості кабелів зовнішньої прокладки. Для забезпечення стійкості до розтягувальних напруг використовується вільне, з надлишковою довжиною, укладання ОВ усередині трубок або пазів сердечника кабелю. Додатковий захист від механічних навантажень здійснюється

за допомогою силових елементів у вигляді склопластикових стрижнів, сталевих дроту або сталевих троса, армуючих шарів з арамідних ниток, захисної броні у вигляді сталеві гофрованої стрічки або у вигляді повивів зі сталевих дротів, зовнішньої оболонки у вигляді захисного шланга з поліетилену чорного кольору. Для захисту від вологи внутрішність кабелю заповнюється гідрофобним компаундом або гелем, вводяться водоблокуючі стрічки та нитки.

Кабелі зовнішньої прокладки залежно від умов їх прокладки і застосування підрозділяються на наступні різновиди [1, 2, 14, 33, 34, 42 -44]:

- кабелі повітряної прокладки,
- кабелі підземної прокладки,
- кабелі підводної прокладки.

### **3.2.1 Кабелі повітряної прокладки**

Кабелі повітряної прокладки призначені для підвіски на опорах різного типу. Залежно від конструкції і призначення вони підрозділяються:

- на підвісні з виносним силовим елементом;
- на самонесучі діелектричні;
- на самонесучі металеві, вбудовані в грозозахисний трос.

#### **3.2.1.1 Підвісні кабелі з виносним силовим елементом**

Кабелі призначені для підвіски і експлуатації на опорах повітряних ліній зв'язку, стовпах міського освітлення, контактної мережі міського транспорту, опорах радіотрансляційної мережі, між будинками і спорудженнями.

Стійкість підвісних кабелів з виносним силовим елементом визначається можливістю протидії:

- до статичного розтяжного зусилля 3,0 – 15,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,2-0,4 кН/см;
- до ударних впливів 5 г.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить близько 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах - 60...+70° С.

На рис.3.5 наведені типові конструкції підвісних кабелів з виносним силовим елементом [45 - 55].

На рис.3.5,а представлена конструкція підвісного багатомодульного кабелю з виносним силовим елементом зі склопластикового стрижня, сталевго троса або сталевго дроту, із зовнішньою оболонкою з поліетилену і, при необхідності, з корделями з поліетилену.

На рис. 3.5,б зображена конструкція підвісного кабелю із центральною трубкою оптичного модуля, з виносним силовим елементом зі склопластикового стрижня, сталевго тонкого троса або сталевго дроту, із зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

Конструкції можуть містити проміжну оболонку, що виконує функцію армуючого елемента у вигляді повива з арамідних або скловидних ниток.

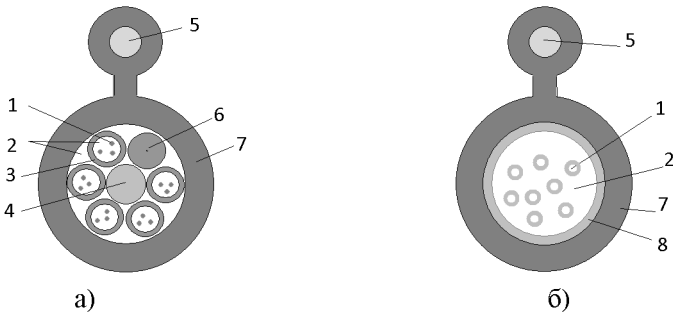


Рисунок 3.5 – Конструкції підвісних кабелів з виносним силовим елементом:  
а – багатомодульний кабель із центральним силовим елементом,  
б – одномодульний кабель із центральною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 – центральний силовий елемент - склопластиковий пруток, 5 - виносний силовий елемент (сталевий трос або склопластиковий пруток), 6 - кордель із поліетилену низькою щільності, 7 - зовнішня оболонка з поліетилену, 8 - пластикова трубка центрального оптичного модуля

Для прикладу в таблиці 3.1 наведені типові характеристики кабелів подібної конструкції [45 – 55].

Таблиця 3.1 – Характеристики кабелю оптичного підвісного з виносним силовим елементом

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Розмір, мм	Маса, кг/км
			Ростягуюче, кН	Раздавлюваюче, кН/см		
Багатомодульний сердечник						
МКФ	ОКПМ	до 144	4-12	0,3	9,7x20,7-16,7x26,7	146-344
Інкаб	ДПОМ	до 144	4-12	0,3	8,9x16,1-13,8x22,8	101,8-242,5
ОКС 01	ДПК	до 192	3-15	0,2-0,4	6,0x13,7-6,0x15,1	165-190
Південкабель	ОПТ	до 144	4-9	0,2	10,2x17,9-12,4x22,3	125-250
Одномодульний сердечник						
Інкаб	ТПОМ	до 24	4-12	0,3	6,2x12,2-7,0x14,8	71-139,7
Москабель	ОКПЦ	до 48	4-9	0,3	6,8x13,9-6,8x14,2	76,2-115
ОКС 01	ОПК	до 32	3-10	0,2-0,4	4,0x8,5-4,8x10,0	55-92
Південкабель	ОЦПТ	до 12	2-8	0,2	6,7x13,0-6,7x15,7	72-120

### 3.2.1.2 Самонесучі діелектричні кабелі

Кабелі призначено для підвішування на опорах повітряних ліній електропередач, ліній зв'язку, контактної мережі залізниць, тощо.

Стійкість підвісних самонесучих діелектричних кабелів визначається можливістю протидії впливам:

- до статичного розтяжного зусилля 3,0 – 50,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,2-1,0 кН/см;
- до ударних впливів 5 г.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить близько 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах  $-60 + 70$  °С.

На рис. 3.6 наведені найпоширеніші конструкції підвісних самонесучих діелектричних кабелів [45 – 55].

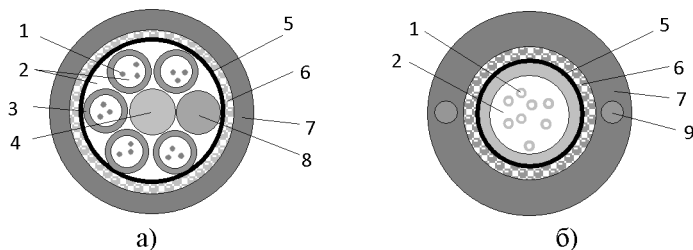


Рисунок 3.6 – Конструкції підвісних самонесучих діелектричних кабелів:

а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом, б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 - центральний силовий елемент - склопластиковий стрижень, 5 – проміжна оболонка з полімерного матеріалу, 6 – армуючий шар зі склопластикових або арамідних ниток, 7 - зовнішня оболонка з поліетилену, 8 – кордель із поліетилену низкої щільності, 9 – периферійний силовий елемент - склопластиковий стрижень

На рис. 3.6,а представлена конструкція багатомодульного кабелю, що містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня, армуючої оболонки з повива арамідних або скловидних ниток та зовнішню оболонку з поліетилену.

На рис. 3.6,б наведена конструкція кабелю із центральною трубкою оптичного модуля, з армуючою оболонкою у вигляді повива з арамідних або скловидних ниток, з периферійним силовим елементом із двох склопластикових стрижнів, та зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

Для прикладу в таблиці 3.2 наведені типові характеристики кабелів подібної конструкції [45 - 55].

Таблиця 3.2 - Кабелі оптичні самонесучі діелектричні

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
Багатомодульний сердечник						
МКФ	ОКСМ	до 144	6-10	0,3	12,7- 18,6	126-273

	ОКСД	до 288	25-45	0,3	15,0-23,9	204-502
Одескабель	ОКЛ	до 216	7-30	0,3	15,5-19,0	142-234
Півден кабель	ОАрП	до 144	3,5-40,0	0,3	9,8-20,5	75-340
ОКС 01	ДПМ	до 288	5-50	0,4-1,0	13,6-22,8	175-465
	ДПГ	до384	3-10	0,2-1,0	10,0-18,7	70-275
	ДПГс	до384	3-15	0,4-0,7	10,0-18,7	70-275
Одномодульний сердечник						
Єврокабель	ОСЦ	до 24	3-20	0,5	6,3-9,3	72-127
Одескабель	ОКТ	до 72	4-30	0,3	10.0-20.0	80-190
Півден кабель	ОЦАрП	до 12	1,0-2,7	0,2	8,3	60-65
ОКС 01	ОДВ	до 64	1-8	0,2-0,4	5,1-8,7	25-65
	ОСВ	до 64	3,0-12,0	0,2-1,0	4,6-8,0	50-145

### 3.2.1.3 Самонесучі металеві кабелі, вбудовані в грозозахисний трос

Кабелі призначені для підвищення на лініях електропередачі напругою 35кВ і вище замість грозозахисного троса.

Стійкість оптичних кабелів даного класу визначається можливістю протидії впливам:

- до статичного розтяжного зусилля 15,0 – 350,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження - від 1,0 кН/см;
- до ударних впливів від 10g.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить близько 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах  $-60+70^{\circ}\text{C}$ .

На рис.3.7 наведені типові конструкції оптичних кабелів, вбудованих у грозозахисний трос [46, 51].

Кабель багатомодульної структури на рис 3.7,а містить центральний силовий елемент зі сталевго дроту, первинний повив зі сталевго дроту і сталевих трубок оптичних модулів, вторинний повив зі сталевго дроту. Сталевий дріт плакується алюмінієм. Замість сталевго дроту може використовуватися дріт з алюмінієвого сплаву.

Кабель на рис 3.7,б містить сталеву трубку центрального оптичного модуля, яка армована одним або декількома шарами дротів зі сталі, плакованої алюмінієм, або дротів з алюмінієвого сплаву.

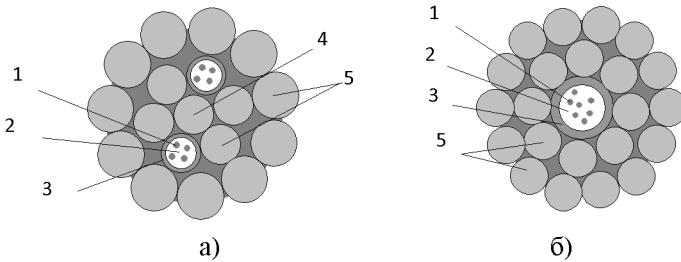


Рисунок 3.7 – Конструкції кабелів, вбудованих у грозозахисний трос:  
 а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом, б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 – металева трубка оптичного модуля, 4 – центральний металевий силовий елемент, 5 – повиви із дроту

Для прикладу в таблиці 3.3 наведені типові характеристики кабелів подібної конструкції [46, 51].

Таблиця 3.3 - Кабелі оптичні самонесучі металеві вбудовані в грозозахисний трос

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
Багатомодульний сердечник						
Інкаб	ОКГТ-З	до 288	24-350	1,0	11-21	330-1530
СКО	ОКГТ-З	до 144	33-484	1,0	13,1-28,5	від 352
Одномодульний сердечник						
Інкаб	ОКГТ-Ц	до 48	15-125	1,0	8,2-18,0	200-1230
СКО	ОКГТ-Ц	до 48	33-484	1,0	8,2-18,0	від 203

### 3.2.2 Кабелі підземної прокладки

По конструкції і призначенню кабелі для підземної прокладки підрозділяються на кабелі:

- для прокладки в спеціальні захисні пластмасові труби;
- для укладання в кабельній каналізації, колекторах, тунелях;
- для закладки безпосередньо в ґрунт.

### 3.2.2.1 Кабелі для прокладки в пластмасових трубах

Кабелі призначені для прокладки в захисних пластмасових трубах (ЗПТ) із зовнішнім діаметром від 25 до 60 мм і товщиною стінок 2 – 5 мм.

Стійкість оптичних кабелів даного класу визначається можливістю протидії впливам:

- до статичного розтяжного зусилля 1.0 - 2,7 кН;
- до роздвлюючого навантаження 0,2-0,5 кН/см;
- до ударних впливів 5 г.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить близько 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах  $-50+50^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3.8 наведені типові конструкції оптичних кабелів для прокладки в спеціальних захисних пластмасових трубах [45 – 55].

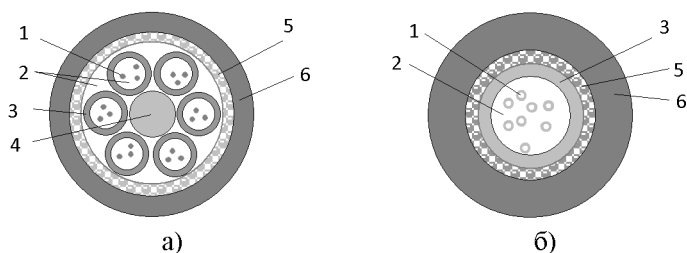


Рисунок 3.8 – Конструкції кабелів для прокладки в пластмасових трубах:  
а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом,  
б – кабель із центральною модульною трубкою: 1 – оптичні волокна, 2 -  
гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 -  
центральний силовий елемент - склопластиковий стрижень або сталевий  
трос, 5 – армуюча оболонка зі склониток або арамідних ниток, 7 - зовнішня  
оболонка з поліетилену

На рис. 3.8,а представлена конструкція багатомодульного кабелю, що містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня або ізольованого поліетиленом сталевого тонкого троса, армуючу оболонку, утворену з повива склониток або арамідних ниток, зовнішню оболонку з поліетилену.

На рис. 3.8,б наведена конструкція кабелю із центральною пластиковою трубкою оптичного модуля з армуючою оболонкою у вигляді повива з арамідних ниток або склониток, із зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

Для прикладу в таблиці 3.4 наведені типові характеристики кабелів подібної конструкції [45 – 55].

