



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

---

Г. М. Розорінов, Д.О. Соловйов

# **ВИСОКОШВИДКІСНІ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями "Радіотехніка" та "Електроніка"*

Київ  
"Кафедра"  
2012



УДК 654: 679.76 (078)  
ББК 3886  
Р 653

Рекомендовано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України як навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за спеціальностями  
"Радіотехніка" та "Електроніка"  
Гриф надано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України  
(Лист № 14/18-Г-1445 від 29.08.2007 р.)

**Рецензенти:**

*Ю.Г. Савченко*, д-р техн. наук, проф., професор кафедри  
звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного  
університету України "Київський політехнічний інститут";

*М.А. Виноградов*, д-р техн. наук, проф., професор кафедри  
комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного  
університету;

*А.М. Кравченко*, д-р техн. наук, проф., професор кафедри  
радіотехнологій Державного університету інформаційно-комунікаційних  
технологій.

**Розорінов Г.М.**

Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. /  
Г.М. Розорінов, Д.О. Соловйов. – 2-е вид., перероб. і допов. – К.:  
Кафедра, 2012. – 344 с.

ISBN 978-966-2705-05-8

Розглянуто найбільш поширені і нові методи передачі сигналів по  
волоконно-оптичним лініям зв'язку. Особливу увагу приділено питанням  
підвішування оптичних кабелів, з урахуванням міжнародних стандартів,  
рекомендацій та практичних розробок авторів. Описані методи з'єднань  
оптичних волокон та особливості фізичних процесів, що відбуваються в  
оптичному кабелі при впливі на нього кліматичних та механічних  
навантажень. Проведено аналіз основних оптичних та електричних  
параметрів оптичних кабелів для підвішування на опорах ліній зв'язку,  
ліній електропередачі та на опорах контактної мережі залізниці.

**УДК 654: 679.76 (078)**  
**ББК 3886**  
**Р 653**

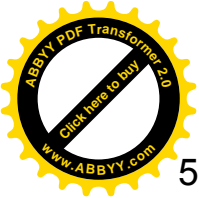
ISBN 978-966-2705-05-8

© Г.М. Розорінов, Д.О. Соловйов, 2007

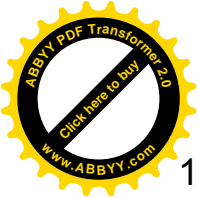


## ЗМІСТ

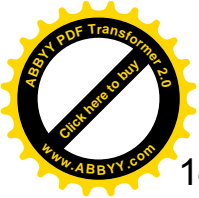
ВСТУП.....	8
1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ.....	9
2 ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ.....	12
2.1 Формування сигналу, що приймається .....	14
2.2 Мультиплексування потоків даних .....	19
3 СИГНАЛИ ПЕРЕДАЧІ.....	23
3.1 Алгоритми формування сигналів.....	25
3.2 Формування спектру .....	35
4 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛЗ.....	41
5 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ ПО ВОЛОКОННИМ СВІТЛОПРОВОДАМ .....	45
5.1 Загальні відомості .....	45
5.2 Основні положення геометричної (променевої) оптики при передачі світла по волоконних світлопроводах.....	51
5.3 Поляризоване світло .....	55
5.4 Розсіяння Релея і світло Тіндаля .....	58
5.5 Променевий аналіз поширення світла у волоконних світлопроводах.....	58
5.6 Основні положення хвильової оптики при передачі світла по волоконних світлопроводах .....	64
5.6.1 Взаємодія оптичної хвилі з середовищем .....	68
5.6.2 Хвильові рівняння .....	70
5.6.3 Граничні умови .....	75
5.6.4 Поширення мод .....	75
5.6.5 Глобове групування мод .....	81
5.7 Основні параметри оптичних волокон .....	83
5.8 Параметри передачі оптичних волокон .....	88
5.9 Нелінійні ефекти .....	103
5.10 Основні типи оптичних волокон.....	105



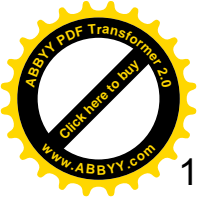
5.11 Розрахунок довжини регенераційної ділянки волоконно-оптичної лінії зв'язку .....	108
5.12 Механічні характеристики оптичних волокон .....	111
<b>6 З'ЄДНАННЯ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН .....</b>	<b>114</b>
6.1 Класифікація методів з'єднань ОВ .....	115
6.2 Технологія підготування ОВ до з'єднання .....	116
6.3 Зварні з'єднання .....	118
6.4 Клейові з'єднання .....	127
6.5 Механічні з'єднання .....	129
6.6 Роз'ємні з'єднання .....	135
<b>7 АНАЛІЗ ВТРАТ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ПРОЦЕСІ МОНТАЖУ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ .....</b>	<b>140</b>
7.1 Класифікація втрат у з'єднаннях ОВ .....	140
7.2 Розрахунки втрат .....	142
<b>8 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ .....</b>	<b>155</b>
8.1 Вимірювання втрат, що вносяться .....	155
8.2 Вимірювання зворотних втрат .....	159
<b>9 ВИМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>161</b>
9.1 Класифікація обладнання .....	161
9.2 Прилади для вимірювань в оптичній області .....	163
9.2.1 Стабілізовані джерела випромінювання .....	163
9.2.2 Вимірювання оптичної потужності .....	165
9.3 Оптичні тестери (набори) .....	169
9.4 Мультиметри і вимірювачі оптичних втрат .....	169
9.5 Аналізатори оптичного спектру .....	170
9.6 Рефлектометри .....	172
<b>10 РОЗРАХУНОК КЛІМАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОПТИЧНИЙ КАБЕЛЬ .....</b>	<b>175</b>
10.1 Вітрові навантаження .....	175



10.2 Навантаження від ожеледі .....	179
11 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ.....	181
11.1 Конструкції оптичних кабелів .....	181
11.2 Вимоги до оптичних кабелів .....	183
11.3 Вибір оптичного кабелю .....	185
12 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ.....	193
12.1 Розміщення оптичних кабелів на опорах при відсутності фазових та несучих контактних проводів .....	193
12.2 Розміщення оптичних кабелів при наявності фазових та несучих контактних проводів .....	194
12.3 Перетин оптичного кабелю повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку із залізницею .....	195
12.4 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по лісовим масивам, зеленим насадженням, орним і культурним землям .....	197
12.5 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по мостах .....	197
12.6 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по греблях і дамбах .....	198
12.7 Перетин і зближення повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку із підземними і наземними трубопроводами і канатними дорогами .....	198
12.8 Перетин і зближення оптичного кабелю повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку з підземними трубопроводами .	199
13 АРМАТУРА ДЛЯ ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ.....	199
14 ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ.....	207
14.1 Загальні положення .....	207



14.2 Підвішування оптичних кабелів на опорах повітряних ліній зв'язку .....	209
14.3 Підвішування оптичних кабелів на опорах контактної мережі залізниці .....	215
14.3.1 Опори контактної мережі залізниці .....	215
14.3.2 Розміщення оптичних кабелів на опорах контактної мережі залізниці .....	220
14.3.3 Порядок підвішування оптичного кабелю .....	221
14.4 Підвішування оптичних кабелів на опорах ліній електропередачі .....	222
14.4.1 Опори ліній електропередачі .....	222
14.4.2 Розміщення оптичних кабелів на опорах ліній електропередачі .....	224
14.4.3 Методи підвішування оптичних кабелів .....	228
14.5 Монтаж оптичних кабелів .....	233
14.5.1 Загальні положення .....	233
14.5.2 Зрощування оптичних волокон .....	233
14.5.3 Вимоги до муфт .....	234
14.5.4 Розміщення муфт .....	234
15 ТЕХНІЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ .....	237
15.1 Особливості технічної експлуатації повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку .....	237
15.2 Випробування оптичних кабелів для підвішування .....	238
15.2.1 Загальні положення .....	238
15.2.2 Вимірювання при входному контролі .....	239
15.2.3 Випробування після підвішування .....	240
15.2.4 Випробування під час монтажу .....	241
15.2.5 Приймально-здавальні випробування .....	241



15.3 Прийняття в експлуатацію повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку .....	242
<b>16 ЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ВІД НЕБЕЗПЕЧНИХ ВПЛИВІВ .....</b>	<b>244</b>
16.1 Загальна характеристика факторів впливу на ОК.....	244
16.2 Вплив температури.....	245
16.3 Вплив механічних зусиль.....	246
16.4 Вплив вологи.....	247
16.5 Вплив водню .....	248
16.6 Вплив іонізуючого випромінювання.....	250
16.7 Ефекти Керра і Фарадея.....	256
16.8 Вплив електричного поля.....	261
16.9 Трекінг-ефект.....	262
<b>17 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТА ТЕХНІЧНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>264</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>266</b>
<b>Додаток А. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН І КАБЕЛІВ.....</b>	<b>272</b>
<b>Додаток Б. СПЕКТР ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ.....</b>	<b>286</b>
<b>Додаток В. ОДИНИЦІ ЧАСУ, ДОВЖИНИ ТА ЧАСТОТИ.....</b>	<b>287</b>
<b>Додаток Г. ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦОВОГО СКЛА .....</b>	<b>287</b>
<b>Додаток Д. ТАБЛИЦІ ПЕРЕВОДУ.....</b>	<b>288</b>



## ВСТУП

Початок ХХІ століття характеризується надзвичайно швидким розвитком різних, особливо кабельних систем і комп'ютерних технологій, синтез яких поклав початок створенню широкосмугової світової інфраструктури. Прогрес в області електроніки, оптичних, квантових і оптоелектронних технологій дозволив різко підвищити швидкодію кінцевих пристроїв систем передачі інформації (40...80 Гбіт/с) і розширити їхню смугу пропускання (близько 100 ГГц). При цьому смуга пропускання середовища передачі (оптичних кабелів - ОК) складає десятки ТГц. Завдяки цьому обсяг переданої інформації з одного волокна у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) збільшився в багато разів. Дальність передачі сигналів без проміжних пунктів регенерації зросла до декількох сотень кілометрів і в перспективі досягне тисяч кілометрів.

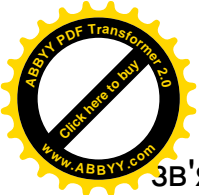
Таке поліпшення характеристик кабельних систем передачі спричинило підвищення якості вже існуючих послуг зв'язку і створення цілого ряду нових видів послуг: можливість користування всесвітньою мережею (Internet) з доступом до приватних осіб, що мають персональний комп'ютер, і зв'язаними з нею комп'ютерною мережею і мережею електронної пошти (E-mail); організація інтелектуальних мереж зв'язку (ІМЗ) і їхнє впровадження в мережі загального користування; інтеграція традиційних мереж зв'язку, ІМЗ і Internet. Однією з нових послуг, зв'язаною з розвитком інтелектуальних мереж, є комп'ютерна телефонія (КТ) – синтез комп'ютера, ІМЗ і телефону. КТ, крім основної функції, надає і такі послуги як телеголосування, телефонні кредитні картки й інші. Крім того, продовжується інтеграція комп'ютерів, комп'ютерних мереж, ІМЗ і телебачення.

Для реалізації цих послуг і технологій з доступом їх до широкого кола абонентів (кількість яких неухильно росте) у більшості країн побудовані і діють високошвидкісні ВОЛЗ. На основі волоконно-оптичних технологій створені ВОЛЗ усіх рівнів: об'єктові, міські, зонові й магістральні. Для систем плезіохронної цифрової ієрархії й асинхронних транспортних модулів (АТМ) швидкості передачі цифрових даних звичайно складають 2,048 Мбіт/с, 8,448 Мбіт/с, 34 Мбіт/с, а для синхронних транспортних модулів (STM) – 155 Мбіт/с (STM-1), 622 Мбіт/с (STM-4), 2,5 Гбіт/с (STM-16), 10 Гбіт/с (STM-64) і 40 Гбіт/с (STM-256).

Паралельно зі створенням і будівництвом ВОЛЗ для систем передачі цифрової інформації, експлуатуються і продовжують створюватися системи передачі аналогової інформації. У першу чергу це системи кабельного телебачення (СКТ). Створюються також ВОЛЗ для передачі сигналів телебачення високої чіткості.

Збільшення числа абонентів при зрослих вимогах до якості і кількості видів послуг зв'язку приводить до необхідності збільшення обсягу і швидкості передачі на магістральних, зонових і міських лініях





зв'язку, по яких передається груповий сигнал, і до розширення смуги переданих частот на абонентській ділянці до 1000 МГц (так звані концепції "Гігагерц у будинок", "Остання миля"). Для рішення цих задач розробляються і впроваджуються нові для оптичного зв'язку методи ущільнення групових каналів: по довжинах хвиль (WDM), оптичне часове (OTDM). Успішно здійснені польові випробування солітонних систем передачі.

Широке впровадження ВОЛЗ різного рівня стимулювало появу нових архітектур і методів маршрутизації мереж зв'язку з комутацією оптичних інформаційних потоків. Це вимагає створення нових комутаційних технологій. Технічно зазначена задача успішно вирішується на основі фізичних принципів, що використовують квантовооптичні, електрооптичні, магнітооптичні, акустооптичні й інші явища.

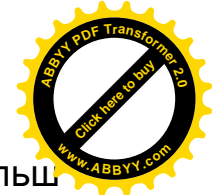
Удосконалюються і створюються нові типи елементів і пристроїв, на основі яких будуються ВОЛЗ і оптичні мережі зв'язку. Розроблено нові типи одномодових оптичних волокон (Truewave, Allwave, Leaf, та ін.), оптичних з'єднувачів, волоконно-оптичних пасивних елементів, випромінювачів і фотоприймачів, оптичних підсилювачів.

Швидкий ріст обсягу і швидкості передачі інформації в сучасних ВОЛЗ при одночасному збільшенні довжини ділянок регенерації привели до того, що поряд з такими факторами, що впливають на якість зв'язку й енергетичний потенціал лінії, як втрати у волокні через релееве розсіювання, хроматична дисперсія, втрати на локальних неоднорідностях, виникла необхідність враховувати і такі явища, як поляризаційна модова дисперсія (PMD), поляризаційні модові втрати (PML) і нелінійні оптичні ефекти, що виявляються під час передачі по волокну оптичного випромінювання із середньою потужністю більш 10 мВт.

Майбутнє волоконно-оптичного зв'язку бачиться в створенні цілком оптичних фотонних мереж і ліній. У цих системах усі процеси передачі, прийому, обробки і комутації сигналів будуть відбуватися винятково на фотонному рівні, без участі електронних пристроїв. В даний час уже розроблені такі фотонні пристрої як оптичні комутатори з оптичним керуванням, оптичні підсилювачі з дистанційним оптичним живленням, генератори оптичних імпульсів із заданими параметрами і низка пасивних оптичних елементів – оптичні відгалужувачі й розгалужувачі, оптичні вентиля (ізолятори), компенсатори хроматичної дисперсії, оптичні фільтри, поляризатори і циркулятори, мультиплексори і демультимплексори. На їхній основі розробляються оптичні процесори.

## **1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ**

Методи передачі інформації по волоконно-оптичних лініях можна розділити на дві групи: цифрові й аналогові.

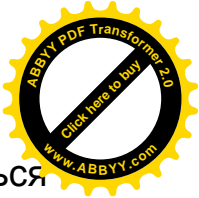
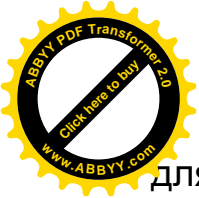


Серед різноманітних сучасних видів послуг зв'язку найбільш масовими є телефонні послуги. Відповідно до вимог вітчизняних і закордонних стандартів вихідний аналоговий телефонний канал повинний мати смугу частот від 400 Гц до 3400 Гц. Однак, в аналоговому виді сигнал передається тільки від АТС до абонента і назад. По сполучних лініях між АТС, по міських, зонавих і магістральних лініях сигнали передаються в цифровій формі. Для перетворення сигналу в цифрову форму використовується принцип імпульсно-кодової модуляції (ІКМ). Отриманий у результаті перетворення бітовий потік передається по каналу зв'язку. Якщо цей потік передається по каналу зі швидкістю 64 Кбіт/с, то такий канал називають ОЦК (основний цифровий канал) або DS0 (по міжнародній класифікації). Таким чином, 64 Кбіт/с – це швидкість, що відповідає одному телефонному каналу. Насправді, у мережах і лініях зв'язку передається одночасно велика кількість таких каналів (група каналів). Отже, по всіх лініях, за винятком абонентської ділянки, передається груповий цифровий сигнал. Він може бути отриманий, наприклад, шляхом часового поділу каналів (TDM – Time Division Multiplexing), що полягає в тому, що імпульси DS0 квантуються за часом на більш короткі імпульси, що потім групуються в новий цифровий потік. Частота, з якою відбувається часове квантування, називається тактовою. Для надійного поділу каналів на прийомній стороні в цей цифровий потік додаються ідентифікаційні синхроімпульси на границях відповідних основних потоків. Тому в груповому каналі швидкість передачі інформації зростає пропорційно числу основних каналів.

Для передачі по ВОЛЗ використовуються сигнали, формовані на базі лінійних кодів з основою  $q$  (найчастіше двійкових і трійкових кодів).

Відповідно до рекомендацій ІТУ-Т і державних стандартів в сполучних лініях зв'язку між АТС у європейських країнах і країнах Латинської Америки використовується 30 каналів типу DS0. Крім цього, у груповому потоці є ще 2 додаткових канали сигналізації і керування. Таким чином, загальне число каналів у груповому потоці складає 32, а швидкість передачі групового цифрового потоку –  $32 \cdot 64 = 2048$  Кбіт/с. У США і Канаді аналогічний груповий цифровий потік має швидкість передачі 1544 Кбіт/с (24 канали DS0). Груповий цифровий канал зі швидкістю 2048 (1544) Кбіт/с називають первинним цифровим каналом (ПЦК або DS1).

Очевидно, кількість каналів, що дорівнює 32 (24), особливо при передачі в зонавих або в магістральних лініях, занадто мала. Тому міжнародними угодами була встановлена можливість збільшення швидкості передачі в число раз, кратне 4. При цьому використовується той же принцип часового квантування імпульсних послідовностей з більш високою тактовою частотою, що може бути не синхронізована з тактовою частотою ПЦК. У результаті розроблена така низка можливих швидкостей передачі інформації: 2048, 8448, 34368, 139264, 564992 Кбіт/с. Некратність ряду обраних значень чотирьом пояснюється тим, що



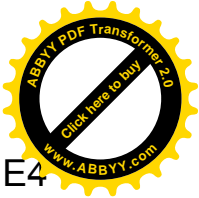
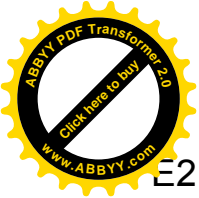
для ідентифікації груп каналів (блоків, пакетів, контейнерів) вводяться додаткові біти, які порушують кратність. Однак, за кількістю ОЦК (DS0) кратність чотирьом строго дотримується: 30 (DS0) – 120 – 480 – 1920 – 7680. Ці швидкості передачі утворюють ієрархічний ряд або, так звані, цифрові ієрархії. У країнах Європи і Латинської Америки кожна цифрова ієрархія має своє позначення:

- E1 (2048 кбіт/с) – первинна цифрова ієрархія (ПЦІ);
- E2 (8448 кбіт/с) – вторинна цифрова ієрархія (ВЦІ);
- E3 (34368 кбіт/с) – третинна цифрова ієрархія (ТЦІ);
- E4 (139264 кбіт/с) – четвіркова цифрова ієрархія (ЧЦІ);
- E5 (564992 кбіт/с) – п'ятерикова цифрова ієрархія (ПЦІ).

Підкреслимо, що в цих ієрархіях тактові частоти не обов'язково повинні бути синхронізовані між собою. Крім цього, можуть не збігатися тактові частоти каналів, що мультиплексується. Проте, тактові частоти настільки близькі, що можуть попадати в смуги захоплення синхронізаторів, тобто вони майже синхронні. Тому такі системи одержали назву плезіохронних цифрових систем передачі, а всю ієрархію називають плезіохронною цифровою ієрархією (ПЦІ або PDH).

Спочатку системи ПЦІ були розроблені для ліній зв'язку, де середовищем поширення сигналів були коаксіальний кабель і радіорелейна лінія. Для таких ліній передачі була розроблена апаратура в рамках ієрархій E1 – E4. У цих лініях зв'язку внаслідок малої смуги пропускання і великого загасання коаксіальних кабелів довжина регенераційної ділянки для E1 і E2 не перевищувала 5 км, а для E4 – 1,5...2 км. Такі лінії зв'язку були дуже дорогими і широкого поширення не одержали. Для E5 лінії зв'язку на коаксіальному кабелі при швидкості 564992 Кбіт/с довжина регенераційної ділянки менше 1,5 км. Вони мали дуже високу вартість і теж не одержали подальшого розвитку. Мала довжина регенераційних ділянок не є єдиною причиною відмовлення від E4 і E5. Інша, не менш важлива причина, зв'язана з особливостями плезіохронних систем передачі. Відсутність загальної жорсткої синхронізації тактових частот різних рівнів E1 – E5, а також додавання (видалення) додаткових біт (стаффінгів) для вирівнювання кодових комбінацій приводить до неможливості виділення з потоку на якому-небудь проміжному пункті зонової або магістральної лінії каналу DS0 або DS1 без повного демультимплексування групового інформаційного потоку. При цьому, якщо для рівня E2 така процедура не є складною і цілком прийнятною по вартості, то для рівня E3 вартість апаратури, що здійснює цю операцію істотно зростає, а для рівнів E4 і E5, у зв'язку з необхідністю підвищення швидкодії електронних пристроїв ця вартість зростає до неприйнятних значень.

Розвиток альтернативного середовища поширення сигналів – оптичного волокна, у якому носієм інформації є не електричний струм, а оптичне випромінювання (потік фотонів), дозволило багаторазово збільшити довжину регенераційних ділянок. Наприклад, для ієрархій E1 і



Е2 довжина регенераційної ділянки зростає до 80 – 100 км, а для Е3 і Е4 склала більше 100 км. При цьому через багаторазове зменшення числа ретрансляторів вартість плезіохронних систем передачі для рівнів Е1 – Е4 істотно знизилася, що також сприяло поширенню ВОЛЗ.

## 2 ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Узагальнена структурна схема будь-якої системи передачі інформації (зокрема волоконно-оптичної) і її основні елементи показані на рис. 2.1.

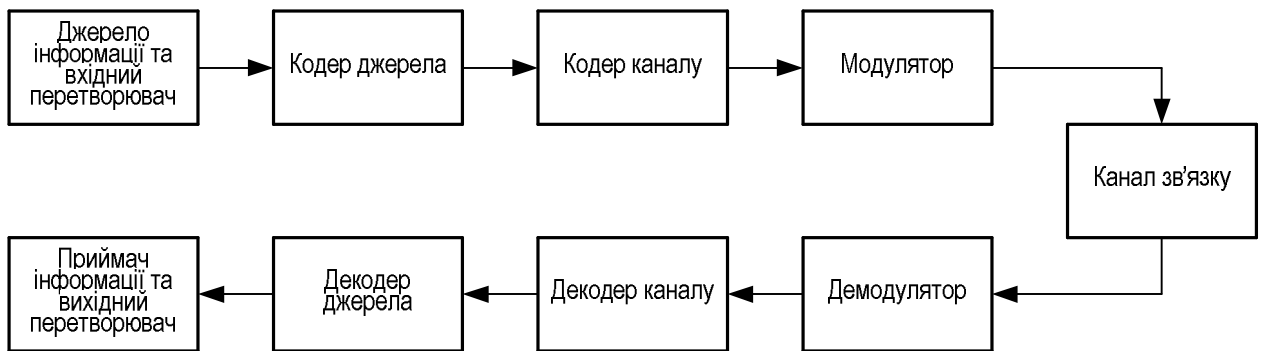


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема системи передачі інформації

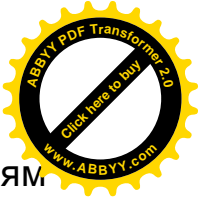
Розглянемо елементи цієї схеми. На виході джерела інформації може бути або **аналоговий** сигнал, або **цифровий** (дискретний в часі і квантований за рівнем).

Процес ефективного перетворення сигналу (як аналогового, так і цифрового) на виході джерела інформації в послідовність, наприклад, двійкових символів називають **кодуванням** джерела або **стисненням** даних. Відзначимо, що кодування джерела не обов'язково повинне виконуватися з використанням основи коду два.

Метою кодера каналу є введення **керуваної надмірності** в інформаційну послідовність, для того, щоб подолати дію шуму і вплив інтерференції, з якими доводиться стикатися при передачі сигналу по каналу зв'язку. Додана надмірність служить для підвищення надійності прийнятих даних і покращує вірність прийому сигналу. Фактично надмірність в інформаційній послідовності допомагає приймальному пристрою надійніше декодувати передані дані.

Наприклад, тривіальною формою кодування початкової послідовності є просте повторення кожного двійкового символу  $m$  разів, де  $m$  - ціле позитивне число.

Нетривіальне кодування зводиться до перетворення блоку з  $k$  інформаційних символів в блок з  $n$  символів, званий кодовим словом.



Надмірність, що вводиться у такий спосіб, вимірюється відношенням  $n/k$ . Зворотна величина цього відношення, а саме,  $k/n$ , називається **швидкістю** коду.

Основне призначення модулятора - перетворити інформаційну кодову послідовність у відповідний сигнал передачі.

Хай кодована інформаційна послідовність повинна передаватися побітово за певний час з постійною швидкістю  $R$  біт/с. Модулятор може просто відображати двійковий символ 0 сигналом будь-якої форми  $S_0(t)$ , а двійковий символ 1 - сигналом  $S_1(t)$ . У такий спосіб кожен біт кодера передається окремо. Це називається двійковою модуляцією.

Як альтернатива модулятор може відображати  $b$  кодованих інформаційних символів одночасно, використовуючи різні сигнали  $S_i(t)$ ,  $i=0, \dots, M-1$ , один сигнал для кожного з  $M=2^b$  можливих  $b$  бітових слів. Це називається  $M$ -позиційною модуляцією ( $M>2$ ).

**Канал зв'язку** - це фізичне середовище, яке використовується для передачі сигналу від передавача до приймача. При безпроводному зв'язку каналом може бути атмосфера. Телефонні канали зазвичай використовують ряд фізичних середовищ, включаючи лінії дротяного зв'язку, волоконно-оптичні кабелі і безпроводні лінії (мікрохвильові радіолінії). Для будь-якого фізичного середовища істотно, що передаваний сигнал схильний до випадкових спотворень через такі механізми як дію аддитивного **теплого шуму**, що генерується електронними пристроями, дію промислових перешкод, дію атмосферних перешкод та ін.

На приймальній стороні **демодулятор** обробляє спотворений в каналі передаваний сигнал і перетворює його в послідовність чисел, які є **оцінками** переданих даних (двійкових або  $M$ -позиційних).

**Канальний декодер** відновлює первинну інформаційну послідовність, враховуючи вид коду і надмірність даних.

**Міра якості** роботи демодулятора і декодера - ця частота, з якою виникають помилки в декодованій послідовності. Вірогідність помилки є функцією від параметрів коду, форми передаваного сигналу, потужності передавача, способів демодуляції та декодування, фізичних характеристик каналу зв'язку.

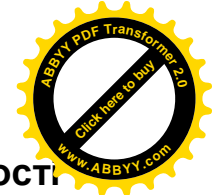
5 с

Одна загальна проблема при передачі сигналу через будь-який канал – аддитивний шум. Він часто створюється усередині електронних компонентів, внаслідок чого його і називають тепловим шумом. Інші джерела шуму й інтерференції (накладення) можуть виникати поза системою, наприклад перехідні перешкоди від інших користувачів каналу.

Коли такий шум і перехідні перешкоди займають той же самий діапазон частот, що і корисний сигнал, їх вплив може бути мінімізований шляхом вибору передаваного сигналу і демодулятора в приймачі.

Інші види сигнальних спотворень – це **загасання** сигналу, амплітудні й фазові його спотворення.





Вплив шуму може бути зменшене збільшенням **потужності** передаваного сигналу. Проте конструктивні й інші практичні міркування обмежують рівень потужності передаваного сигналу.

До базових обмежень відноситься також доступна **ширина смуги** частот каналу. Обмеження ширини смуги зазвичай обумовлене фізичними обмеженнями середовища і електричних компонентів, використовуваних в передавачі і приймачі.

Скловолокно має ширину смуги частот на декілька порядків більше, ніж коаксіальний кабель. Технологічні досягнення в цій області привели до швидкого освоєння таких каналів в системах передачі інформації.

Передавач або модулятор у волоконно-оптичних системах – джерело світла, світловипромінюючий діод або лазер. Інформація передається шляхом зміни (модуляції) інтенсивності світла сигналом повідомлення. Світлова хвиля періодично посилюється (ретранслюється) уздовж каналу передачі, щоб компенсувати загасання сигналу.

Ретранслятори вносять істотний внесок до загальної вартості волоконно-оптичних систем передачі і тому бажано максимально збільшувати відстань між ними. Проте, ця відстань обмежується, з одного боку, тепловим шумом і шумами приймача, а, з іншого боку, рівнем інтерференції, який швидко зростає із збільшенням відстані і швидкості передачі.

У приймачі інтенсивність світла детектується фотодіодом, чий вихід є електричним сигналом, який змінюється пропорційно потужності світла на вході фотодіода.

Основні джерела шуму у волоконно-оптичних системах – це фотодіоди і електронні підсилювачі.

Для максимального зниження втрат потужності передаваного сигналу характеристики джерел і приймачів випромінювання необхідно погоджувати з характеристиками оптоволоконних кабелів. При цьому враховуються такі чинники:

- довжина хвилі випромінювання повинна знаходитися в області малого загасання оптоволоконного кабелю;
- діаграма випромінювання джерела повинна відповідати апертурному куту вибраного світлопровода;
- фотоприймач повинен мати достатньо високу чутливість;
- повинна дотримуватися відповідність між швидкістю передачі і шириною спектру випромінювання джерела.

## **2.1 Формування сигналу, що приймається**

При високошвидкісній передачі сигналів, коли амплітуди імпульсів, що приймаються, відносно малі і за наявності специфічних перешкод і спотворень точність інформації, що приймається, багато в чому

визначається методом її обробки. Сигнал, що приймається, значно відрізняється від передаваного, тому для виділення даних з прийнятого сигналу його необхідно перетворити так, щоб або відновити початкову форму, або часові співвідношення між нуль-перетинами.

В даний час найбільшого поширення набули чотири методи обробки (формування) прийнятого сигналу: амплітудний (пороговий), диференціюючий (по нулю похідної, пікове детектування), інтегруючий, парціальний.

**Амплітудне формування** застосовується переважно при невисоких швидкостях передачі сигналів, коли ефективна тривалість імпульсів, що приймаються, менше періоду їх проходження, а також в комбінованих системах обробки.

Сигнал, що приймається, подається на пороговий елемент (компаратор, тригер Шмітта, та ін.), що спрацьовує при досягненні сигналом заданого порогового рівня (рис. 2.2).

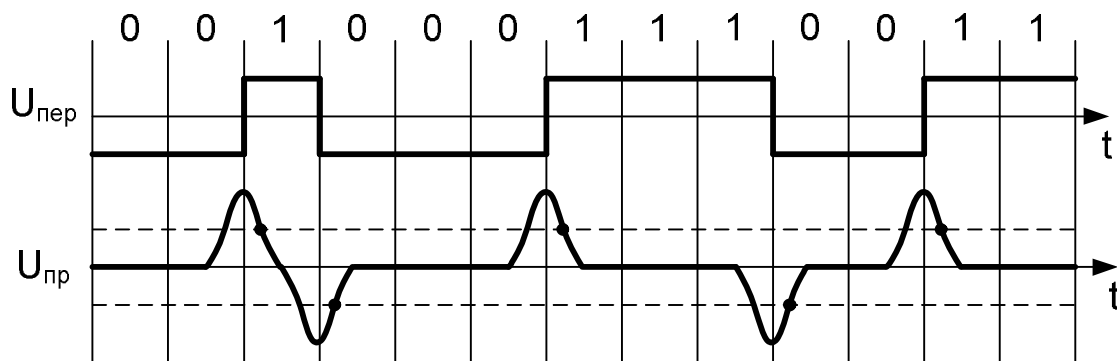


Рисунок 2.2 – Амплітудне формування сигналу, що приймається

Залежно від типу сигналу передачі імпульси, що приймаються, можуть бути і позитивними і негативними, в цьому випадку сигнал має трирівневу структуру. Взаємовплив імпульсів, що приймаються, неточності установки і величина порогів істотно знижують допустиму швидкість передачі при цьому методі формування. Вплив інтерференції припускає встановлення малих значень порогових рівнів, а дія шумів вимагає завдання великих значень цих рівнів. Теоретично оптимальним для дворівневих сигналів виявляється пороговий рівень, рівний 0,33 амплітудного значення імпульсів, що приймаються. Очевидно, що амплітудне формування відноситься до нелінійних методів обробки сигналів.

При **диференціюючому формуванні** порогові елементи спрацьовують при досягненні сигналом, що приймається, максимумів амплітуд (рис. 2.3).

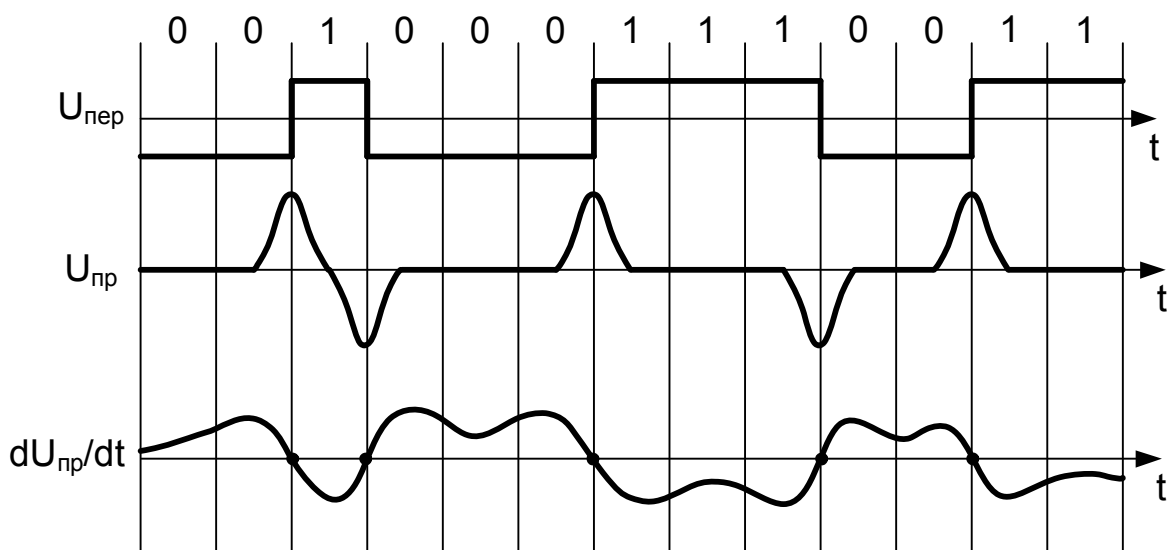


Рисунок 2.3 – Диференціуюче формування сигналу, що приймається

Чинниками, що визначають точність формування є часові флуктуації максимумів амплітуд сигналу, що приймається. Відомо, що флуктуації максимумів амплітуд істотно менше і виявляються при вищих швидкостях передачі, в порівнянні з флуктуаціями нуль-перетинів сигналів.

Диференціуюче формування найбільш схильне до впливу аддитивних шумів.

В порівнянні з амплітудним формуванням диференціуюче формування включає дві операції: лінійну і нелінійну.

**Інтегруюче формування** відноситься до лінійних методів обробки. Операція інтегрування – лінійна, тому форма сигналу, що приймається, на виході формувача наближається до початкової (рис. 2.4).

Включення інтегруючого формувача в канал прийому накладає обмеження на смугу його пропускання в області верхніх частот і виявляється у вигляді згладжування фронтів імпульсів, що приймаються.

**Парціальное формирование.** Фильтры, которые ограничивают полосу пропускания систем передачи информации, обычно рассчитывают так, чтобы как можно больше эту полосу сузить, не вызывая при этом очень высокий уровень интерференции.

Проте, існує клас способів передачі сигналів, в яких інтерференція створюється навмисне і, виходячи з цього, розраховується приймач.



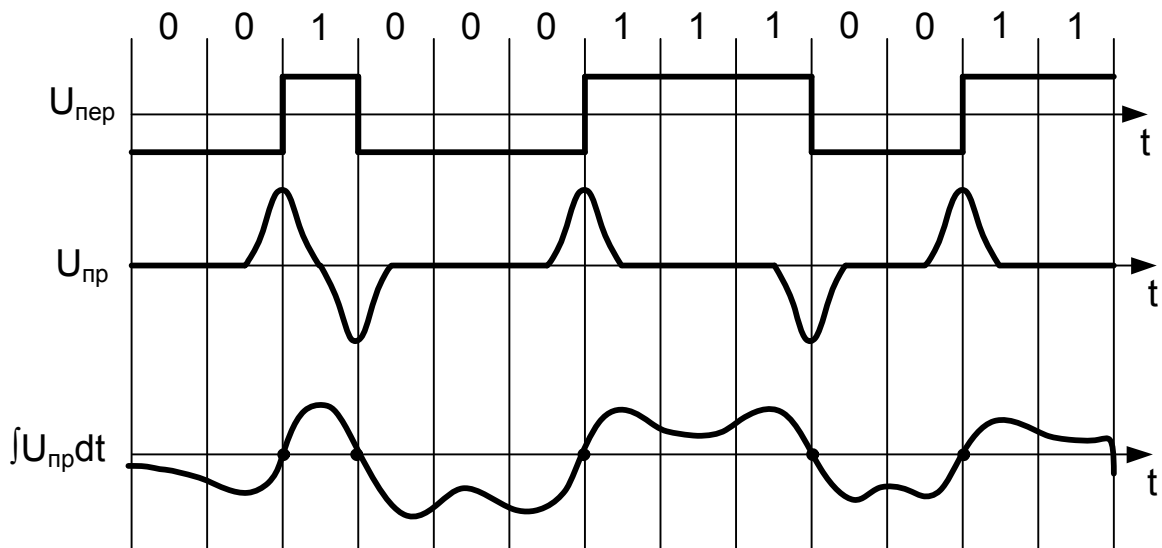


Рисунок 2.4 – Інтегруюче формування сигналу, що приймається

Ці способи називають по-різному: дуобінарні, перетворення коду з корельованими рівнями, парціальні (з частковим відгуком).

Унаслідок надмірного обмеження спектру сигналу при фільтрації смуга пропускання при заданій швидкості передачі сигналів зменшується, а імпульси, що перекриваються, створюють безліч рівнів.

Це ускладнює процес детектування сигналів і підвищує вимоги до потужності сигналу при заданій вірогідності помилок.

На рис. 2.5, а показана імпульсна характеристика типового парціального каналу.

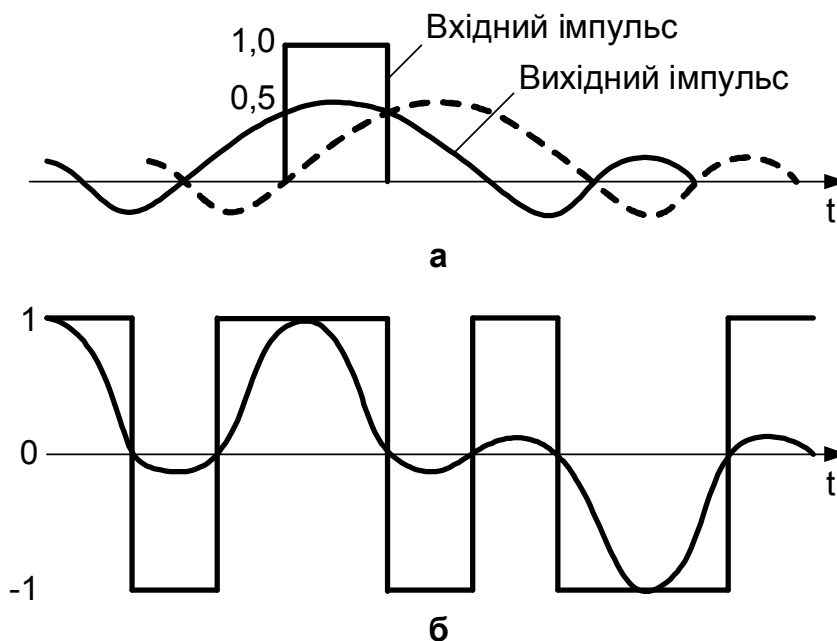
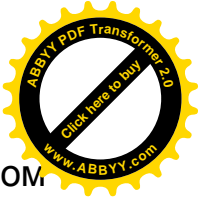


Рисунок 2.5 – Імпульсна характеристика парціального каналу (а) і вихідні трирівневі сигнали (б)



Якщо канал передачі збуджується прямокутним імпульсом тривалістю  $T$ , то каналні фільтри обмежують спектр до такого ступеня, щоб основна частина імпульсу розтягнулася на три тактові інтервали і давала однакові перешкоди в моменти часу існування двох відліків.

Термін парціальний (частковий) виник з того факту, що амплітуда імпульсу на виході каналу відповідає тільки половині амплітуди вхідного імпульсу. Проте, якщо наступний передаваний імпульс має таку ж амплітуду що і попередній, то вихідний сигнал матиме повну амплітуду із-за перекриття імпульсів. Якщо подальший імпульс має протилежну полярність, то при перекритті імпульсів у момент детектування створюється нульова амплітуда.

Тому, як показано на рис. 2.5, б парціальна система з двома рівнями вхідного сигналу (+1,-1) створює на виході сигнал з трьома рівнями (+1, 0 -1).

Парціальне формування ускладнене із-за додаткових рівнів, що створюються каналними фільтрами, і, унаслідок того, що значення в моменти детектування залежать від амплітуд двох сусідніх імпульсів.

Один з методів парціального формування сигналів полягає у відніманні частини попереднього прийнятого імпульсу, що перекривається, з імпульсу, що прийшов, для отримання різниці, яка представляє реакцію каналу на новий імпульс. Віднімати частину, що перекривається (інтерференцію), необхідно тільки в моменти детектування. Різницеві відліки номінально рівні половині амплітуди невідомого вхідного імпульсу. При цьому способі формування вірогідність помилок також подвоюється.

Інший метод парціального формування заснований на попередньому перетворенні сигналу до передачі. Вхідний сигнал змінюється так, щоб рівень імпульсу на вході приймача безпосередньо відображав початковий імпульс без його порівняння з попереднім імпульсом. У двійковій системі, наприклад, одиниця перетвориться в імпульс тієї ж полярності, що і попередній імпульс. Отже, на прийомі логічні одиниці відображаються рівнями +1 або -1. Передача нуля відповідає передачі імпульсу протилежній полярності по відношенню до попереднього імпульсу. Тому на прийомі логічні нулі відображаються як рівні близькі до нуля.

Спосіб передачі з частковим відгуком є окремим випадком більш загального класу способів передачі сигналів, званих **перетворенням коду з корельованими рівнями**.

Для опису властивостей таких систем зазвичай вводять оператора затримки  $D$  для позначення затримки, рівної тривалості одного тактового інтервалу  $T$ .

Затримка на два інтервали реалізується за допомогою двох послідовних затримок і позначається як  $D^2$ .

При таких позначеннях парціальна система описується виразом  $1+D$ , тобто вихідний сигнал є сумою вхідного сигналу і вхідного сигналу, затриманого на один тактовий інтервал.

Існують й інші форми, наприклад, парціальна система вигляду  $1-D$  (рис. 2.6).

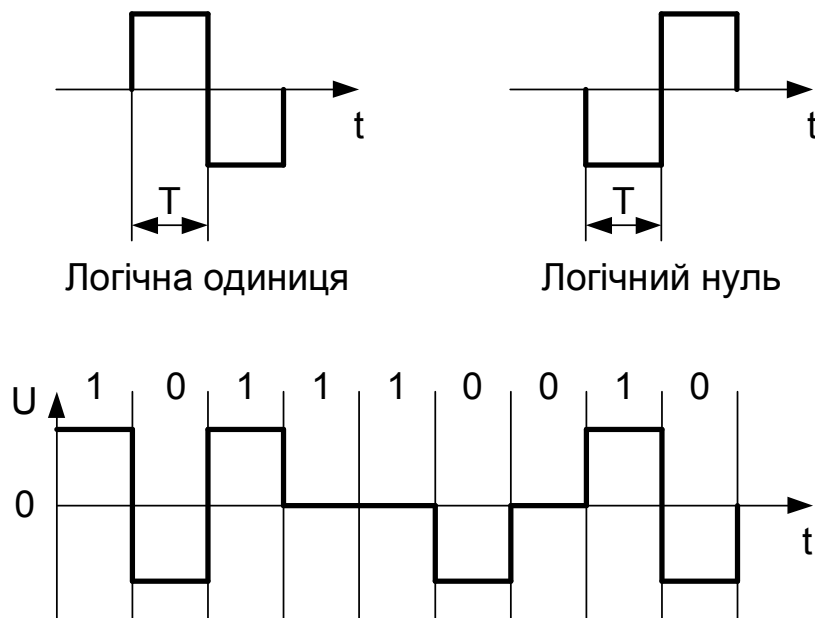


Рисунок 2.6 – Сигнал при перетворенні коду вигляду  $1-D$

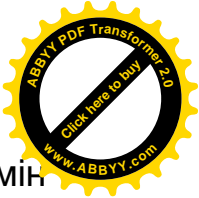
При перетворенні коду вигляду  $1-D$  для кожного біта використовується один період прямокутного коливання, що охоплює два тактові інтервали. Оскільки жоден з двох сигналів не містить постійної складової, в перетвореному сигналі немає коливань базової лінії. Крім цього, позитивні і негативні рівні складеного сигналу чергуються так, що це нагадує біполярне перетворення.

Особливий інтерес представляє сигнал вигляду  $1-D^2$ . Його спектр не містить постійної складової, а перший нуль спектру знаходиться в точці  $1/2T$ . Спектр при перетворенні вигляду  $1-D^2$  є, по суті, добутком спектрів при перетвореннях вигляду  $1+D$  і  $1-D$ .

Таким чином, парціальна система вигляду  $1-D^2$  може бути реалізована шляхом послідовного з'єднання пристрою, що здійснює перетворення виду  $1-D$  і каналу, що має характеристику виду  $1+D$ .

## 2.2 Мультиплексування потоків даних

Перші системи зв'язку використовували окремі лінії передачі для організації кожного каналу. Ідея організації передачі декількох каналів по одній лінії, тобто ідея **мультиплексування** була вперше здійснена в 1918 році за допомогою механічного комутатора.



Під мультиплексуванням (часто також використовується термін **ущільнення**) розумітимемо об'єднання декількох менших за ємністю вхідних каналів зв'язку в один канал передачі більшої ємності. При реалізації такого об'єднання одним з основних завдань є усунення взаємного впливу сусідніх каналів. Найчастіше використовують два методи мультиплексування:

- з **частотним** розділенням каналів (частотне мультиплексування/ущільнення);
- з **часовим** розділенням каналів (часове мультиплексування/ущільнення).

При частотному мультиплексуванні смуга частот вихідного каналу ділиться на деяке число підсмуг (підканалів). Частотне мультиплексування достатнє складне в реалізації і настройці.

При часовому мультиплексуванні на передавальній стороні комутатор послідовно підключає кожен вхідний канал на певний проміжок часу (званий також тайм-слот, інтервал комутації, цикл), необхідний для посилки якоїсь фіксованої частини сигналу в даному каналі. Сформований таким чином потік частин сигналів від різних вхідних каналів прямує в канал зв'язку. На приймальній стороні виконується демультимплексування каналу зв'язку за допомогою аналогічного комутатора і розподілу частин сигналів по різних вихідних каналах. Слід зазначити, що комутатори на передавальній і приймальній сторонах повинні бути **синхронізовані**.

Одиничний волоконний світлопровід може бути використаний як для одноканального, так і для багатоканального зв'язку, в одному або двох напрямках.

При багатоканальному зв'язку мультиплексування - операція абсолютно необхідна.

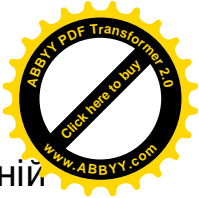
Багатоканальні системи світлопроводів можуть бути побудовані з використанням двох видів мультиплексування:

- мультиплексування **електричних** сигналів перед їх перетворенням в оптичні;
- мультиплексування **оптичних** сигналів.

### **Оптичне (хвилеве) мультиплексування (Wavelength Division**

Multiplexing – WDM) використовує принцип частотного розділення в оптичному середовищі.