Таблиця 3.4 - Кабелі оптичні для прокладки в захисних пластмасових трубах

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
<b>Багатомодульний сердечник</b>						
МКФ	ОКТМ	до 288	1,0-2,7	0,3	10,0-19,7	81-319
Єврокабель	ОТД	до 288	1,5-2,7	0,3-0,5	7,9-13,1	52-118
ОФС ВОКК	ДП	до 432	1,0-2,7	0,2-0,4	7,7-20,0	30-300
ОКС 01	ДАО	до 576	1,5-5,0	0,3-0,7	11,0-26,6	100-495
	ДПО	до 576	1,5-5,0	0,3-0,7	8,0-26,1	60-435
ІНКАБ	ДПО	до 144	1,5-2,7	0,3	9,4-13,8	68,2-139,3
<b>Одномодульний сердечник</b>						
Єврокабель	ОТЦ	до 24	1,6-2,7	0,5	7,3-8,3	49-74
Белтеле-Кабель	ОККТЦ	до 48	1,0-2,7	0,4	8,3-9,1	55-75
Інтегра Кабель	ІК-к	до 48	1,0-3,0	0,3	6,0-14,5	30-90

### 3.2.2.2 Кабелі оптичні для прокладки в кабельній каналізації

Кабелі призначені для прокладки в кабельній каналізації, трубах, блоках, по мостах і естакадам.

Стійкість оптичних кабелів даного класу:

- до статичного розтяжного зусилля 1,5 – 5,0 кН;
- до навантаження, що роздавлює, 0,3 - 0,7 кН/см;
- до ударних впливів 10 g.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить

близько 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах  $-50+50^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3.9 наведені типові конструкції оптичних кабелів для прокладки в кабельній каналізації [45 – 55].

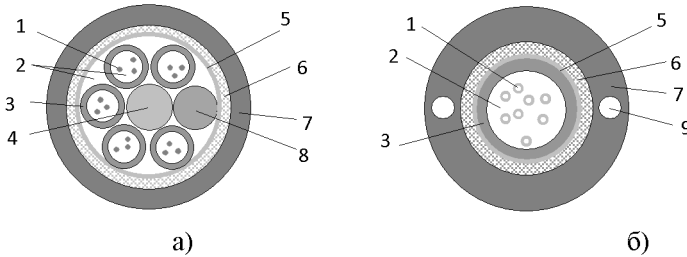


Рисунок 3.9 – Конструкції кабелів для прокладки в кабельній каналізації:

а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом, б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 - центральний силовий елемент - склопластиковий стрижень або сталевий трос, 5 – водоблокуюча проміжна оболонка, 6 – броня у вигляді сталеві гофрованої стрічки, 7 - зовнішня оболонка з поліетилену, 8 – кордель із поліетилену низкою щільності, 9 – периферійний силовий елемент – сталевий оцинкований дріт

На рис. 3.9,а представлена конструкція багатомодульного кабелю, що містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня або ізольованого поліетиленом тонкого сталевих троса; проміжну водоблокуючу оболонку; броню зі сталеві гофрованої стрічки, зовнішню оболонку з поліетилену.

На рис. 3.9,б наведена конструкція кабелю із центральною трубкою оптичного модуля з водоблокуючою оболонкою, із бронею у вигляді сталеві гофрованої стрічки з периферійним силовим елементом зі сталевих оцинкованого дроту, із зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

Для прикладу в таблиці 3.5 наведені типові характеристики кабелів подібної конструкції [45 – 55].

Таблиця 3.5 - Кабелі оптичні для прокладки в кабельній каналізації

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
<b>Багатомодульний сердечник</b>						
Інкаб	ДПЛ	до 144	2,7	0,3	12,6-14,8	142-189
	ДПЛ	до 144	2,7	0,3	11,5-13,7	116-157
МКФ	ОККМ	до 288	2,7	0,3	10,9-21,7	117-427
ОФС ВОКК	ДВП	432	1,5-5,0	0,4-0,6	11,0-28,0	130-550
ОКС 01	ДАО	до 384	1,5-5,0	0,4-0,7	12,0-22,3	120-380
	ДПЛ	до 384	1,5-5,0	0,4-0,7	13,6-24,0	190-505
<b>Одномодульний сердечник</b>						
Інкаб	ТОЛ	до 24	2,7	0,5	8,3-8,8	81-86
	ТОС	до 24	2,7	0,5	8,0-8,3	120-123
МКФ	ОККЦ	до 24	2,7	0,3	9,6	101
СКО	ОКЛ-к	до 48	1,5	0,3	8,5-12,4	87-145
ОКС 01	ОПЛ	до 64	1,5-3,0	0,4-1,5	7,5-10,0	60-110

### 3.2.2.3 Кабелі оптичні для прокладки в ґрунті

Кабелі призначені для прокладки в ґрунті, через болота, ріки і водні перешкоди, у кабельній каналізації, трубах, блоках, по мостам і естакадам.

Стійкість оптичних кабелів для прокладки в ґрунті всіх категорій (крім підвернених мерзлотним деформаціям), через ріки і болота глибиною до 2 м наступна:

- до статичного розтяжного зусилля до 10,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,3 - 0,7 кН/см;
- до ударних впливів 10 г.

Стійкість оптичних кабелів для прокладки в скельні ґрунти і ґрунти, піддані мерзлотним і карстовим деформаціям, через болота глибиною більш 2 м, несудохідні ріки, невеликі водні перешкоди:

- до статичного розтяжного зусилля до 40,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,4 - 1,5 кН/см;
- до ударних впливів 20 г.

Стійкість оптичних кабелів для прокладки в ґрунті будь-яких категорій, у тому числі піддані мерзлотним і карстовим деформаціям, через болота, судноплавні ріки і водойми:

- до статичного розтяжного зусилля від 80,0 кН і вище;

- до роздавлюючого навантаження 0,7 – 1,5 кН/см;
- до ударних впливів до 50 g.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах -40 + 50°C.

На рис. 3.10 наведені типові конструкції оптичних кабелів для прокладки в ґрунті, що містять одношарову броню зі сталевих дротів [45 – 55].

На рис. 3.10,а представлена конструкція багатомодульного кабелю, що містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня або ізольованого поліетиленом тонкого сталевго троса, проміжну оболонку з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, броню зі сталевих оцинкованих дротів, зовнішню оболонку з поліетилену.

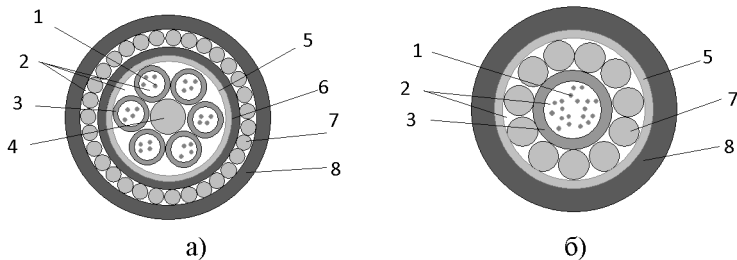


Рисунок 3.10 – Конструкції кабелів з одношаровою бронєю для прокладки в ґрунті:

а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом,

б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 - центральний силовий елемент - склопластиковий стрижень або сталевий трос, 5 – проміжна оболонка з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, 6 – внутрішня поліетиленова оболонка, 7 – броня у вигляді повива зі сталевго дроту, 8 - зовнішня оболонка з поліетилену

На рис. 3.10,б наведена конструкція кабелю із центральною трубкою оптичного модуля, із проміжною оболонкою з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, бронєю зі сталевих оцинкованих дротів, із зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний

простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

На рис. 3.11 наведені типові конструкції оптичних кабелів для прокладки в ґрунт, що містять двошарову броню зі сталевих дротів [45 – 55].

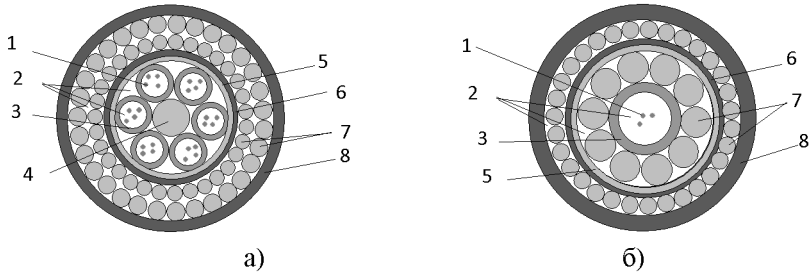


Рисунок 3.11 – Конструкції кабелів із двошаровою бронєю для прокладки в ґрунт:

а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом, б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 - центральний силовий елемент - склопластиковий стрижень або сталевий трос, 5 – проміжна оболонка з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, 6 – внутрішня поліетиленова оболонка, 7 – броня у вигляді повива зі склопластикових прутків або сталевих дротів, 8 - зовнішня оболонка з поліетилену

На рис. 3.11,а представлена конструкція багатомодульного кабелю, що містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня або ізольованого поліетиленом тонкого сталевих троса, проміжну оболонку з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, внутрішню поліетиленову оболонку, двошарову броню зі сталевих оцинкованих дротів, зовнішню оболонку з поліетилену.

На рис. 3.11,б наведена конструкція кабелю із центральною трубкою оптичного модуля, із проміжною оболонкою з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, із внутрішньою поліетиленовою оболонкою, із двошаровою бронєю зі сталевих оцинкованих дротів, із зовнішньою оболонкою з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.

Кабель із одношаровою бронєю з високоміцним сталевим дротом забезпечує припустиме розтягувальне навантаження до 40,0 кН, при двошаровій броні з високоміцним сталевим дротом припустиме навантаження від 80 кН і вище.

Для прикладу в таблиці 3.6 наведені типові характеристики кабелів для прокладки в ґрунті [45 – 55].

Таблиця 3.6 - Кабелі оптичні для прокладки в ґрунті

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
<b>Багатомодульний сердечник</b>						
МКФ	ОКГМ	до 288	7-80	0,4-1,0	12,8-26,9	285-1453
Інкаб	ДПС	до 144	7-20	0,4	12,2-17,2	228,3-520,6
	ДПС2	до 144	7-80	1,0	23,0-24,4	1399,7-1497,1
ОКС 01	ДП1	до 384	35-120	1,0	17,5-33,4	330-1020
	ДП2	до 384	40-200	1,0	14,1-32,4	385-2350
	ДП3	до 384	80-250	0,8-2,5	14,1-31,4	385-2350
ОФС ВОКК	ДКП	до 432	3,0-80	0,4-1,5	9,8-30,5	65-2500
<b>Одномодульний сердечник</b>						
МКФ	ОКГЦ	до 48	4-80	0,4-1,0	10,2-20,2	205-856
ОКС01	ОАС	до 32	4,0-35,0	0,4-1,5	10,2-13,0	170-320
	ОПС	до 32	4,0-35,0	0,4-1,5	7,0-12,0	90-300
	ОП1	до 64	15-60	0,4-1,5	15,8-26,3	315-915
	ОП2	до 64	40-200	0,4-1,5	14,0-25,0	380-1550
	ОП3	до 64	60-250	1,0-3,0	14,0-27,5	380-2010
Єврокабель	ОГЦ	до 24	5-20	0,7	8,0-11,4	95-265

### 3.2.2.4 Кабелі підводної прокладки

По конструкції і призначенню підводні кабелі підрозділяються на кабелі:

- для прокладки через глибоководні ділянки річкових переходів і водоймищ;
- для прокладки по дну морів і океанів, через більші водні перешкоди із глибиною до 5000 м і більш.

Стійкість оптичних кабелів для прокладки на річкових переходах, через судноплавні і несудохідні ріки, озера і водоймища наступна:

- до статичного розтяжного зусилля 25,0 – 200,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,4 - 1,5 кН/см;
- до ударних впливів 20,0 - 30,0 g;
- до надлишкового гідростатичного тиску 0,7 – 4,0 Мпа.

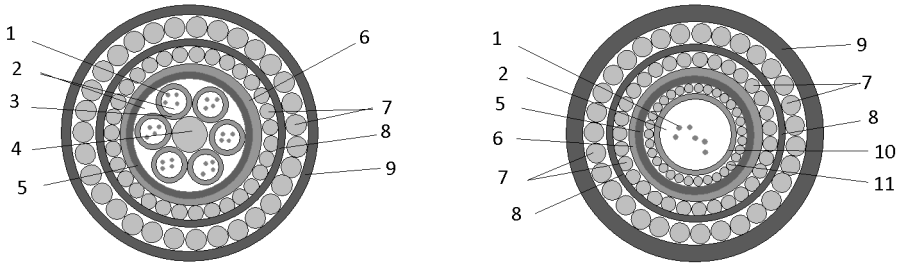
Стійкість оптичних кабелів для прокладки по дну морів і океанів, через більші глибоководні перешкоди:

- до статичного розтяжного зусилля 10,0 – 400,0 кН;
- до роздавлюючого навантаження 1,0 - 1,5 кН/см;
- до ударних впливів 20,0 – 50,0 g.
- до надлишкового гідростатичного тиску 4,0 – 80,0 Мпа.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Мінімальний радіус вигину становить 20 діаметрів кабелю. Робоча температура перебуває в межах  $-40 + 40^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3.12 наведені типові конструкції оптичних кабелів для підводної прокладки [46, 47, 53]. На рис. 3.12,а представлена конструкція багатомодульного кабелю для прокладки через глибоководні ділянки річкових переходів і водоймища. Конструкція містить центральний силовий елемент зі склопластикового стрижня або ізольованого поліетиленом тонкого сталевго троса, проміжну оболонку з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, подвійну броню зі сталевих оцинкованих дротів, зовнішню оболонку з поліетилену.

На рис. 3.12,б наведена конструкція кабелю для прокладки по дну морів і океанів. Конструкція містить пластикову або сталеву трубку оптичного модуля, проміжну оболонку з водоблокуючих і алюмополіетиленових або міднополіетиленових стрічок, подвійну броню з оцинкованих або нержавіючих сталевих дротів, зовнішню оболонку з поліетилену. Вільний простір між елементами кабелю заповнюється гідрофобним компаундом у вигляді желе або гелю.



а)

б)

Рисунок 3.12 – Конструкції підводних оптичних кабелів:

а – кабель багатомодульної структури із центральним силовим елементом, б – кабель із центральною модульною трубкою:

1 – оптичні волокна, 2 - гідрофобний заповнювач, 3 - пластикова трубка оптичного модуля, 4 - центральний силовий елемент - сталевий трос у пластиківій оболонці, 5 – внутрішня поліетиленова оболонка, 6 – проміжна оболонка з водоблокуючих і алюмополіетиленових стрічок, 7 – двошарова броня у вигляді повиви з високоміцного сталевого дроту, 8 – проміжна оболонка з поліетилену, 9 – зовнішня оболонка з поліетилену, 10 - центральна сталева, мідна або алюмінієва трубка оптичного модуля, 11 – повиви з мідних дротів для кабелю зі струмопровідною жилою або повиви з оцинкованого сталевого дроту

Кабелі з конструкцією на рис. 3.12,б застосовуються на глибинах у тисячі метрів, наприклад, кабель ЗАТ «ОКС 01» типу ОПР зі сталевую модульною трубкою призначений для прокладки і експлуатації на морських прибережних і шельфових ділянках, через протоки і фіорди, на глибинах до 6000 метрів [47].