Хвилевий оптичний мультиплексор об'єднує декілька вхідних сигналів з різними несучими частотами в один багаточастотний оптичний сигнал і передає його в одне волокно. Мультиплексування виконується пасивними пристроями, функціонування яких ґрунтується на відомих явищах фізичної оптики - дисперсії, дифракції, інтерференції. Зворотну операцію здійснює оптичний демультимплексор, який виділяє з багаточастотного сигналу одноканальні несучі потоки і направляє їх по окремих волокнах до приймачів.



Звичайне оптичне волокно має три вікна прозорості в інфрачервоній області, їх центральні довжини хвиль рівні 850, 1300 і 1550 нм. Для передачі сигналів на великі відстані використовуються довжини хвиль 1300 і 1550 нм, що мають мінімальне загасання.

Спочатку в одному оптичному волокні об'єднувалися і відокремлювалися оптичні сигнали двох довжин хвиль  $\lambda_1=1310$  нм і  $\lambda_2=1550$  нм або  $\lambda_2=850$  нм. Це дозволяло подвоїти пропускну спроможність одного волоконного світлопровода.

Потім почали застосовувати системи оптичного мультиплексування високої щільності (DWDM), в яких зазвичай передаються 4, 8, 16, 32 або 80 і більш каналів з швидкостями 2,5 або 10 Гбіт/с.

У цих системах використовується третє вікно прозорості з довжинами хвиль 1528 - 1560 нм або так звана стандартна смуга C (Conventional), а інтервал частот між каналами складає 100 - 1000 ГГц (приблизно 0,8...8 нм).

Крім цього, формується клас широкосмугових DWDM систем, що перекривають третє (1320 - 1528 нм) і четверте (1528 - 1612 нм) вікна прозорості. Четверте вікно ще називають L (Long) смугою.

Нарешті, створене волокно, в якому усунений пік поглинання в п'ятому вікні прозорості (близько 1400 нм).

У MCE-T обговорюються проблеми використання шести суміжних частотних смуг оптичного діапазону (табл. 2.1).

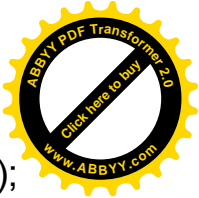
**Таблиця 2.1 – Частотні смуги оптичного діапазону**

Позначення	Найменування смуги	Діапазон, мкм
<b>O</b>	Первинна (Original)	1,260 – 1,360
<b>E</b>	Розширена (Extended)	1,360 – 1,460
<b>S</b>	Короткохвильова (KB) (Short wavelength)	1,460 – 1,530
<b>C</b>	Стандартна (Conventional)	1,530 – 1,565
<b>L</b>	Довгохвильова (ДВ) (Long wavelength)	1,565 – 1,625
<b>U</b>	Наддовгохвильова (СДВ) (Ultra long wavelength)	1,625 – 1,675

Мультиплексування з **кодовим розділенням** (CDM - Code Division Multiplexing), відоме також як широкосмугове, є ще одним методом, що набув великого поширення (у зв'язку з бурхливим розвитком стільникового зв'язку).

На відміну від інших методів мультиплексування, де енергія сигналу концентрується на вибраних частотах або часових інтервалах, в методі CDM енергія сигналу розподілена в безперервному частотно-часовому просторі.

Принцип CDM полягає в розширенні спектру початкового інформаційного сигналу, яке може виконуватися двома способами:



- стрибкоподібним перемиканням частоти (FH - Frequency Hopping);
- прямою черговою частоти (DS - Direct Sequence).

При передачі способом FH несуча частота в передавачі постійно міняє своє значення в деяких заданих межах по псевдовипадковому закону.

Спосіб DS заснований на модуляції інформаційного сигналу єдиним і унікальним у своєму роді псевдовипадковим шумоподібним сигналом, що формується на основі псевдовипадкового коду.

Кількість варіантів таких кодів досягає декількох мільярдів.

В результаті модуляції вузькосмуговий сигнал кожного користувача розширюється на всю ширину частотного спектру, виділеного для користувачів мережі (база сигналу при цьому стає значно більше 1).

У приймачі сигнал відновлюється за допомогою ідентичного коду. Сигнали решти користувачів для даного приймача сприймаються як білий шум.

Принцип CDM використовується в системах множинного доступу з кодовим розділенням CDMA (Code Division Multiple Access). На цьому принципі побудована система оптичного множинного доступу з кодовим розділенням O-CDMA (Optical CDMA).

Велика смуга пропускання оптичного волокна у поєднанні з гнучкою технологією множинного доступу з кодовим розділенням забезпечують високошвидкісне мультиплексування.

Робота систем O-CDMA заснована на способі FH. Несуча частота в передавачі постійно міняє своє значення в деяких заданих межах по псевдовипадковому закону, індивідуальному для кожного каналу (рис. 2.7).

Приймач працює аналогічно, забезпечуючи виділення і подальшу обробку тільки потрібного каналу.

Кожен інформаційний біт розбивається на  $n$  коротких часових інтервалів. Сигнал передається короткими оптичними імпульсами, що модулюються характерним кодовим словом протягом коротких часових інтервалів.

Кожен користувач має свою унікальну послідовність. Кодер кожного передавача представляє біт "1" у вигляді унікальної послідовності, а біт "0" не кодується, а передається як послідовність нулів.

Оскільки кожен біт представляється послідовністю світлих і темних інтервалів, смуга пропускання каналу розширюється.

Закодовані дані передаються через зіркоподібний розгалужувач  $N \times N$  (у локальних мережах), розгалужувач  $1 \times N$  (у мережах доступу) або розповсюджуються у всі вузли.

Унаслідок того, що використовуються унікальні послідовності, кількість користувачів мережі може бути набагато більше числа використовуваних довжин хвиль.



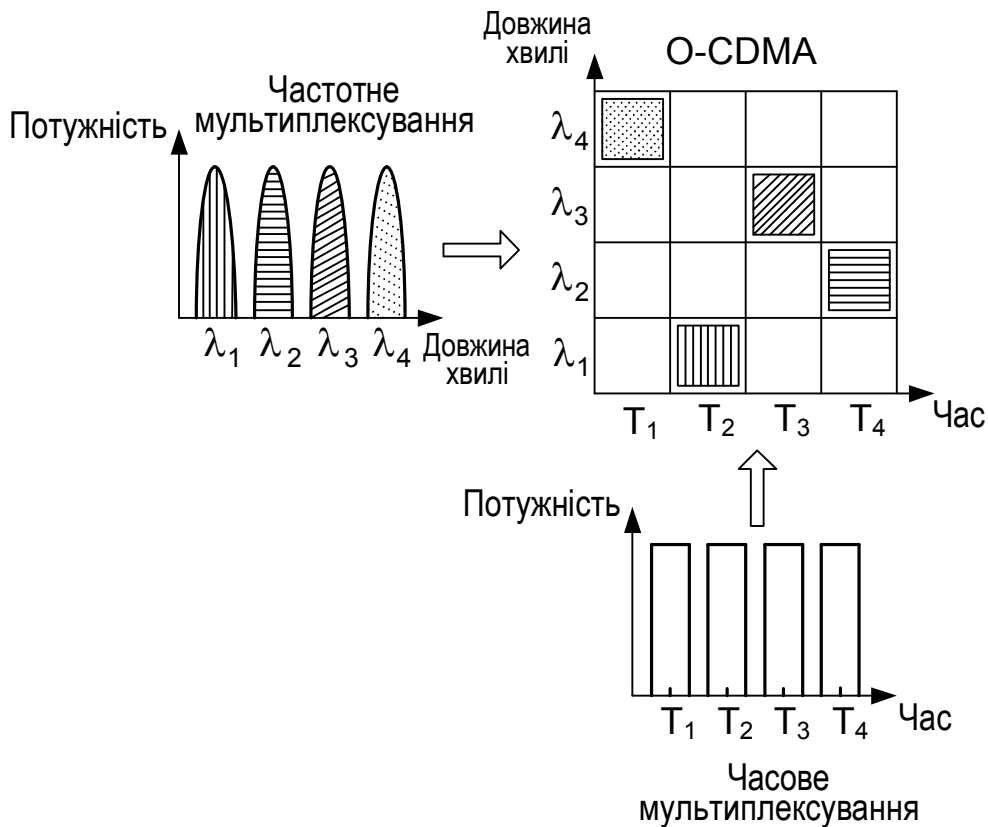


Рисунок 2.7 – Кодове мультиплексування у ВОЛЗ

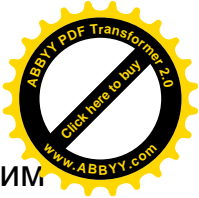
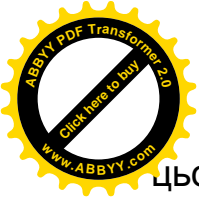
### 3 СИГНАЛИ ПЕРЕДАЧІ

При проектуванні волоконно-оптичних систем передачі необхідно враховувати цілий ряд особливостей, зв'язаних з фізичними властивостями як середовища передачі, так і кінцевих пристроїв – оптичного передавача і приймача оптичних сигналів. Одна з таких особливостей – вибір типу сигналу передачі (так званого лінійного канального коду).

Вибір сигналу складна і надзвичайно важлива проблема, від правильного рішення якої залежать техніко-економічні показники приймально-передавальної апаратури і проектованої системи в цілому.

До сигналів ВОЛЗ пред'являються такі вимоги:

1. Усереднений енергетичний спектр сигналу в лінії повинний мати мінімальний зміст низькочастотних і високочастотних компонентів. Обмеження спектра в області нижніх частот викликано вимогою неспотвореної передачі в підсилювачі перемінного струму фотоприймача прийнятого сигналу. У протилежному випадку для реалізації оптимальних умов прийому перед вирішальним пристроєм регенератора необхідно вводити пристрій відновлення низькочастотної складової. Це ускладнює устаткування лінійного тракту і збільшує його вартість. Крім



цього, оптична потужність, що випромінюється напівпровідниковим лазерним діодом, залежить від навколишньої температури, але її можна стабілізувати введенням негативного зворотного зв'язку за середнім значенням випромінюваної потужності. Однак, зробити це можна тільки в тому випадку, коли відсутня низькочастотна частина спектра, що змінюється в часі в залежності від переданої інформації. У протилежному випадку в ланцюзі зворотного зв'язку повинний бути передбачений  $m$  пристрій компенсації цих змін. Усе це приводить до ускладнення схеми оптичного передавача.

2. Сигнал не повинний накладати які-небудь обмеження на передане повідомлення і забезпечувати однозначну передачу будь-якої послідовності одиниць і нулів.

3. Сигнал у лінії повинний мати властивість самосинхронізації, тобто містити інформацію про тактову частоту. У приймачі ця інформація використовується для відновлення фази і частоти синхронізуючого коливання, необхідного для керування процесом ухвалення рішення граничними пристроями регенераторів. Тактова частота виділяється тим простіше, ніж більше число переходів рівня містить сигнал. У найкращому випадку в усередненому енергетичному спектрі сигналу повинна бути дискретна складова на тактовій частоті. Якщо ця умова не виконується, то необхідно виконувати нелінійну обробку інформаційної послідовності.

4. Статистичні характеристики самосинхронізуємих сигналів не повинні бути довільними для забезпечення стійкої роботи регенераторів. Зокрема, повинне бути обмежене максимальне число символів однакової амплітуди або одного рівня.

5. Структура сигналу в лінії повинна дозволяти виконувати контроль помилок у регенераторах – для автоматичної експлуатації магістральних ліній.

6. Кодери і декодери лінійного тракту, а також пристрою контролю помилок повинні бути схемно простими і мати мале енергоспоживання.

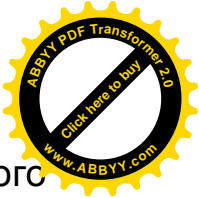
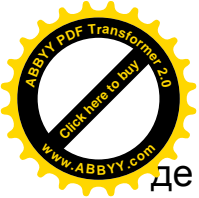
7. Сигнал повинний мати обмежене число рівнів. В основному застосовуються двох і трьохрівневі сигнали, що викликано нелінійністю модуляційних характеристик і температурною залежністю випромінюваної оптичної потужності лазерних діодів.

8. Сигнал повинний забезпечувати одночасну передачу сервісних сигналів.

Для поліпшення статистичних властивостей сигналів у ВОЛЗ часто використовується скремблювання. Узгодження спектра сигналу з передатною характеристикою лінії передачі здійснюється введенням у сигнал контрольованої надмірності. Надмірність  $R$  розраховується по формулі

$$R = (f_{\pi} \log_2 L - f_T \log_2 N) / f_{\pi} \log_2 L, \quad (3.1)$$





де  $f_T$  - тактова частота інформаційного сигналу на вході кодера лінійного тракту (або на виході декодера),  $f_{TI}$  - тактова частота сигналу на виході кодера лінійного тракту (або на вході декодера), тобто в лінії передачі,  $N$  - число дозволених рівнів вхідного сигналу,  $L$  - число дозволених рівнів вихідного сигналу.

Для характеристики сигналів у лініях використовується також параметр, який називають поточною цифровою сумою RDS (Running Digital Sum)

$$RDS(k) = \sum_{n=1}^{n=k} c_n + RDS(0), \quad (3.2)$$

де  $c_n = 1, -1$  для дворівневих сигналів,  $c_n = 1, 0, -1$  для трьохрівневих сигналів, і таке інше, а  $RDS(0)$  - довільно обрана константа. З її допомогою зручно визначати збалансованість сигналу – величину коливань базової лінії. Різниця максимального і мінімального значень поточної цифрової суми називають коливанням цифрової суми DSV (Digital Sum Variation)

$$DSV = RDS_{\max} - RDS_{\min}. \quad (3.3)$$

$DSV$  відображає максимальну довжину послідовностей, що складаються з однакових імпульсів і приблизно пропорційно амплітуді низькочастотних перекручувань сигналу.

Надмірність у сигнал може бути введена підвищенням частоти повторення імпульсів і/або збільшенням числа рівнів для представлення інформації. Другий шлях у системах зв'язку використовується частіше. Однак, неоднорідності в лініях і підвищення складності регенераторів обмежують число застосовуваних рівнів трьома. Це ж відноситься і до довжини кодових слів, з яких формується сигнал передачі.

У таблиці 3.1 приведені значення ефективностей ( $E = (\log_2 N / \log_2 L) \cdot 100\%$ ) деяких збалансованих кодів, на базі яких формуються сигнали передачі.

**Таблиця 3.1 – Ефективність збалансованих кодів**

Код	1В/1Т	2В/2Т	4В/3Т	5В/4Т	7В/5Т	8В/6Т
Ефективність, %	63,09	63,09	84,12	78,87	88,33	84,12

### 3.1 Алгоритми формування сигналів

Розглянемо більш детально деякі характерні сигнали передачі.

**Сигнали, засновані на 1В/1Т кодах.** Цей клас сигналів базується на кодах, для яких один двійковий символ перетворюється в один трійковий символ. Найбільш відомим представником цього класу сигналів є AMI (Alternate Mark Inversion) сигнал. Деякі загальні властивості цієї групи сигналів такі:

- простота схемної реалізації кодування і декодування;



- невисока ефективність (63%);
- надійність передачі і висока завадостійкість, унаслідок великої надмірності.

Наприклад, для AMI сигналу алгоритм формування дуже простий: відсутність імпульсів у тактових інтервалах при передачі інформаційних нулів і позитивні і негативні імпульси, що чергуються при передачі інформаційних одиниць.

AMI сигнали володіють деякими привабливими властивостями:

- усереднений енергетичний спектр має малий зміст низькочастотних компонентів ( $DSV=1$ ) і нульову постійну складову;
- у зв'язку з відсутністю необхідності вирівнювання довжини кодових слів схеми кодування-декодування дуже прості, що дає перевагу в системах передачі на короткі відстані;
- легко виявляти помилки передачі шляхом аналізу порушень алгоритму передачі.

Однак, AMI сигнали не врятовані від ряду істотних недоліків, основними з яких є:

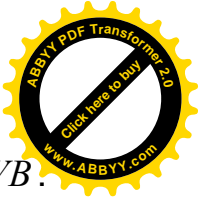
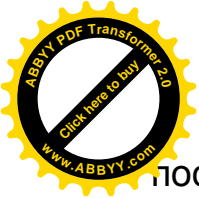
- наявність необмежених довгих проміжків сигналу без зміни рівня ("непрозорість каналу" – відсутність передачі енергії), що дуже ускладнює відновлення часових співвідношень;
- ефективність сигналу тільки 63%.

Усунути "непрозорість каналу" дозволяють сигнали, засновані на модифікованих AMI кодах. У таких сигналах послідовності, що складаються з  $n$  нулів замінюються послідовностями, що порушують алгоритм формування AMI сигналів. Ці порушення дозволяють ідентифікувати такі послідовності на прийомній стороні і відновити нулі.

Модифіковані AMI сигнали можна розділити на дві великі групи за принципом ідентифікації порушень алгоритму формування коду. До першої групи відносяться сигнали, у яких замісна кодова послідовність залежить тільки від полярності імпульсу, що передуює цієї послідовності. До другої групи відносяться сигнали, у яких замісна послідовність визначається як полярністю попереднього імпульсу, так і видом попередньої послідовності.

Сигнали, що відносяться до першої групи, по визначенню, повинні бути балансовими. У протилежному випадку постійна і крайні низькочастотні складові повинні бути додані в сигнал передачі. Тому змінений сигнал повинен містити, принаймні, два порушення алгоритму формування протилежної полярності. Це може бути здійснено вставкою непарного числа імпульсів між порушеннями алгоритму. Таким чином, найкоротша послідовність заміни містить три символи і позначається  $VBV$  (символ  $V$  порушує AMI алгоритм, символ  $B$  відповідає AMI алгоритмові).

На практиці із сигналів першої групи найбільше поширення одержав сигнал B6ZS (Bipolar with 6 Zero Substitution – біполярний з 6 замінними нулями). У цьому сигналі кожен кодовий блок, що складається з 6



послідовних нулів замінюється послідовностями виду  $0VB0VB$ . Достоїнство цього алгоритму в тім, що імпульси однакової полярності завжди розділені нулем (табл.3.2).

**Таблиця 3.2 – Алгоритм формування B6ZS сигналу**

Попередній імпульс	Послідовність заміни
+	0 + - 0 - +
-	0 - + 0 + -

Незважаючи на те, що для B6ZS сигналу значення DSV дорівнює 3, сумарні перекручування цього сигналу при проходженні по лінії передачі менше, ніж в AMI.

Для другої групи сигналів усередині послідовності заміни баланс може бути відсутній, однак він може бути досягнутий за рахунок іншої послідовності. Найкоротша послідовність заміни містить одне порушення алгоритму формування, полярність якого змінюється в залежності від попереднього порушення алгоритму. Реалізується це вставкою біполярного імпульсу перед порушенням алгоритму. Тому найкоротша послідовність заміни містить два символи  $BV$  або  $0V$ . На цій основі формуються сигнали HDB (High Density Bipolar – високої щільності біполярні) і CHDB (Compatible HDB – сумісний HDB).

У HDBn сигналах кожен блок з  $n + 1$  послідовних нулів замінюється блоком такої ж довжини виду  $B...V$  або  $0...V$ . У цьому позначенні  $n$  вказує порядок коду, тобто максимально можливе число послідовних нулів у кодованій послідовності. При цьому імпульси  $V$  завжди чергуються по полярності. Якщо вибрати іншу послідовність заміни, тобто,  $...B0V$  або  $...00V$ , одержимо сигнали типу CHDBn. Їх називають сумісними в зв'язку з тим, що декодування може бути виконане безвідносно до порядку коду. Слід зазначити, що сигнали HDB2 і CHDB2 ідентичні.

Із сигналів другої групи широке розповсюдження одержав сигнал HDB3, що був рекомендований CCITT для використання в первинних ІКМ системах. Алгоритм формування HDB3 сигналу полягає в тім, що кожен блок з 4 послідовних нулів замінюється блоком  $B00V$  або  $000V$ . Вибір того або іншого блоку заміни здійснюється так, щоб їхня полярність чергувалася (табл. 3.3).

**Таблиця 3.3 – Алгоритм формування HDB3 сигналу**

Полярність попереднього блоку	Полярність попереднього імпульсу	Послідовність заміни
+	+	- 0 0 - $B00V$
-	-	+ 0 0 + $B00V$
+	-	0 0 0 - $000V$
-	+	0 0 0 + $000V$

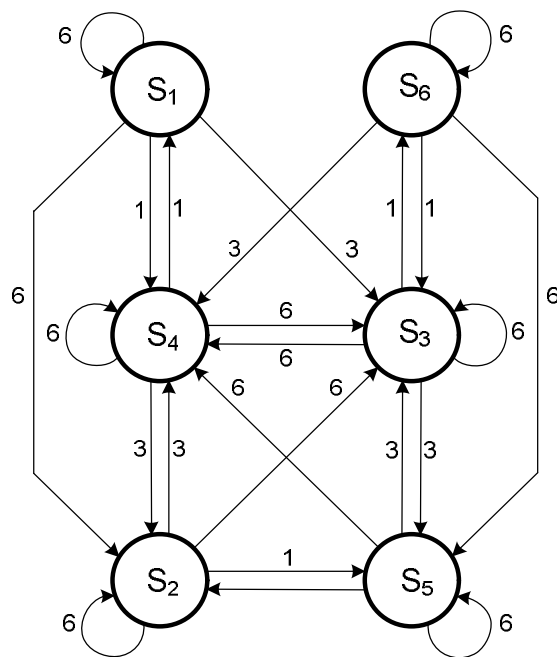


Рисунок 3.1 - Орграф станів сигналу 4В-3Т

Як видно з таблиці 3.3 для сигналу HDB3 число послідовних нулів не перевищує 3.

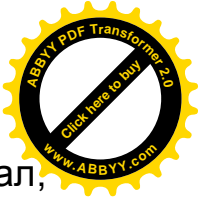
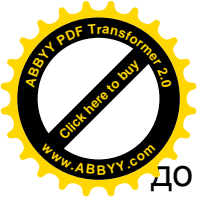
Деякі параметри розглянутих сигналів зведені в табл. 3.4.

**Таблиця 3.4 – Параметри сигналів передачі**

Параметр	AMI	HDB3	B6ZS
Максимальне число послідовних нулів	$\infty$	3	5
DSV	1	2	3
Число рівнів	3	3	3
Мінімальна щільність імпульсів	0	0,25	0,16
Ефективність, %	63	63	63

**Сигнали, засновані на 4В/3Т кодах.** Цей клас сигналів має значно більшу ефективність (табл.3.1). Сигнали цього класу формуються шляхом перетворення 4-х символних двійкових слів у 3-х символні трійкові слова. При цьому необхідно відібрати з 27 трійкових слів такі 16 слів, щоб забезпечити однозначність перетворення і збалансованість коду. Звичайно відбирають 6 трійкових слів з нульовою постійною складовою, за винятком комбінації 000, і 10 пар незбалансованих слів. Вибір наступного трійкового слова здійснюється безупинно на підставі обчислення поточної цифрової суми (RDS), значення якої повинно бути мінімальним.

Практично використовуються кілька сигналів цього класу, з яких найпростішим є 4В-3Т сигнал. У ньому незбалансовані трійкові слова є попарно інверсними одне іншому. RDS може приймати 8 значень: від 0



до 7 (DSV=7). Число можливих станів, у яких може знаходитися сигнал, дорівнює 6 (рис. 3.1).

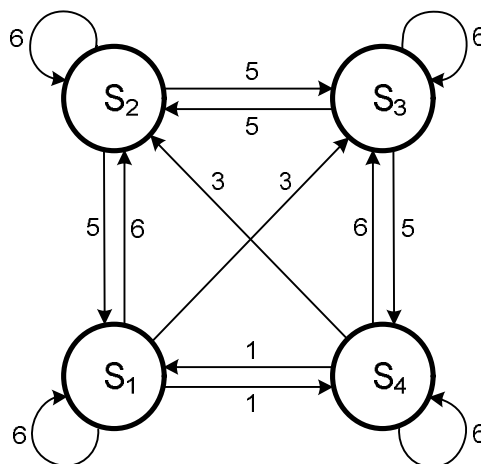
Алгоритм формування 4В-3Т сигналу приведений у табл. 3.5.

**Таблиця 3.5 - Алгоритм формування 4В-3Т сигналу**

Двійкове слово	Трійкове слово	
	S <sub>1,2,3</sub>	S <sub>4,5,6</sub>
0 0 0 0	0 - +	0 - +
0 0 0 1	- + 0	- + 0
0 0 1 0	- 0 +	- 0 +
0 0 1 1	+ - +	- + -
0 1 0 0	0 + +	0 - -
0 1 0 1	0 + 0	0 - 0
0 1 1 0	0 0 +	0 0 -
0 1 1 1	- + +	+ - -
1 0 0 0	0 + -	0 + -
1 0 0 1	+ - 0	+ - 0
1 0 1 0	+ 0 -	+ 0 -
1 0 1 1	+ 0 0	- 0 0
1 1 0 0	+ 0 +	- 0 -
1 1 0 1	+ + 0	- - 0
1 1 1 0	+ + -	- - +
1 1 1 1	+ + +	- - -

Тут використовуються два алфавіти: позитивний, що містить слова з нульовою і позитивною постійною складовою (для станів 1, 2, 3) і негативний, що містить слова з нульовою і негативною постійною складовою (для станів 4, 5, 6).

Трохи кращою збалансованістю і часовими властивостями володіє MS 43 сигнал. У нього RDS може приймати 6 значень: від 0 до 5 (DSV=5), а число можливих станів дорівнює 4 (рис. 3.2).



**Рисунок 3.2 - Орграф станів сигналу MS 43**

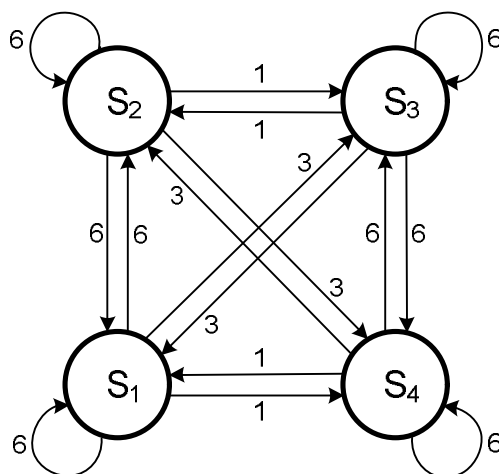


При формуванні MS 43 використовується три алфавіти: позитивний, що відповідає станів 1, негативний, що відповідає станів 4 і змішаний, який містить слова з нульовими постійними складовими і значеннями  $\pm 1$ , що відповідає станам 2, 3 (табл. 3.6).

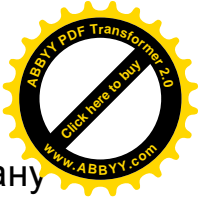
**Таблиця 3.6 - Алгоритм формування MS 43 сигналу**

Двійкове слово	Трійкове слово		
	S <sub>1</sub>	S <sub>2,3</sub>	S <sub>4</sub>
0 0 0 0	+ + +	- + -	- + -
0 0 0 1	+ + 0	0 0 -	0 0 -
0 0 1 0	+ 0 +	0 - 0	0 - 0
0 0 1 1	0 - +	0 - +	0 - +
0 1 0 0	0 + +	- 0 0	- 0 0
0 1 0 1	- 0 +	- 0 +	- 0 +
0 1 1 0	- + 0	- + 0	- + 0
0 1 1 1	- + +	- + +	- - +
1 0 0 0	+ - +	+ - +	- - -
1 0 0 1	0 0 +	0 0 +	- - 0
1 0 1 0	0 + 0	0 + 0	- 0 -
1 0 1 1	0 + -	0 + -	0 + -
1 1 0 0	+ 0 0	+ 0 0	0 - -
1 1 0 1	+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -
1 1 1 0	+ - 0	+ - 0	+ - 0
1 1 1 1	+ + -	+ - -	+ - -

Ще одним різновидом 4B/3T сигналів є сигнал FOMOT (FOur MOde Ternary). У цьому сигналі RDS може приймати 6 значень: від 0 до 5 (DSV=5), а число станів дорівнює 4 (рис. 3.3).



**Рисунок 3.3 - Орграф станів сигналу FOMOT**



FOMOT використовує чотири алфавіти – кожний для свого стану (табл. 3.7).

**Таблиця 3.7 – Алгоритм формування FOMOT сигналу**

Двійкове слово	Трійкове слово			
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
0 0 0 0	- + +	- 0 0	- + +	- 0 0
0 0 0 1	- + 0	- + 0	- + 0	- + 0
0 0 1 0	+ - 0	+ - 0	+ - 0	+ - 0
0 0 1 1	+ 0 0	+ - -	+ 0 0	+ - -
0 1 0 0	- 0 +	- 0 +	- 0 +	- 0 +
0 1 0 1	+ + +	- + -	- + -	- + -
0 1 1 0	+ 0 +	+ 0 +	- 0 -	- 0 -
0 1 1 1	+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -
1 0 0 0	0 + +	0 + +	- - 0	- - 0
1 0 0 1	0 + 0	0 - 0	0 + 0	0 - 0
1 0 1 0	+ - +	+ - +	+ - +	- - -
1 0 1 1	+ + 0	+ + 0	0 - -	0 - -
1 1 0 0	0 0 +	- - +	0 0 +	- - +
1 1 0 1	0 + -	0 + -	0 + -	0 + -
1 1 1 0	0 - +	0 - +	0 - +	0 - +
1 1 1 1	+ + -	0 0 -	+ + -	0 0 -

При цьому імовірність перебування сигналу в кожному з чотирьох станів дорівнює 0,25.

Швидкість передачі даних може бути збільшена і при збереженні дворівневості сигналів, якщо формувати сигнали на основі кодів обмеженої довжини або (d, k)–кодів.

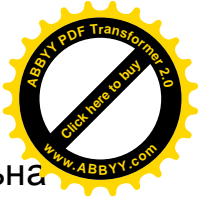
**Визначення.** dk–обмежена з основою L послідовність одночасно задовольняє умовам:

d - обмеження – два суміжних ненульових символи відділені послідовністю нулів довжиною не менш d;

k - обмеження – будь-яка послідовність нулів має довжину не більш k.

Будь-які сигнали передачі можуть бути представлені в рамках dk-обмежень. Найбільше поширення в даний час одержали такі дворівневі сигнали.

**(1, 3) - сигнал** (код Міллера, затримана модуляція, УФМ – удосконалена фазова модуляція, та ін.) утворюється за правилом: інформаційній одиниці відповідає перехід рівня сигналу в середині тактового інтервалу, а інформаційному нулеві – перехід рівня сигналу на границі тактового інтервалу, або відсутність такого переходу (рис. 3.4).



**(2, 7) - сигнал** (HDM-2, High Density Modulation (високощільна модуляція) формується відповідно до алгоритмів (табл. 3.8):

**Таблиця 3.8 – Алгоритми формування (2, 7)-сигналу**

Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
Вхідне двійкове слово	Вихідне двійкове слово	Вхідне двійкове слово	Вихідне двійкове слово	Вхідне двійкове слово	Вихідне двійкове слово
11	0100	00	0100	11	0100
10	1000	01	1000	10	00Y0
011	000100	100	100100	01	1000
010	001000	101	000100	001	000100
000	100100	110	001000	000	100100
0011	00100100	1110	00100100		
0010	00001000	1111	00001000		

Для варіанта 3  $Y=0$ , якщо старший розряд наступного вихідного двійкового слова дорівнює 1, і  $Y=1$ , якщо цей розряд дорівнює 0 (рис. 3.4).

**(2, 8)- сигнал** (HDM-1, High Density Modulation (високощільна

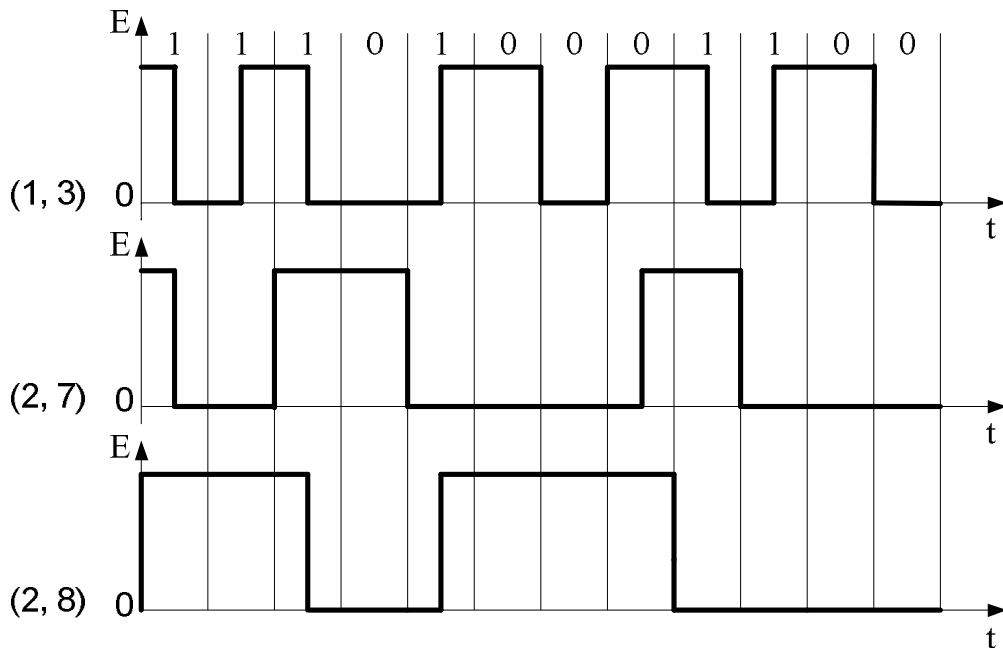


Рисунок 3.4 - Часові діаграми дворівневих сигналів передачі

модуляція) формується відповідно до алгоритму (табл. 3.9):

**Таблиця 3.9 – Алгоритм формування (2, 8)-сигналу**

Вхідне двійкове слово	Вихідне двійкове слово
10	0100
11	1000





0(1)	00
00(1)	0000
000	100100

У дужках відзначений наступний символ (рис. 3.4).

Відповідно до рекомендацій ІТУ-Т G.703 для ієрархій ПЦІ Е1, Е2 і Е3 варто застосовувати трьохрівневий сигнал HDB3. Часто використовується також сигнал АМІ (для невисоких швидкостей передачі, наприклад, 2048 Кбіт/с). Ці сигнали не містять постійну складову, що задовольняє вимогам передачі по електричних лініях. Ця вимога залишається в силі і для оптичних ліній. На відміну від електричного кабелю, по якому можна передавати імпульси струму як позитивної, так і негативної полярності, по оптичному волокну можна передавати імпульси тільки позитивної полярності. Тому при передачі по оптичній лінії двополярних сигналів HDB3 або АМІ на одній довжині хвилі, ці сигнали перетворюються в однополярні з постійною складовою (рис. 3.5).

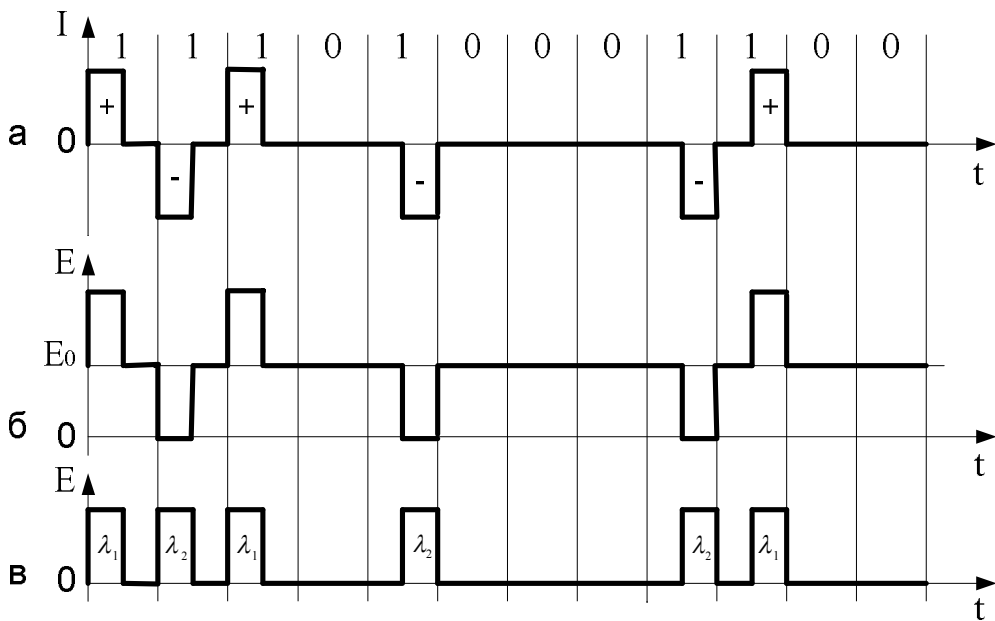
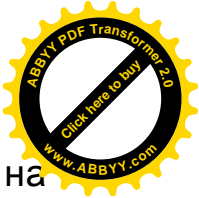


Рисунок 3.5 - Часові діаграми сигналу HDB3

На рис. 3.5, а показаний сигнал HDB3 при передачі по електричному кабелю, а на рис. 3.5, б – при передачі по оптичному волокну. Неважко побачити, що у випадку передачі по оптичному волокну сигнал містить постійну складову  $E_0$ , величина якої залежить від виду переданих кодових комбінацій. У цілому при використанні у ВОЛЗ сигнал HDB3 має такі недоліки:

- потужність суміжних символів (наприклад, двох одиниць) у два рази менше (на 3 дБ) у порівнянні з максимальною потужністю, випромінюваною оптичним передавачем;



- наявність постійної складової вимагає стабілізації робочої точки на ватт-амперній характеристиці лазера, що ускладнює схему передавального оптичного модуля;

- залежність величини  $E_0$  від статистики кодових комбінацій приводить до коливань базової лінії сигналу, що знижує завадостійкість системи передачі.

Слід зазначити, що наявність постійної складової в оптичному сигналі є еквівалентним фоновій засвітці. Через це в процесі ухвалення рішення про переданий символ необхідно враховувати дробовий шум, що виникає внаслідок фону і зменшує відношення сигнал/шум.

Зазначені недоліки сигналу HDB3 у ВОЛЗ характерні для передачі на одній довжині хвилі. У тому випадку, коли позитивні імпульси сигналу HDB3 передаються на одній довжині хвилі випромінювання, наприклад,  $\lambda_1$ , а негативні імпульси – на іншій довжині хвилі, наприклад,  $\lambda_2$ , те ці недоліки відсутні (рис. 3.5, в). Такий спосіб передачі називають хвильовою передачею (кодуванням).

У сучасних системах ВОЛЗ, призначених для передачі цифрової інформації з використанням ієрархій E1, E2, E3 використовується перетворення сигналу HDB3 в інший сигнал, що підходить для передачі по оптичній лінії. Найчастіше це сигнали типу CMI або MCMI, що не містять постійної складової і по інших параметрах оптимізовані для передачі по оптичному волокну. При цьому підвищується тактова частота, а смуга займаних частот істотно розширюється. У більш швидкісних системах передачі, наприклад ПЦІ E4, використовуються сигнали типу 5B6B, 10B1P1R та ін. Відзначимо, що для ВОЛЗ сигнал HDB3, що надходить на вхід при передачі і на вихід при прийомі є стиковим.

На рис. 3.6 показана узагальнена структурна схема однопрогонової ВОЛЗ.

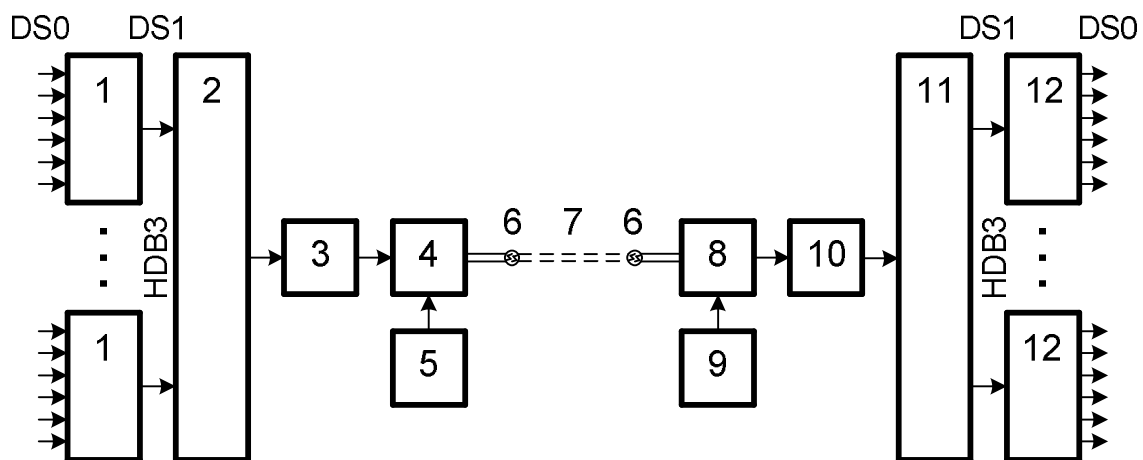


Рисунок 3.6 - Узагальнена структурна схема однопрогонової ВОЛЗ



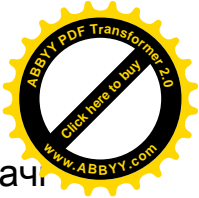
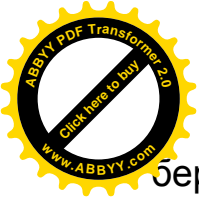
На цьому рисунку основні інформаційні потоки рівня DS0 за допомогою мультиплексорів 1 перетворюються в інформаційні потоки рівня DS1, що використовують сигнал HDB3. Мультиплексор 2 перетворює стиковий сигнал HDB3 у лінійний сигнал. Лінійний сигнал надходить у блок 3 узгодження (накачування) випромінювача 4 оптичного сигналу (лазера або світловипромінюючого діода). Стабілізація вихідної оптичної потужності випромінювача 4 і його температури здійснюється блоком 5. Оптичні рознімачі 6 приєднані до оптичного кабелю 7. На прийомній стороні сигнал попадає на фотодетектор 8, до якого підключене джерело 9 електричної напруги зсуву робочої точки характеристики, підсилюється широкосмуговим підсилювачем 10 і надходить на перетворювач 11. Перетворювач 11 являє собою демультимплексор, що знову формує потоки рівня DS1, які далі за допомогою демультимплексорів 12 перетворюються в сигнали рівня DS0. Таку структурну схему мають практично всі однопрогонові (без проміжних пунктів) ВОЛЗ.

### 3.2 Формування спектру

Необхідність у формуванні спектрів сигналів пояснюється, принаймні, двома причинами.

Першою з них є необхідність узгодження характеристик сигналу з характеристиками середовища поширення. Більшість трактів передачі лінійні, тому їх найбільш зручно описувати частотними характеристиками. Ці характеристики майже завжди обмежені по частоті зверху й знизу, причому за межами верхньої і нижньої граничних частот ефективна передача сигналу практично неможлива. Усереднений енергетичний спектр сигналу може бути визначений, наприклад, за допомогою автокореляційної функції. Передача спектра сигналу в обмеженій смузі частот еквівалентна вирахуванню загублених частотних складових із прийнятого сигналу й, отже, приводить до виникнення перекручувань. Якщо величина загубленої енергії мала, то й результуючі перекручування будуть невеликі.

Відомо, що мінімальна ширина смуги частот, що потрібна для передачі сигналу із припустимою величиною перекручувань, визначається за допомогою критеріїв Найквіста. Однак, ряд специфічних питань не були розглянуті Найквістом. Наприклад, він не враховував вигляд енергетичного спектра сигналу, тобто яким чином розподіляється енергія усередині смуги переданих частот. Отже, можна використати сигнали, енергія яких дорівнює нулю на частотах, що обмежують смугу передачі, мала або дорівнює нулю поза даною смугою, а також мала або дорівнює нулю усередині області переданих частот. Найквіст також не встановлював, що сигнали повинні бути дискретизовані з певною частотою й не досліджував особливості передачі багаторівневих сигналів. Він розглядав передачу тільки певних елементів сигналу, не



беручи до уваги обмеження, що накладають способами передачі інформації. Шеннон показав, що смуга частот, необхідна для передачі інформації з певною тактовою частотою, може бути довільно вузькою, якщо забезпечується рівень шуму, що прагне до нуля.

Друга причина, що вимагає створення енергетичного спектра особливої форми, полягає в необхідності зменшення перехідного впливу між каналами передачі. Рівень перехідного впливу майже завжди визначається рівнем енергії високочастотних складових спектра сигналу. Прикладом може служити передача імпульсної послідовності по парах симетричного кабелю. У радіорелейних системах і при передачі по хвилеводах, де використовується модуляція несучої, величина перехідного впливу між стволами визначається високочастотною частиною спектра модульованого сигналу.

Зі сказаного вище ясно, що знаходження усереднених енергетичних спектрів сигналів передачі має велике значення для підвищення ефективності систем зв'язку.

Питанням знаходження енергетичних спектрів цифрових сигналів присвячено чимало робіт. Найбільш вдалим, на наш погляд, є підхід, заснований на використанні апарата кінцевих ланцюгів Маркова.

**Основні поняття теорії кінцевих ланцюгів Маркова.**

Розглянемо випадковий процес  $\xi(\tau)$ , що функціонує в дискретному часі  $\tau = 0, 1, 2, \dots, n$ . Можливі стани процесу утворюють кінцеву множину станів  $\{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ . Повний імовірнісний опис кінцевого ланцюга Маркова складається із завдання стартового розподілу ймовірностей  $\vec{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_q)$ , де  $\pi_q = p[\xi(0) = s_q]$  - імовірність того, що в початковий момент часу  $\xi(\tau)$  виявиться в стані  $s_q$ , і матриці перехідних імовірностей

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1q} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2q} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{q1} & p_{q2} & \dots & p_{qq} \end{pmatrix}. \tag{3.4}$$

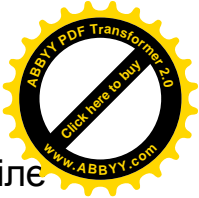
Тут  $p_{ij} = p[\xi(1) = s_j | \xi(0) = s_i]$  - умовна ймовірність того, що процес, що стартував у момент  $\tau = 0$  зі стану  $s_i$ , виявився в момент  $\tau = 1$  у стані  $s_j$ .

Ланцюг Маркова передбачається **однорідним**, тобто для будь-яких  $\tau$

$$p[\xi(\tau + 1) = s_j | \xi(\tau) = s_i] = p_{ij}. \tag{3.5}$$

Елементи ступеня матриці  $P^n$  дають імовірності переходів через  $n$  кроків функціонування ланцюга. З урахуванням цього імовірнісний вектор  $\vec{p}(n)$ , координати якого визначають імовірності станів через  $n$  кроків, визначається формулою

$$\vec{p}(n) = \pi P^n. \tag{3.6}$$



Ланцюг Маркова називається **регулярним**, якщо існує таке ціле позитивне число  $w$ , при якому всі елементи матриці  $P^w$  позитивні. Це означає, що за час, більший або рівний  $w$ , можна перейти з будь-якого стану ланцюга Маркова в будь-який інший її стан з позитивною ймовірністю.

Для регулярних ланцюгів Маркова справедливо таке фундаментальне положення:

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} P^n = A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_q \\ A_1 & A_2 & \dots & A_q \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ A_1 & A_2 & \dots & A_q \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

де  $\vec{A} = (A_1, A_2, \dots, A_q)$  - вектор фінальних імовірностей ланцюга Маркова.

Вектор  $\vec{A}$  може бути знайдений як єдине імовірнісне рішення системи алгебраїчних рівнянь

$$\vec{A}P = \vec{A}, \quad (3.8)$$

або детально:

$$\begin{aligned} p_{11}A_1 + p_{21}A_2 + \dots + p_{q1}A_q &= A_1 \\ p_{12}A_1 + p_{22}A_2 + \dots + p_{q2}A_q &= A_2 \\ \dots & \\ p_{1q}A_1 + p_{2q}A_2 + \dots + p_{qq}A_q &= A_q \\ A_1 + A_2 + \dots + A_q &= 1 \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $A_1 > 0, A_2 > 0, \dots, A_q > 0$ . Помітимо, що, якщо матриця  $P$  - подвійно стохастична, тобто  $\sum_{i=1}^q p_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, q$ , те  $A_1 = A_2 = \dots = A_q = \frac{1}{q}$ .

Відзначимо рівності, що встановлюються безпосередньо:  $AP = PA = A$  і  $\vec{\pi}A = \vec{A}$  для будь-якого імовірнісного вектора  $\vec{\pi}$ . З вищевикладеного випливає, що для будь-якого вектора стартових імовірностей  $\vec{\pi}$

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \vec{p}(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \vec{\pi}P^n = \vec{\pi}A = \vec{A}. \quad (3.10)$$

Рівність (3.10) означає, що як би не стартував ланцюг Маркова, через досить великий час імовірності перебування в станах  $s_1, s_2, \dots, s_q$  будуть рівні  $A_1, A_2, \dots, A_q$ , відповідно.