У випадку найбільш важких умов прокладки та експлуатації, що мають місце при прокладенню кабелю в скельних ґрунтах морської прибережної і шельфової зони, кабелі додатково захищаються бітумним покриттям і зовнішньою оболонкою з повивами поліпропіленової пряди.

Для прикладу в таблиці 3.7 наведені типові характеристики кабелів для підводної прокладки [46, 47, 52, 53].

Таблиця 3.7 - Кабелі підводної прокладки

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
Багатомодульний сердечник						
ОПТЕН	ТАК2		20-80	1,0	19,3-26,3	820-1870
ОКС 01	ДАУ	до 384	20-150	1,0	13,0-28,8	275-1330
	ТАК2	до 384	40-200	1,0	15,8-32,2	525-2440
	ТАК3	до 384	80-250	0,8-2,5	15,8-32,2	525-2440
ОФС ВОКК	ДКПа	до 432	3,5-92	0,4-1,5	9,8-30,5	65-2500
Одномодульний сердечник						
ОПТЕН	ТЕ2	до 24	20-30	1,0	15-20	460-1000
ОКС 01	ОА2	до 64	40-200	0,4-1,5	14,0-27,5	380-2015
	ОПШ	до 64	25-250	1,5	14,0-27,5	2015
	ОПР	до 64	25-250	1,5	10,2-15,8	175-580
Інкаб	ТПС2	до 24	30-130	1,5	13,9-20,3	347-1108
	ТсПС2	до 48	30-120	1,5	13,0-20,1	324-1089

### 3.2.3 Кабелі внутрішньої прокладки

Кабелі внутрішньої прокладки призначені для побудови волоконно-оптичних розподільних мереж широкосмугового доступу з ідеологією *FTTH (Fiber To The Home*— волокно до житла) за технологією *PON (Passive Optical Network* - пасивна оптична мережа). Вони мають підвищену пожежну безпеку, гнучкість та полегшену конструкцію за рахунок використання одношарового діелектричного покриття і відсутності елементів захисту від вологи.

Згідно з рекомендаціями G.657 Міжнародного союзу електровз'язку (ITU) у кабелях використовуються оптичні волокна, які не чутливі до втрат на макровигинах.

Стойкість оптичних кабелів для внутрішньої прокладки:

- до статичного розтяжного зусилля 0,2 – 3,5 кН;
- до роздавлюючого навантаження 0,05 - 1,5 кН/см;
- до ударних впливів 1,0 – 3,0 г.

Стійкість кабелів до динамічних розтяжних зусиль на 15% більше, чим до статичних. Робоча температура перебуває в межах -20 +70°C.

Оптичні волокна кабелів внутрішньої прокладки забезпечуються буферним покриттям 0,9 мм, яке дозволяє здійснювати безпосередню установку конекторів.

Оболонки кабелів виготовляються з полімерних матеріалів *LSZH (Low Smoke Zero Halogen)*, що не поширюють горіння, не виділяють диму і галогенів при горінні.

Кабелі внутрішньої прокладки підрозділяються на:

- абонентські;
- розподільні внутрішньооб'єктові [48, 49, 53].

### 3.2.3.1 Кабелі оптичні абонентські

Абонентські кабелі призначені: для виготовлення оптичних шнурів, окінцеваних оптичними конекторами по обидва боки (*patch-cords - патч-корд*) або з однієї сторони (*pigtai – пігтейл*); з'єднання кабельних систем і електронного обладнання з волоконно-оптичним кабелем; створення кабельного розведення в технічних приміщеннях локальних мереж; формування горизонтальних магістралей великих структурованих кабельних систем із прокладкою в декоративних коробах до робочого місця.

Абонентські кабелі звичайно містять одне або два оптоволокна в буферній оболонці, у них, як правило, використовується оптичне волокно, що забезпечує мінімальний радіус вигину.

На рис. 3.13 наведені типові конструкції абонентських оптичних кабелів [53 - 56].

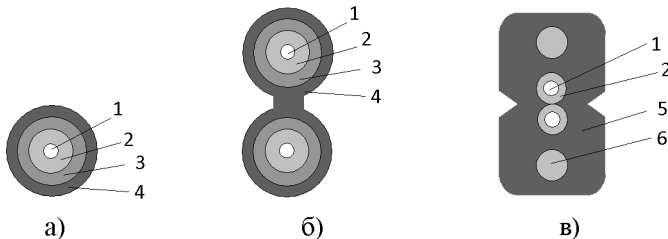


Рисунок 3.13 – Конструкції кабелів оптичних абонентських:  
а – мінікабель Simplex; б – кабель Duplex;  
в – плоский кабель Drop:

1 – оптичне волокно, 2 буферний шар з полімеру, 3 – силовий елемент - арамідні нитки, 4 – пластикова оболонка мінікабелю, 5 – зовнішня пластикова оболонка, 6 – силовий елемент – сталевий оцинкований дріт або склопластиковий пруток у полімерному покритті

Одноволоконний мінікабель *Simplex* на рис. 3.13,а складається з одного волокна в буфері та зміцнюючих арамідних ниток, розташованих усередині полімерної оболонки LSZH.

Двоволоконний кабель *Duplex* на рис. 3.13,б утворений із двох мінікабелів Simplex, з'єднаних між собою полімерною перемичкою.

Плоский *Drop* кабель на рис. 3.13,у може містити від 1 до 8 оптоволокон у буферній оболонці, розміщених у зовнішній полімерній оболонці LSZH.

Для прикладу в таблиці 3.8 наведені типові характеристики абонентських кабелів внутрішньої прокладки [45 - 55].

Таблиця 3.8 - Кабелі внутрішньої прокладки абонентські

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
Simplex кабель абонентський						
МКФ	ОКС	1	0,1	0,05	1,8; 2,8	3,6; 8,0
ОКС 01	ОБАС	1	0,05-1,0	0,05-0,2	1,8-3,5	3,0-12,0
СКО	ОКВ	1	0,1	0,05	2,85	6,5
Єврокабель	ОВНС	1	0,18	0,05	1,8; 2,8	3,5; 7,2
Інкаб	ОБС	1				
Duplex кабель абонентський						
МКФ	ОКД	2	0,1	0,05	1,8x3,6; 2,8x5,6	7,2; 16,0
ОКС 01	ОБАД	2	0,1-1,5	0,05-0,2	1,8x3,6 3,5x7,06	6,0-24,0
СКО	ОКВ	2	0,2	0,05-0,1	6,0x2,85	13,5
Єврокабель	ОВНД	2	0,18	0,05	2,8x5,6	14,3
Інкаб	ОБД	2	0,18	0,05	2,8x5,6	14,3
Drop кабель абонентський						
МКФ	ОКДП	2; 4	0,22	0,3	2,0x3,0	8,9; 9,1
Інкаб	ОВП-2Д	2	0,08	0,25	2,0x3,0	9,1
Єврокабель	ОВНП	1-4	0,4	0,3-1,0	2,0x3,0	8,0-10,0

					2,0x4,0	
СКО	ОКПА	1-8	0,1	0,1-0,5	2,0x3,0	10,0

### 3.2.3.2 Розподільні внутрішньооб'єктові кабелі

Внутрішньооб'єктові розподільні кабелі призначені для прокладки усередині будинків (у тому числі вертикальної), у кабельних лотках, у кабельних каналах.

Залежно від конструкції і призначення кабелі діляться на *Distribution* (дістрібьюшн) кабелі, *Breakout* (брейкаут) кабелі і *Riser* (райзер) кабелі [45 – 47, 50, 51, 55]. Типові конструкції цих кабелів наведені на рис. 3.14, 3.15.

Distribution кабелі на рис. 3.14,а і б містять кілька оптичних волокон у первинних щільних буферних покриттях, обгорнених арамідними нитками і поміщених усередині полімерної оболонки LSZH. Деякі конструкції для передання більшої міцності і запобігання перегинів містять центральний силовий елемент у вигляді склопластикового стрижня в полімерному покритті. Оптичні волокна в буферному покритті мають невисоку міцність, тому їх окінцівка проводиться безпосередньо при введенні кабелю в оптичний крос, муфту або патч-панель.

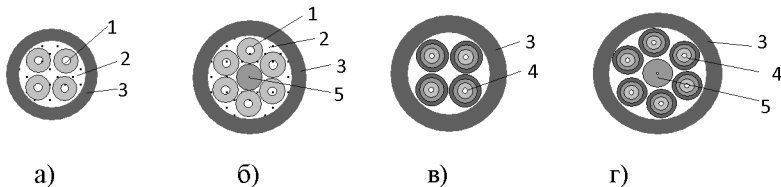


Рисунок 3.14 – Конструкції кабелів оптичних розподільних:  
а, б - кабелі Distribution; в, г - кабелі Breakout:

1 – оптичне волокно в буферному покритті, 2 – силовий елемент - арамідні нитки, 3 - зовнішня оболонка LSZH, 4 – мінікабель кабель Simplex, 5 – силовий елемент склопластиковий пруток у полімерному покритті

Breakout кабелі на рис. 3.14,в і г складаються з декількох мінікабелів Simplex, поміщених усередині полімерної оболонки LSZH. Для більшої міцності можливе використання центрального силового елемента. Конструкція кабелю дозволяє легко робити відводи з

мінікабелів Simplex, які забезпечуються, при необхідності, коннекторами для підключення до розподільних пристроїв.

Riser кабелі на рис. 3.15,а і б складаються з зовнішньої оболонки LSZH, посиленої периферійними силовими елементами зі склопластикових прутків.

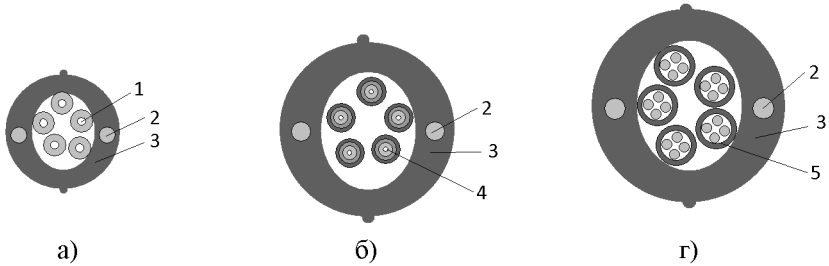


Рисунок 3.15 – Конструкції кабелів оптичних розподільних:  
а, б – кабелі Riser; в - кабель Riser Loose Tube:

1 – оптичне волокно в буферному покритті, 2 – силовий елемент – склопластиковий пруток у полімерному покритті, 3 - зовнішня оболонка LSZH,  
4 – мінікабель кабель Simplex, 5 – мікромодулі з оптичними волокнами

Усередині оболонки розміщуються або оптичні волокна в буферному покритті (див. рис. 3.15,а) або мінікабелі Simplex (див. рис. 3.15,б) або мікромодулі з оптичними волокнами (див. рис. 3.15,в). Кабель призначений для вертикальної прокладки усередині будинків між поверхами з використанням лотків, коробів. Конструкція кабелю дозволяє легко витягати оптичні волокна, мінікабелі або мікромодулі для підключення абонентів поверху.

Для розширення функціональних можливостей кабельних систем внутрішньої прокладки ряд компаній роблять комбіновані кабелі, конструкції яких поряд з оптоволоконном містять кручені пари з мідних ізольованих провідників.

Для прикладу в таблиці 3.9 наведені типові характеристики кабелів внутрішньої прокладки [45 – 47, 50, 51, 55].

Таблиця 3.9 – Розподільні кабелі внутрішньої прокладки

Найменування кабельного заводу і тип кабелю		Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
			розтягуюче, кН	роздавлююче, кН/см		
Distribution кабель розподільний						
МКФ	ОКР	до 24	0,5	0,3	4,5-8,6	22,0-60,2
ОКС 01	ОБОЄ	до 48	0,2-3,0	0,05-0,2	4,0-8,0	25,0-145,0
Інкаб	ОБР	до 144	0,4	0,1	4,7-11,2	21,0-98,0
	ОМР	до 144	0,2	0,1	4,7-10,7	21,0-79,0
СКО	ОКВ					
Елікс	БПР	до 12	0,08-0,15	0,25	5,0-8,5	23,0-50,0
Єврокабель	ОВНР	до 12	0,5-1,0	0,1	4,5-7,1	21,0-45,0
Breakout кабель розподільний						
МКФ	ОКБ	до 12	0,6	0,03	6,0-11,5	38,2-132,3
Елікс	БМСР	до 8	1,5	0,5	11,5-13,5	90,0-120,0
Riser кабель розподільний						
МКФ	ОКВ	до 24	1,0	2,0	8,5-10,5	63,8-91,1
ОКС 01	ОБП	до 48	0,2-1,5	0,1-0,3	5,5-13,5	30,0-180,0
Інкаб	ОБВ	до 48	0,4	0,08-0,2	6,5-13,5	42,0-160,0
СКО	ОКВ		0,5	0,8	6,5-13,5	32,0-160,0
кабель Riser Loose Tube розподільний						
МКФ	ОКВ	до 144	1,0	2,0	10,5-13,5	80,0-145,0
ОКС 01	ОМП	до 144	0,2-1,5	0,1-0,3	6,3-14,0	40,0-170,0
Інкаб	ОМВ	до 288	0,4	0,08-0,2	6,5-14,5	40,0-163,0
Єврокабель	ОВНВ	до 288	0,4	0,08	6,5-14,5	40,0-163,0

### 3.3 ОПТИЧНІ МІКРОКАБЕЛІ

Оптичний мікрокабель – це кабель зі зменшеним діаметром і вагою. Призначені мікрокабелі для прокладки методом пневмозадування в мікротрубках, що представляють собою захисні пластмасові трубки з діаметром від 5 до 16 мм і з товщиною стінок від 0,65 до 2 мм.