Розглянемо тепер ланцюг Маркова із двома станами  $s_1, s_2$  й матрицею перехідних імовірностей

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$



Очевидно, що

$$P^{2n} = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P^{2n+1} = P = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

тобто будь-який ступінь матриці  $P$  містить нульові елементи. Такий ланцюг – приклад циклічних (періодичних) ланцюгів Маркова. Вони характеризуються тим, що множина їхніх станів може бути розбита на  $d$  циклічних класів (у прикладі  $d = 2$ ). Для регулярних ланцюгів  $d = 1$ , тобто вони складаються з одного циклічного класу. Якщо розглянути ступеня матриці  $P$ , кратні  $d$ , тобто  $P^{nd}$ , то існує таке число  $w$ , починаючи з якого всі елементи цієї матриці, що відповідають переходам усередині одного циклічного класу, позитивні.

У випадку циклічного ланцюга також існує єдине імовірнісне рішення  $\vec{A}$  рівняння  $\vec{A}P = \vec{A}$ , і справедливі рівності:

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I + P + \dots + P^{n-1}}{n} = A, \quad (3.11)$$

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} P^{dn} = A_0, \quad (3.12)$$

де елементи  $A_0$  з індексами  $i$  й  $j$  дорівнюють нулю, якщо  $s_i$  й  $s_j$  не належать тому самому циклічному класу, і отримують перенормуванням компонент стаціонарного вектора  $\vec{A}$ , що належать відповідному циклічному класу, якщо  $s_i$  й  $s_j$  належать тому самому циклічному класу.

Регулярні й циклічні ланцюги Маркова утворюють клас **ергодичних** ланцюгів Маркова.

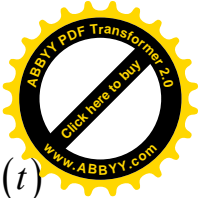
**Математична модель.** Розглянутий випадковий процес  $\xi(t)$  являє собою набір прямокутних імпульсів з амплітудами  $c_1, c_2, \dots, c_p$ , і тривалостями  $T$ . Зміна амплітуди або її збереження відбувається в моменти часу  $kT$ ,  $k = 0, 1, \dots$ .

Гіпотези, що описують процес  $\xi(t)$ :

1. Існує ціле число  $r$  таке, що в напівсегментах  $[(k-1)rT, krT)$ ,  $k = 1, 2, \dots$  можуть з'явитися лише певні набори імпульсів  $\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_q(t)$ . Кожен набір являє собою певну комбінацію прямокутних імпульсів  $\varphi_j(t)$  тривалістю  $rT$ ;  $\varphi_j(t) = \varepsilon_{jv}$  при  $t \in [(v-1)rT, vrT]$ ,  $v = 1, 2, \dots, r$ , де  $\varepsilon_{jv}$  приймає деяке значення з послідовності  $c_1, c_2, \dots, c_p$ .

2. Процесу  $\xi(t)$  може бути поставлений у відповідність такий кінцевий ланцюг Маркова  $\eta(\tau)$  з дискретним часом  $\tau = 0, rT, 2rT, \dots$  і станами  $s_1, s_2, \dots, s_q$ , для якого:





а) якщо  $\eta(krT)$  перебуває в стані  $s_j$ , те це означає, що  $\xi(t) = \xi_j(t)$  при  $t \in [(k-1)rT, krT)$ ,  $k=1,2,\dots$ ;

б)  $\eta(\tau)$  - ергодичний ланцюг Маркова із заданою матрицею  $P = (p_{ij})$ ,  $i, j=1,\dots,q$  перехідних імовірностей.

3. Математичне сподівання  $M\{\xi(t)\}$  процесу  $\xi(t)$  дорівнює нулю.

Відомо, що усереднений енергетичний спектр  $P(\omega)$  процесу  $\xi(t)$  визначається формулою

$$P(\omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} P^{(N)}(\omega), \quad (3.13)$$

де

$$P^{(N)}(\omega) = \frac{2}{NrT} M \left\{ \left| \int_0^{NrT} \xi(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \right\}. \quad (3.14)$$

Варто підкреслити, що необхідно щоразу вказувати, в якому змісті існує межа у формулі (3.14).

Для скорочення подальших записів уведемо позначення:

$e_\mu = (\varepsilon_{1\mu}, \varepsilon_{2\mu}, \dots, \varepsilon_{q\mu})$ ;  $\tilde{P}^s = P^{ds} - A_0$ ,  $s' = 1, 2, \dots$ ;  $\tilde{P}^0 = I$  – одинична матриця;

$\hat{A} = (A_i \delta_{ij})_{i,j=1,\dots,q}$ ,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\hat{A}e_\nu = (A_1 \varepsilon_{1\nu}, A_2 \varepsilon_{2\nu}, \dots, A_q \varepsilon_{q\nu})$ ;

$\tilde{P}^s P^{s'} e_\mu \cdot \hat{A}e_\nu = \tilde{m}_{\mu\nu}^{(s,s')}$ ;  $A_0 P^{s'} e_\mu \cdot \hat{A}e_\nu = m_{\mu\nu}^{(s')}$ ;  $A_0 e_\mu \cdot \hat{A}e_\nu = m_{\mu\nu}^{(0)}$ ;  $e_\mu \cdot \hat{A}e_\nu = m_{\mu\nu}$ ;

$e_\mu \cdot \hat{A}e_\mu = m_\mu$ ;  $\tilde{m}_{\mu\nu}^{(s,0)} = \tilde{m}_{\mu\nu}^{(s)}$ ;  $\tilde{\xi}_q = \left( \underbrace{1, 1, \dots, 1}_q \right)$ .

Переходячи до межі при  $N \rightarrow \infty$  в (3.14) і виконавши необхідні перетворення, одержимо

$$P(\omega) = \frac{4|a|^2}{rT} \sum_{\mu,\nu=1}^r \left\{ \sum_{s'=0}^{d-1} P^{s'} [\operatorname{Re}(\{ [I - (P^d - A_0) e^{idr\omega T} ]^{-1} + \right. \\ \left. + \frac{\pi}{drT} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi h}{drT}\right) A_0 \} e^{i(s'r + \mu - \nu)\omega T}) + \frac{\sin\left(\frac{dr}{2} - s'r - \mu + \nu\right)\omega T}{2 \sin \frac{dr\omega T}{2}} A_0 \right] - \\ \left. - \frac{I}{2} \cos(\mu - \nu)\omega T \right\} (e_\mu \cdot \hat{A}e_\nu). \quad (3.15)$$

Формула (3.15) не містить нескінченних сум і дозволяє при чисельному знаходженні енергетичного спектра використати стандартні програми для обчислення матриці  $[*]^{-1}$ , зворотної до даної.

Для імпульсних випадкових процесів, керованих регулярним ланцюгом Маркова, формула для спектра може бути формально отримана з (3.15), якщо покласти  $d=1$ ,  $A_0 = A$ . Матриця  $m_{\mu\nu}^{(0)}$  симетрична й, у силу непарності синуса, третя сума в (3.15) звертається в нуль. Таким чином, для регулярного ланцюга Маркова



$$P(\omega) = \frac{4|a|^2}{rT} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{\mu, \nu=1}^r m_{\mu\nu} \cos(\mu - \nu)\omega T + \sum_{\mu, \nu=1}^r \sum_{s=1}^{\infty} \tilde{m}_{\mu\nu}^{(s)} \cos(sr + \mu - \nu)\omega T + \sum_{\mu, \nu=1}^r m_{\mu\nu}^{(0)} \cos(\mu - \nu)\omega T \left[ -\frac{1}{2} + \frac{\pi}{rT} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi h}{rT}\right) \right] \right\}. \quad (3.16)$$

Результати розрахунків усереднених енергетичних спектрів деяких характерних сигналів передачі показані у вигляді графіків на рис. 3.7. На цьому рисунку по осі ординат відкладені значення  $P(\omega)$ , помножені на коефіцієнт  $\frac{\pi^2}{2T_T}$ , що нормує, а по осі абсцис - значення нормалізованої частоти  $\frac{\omega}{\omega_T}$ , де  $\omega_T = \frac{2\pi}{T_T}$  - кругова тактова частота.

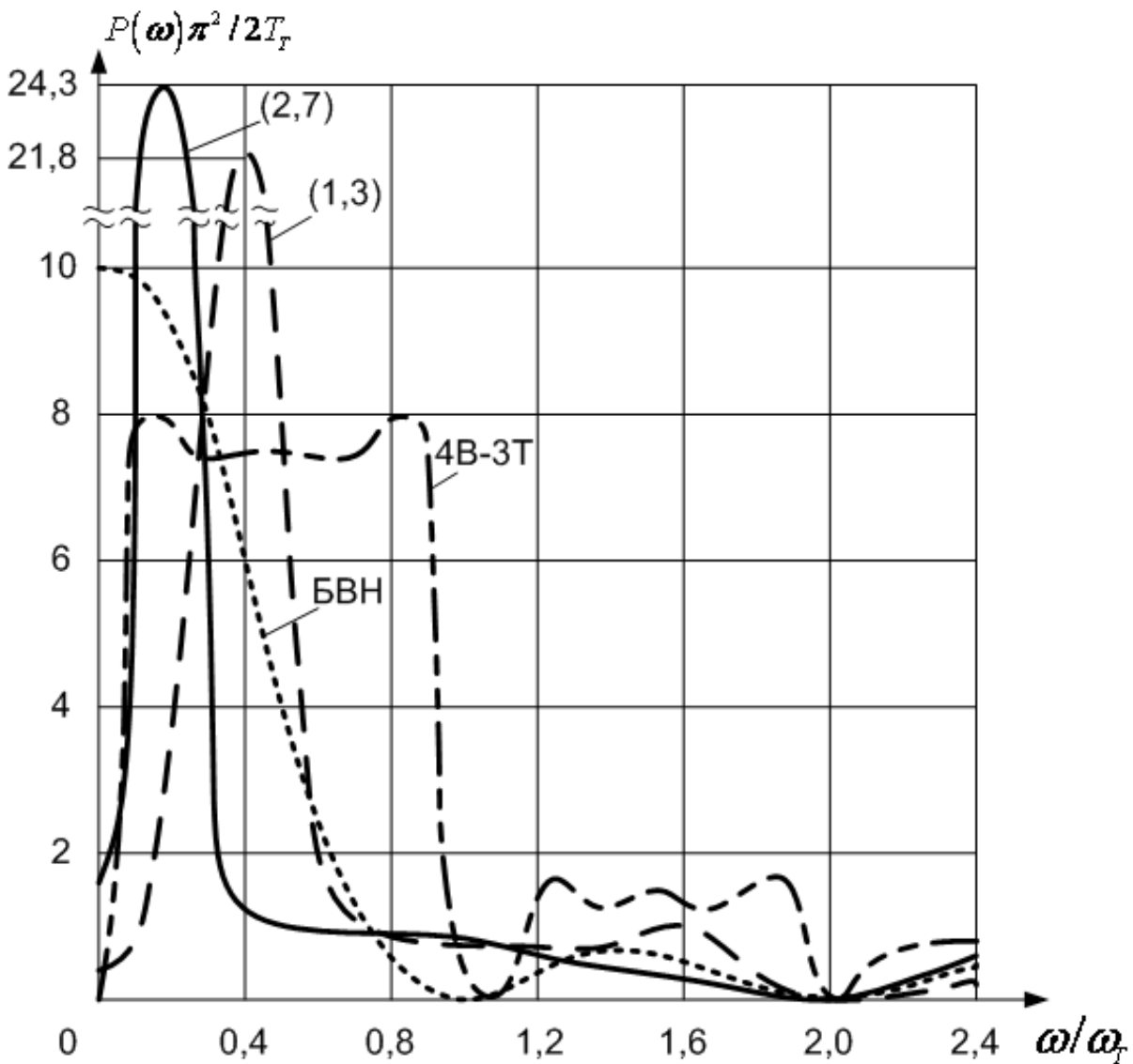


Рисунок 3.7 – Енергетичні спектри сигналів передачі





## 4 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛЗ

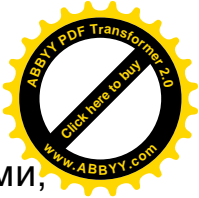
Поряд з оптичними кабелями (ОК), які прокладаються в ґрунт у світовій практиці широке застосування отримали ОК, які підвішуються на опорах повітряних ліній зв'язку (ПЛЗ), повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) та контактної мережі залізниць (КМЗ).

Підвішувати ОК доцільно в тих випадках, коли по якійсь причині неможливе прокладання кабелів в ґрунт, або в кабельній каналізації: в умовах вічної мерзлоти, скельного ґрунту, при прокладанні через ріки, глибокі болота та ін. Крім того, ОК, що підвішуються, мають експлуатаційні переваги:

- порівняно швидке будівництво ВОЛЗ;
- відсутність труднощів при пошуку пошкодженої ділянки ОК;
- мала вірогідність пошкоджень кабелів (менше одного пошкодження на рік на 1000 км, що на порядок більше надійності підземних ВОЛЗ).

Економічний ефект використання ВОЛЗ з підвісним ОК на опорах ЛЕП треба розглядати для кожного проекту окремо. Він залежить від багатьох факторів, які є традиційними при побудові будь-якої мережі зв'язку, наприклад, від структури мережі, об'єму інформації, що передається, кількості регенераційних пунктів та ін. Однак така перевага ВОЛЗ, як неприйнятність до індукційних завад, часто розглядається при побудові інформаційних систем в енергетичних комплексах як більш важлива, ніж вартість. Висока надійність ВОЛЗ в безпосередній близькості до потужних електропристроїв та високовольтних проводів викликає великий попит на них не тільки електротехнічних компаній, а й інших відомств. Разом з тим, можливість сполучення оптичних кабелів з іншими направляючими системами, розташованими на опорах ліній зв'язку, ЛЕП, КМЗ, симетричними конструкціями, коаксіальними конструкціями, надпровідними конструкціями, може привести до створення єдиних конструкцій, які мають металеві жили, металеві оболонки та металеві армуючі елементи. В цьому випадку можливі побічні впливи на ОК:

- вплив електричного поля на діелектричні елементи ОК та їх руйнування з часом;
- електричний пробій у вигляді дуги між металевими елементами і руйнування оптичного волокна (ОВ);
- перегрів металевих елементів при проходженні великих струмів, підвищення температури на поверхні захисних полімерних елементів ОВ вище 200°C та втрата міцності;
- порушення герметичності конструкції ОК, проникнення вологи;
- вплив сильних електромагнітних полів на конструкцію ОВ та погіршення механічних характеристик ОК (при ядерному вибуху, ударі блискавки);



- електричний пробій у вигляді дуги між коронуючими електродами, утвореними на поверхні оболонки оптичного кабелю, який призводить до руйнування оболонки ОК і погіршення його механічних характеристик.

Збільшення числа каналів, які організуються по різних системам передачі інформації, може потребувати збільшення числа додаткових модулів оптичного кабелю, що призведе до збільшення ваги ОК. В свою чергу це внесе додаткові корекції до вимог щодо механічних навантажень на ОК, опори, з'єднувальні муфти, арматуру.

Вибір варіанту прокладання оптичного кабелю (підземного чи повітряного) залежить від природних, передусім, ґрунтових умов проходження траси волоконно-оптичної лінії зв'язку.

ОК рекомендується підвішувати на опорах на місцевості з великою кількістю перетинів та на ділянках з складним рельєфом (наявність ярів, байраків тощо), а також міській місцевості, де будівництво підземних ВОЛЗ неможливе або економічно недоцільне.

В залежності від категорії ґрунтів прокладання ОК рекомендується проводити:

- за підземним варіантом, якщо по трасі проходження ВОЛЗ переважають ґрунти не вище III категорії;

- за підземним чи повітряним варіантом, якщо по трасі проходження ВОЛЗ переважають ґрунти IV категорії. Остаточне рішення приймається на етапі проектування, на основі техніко-економічного обґрунтування того чи іншого варіанту;

- за повітряним варіантом, якщо по трасі проходження ВОЛЗ переважають ґрунти V та вищих категорій.

При виборі траси для підвішування ОК на опорах (які вперше будуються) слід по можливості уникати ділянок з ґрунтами, що агресивні по відношенню до матеріалу цих опор.

Повітряні ВОЛЗ можна віднести до трьох класів: I, II, III. До ліній класу I і II ставляться більш високі технічні вимоги як при будівництві, так і при експлуатації.

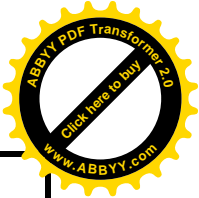
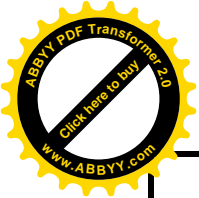
По механічній міцності лінії класу I і II діляться на чотири типи:

- полегшені (Пл);
- нормальні (Нр);
- підсилені (Пс);
- особливо підсилені (ОП).

Вказана класифікація обумовлюється метеорологічними умовами району будівництва. При цьому основним критерієм є товщина ожеледі, що утворюється на ОК. Ожеледь призводить до збільшення ваги проводів та їх поверхні, на які тисне вітер, і внаслідок цього повітряна лінія зазнає найбільшого механічного навантаження.

В таблиці 4.1 наведено типи ліній у залежності від метеорологічних умов.

#### **Таблиця 4.1 - Типи ліній**



Типи ліній	Метеорологічні умови
Полегшений	Ожеледь відсутня. Ожеледь з еквівалентною товщиною шару льоду до 5 мм або паморозі до 20 мм
Нормальний	Ожеледь з еквівалентною товщиною шару льоду до 10 мм або паморозі понад 20 мм
Підсилений	Ожеледь з еквівалентною товщиною шару льоду до 15 мм
Особливо підсилений	Дуже інтенсивна ожеледь з еквівалентною товщиною шару льоду до 20 мм

Кожен з даних типів ліній характеризується, головним чином, кількістю опор на 1км і максимально допустимою кількістю ОК та проводів, що підвішуються.

Для повітряних ВОЛЗ існує кілька варіантів підвішування ОК на опорах і відповідно типів ОК, призначених для підвішування (див. розділ 8).

При зберіганні, транспортуванні та виконанні будівельно-монтажних робіт по підвішуванню ОК на опорах кабель, з'єднувальні муфти і використана арматура не повинні бути небезпечними для здоров'я людини та шкідливо впливати на навколишнє природне середовище.

Планування - це невід'ємна частина робіт з будівництва і повинна виконуватися перед початком підвішування. Так само це стосується підготовчих робіт, таких наприклад, як наявність доступу до об'єкту установки, до ділянок, придатних для встановлення кабельних барабанів, лебідок та ін.

Під час планування і виконання підготовчих робіт необхідно:

- провести старанне обстеження траси, стану опор ЛЕП, опор контактної мережі залізниці, опор ліній зв'язку. Впевнитися у відсутності на трасі дерев, чагарнику та інших перешкод ускладнюючих роботи з монтажу;

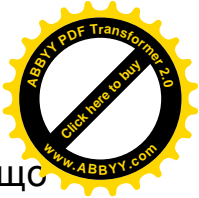
- визначити місце розташування підоб'єктних складів, наявність під'їзних шляхів, площадок придатних для встановлення кабельних барабанів, лебідок та ін., для кожного сегмента (сегмент - відстань між двома з'єднувальними точками; визначається будівельною довжиною ОК);

- підготувати і узгодити з управлінням даного відомства графік проведення робіт, в якому подати питання, пов'язані з технікою безпеки виконання робіт.

Повітряні ВОЛЗ проектується згідно з завданням на проектування, що видається замовником, а також згідно з технічними умовами.

У завданні на проектування треба вказати:

- вихідні дані;
- район будівництва;



- тип будівництва (нове будівництво, заміна повітряних ВОЛЗ, що стали непридатними для використання, або підвішування ОК з використанням опор ЛЕП, ліній зв'язку та опор контактної мережі залізниць);

- довжину лінії зв'язку (орієнтовну);
- стадії проектування;
- термін виконання проекту;
- термін початку будівництва;
- назви організацій, які виконують проектні та будівельні роботи;
- найменування Замовника проекту;
- додаткові дані (матеріал опор, типи залізобетонних опор, габарити опор, паспорт на опори).

До завдання на проектування додаються:

- акт технічного стану опор;
- акт списання з балансу опор (повітряних ліній), що стали непридатними для використання;
- картографічні матеріали (плани населених пунктів з нанесеними на них надземними і підземними комунікаціями та спорудами у масштабі 1:2000, 1:1000 або 1:5000);
- вихідні дані з підприємств Міністерства транспорту та зв'язку України про технічний стан ліній зв'язку, про необхідність та умови підвішування ОК на опорах ЛЕП, ліній зв'язку на опорах контактної мережі залізниць;
- креслення існуючих будівель різного призначення з наведеними параметрами встановленого в них технологічного обладнання, режиму його роботи.

Проект організації робіт, який розробляється з приводу монтажу ОК по ділянках траси, повинен мати такі дані:

- пояснювальну записку;
- кошторисну документацію;
- загальну довжину ділянки;
- накреслений план траси;
- відомості перетинів;
- перелік складу комплексних бригад;
- перелік необхідних механізмів, машин, обладнання та пристроїв з наведеними їх характеристиками та параметрами і т.ін.;
- інструкцію по монтажу ОК, що підвішується на опорах ЛЕП, ліній зв'язку та опорах контактної мережі залізниць;
- план виконання робіт на кожній із ділянок.

Врахування вище викладених факторів, розробка нормативних вимог до технології підвішування ОК, а також до елементної бази, дозволять підвищити ефективність виконання робіт у цій галузі.

Цей навчальний посібник рекомендовано для використання при курсовому та дипломному проектуванні, а також для самостійної роботи студентів.



## 5 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАВАННЯ СИГНАЛІВ ПО ВОЛОКОННИМ СВІТЛОПРОВОДАМ

### 5.1 Загальні відомості

Основним елементом волоконно-оптичного кабелю (ВОК), або в подальшому оптичного кабелю (ОК), є волоконний світлопровід (ВС).

Волоконний світлопровід, або оптичне волокно (ОВ), – це оптичний хвилепровід, призначений для напрямленої передачі оптичного випромінювання, що зроблений у вигляді тонкої скляної нитки циліндричної форми з круглим поперековим перерізом.

Оптичне волокно складається з серцевини, однієї чи декількох оболонок і одного чи декількох захисних покриттів. Серцевина ВС – це центральна область ОВ, через яку передається основна частина оптичної потужності сигналу. Оболонка ВС – це шар, що оточує серцевину, середнє значення показника заломлення ( $n_2$ ) в якому менше середнього значення в серцевині.

В ОВ використовуються однорідні або депресовані оболонки. У однорідних оболонок ОВ значення  $n_2$  постійне, у депресованих змінне. Діелектричним матеріалом для серцевини і оболонки ОВ служить плавлений кварц (кварцове скло) – аморфна, прозора речовина з хімічною формулою двоокису кремнію  $\text{SiO}_2$ , чистий або з домішками хімічних елементів і їх сполук, невеликі пропорції яких сприяють зміні оптичних властивостей плавленого кварцу потрібним чином. Серцевина та оболонка ОВ мають різні оптичні характеристики (показники заломлення  $n_1$  і  $n_2$ ). Якщо серцевина служить для передачі електромагнітної енергії, то оболонка – для створення кращих умов відображення на границі серцевина – оболонка, захисту серцевини волокна від механічних пошкоджень, а також для захисту від випромінювання енергії в оточуюче середовище і вбирання небажаного випромінювання ззовні.

Волоконні світлопроводи поділяються на дві групи: багатомодові та одномодові. Перші, в свою чергу, поділяються на східчасті та градієнтні (рис. 5.1). В східчастих ВС показник заломлення в серцевині постійний і має місце різкий перехід від  $n_1$  серцевини до  $n_2$  оболонки. Градієнтні ВС мають безперервну плавну зміну показника заломлення в серцевині по радіусу світлопроводу від центра до периферії.

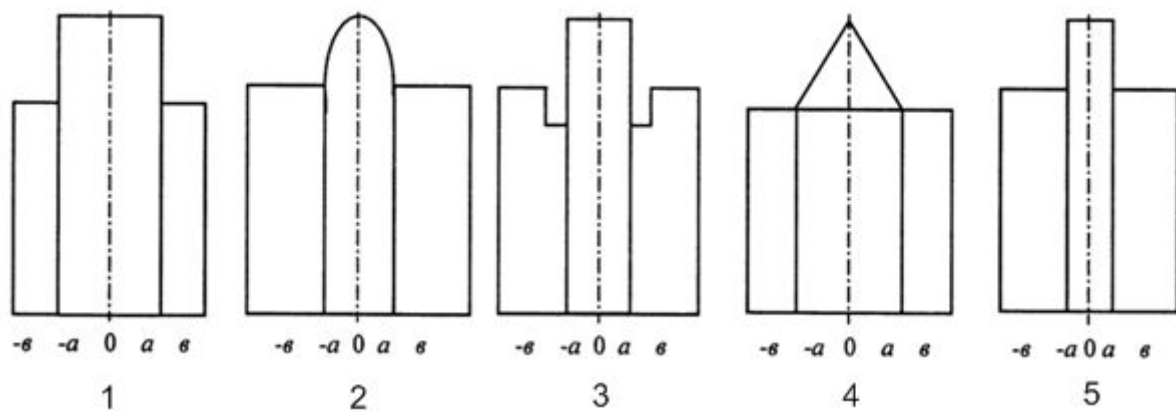


Рисунок 5.1 - Профілі показників заломлення різних світлопроводів:  
 1 – східчастий; 2 – градієнтний; 3 – типу W; 4 – трикутний;  
 5- одномодовий східчастий

У конструктивному відношенні одномодові і багатомодові ВС різняться діаметром сердцевини. В одномодових світлопроводах діаметр сердцевини порівняний з довжиною хвилі ( $d \approx \lambda$ ) і по ньому передається лише один тип хвилі (мода). В багатомодових світлопроводах діаметр сердцевини більший, ніж довжина хвилі ( $d > \lambda$ ), і по ньому поширюється велика кількість хвиль.

На практиці сердцевина світлопроводу складає 6 – 8 мкм у одномодових і 50 мкм у багатомодових світлопроводах, діаметр оболонки – 125 мкм, діаметр волокна по захисному покриттю – 250 мкм.

На рис. 5.2 представлені траєкторії променів в світлопроводах різноманітних груп. Як видно з рисунку, хід променів в різних світлопроводах різний. В східчастому багатомодовому світлопроводі промені різко відбиваються від границі сердцевина – оболонка. При цьому шляхи проходження променів різняться, тому вони приходять до кінця лінії зі зсувом у часі. Це призводить до спотворення сигналу, що передається (дисперсії).

Градієнтні світлопроводи також являються багатомодовими. Але тут промені поширюються по хвилевидним траєкторіям і спотворень менше.



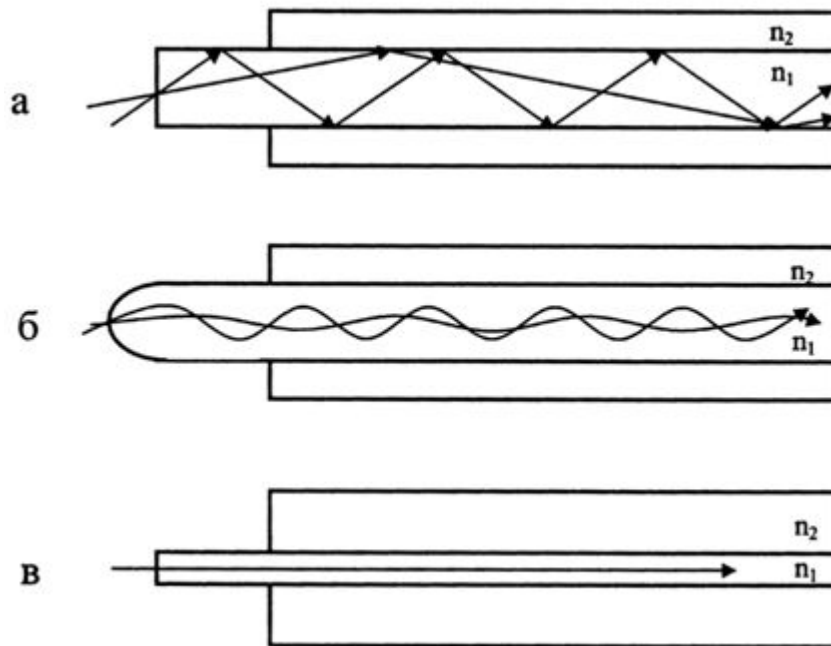


Рисунок 5.2 – Волоконні світлопроводи: а – східчасті багатомодові; б – градієнтні багатомодові; в – одномодові

В найкращих умовах знаходиться одномодова передача, так як тут поширюється лише один промінь.

Математично профіль показника заломлення (ППЗ) ОВ може бути описаний виразом вигляду:

$$n_r = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^u \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

де  $n_1$  – максимальне значення ППЗ на вісі волокна, тобто при  $r = 0$ ;  $a$  – радіус серцевини;  $u$  – показник степеня, що описує зміни ППЗ;  $\Delta$  – відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки ОВ. В різних волокнах значення  $\Delta$  змінюються від 0,003 до 0,01.

Показник степеня для трикутного профілю ПЗ (показника заломлення) дорівнює 1, параболічного – 2, а прямокутного (східчастого) –  $\infty$ .

Фізичні процеси, що відбуваються при поширенні електромагнітних хвиль у волоконних світлопроводах оптичних кабелів, мають свої особливості. На відміну від звичайних кабелів, що мають електричну провідність і струм провідності  $I_{r\delta}$ , ОК мають інший механізм передачі, а саме: струми зсуву  $I_{\phi\tilde{n}}$ , на основі яких діє також радіопередача. Відмінність від радіопередачі є в тому, що хвиля поширюється не у вільному просторі, а концентрується в самому об'ємі світлопроводу і передається по ньому в заданому напрямку (рис. 5.3).



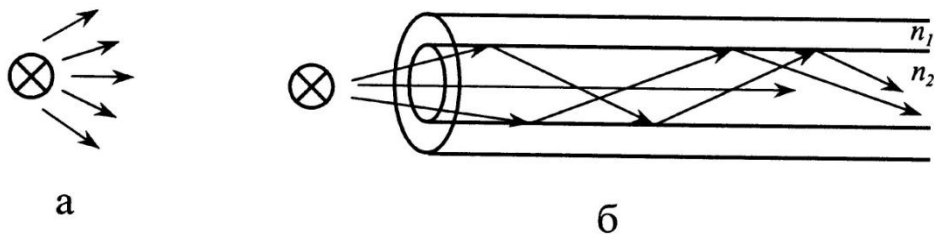


Рисунок 5.3 – Процеси передачі: а – безпроводні; б – по світлопроводу

Наприклад передача хвилі по світлопроводу зі східчастим профілем показника здійснюється за рахунок відбивання її від границі серцевини і оболонки, що мають різні показники заломлення ( $n_1$  і  $n_2$ ).

У звичайних кабелях носієм інформації, що передається, є електричний струм, а в ОК – лазерний промінь.

У звичайних широко використовуваних на сьогодні симетричних і коаксіальних кабелях передача здійснюється по двопровідній схемі з використанням прямого і оберненого провідника кола (рис. 5.4, а).

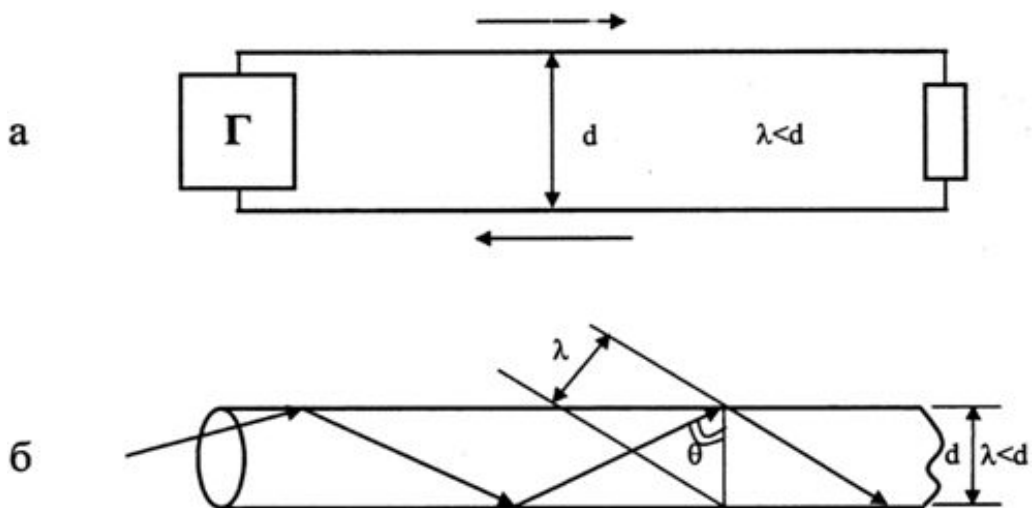


Рисунок 5.4 – Направляючі системи: а – двопровідні; б – хвилепровідні

В світлопроводах, хвилепровадах і деяких інших напрямляючих системах немає двох провідників, і передача відбувається хвильовим методом. Передача здійснюється за рахунок багаторазового відбиття хвилі від границі розмежування середовищ (рис. 5.4, б). Такою відбиваючою границею може бути метал – діелектрик, діелектрик – діелектрик з різноманітними діелектричними (оптичними) властивостями, тощо. На хвилепровідному принципі діє світлопровід, хвилепровід, лінія поверхневої хвилі, діелектричний хвилепровід та інші конструкції напрямляючих систем.

Границя розподілу двопровідних (двозв'язних) і хвилепровідних (однорозв'язних) напрямляючих систем характеризується співвідношенням

між довжиною хвилі  $\lambda$  і поперечними розмірами напрямляючої системи  $d$ . При  $\lambda > d$  потрібно два проводи: прямий і обернений і передача відбувається по звичайній двопровідній схемі. При  $\lambda < d$  не потрібна двопровідна схема, а передача відбувається за рахунок багаторазового зигзагоподібного відбиття хвилі від границь розмежування середовищ з різними характеристиками. Тому передача по хвилепровідних системах (світлопроводам, хвилепроводам і іншим напрямляючим системам) можлива лише при частотах, коли довжина хвилі співвідносна або менша за поперечні розміри діаметра напрямляючої системи.

Розглянемо принцип дії волоконного світлопроводу і можливі випадки поширення хвилі в світлопроводі для різних частот.

На рис. 5.5 показані граничні випадки поширення малих довжин хвиль при  $\lambda \rightarrow 0$  (рис. 5.5, а) і хвиль, співвідносних з діаметром світлопроводу  $d$  при  $\lambda \rightarrow d$  (рис. 5.5, б). В першому випадку ( $\lambda \rightarrow 0$  і  $f \rightarrow \infty$ , кут  $\theta \rightarrow 90^\circ$ ) відбивань мало і хвиля прагне до прямолінійного руху упродовж світлопроводу. В цьому випадку передача по світлопроводу проходить у вигідних умовах.

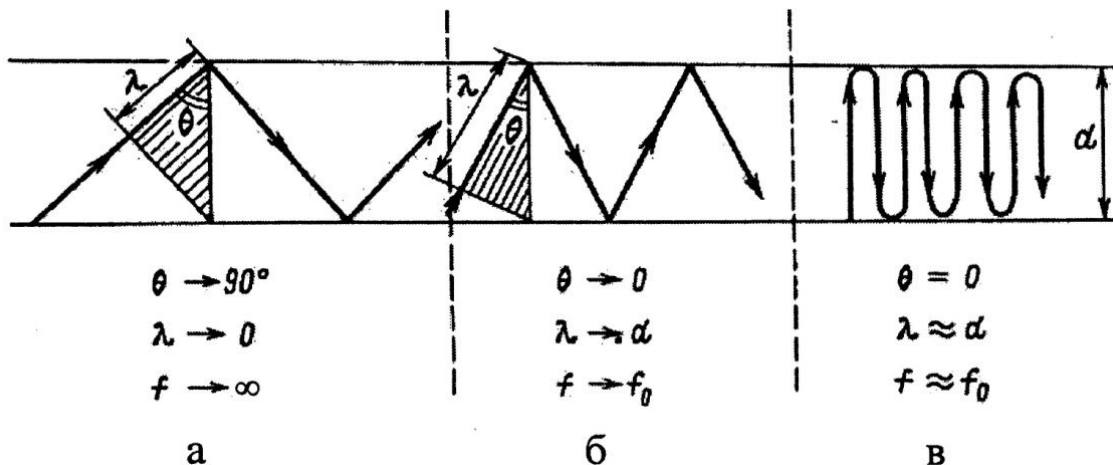


Рисунок 5.5 – Поширення хвилі в світлопроводі для різних частот: а – дуже високих; б – менш високих; в – критичних

В іншому випадку ( $\lambda \rightarrow d$  і  $f \rightarrow f_0 = c/d$ ) кут  $\theta \rightarrow 0$ , хвиля відчуває більшу кількість відбиттів і поступальний рух її досить малий. В цьому випадку вздовж світлопроводу передається незначна доля енергії.

При певній довжині хвилі  $\lambda \rightarrow d$  починається такий режим, коли  $\theta = 0$  і хвиля падає на оболонку світлопроводу і відбивається перпендикулярно (рис. 5.5, в). В світлопроводі встановлюється режим стоячої хвилі, і енергія вздовж світлопроводу не переміщається. Цей режим відповідає критичній довжині хвилі  $\lambda_0 = d$  і критичній частоті  $f_0$ .

Таким чином, в світлопроводі можуть поширюватися лише хвилі довжиною меншою, ніж діаметр серцевини світлопроводу ( $\lambda < d$ ). З урахуванням того, що, наприклад, в світлопроводі зі східчастим ППЗ границею розподілу серцевина – оболонка є прозоре скло, можливе не

тільки відбиття оптичного променя, але і проникнення його в оболонку. Для запобігання переходу енергії в оболонку і випромінювання в оточуючий простір необхідно дотримуватися умови повного внутрішнього відбиття. Реалізація цієї умови стосовно до двохшарового світлопроводу показана на рис. 5.6.

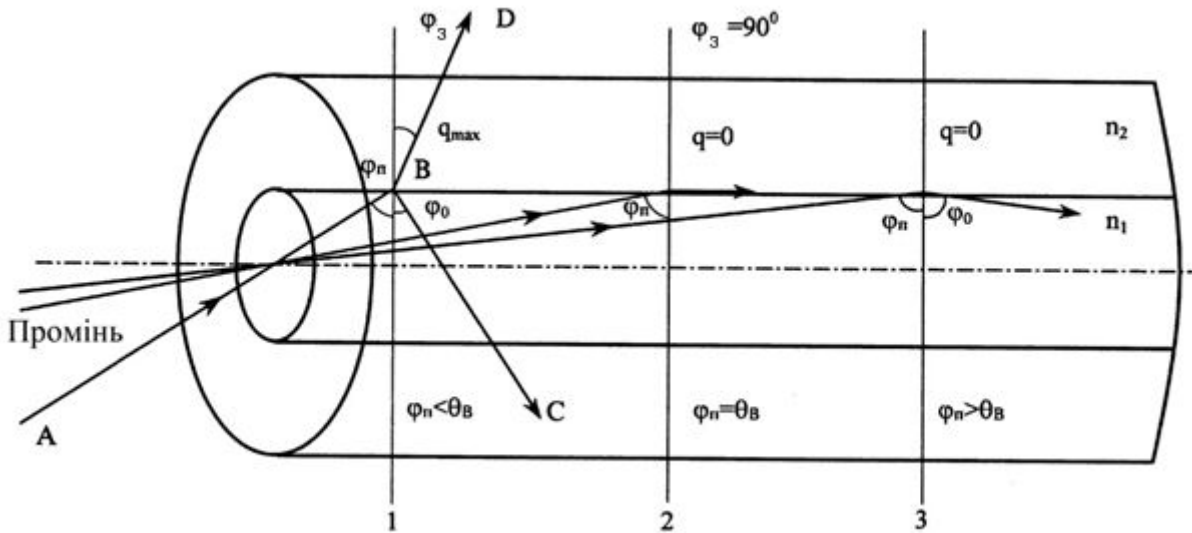


Рисунок 5.6 – Принцип дії волоконного світлопроводу: 1 – наявний заломлений промінь; 2 і 3 – відсутній заломлений промінь

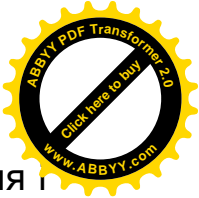
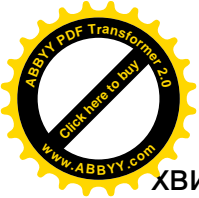
По законам геометричної оптики в загальному вигляді на границі серцевина – оболонка будуть знаходитися падаюча хвиля АВ з кутом  $\varphi_I$ , відбита хвиля ВС з кутом  $\varphi_0$ , і заломлена хвиля ВD з кутом  $\varphi_\varphi$  (рис. 5.6, лінія 1). Відомо, що при переході з середовища з більшою щільністю в середовище з меншою щільністю, тобто при  $n_1 > n_2$ , хвиля при певному куті падіння повністю відбивається і не проходить в інше середовище. Кут падіння, починаючи з якого вся енергія відбивається від границі розмежування середовищ, тобто  $\varphi_I > \theta_{\hat{A}}$ , називається кутом **повного внутрішнього відбиття**.

Цей кут визначається із співвідношення:

$$\sin \theta_{\hat{A}} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_{r2} \varepsilon_{r2}}{\mu_{r1} \varepsilon_{r1}}}, \quad (5.2)$$

де  $\mu_{r1}$  і  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\mu_{r2}$  і  $\varepsilon_{r2}$  - магнітна і діелектрична проникності серцевини та оболонки.

При критичному куті  $\varphi_I = \theta_{\hat{A}}$  хвиля рухається вздовж границі розмежування середовищ серцевина – оболонка (рис. 5.6, лінія 2) і не має випромінювання в оточуючий простір. При  $\varphi_I > \theta_{\hat{A}}$  хвиля повністю відбивається і повертається в початкове середовище – серцевину (рис. 5.6, лінія 3). Випромінювання також немає. Чим більший кут падіння



хвилі, тобто  $\varphi_i > \theta_A$  в межах від  $q_B$  до  $90^\circ$ , тим кращі умови поширення і швидше хвиля прийде до кінця. В такому випадку вся енергія концентрується в серцевині світлопроводу і практично не випромінюється в зовнішнє середовище.

При куті, що менший за кут повного відбиття, тобто при  $\varphi_i < \theta_A$ , енергія проникає в оболонку, випромінюється у зовнішній простір і передача по світлопроводу неефективна.

Режим повного внутрішнього відбиття зумовлює умову вводу світла у вхідний торець волоконного світлопроводу. Як бачимо з рисунка 5.6, світлопровід пропускає лише світло, яке знаходиться в межах тілесного кута  $\theta_A$ , який обумовлений кутом повного внутрішнього відбивання  $\theta_B$ . Цей тілесний кут характеризується апертурою.

## 5.2 Основні положення геометричної (променевої) оптики при передачі світла по волоконних світлопроводах

Найпростішим способом опису світла в волоконній оптиці є аналіз проходження променів світла. Переміщення світла по волоконно-оптичній системі аналізується геометричними побудовами. Це не тільки спрощує аналіз, але і допомагає зрозуміти процеси в оптичних волокнах.

Геометрична оптика має історію, що датується двома тисячами років, і передбачає, що світло складається з променів, які поширюються з джерела по прямим лініям в гомогенному середовищі, наприклад склі, воді, повітрі або вакуумі. При цьому в геометричній оптиці прийнято ствердження, що плоскі хвильові фронти поширюються під прямими кутами до кожного променя і світло зменшується пропорційно квадрату відстані (рис. 5.7).

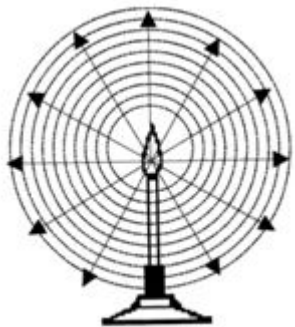


Рисунок 5.7 – Зв'язок плоских хвильових фронтів з променями

В загальному випадку, кажучи про швидкість світла, мають на увазі швидкість електромагнітної енергії у вакуумі. В інших матеріалах (наприклад, у склі) світло поширюється з меншою швидкістю. При переміщенні з одного матеріалу в інший змінюється швидкість поширення, що з погляду хвильової теорії призводить до зміни напрямку руху. Відхилення світла від прямого напрямку називається заломленням.

Крім того, хвилі з різноманітними довжинами поширюються з різними швидкостями в одному і тому ж матеріалі. Зміна швидкості від довжини хвилі має важливе значення у волоконній оптиці.

Як відомо, промінь світла при падінні на границю розмежування двох середовищ ділиться на відбитий промінь і заломлений промінь. Згідно з законом відбиття, промінь світла, який падає на границю розподілу двох середовищ, відбивається під тим самим кутом ( $\varphi_{\text{ááá}}$ ) до нормалі (перпендикуляру до межі), що і кут падіння ( $\varphi_i$ ) до поверхні, тобто  $\varphi_{\text{ááá}} = \varphi_i$  (рис. 5.8).

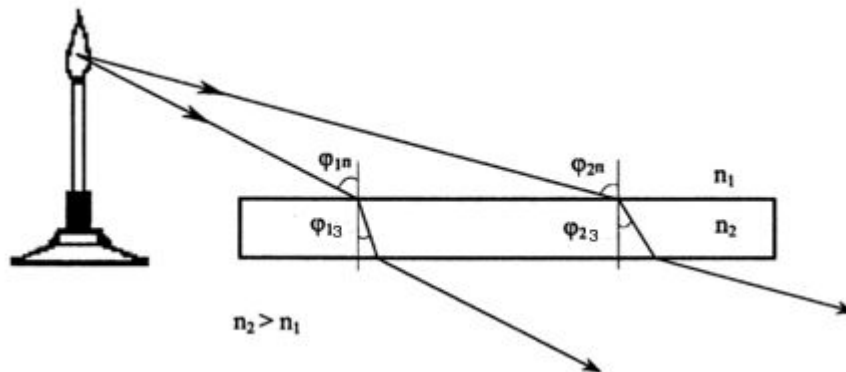


Рисунок 5.8 – Відбиття на плоскій поверхні

Згідно із законом Снелліуса (закон заломлення) промені світла, що падають на межу поділу двох середовищ, мають кути заломлення, відмінні від кутів падіння до нормалі межі цих середовищ (рис. 5.9):

$$n_1 \sin \varphi_{1n} = n_2 \sin \varphi_{1\varphi}, \quad (5.3)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – показники заломлення першого і другого середовищ, відповідно.

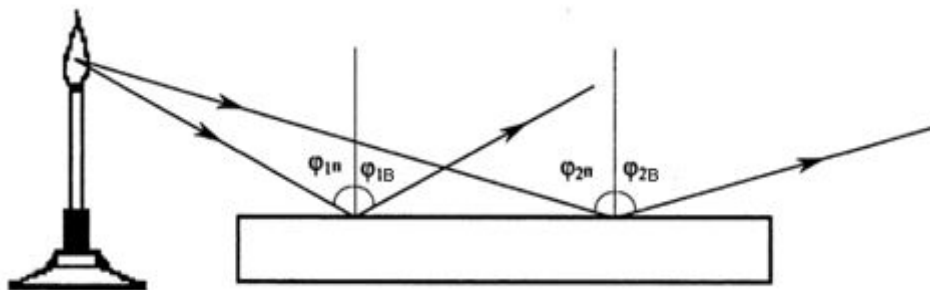


Рисунок 5.9 – Рефракція світлового променя, що проходить через оптично більш щільне середовище

Показник заломлення, що позначений  $n$ , є безрозмірною величиною, яка виражається через відношення швидкості світла у вакуумі  $c_0$  до швидкості світла в матеріалі  $v$ :



$$n = \frac{c_0}{v}, \quad (5.4)$$

$$c_0 = 299792,458 \text{ км/с} \approx 300000 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

У таблиці 5.1 представлені показники заломлення деяких речовин і швидкості поширення світла.

**Таблиця 5.1 - Показники заломлення деяких матеріалів**

Матеріал	Показник заломлення	Швидкість світла, км/с
Вакуум	1,0	300 000
Повітря	1,0003(1)	300 000
Вода	1,33	225 000
Кварц	1,46	205 000
Скло	1,5	200 000
Алмаз	2,5	120 000

Величина  $n$  належить до світлових хвиль, що розповсюджуються лише на одній довжині хвилі з постійною амплітудою. Для передавання інформації світлові хвилі модулюють (цифрова модуляція). При цьому інформація передається у вигляді імпульсів – коротких у часі хвильових пакетів, що містять світлові хвилі різної довжини. Всередині таких хвильових пакетів окремі хвилі розповсюджуються з різними швидкостями через їх різні довжини. Швидкість розповсюдження такого хвильового пакету називають груповою швидкістю. Відповідно груповий показник заломлення  $n_g$  відноситься до показника заломлення, як:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5.5)$$

Вираз  $\frac{dn}{d\lambda}$  показує нахил кривої показника заломлення  $n(\lambda)$ , який у розглядаємому діапазоні довжин хвиль є негативним. Тому груповий показник заломлення  $n_g$  при будь-якій довжині хвилі більше показника заломлення  $n$ . Для розрахунків часу передавання оптичних сигналів слід використовувати лише груповий показник заломлення  $n_g$ .