До мікрокабелів звичайно відносять кабелі зовнішньої і внутрішньої прокладки с зовнішнім діаметром не більш 11 мм [56]. Для прокладки в мікротрубках кабелю промисловістю випускаються спеціальні малорозмірні полегшені типи оптичного кабелю. Для прикладу на рис. 3.16 представлені конструкції

броньованих оптичних мікрокабелів, виготовлених НВП «Старлінк» [57], а на рис. 3.17 – конструкції діелектричних кабелів виробництва компанії YOFC [58]. Їхні основні характеристики наведено в таблиці 3.10.

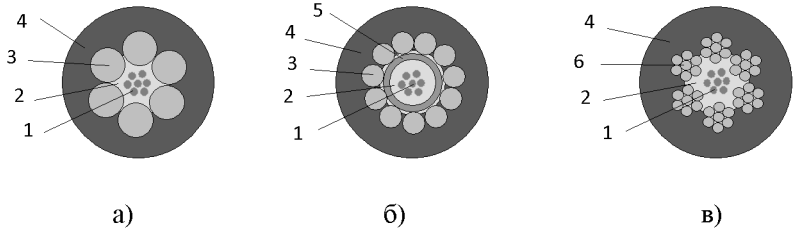


Рисунок 3.16 – Конструкції оптичних броньованих мікрокабелів: а – кабель СЛ-ОКМБ-03, б – кабель СЛ-ОКПБ, в – кабель СЛ-ОКМБ-01,2; 1 – оптичне волокно в буферному покритті, 2 – гідрофобне змащення, 3 – броня зі сталевого оцинкованого дроту, 4 – полімерна захисна оболонка, 5 – полімерна модульна трубка, 6 – броня у вигляді джгута з тонкого сталевого оцинкованого дроту

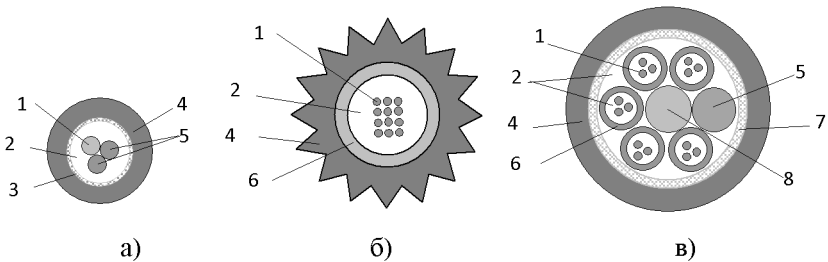


Рисунок 3.17 – Конструкції оптичних діелектричних мікрокабелів: а – кабель CF, б – кабель СУСXFY, в – кабель СУCFY: 1 – оптичне волокно в буферному покритті, 2 – гідрофобне змащення, 3 – обв'язка з арамідних ниток, 4 – полімерна захисна оболонка, 5 – корделі для додання округлої форми і механічної міцності, 6 – модульна трубка, 7 – арамідна оболонка, 8 – центральний пластиковий силовий елемент

Таблиця 3.10 – Оптичні мікрокабелі

Тип кабелю	Число ОВ	Припустиме навантаження		Діаметр, мм	Маса, кг/км
		розтя- гуюче, кН	роздав- лююче, кН/см		
СЛ-ОКМБ-01	до 12	1,5-9,0	0,3	2,8-6,4	19,3-89,0
СЛ-ОКМБ-02	до 12	1,5-2,5	0,5	4,5-5,1	45,0-62,0
СЛ-ОКМБ-03	до 12	4,0-5,0	1,0	4,0-5,0	39,0-59,0
СЛ-ОКПБ	до 16	2,7-7,0	1,0	5,0-7,0	46,7-97,0
CF	1	0,15	0,25	1,2±0,1	1,3
GYCXFY	до 12	>0,15	0,15	2,3±0,2	4,0±1,0
GYCFY	до 144	>0,15	0,15	5,2-8,0	22,0-55,0

Броньовані мікрокабелі призначені: для укладання в захисних мікротрубках у ґрунт; для самонесучого підвішування на опорах ліній зв'язку і по зовнішніх фасадах будинків із прольотами до 150 м; для прокладки в кабельній каналізації і усередині будинків і приміщень. Діапазон робочих температур від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , мінімальний радіус вигину – 30 мм. Оболонка кабелю виготовляється з полімерних матеріалів LSZH, стійких до зовнішніх впливів і не підтримуючих горіння.

Діелектричні кабелі, що представлені на рис. 3.17, призначені для інсталяції в захисні мікротрубки методом пневмозадудання при прокладці магістральних мереж, міських мереж і мереж доступу. Кабель CF допускає скручування в джгути перед вдуданням у мікротрубки, його мінімальний радіус вигину становить 30 мм. Кабель GYCXFY має рифлену оболонку, що підвищує ефективність його продувки через мікротрубки. Діапазон робочих температур кабелів від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , мінімальний радіус вигину кабелів GYCXFY і GYCFY – 10 зовнішніх діаметрів. Оболонка кабелів виготовляється з полімерних матеріалів LSZH, стійких до зовнішніх впливів і не підтримуючих горіння.

На основі оптичних мікрокабелів і мікротрубок будуються мікроволоконні кабельні системи, основу інфраструктури якої становить кабельна каналізація, утворена пакетами мікротрубок у загальній зовнішній захисній оболонці [56].

Кожний з типів оптичних кабелів, що випускаються промисловістю для зовнішньої і внутрішньої прокладки традиційними

методами, а також для створення сучасних мікрОВОЛОКОННИХ кабельних систем, має свої гідності і недоліками. Вибір конкретного типу кабелю визначається його призначенням, вимогами, пропонованими до його характеристик, умовами прокладки і експлуатації.

### **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Різновиди підвісних кабелів з виносним силовим елементом.
2. Різновиди підвісних самонесучих діелектричних кабелів.
3. Різновиди кабелів, вбудованих у грозозахисний трос.
4. Різновиди кабелів для прокладки в пластмасових трубах.
5. Різновиди кабелів для прокладки в кабельній каналізації.
6. Різновиди кабелів з одношаровою бронєю для прокладки в ґрунт.
7. Різновиди кабелів із двошаровою бронєю для прокладки в ґрунт.
8. Різновиди підводних оптичних кабелів.
9. Різновиди кабелів оптичних абонентських.
10. Різновиди кабелів оптичних розподільних.
11. Різновиди оптичних мікрокабелів

## 4 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ

Прокладка волоконно-оптичного кабелю (ВОК) проводиться на підставі проектної документації, яка містить у собі визначення траси та технологію прокладки, види використовуваного кабелю, устаткування, місця розміщення регенераційних пунктів, оптичних підсилювачів і оптичних муфт. Проектна документація містить також нормативно-технічні вимоги на кліматичні умови прокладки і експлуатації кабелю, на рівень розтягувальних та роздавлюючих зусиль, величин радіусів вигину.

В залежності від характеру траси можливі наступні основні різновиди прокладки кабелю:

- прокладка в ґрунті;
- прокладка в кабельній каналізації;
- підвішування на опорах повітряних ліній зв'язку та електропередачі;
- прокладка через водні перешкоди;
- прокладка усередині будинків і приміщень.

Після підготовки траси для прокладки кабелю по трасі прокладається кабель або захисні пластмасові трубки, призначені для подальшої інсталяції в них кабелю.

### 4.1 ЗАХИСНІ ПЛАСТМАСОВІ ТРУБКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ПРОКЛАДКИ

Захисні пластмасові трубки (ЗПТ) застосовуються для захисту прокладеного в них ВОК від зовнішніх впливів, включаючи гризунів [1, 3, 9, 33, 34].

У якості ЗПТ служить пластмасова трубка з поліетилену високої щільності (*HDPE -high density polyethylene*) із зовнішнім діаметром від 25 до 63 мм і з товщиною стінки 2 - 5 мм. На внутрішній поверхні ЗПТ для зниження тертя при протяганні кабелів присутній антифрикційний шар або рідке мастило.

Для прикладу в таблиці 4.1 наведені основні характеристики ЗПТ виробництва ЗАТ «Пластком» [59].

Трубки стійкі до удару з енергією 132 г, мінімальний радіус вигину трубок - 10 зовнішніх діаметрів, коефіцієнт тертя по внутрішній поверхні не перевищує 0,1. Температура експлуатації від мінус 60<sup>0</sup>С до плюс 60<sup>0</sup>С, термін експлуатації – 50 років. Для

прокладки в будинках і приміщеннях трубки виготовляються з LSZH-матеріалу.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики ЗПТ

Типорозмір	Зовнішній діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Довготривале розтягувальне навантаження, кН	Розрахункова погонна маса, кг/км	Стійкість на зминання, МПа	Надлишковий внутрішній тиск, МПа	Будівельна довжина, км
25/2,0	25,0	2,0	1,2	150	1,5	1,5	4000
32/2,5	32,0	2,5	1,9	241	1,3	2,0	3000
40/3,0	40,0	3,0	2,2	358	2,1	2,0	2000
50/4,0	50,0	4,0	2,8	589	1,1	2,0	1000
63/4,0	63,0	4,0	3,2	691	1,3	2,0	500
32/3,0	32,0	3,0	4,6	280	1,4	2,0	3000
40/3,5	40,0	3,5	5,1	412	2,0	2,0	2000
50/4,5	50,0	4,5	5,9	656	0,7	2,0	1000
63/5,0	63,0	5,0	7,3	924	1,4	2,0	700

Будівельні довжини ЗПТ можуть з'єднуватися за допомогою спеціального обладнання, що забезпечує зварювання трубок і герметизацію місця стику.

#### 4.1.1 Інсталяція кабелю в захисні пластмасові трубки

Інсталяція ВОК у ЗПТ може бути виконана вручну за допомогою троса, з прикріпленим до нього кабелем, або методом пневмопрокладки [1, 3, 9, 33, 34]. Затягування за допомогою троса застосовується при довжині прольотів до 1 км і може здійснюватися як вручну, так і з використанням механізмів у вигляді кабельних лебідок із пристроями, що контролюють силу натягу. Метод пневмопрокладки застосовується при прокладці ВОК на великі відстані, при цьому можлива прокладка відразу всієї будівельної довжини ВОК, типові значення яких звичайно становлять 2, 4 і 6 км. Методи пневмопрокладки підрозділяються на безпоршневий і поршневий. Безпоршневий метод здійснюється спеціальними компресорами, що створюють тиск стисненого повітря від 0,8 до 1,2 МПа. Протягання кабелю забезпечується за рахунок інтенсивного повітряного потоку, що протікає в ЗПТ. При поршневому методі прокладки до кабелю прикріплюється парашут (поршень). Протягання

ВОК відбувається під дією тиску повітряного потоку на парашут, створюваного компресором, при одночасній механічній подачі кабелю, яку забезпечує спеціальний пристрій уведення кабелю.

#### 4.1.2. Малорозмірні захисні пластикові трубки

Малорозмірні захисні пластикові трубки (МЗПТ) – мікротрубки (**Micro Ducts**) мають зовнішній діаметр від 5 до 16 мм при товщині стінок від 0,65 до 2,0 мм. Мікротрубки призначені для інсталяції в них мікрокабелів і оптичних волокон у щільному буферному покритті методом пневмозадувки [56, 58, 60, 61].

Для прикладу в таблиці 4.2 наведені основні характеристики МЗПТ виробництва компанії YOFC [58].

Таблиця 4.2 – Основні характеристики захисних пластикових мікротрубок

Типорозмір ЗПТ	Зовнішній діаметр, мм	Мінімальний внутрішній діаметр, мм	Мінімальна товщина стінки, мм	Міцність на розтягання, МПа	Внутрішній тиск, що витримується, МПа	Надлишковий внутрішній тиск, МПа	Кільцева твердість, Н/мм <sup>2</sup>
5/3,5	5,0±0,10	3,4	0,65	20	1,2	1,5	6,3
7/5,5	7,0±0,10	5,4	0,65	20	1,2	2,0	6,3
7/3,5	7,0±0,10	3,4	1,65	20	1,2	2,0	6,3
8/6,0	8,0±0,10	5,9	0,9	20	1,2	2,0	6,3
10/8,0	10,0±0,10	7,9	0,9	20	1,2	2,0	6,3
12/10,0	12,0±0,10	9,9	0,9	20	1,2	2,0	6,3
12/8,0	12,0±0,10	7,9	1,9	20	1,2	2,0	6,3
14/12,0	14,0±0,10	11,9	0,9	20	1,2	2,0	6,3
14/10,0	14,0±0,10	9,9	1,9	20	1,2	2,0	6,3
16/14,0	16,0±0,10	13,9	0,9	20	1,2	2,0	6,3

Зовнішня оболонка мікротрубок являє собою поліетилен високої щільності (HDPE), внутрішній шар – силіконове покриття з коефіцієнтом тертя менше 0,1. Температура експлуатації мікротрубок від мінус 10°С до плюс 50°С. Для прокладки в будинках і приміщеннях мікротрубки виготовляються з LSZH-матеріалу.

### 4.1.3 МікрОВОЛОКОННІ КАБЕЛЬНІ СИСТЕМИ

МікрОВОЛОКОННІ КАБЕЛЬНІ СИСТЕМИ (МКС) являють собою кабельну інфраструктуру, кабельні канали якої утворюють системи мікротрубок [56, 60, 61]. На етапі будівництва кабельної системи проводиться прокладка пакетів мікротрубок. У місцях відгалужень устанавлюються спеціальні Y-коннектори, через які виконуються відводи з однієї мікротрубки або пучка мікротрубок необхідного обсягу. Відгалуження у вигляді порожніх мікротрубок підводять безпосередньо до абонентського пристрою. У створеній системі частина кабельних каналів залишається вільними для наступного нарощування її ємності, а в інші інсталується оптичний мікрокабель за допомогою пневматичної задувки. При задувці мікрокабель проходить по прокладеному трубопроводу від початкової до кінцевої точки через усі повороти, що зустрічаються на трасі відгалуження. Середня швидкість задувки мікротрубок або мікрокабелю становить близько 30 м/хв. на відстані до 1500 км.

Для будівництва МКС можуть використовуватися різні способи прокладення: прокладення ЗПТ із наступною інсталяцією в них мікротрубок; прокладення збірок мікротрубок; спільне укладання в ЗПТ мікротрубок і збірок мікротрубок [56, 60, 61].