Залежність показника заломлення  $n$  та групового показника заломлення  $n_g$  від довжини хвилі  $\lambda$  для чистого кварцового скла показано на рисунку 5.10.



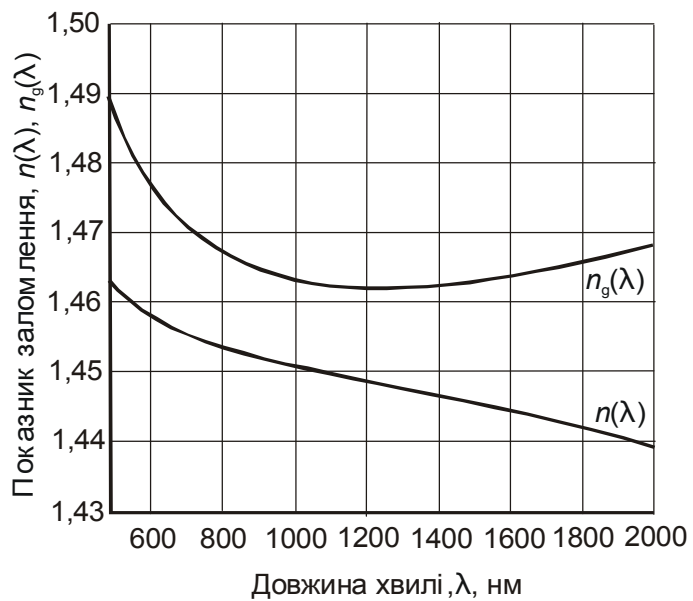


Рисунок 5.10 - Залежність показників заломлення від довжини хвилі  $\lambda$  для чистого кварцового скла

Особливу зацікавленість, з точки зору волоконної оптики, представляє той факт, що показник заломлення скла може змінюватись в залежності від його складу. Кількість відбитого світла від межі середовищ залежить від показників заломлення.

Якщо випромінювання видимої області спектра падає на межу поділу двох середовищ з оптично більш щільного середовища  $n_1$  на оптично менш щільне  $n_2$   $n_2 < n_1$  і кут падіння збільшується, то кут заломлення наближається до  $90^\circ$ . Шляхом збільшення кута падіння можна добитися такого стану, при якому заломлений кут буде розташовуватися вздовж межі поділу середовищ, не переходячи в інше середовище (рис. 5.11, а).

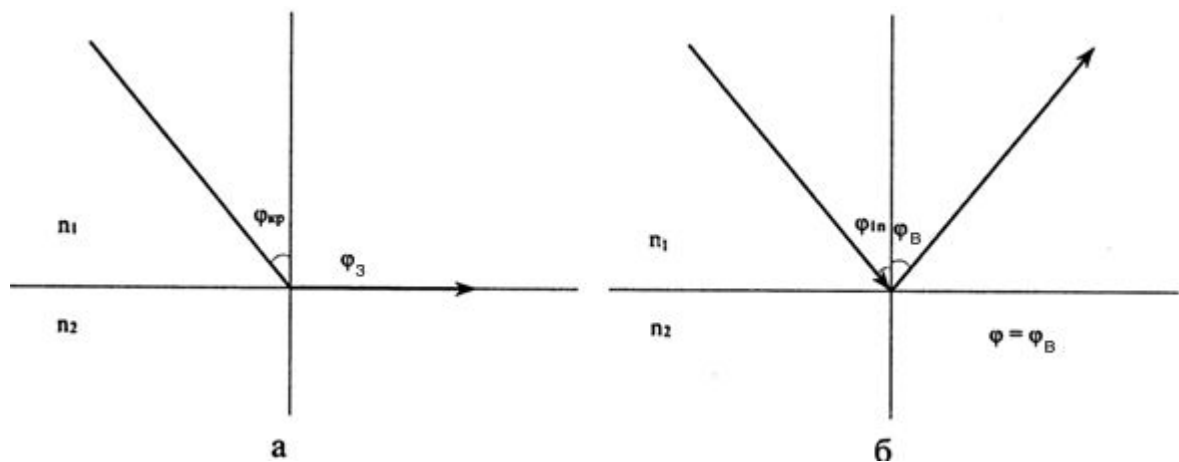
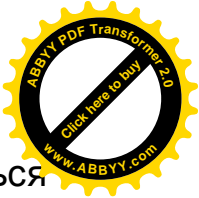


Рисунок 5.11 – Повне внутрішнє відбиття світла





Кут падіння, при якому має місце дане явище, називається **критичним кутом**  $\varphi_{\text{сд}}$  повного внутрішнього відбиття. Тобто кут падіння, при якому кут заломлення дорівнює 90 градусів, називається критичним кутом. Якщо кут падіння більше критичного, то світло повністю відображається в початкове середовище, не проникаючи при цьому в матеріал. При цьому має місце тільки відбиття, а заломлення відсутнє. Це призводить до явища повного внутрішнього відбиття (рис. 5.11, б), тобто виконенню умови, коли при  $\varphi_{\text{сд}} = 90^\circ$

$$\sin \varphi_{1n} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.6)$$

На цьому явищі заснований принцип передачі оптичного випромінювання по волоконним світлопроводам.

Розглянемо відбивання світла при куті падіння  $90^\circ$  (закони відбиття Френеля).

Навіть коли світло проходить в більш щільне середовище, деяка його частина відбивається назад в початкове середовище. Цей ефект отримав назву відбиття Френеля. Чим більша різниця показників заломлення середовищ, тим більша доля світла відбивається назад. Показник френелєвого відбиття  $p_{\text{сд}}$  на межі з повітрям дорівнює:

$$p_{\text{сд}} = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (5.7)$$

В децибелах втрати переданого світла складають:

$$A_{\text{сд}} = 10 \lg(1 - p_{\text{сд}}). \quad (5.8)$$

Прикладом наслідків відбивання Френеля є втрати на вводиті і виводі оптичного випромінювання у волоконний світлопровід.

Для світла, падаючого з повітря на скло (з  $n = 1,5$  для скла) втрати від френелєвого відбиття дорівнює приблизно 0,17 дБ. Це значення буде змінюватись в залежності від складу скла. Оскільки такого виду втрати відбуваються як при входженні світла у скло, так і при виході з нього, тому втрати на з'єднанні двох стекол складають 0,34 дБ.

### 5.3 Поляризоване світло

Світло може розглядатися як хвиля, яка складається з двох полів перпендикулярних один до одного – електричного поля і магнітного поля (рис. 5.12). Ці поля синхронні з польовими векторами, які мають різницю

фаз між собою, що дорівнює  $90^\circ$ . В нормальному світлі є нескінченне число площин, що перпендикулярно коливаються, і які поширюються у напрямку переміщення світла. Відбиттям і рефракцією світло можна зробити поляризованим.

Світло, в якому інтенсивність електричного поля залишається незмінною, в той час як інтенсивність магнітного поля зменшується, називається ТЕ-поляризованим світлом (коефіцієнт пропускання електрично поляризованого світла).

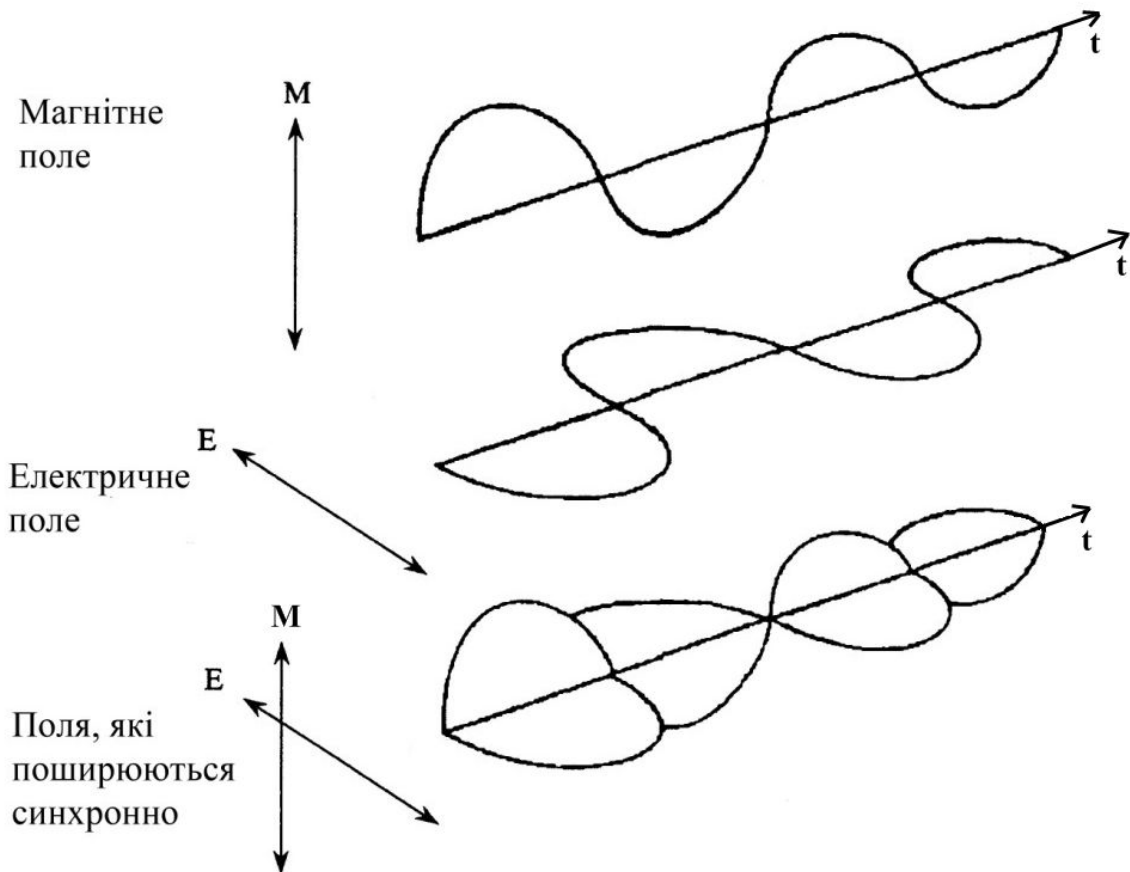


Рисунок 5.12 – Поля, що складають світло: електричне і магнітне

Світло, в якому інтенсивність магнітного поля залишається незмінною, а інтенсивність електричного поля зменшується, називається ТМ-поляризованим світлом (коефіцієнт пропускання поляризованого магнітного поля).

На рис. 5.13 показаний приклад поляризації світла, падаючого на поверхню деякої кристалічної пластини, при цьому електричне і магнітне поля поляризуються по-різному.

Два типи поляризації мають декілька різних коефіцієнтів відбиття, які описуються законом відбиття Френеля. Інтенсивність відбитого світла збільшується від 4% до 100% при збільшенні кута падіння від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  для обох поляризацій (заломлене світло зменшується в тому ж ступені),

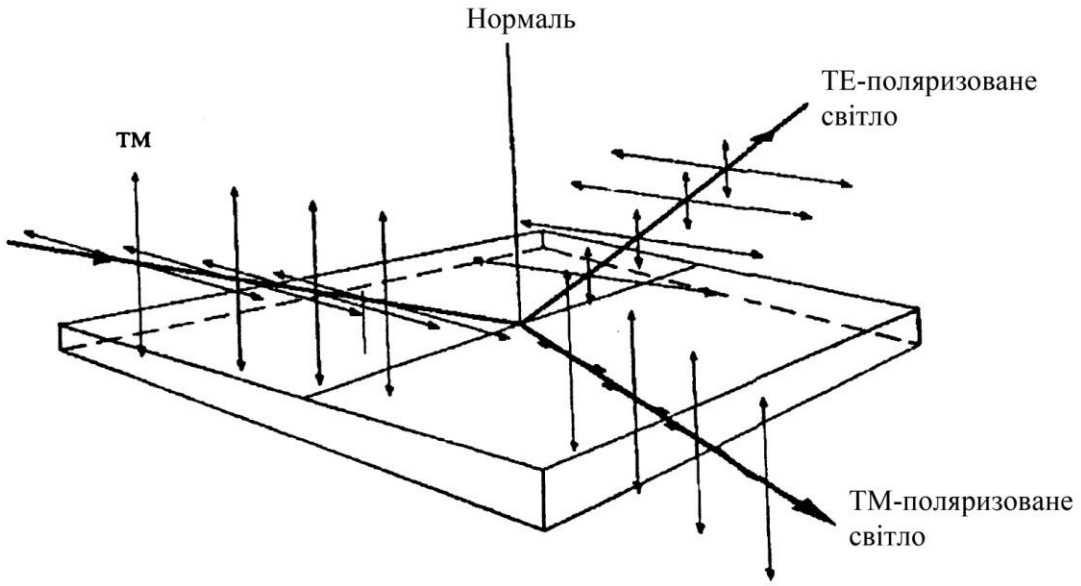


Рисунок 5.13 – Розклад падаючого світла за допомогою пластини на поляризовані електричне і магнітне поля

але для ТМ-поляризації інтенсивність спочатку зменшується з 4% до нуля, а потім знову збільшується до 100% (рис. 5.14).

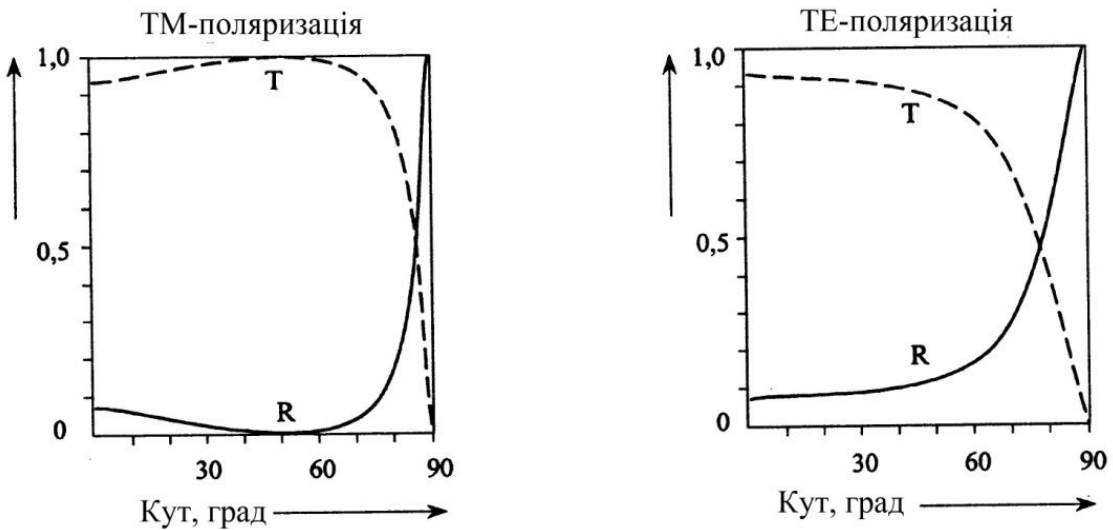


Рисунок 5.14 – Діаграми залежності коефіцієнтів відбиття (R) і заломлення (T) різних поляризацій від кута падіння світла

Кут, під яким ТМ-відбиття є нульовим, називається **кутом Брюстера**.

Принцип поширення світла в скловолокні заснований на законі повного внутрішнього відбиття. При типових значеннях ПЗ в серцевині  $n_1=1,47$  і оболонки  $n_2=1,46$  ОВ зі східчастим ППЗ має критичний кут повного внутрішнього відбиття  $\varphi_{\text{вд}} = 83,3^\circ$ .



## 5.4 Розсіяння Релея і світло Тіндаля

В аморфному матеріалі типу скла структура матеріалу не всюди однорідна, тому скло ніколи повністю не буде прозоре, тобто буде трохи мутне. Світловий промінь, що поширюється через такий матеріал, буде розсіюватися в інших напрямках (наприклад, промінь сонячного світла в пильному чи заповненому димом приміщенні) (рис. 5.15). Це явище називається релеєвським розсіюванням. Воно визвано наявністю в середовищі маленьких частинок і неоднорідностей, які розсіюють потрапляюче на них світло у всіх напрямках за рахунок відбиття Френеля. Розсіяне світло називається **світлом Тіндаля**. Гідроксильна група (ОН<sup>-</sup>), йони металів, домішки тощо пояснюють це явище в скловолокні.

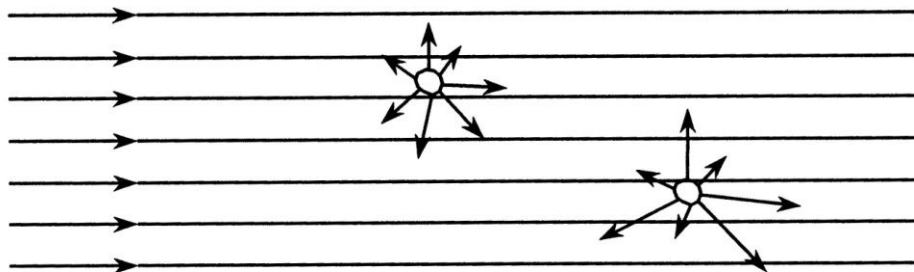


Рисунок 5.15 – Релеєве розсіювання світла через домішки в середовищі передачі

Молекули і варіації неоднорідностей у склі функціонують як електричні диполі. Диполі, що коливаються, створюють поле. Потужність випромінювання диполем визначена у наступному розділі.

В атмосфері короткохвильове світло (синій колір спектра) розсіюється у 3–4 рази більше, ніж довгохвильове світло (червона межа спектру), який надає небу різноманітні кольори в залежності від положення сонця на небі. Релей пояснив це явище і показав, що розсіювання має вирішальне значення у виборі діапазону хвиль у волоконній оптиці. Чим більша довжина хвилі, тим менше втрат релеєвського розсіювання.

## 5.5 Променевий аналіз поширення світла у волоконних світлопроводах

В геометричній оптиці світлові хвилі зображуються променями, що напрямлені по нормалі до хвильової поверхні. При падінні світлової хвилі на плоску межу поділу двох діелектриків з різними значеннями відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  в загальному випадку спостерігаються заломлена і відбита хвиля. У відповідності до закону Снелліуса кут

падіння пов'язаний з кутами відбиття і заломлення через рівність  $\varphi_i = \varphi_{a^3aa}$  і вираз (5.3).

Оскільки в оптичних середовищах відношення магнітної проникності  $\mu$  до магнітної проникності вакууму  $\mu_0$  приймається рівним одиниці, то в цьому виразі  $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ , а  $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ . В ОВ середовище серцевини більш щільне, ніж середовище оболонки, тобто  $n_1 > n_2$ . Тому при куті падіння  $\varphi_n > \varphi_{k0}$  світло повністю відбивається від границі серцевина – оболонка і поширюється тільки в серцевині волокна. Як відомо, критичний кут падіння світла визначається виразом:

$$\varphi_{k0} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.9)$$

Потік енергії з першого середовища в друге в середньому рівний нулю, і енергія падаючої електромагнітної хвилі повністю повертається в перше середовище. Як приклад розглянемо ОВ зі східчастим профілем показника заломлення. Східчасте оптичне волокно представляє собою двошарову скляну нитку, серцевина якої виготовлена зі скла з показником заломлення  $n_1$  діаметром  $2a = (3...50)$  мкм і оболонку з показником заломлення  $n_2$  діаметром  $2b = 125$  мкм (рис. 5.16). Для забезпечення повного внутрішнього відбиття на межі поділу необхідно, щоб  $n_1 > n_2$ . Зверху оболонки накладається захисне покриття з показником заломлення  $n_3 < n_2$ .

На рис. 5.16 показані світлові промені, які описують однорідні плоскі хвилі, що виходять пучком з точкового джерела, розташованого на вісі волокна.

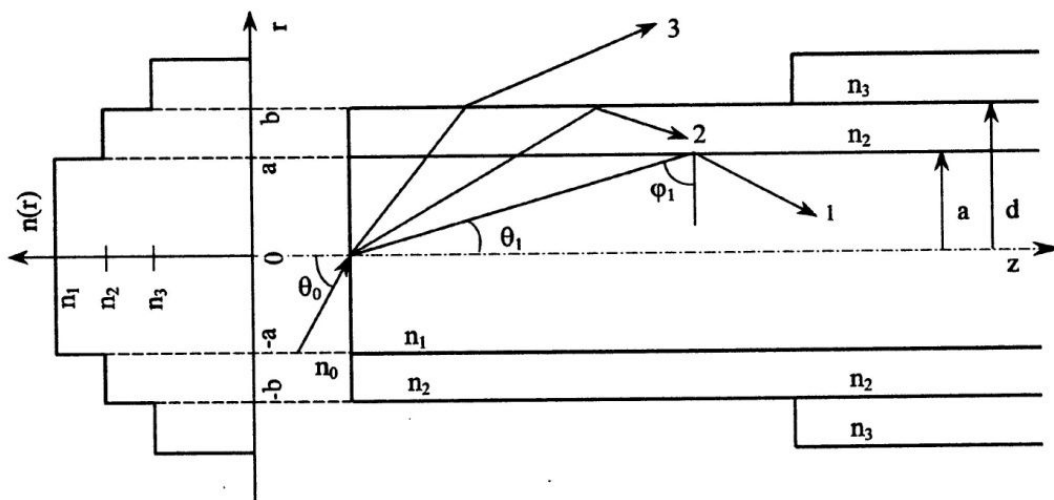
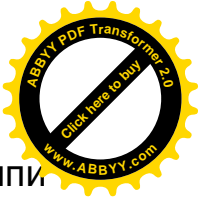


Рисунок 5.16 – Модель ОВ зі східчастим профілем показника заломлення



На торці ОВ цей пучок променів перетворюється в два типи променів волокна: меридіанні, які перетинають вісь волокна  $Z$ , і косі, які не перетинають цю вісь. На рис. 5.17 представлена траєкторія проходження косого променя в східчастому ОВ.

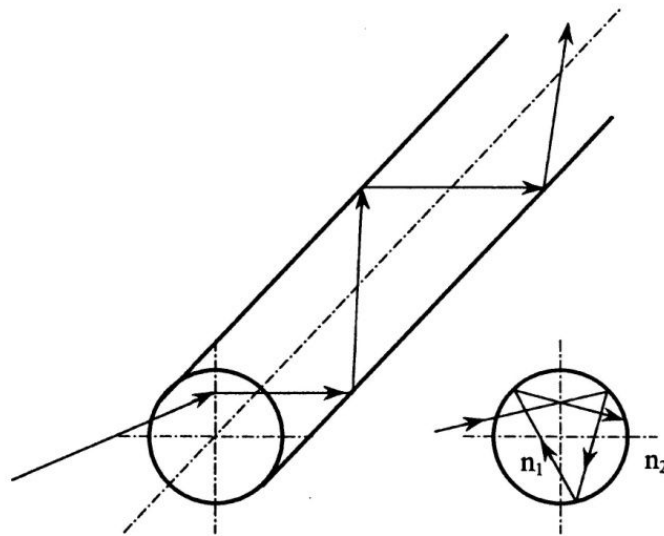


Рисунок 5.17 – Траєкторія проходження косого променя в ОВ

Частина меридіанних і косих променів, унаслідок повного внутрішнього відбиття в місцях падіння на границю серцевина – оболонка, поширюється впродовж ОВ за зигзагоподібними шляхами.

В залежності від кута нахилу променя  $\theta_1$  до осі  $Z$  меридіанні промені, що лежать в площині рис. 5.16, можуть відчувати повне внутрішнє відбиття від межі серцевина – оболонка, якщо  $\theta_1 < \arccos(n_2 / n_1)$ . При цьому утворюються моди сердечника 1, або напрямляючі моди.

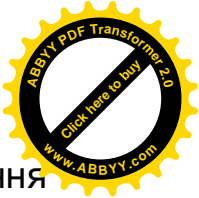
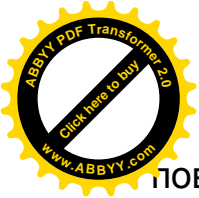
Якщо промінь падає під кутом  $\arccos(n_2 / n_1) < \theta_1 < \arccos(n_3 / n_2)$ , то він може формувати моду оболонки 2. Світлові промені, падаючі під кутом  $\theta_1 > \arccos(n_3 / n_2)$ , випромінюються у відкритий простір, тобто в захисну оболонку, утворюючи витікаючі моди, або моди випромінювання 3.

Промінь, що падає на торець волокна з оточуючого середовища під кутом  $\theta_0$  до вісі волокна, заломлюється при входженні в серцевину і поширюється у ній під кутом  $\theta_1$  відповідно до закону Снелліуса:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} . \quad (5.10)$$

При цьому заломлений промінь падає на бічну поверхню під кутом  $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ . Для повного внутрішнього відбиття променів від бічної





поверхні необхідно виконання умови  $\varphi_1 \geq \varphi_{\text{эд}}$ , де критичний кут падіння

$\varphi_{\text{эд}}$  визначається виразом (5.9). Звідси  $\sin \varphi_1 = \cos \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1}$ .

З (5.10) виходить, що

$$\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

Таким чином,

$$\sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0} \geq \frac{n_2}{n_1} \quad \text{або} \quad \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0 \geq 1.$$

Але  $\sin^2 \theta_0 \leq 1$ , тобто

$$\frac{n_1}{n_2} \geq 1 + \frac{n_0}{n_2} \sin^2 \theta_0. \quad (5.11)$$

Таким чином, якщо виконується умова (5.11), то будь-який меридіанний промінь поширюється вздовж серцевини волокна. Ця умова справедлива і для косих променів.

На рис. 5.18 показана конструкція волокна в оболонці із захисним покриттям.

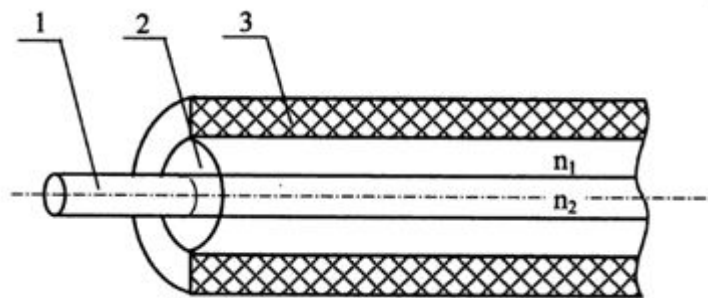
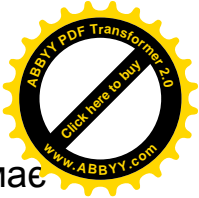
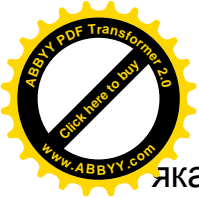


Рисунок 5.18 – Оптичне волокно: 1 – серцевина; 2 – оболонка; 3 – захисне покриття

Як було показано вище, оптичне випромінювання поширюється в ОВ такої конструкції при виконанні умови  $n_1 > n_2 > n_3$ . Співвідношення між  $n_1$  і  $n_2$  прийнято характеризувати відносною різницею ПЗ

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (5.12)$$





яка для більшості ОВ  $\Delta = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Показник заломлення оболонки має постійне значення, а серцевини – або постійне, або змінне по радіусу за певним законом.

Як згадувалось у розділі 5.1, в залежності від ППЗ ОВ поділяються на східчасті і градієнтні. Для усіх ППЗ головним є те, що показник заломлення серцевини має бути більшим ніж показник заломлення оболонки. Цього досягають за рахунок легування матеріалу серцевини або оболонки, тобто додаванням певної кількості оксидів в процесі виготовлення пресформ для витягування ОВ. В залежності від виду оксиду та його кількості можна підвищувати або зменшувати показник заломлення кварцового скла (рис. 5.19).

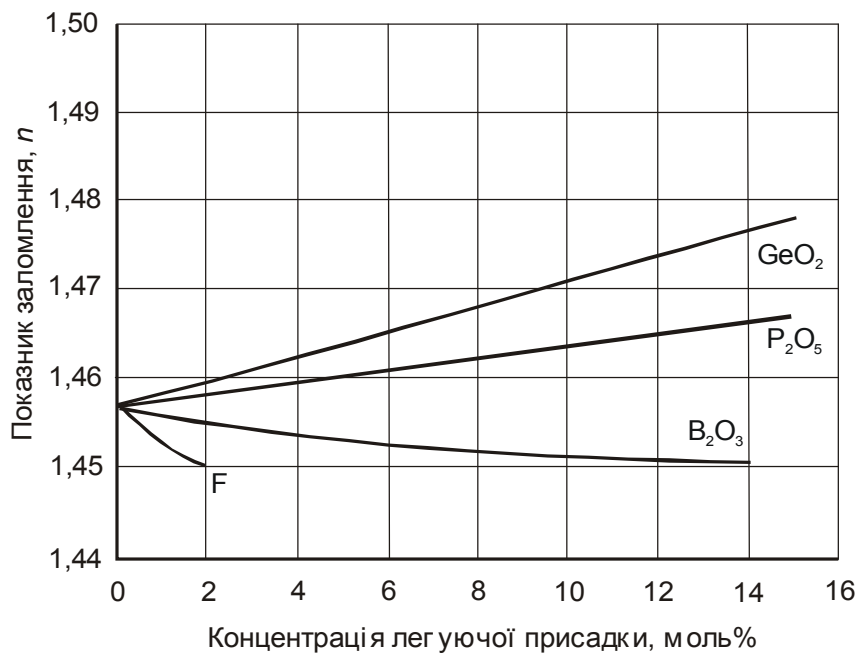
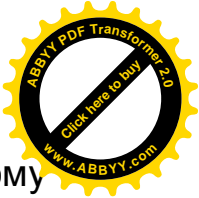
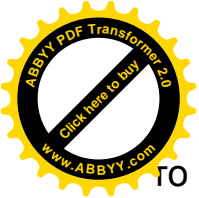


Рисунок 5.19 – Показники заломлення кварцового скла з різними легуючими присадками

Введення легуючих оксидів у чистий кварц призводить не лише до зміни показника заломлення, а й до зміни коефіцієнта лінійного температурного розширення кварцу, зростання розсіювання та поглинання світла, а значить і до зростання загасання розповсюдженого світла.

Наявність оптичної оболонки ускладнює хвильовий процес в ОВ. Частина меридіанних і косих променів, багаторазово відбиваючись від межі серцевина – оболонка, поширюється вздовж серцевини і утворює моди серцевини (напрямні моди). Інші промені, які падають на цю границю під кутами  $\varphi_i < \varphi_{\text{гд}}$ , виходять із серцевини назовні. Промені, що залишили серцевину, утворюють моди випромінювання. Деякі з них поширюються в оболонці за рахунок повного внутрішнього відбиття від межі оболонка – оточуюче середовище і утворюють моди оболонки. Якщо захисне покриття ОВ виконано з сильно поглинаючого матеріалу,



то воно буде прибирати перехресні перешкоди між ОВ в оптичному кабелі, які обумовлені модами випромінювання. Крім того, захисне покриття буде розсіювати енергію мод оболонки аналогічно до того, як це відбувається з напрямними модами діелектричного стрижня. Поле напрямних мод частково проникає в оточуюче середовище, де експоненціально згасає. При цьому глибина проникнення в оболонку ОВ, тобто відстань, на якій це поле згасає в  $e$  разів ( $e=2,718$ ), визначається при  $\varphi_i > \varphi_{\text{до}}$  виразом:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \varphi_n - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}, \quad (5.13)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі оптичного випромінювання, що вводиться в ОВ.

Як відомо, режим повного внутрішнього відбиття визначає умову подачі світла на вхідний торець волоконного світлопроводу.

З рис. 5.20 видно, що світлопровід пропускає лише світло, що знаходиться в межах тілесного кута  $\theta_a$ , величина якого обумовлена кутом повного внутрішнього відбиття  $\theta_a$ .

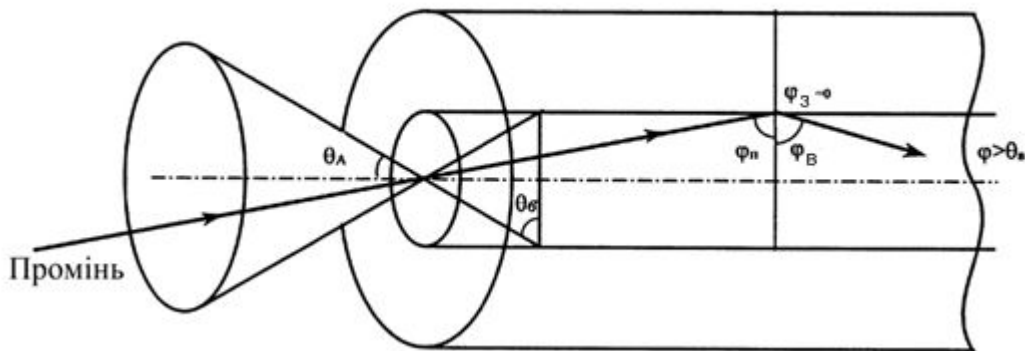


Рисунок 5.20 – Подача світла в ОВ

Цей тілесний кут  $\theta_a$  характеризується **апертурою**. Апертура – це кут між оптичною віссю і однією з твірних світлового конусу, що потрапляє в торець волоконного світлопроводу, при якому виконується умова повного внутрішнього відбиття.

Зазвичай користуються поняттям **числової апертури**

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5.14)$$

де  $n_0, n_1, n_2$  - показники заломлення повітря, сердечника, оболонки. Маючи на увазі, що для повітря  $n_0 = 1$  отримаємо

$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (5.15)$$



Як видно з рис. 5.20, між кутом повного внутрішнього відбиття  $\theta_a$  і апертурним кутом падіння променя  $\theta_a$  є взаємозв'язок. Чим більший кут  $\theta_a$ , тим менша апертура волокна  $\theta_a$ .

Для східчастих ОВ, що використовуються в системах зв'язку, числова апертура зазвичай дорівнює 0,18...0,23.

Формула (5.15) враховує тільки меридіанні промені ОВ. Однак в ОВ переважають косі промені, які не перетинають його вісь, а поширюються по ломаним (для східчастого ОВ) або право- чи лівогвинтовим спіралям (для градієнтного ОВ).

Виведення простого виразу для числової апертури косих променів дуже складне. Відмітимо тільки, що числова апертура, яка підрахована для меридіанних променів східчастого ОВ (5.15), менша дійсної числової апертури  $NA_A$ , що враховує усі промені. Відношення  $\frac{NA_A}{NA}$ , що приведенне

у технічних довідниках для різних значень ПЗ  $n_1$  і  $n_2$ , збільшується зі зменшенням різниці  $n_1 - n_2$ , тобто зі зменшенням апертури  $NA$  меридіанних променів.

Просте і наглядне представлення направляючих мод в ОВ за допомогою променів не враховує властивості світла як електромагнітної хвилі і у багатьох випадках не дозволяє отримати правильні результати. Наприклад, у відповідності зі сказаним вище вся нескінченна сукупність променів, падаючих на торець ОВ в межах кута  $\theta_a$ , повинна утворювати також нескінченну сукупність напрямних мод. Однак це не так. Хвильова теорія світла показує, що тільки скінченне число променів з певними кутами падіння на торець може утворювати напрямні моди ОВ. Це пояснюється, з точки зору променевої оптики, в східчастому світлопроводі тим, що при повному внутрішньому відбитті від межі з оболонкою хвиля набуває фазового зсуву, який залежить від кута падіння. Якщо в серцевині багаторазово відбиті хвилі складаються по фазі, то утворюється напрямна хвиля. В іншому випадку поля хвиль взаємно компенсуються.

## 5.6 Основні положення хвильової оптики при передачі світла по волоконних світлопроводах

Строге вирішення задач поширення електромагнітної енергії по сучасних кабелях зв'язку потребує застосування класичної електродинаміки і рівнянь Максвелла. На основі електродинаміки можна розглянути практично всі питання передачі, випромінювання, впливу і поглинання в ОК. Однак, в більшості випадках дуже складно шукати точні рішення. Під впливом запитів практики в свій час були розроблені приблизні методи рішення задач різних класів. Таким найбільш

характерним методом являється метод теорії геометричної оптики. В цьому випадку (квазіоптичний режим) здійснюється перехід від хвильових електродинамічних процесів до променевих процесів ( $\lambda \rightarrow 0$ ).

При  $\lambda \rightarrow 0$  в області дуже високих частот (вище  $10^{13}$  Гц) справедливі рівняння геометричної оптики. Однак квазіоптичний режим передачі по ОВ являється граничним випадком рівнянь електродинаміки.

Носієм електромагнітної енергії, яка широко використовується в сучасній мікроелектроніці та електрозв'язку, являється електромагнітне поле.

Електромагнітне поле – це особливий вид матерії, яке надає силовий вплив на заряджені частинки і володіє енергією, масою, швидкістю, тобто всіма властивостями матерії. Поле відрізняється безперервним розподіленням в просторі (електромагнітні хвилі) і виявляє дискретність структури (фотони).

Електромагнітне поле являє собою єдність двох своїх складових – електричного і магнітного полів.

Електричне поле  $\vec{E}$  характеризується силовою взаємодією як з нерухомими, так і з рухомими зарядами.

Магнітне поле  $\vec{H}$  характеризується силовою взаємодією лише з рухомими зарядами.

Електричні і магнітні поля зв'язані з певними кількостями електромагнітної енергії. В різних випадках може переважати той чи інший вид енергії (електричної або магнітної).

Розрізняють два основних типи полів: потенціальне і вихрове. Потенціальне поле тісно пов'язане зі своїм джерелом. Лінії поля мають початок і кінець. Лінії вихрового поля замикаються за соленоїдою, завжди безперервні і не мають початку і кінця (рис. 5.21).

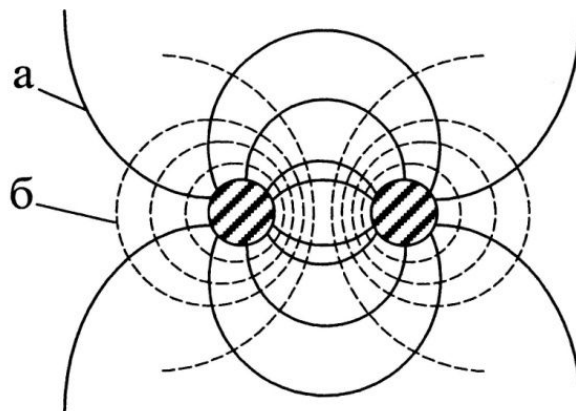
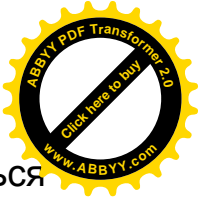


Рисунок 5.21 – Лінії потенціального (а) і вихрового (б) полів

Електростатичне поле є повністю потенціальним, а магнітне поле – повністю вихровим. Змінне електромагнітне поле в загальному випадку є суперпозицією потенціального поля електричних зарядів і вихрового поля індукції.



Електричні і магнітні властивості середовища характеризуються трьома параметрами: діелектричною проникністю  $\epsilon$ , магнітною проникністю  $\mu$  і індукцією  $\vec{B}$  магнітного поля.

Останні зв'язані між собою і параметрами середовища поширення наступними рівняннями Максвелла, при умові, що провідність середовища  $\sigma = 0$ :

$$\text{rot } \vec{H} \equiv \nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t, \quad (5.16)$$

$$\text{rot } \vec{E} \equiv \nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (5.17)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (5.18)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (5.19)$$

$$\text{div } \vec{D} = \nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad (5.20)$$

$$\text{div } \vec{B} = \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (5.21)$$

Діелектрична  $\epsilon$  і магнітна  $\mu$  проникності описують матеріали, що використовують у волоконній оптиці, які можуть бути лінійними і нелінійними, ізотропними і анізотропними, однорідними і неоднорідними, дисперсійними і недисперсійними. У абсолютної більшості матеріалів, що використовуються на практиці,  $\mu = \mu_0$  - магнітна проникність вакууму.

В залежності від властивостей параметрів  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  розрізняють наступні середовища:

- лінійні, в яких параметри  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  не залежать від величини електричного і магнітного полів;

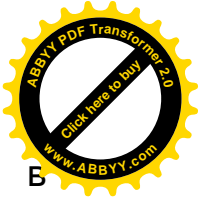
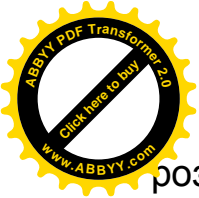
- нелінійні, в яких параметри  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  (або хоча б один із них) залежать від величини електричного або магнітного полів.

Всі дійсні середовища, по суті, є нелінійними. Однак при не дуже сильних полях в більшості випадках можна знехтувати залежністю  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  від величини електричного та магнітного полів і вважати, що дане середовище лінійне. Надалі будуть розглядатися тільки лінійні середовища.

В свою чергу, лінійні середовища поділяються на однорідні і неоднорідні, ізотропні і анізотропні.

Однорідними називають середовища, параметри  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  яких не залежать від координат, тобто властивості середовища однакові у всіх її точках. Середовища, в яких хоча б один з параметрів  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  є функцією координат, називають неоднорідними.

Однак, не дивлячись на те, що кварц є однорідним середовищем, оптичне волокно неоднорідне через те, що показники заломлення серцевини і оболонки різні. Тому області серцевини і оболонки у волокні з показником заломлення, що східчасто змінюється, можуть



розглядатися окремо як однорідні середовища, в той час як в градієнтному волокні це припущення недопустиме через його неоднорідну серцевину.

Якщо властивості середовища однакові по різним напрямкам, то середовище називають ізотропним. Відповідно середовища, властивості яких різні по різних напрямках, називають анізотропними. В ізотропних середовищах вектор електричної поляризації  $\vec{p}$  і вектор  $\vec{E}$ , вектори  $\vec{D}$  і  $\vec{E}$ , а також вектори магнітної поляризації  $\vec{M}$  і  $\vec{H}$ , вектори  $\vec{B}$  і  $\vec{H}$  паралельні, в анізотропних середовищах вони можуть бути непаралельними. В ізотропних середовищах параметри  $\epsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  скалярні величини. В анізотропних середовищах хоча б один з параметрів є тензором.

В кристалічному діелектрику тензором є діелектрична проникність  $\epsilon$ . В загальному випадку її записують у вигляді матриці:

$$\|\epsilon\| = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix}. \quad (5.22)$$

При цьому форма рівняння (5.18) залишається попередньою:

$$\vec{D} = \|\epsilon\| \vec{E}. \quad (5.23)$$

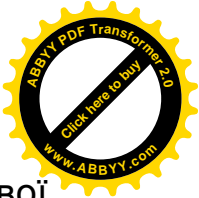
Для того, щоб записати рівняння (5.23) в проекціях на вісі прямокутної системи координат  $x, y, z$ , потрібно розкрити праву частину рівняння (5.23) за звичайними правилами множення матриць. У результаті отримаємо

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \epsilon_{xx} E_x + \epsilon_{xy} E_y + \epsilon_{xz} E_z \\ D_y &= \epsilon_{yx} E_x + \epsilon_{yy} E_y + \epsilon_{yz} E_z \\ D_z &= \epsilon_{zx} E_x + \epsilon_{zy} E_y + \epsilon_{zz} E_z \end{aligned} \right\}. \quad (5.24)$$

Непаралельність векторів  $\vec{D}$  і  $\vec{E}$  (а також  $\vec{p}$  і  $\vec{E}$ ) в анізотропному середовищі пояснюється тим, що в загальному випадку напрямок виникаючого в результаті поляризації анізотропного середовища вторинного електричного поля, створеного пов'язаними зарядами речовини, складає деякий кут (відмінний від 0 і  $\pi$ ) з напрямком первинного електричного поля.

Таким чином, ізотропне середовище характеризується тим, що його електромагнітні властивості, такі як показник заломлення, однакові в усіх





напрямах. В ізотропному середовищі  $\vec{E}$  і  $\vec{p}$  є векторами однакової орієнтації, і так як кварц представляє собою ізотропне середовище, ідеальне циліндричне оптичне волокно також є ізотропним.

Середовище, показники заломлення якого вздовж двох відмінних напрямків відповідної системи координат, наприклад уздовж осей  $X$  та  $Y$ , різні, називається двопроменезаломлюючим, тому оптичне волокно, що не має циліндричну систему, також називається двопроменезаломлюючим. Двопроменезаломлювання матеріалів, таких як ніобат літію, використовується у волоконно-оптичних компонентах, таких як модулятори, ізолятори і фільтри, які настроюються.

Середовище, в якому  $\varepsilon = const$ , тобто середовище однорідне по координатам простору і яке не залежить від частоти, називається однорідним дисперсійним середовищем. В ньому всі частотні складові сигналу поширюються з однією і тією ж фазовою швидкістю. Звідси сигнал не зазнає дисперсії.

Більшість оптичних середовищ характеризуються тим, що  $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$  і  $v = v(\omega)$ , тобто є функціями частоти. Це значить, що косинусоїдальні хвилі

$$\psi = A \cos(\omega t - (\omega/v)\vec{n}\vec{r}) \quad (5.25)$$

різних частот поширюються з різними фазовими швидкостями, що призводить до розширення сигналу, тобто до появи дисперсії.

У виразі (5.25) прийнято:  $A$  – амплітуда хвилі;  $\omega$  – кругова частота;  $\vec{n}$  – одиничний вектор, нормальний до площини, в якій знаходиться плоска хвиля;  $\vec{r}$  – координата точки спостереження.

### 5.6.1 Взаємодія оптичної хвилі з середовищем

Як відомо, електрони в атомі заряджені негативно, а ядро несе позитивний заряд. При поширенні синусоїдальної оптичної хвилі через матеріал, наприклад кварц, її електричне поле діє на цей матеріал. Під впливом сили зовнішнього електричного поля в матеріалі змінюються коливання заряджених частинок атомів. В результаті такої взаємодії потужність світлової хвилі зменшуються, тобто відбувається поглинання світла. Коливальні заряди атома перевипромінюють отриману від світлової хвилі потужність на власних частотах  $\omega_0$ . Таким чином, синусоїдальна оптична хвиля з частотою  $\omega$  створює систему осциляторів (диполів). Середня у часі випромінювана осцилятором потужність у відповідності до закону Релея представляється у вигляді

$$\langle W \rangle = \frac{\omega^4 q^2}{6\pi\epsilon c^3} \langle x \rangle^2, \quad (5.26)$$





де  $q$  – заряд частинки, що коливається по синусоїдальному закону з частотою  $\omega$ ;  $C$  – швидкість світла у вакуумі;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища (матеріалу);  $\vec{x} = \vec{x}_0 \cos \omega t$ .

Комплексна амплітуда вимушених коливань частинки з частотою  $\omega$

$$\vec{x}_0 = \frac{-q \vec{E} / m}{\omega_0^2 - \omega^2 + ia\omega / m}, \quad (5.27)$$

де  $m, a, \omega_0$  – відповідно маса спокою, коефіцієнт "тертя" і резонансна частота частинки. Тому при взаємодії оптичного поля з середовищем з'являються електричні диполі. На мікроскопічному рівні щільність дипольних моментів характеризується вектором поляризації середовища. Якщо в одиниці об'єму є  $N$  однакових атомів, кожний з яких має, наприклад,  $\eta$  електронів, то вектор поляризації дорівнюватиме

$$\vec{p} = -\eta N q \vec{x}. \quad (5.28)$$

Таким чином, індукована електрична поляризація матеріалу, або просто поляризація, може бути описана за допомогою вектора  $\vec{p}$ , який залежить як від особливостей матеріалу, так і від прикладеного поля. Індукована поляризація розглядається як відгук середовища на прикладене електричне поле. Розглянемо зв'язок  $\vec{p}$  і  $\vec{E}$  більш докладніше, визначивши спочатку вектор  $\vec{D}$ , так звана електрична індукція, яка зв'язана з електричним полем  $\vec{E}$  і електричною поляризацією  $\vec{p}$  наступним чином:

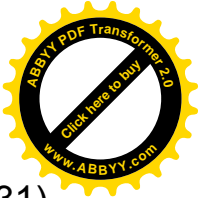
$$\vec{D} = \varepsilon_{cm} \vec{E} + \vec{p}, \quad (5.29)$$

де  $\varepsilon_{cm}$  - постійна, що називається статичною діелектричною проникністю середовища, в нашому випадку ОВ.

Виходячи з (5.28) і (5.29) комплексну діелектричну проникність можна представити у вигляді суми статичної і динамічної складових

$$\varepsilon = \varepsilon_{cm} + \varepsilon_a. \quad (5.30)$$

Звідси



$$\varepsilon = \varepsilon_{cm} + \frac{\eta N q^2 / m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i a \omega / m}. \quad (5.31)$$

Для чистого скла (плавленого кварцу без домішок, хімічна формула якого  $\text{SiO}_2$ ) резонансна частота електрона  $\omega_0$  розташована в ультрафіолетовій області спектру. Звідси у видимій ближній інфрачервоній області спектру ( $\omega \ll \omega_0$ ) діелектрична проникність практично постійна:

$$\varepsilon = \varepsilon_{cm} + \eta N q^2 / m \omega_0^2 = \varepsilon_{cm} + N a_0. \quad (5.32)$$

В реальних спектрах, крім атомів Si та O, в одиниці об'єму знаходяться й іони домішків (іони OH, Fe, Cu, Cr, тощо), а також молекули. Таким чином, для реального скла у виразі (5.31) необхідно додати стільки членів виду другого члена, скільки є диполів, обумовлених домішками. Молекула є відносно масивною, тому її  $\omega_0$  знаходиться поза спектру частот, що використовується у волоконно-оптичних системах.

Зв'язок  $\vec{p}$  і  $\vec{E}$  в оптичному волокні визначається властивостями середовища (кварцу) і являється причиною двох важливих явищ, які відносяться до поширення в ньому світла, – дисперсії і нелінійним ефектам, які обмежують функціонування сучасних волоконно-оптичних систем.

### 5.6.2 Хвильові рівняння

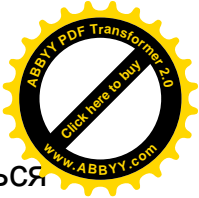
Для математичного аналізу поширення електромагнітних хвиль в діелектричних хвилепроводах (оптичних волокнах) методом хвильової оптики необхідно скористатися рівняннями Максвелла (5.16) – (5.21).

З цих рівнянь можна отримати більш зручні для практики рівняння, виконавши операцію ротора від рівняння (5.17) з урахуванням (5.19),

$$\text{rot rot } \vec{E} = -\mu (\partial / \partial t) \text{rot } \vec{H}. \quad (5.33)$$

Підставивши (5.16) і (5.18) в (5.33), отримаємо рівняння, яке містить тільки один вектор  $\vec{E}$

$$\text{rot rot } \vec{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (5.34)$$



Це рівняння справедливе тільки у тому випадку, коли  $\varepsilon$  змінюється в просторі, тобто для неоднорідного середовища. Перший член виразу (5.34), виходячи з векторної алгебри, можна представити у вигляді

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} \equiv \nabla \times (\nabla \cdot \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}, \quad (5.35)$$

де  $\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Замінив в цьому рівнянні вектор  $\vec{E}$  на  $\frac{\vec{D}}{\varepsilon}$ , можна отримати вираз першого члену правої частини у вигляді

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) = \nabla \left( \nabla^2 \frac{\vec{D}}{\varepsilon} \right) = \nabla \left[ (1/\varepsilon^2) (\varepsilon \nabla \cdot \vec{D} - \vec{D} \nabla \varepsilon) \right], \quad (5.36)$$

Оскільки  $\nabla \cdot \vec{D} \equiv \operatorname{div} \vec{D}$ , а  $\operatorname{div} \vec{D} = 0$ , те

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) = -\nabla \left( \vec{E} \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right). \quad (5.37)$$

Тоді з урахуванням (5.35), (5.36) і (5.37) рівняння (5.34) набуде вигляду

$$\nabla^2 \vec{E} + \nabla \left( \vec{E} \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (5.38)$$

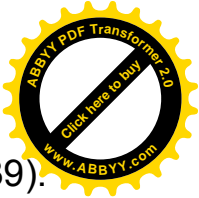
Аналогічно можна отримати хвильове рівняння для вектора  $\vec{H}$ , виконавши операцію ротора від рівняння (5.16),

$$\nabla^2 \vec{H} + \nabla \left( \vec{H} \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (5.39)$$

Розглянемо рішення рівняння (5.38) у різних середовищах.

В окремому випадку однорідного недисперсійного середовища ( $\varepsilon = \text{const}$ ), тобто коли середовище однорідне по координатам простору і не залежить від частоти, рівняння (5.38) приймає вигляд

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (5.40)$$



Такого ж вигляду в даному середовищі набуває і рівняння (5.39). Рівняння (5.40) справедливе тільки для будь-якої компоненти поля в декартовій системі координат. В циліндричній системі координат воно справедливе тільки для  $E_2$ . Величина  $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$  має фізичний зміст швидкості в середовищі з діелектричною і магнітними проникностями  $\varepsilon/\varepsilon_0$  і  $\mu/\mu_0$ , де  $\varepsilon_0, \mu_0$  - діелектрична і магнітна проникності вакууму. Як відмічалось раніше, в оптичних середовищах всюди вважається, що  $\mu/\mu_0 = 1$ .

Загальновідомо, що рішення рівняння (5.40) може задовольнятися будь-якою функцією

$$\psi = \psi\left(t - \vec{n} \cdot \vec{r} / v\right), \quad (5.41)$$

якщо існує друга похідна від  $\psi$ . При цьому рішенням є плоска хвиля.

У виразі компоненти  $\vec{r}$  являються компонентами точки спостереження,  $\vec{n}$  - одиничний вектор, нормальний до площини. В розв'язку (5.41)  $v$  не залежить від частоти. Дійсно, при заданому значенні аргументу цієї функції  $u$  і фіксованих значеннях часу  $t$

$$u = t - \vec{n} \cdot \vec{r} / v = \text{const} \quad (5.42)$$

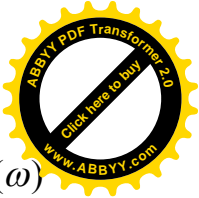
функція  $\psi(u)$  має відповідне фіксоване значення. Тому  $\psi(u)$  має одне і те ж значення на цій нескінченній площині. Кожному приросту  $\Delta t$  відповідає приріст  $\Delta \vec{r}$ , так що величина (5.42) залишається незмінною, тобто

$$v \cdot \Delta t = \vec{n} \cdot \Delta \vec{r}. \quad (5.43)$$

Вектор  $\vec{n}$  являється нормаллю як до первинної, так і до зміщеної площини. З (5.42) слідує, що площина рухається в просторі зі швидкістю  $v$ . Окремим випадком являються такі рішення рівняння (5.40), які в кожній точці простору змінюються в часі по косинусоїді

$$\psi = A \cos\left(\omega t - (\omega/v) \vec{n} \cdot \vec{r}\right). \quad (5.44)$$

Вектор  $\vec{k} = k \vec{n} = (\omega/v) \vec{n}$  називається хвилевим вектором. Всі окремі складові сигналу поширюються з однією і тією ж фазовою швидкістю. Звідси сигнал не піддається дисперсії.



В однорідному дисперсійному середовищі при  $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$  і  $v = v(\omega)$  рішення (5.41) є наближеним, якщо дисперсія слабо виявлена. В компонентах волоконно-оптичних систем ця умова зазвичай виконується.

Розглянемо два випадки, тобто збудження сигналу  $\psi(t)$  деякою площиною, що світиться і деякою поверхнею, що світиться неплоскої форми.

1. Якщо деякий сигнал  $\psi(t)$  збуджується деякою площиною, що світиться, на якій сигнал можна представити у вигляді суперпозиції косинусоїдальних коливань за допомогою перетворень Фур'є, то кожне гармонійне коливання (5.44) поширюється через дисперсійне середовище як плоска хвиля. Такого типу хвилю  $\psi(t)$  можна представити у вигляді комплексного інтеграла Фур'є, розташувавши систему координат таким чином, щоб вона поширювалась вздовж вісі  $z$ . Тоді

$$\psi(z, t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\omega) e^{i(\omega t - kz)} d\omega. \quad (5.45)$$

Амплітудна функція  $\varphi(\omega)$  визначається через відому форму сигналу при  $z = 0$ :

$$\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(0, t) e^{-k\omega t} dt. \quad (5.46)$$

Таким чином, сигнал в просторі дисперсійного середовища представляється сукупністю хвиль, кожна з яких знаходиться в своїй площині і рухається зі своєю швидкістю. Звідки просторова тривалість сигналу  $\Delta z$ , представлена на рис. 5.22, визначається відстанню між площиною 1 з гармонійним коливанням сигналу частотою  $\omega_1$  і площиною  $N$  з гармонійним коливанням  $\omega_N$ .

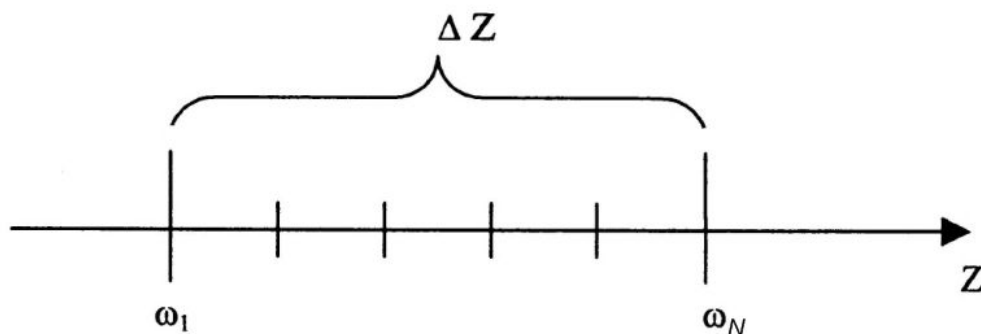
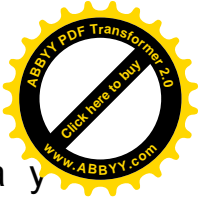
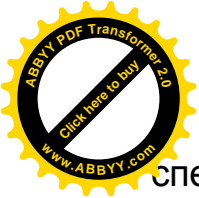


Рисунок 5.22 – Просторова тривалість сигналу  $\psi(t)$  в однорідному дисперсійному середовищі

Нагадаємо, що ці представлення підходять для випадку, коли  $v$  слабо залежить від частоти або функція  $\psi(z, t)$  описується вузьким



спектром частот у порівнянні з оптичною несучою. Остання умова у волоконно-оптичних системах також виконується.

Фазова швидкість не має змісту для функції (5.45). Однак функція (5.45) правильно описує поширення плоскої хвилі загального вигляду в дисперсійному середовищі.

Викладені вище представлення полів, що поширюються в дисперсійному середовищі, можна використовувати і у випадку збудження сигналу  $\psi(t)$  деякою поверхнею, що світиться неплоскої форми.

2. Криволінійну поверхню представимо у вигляді сукупності плоских хвиль.

На виході реальних джерел випромінювання, якими є лазери, коливання сферичні. Тому на малій відстані від лазера випромінювання представляється сукупністю плоских хвиль (рис. 5.23).

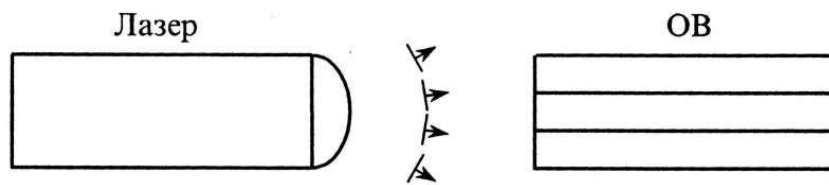


Рисунок 5.23 – Введення оптичного випромінювання у волокно

Використовуючи суперпозицію плоских синусоїдальних хвиль із різними частотами, що біжать у різних напрямках, можна скласти загальний вираз для хвилі, що поширюється в дисперсійному середовищі:

$$\psi(x, y, z, t) = (1/2\pi)^3 \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \varphi(k_x, k_y, \omega) \times e^{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)}. \quad (5.47)$$

Тут  $k_z$  або будь-яка інша складова хвильового вектора повинна задовольняти умові

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}. \quad (5.48)$$

Складова  $k_z$  може бути уявною, коли підкореневий вираз негативний. У цьому випадку замість плоскої хвилі маємо справу з локальною хвилею, яка не поширюється. Такі хвилі також є рішеннями хвильового рівняння (5.40).

Інтегральне подання (5.47) узагальненої хвилі складається із плоских хвиль різних напрямків поширення й різних частот, а також із локальних хвиль, що не поширюються. При гармонійному (синусоїдальному) сигналі інтегрування по частоті можна виключити.





### 5.6.3 Граничні умови

Рівняння Максвелла в диференціальній формі (5.16), (5.17) справедливі у випадку лінійних середовищ, параметр у яких або не залежить від координат, або є безперервною функцією координат. На практиці, однак, часто зустрічаються випадки, коли розглянута область складається із двох (або більше) різнорідних середовищ. При аналізі макроскопічних властивостей поля в цих випадках звичайно доводиться вважати, що параметр  $\varepsilon$  на границі розділу середовищ змінюється стрибком. Операція диференціювання в точках, що належать границі розділу, не справедлива, і рівняння Максвелла в диференціальній формі в цих точках не мають сенсу. Тому для вивчення поведінки векторів електромагнітного поля при переході з одного середовища в інше потрібно виходити з рівнянь Максвелла в інтегральній формі, які залишаються справедливими і у цих випадках.

Співвідношення, що показують зв'язок між значеннями векторів електромагнітного поля в різних середовищах у поверхні розділу, називаються граничними умовами. Рівняння Максвелла не визначають електромагнітне поле повністю без завдання граничних умов.

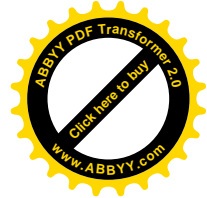
У завданнях про неоднорідні структури без стрибкоподібної зміни граничною умовою звичайно є вимога зникнення поля в нескінченності й обмеженість поля усередині будь-якої кінцевої області простору. Вимога відсутності поля в нескінченності приводить до мод, що направляються, (типам хвиль). Поле мод, що направляють, обмежено напрямною структурою (системою), і при цьому не губиться їхня потужність на випромінювання.

Найбільш загальний тип граничних умов у світлопроводних пристроях відповідає частково-однорідному розподілу  $\varepsilon$ . Становлять інтерес граничні умови для змінних у часі полів. Шукані граничні умови виходять із рівнянь Максвелла шляхом інтегрування їх по об'єму, обраному на границі поділу середовищ 1 і 2. Стягаючи об'єм у точку, у границі одержуємо рівність тангенціальних складових електричних і магнітних полів на границі поділу середовищ:

$$H_{t1} = H_{t2}, \quad E_{t1} = E_{t2}. \quad (5.49)$$

Фізичний зміст цих співвідношень полягає в тому, що тангенціальні складові полів  $\vec{H}$  і  $\vec{E}$  безперервні на границі розділу середовищ. Ці граничні умови разом з умовами на нескінченність визначають конкретні рішення рівнянь Максвелла для конкретного завдання. При цьому поля представляються у вигляді деяких функцій координат, частот і часу. У цьому заключається хвильовий метод рішення завдань.

### 5.6.4. Поширення мод



Виконаємо хвильовий аналіз поширення мод на прикладі ОВ зі східчастим ППЗ. Для цього розглянемо ОВ без втрат двошарової конструкції, наведене на рис. 5.24.

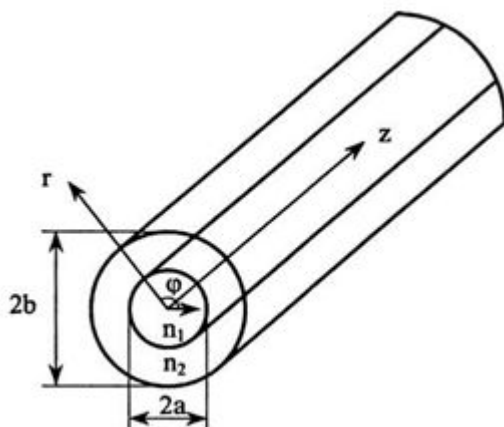


Рисунок 5.24 – Конструкція ОВ двошарової структури

Променевий метод розрахунку волоконних світловодів є наближеним і не дає повної картини поширення хвиль у східчастому ОВ. Тому необхідно звертатися й до хвильового методу рішення рівнянь Максвелла або хвильового рівняння. Хвильове рівняння (5.40) у циліндричній системі координат  $r, \varphi, z$  щодо компонентів електричного поля або магнітного поля  $H_z$ , що змінюються в часі  $t$  й уздовж вісі  $z$  волокна, у вигляді

$$E_z e^{i(\omega t - \beta z)}, H_z e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (5.50)$$

переходить у рівняння Гельмгольца

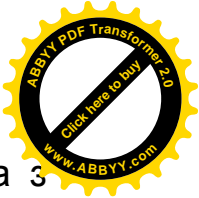
$$\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} + \chi^2 F = 0, \quad (5.51)$$

де

$$F = \begin{Bmatrix} E_z \\ H_z \end{Bmatrix}, \quad \chi^2 = \kappa^2 - \beta^2 = \kappa_0^2 n^2 - \beta^2; \quad (5.52)$$

$\chi$  – поперечне хвильове число, або власне значення;  $\beta$  – фазова постійна.

Для опису поведінки електромагнітного поля в серцевині ( $0 < r < a$ ) і в оболонці ( $a < r < b$ ) необхідно використати різні функції. Виходячи з фізичної сутності процесів, функції серцевини при  $r = 0$  повинні бути кінцевими, а в оболонці повинні описувати спадаюче поле.



Використаємо циліндричну систему координат, вісь якої сумісна з віссю циліндра. Поверхневі складові напруженості електричного й магнітного полів можуть бути виражені через поздовжні складові  $E_z$  й  $H_z$ .

Для спрощення рішення рівняння (5.51) припустимо, що оболонка ОВ з  $n_2$  на рис. 5.24 простирається нескінченно ( $d = \infty$ ). Таке спрощення моделі є виправданим і приводить до адекватних характеристик мод реального східчастого ОВ, що має захисне покриття, для забезпечення механічного захисту ОВ. У такому випадку  $n$  в (5.52) дорівнює або  $n_1$  у середині ОВ, або  $n_2$  у зовнішньому середовищі. Для знаходження хвиль, що біжать уздовж вісі  $Z$  необхідно для зовнішнього середовища покласти

$$\chi_2^2 = -\alpha_2^2 = \beta^2 - \kappa_0^2 n_2^2, \quad (5.53)$$

щоб поле в радіальному напрямку в середовищі  $n_2$  зменшувалося. Тоді рішення рівняння (5.51) можна записати у вигляді

$$F_1 = [A_m J_n(\chi_1 r) + B_m N_n(\chi_1 r)] \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} \quad (5.54)$$

для серцевини ОВ з показником заломлення  $n_1$ ;

$$F_2 = [C_m I_n(\alpha_2 r) + D_m K_n(\alpha_2 r)] \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} \quad (5.55)$$

для оболонки з  $n_2$ , що простирається нескінченно.

Залежність всіх полів від координат  $\varphi$  у вигляді  $\cos n\varphi$  й  $\sin n\varphi$  свідчить про те, що у волокнах круглого перетину моди можуть існувати у вигляді двох взаємно ортогональних поляризацій. Це значить, що моди в східчастому ОВ є попарно виродженими по поляризації, що особливо важливо для передачі сигналів в одномодовому ОВ.

Таким чином, рішення (5.54) і (5.55) дають можливість виявити умови поширення хвиль у східчастому ОВ.

У рішеннях (5.54) і (5.55)  $A_m, B_m, C_m$  і  $D_m$  — постійні інтегрування;  $J_n, N_n$  — функції Бесселя першого й другого роду  $n$ -го порядку, відповідно;  $I_n$  і  $K_n$  — видозмінені (модифіковані) функції Бесселя першого й другого роду  $n$ -го порядку, відповідно. На рис. 5.25 наведені якісні характеристики функції залежно від власних значень  $\chi_1 r$  і  $\alpha_2 r$ .

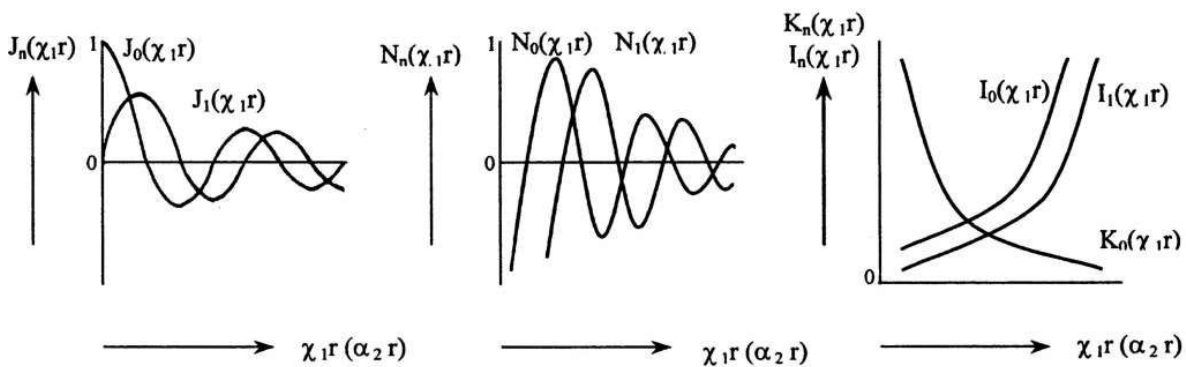


Рисунок 5.25 – Якісні залежності функцій  $J_n(\chi_1 r)$ ,  $N_n(\chi_1 r)$ ,  $I_n(\chi_1 r)$  і  $K_n(\chi_1 r)$  від аргументу  $\chi_1 r(\alpha_2 r)$

При  $r \rightarrow 0$  значення  $N_n \rightarrow -\infty$ . Але тому що поле на вісі серцевини не може здобувати нескінченних значень, то необхідно покласти  $B_m = 0$ . Поле за межами серцевини повинне зменшуватися в радіальному напрямку й при  $r \rightarrow \infty$  повинне прагнути до нуля. Однак  $I_n$  при цьому прагне до нескінченності, що суперечить умові Зоммерфельда. Отже, треба покласти  $C_m = 0$ , тому що нас цікавлять моди, що направляють тільки уздовж вісі  $z$ . Таким чином, функція  $J_n(\chi_1 r)$  описує розподіл поля усередині серцевини ОВ, а функція  $K_n(\alpha_2 r)$  описує зміни поля за її межами (в середовищі з  $n_2$ ) і поводить себе при великих значеннях  $\alpha_2 r$  як  $\exp(-\alpha_2 r)$ . Тоді рівняння (5.54) и (5.55) перепишуться у вигляді

$$F_1 = A_m J_n(\chi_1 r) \begin{Bmatrix} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{Bmatrix}, \quad (5.56)$$

$$F_2 = D_m K_n(\alpha_2 r) \begin{Bmatrix} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{Bmatrix}. \quad (5.57)$$

Постійні інтегрування  $A_m$  і  $D_m$  можуть бути визначені на підставі граничних умов, як відзначалося раніше.

Поперечні складові електричних ( $E_r, E_\varphi$ ) і магнітних ( $H_r, H_\varphi$ ) полів можуть бути виражені за допомогою відомих співвідношень між поперечними й поздовжніми ( $E_z, H_z$ ) складовими.

Тоді, використовуючи умову рівності тангенціальних складових напруженостей електричних і магнітних полів на поверхні поділу серцевина – оболонка (при  $r = a$ ):

$$\begin{aligned} E_{z1}(a) &= E_{z2}(a); & E_{\varphi1}(a) &= E_{\varphi2}(a); \\ H_{z1}(a) &= H_{z2}(a); & H_{\varphi1}(a) &= H_{\varphi2}(a); \end{aligned} \quad (5.58)$$



знайдемо постійні інтегрування. Підставивши їх у рівняння (5.56) і (5.57), і після відповідних перетворень одержимо наступне характеристичне рівняння:

$$\frac{\chi_1 a}{n_1} \cdot \frac{J_{n\pm 1}(\chi_1 a)}{J_n(\chi_1 a)} = \pm \frac{\alpha_2 a}{n_2} \cdot \frac{K_{n\pm 1}(\alpha_2 a)}{K_n(\alpha_2 a)}. \quad (5.59)$$

Це рівняння дозволяє визначити структуру поля, параметри хвиль і характеристики ОВ. У загальному випадку воно має ряд рішень, кожному з яких відповідає певна структура поля, названа типом хвилі, або модою. Звичайно в східчастих ОВ, застосованих для ліній передачі сигналів,  $n_1 \approx n_2$ . Тоді рівняння (5.59) можна переписати у вигляді:

$$\chi_1 a \frac{J_{n-1}(\chi_1 a)}{J_n(\chi_1 a)} = -\alpha_2 a \frac{K_{n-1}(\alpha_2 a)}{K_n(\alpha_2 a)}. \quad (5.60)$$

У східчастому ОВ відсічення моди (критичні умови) настає при значенні поперечного хвильового числа в оболонці  $\alpha_2 = 0$ , а це можливо при  $\beta = k_2$ . При цій умові з (5.60) виходить, що

$$J_{n-1}(\chi_1 a) = 0. \quad (5.61)$$

Звідси видно, що нижча (основна) мода ( $n = 0$ ) має відсічення, визначене з рівняння

$$J_1(\chi_1 a) = -J_{-1}(\chi_1 a) = 0. \quad (5.62)$$

Перший корінь цього характеристичного рівняння  $\chi_1 a = 0$ , і він відповідає моді  $HE_{11}$ . Відповідно до рішення (5.54) і (5.55) ця хвиля існує у вигляді двох взаємних ортогональних поляризацій  $HE_{11r}$  і  $HE_{11\theta}$ , що відповідають  $\cos \varphi$  й  $\sin \varphi$  (рис. 5.26).

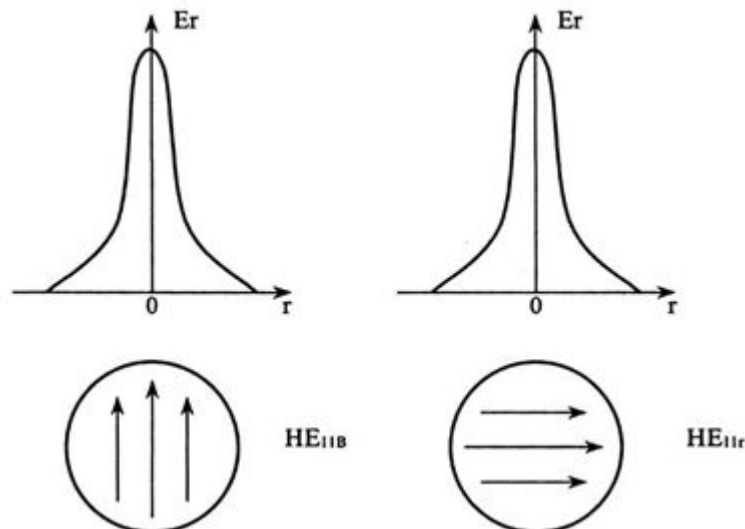




Рисунок 5.26 – Приклад двох взаємно ортогональних поляризацій моди  $HE_{11}$

Розподіл щільності поперечного поля в поперечному перерізі серцевини підкоряється закону  $J_0(\chi_1 r)$ , що наближається до гаусового закону  $\exp(-r^2 / \omega_0^2)$  розподілу поля в лазерному світловому пучку. Друга в порядку збудження мода для  $n=0$  відсікається, коли функція  $J_1(\chi_1 r)$  другий раз стає рівною нулю, тобто коли  $\chi_1 a = 3,83$  (рис. 5.25). Ця мода позначається  $HE_{12}$ . Аналогічно для  $n=0$  буде впливати мода  $HE_{13}$ ,  $HE_{14} \dots$ .

У наведених позначеннях мод перший індекс ураховує порядок функції, другий - номер кореня (порядок рішення), що задовольняє граничним умовам для даного порядку функції Бесселя.

Наступна сукупність мод відповідає  $n=1$  або характеристичному рівнянню

$$J_0(\chi_1 r) = 0. \tag{5.63}$$

Першим коренем цього рівняння є  $\chi_1 a = 2,405$ . Йому відповідають дві хвилі  $H_{01}$  і  $E_{01}$ . Другому кореню рівняння (5.63) відповідає наступна пара мод  $H_{02}$  й  $E_{02}$ , тощо.

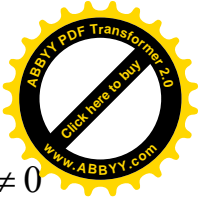
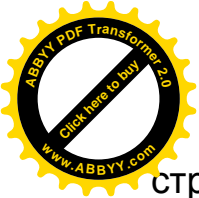
У таблиці 5.2 як приклад наведені значення частини коренів бesselевих функцій  $P_{nm} = \chi_1 a$  залежно від порядку функцій і кореня бesselевої функції.

Таблиця 5.2 - Значення коренів бesselевих функцій  $P_{nm}$

Тип хвилі	Порядок функції, $n$	Номер кореня функції, $m$		
		1	2	3
$E_{0m}, H_{0m}$	0	2,405	5,520	8,654
$HE_{11}$	1	0,000	3,832	7,016
$EH_{1m}$	1	3,832	7,016	10,173
$HE_{2m}$	2	3,05	5,538	8,665
$EH_{2m}$	2	5,136	8,417	11,620

Таким чином, функції Бесселя першого роду  $n$ -го порядку дають нескінченне число коренів. Причому корінь функції  $J_0(\chi_1 a)$  визначає





структуру поля симетричних хвиль  $E_{0m}, H_{0m}$ , а  $J_n(\chi_1 a)$  при  $n \neq 0$  структуру несиметричних гібридних хвиль  $EH_{nm}, HE_{nm}$ . В індексі моди  $n$  — число змін поля по діаметру, а  $m$  — число змін поля по периметру серцевини ОВ.

Симетричні хвилі, електричні  $E_{0m}$  і магнітні  $H_{0m}$ , мають кругову симетрію  $n = 0$ . Роздільне поширення по світлопроводу несиметричних хвиль типу  $E_{nm}$  й  $H_{nm}$  неможливо. В ОВ вони існують тільки спільно, тобто є поздовжні складові  $E$  і  $H$ . Ці хвилі називаються гібридними, дипольними й позначаються через  $HE_{nm}$ , якщо поле в поперечному перерізі нагадує поле  $H$ , або  $EH_{nm}$ , якщо поле в поперечному перерізі ближче до хвиль  $E$ .

### 5.6.5 Глокове групування мод

У світлопроводних системах зв'язку застосовуються джерела випромінювання двох видів: світловипромінюючі та лазерні діоди. На відміну від світловипромінюючого діода лазерний діод виробляє когерентне світло. Нагадаємо, що дві хвилі називаються **когерентними**, якщо різниця їх фаз не залежить від часу.

Когерентні джерела оптичного випромінювання найчастіше створюють лінійно-поляризоване світло, і тому первинно у волокні збуджуються хвилі, не схожі на  $HE$  й  $EH$  хвилі. Це навіть поставило під сумнів правильність індексації зазначених хвиль. Уперше ці труднощі вирішив Глог, згрупувавши моди по областях значень  $\chi_1 a$  між сусідніми коренями функцій  $J_0(\chi_1 a)$  й  $J_1(\chi_1 a)$ , як зазначено на рис. 5.27 і наведено в таблиці 5.3.

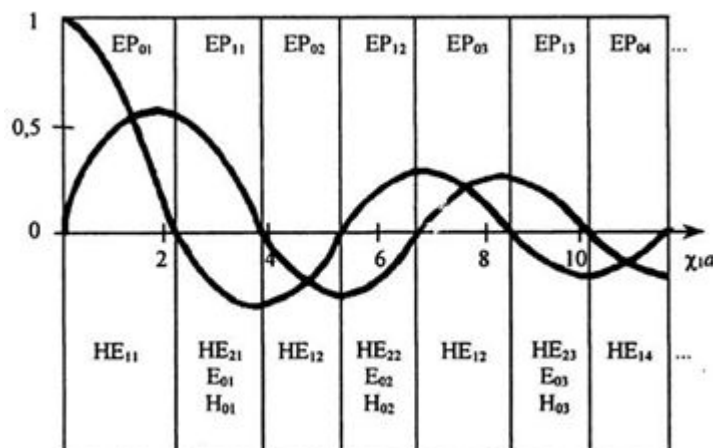
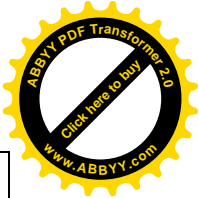
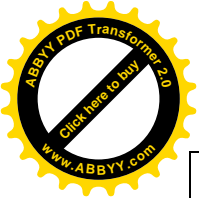


Рисунок 5.27 – Групування мод по областях значень між сусідніми коренями функції  $J_0(\chi_1 a)$  й  $J_1(\chi_1 a)$

Таблиця 5.3 - Групування мод по Глогу



Інтервал між значеннями коренів $\chi_1 a$	Мода	Інтервал між значеннями коренів $\chi_1 a$	Мода
0 - 2,405	$HE_{11}$	5,520 - 6,380	$H_{02}, E_{02}, HE_{22}$
2,405-3,832	$H_{01}, E_{01}, HE_{21}$	6,380-7,016	$EH_{31}, HE_{51}$
3,832-5,136	$HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}$	7,016-7,588	$HE_{13}, EH_{12}, HE_{32}$
5,136-5,520	$EH_{21}, HE_{41}$	7,588-8,417	$EH_{41}, HE_{61}$

Сума полів зазначених груп хвиль дає відповідні лінійно-поляризовані моди, позначені  $LP_{nm}$ , або моди поляризації, позначені  $EP_{nm}$ .

На рис. 5.28, а, б представлені, наприклад, суми полів хвиль  $H_{01}$  з власним значенням  $\chi_{01} a = 2,405$  і  $HE_{21}$  з власним значенням  $\chi_{21} a = 3,05$ , що утворюють поля двох хвиль  $LP_{11}$  єдиної лінійної в поперечному перерізі ОВ поляризації, зазначених стрілками.

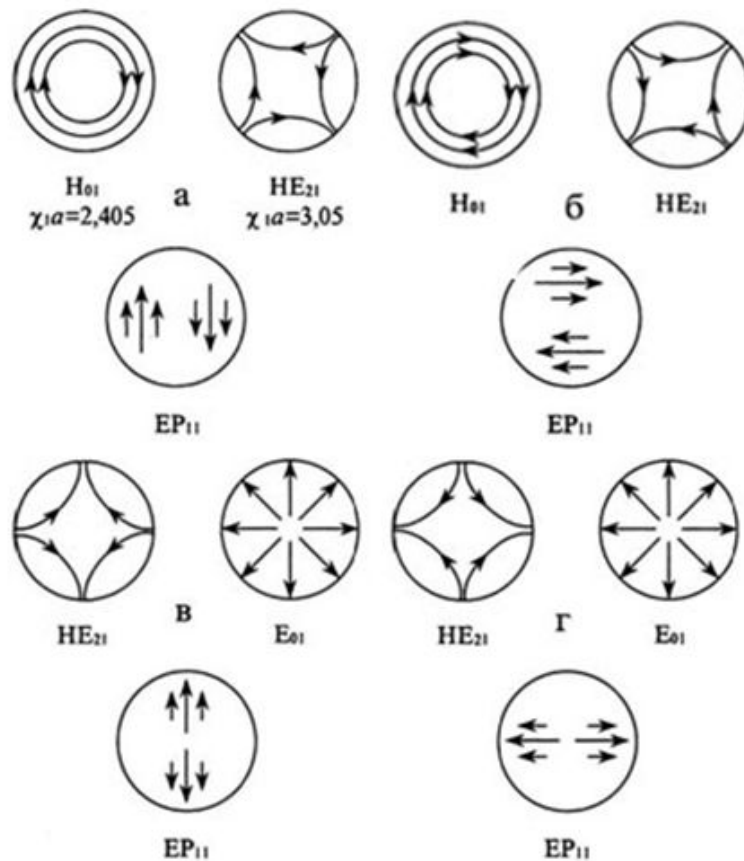


Рисунок 5.28 – Суми полів хвиль  $H_{01}$  і  $HE_{21}$  ( $E_{01}$  і  $HE_{21}$ )

Аналогічно суми полів хвиль  $E_{01}$  і  $HE_{21}$  (рис. 5.28, в, г) дають ще дві лінійні поляризаційні хвилі  $LP_{11}$ . Хвилі  $LP_{nm}$  з єдиною лінійною поляризацією являють собою лише наближення дійсних власних  $HE_{nm}$  і

$E_{H_{nm}}$  хвиль осердя. Взагалі, будь-яка  $LP_{1m}$  хвиля складається з  $H_{0m}$  і  $HE_{2m}$  хвиль при одній поляризації та з  $E_{0m}$  і  $HE_{2m}$  хвиль при іншій поляризації. Хвиля  $LP_{nm}$  більш високого порядку  $n$  по колу складається із хвиль  $E_{H_{n-1,m}}$  й  $HE_{n+1,m}$ .

Більш точно, звичайно, використати спектр хвиль  $E_{H_{nm}}$  та  $HE_{nm}$ . Але для слабонаправляючих ОВ з  $n_1 \approx n_2$  зручніше використати  $LP$  хвилі. Тільки тоді, коли  $LP$  хвилі проходять по ОВ велику відстань, вони розщеплюються на власні  $HE$ - і  $E_{H}$ - хвилі, внаслідок розходження їхніх власних значень (фазових швидкостей).

Таким чином, при уведенні з лазера лінійно-поляризованого випромінювання в східчасте оптичне волокно, що підтримує власні моди  $HE_{nm}$  й  $E_{H_{nm}}$ , спостерігається їхня неузгодженість як за структурою полів, так і за поляризацією. Це приводить до сильного перетворення хвиль на початковій ділянці ОВ та, як наслідок, до більших втрат сигналів за рахунок випромінювання частини їхньої потужності у відкритий простір у вигляді витікаючих мод. Довжина встановлення рівноважного стану мод може бути визначена по наближеній формулі:

$$L_y \approx (a/2\theta_{sp}) \exp(V/2) \quad (5.64)$$

і може досягати значень від одиниць сантиметрів до сотень метрів. Наприклад, у випадку типового багатомодового ОВ з радіусом серцевини  $a = 25 \lambda$ ,  $\theta_{ed} = 0,14$  та  $V = 30$ ,  $L_y \approx 300 \lambda$ . Картина висвічування витікаючих мод, на ділянці встановлення рівноважного стану мод представлена на рис. 5.29.

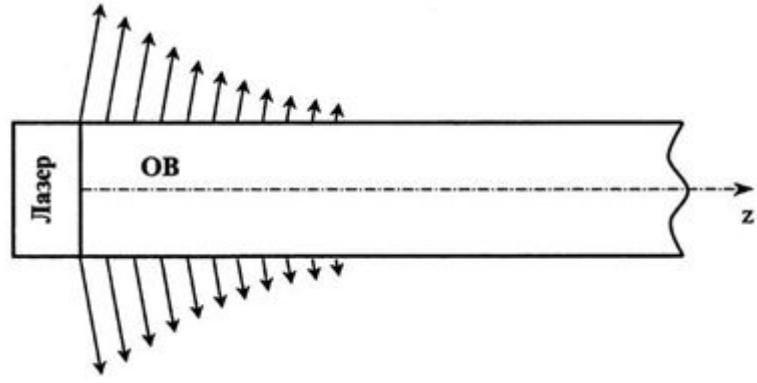


Рисунок 5.29 – Висвічування витікаючих мод з багатомодових ОВ на ділянці  $L_y$

Під  $L_y$  розуміється довжина ОВ, на якій випромінюється 0,9 потужності всіх витікаючих мод.

### 5.7 Основні параметри оптичних волокон



Розглянемо основні параметри одномодових і багатомодових ОВ. До них відносяться: геометричні й оптичні параметри, параметри передачі, механічні параметри.

Основними **геометричними** параметрами ОВ є: діаметр серцевини, діаметр оболонки, діаметр захисного покриття, некруглість (еліптичність) серцевини, некруглість оболонки, неконцентричність серцевини й оболонки.

Некруглість серцевини ОВ визначається як різниця максимального й мінімального діаметрів серцевини, ділена на номінальний діаметр серцевини.

Некруглість серцевини визначається тільки в багатомодових волокнах, некруглість оболонки - у багатомодових й одномодових волокнах.

Некруглість серцевини ОВ (рис. 5.30, а) визначається з виразу:

$$H_c = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{d_i}, \quad (5.65)$$

де  $H_c$  — некруглість серцевини, %;  $d_{\max}$  — найбільший діаметр серцевини, мкм;  $d_{\min}$  — найменший діаметр серцевини, мкм;  $d_H$  — номінальний діаметр серцевини, мкм.

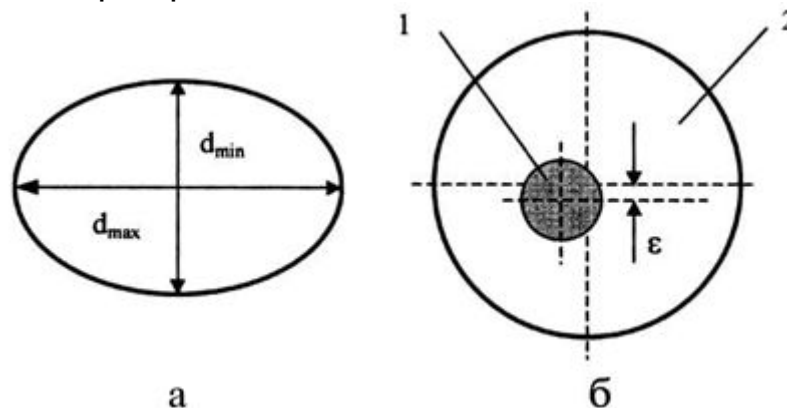


Рисунок 5.30 – Приклади неоднорідностей в ОВ: а — некруглість; б — неконцентричність серцевини й оболонки ОВ

Некруглість оболонки ОВ визначається аналогічно.

Неконцентричність серцевини щодо оболонки визначається як відстань між центрами оболонки й серцевини ОВ (рис. 5.30, б) і визначається з виразу:

$$H_{\%} = \ddot{O}_0 - \ddot{O}_n, \quad (5.66)$$

де  $H_{\%}$  — неконцентричність серцевини щодо оболонки, мкм;  $\ddot{O}_n$  — координата центра серцевини, мкм;  $\ddot{O}_i$  — координата центра оболонки, мкм.



Геометричні параметри стандартизовані для різних типів ОВ.

Основними **оптичними** параметрами волокна є: відносна різниця ПЗ  $\Delta$ ; числова апертура  $NA$ ; нормована частота  $\nu$ ; число мод, що поширюються  $M$ ; діаметр модового поля; довжина хвилі відсічення (критична довжина хвилі  $\lambda_{сб}$ ).

Відносна різниця ПЗ серцевини й оболонки ОВ визначається виразом (5.12).

Однією з основних характеристик, що визначають умови введення оптичних сигналів і процеси їхнього поширення в ОВ, є числова апертура, обумовлена для:

- оптичних волокон зі східчастим ППЗ

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (5.67)$$

- оптичного волокна з градієнтним ППЗ

$$NA = \sqrt{\frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2}}. \quad (5.68)$$

У градієнтних ОВ використовується поняття локальної числової апертури. Її значення максимально на вісі волокна й дорівнює 0 на границі поділу серцевина - оболонка.

Важливим параметром ОВ є нормована частота

$$\nu = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (5.69)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі, мкм.

Цей параметр визначає число мод, що поширюються по ОВ. Якщо  $0 < \nu < 2,405$ , тоді режим роботи волокна одномодовий, якщо  $\nu > 2,405$  — багатомодовий.

Чим менше діаметр серцевини ОВ, тим менше мод може поширюватися по ньому й тим менше розширення одержують оптичні імпульси. Відповідно збільшується коефіцієнт широкосмуговості ОВ. Таким чином, одномодові ОВ можуть передавати більше широкосмугових сигналів, ніж багатомодові ОВ.

Загальне число мод у багатомодовому ОВ з діаметром серцевини  $2a$ , заданою числовою апертурою на робочій довжині хвилі  $\lambda$  визначається через нормовану частоту виразом виду



$$M \approx \begin{cases} \frac{v^2}{2} - \text{äëÿ } \hat{I} \hat{A} \zeta^3 \tilde{\text{ñ}}^3 \tilde{\text{ä}} - \tilde{\text{à}} \tilde{\text{ñ}} \tilde{\text{ò}} \tilde{\text{è}} \tilde{I} \tilde{I} \zeta \\ \frac{v^2}{4} - \text{äëÿ } \hat{I} \hat{A} \zeta \tilde{\text{ä}} \tilde{\text{ð}} \tilde{\text{à}} \tilde{\text{ä}}^3 \tilde{\text{ò}} \tilde{\text{è}} \tilde{I} \tilde{I} \zeta \end{cases} \quad (5.70)$$

У розрахунках  $M$  може виявитися дробовим числом, у той час як число мод у волокні буває тільки цілим. При цьому це число мод може становити від однієї до тисячі мод.

Звертає на себе увагу той факт, що у волокні із градієнтним ППЗ із тими ж значеннями діаметра серцевини, показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$  число мод приблизно в 2 рази менше, ніж в ОВ зі східчастим ППЗ.

Кількість мод (з обліком всіх вироджених мод), у випадку степеневого ППЗ (5.1), визначається виразом виду

$$M = \frac{v^2}{2(1 + \frac{2}{u})}, \quad (5.71)$$

де  $u$  — показник степеня, що описує зміни ППЗ.

Важливим інтегральним параметром одномодового ОВ є діаметр модового поля. Цей параметр використовується при аналізі одномодових волокон.

У багатомодових ОВ розмір серцевини прийнято оцінювати діаметром  $2a$ , в одномодових ОВ — за допомогою діаметра модового поля  $d_{\text{II}}$ . Це пов'язане з тим, що енергія основної моди в одномодових ОВ поширюється не тільки в серцевині, але й частково в оболонці, захоплюючи її прикордонну область.

Тому  $d_{\text{II}}$  більш точно оцінює розміри поперечного розподілу енергії основної моди. Величина  $d_{\text{II}}$  є важливою при стикуванні волокон між собою, а також при стикуванні джерела випромінювання з волокном.

На рис. 5.31 показана залежність розподілу інтенсивності (потужності) випромінювання основної моди одномодового волокна в ближній зоні від радіуса.



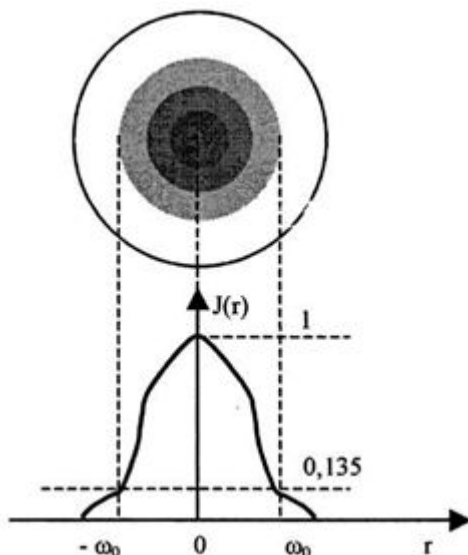


Рисунок 5.31 – Залежність розподілу інтенсивності випромінювання основної моди одномодового ОВ у ближній зоні від радіуса

Ця залежність апроксимується з достатнім ступенем точності формулою Гауса:

$$J(r) = J_0 \exp\left(-\frac{r}{W_0}\right)^2, \quad (5.72)$$

де  $J(r)$  — інтенсивність випромінювання на відстані  $r$  від вісі одномодового ОВ;  $J_0$  — інтенсивність випромінювання на вісі одномодового ОВ (при  $r=0$ );  $W_0$  — радіус модового поля, тобто значення радіуса, при якому інтенсивність випромінювання становить  $\frac{1}{e^2} = 0,135J_0$ .

Радіус поля моди  $W_0$  (мкм) визначається при відомих значеннях  $\nu$  і  $a = \frac{d_c}{2}$  з наступного співвідношення:

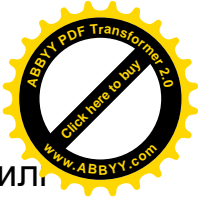
$$W_0 = a(0,65 + 1,619\nu^{-1,5} + 2,879\nu^{-6}), \quad (5.73)$$

або

$$W_0 = a(0,65 + 1,62\nu^{-3/2}).$$

Тоді шукане значення діаметра модового поля буде дорівнювати  $d_{\text{м}} = 2W_0$ .

Мінімальна довжина хвилі, при якій ОВ підтримує тільки одну моду, що поширюється, називається довжиною хвилі відсічення. Цей параметр характерний для одномодових ОВ. Якщо  $\lambda_p$  менше, ніж довжина хвилі відсічення, то має місце багатомодовий режим поширення світла.



Розрізняють довжину хвилі відсічення у волокні  $\lambda_c$  і довжину хвилі відсічення у прокладеному кабелі  $\lambda_{cc}$ . Перша —  $\lambda_c$  відповідає слабко напруженому волокну, і для східчастого одномодового ОВ вона визначається виразом виду

$$\lambda_c = 2\pi a \frac{NA}{2,405}. \quad (5.74)$$

Друга —  $\lambda_{cc}$  відповідає напруженому ОВ. На практиці ОВ у прокладеному або підвішеному на опорах кабелі має велику кількість вигинів. Крім того, сильні скривлення є в ОВ, покладених у касети муфт і проміжних з'єднувачів на об'єктах зв'язку (сплайс-боксах). Все це веде до придушення побічних мод і зрушенню  $\lambda_{cc}$  у бік коротких довжин хвиль у порівнянні з  $\lambda_c$ . Різниця між  $\lambda_{cc}$  і  $\lambda_c$  можна оцінити тільки експериментальним шляхом.