У ЗПТ інсталується тонкостінні трубки одного або різного діаметру. Кількість і діаметр інстальованих мікротрубок визначається технічним проектом. Для запобігання механічних ушкоджень при інсталяції мікротрубок у ЗПТ вони герметизуються та в них через ніпель накачується повітря під тиском від 0,5 до 1,0 МПа.

Збірки мікротрубок (**Multi Ducts**) виконуються з товстостінних або тонкостінних трубок. Збірки можуть містити від 1 до 24 трубок. Тонкостінні трубки розміщуються усередині посиленої захисної оболонки. Для товстостінних трубок в якості загальної оболонки використовується тонкий гнучкий чохол з поліетилену [56, 60, 61]. Трубки в складанні офарблюються в різні кольори, для додаткової ідентифікації трубок на їхній зовнішній поверхні через кожні 10 см наносяться номери.

Кабельною промисловістю випускаються різні модифікації збірок, зібраних із трубок одного діаметра або у вигляді комбінації трубок різного діаметра. Конструкції збірок мікротрубок, для прикладу, наведені на рис. 4.1.

Монтаж МКС проводиться з використанням спеціальних коннекторів і муфт, що забезпечують надійне і герметичне з'єднання трубок.

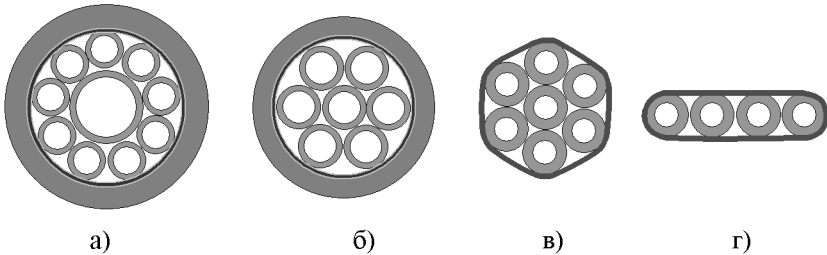


Рисунок 4.1 – Основні види збірок мікротрубок:

а, б – тонкостінні трубки в товстій оболонці; в, г – товстостінні трубки в тонкій оболонці

Відсутність необхідності установки оптичних муфт у місцях відгалужень кабелю є істотною перевагою МКС у порівнянні із традиційними технологіями прокладки. Також її гідністю є простота інсталяції та деінсталяції мікрокабелю, оскільки кожен кабель прокладається, як правило, в окремій трубці.

## 4.2 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ В ҐРУНТІ

У ґрунт укладається кабель із бронепокривом, а також захисні пластмасові трубки, у які потім інсталюється кабель. При прокладці ВОК у скельних ґрунтах, у ґрунтах з мерзлотними явищами, через болота, на переходах через судноплавні ріки і водойми використовується кабель із найбільш високими значеннями допустимого розтяжного зусилля – від 80,0 кН і вище.

ЗПТ забезпечують додатковий механічний захист кабелю, що дозволяє використовувати для прокладки в ґрунт полегшений ВОК, що не містить металевих броньових покриттів, а також використовувати повністю діелектричний кабель на ділянках траси, схильних до електромагнітних впливів.

Підготовка траншей у ґрунті для укладання в них ВОК або ЗПТ здійснюється різними способами [1, 3, 9, 33, 34]:

- вручну;

- за допомогою ножових кабелеукладачів;
- за допомогою спеціальних бурових пристроїв;
- з використанням спеціальних фрез.

Прокладка вручну проводиться на ділянках траси, що перетинають підземні комунікації, на особливо небезпечних або стиснутих ділянках. Риття траншей здійснюється екскаватором або траншеєкопачем. Укладання кабелю в траншею проводиться вручну або за допомогою кабельної лебідки з контролем зусилля натягу і радіуса вигину кабелю.

Основним способом прокладки ВОК у ґрунт є безтраншейна прокладка за допомогою ножового кабелеукладача, робочі органи якого прорізають у ґрунті вузький проріз, глибиною до півтора метра і шириною близько 80 мм. При цьому одночасно укладають ВОК або ЗПТ, виключаючи їх механічні ушкодження. У ґрунтах значної щільності, а також при наявності на трасі кам'янистих включень і інших перешкод, проводиться попередня пропорка (розпушування) ґрунту за допомогою пропорщиків.

Поверх кабелю або ЗПТ, покладених у траншею, рекомендується поміщати із заглибленням не менше 30 см маркерну стрічку або електронні маркери, які можуть бути виявлені за допомогою локаторів маркерів.

При перетині траси шосейних доріг, залізниць, водних перешкод, аеродромів, сільськогосподарських угідь, природоохоронних зон і інших об'єктів для прокладки ВОК використовується технологія горизонтально-похилого буріння. Ця технологія з високою точністю дозволяє виконати підземні переходи на глибині до 30 м і довжиною до 1 км, завдяки наявності в головці бура прийомнопередавального пристрою, що дозволяє на відстані управляти траєкторією буріння свердловини. На початковому етапі буріння проводиться попереднє прорізання тонкої пілотної свердловини під перешкодою. Потім головка бура знімається зі штанги бура і на її місце встановлюється риммер – пристрій, що розширює свердловину при зворотному ході. За один або кілька проходів бура та риммера свердловину розширюють до необхідного діаметра. Перед останнім проходом риммера, до нього через вертлюг (пристрій, що усуває обертовий рух прикріпленого вантажу) приєднується ЗПТ, яка затягується в сформований канал при зворотному ході риммера.

Для проходки горизонтальних свердловин в однорідних ґрунтах на відстань до 50 метрів використовуються спеціальні пневмопробійники, які пробивають свердловину за рахунок ущільнення ґрунту і одночасно простягають ЗПТ.

У населених пунктах для прокладки ВОК під дорожнім покриттям уздовж тротуарів і бордюрів застосовується мікротраншейна (**Micro-trenching**) технологія прокладки [56, 61, 62]. Мікротраншея глибиною 70-400 мм, шириною 10-30 мм прорізається в дорожньому покритті за допомогою спеціального пристрою, який містить фрезу для прорізання дорожнього покриття та пристосування для видалення дрібних фракцій покриття і ґрунту. Невелика глибина мікротраншей дозволяє прокладати ВОК над існуючими міськими підземними комунікаціями.

У мікротраншей рекомендується укладати DB або DBR мікротрубки. DB мікротрубки (**Direct burial micro-duct**) мають посилену оболонку, розраховану на тиск ґрунту, і можуть містити водонепроникний алюмінієвий бар'єр або вологоблокуючу стрічку. DBR мікротрубки (**Direct burialreinforced micro-duct**) мають додаткову оболонку, що збільшує міцність на розрив. Після укладання мікротрубок у мікротраншею, її рекомендується залити легким бетоном і відновити зверху дорожнє покриття. Наступна інсталяція оптичного мікрокабелю в мікротрубки проводиться методом пневмозадувки.

#### 4.3 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ ЧЕРЕЗ ВОДНІ ПЕРЕШКОДИ

Прокладка ВОК через водні перешкоди проводиться різними способами: у свердловинах, пробурених у ґрунті під поверхнею дна; у траншеях, проритих у донному ґрунті; безпосередньо по поверхні дна [9, 63]. Для прокладки під водою застосовуються спеціальні типи оптичного кабелю, які володіють посиленням броньовим та гідрозахистом, що забезпечує підвищену стійкість до довгочасних розтягувальних і роздавлюючих зусиль, а також до надлишкового гідростатичного тиску. При прокладці на значні дистанції на морських і океанських переходах використовуються підводні оптичні кабелі з вмонтованими мідними провідниками для підведення

електроживлення до підводних оптичних підсилювачів і регенераційних пунктів.

Для буріння свердловин під водними перешкодами шириною до 1 км і для укладання в них кабелю використовується технологія горизонтально-похилого буріння, яка аналогічна застосовуваній для підземної прокладки. У свердловину затягаються ЗПТ діаметром від 40 до 110 мм, які утворюють кабельний канал. Глибина прокладки кабельного каналу в русловій частині ріки не менше 3 м від відмітки можливого розмиву дна.

При укладанні кабелю в траншеї, прориті в донному ґрунті, рекомендується попередньо прокласти трубопровід зі ЗПТ, а на особливо небезпечних переходах, зі сталевих труб. Сталеві труби з'єднуються по різьбі і герметизуються за допомогою зварювання.

На мілководді траншеї для укладання кабелю можуть бути прориті за допомогою екскаватора, встановленого на понтоні. На незв'язних та мало зв'язних донних ґрунтах із глибиною водойму до 8 – 12 м можливо застосування гідромоніторів, за допомогою яких розмивається ґрунт із утвором траншеї глибиною до 2 м.

Основний способом прокладки кабелю по дну водойм – це прокладка з використанням підводних ножових кабелеукладачів, які застосовуються на глибинах до 6 м і проривають траншею шириною 0,1 - 0,2 м, глибиною 0,7 – 2,0 м і одночасно укладають у неї кабель або ЗПТ. Перед прокладкою кабелю кабелеукладачем необхідно зробити двох-трьох разову пропорку дна в створі переходу. Переміщення кабелеукладача як і пропорщика проводиться за допомогою тросів і тракторних лебідок, встановлених на протилежних берегах, або з використанням тягових зусиль тракторів, а при великій ширині водного переходу – за допомогою судна, що буксирує кабелеукладач або пропорщик.

Прокладка кабелю через ріки, озера і водойми глибиною до 3 м проводиться із заглибленням близько 1 м. На глибинах більш 8 м допускається прокладка без заглиблення безпосередньо по поверхні дна. Укладання кабелю в трубопровід, що проходить по дну або в донному ґрунті, здійснюється методом пневмозадувки або протягуванням задалегідь покладеного в трубопровід капронового джгута із прикріпленням до нього через вертлюг кабелем.

У берегах підводний кабель укладають на глибині не менше 1 м до місця стику з підземним кабелем. Місце стику розташовують у незатоплюваній частині на відстані не менше 30 м від урізання води.

У місці стику встановлюється кабельний колодязь, у який через ЗПТ, а в межі населених пунктів при гранітному або бетонному облицюванні берегів, через сталеву трубу вводиться підводний кабель. Труби повинні обов'язково заглиблюватися в дно водойми на глибину не менше 1 м.

У прибережних зонах морів і відкритому морі використовуються для прокладки кабелю спеціально оснащені баржі і судна - кабелеукладачі. Прокладка кабелю в прибережній зоні проводиться за допомогою буксируваних пропорщиків і кабелеукладчиків із заглибленням у підводний ґрунт в особливо небезпечних зонах до 3 м. Якщо заглиблення кабелю неможливо, то поверх кабелю укладаються мішки з піском, які потім накриваються спеціальними плитами або засипаються каменями.

У відкритому морі кабель укладається на поверхню дна. При морській та океанській прокладці на великі дистанції будівельної довжини підводного оптичного кабелю, що складає від 5 до 50 км, виявляється недостатньою. З'єднання бухт кабелю проводиться на судні-кабелеукладачі за допомогою спеціальних стикувальних коробок (сплайс-боксів), які забезпечують герметичне з'єднання кабелів, витримують розтягувальні навантаження до 200 кН, зовнішній гідростатичний тиск до 60-80 МПа та забезпечують вільне проходження, завдяки малим розмірам, через колеса корабельної кабелеукладчої машини [63].

#### **4.4 ПІДВІСКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ**

Для підвіски ВОК використовуються різні опори: опори ліній електропередач (ЛЕП), контактної мережі і автоблокування залізничного транспорту, опори силових мереж наземного електричного транспорту, опори повітряних ліній зв'язку (ПЛЗ) і освітлювальної мережі, а також зовнішні фасади будинків і споруджень.

Спосіб підвіски визначається видом опори і типом застосовуваного кабелю. Розрізняють наступні способи [1, 3, 9, 33, 34]: підвіска самонесучого ВОК; підвіска ВОК із вбудованим несучим тросом; підвіска ВОК із кріпленням до зовнішнього несучого троса; підвіска грозотроса із вбудованим ВОК; навивка ВОК на фазні і грозозахисні дроти.

Кабель на опорах контактної мережі і автоблокування рекомендується прокладати з польової сторони. Підвіска кабелю здійснюється за допомогою кронштейнів, установлених на опорах. Мінімальний розмір вильоту кронштейна повинен виключати зіткнення ВОК з частинами контактної мережі, що перебувають під напругою, під час вітрового зближення. При підвішені ВОК, конструкція якого містить металеві елементи, а також при наявності над повністю діелектричним кабелем проводів з напругою понад 0,4 кВ, усі кронштейни приєднуються до захисного ланцюга заземлення. На опорах автоблокування кабель рекомендується підвішувати нижче високовольтних проводів, при цьому відстань від кабелю до поверхні землі по вертикалі при найбільшій стрілі прогину повинна бути не менше 5 м у ненаселеній місцевості, та не менше 6 м у населеній.

На опорах ПЛЗ і освітлювальної мережі підвіска ВОК повинна розташовуватися нижче прокладених проводів. Самонесучий кабель, кабель із вбудованим тросом або несучий трос, кріпляться до спеціальних консолей, які встановлюються на опорах на відстані не менше 350 мм від нижнього гака або траверси. До несучого троса кабель прикріплюється за допомогою підвісів, виконаних з оцинкованої тонколистової сталі. Підвіси повинні вільно переміщатися по сталевому тросу і щільно охоплювати кабель. Висоту установки консолей підбирають такою, щоб відстань від стріли прогину кабелю до землі становила не менше 4,5 метрів

На опорах ЛЕП використовуються наступні способи підвіски ВОК: підвіска самонесучого повністю діелектричного кабелю, підвіска кабелю в грозозахисному тросі і навивка кабелю на фазні або грозозахисні дроти. Підвіска самонесучого діелектричного ВОК проводиться шляхом його закріплення на нижньому траверсі опор і використовується як на низьковольтних, так і на високовольтних лініях. На ЛЕП напругою 110 кВ і вище застосовується підвіска спеціальних типів кабелю, конструкції яких являють собою грозозахисний трос із розташованими усередині одним або декількома оптичними модулями в сталевій оболонці. Такий кабель підвішується замість демонтованого грозозахисного троса із застосуванням типової арматури його кріплення і заземлення. Використовується також прокладка повністю діелектричного кабелю малого діаметра шляхом навивки його на фазні або грозозахисні дроти ЛЕП низького (від 6 кВ), середнього і високого (понад 110 кВ) напруг [1, 3, 9, 33, 34]. Навивка здійснюється за допомогою спеціального пристрою, який

складається з навивочної машинки і буксировщика, що переміщає її по дроту.

Для монтажу ВОК на опорах використовуються спеціальна натяжна і підтримуюча арматури, яка нейтралізує вплив на кабель екстремальних здавлюючих сил і забезпечує високу стійкість до розтяжних зусиль.

#### **4.5 ПРОКЛАДКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ В КАБЕЛЬНІЙ КАНАЛІЗАЦІЇ**

Прокладка ВОК у кабельній каналізації здійснюється в населених пунктах, при цьому, як правило, використовується наявна кабельна інфраструктура. Кабельна каналізація являє собою конструкцію, що складається із труб і оглядових колодязів, оснащених консолями, кронштейнами та стойками для укладання, кріплення кабелю, а також сполучних муфт. Кабельна каналізація прокладається з розрахунку максимального прольоту між оглядовими колодязями від 40 до 130 м. Колодязі з'єднуються між собою однієї або декількома трубами діаметром 100 мм із азбоцементу або пластмаси. Труби укладаються на глибину від 0,4 до 1,5 м.

Для прокладки в кабельну каналізацію, як правило, використовуються ВОК з гідрофобним захистом і із бронею зі сталеві гофрованої стрічки, а у випадку наявності електромагнітних впливів, повністю діелектричний кабель із бронею зі склопластикових стрижнів. Кабель може бути покладений безпосередньо у вільні труби кабельної каналізації, однак для більш ефективного використання каналів кабельної каналізації в них рекомендується попередньо прокладати ЗПТ. При необхідності ЗПТ можуть бути прокладені в трубі кабельної каналізації, частково зайнятій мідними кабелями.

Захисні пластмасові труби, забезпечуючи додатковий захист, дозволяють використовувати для інсталяції в них полегшені конструкції ВОК, а прокладка додаткових резервних захисних труб спрощує наступне нарощування ємності кабельної системи.

Прокладка ВОК по кабельній каналізації здійснюється різними способами: вручну або за допомогою кабельних лебідок з контролем тягового зусилля; шляхом пневмозадувки. Основним способом є пневмозадувка кабелю в ЗПТ. При ручному способі прокладки використовується пристрій протягання канатів. Найчастіше це

склопластиковий пружний пруток діаметром 11 мм і довжиною до 150 м, намотаний на барабан. Пруток спочатку простягається через канал, а потім виводиться з каналу разом із прикріпленим до нього кабелем. При протяганні кабелю використовуються компенсатори крутіння, направляючі пристрої, розкочувальні ролики, що знижують коефіцієнт тертя та запобігають ушкодження ВОК на ділянках вигину.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Захисні пластмасові трубки, призначення, конструкція.
2. Способи інсталяція ВОК у ЗПТ.
3. Малорозмірні захисні пластикові трубки, призначення, конструкції.
4. Мікроволоконні кабельні системи, призначення, конструкції.
5. Способи прокладки мікроволоконних кабельних систем.
6. Способи підготовки траншей для укладання ВОК у ґрунті.
7. Мікротраншейна технологія прокладки ВОК.
8. Особливості прокладки ВОК через ріки, озера і водойми.
9. Особливості прокладки ВОК у прибережних зонах морів і відкритому морі.
10. Особливості підвіски ВОК на опорах контактної мережі і автоблокування.
11. Особливості підвіски ВОК на опорах повітряних ліній зв'язку і освітлювальної мережі.
12. Особливості підвіски ВОК на опорах ЛЕП.
13. Особливості прокладки ВОК у кабельній каналізації.

### 4.6 ОПТИЧНІ МУФТИ

Муфта оптична – пристрій, призначений для з'єднання ВОК і захисту місця з'єднання від механічних впливів і впливу вологи [1, 3, 9]. Муфти, залежно від характеру траси прокладки кабелю укладаються в ґрунт, у кабельну каналізацію, на дно водойм, підвішуються на опорах ЛЕП і ПЛЗ, встановлюються в будинках і приміщеннях. По способу введення кабелю в муфту, вони підрозділяються на тупикові, прохідні і універсальні. У тупиковій муфти кабельні введення перебувають із одного боку, у прохідній – із протилежних сторін. Універсальна муфта має кабельні введення з

різних сторін, невикористовуванні введення закриваються заглушками. Конструкції муфт містять, як правило, три і більш кабельні введення, що дозволяє їх використовувати в якості сполучних і розподільних муфт. Герметизації кабельних введень у муфтах може виконуватися різними способами: за допомогою гумових або силіконових ущільнювачів; герметизуючих мастик; термоусадних трубок. Корпус муфт виготовляється з удароміцного пластику або металу. Герметизація з'єднання кришки або кожуха муфти з її корпусом виконується з використанням гумових або силіконових ущільнювачів або термоусадних трубок з ущільненням місця герметизації за допомогою болтів або хомутів.

Конструкція оптичної муфти містить наступні елементи:

- корпус муфти із кришкою;
- деталі для закріплення кабелю і його силових елементів;
- касети для укладання та захисту зварних або механічних з'єднань оптичних волокон;
- гільзи КДЗЗ (комплект для захисту зварювання) для захисту місць зварювання волокон;
- деталі для заземлення електропровідних елементів кабелю.

Промисловістю випускаються різноманітні типи оптичних муфт, що відрізняються конструкцією та призначенням.

#### **4.6.1 Касети оптичних муфт**

Одним з основних елементів оптичної муфти є касета, яка призначена для укладання і закріплення оптичного волокна, захисту місць зрощування волокон, забезпечення при укладанні волокон радіусів їх вигину не менше 30 мм, зберігання технологічних відрізків волокна, необхідних для монтажу і ремонту. Касети мають різне конструктивне виконання. Для прикладу на рис. 4.2 представлена касета КВ виробництва ЗАТ «Зв'язокбуддеталь» [64]. Як видно з рисунка, волокна 2 оптичного модуля 1 кілька раз покладені по периметру касети для забезпечення технологічного запасу 4. Місця зварювання волокон захищені гільзами КДЗЗ 3, які складаються з металевого або полімерного стрижня, клейової трубки і термоусадної трубки. При нагріванні клейова трубка розплавляється і герметизує місце зварювання, а термоусадна трубка зменшується по зовнішньому діаметру від 3,1 до 2,4 мм, утворюючи оболонку волокон. Стрижень

забезпечує твердість з'єднання в місці зварювання. Гільзи із з'єднаними між собою волокнами укладаються в прорізі ложемента 5 і закріплюються. Зверху касета закривається прозорою кришкою.

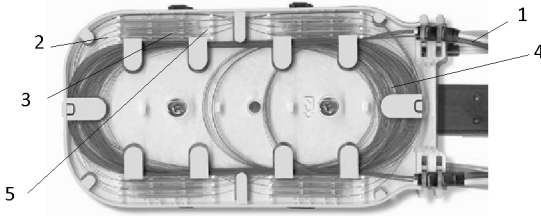


Рисунок 4.2 – Касета оптичної муфти:

- 1 – оптичний модуль, що вводиться, 2 – оптичні волокна, 3 – гільзи КДЗЗ, 4 – технологічний запас волокна, 5 – ложемент для укладання і закріплення волокон

У муфтах може встановлюватися одночасно кілька касет. Касети прикріплюються друг до друга, утворюючи стопку касет. Стопка потім закріплюється на кронштейні муфти.

#### 4.6.2 Муфти оптичні міські

Муфти оптичні міські (МОМ) містять у собі наступні різновиди: муфти типу МОМ-С, муфти типу МОМ-У і муфти типу МОМ-Спліт. Муфти призначені для зрощування і монтажу магістральних, внутрішньоозонових, міських і внутрішньооб'єктових кабелів з оболонками діаметром від 6 до 21 мм, у тому числі кабелів із бронєю зі сталеві гофрованої стрічки.

Прохідна муфта МОМ-С (муфта оптична міська стандартна) застосовується для установки в типових колодязях кабельної каналізації, а також у міських колекторах на стандартних консолях. Конструкція муфти наведена на рис. 4.3

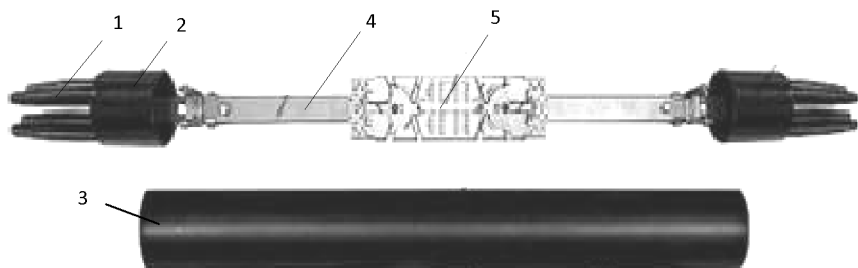


Рисунок 4.3 – Конструкція муфти МОМ-С:

1 – патрубкі, 2 – оголовник, 3 – кожух у вигляді пластмасової труби, 4 – лоток металевий із кронштейнами для кріплення центрального силового елемента кабелю, 5 – касета ДО24-4525 із кришкою

У конструкції муфти круглі патрубкі 1 на оголовнику 2 мають ступінчасту форму з різними діаметрами. Зріз патрубків проводиться в перетині, який відповідає діаметру кабелю, що вводиться. Усі патрубкі муфти оснащені індивідуальними вузлами кріплення центрального силового елемента (ЦСЕ) або периферійних силових елементів кабелю. Герметизація введень кабелів і місць з'єднання кожуха 3 з оголовником здійснюється за допомогою термоусадних трубок. Касета 5 типу ДО24-4525 на 24 ОВ є базовою касетою для муфти МОМ-С. Інша базова касета типу ДО48-4525 має ємність на 48 ОВ. Можлива установка чотирьох касет ДО24-4525 для збільшення ємності муфти до 96 ОВ або трьох касет ДО48-4525 із загальною ємністю 144 ОВ.

Габаритні розміри муфти 90x1148 мм, маса 2,3 кг, кількість патрубків в оголовнику від 2 до 4. На основі конструкції муфти МОМ-С випускаються її модифікації: муфта типу МОМ-У, яка укорочена до довжини 920 мм і муфта типу МОМ-Т, тупикова з одним оголовником.

Муфта МОМ-Спліт призначена для установки в кабельній каналізації, колекторах, у підвалах і на горищах будинків. Її конструкція зі знятою кришкою наведена на рис. 4.4.

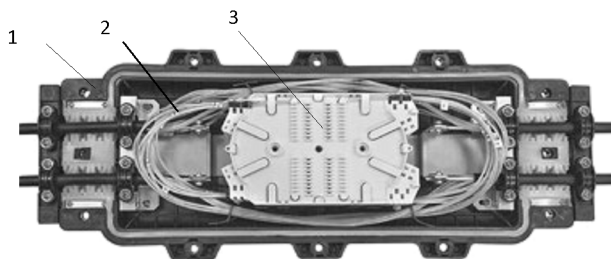


Рисунок 4.4 – Конструкція змонтованої муфти Міг-Спліт зі знятою кришкою:

1 – корпус, 2 – оптичні модулі, 3 – касета КТ-3645 ємністю 36 ОВ

Герметичність муфти між корпусом і кришкою забезпечується прокладками зі спеціального силіконового матеріалу і затягуванням місць ущільнення болтами. Усередині корпусу встановлено лоток з нержавіючої сталі, на якому розміщуються касети типу КТ-3645 і вузли кріплення кабелів і їх ЦСЕ. Муфта допускає введення до 4 кабелів діаметром від 8 до 17 мм. У невикористованні кабельні введення встановлюються заглушки. Габарити муфти 53x210x105 мм, вага 4,2 кг.

Температура експлуатації муфт типу МОМ від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  при відносній вологості до 100%, зусилля здавлювання 1 кН/100 мм, удароміцність 10 г.

#### 4.6.3 Муфти тупикові оптичні

Типовий зовнішній вигляд муфт тупикових оптичних типу МТОК представлено на рис. 4.5. Для забезпечення герметичності з'єднання оголовника 2 з кожухом 4 застосовуються два способи. Перший спосіб механічний за допомогою пластмасового хомута 3 із клямкою або сталевого хомута під гвинт, другий - за допомогою термоусадної трубки і пластмасових хомутів. Кожух виконується з удароміцної пластмаси або з нержавіючої сталі. Оголовник 2 містить патрубкі 1. Патрубкі мають ступінчатий переріз, що дозволяє підібрати місце зрізу під діаметр кабелю. Оголовник може оснащуватися патрубком овальної форми для укладання транзитного кабелю.

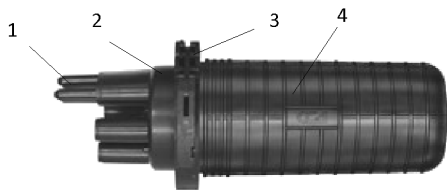


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд муфти оптичної тупикової:  
1 – патрубки, 2 – оголовник, 3 – хомут, 4 - кожух

У конструкціях муфт застосовуються 7 різновидів оголовників типів А, Б, В, Г, К, Л, М. Усередині муфти знаходяться касети, металевий або пластмасовий кронштейн для кріплення касет, деталі для кріплення елементів кабелів. Для прикладу на рис. 4.6 зображена типова внутрішня конструкція муфт МТОК.

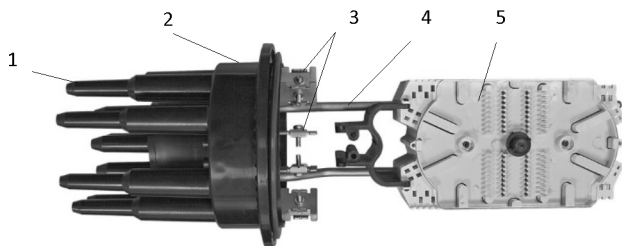


Рисунок 4.6 – Конструкція муфти зі знятим кожухом:  
1 – патрубки, 2 – оголовник, 3 – деталі кріплення елементів кабелю, 4 - кронштейн для кріплення касет, 5 - касета

Температура експлуатації від  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість 100%, зусилля здавлювання 10 кН/100 мм, удароміцність 10 г.