## 5.8 Параметри передачі оптичних волокон

До параметрів передачі ОВ відносяться: коефіцієнт загасання; дисперсія одномодових ОВ; ширина смуги пропускання багатомодових ОВ.

**Коефіцієнт загасання оптичного сигналу.** Загасання в оптичному волокні - це міра ослаблення оптичної потужності, розповсюдженої уздовж ОВ між двома його поперечними перерізами на даній довжині хвилі. Загасання в ОВ виражається в дБ. Коефіцієнт загасання ОВ - це величина загасання на одиниці довжини волокна, виражається в дБ/км. Коефіцієнт загасання ОВ обумовлюється власними втратами волокна й виражається у вигляді

$$\alpha = \alpha_{pp} + \alpha_{ii} + \alpha_{iz} + \alpha_{ia}, \quad (5.75)$$

де  $\alpha_{\partial\partial}, \alpha_{ii}, \alpha_{iz}, \alpha_{ia}$  - складові коефіцієнта загасання за рахунок розсіювання Релея, поглинання в матеріалі волокна, інфрачервоного поглинання й поглинання на домішках ОВ, відповідно.

Таким чином, коефіцієнт загасання в ОВ визначається двома факторами: розсіюванням енергії в навколишній простір  $\alpha_{\partial\partial}$  і втратами енергії в матеріалі волокна  $\alpha_{ii}$ . Загальні втрати енергії в матеріалі волокна залежать від поглинання світлової енергії, наявності сторонніх домішок, таких як гідроксильні групи ОН, іони металів (заліза, кобальту, нікелю, міді) і інших включень, а так само від прояву втрат на поглинання переданої потужності в інфрачервоній області спектра.

Загальні втрати на поглинання в ОВ визначаються формулою

$$\alpha_i = \alpha_{ii} + \alpha_{\text{sc}} + \alpha_a \tag{5.76}$$

Механізм основних втрат, що виникають при поширенні по ОВ електромагнітної енергії, ілюструється рис. 5.32.

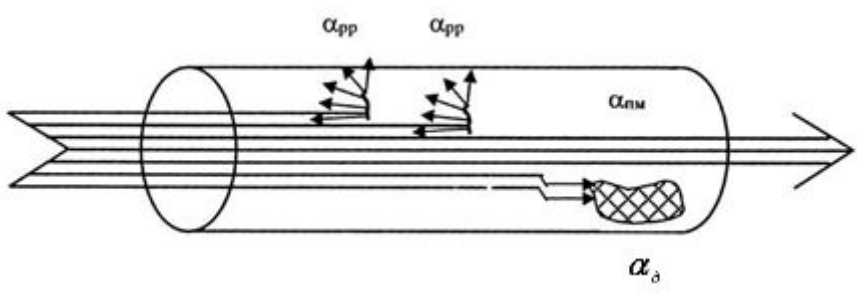


Рисунок 5.32 – Механізм основних втрат у світлопроводах:  $\alpha_{pp}$  — розсіювання на нерегулярностях;  $\alpha_a$  — поглинання через домішки;  $\alpha_{nm}$  — поглинання в матеріалі волокна

Частина потужності, що надходить на вхід світлопровода  $D_{\text{вх}}$ , розсіюється через зміну напрямку розповсюджуваних променів на нерегулярностях та їх висвічування в навколишній простір  $\alpha_{pp}$ , інша частина потужності поглинається матеріалом ОВ  $\alpha_{nm}$  у вигляді поляризації диполів ОВ, сторонніми домішками, що проявляється у вигляді джоулевого тепла  $\alpha_a$ . У результаті потужність на вході  $D_{\text{вх}}$  зменшується.

Втрати на поглинання істотно залежать від чистоти матеріалу й при наявності сторонніх домішок можуть бути значними. Втрати на розсіювання лімітує межа мінімально припустимих втрат в ОВ.

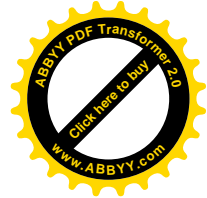
Розсіювання, з одного боку, обумовлено неоднорідностями матеріалу ОВ, розміри яких менше довжини хвилі, а з іншого боку - тепловими флуктуаціями показника заломлення. Розсіювання світла принципово є неусувним і вносить свій внесок у загасання ОВ навіть у тому випадку, коли втрати світла на поглинання дорівнюють нулю.

Складову коефіцієнта загасання ОВ  $\alpha_{\text{рр}}$  (дБ/км) за рахунок розсіювання Релея можна визначити за допомогою виразу

$$\alpha_{\text{рр}} = 4,34 \frac{8\pi^3 (n_1^2 - 1)}{3\lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T \cdot 10^3, \tag{5.77}$$

де  $n_1 = 1,48 - 1,50$  — ПЗ серцевини;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постійна Больцмана;  $T = 1500\text{K}$  — температура затвердіння скла при витяжці;  $\beta = 8,1 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н (для кварцу) — коефіцієнт стискання.

Складову  $\alpha_{nm}$  (дБ/км), пов'язану із втратами на діелектричну поляризацію можна визначити з виразу



$$\alpha_{ii} = 8,69 \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \operatorname{tg} \delta, \quad (5.78)$$

де  $n_1$  — ПЗ серцевини ОВ;  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс кута діелектричних втрат серцевини ОВ.

Складову  $\alpha_{\pm}$  (дБ/км), обумовлену електронним і атомним резонансами в інфрачервоній частині спектра за рахунок коливання атомів у кристалічній решітці, можна визначити з виразу

$$\alpha_{\pm} = C e^{-k/\lambda}, \quad (5.79)$$

де  $C$  і  $k$  — постійні коефіцієнти, які дорівнюють, наприклад, для кварцу  $k = (0,7 \dots 0,9) \cdot 10^{-6} \lambda$ ,  $C = 0,9$ .

На рис. 5.33 представлені типові залежності основних складових втрат від довжини хвилі. Як видно із графіка, розсіювання Релея  $\alpha_{pp}$  обмежує нижню границю втрат у лівій частині, а інфрачервоне поглинання  $\alpha_{\pm}$  — у правій частині спектра хвиль.

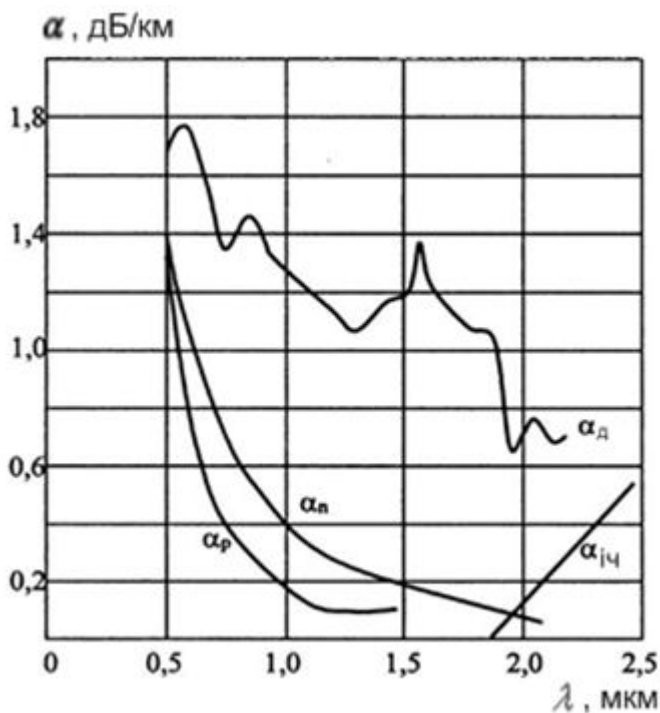
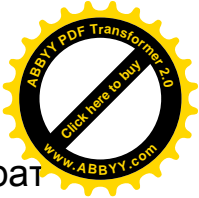
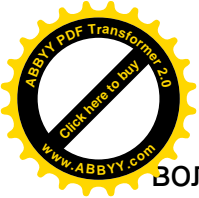


Рисунок 5.33 – Складові втрат енергії

У теперішній час в електронній техніці в основному застосовуються кварцеві ОВ, область ефективного використання яких перебуває в діапазоні довжин хвиль до 2 мкм. При подальшому збільшенні довжини хвилі через значні величини  $\alpha_{\pm}$  в ОВ проводиться заміна кварцу на інші матеріали.

На більш довгих хвилях як матеріал для волокна використовують галогідне, халькогенідне й фтористе скло. У порівнянні із кварцовими



волокнами вони мають більшу прозорість і забезпечують зниження втрат на кілька порядків. З появою ОВ з нових матеріалів стає реальним створення волоконно-оптичних систем без регенераторів. Відомі проекти будівництва підводної оптичної лінії через Атлантичний океан довжиною 6000 км без регенераторів, у яких аналізується можливість застосування ОВ з тетрафторида, цирконія й фторуида бериллія.

При практичних розрахунках  $\alpha$  зручно застосовувати наближені формули, тому що теоретичні розрахунки втрат на релееве розсіювання й поглинання являють собою складне завдання й точність таких розрахунків мала, наприклад:

$$\alpha_{pp} \approx (6,3 \cdot 10^{11} / \lambda^4) \cdot (1 + 215\Delta), \quad (5.80)$$

де  $\alpha_{pp}$  - складова коефіцієнта загасання ОВ за рахунок релеевих втрат, дБ/км;  $\lambda$  - довжина хвилі оптичного випромінювання, уведеного в ОВ, нм.

При розрахунку  $\alpha_{pp}$  в одномодових ОВ другий доданок відкидається

$$\alpha_{ii} = 2,55 \cdot 10^{-3} \exp[4,63 \cdot 10^3 / \lambda], \quad (5.81)$$

де  $\alpha_{ii}$  - складова  $\alpha$  за рахунок матеріальних втрат ОВ, дБ/км.

Нарешті

$$\alpha_{\pm} \approx 7,81 \cdot 10^{11} \exp[-4,85 \cdot 10^4 / \lambda], \quad (5.82)$$

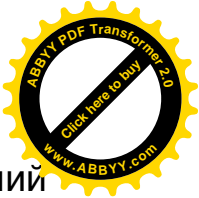
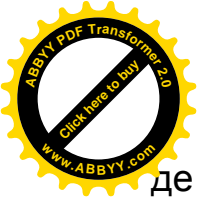
де  $\alpha_{\pm}$  — складова  $\alpha$  ОВ за рахунок втрат в інфрачервоній області, дБ/км.

Із втрат на домішках у реальних ОВ, що випускають відповідно до вимог ITU-T G.651, G.652, найбільш значні втрати на гідроксильному залишку води - ОН, значення яких дорівнюють:

$$\alpha_{OH} = \begin{cases} 0,1 \frac{\ddot{a}A}{\dot{e}i} & \text{ї } \delta \dot{e} \lambda = 850 \dot{i} \dot{i} ; \\ 0,05 \frac{\ddot{a}A}{\dot{e}i} & \text{ї } \delta \dot{e} \lambda = 1300 \dot{i} \dot{i} ; \\ 0,03 \frac{\ddot{a}A}{\dot{e}i} & \text{ї } \delta \dot{e} \lambda = 1550 \dot{i} \dot{i} . \end{cases} \quad (5.83)$$

При раціональному виборі матеріалу для ОВ і робочої довжини хвилі  $\lambda$  сумарне оцінке значення коефіцієнта загасання ОВ, виражене релеевими втратами й загальними втратами за рахунок поглинання, може бути визначене виразом

$$\alpha = \alpha_{pp} + \alpha_{ii} = 4,34 \frac{8\pi^3 (n_1^2 - 1)}{3\lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T(1 + k_n) \cdot 10^3, \quad (5.84)$$



де  $\alpha$  - коефіцієнт загасання ОВ, дБ/км;  $k_n$  — експериментальний поправочний коефіцієнт, що враховує втрати на поглинання,  $k_n = (0,1 \dots 0,25)$ .

**Дисперсія оптичного сигналу.** Дисперсія - це розсіювання в часі спектральних або модових складових оптичного сигналу, що приводить до збільшення тривалості імпульсу оптичного випромінювання при поширенні його по ОВ (рис. 5.34) і визначається різницею квадратів тривалостей імпульсів на виході й вході ОВ:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{в\ddot{e}o}}^2 - \tau_{\text{в\ddot{o}}}^2}, \tag{5.85}$$

де значення  $\tau_{\text{в\ddot{e}o}}$  и  $\tau_{\text{в\ddot{o}}}$  визначаються на рівні половини амплітуди імпульсів. Дисперсія не тільки обмежує частотний діапазон ОВ, але й суттєво знижує дальність передачі сигналів, тому що чим довше лінія, тим більше збільшення тривалості імпульсів.

Дисперсія в загальному випадку визначається трьома основними факторами: відмінністю швидкостей поширення мод, що направляють, направляючими властивостями ОВ й параметрами матеріалу, з якого ОВ виготовлено. У зв'язку з цим основними причинами виникнення дисперсії є, з одного боку, велика кількість мод в ОВ (міжмодова дисперсія), а з іншого боку - некогерентність джерел випромінювання, що реально працюють у спектрі довжин хвиль  $\Delta\lambda$  (хроматична дисперсія).

**Міжмодова (модова) дисперсія** переважає в багатомодових ОВ. Вона обумовлена наявністю великої кількості мод, час поширення яких різний. Для ОВ зі східчастим ППЗ швидкість поширення електромагнітних хвиль із довжиною хвилі  $\lambda$ , однакова й дорівнює

$$v = \frac{c}{n_1}, \tag{5.86}$$

де  $\tilde{n}$  — швидкість світла, км/с.

У цьому випадку всі промені, що падають на торець ОВ під кутами до його вісі в межах апертурного кута  $\theta_a$ , рухаються в серцевині волокна по своїх зигзагоподібних лініях і при однаковій швидкості поширення досягають прийомного кінця в різний час, що природно приводить до збільшення тривалості прийнятого імпульсу (рис. 5.34).

Міжмодова дисперсія градієнтних ОВ, як правило, на порядок і більше нижча, ніж у східчастих волокон. Це обумовлено тим, що за рахунок зменшення показника заломлення від вісі ОВ до оболонки швидкість поширення променів уздовж їх траєкторій змінюється. Так, на траєкторіях, близьких до вісі, швидкість менше, а на віддалених, природно, — більше. Отже, промені, що поширюються найкоротшими



траєкторіями (ближче до вісі), мають меншу швидкість, а промені, що поширюються по більш протяжних траєкторіях, мають більшу швидкість. У результаті час поширення променів вирівнюється й збільшення тривалості імпульсу стає менше.

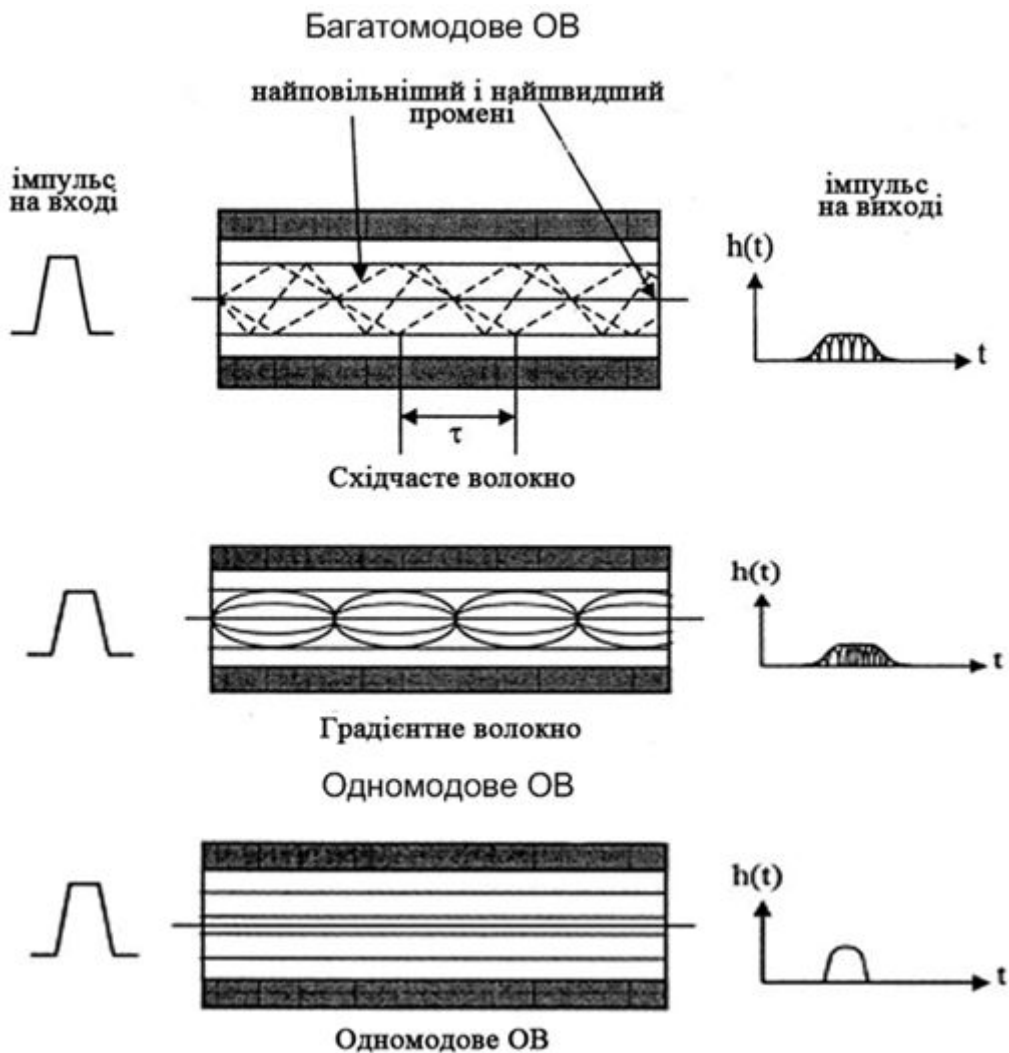
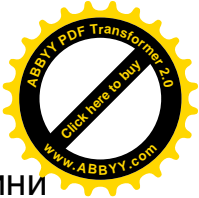
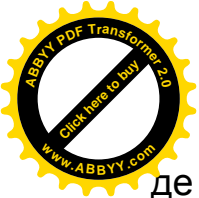


Рисунок 5.34 – Поширення випромінювання по східчастому й градієнтному багатомодовому й одномодовому ОВ

Розширення імпульсу через модову дисперсію, характеризується часом наростання сигналу й визначається як різниця між найбільшим і найменшим часом приходу променів у перетин світлопровода на відстані  $l$  від початку.

Відповідно до геометричної оптики час поширення променя в східчастому багатомодовому ОВ залежить від кута падіння  $\theta_n$  і визначається виразом

$$t = L \cdot n_1 / c \cdot \cos \theta_n, \quad (5.87)$$



де  $L$  - довжина світлопровода, км;  $n_1$  — показник заломлення серцевини ОВ.

Так як мінімальний час поширення оптичного променя має місце при  $\theta_n = 0$ , а максимальний – при  $\theta_n = \theta_{\text{эд}}$ , тому

$$t_{i'i} = L \cdot n_1 / c \quad \text{і} \quad t_{i\text{эд}i} = L \cdot n_1 / c \cdot \cos\theta_{\text{эд}}, \quad (5.88)$$

звідки значення міжмодової дисперсії дорівнює

$$\tau_{ii} = t_{i\text{эд}i} - t_{i'i} = \frac{L}{c} n_1 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{n_1 \Delta}{c} L, \quad (5.89)$$

де  $\tau_{ii}$  — міжмодова дисперсія, пс.

З останнього виразу виходить, що міжмодова дисперсія зростає зі збільшенням довжини волокна. Однак це справедливо тільки для ідеального волокна, у якому взаємодія між модами відсутня. У реальних умовах наявність неоднорідностей, крутіння й вигин волокна приводять до постійних переходів енергії з одних мод в інші – до взаємодії мод, у зв'язку із чим дисперсія стає пропорційною  $\sqrt{L}$ . Цей вплив проявляється не відразу, а після певної відстані проходження світлової хвилі, що зветься довжиною сталого зв'язку мод. Ця довжина приймається рівною 5...7 км для східчастого волокна й 10...15 км – для градієнтного. Вона встановлена емпіричним шляхом.

У градієнтних багатомодових ОВ час поширення оптичних променів, як було показано вище, визначається законом зміни ПЗ і за певних умов вирівнюється, що, природно, вабить зменшення дисперсії. Так, при параболічному профілі ПЗ, коли показник степеня  $u$  у виразі (5.1) приймає значення 2, величина  $\tau_{i\text{эд}i}$  буде визначатися формулою

$$\tau_{i\text{эд}i} = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L. \quad (5.90)$$

Найменший розкид групових затримок із всіх ППЗ, описуваних (5.1), виходить при показнику степеня  $u = u_{i\text{эд}}$ , тобто при  $u_{i\text{эд}} = 2(1 - \Delta)$ . При цьому  $\tau_{i\text{эд}i}$  досягає мінімального значення (рис. 5.35), рівного

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} L. \quad (5.91)$$

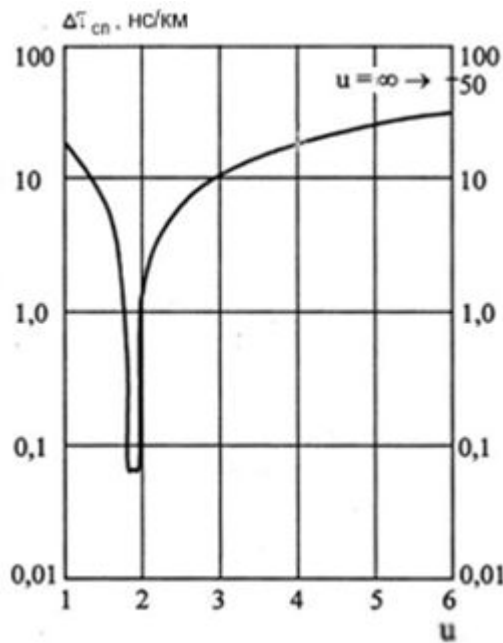


Рисунок 5.35 – Залежність модової дисперсії  $\Delta\tau_{ii}$  від степеня у східчастих градієнтних ОВ

Згідно з цим рисунком  $\tau_{ii}$  може бути представлене у вигляді

$$\Delta\tau_{cn} \cdot L = \tau_{ii} . \quad (5.92)$$

Вид кривої на рис. 5.35 свідчить про те, що для мінімізації дисперсії необхідно ретельно керувати значенням  $u$ , що на практиці виявляється нелегкою справою. А всяка зміна профілю, що наближається до параболічного, істотно зменшує модову дисперсію в такому градієнтному ОВ.

При аналізі виразів (5.89) і (5.90) стає очевидним, що міжмодова дисперсія градієнтного ОВ в  $\Delta/2$  разів менша, ніж у східчастого ОВ при однакових значеннях  $\Delta$ . А тому що звичайно  $\Delta \approx 1\%$ , то міжмодові дисперсії зазначених ОВ можуть відрізнятися на два порядки.

При визначенні модової дисперсії варто мати на увазі, що до певної довжини лінії  $L_c$  немає міжмодового зв'язку, а потім при  $L > L_c$  відбувається процес взаємного перетворення мод і наступає сталий режим. Тому, як видно з рис. 5.36, спочатку, при  $L < L_c$ , дисперсія збільшується за лінійним законом, а потім, при  $L > L_c$ , — за квадратичним законом.

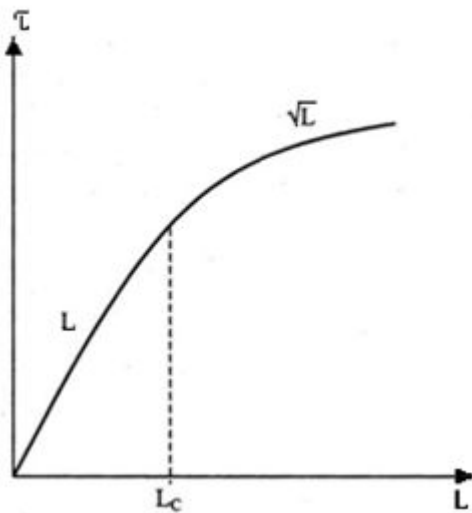


Рисунок 5.36 – Довжина взаємодії мод

Отже, вище наведені формули розрахунку модової дисперсії справедливі лише для довжин ліній  $L < L_c$ . При довжинах ліній  $L > L_c$  варто користуватися наступними формулами:

$$\tau_{iia} = \frac{\Delta n_1}{c} \sqrt{LL_c} - \text{äëÿ } \tilde{n} \tilde{\omega}^3 \tilde{a} - \tilde{a} \tilde{n} \tilde{\omega} \tilde{i} \tilde{a} \tilde{a}; \tag{5.93}$$

$$\tau_{iia} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} \sqrt{LL_c} - \text{äëÿ } \tilde{a} \tilde{\omega} \tilde{a}^3 \tilde{\omega} \tilde{i} \tilde{a} \tilde{a} \tilde{a} \tilde{a},$$

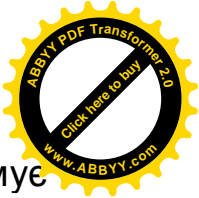
де  $L$  - довжина лінії, км;  $L_c$  - довжина зв'язку мод (сталого режиму), км.

У табл. 5.4 наведені дисперсійні властивості різних типів ОВ, що випускають за рекомендаціями ITU-T G.651 і G.652. З табл. 5.4 видно, що в східчастих світлопроводах при багатомодовій передачі домінує модова дисперсія і вона досягає великих значень (20...50 нс/км).

Таблиця 5.4 - Дисперсійні властивості різних ОВ

Вид дисперсії	Причина дисперсії	Багатомодові ОВ		Одномодові ОВ $\Delta F = 1 \div 10$ ГГц
		східчасте $\Delta F = 10 \div 100$ МГц	градієнтне $\Delta F = 100 \div 1000$ МГц	
<b>Хвильова</b>	Коефіцієнт поширення залежить від частоти	Мале значення дисперсії	Мале значення дисперсії	<b>Взаємна компенсація</b>
<b>Матеріальна</b>	Показник заломлення залежить від частоти	(2 - 5) нс/км	(0,1 - 0,3) нс/км	
<b>Міжмодова</b>	Різні моди приходять до кінця лінії в різний час	(20 - 50) нс/км	(1-4) нс/км	<b>Відсутня</b>

Модова дисперсія може бути зменшена трьома способами:



1. Використання ОВ з меншим діаметром сердцевини, що підтримує меншу кількість мод. Наприклад, сердцевина діаметром 100 мкм підтримує менше число мод, ніж сердцевина 200 мкм.

2. Використання волокна зі згладженим ППЗ, щоб світлові промені, що пройшли по більш довгих траєкторіях, рухалися зі швидкістю, що перевищує середню, і досягали протилежного кінця волокна в той же момент часу, що й промені, що рухаються по коротких траєкторіях.

3. Використання одномодового волокна, що дозволяє уникнути модової дисперсії.

В одномодових східчастих світлопроводах відсутня модова дисперсія й дисперсія в цілому позначається істотно менше. Тут проявляються хвильова й матеріальна дисперсії й при довжині хвилі порядку 1,3 мкм відбувається їхня взаємна компенсація ( $\tau_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \approx \tau_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ ).

**Хвильова (внутрішньомодова) дисперсія** обумовлена процесами всередині моди. Вона характеризується напрямними властивостями сердцевини ОВ, а саме: залежністю групової швидкості моди від довжини хвилі оптичного випромінювання, що призводить до розходження швидкостей поширення частотних складових випромінюваного спектра. Тому внутрішньомодова дисперсія в першу чергу визначається ППЗ ОВ і пропорційна ширині спектра випромінювання джерела  $\Delta\lambda$ , тобто

$$\tau_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda), \quad (5.94)$$

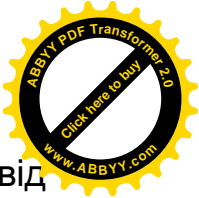
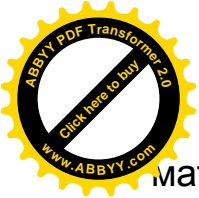
де  $B(\lambda)$  - питома внутрішньомодова дисперсія.

При відсутності значень  $B(\lambda)$  оцінка  $\lambda_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  може виконуватися за виразом

$$\tau_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2n_1^2 \Delta L}{c}, \quad (5.95)$$

де  $\Delta\lambda$  — ширина спектральної лінії джерела випромінювання, рівна 1...3 нм для лазера й 20...40 нм для світловипромінюючого діода;  $L$  - довжина лінії, км.

**Матеріальна дисперсія** в ОВ обумовлена залежністю ПЗ від довжини хвилі  $n \equiv \psi_2(\lambda)$ . У реальному ОВ поширення хвиль є дисперсійним, тобто швидкість поширення залежить від частоти (довжини хвилі). Різні довжини хвиль (кольори) також рухаються з різними швидкостями по волокну, навіть в одній і тій же моді. Раніше ми бачили, що ПЗ дорівнює  $n = \frac{c}{v}$ . Оскільки кожна довжина хвилі рухається з різною швидкістю, то величина швидкості  $v$  у цьому рівнянні змінюється для кожної довжини хвилі. Таким чином, ПЗ змінюється залежно від довжини хвилі. Дисперсія, пов'язана із цим явищем, називається



матеріальною (молекулярною) дисперсією, оскільки залежить від фізичних властивостей речовини волокна. Рівень дисперсії залежить від двох факторів:

1. Діапазону довжин хвиль світла, інjektуємого у волокно. Як правило, джерело не може випромінювати одну довжину хвилі; воно випромінює декілька довжин хвиль.

2. Центральної робочої довжини хвилі джерела. В області 850 нм більш довгі хвилі (більш червоні) рухаються швидше в порівнянні з більш короткими (більш блакитними) довжинами хвиль. Хвилі довжиною 860 нм рухаються швидше по скляному волокну, чим хвилі довжиною 850 нм. В області 1550 нм ситуація міняється: більш короткі хвилі рухаються швидше в порівнянні з більш довгими; хвиля 1560 нм рухається повільніше, ніж хвиля 1540 нм. У деякій точці спектра відбувається збіг, при цьому більш блакитні й більш червоні довжини хвиль рухаються з однією й тією же швидкістю. Цей збіг швидкостей відбувається в області 1300 нм, яку називають довжиною хвилі з нульовою дисперсією (рис. 5.37). Довжина стрілок відповідає швидкості довжин хвиль; отже, більше довга стрілка відповідає більш швидкому руху.

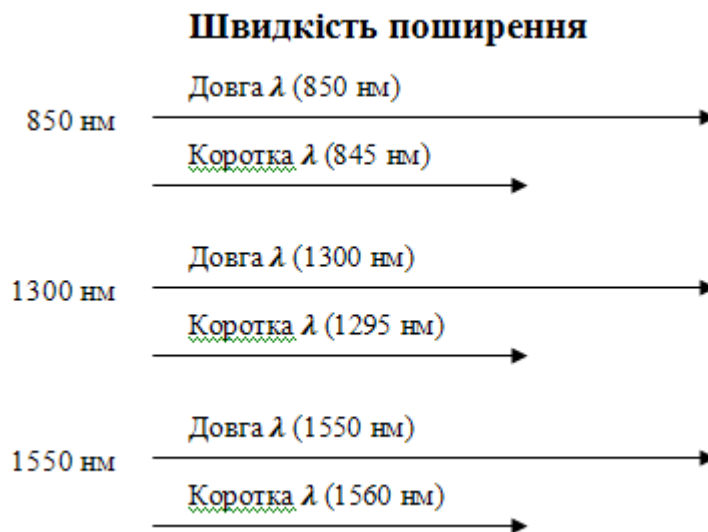


Рисунок 5.37 – Швидкості поширення довжин хвиль

Рис. 5.38 показує типову картину питомої хвильової  $B(\lambda)$  і матеріальної  $M(\lambda)$  дисперсій речовини одномодового ОВ.



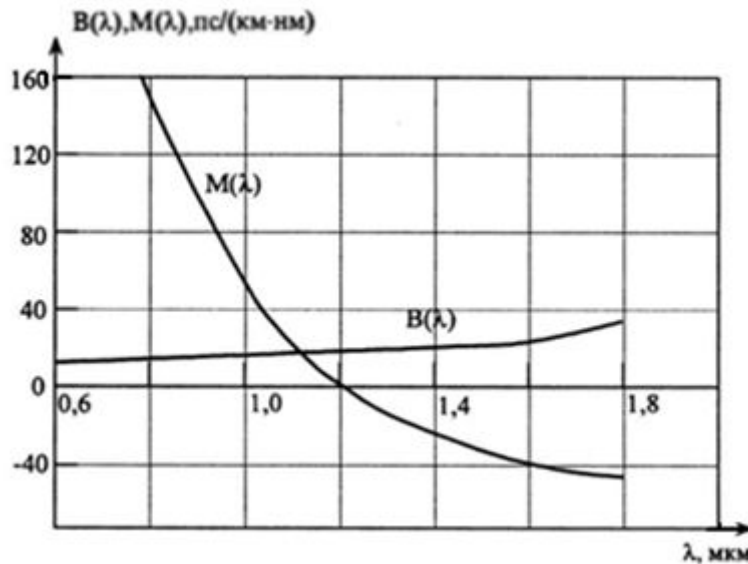


Рисунок 5.38 – Питоме значення дисперсії при різних довжинах хвиль:  $B(\lambda)$  - хвильова;  $M(\lambda)$  - матеріальна

На довжині хвилі 1300 нм  $M(\lambda)$  дорівнює нулю. В області довжин хвиль вище 1300 нм вона негативна - хвилі відстають і прибувають пізніше. В області менш 1300 нм хвилі випереджають і прибувають раніше.

Як і хвильову дисперсію, матеріальну дисперсію можна визначити через питому дисперсію за виразом

$$\tau_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) \quad (5.96)$$

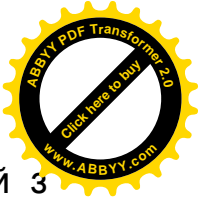
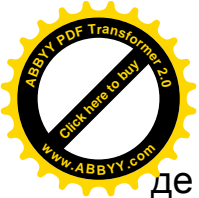
Величина  $M(\lambda)$  визначається експериментальним шляхом. При різних сполуках легуючих домішок в ОВ  $M(\lambda)$  має різні значення залежно від  $\lambda$ . Тому для визначення  $\tau_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}}$  можна використати вираз

$$\tau_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{\tilde{n}} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} L \quad (5.97)$$

Для визначення  $\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$  можна скористатися формулою Селмейєра для ПЗ кварцового скла з використанням методу кінцевих різностей.

**Поляризаційна модова дисперсія**  $\tau_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}}$  виникає внаслідок різної швидкості поширення двох взаємно перпендикулярних поляризацій основної моди ОВ. Для оцінки цього виду дисперсії використовується вираз

$$\tau_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}} = K_{i \dot{\alpha} \ddot{\alpha}} \sqrt{L} \quad (5.98)$$



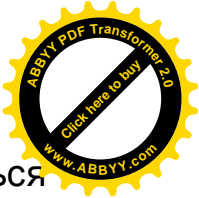
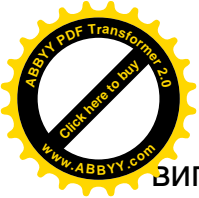
де  $K_{i\bar{i}a}$  – коефіцієнт питомої поляризаційної дисперсії, нормований з розрахунку на 1 км і який має розмірність  $\frac{i\bar{n}}{\sqrt{\epsilon i}}$ .

По визначенню поляризаційна модова дисперсія проявляється винятково в одномодових ОВ з нециркулярною (еліптичною) серцевиною і за певних умов стає порівняною із хроматичною дисперсією. Ці умови проявляються тоді, коли використовується передача широкосмугового сигналу (швидкість передачі 2,4 Гбіт/с і вище) з дуже вузькою спектральною смугою випромінювання 0,1 нм і менше. В одномодових ОВ поширюється не єдина мода, а дві фундаментальні моди - дві взаємно перпендикулярні поляризації вхідного сигналу. В ідеальному, тобто однорідному по геометрії, волокні дві моди поширюються з однаковою швидкістю. Проте реальні ОВ мають не ідеальні геометричні розміри, що приводить до різних швидкостей поширення цих двох мод з різними станами поляризації і, як наслідок, до появи поляризаційної модової дисперсії.

ОВ в оптичному кабелі піддається впливу як механічних, так і кліматичних навантажень. Напруження в ОВ, що виникають в процесі виробництва ОВ та оптичних кабелів, призводить до залишкових напружень в його серцевині та оболонці і в подальшому викликає явища подвійного променезаломлення, які важко передбачити.

Крім того, механічні навантаження на ОВ в скрученому оптичному кабелі створюють несиметричні напруження, що зростають при його намотуванні та дії різноманітних зовнішніх навантажень. Усі ці механічні впливи призводять до локальних, випадково розподілених, деформацій ОВ, що порушують геометрію ОВ або співвісність серцевини та оболонки. Поляризаційна модова дисперсія - це основний механізм, через який дефекти ОВ впливають на характеристики системи передавання. У будь якій точці ОВ імпульс поляризованого оптичного випромінювання можна розкласти на поляризовані складові з двома ортогональними площинами поляризації, направленими вздовж двох локально ортогональних осей ОВ, так званих, швидкої та повільної осей. На практиці в укладеному в кабель ОВ напрямком цих осей та відносна різниця швидкостей розповсюдження по кожній вісі (що безпосередньо залежить від величини локального двохвилезаломлення) змінюються вздовж оптичного шляху.

Для ідеалізованої моделі явище поляризаційної модової дисперсії можна подати так: різні ділянки ОВ мають постійні, але різні на кожній ділянці напрями осей двохвилезаломлення (локальні зміни орієнтації головних осей двохвилезаломлення ОВ відомі як явище зв'язку мод). На кожній ділянці ОВ виникає часова затримка між складовими оптичного сигналу, розкладеними по швидкій та повільній осях. Через те, що напрямком осей двохвилезаломлення сусідніх ділянок ОВ змінюється



випадковим чином, форма й границі оптичного імпульсу піддаються часовому розсіюванню.

Ступінь модового двохвилезаломлення  $D$  визначається як:

$$D = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{K_0} = (n_x - n_y), \quad (5.99)$$

де  $\beta_x$  та  $\beta_y$  - постійна розповсюдження в напрямках  $x$  та  $y$ ;  $n_x$  та  $n_y$  - ефективні показники заломлення мод по двох ортогональних площинах поляризації. Періодичний обмін потужностями між двома модами відбувається при відповідному періоді  $L_B$  та певному  $D$ :

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{D}, \quad (5.100)$$

де  $L_B$  - називається довжиною биття. Вісь вздовж кожного ефективного показника заломлення моди менша. Її називають швидкою віссю, тому, що для світла поляризованого в цьому напрямі, групова швидкість більша. З тієї ж причини вісь з більшим модовим показником заломлення називають повільною віссю.

Оскільки, окремі фактори, що викликають поляризаційну модову дисперсію, неможливо виділити та змінити, то явище поляризаційної модової дисперсії слід розглядати як безперервний і нестационарний випадковий процес. Цей процес призводить до розширення інформаційних оптичних імпульсів, що викликає погіршення якості сигналу при його прийомі.

Таким чином, поляризаційна модова дисперсія є суттєвим фактором, що обмежує швидкість передавання по ОВ. Тому результуюча поляризаційна дисперсія одномодового волокна повинна визначатися відповідно до виразу

$$\tau = \sqrt{(\tau_{AA} + \tau_{i \dot{a} \dot{o}})^2 + \tau_{ri \ddot{a}}^2}. \quad (5.101)$$

Вплив поляризаційної модової дисперсії на якість сигналу в лінії зв'язку збільшується при:

- зростанні швидкості передачі;
- зростанні кількості ділянок лінії (рівносильне зростанню довжини оптичного каналу);
- зростанні кількості частотних каналів (при великому числі каналів зростає вірогідність чималого відхилення диференційної групової затримки від середнього значення одного каналу).

Критерії оцінки питомого коефіцієнту поляризаційної модової дисперсії, що забезпечують необхідний рівень бітових помилок приймача, згідно рекомендацій ІТУ-Т, подано у таблиці 5.5.



Таблиця 5.5 - Значення поляризаційної модової дисперсії для заданої швидкості передачі

Швидкість передачі $v$ , Гбіт/с	Загальна затримка $\tau$ , пс	Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії для ОВ довжиною 400 км, пс/км <sup>1/2</sup>
2,5	40	2
10	10	0,5
20	5	0,25
40	2,5	0,125

**Повна дисперсія.** Різні види дисперсії проявляються по-різному в різних типах ОВ. Як відзначалося раніше, розрізняють три види дисперсії: модову, хроматичну й поляризаційну. У свою чергу, хроматична дисперсія складається з хвильової і матеріальної дисперсій.

У багатомодовому ОВ хвильова дисперсія мала по величині, тому при визначенні повної дисперсії нею зневажають. У таких ОВ зі східчастим ППЗ  $\tau_{iia}$  домінує над  $\tau_{i\dot{a}\dot{o}}$ , а з градієнтним ППЗ визначальною стає матеріальна дисперсія. Останнє пов'язане з тим, що  $\tau_{iia}$  у градієнтних ОВ зменшується за рахунок вирівнювання часу поширення різних мод. Виходячи із цього в загальному виді повна дисперсія в ОВ може бути представлена виразом

$$\tau = \sqrt{\tau_{iia}^2 + \tau_{i\dot{a}\dot{o}}^2} \quad (5.102)$$

В одномодовому ОВ модова дисперсія відсутня, тому що по таких волокнах поширюється тільки одна мода  $HE_{11}$  або, як відзначалося раніше, дві моди у двох різних станах поляризації, але з однією дисперсійною залежністю фазового коефіцієнта  $\beta(\lambda)$  (у наближенні лінійно-поляризованих мод –  $LP_{01}$  мода у двох взаємно ортогональних поляризаціях). Інакше кажучи, розширення імпульсів в одномодових ОВ визначається хроматичною дисперсією в межах цієї моди. Тоді повна дисперсія в одномодових ОВ може бути представлена в загальному виді виразом

$$\tau = \sqrt{(\tau_{\dot{a}\dot{o}} + \tau_{i\dot{a}\dot{o}})^2} \quad (5.103)$$

У цілому, порівнюючи дисперсійні характеристики різних волокон, можна відзначити, що найкращими показниками володіють одномодові ОВ, а найбільш сильно дисперсія проявляється в багатомодових ОВ зі східчастим ППЗ.



### 5.9 Нелінійні ефекти

Нелінійність ОВ не є дефектом виробництва або конструкції ОВ. Це невід’ємна властивість матеріального середовища при розповсюдженні в ньому будь-якої електромагнітної енергії.

Більшість нелінійних ефектів в ОВ виникає через нелінійне заломлення (залежність показника заломлення від інтенсивності) як результат чутливості  $x^{(3)}$ , тобто показник заломлення світловода стає рівним:

$$\bar{n}(\omega, |\bar{E}|^2) = n(\omega) + n_2 |\bar{E}|^2, \tag{5.104}$$

де  $n(\omega)$  - характеристика нелінійності, що описується рівнянням

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j}{\omega_j^2 - \omega^2}; \tag{5.105}$$

$|\bar{E}|^2$  - інтенсивність поля всередині ОВ;  $n_2$  - нелінійний ПЗ, пов’язаний з  $x^{(3)}$  співвідношенням:

$$n_2 = \frac{3}{8n} x^{(3)}. \tag{5.106}$$

Залежність показника заломлення від інтенсивності призводить до великої кількості нелінійних ефектів (тут не розглядаються). Вплив нелінійності виявляється після проходження сигналом деякого шляху по ОВ в залежності від параметрів, конструкції ОВ та умов його роботи (рис.5.39).

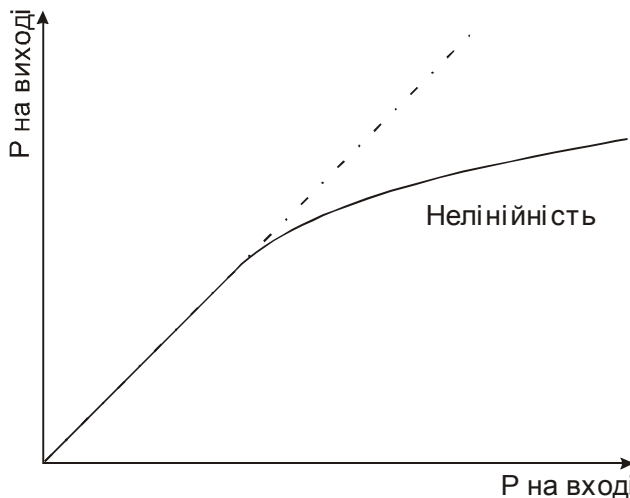
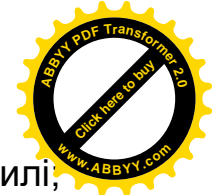
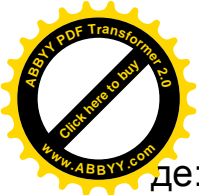


Рисунок 5.39 - Нелінійність в ОВ, що проявляється при високому рівні потужності  $P$

Напруженість електричного поля  $\bar{E}$ , після проходження деякого шляху по ОВ, можна описати наступним співвідношенням:

$$E(z + dz) = E(z) \exp \left[ -\frac{\alpha}{2} + i\beta + \frac{\gamma P(z, t)}{2} dz \right], \tag{5.107}$$



де:  $\alpha$  - загасання в ОВ;  $\beta$  - фаза розповсюдження хвилі,  
 $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_2}{A_s}$  - коефіцієнт нелінійності;  $A_s$  - ефективна площа серцевини ОВ.

При гаусовому розповсюдженні оптичного випромінювання по ОВ, ефективну площу можна виразити через діаметр модового поля  $d_{МП}$ :  $A_s = \pi(d_{МП})^2$ . Для ОВ зі зміщеною дисперсією та з ненульовою зміщеною дисперсією  $A_s = 50-60$  мкм<sup>2</sup>, тоді, як для ОВ із зміщеною дисперсією вона становить близько 80 мкм<sup>2</sup>. Іноді використовують поняття ефективної довжини ОВ  $L_{ЕФ}$  ( $\gamma \sim 1/L_{ЕФ}$ ), яка дає такий самий ефект, що й величина  $A_s$ . Для типового одномодового ОВ  $L_{ЕФ} \approx 20$  км. В залежності від характеру поведінки нелінійного коефіцієнта  $\gamma$  усі нелінійні явища можна розподілити на дві категорії:

- явища розсіювання (дійсна частина коефіцієнта  $\gamma$  дає підсилювання або загасання);
- явища заломлення (уявна частина коефіцієнта  $\gamma$  призводить до фазової модуляції).

При явищах розсіювання світло джерела розсіюється на звукових хвилях (акустичних фононах) або на молекулярних коливаннях ОВ (оптичні фонони) та зміщується в область більш довгих хвиль. Розрізняють два ефекти розсіювання:

- вимушене зворотне розсіювання Брілюена-Мандельштама (на акустичних фононах);
- вимушене романівське або комбінаційне розсіювання (на оптичних фононах).

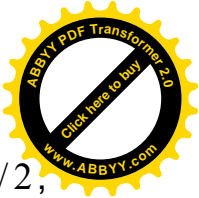
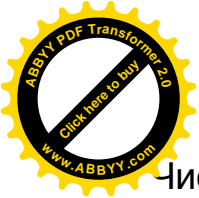
В явищах, що залежать від ПЗ, при високому рівні потужності сигналу необхідно враховувати нелінійність ПЗ  $n = n_0 + n_2 I$ , де  $n_0$  - ПЗ ОВ,  $n_2$  - коефіцієнт нелінійності ПЗ ОВ (для кварцового ОВ  $n_2 = (2...3) \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт);  $I$  - інтенсивність оптичного сигналу.

До явищ, що залежать від ПЗ, відносяться:

- фазова саомодуляція або вплив сигналу на власну фазу (самонаведене набігання фази);
- перехресна фазова модуляція або вплив сигналу одного каналу на фазу сигналу іншого каналу;
- чотирьоххвильове зміщення або зміщення деякого числа хвиль з виникненням випромінювання на нових довжинах хвиль.

Чотирьоххвильове зміщення є одним з найбільш шкідливих нелінійних оптичних явищ в сучасних ВОЛЗ. При досягненні критичних рівнів потужності випромінювання джерела світла нелінійність ОВ призводить до взаємодії трьох хвиль з частотами  $\omega_i, \omega_j, \omega_k$  та появи нової четвертої хвилі на частоті  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ . Деякі частоти таких хибних сигналів можуть співпадати з робочими смугами пропускання каналів.





Число таких хибних сигналів визначається співвідношенням  $N^2(N-1)/2$ , де  $N$  - число каналів, що передають сигнал. Таким чином, наприклад, в чотирьохканальній системі з WDM модуляцією виникає 24 хибних сигнали, а в шістнадцятиканальній - уже 1420. Така завада може стати катастрофічною для приймального пристрою на кінці лінії.