За призначенням муфти МТОК підрозділяються на підвісні, універсальні та магістральні.

**Підвісні (внутрішньозонові) муфти** типу МТОК-ГЗ, МТОК-Л6 і МТОК-Л7 призначені для зрощування і монтажу підвісних самонесучих ВОК, підвісних ВОК з виносним силовим елементом, а також ВОК, які застосовуються для укладання в кабельну каналізацію та у захисні поліетиленові труби, включаючи кабель із бронєю зі сталеві гофрованої стрічки. Муфти дозволяють вводити кабель діаметром від 5 до 20 мм. Підвісні муфти можуть установлюватися на

опорах усіх видів, а також на дахах і горищах будинків. З додатковим захистом муфти можлива її установка в колодязях кабельної каналізації і у підземних контейнерах. Герметизація кожуха з оголовником механічна з використанням пластмасового хомута. Кожух і кронштейн для установки касет пластмасові. Ступінчасті патрубкі мають звужені кінці, які призначені для введення малорозмірного кабелю.

Муфта МТОК-Г3 стандартного розміру з габаритами 488x215 мм, вага 3,0 кг. Можлива установка до 8 касет з ємністю до 288 зварних з'єднань. Оснащена оголовником типу Г, який має 2 круглих патрубка діаметром 20 мм, 4 – діаметром 16 мм, а також має один патрубок овального перерізу, на якому розташовані 4 круглих патрубка діаметром 10 мм. При використанні овального патрубка круглі патрубки зрізуються.

Муфта МТОК-Л6 малогабаритна з розмірами 416x188, вага 1,3 кг. Можлива установка до 3 касет з ємністю до 108 зварних з'єднань.

Муфта МТОК-Л7 малогабаритна укорочена з розмірами 324x188 мм, вага 1,0 кг. Ємність муфти до 48 зварних з'єднань

Муфти МТОК-Л6 і Л7 оснащені оголовником типу Л, що мають 2 круглих патрубка діаметром 16 мм, 2 – діаметром 20 мм, і один овальний патрубок.

**Універсальні муфти** типу МТОК-В3, МТОК-В4, МТОК-К6 і муфта МТОК-ББ призначені для зрощування оптичних кабелів з різними видами броні і силових елементів, включаючи кабелі з металевим гофрованим бронепокровом і бронепокровом з металевого дроту, крім кабелів для підводної прокладки. Муфти можна встановлювати на опорах будь-якого виду, поміщати в колодязі, колектори, підземні контейнери. Можлива установка в ґрунті з використанням захисних пластмасових або чавунних муфт.

Муфта МТОК-В3 з габаритами 494x215 мм, вага 3,0 кг, Можлива установка до 8 касет з ємністю до 288 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий.

Муфта МТОК-В4 подовжена з габаритами 624x215 мм, вага 5,2 кг, Можлива установка до 10 касет з ємністю до 480 зварних з'єднань. Кожух муфти з нержавіючої сталі.

Муфти МТОК-В3 і В4 оснащені оголовником типу В, який має 4 круглих патрубка діаметром 22 мм, а також один патрубок овального перерізу, на якому розташовані 4 круглих патрубка

діаметром 10 мм. При використанні овального патрубкa круглі патрубкa зрізуються.

Муфта МТОК- К6 малогабаритна з розмірами 378x188 мм, вага 1,3 кг. Можлива установка до 3 касет з ємністю до 108 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий, її оголовник типу К має 3 круглих патрубкa діаметром 22 мм, а також один патрубк овального перерізу.

Муфта МТОК-ББ прохідного типу з розмірами 720x160 мм, вага 4,9 кг. Можлива установка до 9 касет з ємністю до 324 зварних з'єднань. Кожух муфти з нержавіючої сталі. Муфта оснащено двома оголовниками типу Б, які мають 4 круглих патрубкa діаметром 22 мм, а також має один патрубк овального перерізу, на якому розташовані 4 круглих патрубкa діаметром 10 мм. При використанні овального патрубкa круглі патрубкa зрізуються.

Герметизація кожуха з оголовником у муфт МТОК-В3, МТОК-В4, МТОК- К6 механічна з використанням пластмасового хомута, а у муфти МТОК-ББ – за допомогою термоусадних трубок.

**Магістральні муфти** типу МТОК-А1, МТОК-М6, МТОК- Б1, МТОК-В2 призначені для зрощування підземних і підводних кабелів із бронєю зі сталевих дротів. Муфти оснащуються спеціальними кабельними введеннями зі сталевими штуцерами, а також додатковим приладдям, які забезпечують можливість виводу проводів заземлення як від броні кожного ВОК окремо, так і від загального з'єднання броні всіх кабелів, що вводяться. Муфти встановлюються в приміщеннях введення кабелів, у колодязях, у котлованах і на дні водойм глибиною до 10 метрів (МТОК-А та МТОК-Б).

Муфта МТОК-А1 стандартного розміру 527x188 мм, вага 3,8 кг або розміром 597x159 при вазі 4,8 кг. Можлива установка до 6 касет з ємністю до 216 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий, герметизація кожуха з оголовником здійснюється за допомогою термоусадної трубки. Використовується оголовник типу А, що має 3 патрубкa діаметром 22 мм і 3 патрубкa діаметром 9 мм..

Муфта МТОК-М6 малогабаритна з розмірами 392x188 мм, вага 1,3 кг. Можлива установка до 4 касет з ємністю до 144 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий, герметизація механічна. Використовується оголовник типу М, що має 3 патрубкa діаметром 22 мм і 3 патрубкa діаметром 9 мм.

Патрубкa діаметром 9 мм у муфт МТОК-А1 і МТОК-М6 можуть використовуватися для введення проводів заземлення

Муфта МТОК-Б1 стандартного розміру 593x159 мм, вага 4,8 кг або розміру 523x159, вага 4,0 кг. Можлива установка до 8 касет з ємністю до 288 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий, герметизація за допомогою термоусадної трубки. Використовується оголовник типу Б.

Муфта МТОК-В2 має розмір 494x200 мм, вага 3,0 кг. Можлива установка до 8 касет з ємністю до 288 зварних з'єднань. Кожух муфти пластмасовий, герметизація механічна. Використовується оголовник типу В.

Для додаткового захисту муфт можуть застосовуються захисні пластмасові або чавунні муфти.

**Магістральні муфти типу МОПГ-М.** Призначені для зрощування ВОК, вбудованих у грозозахисний трос, самонесучих, навивних і підвісних з діаметром оболонки від 8 до 22 мм.

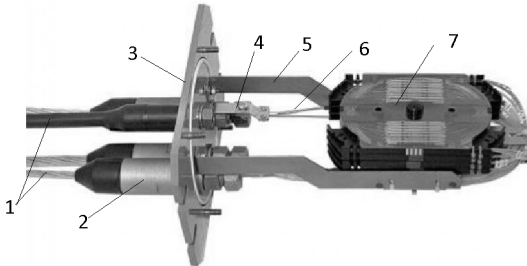


Рисунок 4.7 – Конструкція змонтованої муфти зі знятим кожухом:

1 – оптичний кабель, 2 – патрубки, 3 – оголовник, 4 – деталі кріплення елементів кабелю, 5 - кронштейн для кріплення касет, 6 – оптичні модулі, 7 - касети

Корпус муфти повністю металевий. Спосіб герметизації корпуса механічний за допомогою еластичної прокладки і чотирьох затяжних болтів кріплення кожуха до оголовника. Є дві модифікації муфт: муфта типу МОПГ-М-1 і типу МОПГ-М-2. Габаритні розміри муфти МОПГ-М-1 (довжина, ширина, висота) 295x200x390 мм, вага 6,5 кг при 6 касетах із загальним обсягом 216 зрощених волокон. Розміри муфти МОПГ-М-2 – 295x170x330 мм, вага 4,2 кг при 4 касетах із загальним обсягом 64 зрощених волокон.

#### 4.6.4 Розміщення змонтованих оптичних муфт

Розміщення змонтованих оптичних муфт разом з технологічним запасом ВОК проводиться в місцях прокладки кабелю – у ґрунті, в оглядових колодязях кабельної каналізації, на опорах повітряних ліній передач (ПЛП).

**Розміщення муфти в ґрунті.** Приклад схеми розміщення муфти в ґрунті наведений на рис. 4.8.

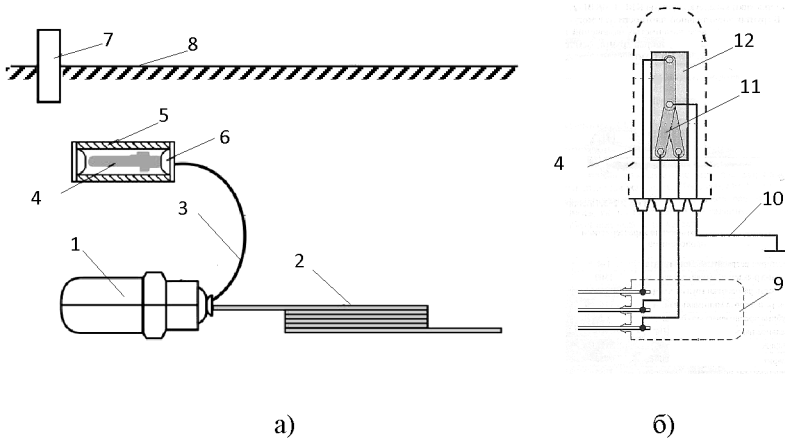


Рисунок 4.8 – Розміщення оптичної муфти в ґрунті (а) і схема підключення КДЗ (б): 1 – оптична муфта, поміщена в захисну муфту, 2 – запас ВОК, 3 – проведення заземлення, 4 – КДЗ, 5 – труба захисна, 6 – пробки поліетиленові, 7 – замірний стовпчик, 8 – поверхня ґрунту, 9 – оптична муфта, 10 – дроти заземлення, 11 – металеві перемички, 12 – діелектрична пластина із клемми

У ґрунт муфта укладається в місцях стикування будівельних довжин ВОК. У місці стикування для розміщення муфти і запасу ВОК відривається котлован глибиною 1200 мм і з поперечним перерізом 3000x1200 мм. У якості муфти використовується тупикова муфта типу МТОК або подібна їй, яка поміщається в чавунну або пластикову захисну муфту. Змонтована муфта та запаси кабелю довжиною не менше 10 м, змотані в одну або дві бухти діаметром не менше метра та укладаються на дно котловану. Зверху муфта і запаси кабелю накриваються листовим матеріалом, здатним захистити їх від шанцевого інструмента, якщо буде потреба розкопки котловану. Якщо проектом передбачений вимір опору ізоляції оболонок кабелю, то у

відповідності зі схемою на рис. 4.8,а, встановлюється контейнер дротів заземлення (КДЗ), який призначений для облаштування контрольно-вимірювальних пунктів (КВП) у місцях монтажу оптичних муфт типу МТОК. Усередині контейнера розміщується панель із клемми і перемичками. До клем підключають дроти заземлення, що виходять зі змонтованих муфт.

КДЗ закопується в землю над муфтою на глибині 20 см від поверхні землі і захищається відрізком азбестоцементної труби діаметром 150 мм. Корпус КДЗ герметизується механічним способом.

**Розміщення муфти на опорах.** Приклади розміщення муфт на опорах наведені на рис. 4.9.

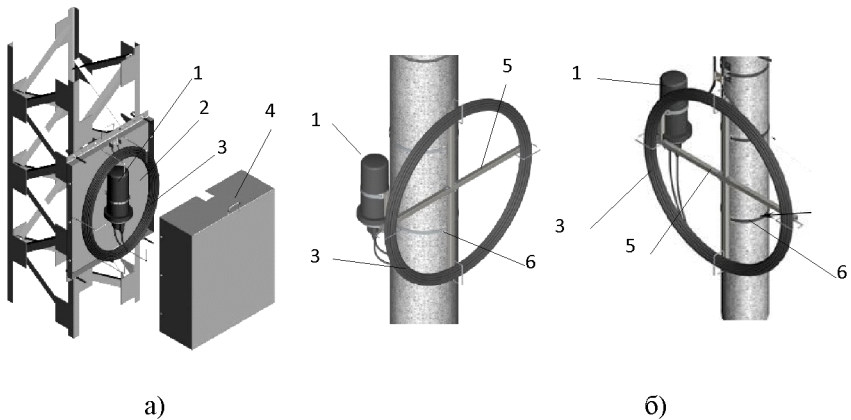


Рисунок 4.9 – Розміщення оптичних муфт і запасу кабелю на опорах: а – розміщення муфти і запасу кабелю в шафі, б – розміщення муфти і запасу кабелю на ППМК: 1 – оптична муфта, 2 – дно шафи із закріпленою муфтою і запасом кабелю, 3 – запас кабелю, 4 – кришка шафи, 5 – каркас ППМК, 6 – елементи кріплення ППМК на опорі.

При підвішуванні на опорах оптичні муфти і технологічний запас кабелю рекомендується розміщати в спеціальних шафах. Шафа кріпиться на опорі за допомогою хомутів, шпильок і інших кріпильних виробів. Муфта закріплюється двома ремінцями-стяжками на утримувачах, установлених у шафі. Технологічний запас ВОК укладається в бухту, діаметром не менше 700 мм, і розміщується усередині шафи. Допускається розміщати муфти і запас кабелю на спеціальних пристроях підвіски муфт і кабелів (ППМК), що складаються із каркаса для намотування технологічного запасу

кабелю, кронштейнів і хомутів для кріплення пристрою на опорі. Кріплення ППМК на опорі здійснюється сталевією монтажною стрічкою із замками-фіксаторами. Муфта може бути розміщена безпосередньо на опорі або на каркасі разом з технологічним запасом кабелю. На каркасі муфта поміщається в спеціальних кріпильний вузол. Технологічний запас кабелю укладається в бухту і закріплюється на каркасі пластиковими ремінцями-стяжками.

**Розміщення муфт у кабельній каналізації.** На рис. 4.10 наведені схеми розміщення прохідної і тупикової оптичних муфт у кабельній каналізації. Оптичні муфти разом із запасом ВОК розміщаються в типових кабельних колодязях зв'язку (ККЗ), що мають п'ять модифікацій від ККЗ-1 до ККЗ-5 [64]. Колодязі виготовляються із залізобетону і різняться розміром і формою. Колодязь ККЗ-1-80 має 4-гранну форму та найменші розміри і вагу: довжина 1350 мм, ширина 1060 мм, висота 890 мм, вага 1,25 т. Найбільші розміри 3000x1620x2010 у колодязя ККЗ-5-80, що має 8-гранну форму і вагу 5,4 т.