Чотирьоххвильове зміщення призводить до появи небажаних сигналів у спектральному діапазоні сигналу передачі. Чотирьоххвильове зміщення чутливе до:

- зростання потужності сигналу;
- зменшення частотного інтервалу між каналами;
- зростання числа каналів.

Дію чотирьоххвильового зміщення треба враховувати в системах, що використовують ОВ зі зміщеною дисперсією. Вона менш критична в ОВ з ненульовою зміщеною дисперсією, особливо в ОВ з великою ефективною площиною. Зростання швидкості передачі в каналі трохи впливає на чотирьоххвильове зміщення.

Вплив чотирьоххвильового зміщення зменшується при зростанні ефективної площі серцевини ОВ та абсолютного значення хроматичної дисперсії.

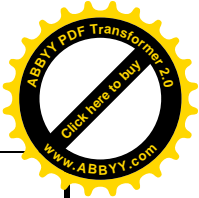
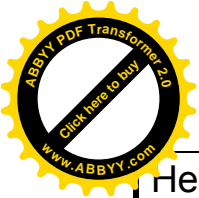
## 5.10 Основні типи оптичних волокон

Перші оптичні волокна, що використовувались для потреб зв'язку, були багатомодові і розроблялись для роботи на довжинах хвиль 850 та 1300 нм. Слід зазначити, що перше вікно прозорості ( $\lambda=850$  нм) було визначене не стільки оптичними властивостями ОВ, скільки характеристиками перших стабільних напівпровідникових джерел випромінювання. Нині багатомодові ОВ використовуються головним чином на місцевих мережах зв'язку на базі систем передавання плезіохронної цифрової ієрархії з робочою довжиною хвилі  $\lambda=1300$  нм. Останнім часом багатомодові ОВ застосовуються на абонентських та розподільних лініях мереж доступу.

На даний час для потреб зв'язку застосовуються два типи стандартизованих багатомодових ОВ 50/125 мкм (ITU-T Rec. G.651 та IEC 60793-2) та 62,5/125 мкм (IEC 60793-2). Характеристики багатомодових ОВ надано у табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Характеристики багатомодових ОВ

Характеристика	ОВ 50/125	ОВ 62,5/125
Діаметр серцевини, мкм	50±3	62,5±3
Діаметр оболонки, мкм	125±3	125±3
Некруглість оболонки, менше, %	2	2
Діаметр ОВ по захисному покриттю, мкм	245±15	245±15



Некруглість покриття, менше, %	2	2
Некруглість серцевини, менше, %	6	6
Неконцентричність між серцевиною і оболонкою, менше, %	6	6
Числова апертура	(від 0,18 до 0,24) $\pm 0,02$	(від 0,255 до 0,295) $\pm 0,03$
Коефіцієнт загасання, менше, дБ/км, на довжині хвилі: $\lambda = 850$ нм $\lambda = 1300$ нм	4	4,5
	2	2,5
Коефіцієнт широкосмуговості, не менше, МГц·км, на довжині хвилі: $\lambda = 850$ нм $\lambda = 1300$ нм	200	150
	200	300

Одномодові ОВ розроблялись одночасно з багатомодовими, але з часом стали основними типами ОВ, які використовуються для потреб зв'язку. Першим типом одномодових ОВ були ОВ із східчастим ППЗ і серцевиною, легованою германієм. Такі одномодові ОВ досі називають стандартними. Їх характеристики регламентовані ІТУ-Т Rec. G.652 та ІЕС 60793-2. Ці ОВ широко застосовуються як найбільш масові типи ОВ. Останнім часом їх фактичне загасання було знижене до рівня 0,18–0,19 дБ/км. Єдиний їх недолік – досить велика хроматична дисперсія на довжині хвилі  $\lambda = 1310$  нм (17–20 пс/нм·км).

Ліквідувати цей недолік мали одномодові ОВ із зміщенням дисперсії (відповідають ІТУ-Т Rec. G.653 та ІЕС 60793-2). Ці ОВ застосовуються в системах зв'язку на базі синхронної цифрової ієрархії рівня STM-16 і вище, причому, головним чином, в США, Канаді, Мексиці та Японії. В Європі ці ОВ майже не застосовувались через відсутність потреби в лініях великої довжини та відносну дорожнечу.

Спеціально для морських ВОЛЗ були розроблені кварцові ОВ, в яких серцевина виготовлена з чистого кварцу, а відбиваюча оболонка легована фтором (присадкою, що зменшує ПЗ). Такі ОВ відповідають ІТУ-Т Rec. G.654 та ІЕС 60793-2. Вони ідентичні стандартним одномодовим ОВ, але завдяки тому, що серцевина зроблена з чистого кварцу, ОВ мають втрати на рівні 0,16–0,17 дБ/км.

Спеціально для систем із спектральним ущільненням (WDM та DWDM) були розроблені одномодові ОВ із зміщеною ненульовою дисперсією. Характеристики цих ОВ регламентовані в ІТУ-Т Rec. G.655. ОВ розраховані для роботи в широкому діапазоні довжин хвиль. Щоб забезпечити нульове або досить мале значення дисперсії конкретний тип ОВ вибирають залежно від необхідного діапазону довжин хвиль. Крім того, в межах обраного робочого діапазону дисперсія має бути одного знаку і не менше 2–4 пс/нм·км.

Характеристики одномодових ОВ показано на рис. 5.40 та у табл. 5.7.

5.7.

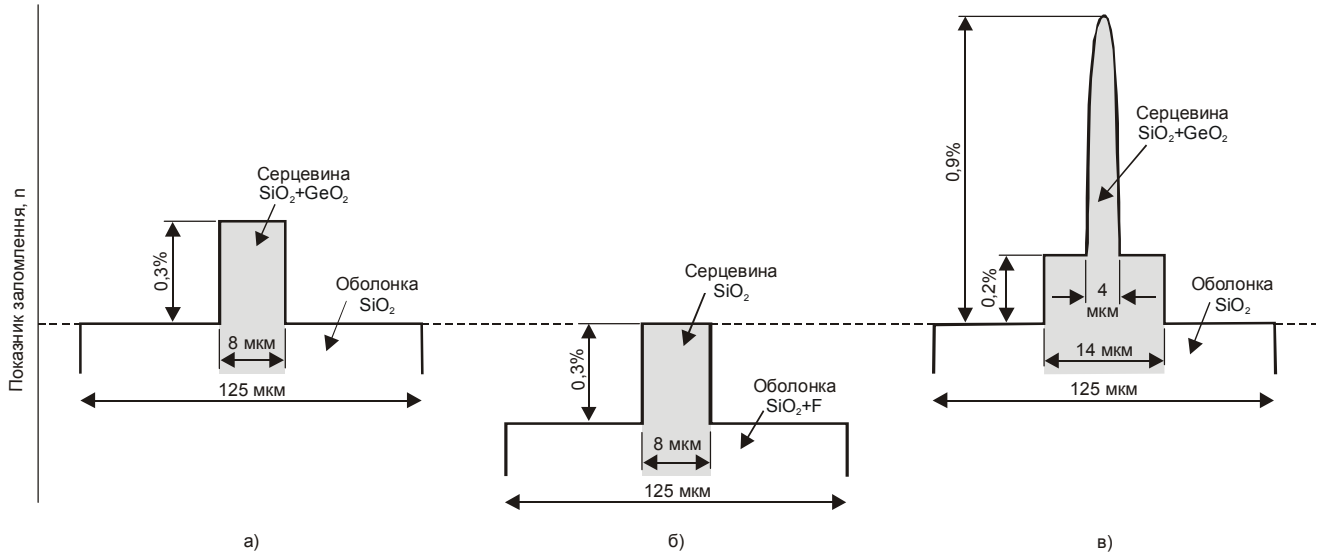
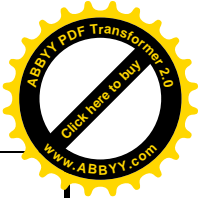
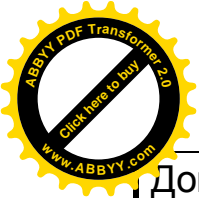


Рисунок 5.40 – Основні типи одномодових ОВ: стандартне (а), із змщеною довжиною хвилі відсічення (б) та із змщеною дисперсією (в)

Таблиця 5.7 – Характеристики одномодових ОВ

Характеристика	Одномодове ОВ	Одномодове ОВ із змщеною дисперсією	Одномодове ОВ із змщеною довжиною хвилі відсічки	Одномодове ОВ із змщеною ненульовою дисперсією
Діаметр оболонки, мкм	125±1	125±1	125±1	125±1
Некруглість оболонки, менше, %	2	2	2	2
Діаметр ОВ по захисному покриттю, мкм	250±5	250±5	250±5	250±5
Некруглість покриття, менше, %	2	2	2	2
Коефіцієнт загасання, менше, дБ/км, на довжині хвилі: $\lambda = 1310$ нм $\lambda = 1550$ нм	0,5 0,4	- 0,3	- 0,22	- 0,35
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, $D$ , не більше, пс/(нм·км), на довжині хвилі: $\lambda = 1550$ нм $\lambda = 1530-1565$ нм	20 -	3,5 -	20 -	- $0,1 \leq  D  \leq 6,0$



Довжина хвилі нульової дисперсії, $\lambda_0$ , нм	$1300 \leq \lambda_0 \leq 1324$	$1500 \leq \lambda_0 \leq 1600$	Не нормується	Не нормується
Крутизна нульової дисперсії, не більше, пс/(нм <sup>2</sup> ·км)	0,093	0,085	0,070	Не нормується
Діаметр модового поля, мкм	(від 8,6 до 9,7) $\pm 0,7$ на $\lambda = 1310$ нм	(від 7,8 до 8,5) $\pm 0,8$ на $\lambda = 1550$ нм	(від 9,5 до 10,5) $\pm 0,7$ на $\lambda = 1550$ нм	(від 8 до 11) $\pm 0,7$ на $\lambda = 1550$ нм
Довжина хвилі відсічення для ОВ в ОК, не більше, нм	1260	1270	1530	1480
Поляризаційна модова дисперсія для ОВ в ОК, не більше, пс/км <sup>1/2</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5

Не дивлячись на те, що останніми роками розроблені одномодові та багатомодові ОВ із значно покращеними характеристиками (Додаток А), ця робота активно продовжується.

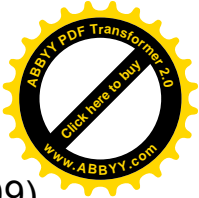
### 5.11 Розрахунок довжини регенераційної ділянки волоконно-оптичної лінії зв'язку

У міру розповсюдження оптичного імпульсу в оптичному волокні відбувається його ослаблення (загасання) та збільшення його тривалості через дисперсію. Будь яка з цих причин може обмежити дальність передачі. Основний параметр ВОЛЗ - довжина регенераційної (для цифрових систем) або підсилювальної (для аналогових систем) ділянки, тобто максимальна відстань між передавальним та приймальним обладнанням, при якій забезпечується задана якість передачі інформаційного сигналу (коефіцієнт помилок, відношення сигнал/шум). Значення цих параметрів залежить як від характеристик апаратури (енергетичного потенціалу), так і від параметрів оптичного кабелю (коефіцієнт загасання, дисперсія).

Енергетичний потенціал (бюджет)  $P$  апаратури ВОЛЗ дорівнює різниці рівнів потужності оптичного сигналу в точці передачі  $P_H$  (дБм) та прийому  $P_o$  (дБм), при якому забезпечується задана якість передачі інформації:

$$P = P_H - P_o, \text{ дБ.} \tag{5.108}$$

Довжина регенераційної (підсилювальної) ділянки, обмеженої загасанням, дорівнює:



$$L_{P1MAX} = \frac{P - \alpha_3 - \alpha_{ДВ} - N\alpha_{BB} - \alpha_{ВП}}{\alpha}, \quad (5.109)$$

$$L_{P1MIN} = \frac{P - \Pi - \alpha_3 - \alpha_{ДВ} - N\alpha_{BB} - \alpha_{ВП}}{\alpha}, \quad (5.110)$$

де:  $L_{P1MAX}$ ,  $L_{P1MIN}$  - відповідно максимальна і мінімальна довжина регенераційної ділянки, км;  $\alpha_3$  - експлуатаційний запас, дБ ( $\approx 6$  дБ);  $\alpha_{ДВ}$  - втрати в з'єднаннях джерело-ОВ, дБ,  $\alpha_{BB}$  - втрати в з'єднаннях ОВ-ОВ, дБ;  $N$  - кількість з'єднань ОВ-ОВ;  $\alpha_{ВП}$  - втрати в з'єднаннях ОВ-приймач, дБ;  $\alpha$  - коефіцієнт загасання оптичного кабелю на робочій довжині хвилі, дБ/км;  $\Pi$  - діапазон автоматичного регулювання підсилення (АРП) приймального обладнання, дБ.

Мінімальна дальність передачі обумовлена перевантаженням (насиченням) приймального оптичного модуля (ПРОМ).

Якщо на ділянці регенерації усі будівельні довжини ОК (довжини, з якими випускаються кабелі) однакові, тобто  $L_{B1} = L_{B2} = \dots = L_{BN} = L_B$ ,

$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N = \alpha$ , то для  $N = \frac{L_1}{L_B} - 1$  вирази (5.109, 5.110) приймуть

вигляд:

$$L_{P1MAX} = \frac{P - \alpha_3 - \alpha_{ДВ} - \alpha_{BB} - \alpha_{ВП}}{\alpha + \frac{\alpha_{BB}}{L_B}}, \quad (5.111)$$

$$L_{P1MIN} = \frac{P - \Pi - \alpha_3 - \alpha_{ДВ} - \alpha_{BB} - \alpha_{ВП}}{\alpha + \frac{\alpha_{BB}}{L_B}}, \quad (5.112)$$

де:  $L_B$  - будівельна довжина ОК, км. Значення параметрів  $\alpha_{ДВ}$ ,  $\alpha_{BB}$ ,  $\alpha_{ВП}$  залежать від способу з'єднання: зварювання, механічне з'єднання.

Збільшити довжину регенераційної ділянки  $L_{P1}$  можна двома шляхами: вибором апаратури з більшим енергетичним потенціалом; застосуванням ОК з меншим значенням загасання.

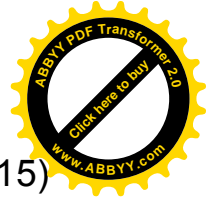
Тривалість фронту імпульсу  $\tau_p$  після проходження регенераційної ділянки (на виході приймального обладнання) дорівнює

$$\tau_p = \sqrt{\tau_D^2 + \tau_B^2 + \tau_{II}^2}, \quad (5.113)$$

де  $\tau_D$  - збільшення тривалості фронту (зрізу) імпульсу в передавальному оптичному модулі (ПОМ);  $\tau_B$  - збільшення тривалості фронту імпульсу в ОВ;  $\tau_{II}$  - збільшення тривалості фронту імпульсу в ПРОМ. Тривалість фронту імпульсу на кінці регенераційної ділянки не повинна перевищувати припустимого значення (заданого швидкістю та типом лінійного сигналу) для БВН (NRZ) сигналу

$$\tau_p \cdot \tau_{прим} = 0,70 \cdot T, \quad (5.114)$$

та для ВН (RZ) сигналу



$$\tau_p \cdot \tau_{npun} = 0,35 \cdot T, \quad (5.115)$$

де  $T = \frac{1}{B_{лин}}$ , с – тривалість одиночного імпульсу, при швидкості передачі символів в лінії  $B_{лин}$ , біт/с. Якщо умови (5.114, 5.115) не виконуються, то виникає перекриття імпульсів, тобто міжсимвольна інтерференція, і як наслідок, зростання кількості помилок при регенерації.

Тривалість фронту оптичного імпульсу на виході ПОМ залежить від швидкодії джерела випромінювання та ширини смуги підсилювача каналу. При проведенні розрахунків замість  $\tau_d$  може бути прийнята величина, обернена максимальній частоті модуляції, значення якої, зазвичай, приводиться у паспорті на джерело випромінювання. При умові гаусової форми імпульсу  $\tau_d \approx \frac{440}{F_{max}}$ , нс, де  $F_{max}$  - максимальна частота модуляції, МГц.

При розповсюдженні світлового імпульса по ОВ довжиною  $L_{ОВ}$  збільшується тривалість фронту імпульсу

$$\tau_{\hat{A}} = \tau \cdot L_{\hat{A}}, \quad (5.116)$$

де  $\tau = \sqrt{\tau_{mm}^2 + (\tau_{mat}^2 + \tau_{x6}^2)}$  - сумарна дисперсія сигналів в ОВ, с/км;  $\tau_{mm}$  - міжмодова дисперсія, с/км;  $\tau_{mat}$  - матеріальна дисперсія, с/км;  $\tau_{x6}$  - хвилева дисперсія, с/км.

Збільшення тривалості фронту імпульсу в ПРОМ, тобто тривалість, що вноситься приймальним пристроєм  $\tau_d \approx \frac{350}{F_{0,5}}$ , нс, де  $F_{0,5}$  - ширина смуги пропускання ПРОМ на рівні 0,5, МГц.

Для конкретної комбінації ВОЛЗ апаратура – кабель існує критична (максимально допустима) швидкість передачі  $B_{кр}$ , біт/с, символів у лінії

$$B_{кр} = \frac{\alpha}{4\tau W}, \quad (5.117)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт загасання ОВ, дБ/км;  $W = P - \alpha_{дв} - \alpha_{вп}$ , дБ. При швидкості передавання, більшій за критичну ( $B > B_{кр}$ ), дальність передавання обмежена дисперсійними спотвореннями і максимальна довжина регенераційної ділянки становить, км:

$$L_{P2} = \frac{1}{4\tau B}. \quad (5.118)$$

Інакше ( $B \leq B_{кр}$ ) дальність передавання обмежена загасанням та максимальною і мінімальною довжинами регенераційної ділянки і визначається за формулами (5.111, 5.112). Для збільшення  $L_{P2}$  необхідно застосовувати передавальне та приймальне обладнання ВОЛЗ з кращою швидкодією, а ОВ – з мінімальною дисперсією (одномодові ОВ).



Все сказане вище справедливе як для цифрових, так і для аналогових ВОЛЗ при заміні терміну "довжина регенераційної ділянки" на "довжина підсилювальної ділянки".

### 5.12 Механічні характеристики оптичних волокон

На відміну від металу, який внаслідок дії на нього розтягуючого зусилля спочатку значно подовжується і лише після цього рветься, скло фактично руйнується одразу після досягнення розривного зусилля. Незначне подовження і різкий розрив називають крихкістю. Поведінку металу та скла при дії на них розтягуючого зусилля зображено на графіку залежності подовження цих матеріалів від прикладеного зусилля (рис. 5.41).

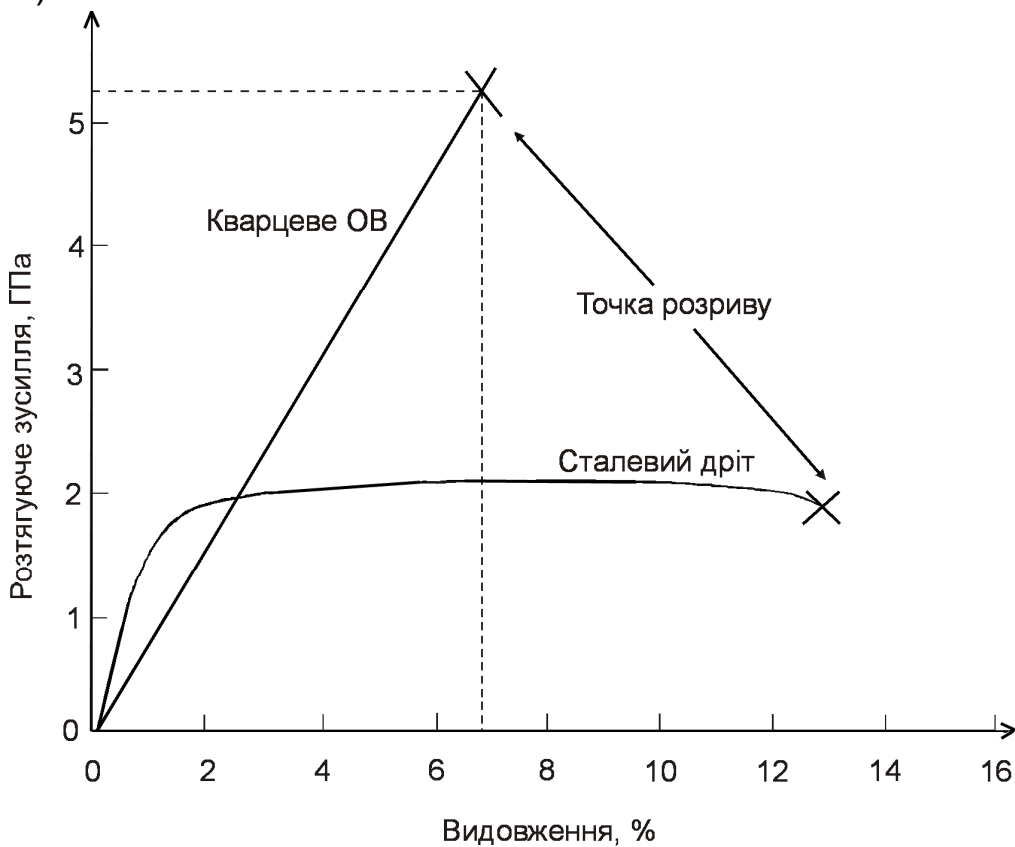
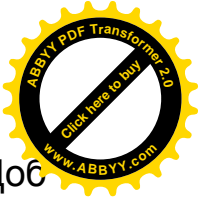
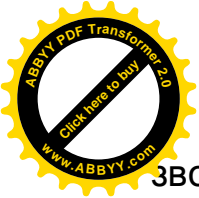


Рисунок 5.41 – Деформація сталевий дріт та ОВ залежно від ступеню розтягу (модуль Юнга: для скла –  $72900 \text{ Н/мм}^2$ , для сталі –  $150000 \text{ Н/мм}^2$ )

З графіка видно, що сталевий дріт пружно подовжується до 1%, після чого починає "текти", постійно деформуючись, і, нарешті, розривається при подовженні приблизно на 13%. На відміну від сталевий дріт кварцеве ОВ рветься приблизно при подовженні на 7%.

Хоча зусилля, при якому руйнується ОВ, складає 5,2 ГПа (рис. 5.41), для ОВ великих довжин мінімальне розривне зусилля змінюється в межах від 0,3 до 1,4 ГПа. Причиною цьому є мікроскопічні тріщини, що можуть знаходитись на поверхні ОВ. Сучасна технологія витягування ОВ



зводить до мінімуму можливість появи мікротріщин на поверхні ОВ. Щоб запобігти руйнуванню ОВ в процесі виробництва кабелів, транспортування, прокладання та технічної експлуатації усі ОВ обов'язково піддають пруф-тесту (перемотуванню під розтягуючим навантаженням 0,34 ГПа). Нажаль, таке випробування дозволяє виявити лише суттєві мікротріщини та інші дефекти щойно виготовленого ОВ. Мікротріщини мають тенденцію до зростання під впливом залишкових напруг (статичної втоми) в ОВ. Статична втома може виникати в ОВ під впливом вологи, високої температури, лужності або аміаку. Навіть якщо ОВ не буде піддаватись дії розтягуючого зусилля, а буде постійно знаходитись в активному довікллі, воно буде з часом виходить з ладу через статичну втому. Таким чином статистична втома обмежує термін служби ОВ.

Для ОВ, що пройшов пруф-тест, мінімальний строк служби  $T_f$  (діб) можна розрахувати за формулою:

$$\log[T_f] = -0,931 - 0,21n - \log(n - 1) + (n - 2)\log|\sigma_p| - n \cdot \log|\sigma_a|, \quad (5.119)$$

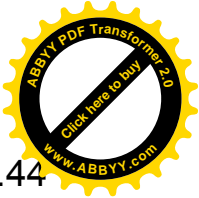
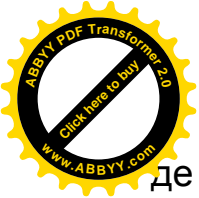
де  $\sigma_p$  – зусилля при пруф-тесті в ГПа;  $\sigma_a$  – зусилля прикладене до ОВ протягом усього терміну служби в ГПа;  $n$  – коефіцієнт втомної міцності, величина якого залежить від особливості матеріалів серцевини та оболонки, прикладеного зусилля, температури та вологості. Деякі значення коефіцієнта втомної міцності залежно від умов довіклля подані у таблиці 5.8. Розрахунковий мінімальний термін служби ОВ, що пройшов пруф-тест з зусиллям 0,34 ГПа приведено на рис. 5.42.

Таблиця 5.8 – Коефіцієнт втомної міцності

Температура, °C	Відносна вологість, %	Коефіцієнт втомної міцності, $n$
23	45	20
23	97	14
42	Занурення у воду	7

Іншим фактором, що впливає на статичну втому, а отже й на строк служби, є наявність вигинів ОВ (рис. 5.43). При вигині одна (зовнішня) частина ОВ піддається розтягуючому зусиллю, а інша (внутрішня) – стискаючому зусиллю. Стискаюче зусилля не впливає на строк служби ОВ, але розтягуючі зусилля впливають, причому зовнішня поверхня ОВ сильніше піддається дії розтягуючого зусилля. Для ОВ діаметром 125 мкм розтягуюче зусилля  $\sigma_a$  на поверхні ОВ можна визначити за формулою:

$$\sigma_a = \frac{26,75}{R}, \quad (5.120)$$



де  $R$  – радіус вигину  $OB$  в дюймах (1 дюйм = 25,4 мм). На рис. 5.44 показано розподіл максимального розтягуючого зусилля на поверхні  $OB$  при різних діаметрах вигину.

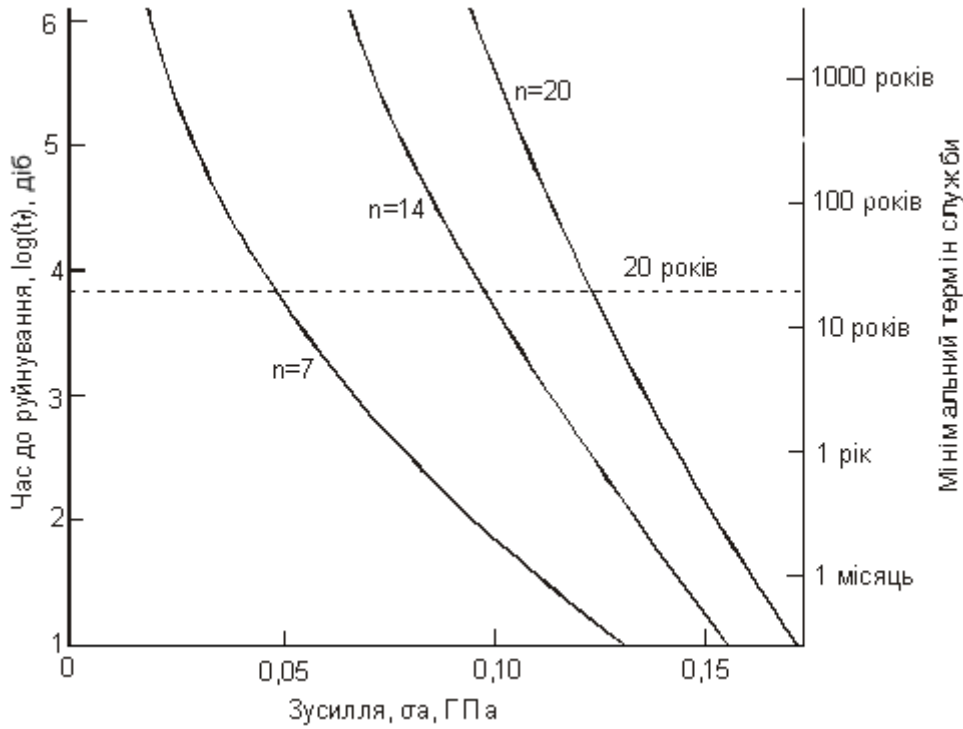


Рисунок 5.42 – Розрахунковий мінімальний термін служби  $OB$  при різних значеннях застосованого зусилля

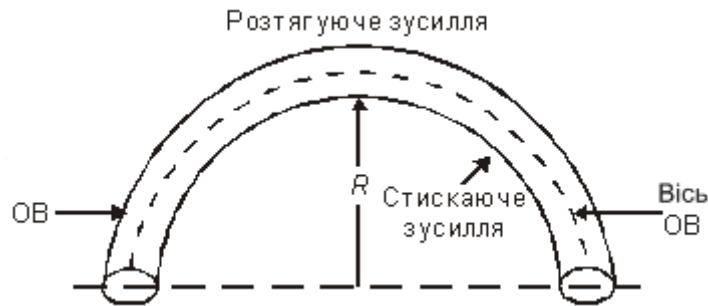


Рисунок 5.43 – Вигин  $OB$

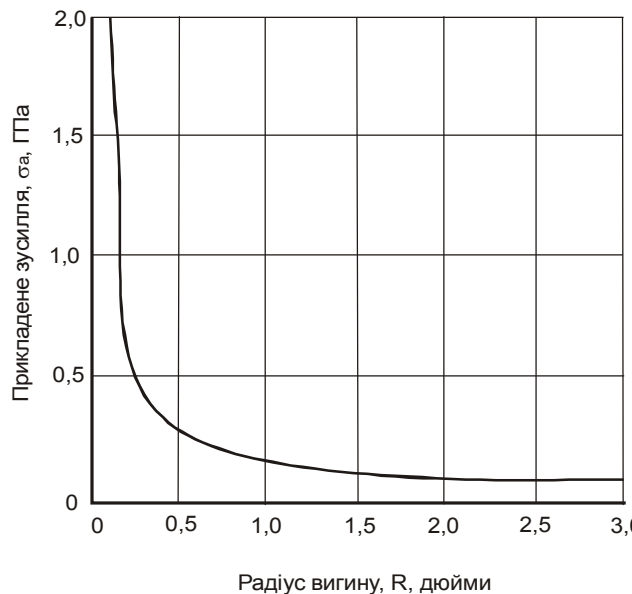




Рисунок 5.44 - Максимальне розтягуюче зусилля на поверхні ОВ діаметром 125 мкм при різних діаметрах вигину ОВ

Підсумовуючи результати розрахунків за графіками (рис.5.42– 5.44) можна побудувати графік залежності мінімального терміну служби ОВ від радіусу вигину (рис. 5.45).

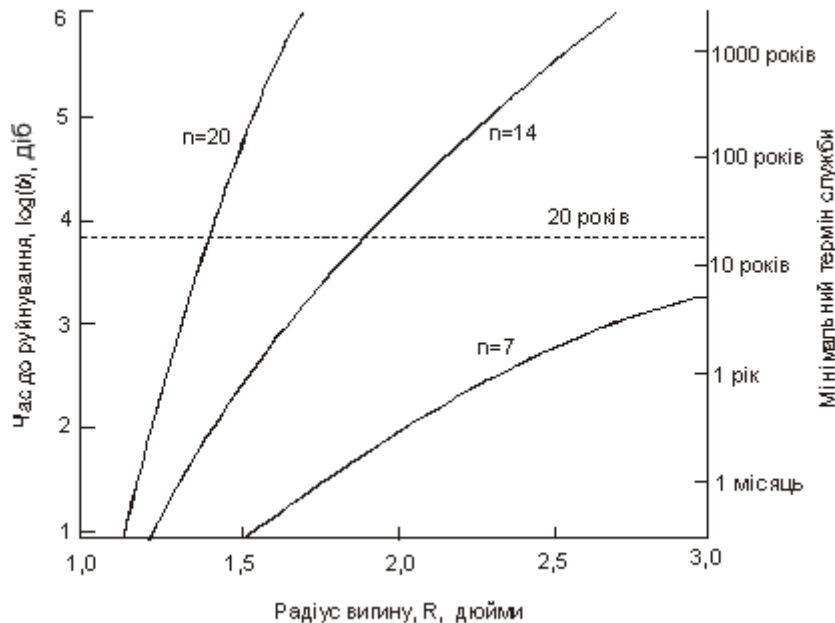


Рисунок 5.45 – Розрахунковий мінімальний термін служби ОВ при наявності вигину

Слід зазначити, що руйнівне зусилля для коротких відрізків ОВ значно перевищує руйнівне зусилля для довгих відрізків і може досягати рівня від 4,5 до 5,8 ГПа.

## 6 З'ЄДНАННЯ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

Однією з операцій, що, в певній мірі, обумовлює якість зв'язку по ОК, при будівництві міжміських та місцевих волоконно-оптичних ліній зв'язку є монтаж ОК. Створення окремих будівельних довжин лінійного ОК виконується за допомогою нероз'ємних з'єднань ОВ: зварювання, склеювання та механічних з'єднувачів. Цей же тип з'єднань, як правило, використовується й для з'єднання лінійного та станційних ОК. Захист місць з'єднань ОК виконується за допомогою захисних муфт, а також пристроїв стику станційного та лінійного кабелів.

В цьому розділі узагальнюється досвід монтажу ОК і аналізуються методи, конструкції та технічні характеристики обладнання для з'єднання ОВ.



## 6.1 Класифікація методів з'єднань ОВ

За конструкцією оптичне волокно – це два циліндра, які знаходяться один в одному. Внутрішній циліндр – це ядро, а зовнішній – це оболонка. Світловий імпульс завжди знаходиться в ядрі і на межі двох середовищ відбивається в середину внутрішнього циліндра.

Для захисту ОВ на зовнішню оболонку наносять невеликий шар лаку 2-3 мкм, а потім покривають захисним буфером, що додає ОВ еластичність та гнучкість (рис. 6.1).

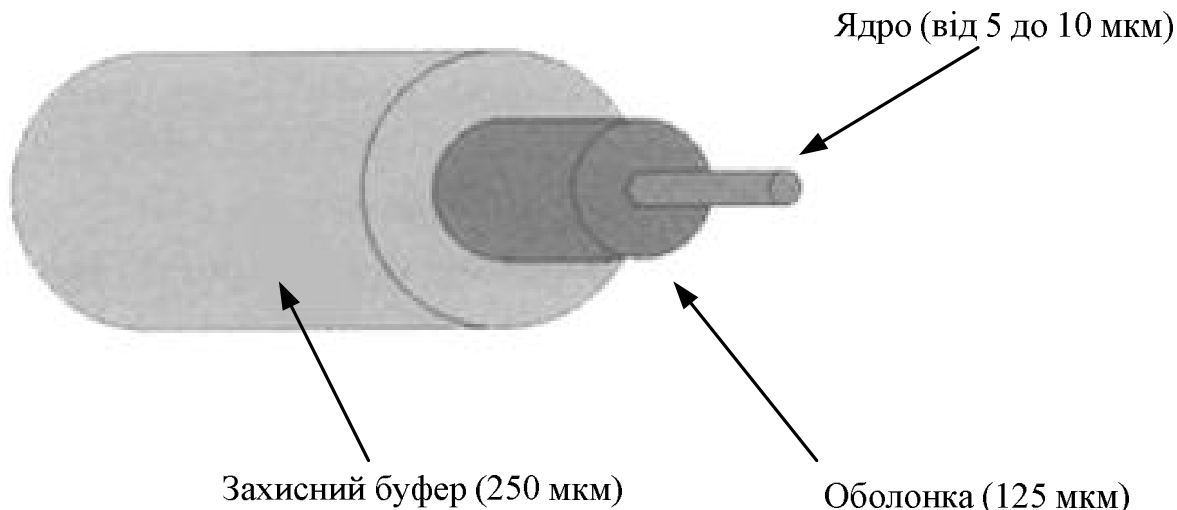


Рисунок 6.1 – Будова оптичного волокна

З'єднання ОВ можуть бути нероз'ємні та роз'ємні (рис. 6.2).



Рисунок 6.2 – Методи з'єднань ОВ



В даний час відомі наступні методи з'єднань ОВ: зварювання, склеювання, за допомогою фіксаторів, та роз'ємні. Вибір методу з'єднання ОВ визначається за типом ОВ (одномодові чи багатомодові), методами прокладання (підвісні чи підземні), та економічними факторами (вартість матеріалів, що використовуються при з'єднанні, необхідного обладнання та інструментів, рівень професійної підготовки персоналу, витрати на прокладку та монтаж).

При виборі метода з'єднання слід враховувати: стабільність загасання в місці з'єднання, механічну міцність з'єднання, стабільність роботи в умовах навколишнього середовища.

Загалом процес з'єднання ОВ складається з чотирьох етапів:

1. Підготування ОВ до з'єднання.
2. Юстирування ОВ.
3. З'єднання ОВ.
4. Захист місця з'єднання.

## 6.2 Технологія підготування ОВ до з'єднання

Підготування ОВ до з'єднання є операцією, що багато в чому визначає якість процесу з'єднання. Виконують два послідовних етапи:

1. Видалення захисної оболонки ОВ.
2. Сколювання торцевої поверхні.

Перший етап може виконуватись як механічними так і хімічними засобами. Після видалення захисної оболонки переходять до другого етапу – сколюванню торцевої поверхні ОВ. Воно виконується для утворення гладкої перпендикулярної до вісі поверхні торця ОВ. Це як правило досягається шляхом застосування спеціального сколюючого інструменту або поліровки торця ОВ у спеціальному фіксаторі. Для забезпечення якісного з'єднання треба, щоб відхил поверхні торця від перпендикуляра до вісі ОВ не перевищував 1%.

Другий етап – процес сколювання пояснюється рис. 6.3. Звільнене від захисної оболонки ОВ 2 обережно притискається до поверхні спеціальної оправки 3 і при слабкому натяжінні на ньому, перпендикулярно до вісі, спеціальним різцем 1, твердість якого в декілька разів повинна перевищувати твердість матеріалу ОВ (кварцового скла), наносять подряпину. Оправка вигинається, ОВ натягується на випуклій поверхні і під дією напруг, що виникають в ОВ розколюється за подряпиною. При правильному виконанні утворюється перпендикулярна до вісі волокна дзеркальна поверхня. Сьогодні у світі випускається широкий асортимент інструментів для сколювання ОВ, різних по виконанню та вартості.



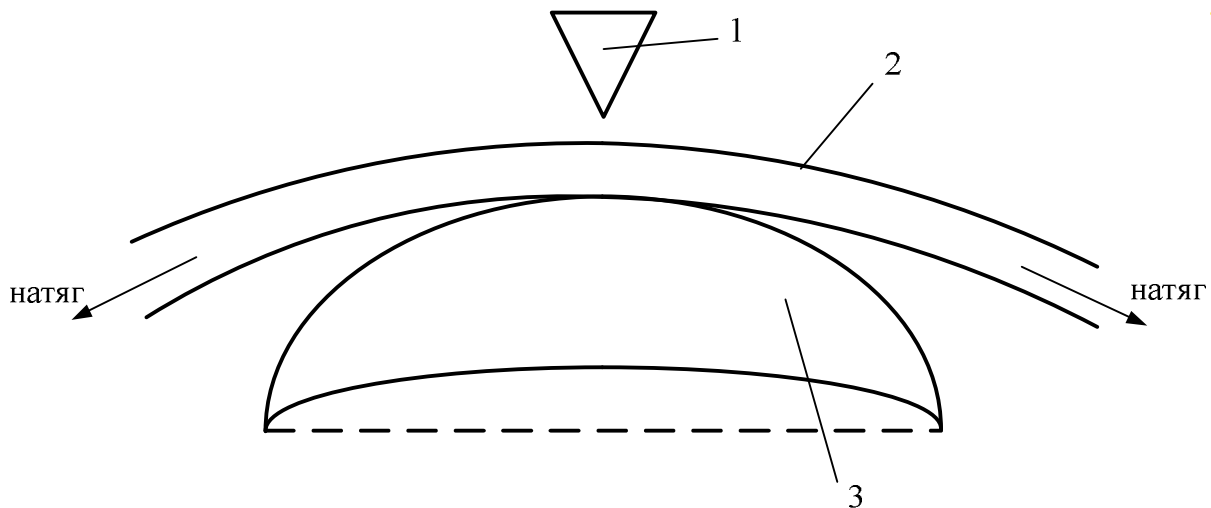


Рисунок 6.3 – Вид пристрою для сколювання торців ОВ:  
1 – спеціальний різець, 2 – ОВ, 3 – оправка

Іноколи навіть при досить якісному, на перший погляд, сколі дзеркально гладкою залишається лише частина торцевої поверхні, тоді як на іншій частині поверхні з'являються, так звані, пір'їва зона 1 та зона туману 2 (рис. 6.4).

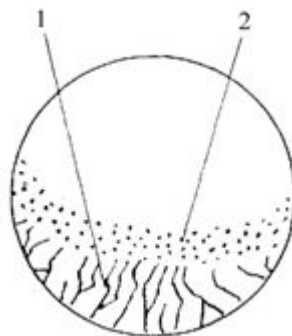


Рисунок 6.4 – Торцева поверхня сколеного ОВ:  
1 – пір'їва зона, 2 – зона туману

Для того, щоб уникнути цього виконують полірування торців при механічних способах з'єднань або попереднє оплавлення при зварюванні.

Після сколювання виконується перевірка якості торця ОВ. Перевірка якості, як правило, виконується за допомогою мікроскопа. На поверхні торця не повинно бути виступів, подряпин, обломів, зазубрин, пилу, бруду. Поверхня торця повинна бути перпендикулярна до вісі ОВ (рис. 6.5).

### Якісний скол

### Неякісні сколи

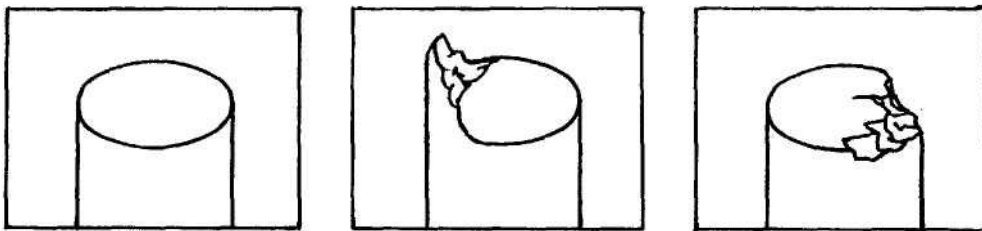


Рисунок 6.5 – Можливі види поверхні торця ОВ

## 6.3 Зварні з'єднання

Найбільш розповсюдженим способом отримання нероз'ємних з'єднань ОВ є зварювання. Зварювання може бути виконано шляхом розплавлення кінців ОВ за допомогою потужного джерела теплової енергії наступними методами:

- розміщення кінців ОВ у зону потужного лазерного випромінювання;
- розміщення кінців ОВ у полум'я газового пальника;
- розміщення кінців ОВ у поле електричного розряду.

Кожний з цих методів зварювання має свої достоїнства і недоліки.

Достоїнством зварювання ОВ за допомогою лазера слід вважати можливість отримання чистих з'єднань, завдяки відсутності в них сторонніх матеріалів, і як наслідок, досить малих втрат сигналу, близько 0,1 дБ. Як правило, джерелами лазерного випромінювання великої потужності (до 5 Вт) є  $CO_2$  газові лазери. Устаткування для такого зварювання ОВ виготовляється фірмами Cabloptic (Швейцарія) та Hewlett-Packard (США).

Зварювання в полум'ї газового пальника використовують головним чином для з'єднання багатомодових ОВ. До достоїнств цього способу слід віднести можливість отримання дуже міцних з'єднань. Як джерело для полум'я використовують суміш пропану та кисню, або кисню-хлоруводню. Втрати в з'єднаннях близькі до 0,1 дБ. Обладнання для зварювання в полум'ї виготовляється фірмами Cabloptic (Швейцарія) та AT&T (США).

Однак найбільшого застосування отримав спосіб зварювання ОВ у полі електричного розряду. Воно виконується в наступній послідовності:

1. Підготування торцевих поверхонь ОВ.
2. Юстирування (вирівнювання) кінців ОВ (рис. 6.6). При цьому виконуються такі операції:
  - первинне встановлення – кінці ОВ установлюються і виставляються відносно маркерів;
  - вирівнювання серцевин за їх геометричними розмірами або за мінімумом втрат світла, що розповсюджується скрізь серцевини ОВ;
  - встановлення відстані між кінцями ОВ.
3. Попереднє оплавлення торців ОВ. Ця операція виконується з

метою часткової ліквідації мікронерівностей, що виникають на торцевих поверхнях під час сколювання ОВ. Струм в режимі оплавлення сягає 10...12 мА. Іноді цю операцію називають термо- або гарячим очищенням (fire cleaning).

4. Безпосереднє зварювання ОВ. При цій операції струм дуги сягає 12...16 мА.

Для реалізації зварного з'єднання ОВ розроблено ряд зварювальних апаратів, які можна класифікувати за:

- способом юстирування кінців ОВ (за геометричними розмірами серцевин, або за втратами світла, що розповсюджується через місце зварювання);
- способом виконання операції (ручний, автоматичний);
- типом контрольного пристрою (мікроскоп, монітор на рідких кристалах, тощо);
- кількістю ОВ, що зварюються (одномодове ОВ, багатомодове ОВ).

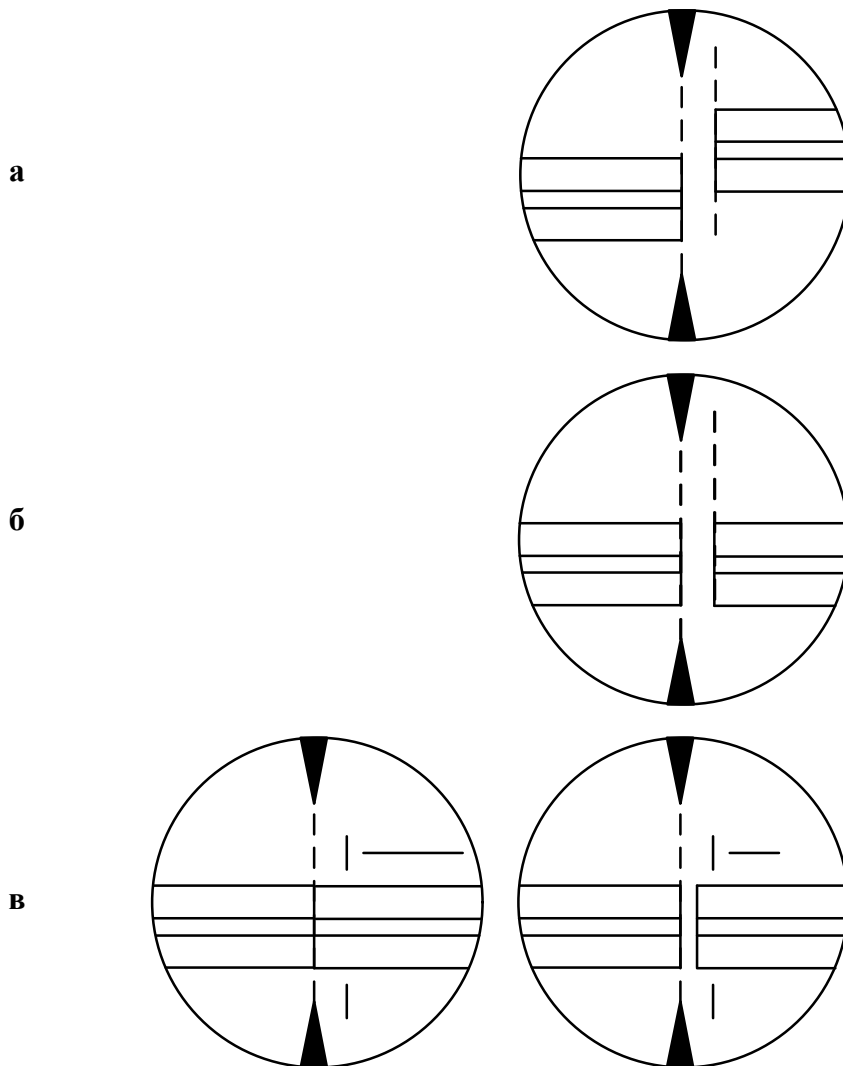


Рисунок 6.6 – Послідовність операцій юстирування ОВ

За способом юстирування кінців ОВ існують дві технології:

1. Вирівнювання серцевин ОВ за їх геометричними розмірами (Profile Alignment System – PAS) шляхом бічного підсвітлювання кінців ОВ, що з'єднуються (рис. 6.7);

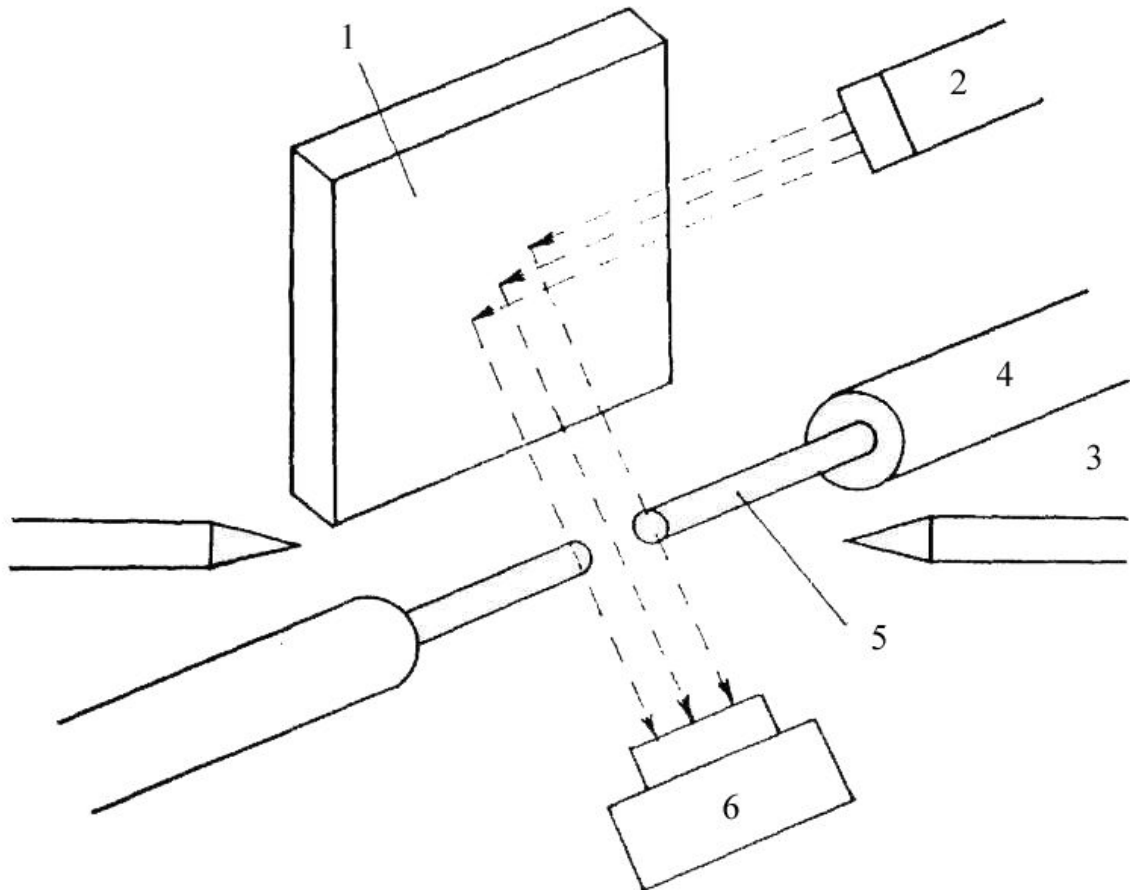


Рисунок 6.7 – Юстирування за геометричними розмірами: 1 – зафіксоване дзеркало, 2 – джерело випромінювання, 3 – електрод, 4 – ОВ, 5 – ОВ без захисного покриття, 6 – камера детектора

2. Вирівнювання серцевин ОВ шляхом мінімізації втрат світла, що розповсюджується через ОВ і місце їх з'єднання (метод активного юстирування).