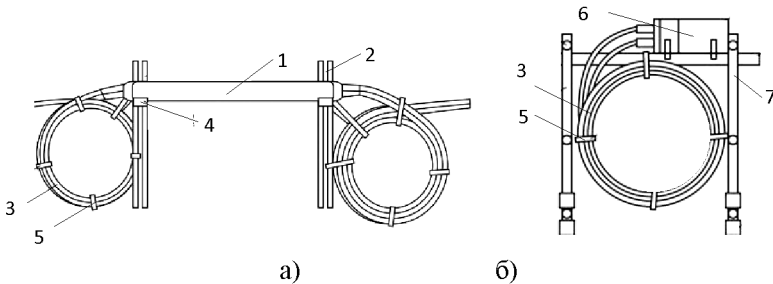


Рисунок 4.10 – Розміщення оптичних муфт у кабельному колодязі або колекторі: а – розміщення прохідної муфти, б – розміщення тупикової муфти:

1 – прохідна оптична муфта, 2 – кронштейн, 3 – запас ВОК, 4 – консоль, 5 – перев'язки із дроту або пластмасові стяжки, 6 – тупикова оптична муфта, 7 – кронштейн для тупикової муфти

Для розміщення муфт у колодязях використовуються кронштейни, прикріплені до стінок колодязів. Оптичні муфти типу МОМ укладаються на консолях, які закріплені на кронштейнах. Запаси кабелів по обидва боки муфт типу МОМ викладаються в бухти діаметром від 400 до 700 мм. Кільця кабелю в бухтах запасу скріплюються перев'язками із дроту або пластмасовими стяжками та прикріплюються сталевим оцинкованим дротом до кронштейнів.

Муфти типу МТОК у колодязях установлюються на спеціальні кронштейни для установки тупикових муфт. Кільця кабелю в бухті запасу скріплюються перев'язками із дроту або пластмасовими стяжками, а бухта розміщається між кронштейнами і прикріплюється до них сталевим оцинкованим дротом.

При будівництві каналізаційних систем для прокладки ВОК у ЗПТ знаходять застосування пластикові кабельні колодязі телекомунікаційні (ККТ) для захисту оптичних муфт і запасів кабелю. Пластикові колодязі мають тривалий термін служби, малу вагу, повністю герметичні і зручні в монтажі.

Промисловістю випускаються різноманітні види пластикових колодязів, що різняться формою і призначенням. Наприклад, ВО «Союз» випускає пластикові кабельні колодязі типу КОД, ККТ, ККТМ [66].

Колодязь оперативного доступу (КОД) установлюється при прокладці ВОК у ґрунті в місцях стикування його робочих довжин. Колодязь забезпечує розміщення до двох оптичних муфт тупикового типу разом з технологічними запасами довжини до 15 м оптичного кабелю з кожної із сторін та провідників для КВП. Оптичний кабель укладається в бухту з найменшим припустимим радіусом вигину 450 мм У пластиковому корпусі колодязя передбачено 4 монтажних площини для введення розподільних поліетиленових труб. Розмір кожної площини 230мм x 165мм, що дозволяє залежно від діаметра ЗПТ і технічних вимог проекту, зробити кілька введень у кожну площину. Герметизація місць введення труб здійснюється за допомогою адаптерів герметичного введення. Колодязь укомплектований кришкою діаметром 680 мм. Висота колодязя 380 мм, довжина 880 мм, ширина 745 мм, вага - 16 кг.

Малогабаритні колодязі ККТМ-1 і ККТМ-2 можуть використовуватися в якості оглядового пристрою з виводом люка на поверхню, а також у якості герметичного підземного контейнера. Колодязі оснащені плоскою кришкою стійкої до стирання, з'єднання кришки з корпусом – різьбове. Плоска форма кришки колодязів дозволяє використовувати їх у пішохідній зоні. Герметичність з'єднання кришки з корпусом колодязя забезпечується гумовим ущільнювальним кільцем, вмонтованим в обід кришки. Колодязь ККТМ-1 має висоту 450 мм, діаметр 410 мм, вагу 7 кг. Він містить 6 монтажних площин, розміром 350x185мм для введення ЗПТ. У колодязя ККТМ-2 висота 620 мм, діаметр 575 мм, вага 9 кг. Містить 8

монтажних площин, розміром 230x180 мм для введення ЗПТ. Введення ЗПТ у колодязі здійснюється через отвори, які прорізаються в потрібному місці під час установки колодязів. Герметизація місць введення труб здійснюється за допомогою адаптерів герметичного введення. Колодязі можуть бути використані в прохідному, кутовому і розподільному виконанні.

Колодязі ККТ-1, ККТ-2 призначені для розміщення пасивного обладнання, технологічних виносів кабелю і кабельних муфт при будівництві кабельної каналізації. Запас міцності корпусу достатній для установки колодязів як у пішохідній, так і транспортній зоні. Колодязь ККТ-1 має висоту 770 мм, діаметр 970 мм, вага 25 кг. Він оснащений 4-ма ввідними патрубками із зовнішнім діаметром 70 мм, внутрішнім 50 мм і 4-ма монтажними площинами введення захисних труб кабельної каналізації. Введення ЗПТ проводиться через отвори, прорізані в монтажних площинах, введення герметизується за допомогою адаптерів герметичного введення. При прокладці броньованого кабелю, він уводиться в колодязь через патрубки і герметизується за допомогою термоусадних трубок. Колодязь ККТ-2 має конструкцію, аналогічну колодязю ККТ-1, але має більші розміри і вагу – висота 1670 мм, діаметр 1360мм і вага 100 кг. Колодязі можуть бути використані в прохідному, кутовому та розподільному виконанні.

Колодязі ККТ-1 і ККТ-2 є альтернативними варіантами залізобетонних колодязів типу ККЗ. У порівнянні із традиційними методами будівництва кабельної каналізації пластмасова кабельна каналізація відрізняється невисокою вартістю, більшим терміном експлуатації, до 50 років, високим ступенем герметизації, набагато більш простими і економічними технологіями будівництва, ремонту та модернізації кабельної мережі.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Призначення захисних пластмасових трубок.
2. Призначення оптичної муфти.
3. З яких елементів складається оптична муфта?
4. Муфти оптичні міські, призначення і різновиди.
5. Муфти оптичні тупикові, призначення і різновиди.
6. Способи розміщення оптичних муфт у ґрунті.

7. Способи розміщення оптичних муфт на опорах.
8. Способи розміщення оптичних муфт у кабельній каналізації.
9. Різновиди кабельних колодязів зв'язку.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник / И.И. Гроднев и др.- М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.
2. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов. Под ред. профессора В. Н. Гордиенко. - М.: Горячая линия-Телеком, 2011. - 368 с.
3. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. - 2-е изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: ООО “Волоконно-оптическая техника”, 2005. - 576 с.
4. Листвин А.В. Листвин В.Н. Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи М.: ЛЕСАРТарт 2003 288 с.
5. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
6. Андрушко Л.М. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенский, В.Б. Каток и др. – М.: Техника, 1988. – 239 с.
7. Корнейчук В. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические системы передачи. – Одесса: Друк, 2001. – 435 с.
8. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. – Київ: LucentTechnologiesBellLabsInnovations, 1999. – 482 с.
9. Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 382 с.
10. Оптические системы передачи / Под ред. В. И. Иванова. – М.: Радио и связь, 1994. – 224 с.
11. Семенов А. Б. Волоконно\_оптические подсистемы современных СКС / А. Б. Семенов – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
12. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. – М.: Питер, 2003. – 263 с.

13. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство – волоконная оптика / Д.Дж.Стерлинг. – М.: Лори, 1998. – 288 с.
14. Скляр О. К. Волоконнооптические сети и системы связи: Учебное пособие. 2е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 272 с.
15. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, 2-е дополнительное издание. – М.: Техносфера, 2006. – 496 с.
16. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных систем связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 486 с.
17. Жирар Андре Руководство по технологии и тестированию систем WDM: Пер. с англ. – М.: EXFO, 2001.- 252 с.
18. Конышев В., Леонтьев А., Слепов М. OTN в сетях связи: современные тенденции. Первая миля 8/2016 с.50-55.
19. Слепов Н.Н. Особенности современной технологии WDM. ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес 6/2004, с. 68-76.
20. Слепов Н.Н. Оптоволоконные системы дальней связи. Перспективы развития. ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес 6/2005, с. 71-75.
21. Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи. Вестник связи, №9, 2013, с. 17-19.
22. В. Ткаченко Мост в «Терабитию»: Волны, коды и суперканалы. Сети@Бизнес, №4 (71) 2013
23. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. Под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
24. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. Пер. с англ. под ред В.В. Шевченко / Х.-Г. Унгер. - М.: Мир. 1980. 656 с.
25. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. Пер. с англ. под ред. И.Н.Сисакяна – М.:Мир, 1984. – 512 с.
26. Маркузе Д. Оптические волноводы. Пер. с англ. под ред В.В. Шевченко / Д. М Маркузе. – М.: Мир, 1974. - 576 с.
27. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М. Наука, 1980. 544 с.
28. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. – М.: ВШ, 1990.- 334 с.
29. Гауэр Дж. Оптические системы связи. Пер. с англ. под ред. А.И. Ларкина – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.

30. Основы волоконно-оптической связи. Пер. с англ. под ред. Е.М. Дианова. – М.: Сов. радио, 1980, - 232 с.
31. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. Пер. с англ. под ред К.А. Семендяева / М., Наука 1977 г., 228 с.
32. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. под ред. П.В. Мамышева. М.: Мир, 1996 – 323 с.
33. Портнов Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2009. — 545 с.
34. Портнов Э.А. Оптические кабели связи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 232с.
35. ITU-T Recommendation G.651.1. Characteristics of a 50/125  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical fibre cable for the optical access network. Geneva, 2008.
36. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2009.
37. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2010.
38. ITU-T Recommendation G.654. Characteristics of a cut-off shifted, single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2010
39. ITU-T Recommendation G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2009.
40. ITU-T Recommendation G.656. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport. Geneva, 2006.
41. ITU-T Recommendation G.657 Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network. Geneva, 2009
42. Ларин Ю.Т. Оптические кабели.– М.: Престиж, 2006. – 304 с.
43. Родина О.В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 400 с.
44. Воронцов А.С., Гурин О.И., Мифтяхетдинов С.Х. и др. Оптические кабели связи российского производства. Справочник. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 288 с.
45. Каталог. Волоконно-оптический кабель связи. ЗАО МКФ «Москабель-Фуджикура». [www.mk-f.ru](http://www.mk-f.ru)

46. Каталог оптического кабеля. ООО ИНКАБ <http://www.inkab.ru>
47. Оптические кабели связи. ЗАО «ОКС 01» <http://www.oks01.ru>
48. Волоконно-оптические кабели. Каталог. ЗАО «Завод «Южкабель» <http://www.yuzhcable.info>
49. Волоконно-оптические кабели. Каталог. ОАО «Одескабель» <http://www.odeskabel.com>
50. Разработка и производство оптических кабелей связи и специальных конструкций. Буклет. ООО «Еврокабель 1» <http://www.eurocabel-1.ru>
51. Каталог продукции. ООО «Саранскабель-оптика» СКО. <http://www.sarko.ru>
52. Волоконно-оптические кабели. Каталог. АО ОФС Связьстрой-1 ВОКК <http://www.ofsoptics.com>
53. Волоконно-оптический кабель. Каталог продукции ООО «ОПТЕН-КАБЕЛЬ» <http://opten.spb.ru/ru/catalog.html4>
54. Волоконно-оптический кабель. Интегра кабель. ООО «Союз кабель» <http://www.intg.ru>
55. Волоконно-оптический кабель. Каталог продукции компании Эликс-кабель <http://www.elixcable.ru>
56. Семенов Ю. Сети широкополосного доступа на основе оптических микрокабелей – новый взгляд на городскую телефонную канализацию. Первая миля. №4 - 2008 с. 16-21.
57. Волоконно-оптический кабель. Каталог продукции НПП «Старлинк» <http://www.cabeltov.ru>
58. Решения микротрубок и микрокабелей. Каталог продукции компании «Yofc». [www.yofc.com](http://www.yofc.com)
59. Защитные пластмассовые трубки. Каталог продукции ЗАО «Пластком». <http://www.plastcom.spb.ru>.
60. Детинко В.М., Плехотник А.И., Терещенко А.В., Нилов Ю.А. Практическая реализация строительства сетей широкополосного доступа с использованием технологии оптических микрокабелей в существующей городской канализации. Фотон-экспресс №2. 2006 г. с. 22-25
61. Гаскевич Е., Петренко И. Микротрубочная канализация для сетей ФТТН в районах индивидуального жилья. Первая миля. №4 2012 с. 16 - 29
62. Андреев В., Андреев Р., Попов Б., Попов В. Прокладка оптических кабелей в полосе отвода автодорог. Первая миля №1 2015 с. 32-34

63. Денисов С.Л. Подводные оптоволоконные линии связи. Литературный обзор. [www.ntoire-polus.ru](http://www.ntoire-polus.ru)
64. Муфты для оптических кабелей связи. Каталог продукции ЗАО «Связьстройдеталь» [www.ssd.ru](http://www.ssd.ru)
65. Железобетонные изделия для кабельной канализации. Каталог продукции ЗАО «Связьстройдеталь» [www.ssd.ru](http://www.ssd.ru)
66. Кабельные колодцы пластиковые. Каталог продукции ООО Производственное объединение «Союз» [www.po-souz.ru](http://www.po-souz.ru)

*Навчальне видання*

КАРПУКОВ Леонід Матвійович  
ЩЕКОТИХІН Олег В'ячеславович  
ВОСКОБОЙНИК Володимир Олександрович

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ**

*Навчальний посібник*

Комп'ютерний набір: *Воскобойник В.О.*  
Комп'ютерна верстка: *Дяченко О.О.*

Підписано до друку 13.10.2020. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 9,76.  
Тираж 100 прим. Зам. № 1086.

Національний університет «Запорізька політехніка»  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.