Для метода активного юстирування існує три схеми інформаційного забезпечення:

■ перша схема ґрунтується на використанні оптичних передавачів та приймачів на протилежних кінцях ОВ, що підлягають з'єднанню (рис. 6.8, а). Інформація від приймача передається назад на передавач.

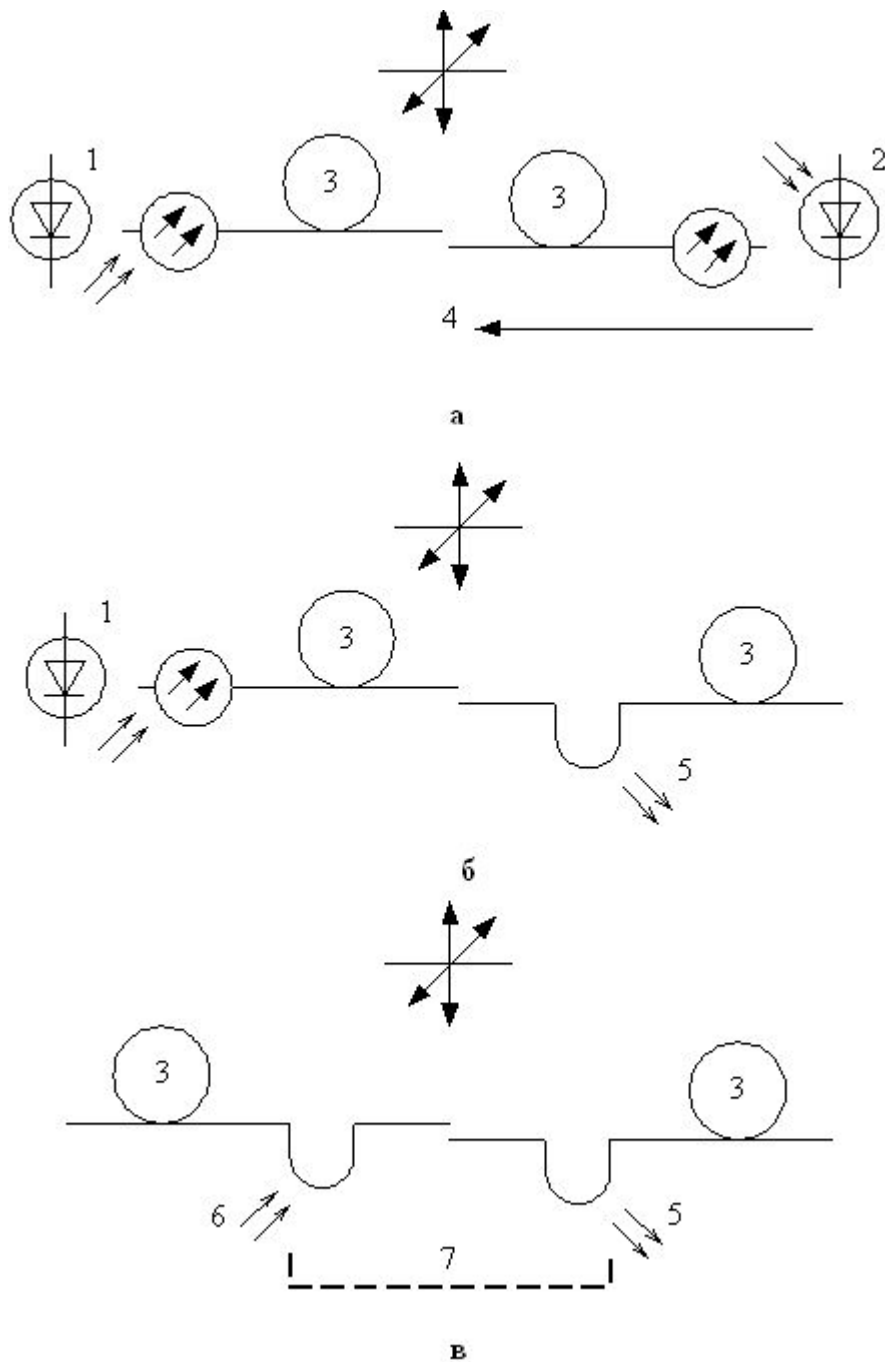


Рисунок 6.8 – Схеми юстирування з введенням/знаходженням світла: 1 – джерело випромінювання, 2 – детектор, 3 – прокладена будівельна довжина ОК, 4 – зворотний зв'язок, 5 – виведення оптичного сигналу, 6 – введення оптичного сигналу, 7 – ділянка юстирування

■ друга схема використовує оптичний передавач на дальньому кінці та детектор у точці з'єднання (рис. 6.8, б). Оптичний сигнал виводиться (випромінюється) з ОБ на його вигині, на невеликій відстані (наприклад, до 0,5 м) від місця з'єднання.

■ третя схема є реалізацією LID (Local Injection and Detection) метода і являє собою процедуру юстирування, що обмежена лише місцем з'єднання (рис. 6.8, в). Схема базується на введенні оптичного сигналу в серцевину одного ОБ та визначенні його у серцевині другого

ОВ на його вигині (у місці випромінювання світла).

Третя схема є найбільш ефективною, оскільки на відміну від юстирування за геометричними розмірами якість зварного з'єднання залежить не від індивідуальної майстерності робітника, що виконує зварювання, а від зварювального апарату. До того, слід додати, що в сучасних апаратах, для керування процесами юстирування та зварювання використовують програмне забезпечення, що дозволяє мінімізувати втрати світла (менше 0,1 дБ) на з'єднаннях (рис. 6.9).

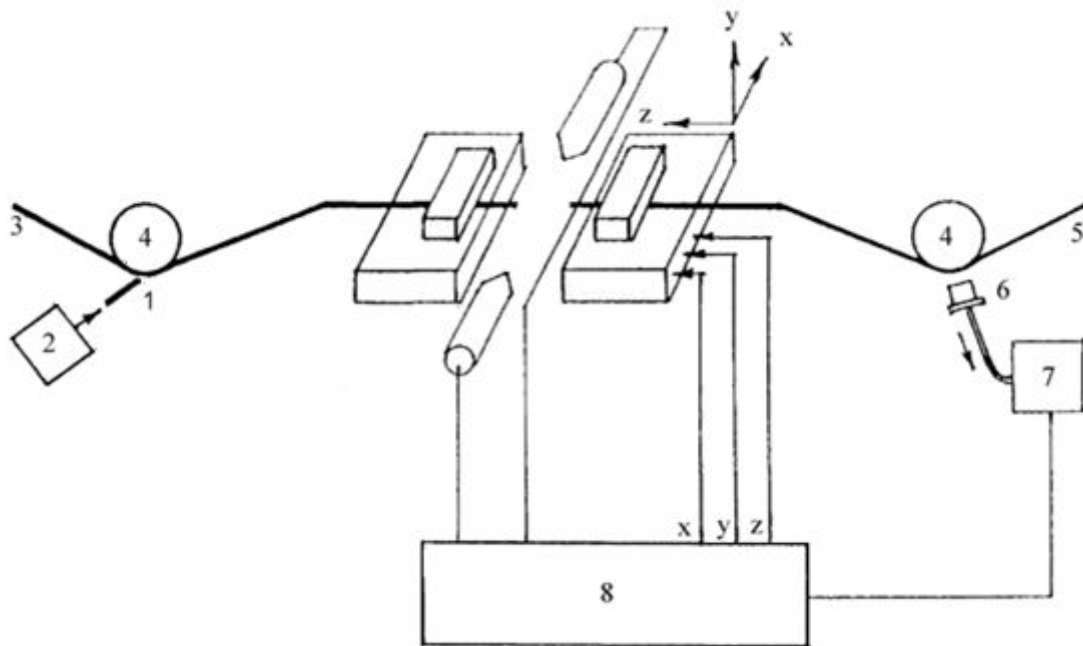


Рисунок 6.9 – Схема юстирування за мінімізацією втрат світла:

- 1 – ОВ з великим діаметром серцевини, 2 – світловипромінювальний діод, 3 – перше ОВ, 4 – оправка, 5 – друге ОВ, 6 – фотодіод, 7 – підсилювач, 8 – мікропроцесор

Безпосередньо процес зварювання ОВ складається з розведення ОВ, їх попереднього оплавлення (гарячого очищення), з'єднання ОВ та їх оплавлення. В процесі плавлення ОВ одночасно запобігають укороченню одного з них у місці зварки. Ці операції (попереднє оплавлення та зварювання), як правило, виконуються автоматично.

Для зняття механічної напруги в місці зварки, в сучасних автоматичних зварювальних апаратах передбачено режим прогрівання місця з'єднання після зварювання (режим релаксації).

При з'єднанні ОВ методом зварювання досить важливою характеристикою є температура і точка плавлення скла. Може виникнути потреба в розробці спеціального циклу плавлення (час та величина струму як для попереднього оплавлення, так і для плавлення та релаксації) для різних типів ОВ, що з'єднуються методом зварювання (рис. 6.10).



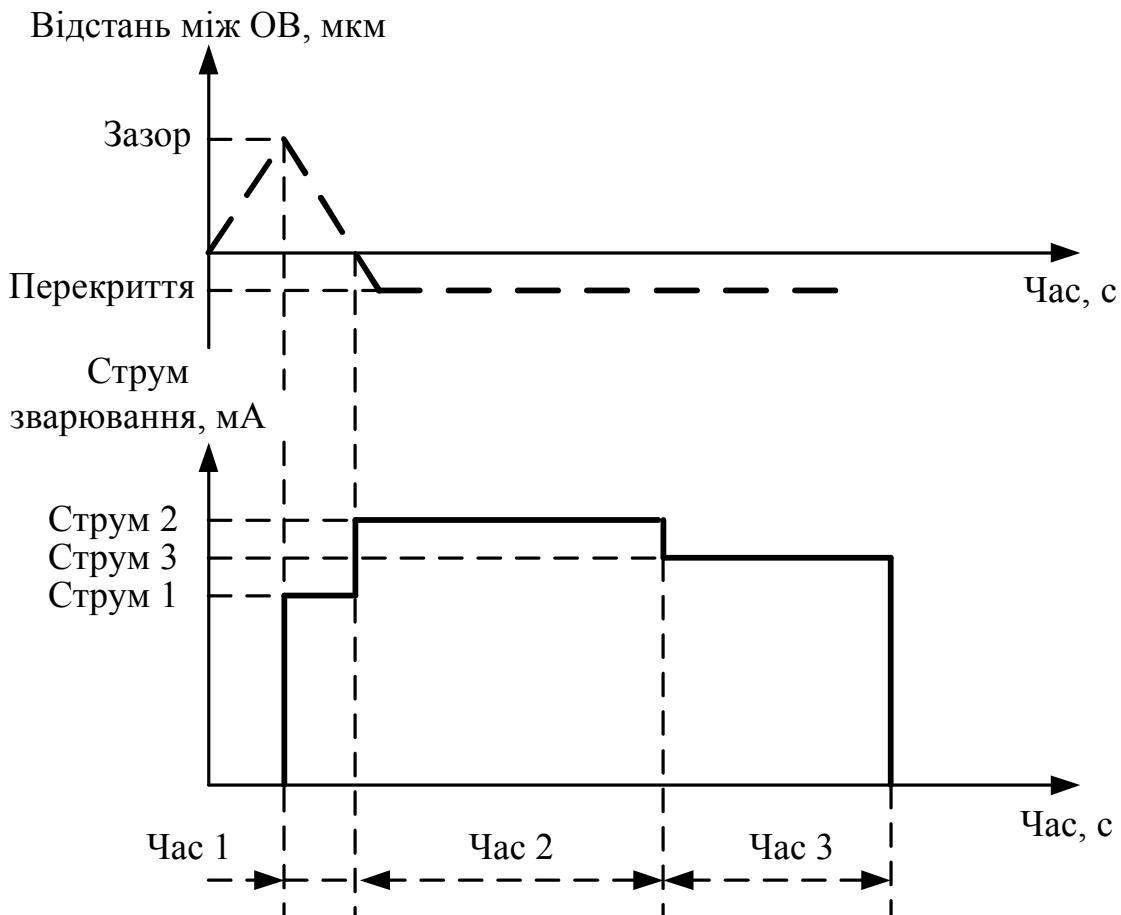


Рисунок 6.10 – Цикл зварювання ОВ за допомогою автоматичного зварювального апарату

При зварюванні ОВ, які мають неконцентричні серцевини, виникає порушення юстирування внаслідок дії поверхневого натягу. Ці порушення можна мінімізувати шляхом:

- зменшення часу плавлення (зварювати зовсім невелику частину ОВ), або довжини вільного кінця ОВ в зварювальному пристрої, дозволяючи йому переміщуватись на досить малу відстань в процесі зварювання;

- використання компенсаційних програм, таких як управління зсувом серцевини за допомогою метода навмисного зсуву осей.

Прикладом реалізації останнього метода може служити режим зварювання ОВ з концентриситетом серцевин RTC (Real Time Control)), що реалізований в зварювальному апараті FSU 925 фірми Ericsson (Швеція). В цьому режимі після юстирування серцевин ОВ та проведення попереднього оплавлення відбувається компенсація поперечного зсуву серцевин в бік, протилежний похідній розбіжності (рис. 6.11).

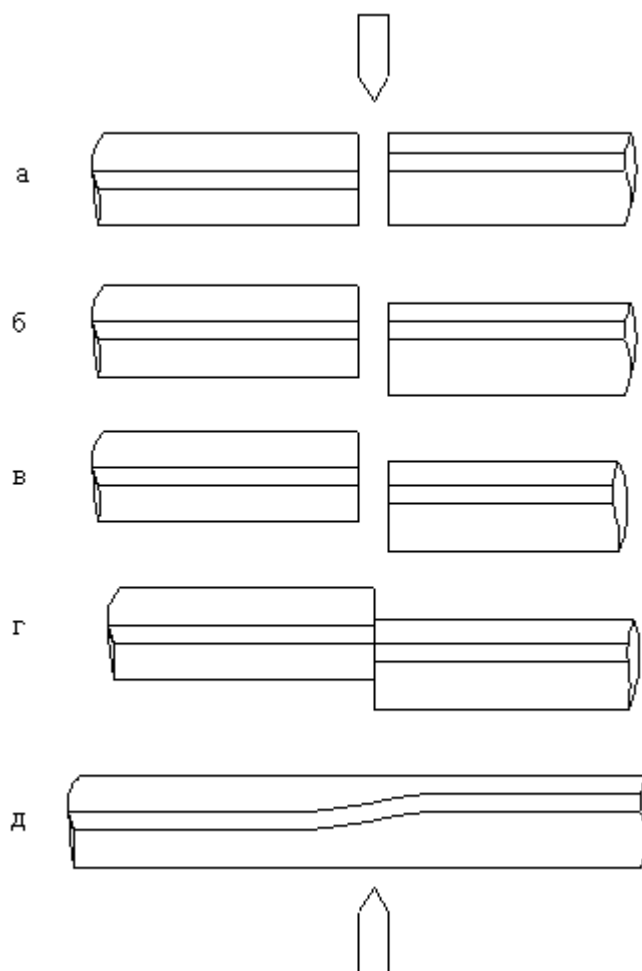


Рисунок 6.11 – Послідовність виконання з'єднання ОВ методом зварювання з концентриситетом серцевин: а – вихідна позиція, б – юстирування серцевин, в – компенсація зміщення, г – суміщення ОВ, д – після зварювання

Зварювання ОВ відбувається чергуванням коротких імпульсів струму високої інтенсивності з імпульсами струму низької інтенсивності (релаксаційними імпульсами). При цьому після зварювання в електричному полі імпульсу високої інтенсивності в полі релаксаційного імпульсу відбувається переміщення ОВ під дією поверхневого натягу.

Кількість імпульсів, які чергуються, залежить від зсуву серцевин ОВ, яке постійно програмно контролюється. Але, як правило, кількість імпульсів не перевищує 2 – 3 (рис. 6.12).

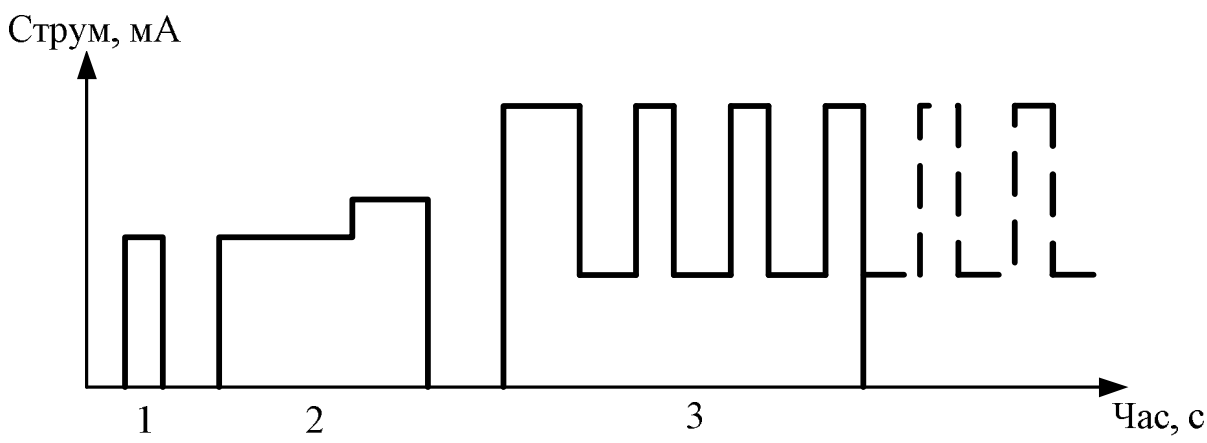


Рисунок 6.12 – Цикл зварювання ОВ у RTC режимі: 1 – очищення, 2 – попереднє оплавлення, 3 – зварювання

При з'єднанні стрічкових елементів методом зварювання, крім основних операцій – підготування ОВ, їх юстирування, з'єднання та захист місця з'єднання – необхідно здійснення ще трьох операцій:

- видалення розбігу торців ОВ;
- виконання плавлення усіх ОВ при одній і тій самій температурі;
- перевірка рівня загасання в з'єднанні.

Зварювання стрічкових елементів можливе лише при застосуванні повністю автоматичних зварювальних апаратів, за допомогою яких можна з'єднувати до 12 ОВ приблизно за 3 хвилини при середньому рівні втрат до 0,1 дБ. При зварюванні ОВ розміщуються з відповідним зсувом від вісі електродів, що забезпечує рівномірне нагрівання (рис. 6.13). До початку процесу зварювання та після його завершення виконується перевірка зсуву ОВ, стану поверхні торців, а також деформація. Якщо перевірка показала, що результати не відповідають вимогам, процес зварювання повторюють.

Після здійснення операції зварювання якість з'єднання перевіряється як візуально так і вимірюванням за допомогою рефлектометра (див. розділ 8). Якщо рівень втрат в з'єднанні перевищує норму, то всі операції виконуються спочатку.

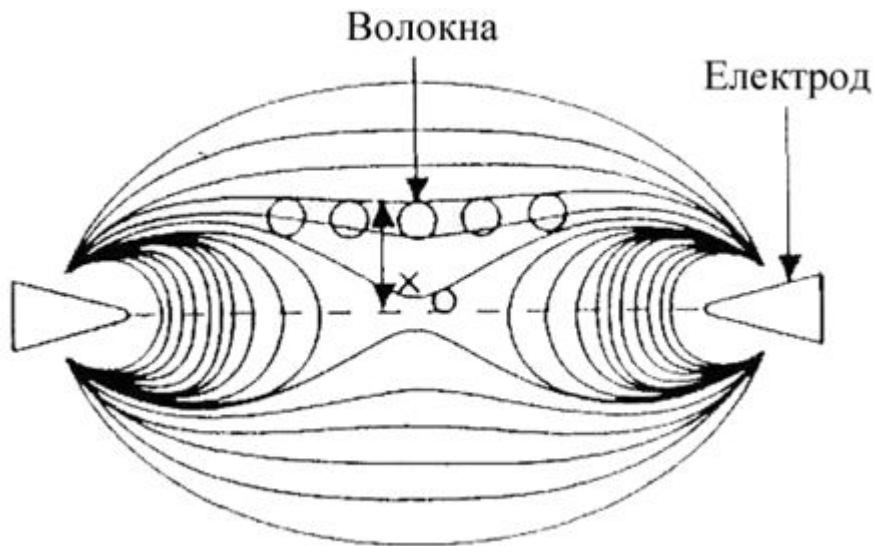


Рисунок 6.13 – Зварювання стрічкових елементів

Дефекти зварювання, які можна виявити візуально, можна розподілити на п'ять типів: пухирі, стоншення, стовщення, розрив та викривлення (рис. 6.14).

Причини та способи видалення дефектів наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Види дефектів зварних з'єднань ОВ та способи їх видалення

Дефект	Причина	Спосіб видалення
Пузир	Неякісний скол або бруд на кінці ОВ	Повторний скол ОВ та зварювання. При стійкому отриманні неякісного сколу, слід замінити сколювач
Стоншення	Невірне (сильне) розтягування	Повторні сколи ОВ та зварювання
Стовщення	Невірне (слабке) розтягування	Повторні сколи ОВ та зварювання
Розрив	ОВ не зведені разом, або надто великий струм при зварюванні	Повторні сколи ОВ та зварювання
Викривлення	Неперпендикулярні торці ОВ, або надмірне зведення кінців ОВ	Повторний скол ОВ та зварювання. При стійкому отриманні неперпендикулярного сколу, слід замінити сколювач

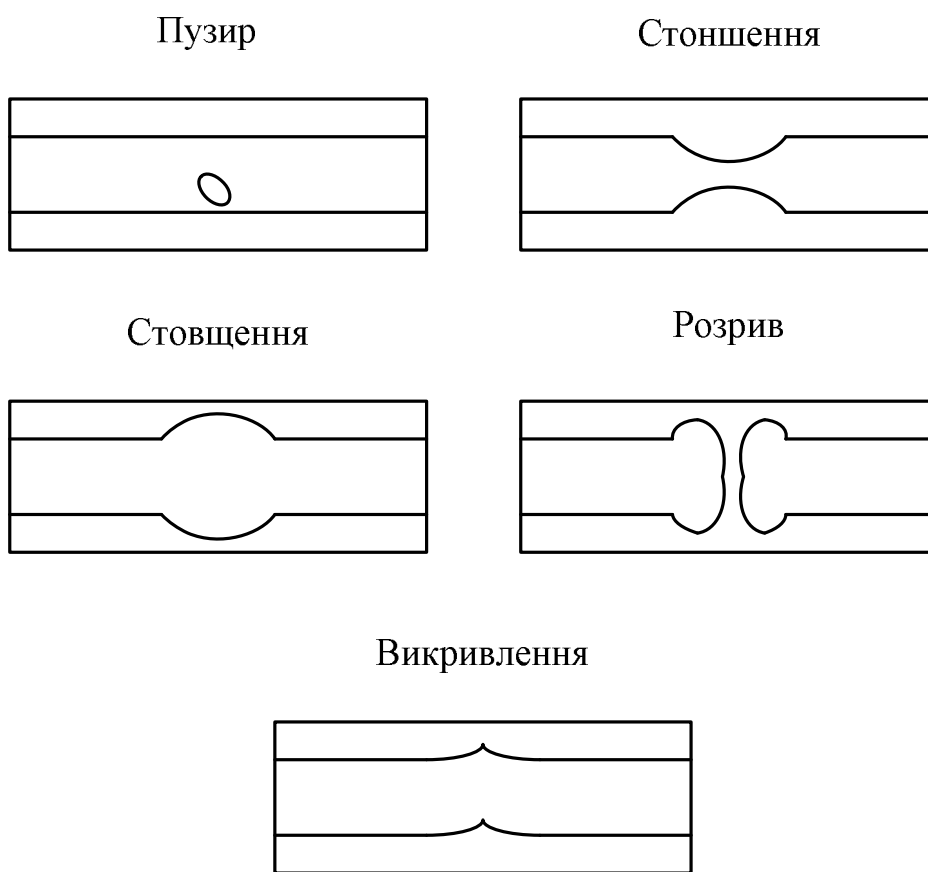


Рисунок 6.14 – Види дефектів при зварюванні ОВ

Після зварювання місце з'єднання захищається шляхом термічного усаджування комплекту деталей для захисту місця зварювання (рис.6.15).

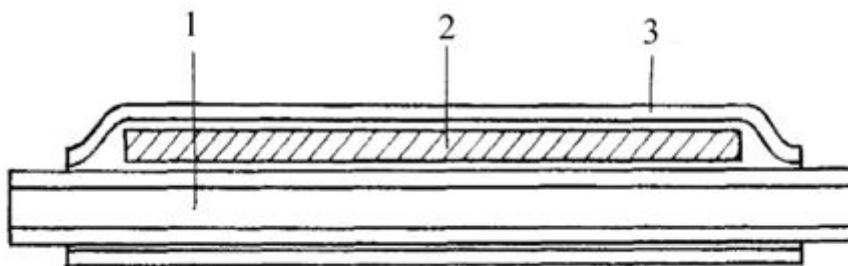


Рисунок 6.15 – Комплект деталей для захисту місця зварки:  
1 – гільза, 2 – металевий стрижень, 3 – термоусадна трубка

#### 6.4 Клейові з'єднання

Іншим способом отримання нероз'ємних з'єднань ОВ є склеювання. До переваг цього способу слід віднести оперативність та відсутність деформації серцевин ОВ, що з'єднуються. Це сприяє отриманню малих втрат, відсутності напруги в області стику, забезпеченню добрих міцностних якостей, тощо. Однак обмежений строк експлуатації та

часова нестабільність втрат в клейових з'єднаннях стримує широке застосування цього метода.

Для отримання клейових з'єднань використовують суміщення та фіксацію ОВ: в капілярі, в прямокутній трубці, за допомогою V-видної канавки, за допомогою стрижнів.

Наведемо приклад клейового з'єднання за допомогою капіляру. Він має низку етапів (рис. 6.16):

1. Підготування ОВ до з'єднання.
2. Введення ОВ у капіляр.
3. Нагнітання імерсійної рідини, гелю або клею.
4. Регулювання з'єднання, юстирування ОВ.
5. Нанесення шару адгезивної речовини.
6. Цементування адгезиву ультрафіолетовим опромінюванням.

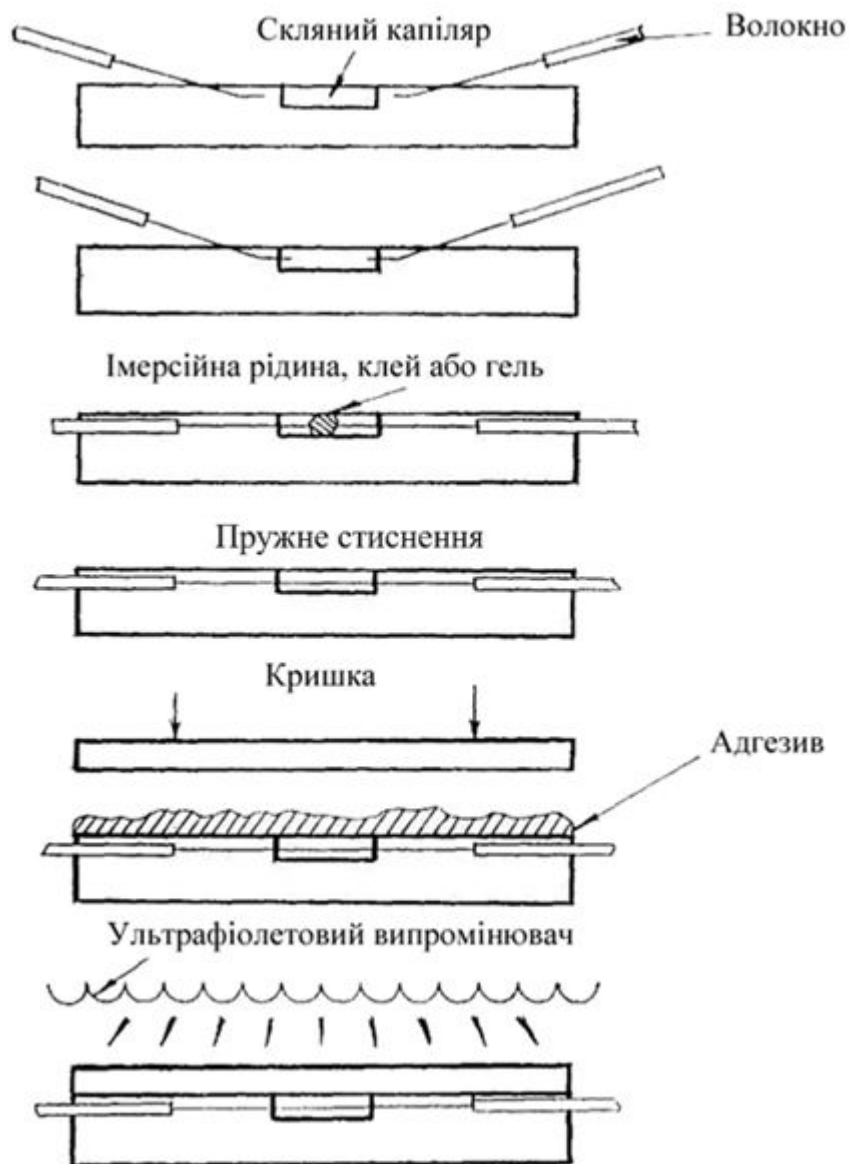


Рисунок 6.16 – Етапи отримання клейового з'єднання за допомогою капіляра



## 6.5 Механічні з'єднання

Для абонентських і локальних мереж передачі інформації, де вимоги до загасання на стиках ОВ менш жорсткі, останнім часом широкого застосування набули механічні з'єднання ОВ. Це визначається цілим рядом позитивних якостей із міркувань економії та надійності. Так, за даними різних фірм, що випускають обладнання для волоконно-оптичних систем, вартість одного механічного з'єднувача складає 20...40 дол. у той час, як вартість пристроїв для отримання зварних з'єднань ОВ – 20...30 тис. дол. Крім того, отримання з'єднань за допомогою механічних з'єднувачів займає не більше 3 хвилин і може виконуватись робітниками порівняно низької кваліфікації. Виконання же зварних з'єднань є досить трудомістким і вимагає більш високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Крім того, втрати в зварних з'єднаннях досить суттєво залежать від режимів зварювання, а сама операція вимагає великих витрат часу на один стик, необхідність юстирування, тощо.

З широкого кола задач, що вирішуються при створенні механічних з'єднувачів ОВ, як першочергова, може бути виділена задача конструювання з'єднувачів для найбільш широко використовуваних в даний час систем з модуляцією інтенсивності світла. В таких з'єднувачах втрати світла при його передачі з одного ОВ в інше повинні бути мінімальні, самі з'єднувачі мати високу ремонтоздатність, а їх збирання та монтаж – як можливо більш простими.

В світлопроводних системах, що побудовані на одно- та багатомодових ОВ з малим загасанням (менше 0,5-0,7 дБ/км), вимоги до значень втрат в з'єднаннях найбільш жорсткі, тому недоцільно в подібних лініях використовувати з'єднувачі з загасанням більше ніж 0,1 дБ.

Існує безліч різних видів механічних з'єднувачів. Однак всі вони вимагають виконання сколу, а іноді ще й поліровки торців ОВ в процесі їх підготування до з'єднання. Для узгодження стику ОВ в механічних з'єднувачах можуть використовуватись різні рідини, адгезиви, мастила. Оскільки перші тяжко утримуються і легко забруднюються, а треті не твердіють і не забезпечують надійного стику то їх не використовують у механічних з'єднувачах. Адгезив – рідкий матеріал, який після отвердіння приймає стійку форму і надійно забезпечує поперечний зв'язок, зберігаючи при цьому свої характеристики на протязі усього терміну служби, що й визначило його широке застосування.

Механічні з'єднувачі можуть бути **активними**, в яких є можливість вирівнювати та оптимізувати положення ОВ по мінімуму втрат, і **пасивними**.

За використанням механічні з'єднувачі розділяють на **одноразові** та **багаторазові**.

Механічний з'єднувач ОВ типу Fiblok компанії 3М складається з трьох частин – пластмасово-алюмінієвої основи 1, металевого елемента



2, який зроблений з м'якого алюмінієвого сплаву, в середині якого виконується з'єднання ОВ 3, та пластмасової кришки 4 (рис. 6.17). ОВ вводять в з'єднувач крізь отвір 5. Для оптичного узгодження в місці стику кінців ОВ, що з'єднуються, використовується спеціальний гель 6.

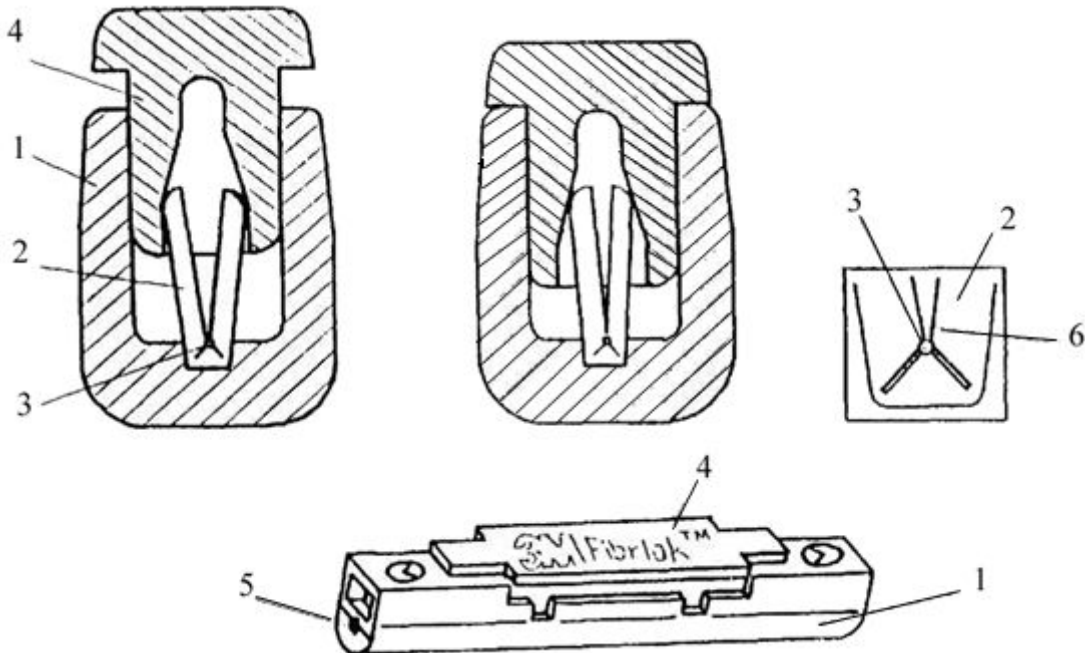


Рисунок 6.17 – Механічний з'єднувач Fibrlok: 1 – пластмасова-алюмінієва основа, 2 – металевий елемент, в середині якого виконується з'єднання ОВ, 3 – ОВ, 4 – пластмасова кришка, 5 – отвір для ОВ, 6 – гель для оптичного узгодження в місці стику кінців ОВ

З'єднувачі Fibrlok використовуються для з'єднання одномодових ОВ і багатомодових ОВ. Загасання в з'єднанні не перевищує 0,2 дБ (для більш ніж 90% з'єднань); дозволене зусилля на розтягування 0,34 кг; діапазон робочих температур від -40°C до +80°C; втрати на відбиття 45 дБ; час, що потрібен для здійснення одного з'єднання – не більше 3 хвилин; термін використання – 30 років.

Механічний з'єднувач CSL LightSplice компанії Lucent Technologies являє собою польовий з'єднувач, що призначений для отримання постійних та тимчасових з'єднань ОВ із зовнішнім діаметром захисного покриття 250 або 900 мкм.

З'єднувач складається з прозорого пластикового корпусу 1, скляної капілярної трубки 2 та металевої пружини 3 з тонким шаром еластичного матеріалу 4, що розміщено вздовж усієї контактної поверхні пружини (рис. 6.18). Прозорий матеріал корпусу дає змогу візуально контролювати процес з'єднання ОВ 5. В з'єднувачі не використовується затверджування адгезиву, однак для мінімізації втрат використовують спеціальні гелі.

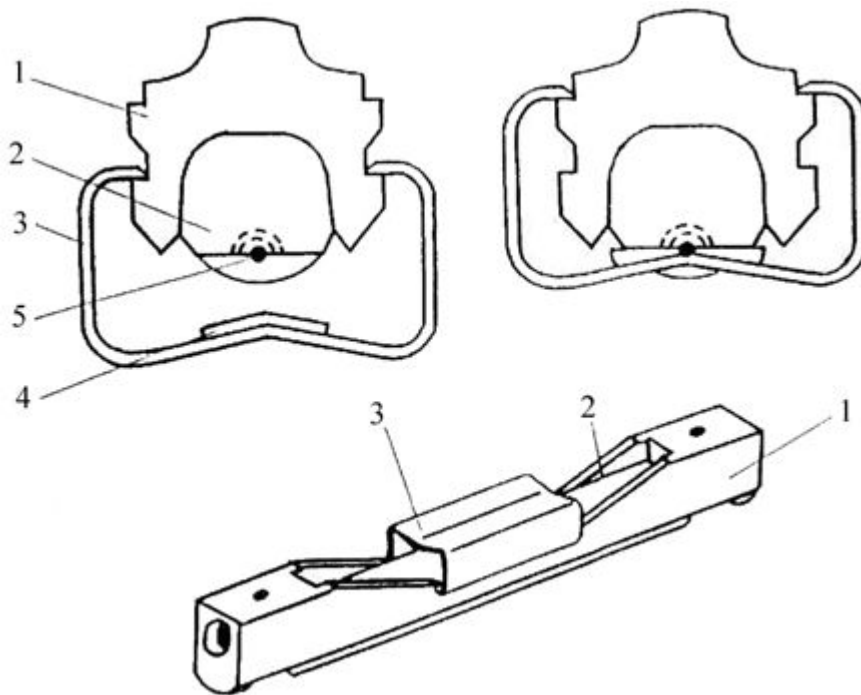


Рисунок 6.18 – Механічний з'єднувач CSL LightSplice: 1 – прозорий пластиковий корпус, 2 – скляна капілярна трубка, 3 – металева пружина, 4 – тонкий шар еластичного матеріалу, 5 – процес з'єднання ОВ

Достоїнством з'єднувача є швидкість та легкість отримання з'єднання, а також можливість використання на всіх ступенях мереж зв'язку: магістральних, абонентських, локальних, інформаційних і мережах керування й телеметрії. Даний з'єднувач призначений для роботи в широкому діапазоні робочих температур. Втрати на з'єднання одномодових ОВ і багатомодових ОВ не перевищує 0,2 дБ, на відбиття – не більше 50 дБ. Час, що потрібен для монтажу одного з'єднувача – 2-3 хвилини.

Механічний з'єднувач обертального типу Rotary Mechanical Splice (RMS) компанії Lucent Technologies є найбільш складним, працездатним серед вище перелічених, але він дозволяє досягти найменших втрат в з'єднаннях ООВ. На відміну від попередніх з'єднувачів, де величина втрат головним чином залежить від якості сколу торцевих поверхонь ОВ, RMS дозволяє налагодити з'єднання простим обертанням двох скляних втулок, які утримують підготовлені кінці ОВ (рис. 6.19).

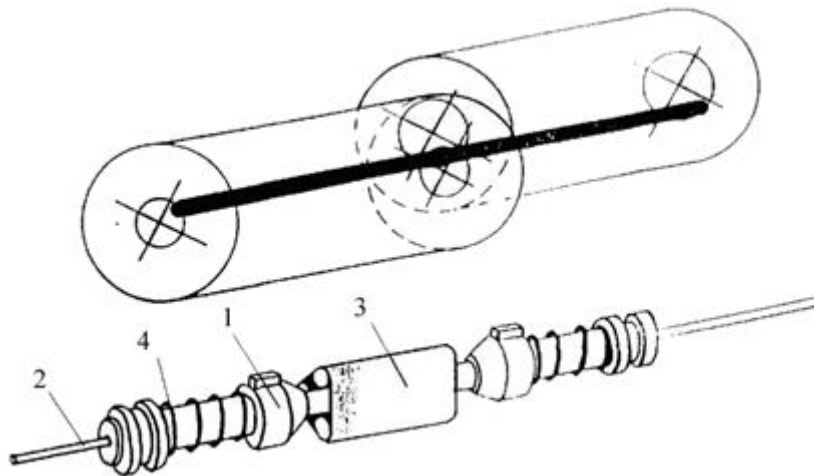


Рисунок 6.19 – Механічний з'єднувач RMS: 1 – втулка з капілярами, 2 – ОВ, 3 – вирівнююча муфта, 4 – з'єднувальні пружини

З'єднувач складається з двох втулок 1 з капілярами. ОВ 2 вкладаються в капіляри після попереднього нанесення на них адгезиву. Після цементування адгезиву ультрафіолетовим опроміненням, кінці ОВ, що виступають за межі втулки обламуються і шліфуються. Після підготування ОВ, втулки розміщуються в середині вирівнювальної муфти 3, що являє собою трикутник, у кожному куті якого розміщені напрямні стрижні. Вони міцно утримують втулки, при цьому дозволяючи їм обертатись навколо своєї вісі. Втрати в з'єднанні постійно контролюються шляхом вимірювання потужності за допомогою спеціально розробленого вимірювального блоку. Змонтований з'єднувач фіксується в муфті за допомогою спеціальних пружин 4, що працюють на стискання. Середні втрати на з'єднаннях ООВ без активного регулювання – близько 0,2 дБ, а з регулюванням – 0,05 дБ, на з'єднаннях багатомодових ОВ відповідно 0,25 дБ та 0,1 дБ. Втрати на відбиття не більше 50 дБ. Діапазон робочих температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Час на монтаж одного з'єднувача 7-8 хвилин.

Механічний з'єднувач CORELINK компанії AMP призначається для механічного з'єднання оптичних волокон з діаметром 125 мкм. З'єднувач складається з алюмінієвого елемента 2 для юстирування та з'єднання ОВ, що розміщується в прозорому корпусі 3 (рис. 6.20). Корпус 3, крім того, що утримує алюмінієвий елемент 2, ще й працює на стискання, за допомогою чого досягається фіксація ОВ, які з'єднуються.

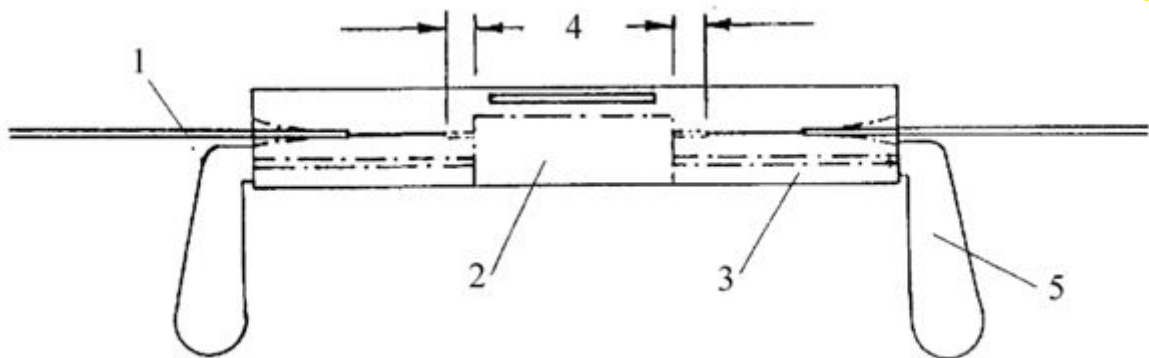


Рисунок 6.20 – Механічний з'єднувач CORELINK: 1 – ОВ, 2 – алюмінієвий елемент для юстирування, 3 – прозорий корпус, 4 – зазор для запобігання пошкодженню торців ОВ, 5 – спеціальний ключ для розсування стінок корпуса на кут 90°

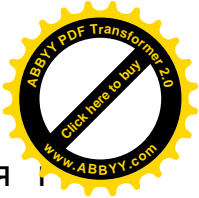
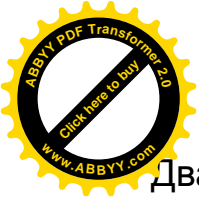
При монтажі підготовлені ОВ після повороту спеціального ключа 5 на кут 90°, який розсуває стінки корпуса і відкриває вхід до спрямовуючого алюмінієвого елемента, вводяться у корпус з'єднувача до спеціальної позначки, що забезпечує потрібний зазор 4 і запобігає пошкодженню торців ОВ. Після чого ОВ через відкритий вхід вводять в алюмінієвий напрямний елемент до повного контакту. Потім ключ повертається в вихідне положення і виймається. При цьому стінки корпусу сходяться і надійно фіксують ОВ. Для оптичного узгодження в місці стику кінців ОВ використовується спеціальний гель. З'єднувач може використовуватись багаторазово.

Рівень втрат світла, що вносяться CORELINK – до 0,1 дБ. Втрати на зворотне відбиття порядку 55 дБ. Діапазон робочих температур від -40°C до +80°C. Час на монтаж одного з'єднувача не перевищує 3 хвилин.

З'єднання кількох ОВ виконується згідно основних положень, що були перелічені вище. Однак це пов'язано з більшою складністю при юстируванні та розміщенні ОВ. Число ОВ в з'єднанні повинно відповідати кількості ОВ в одному стрічковому елементі кабелю, а саме з'єднання повинно бути виконано у вигляді єдиного модуля.

З точки зору мінімального загасання важливо використовувати модулі-з'єднувачі з відмінними геометричними характеристиками, які можуть досить точно відтворюватись та легко виготовлятись. Для цього переважно використовують модулі, що мають форму плоского паралелепіпеда. Матеріали, що використовуються при цьому, повинні зберігати свою стабільність в часі й не залежати від зміни температури та вологості.

Прикладом механічного з'єднувача для стрічкових елементів може служити силіконовий з'єднувач Agau Splice (рис. 6.21) компанії Lucent Technologies. Юстирування ОВ в з'єднувачі досягають за допомогою елементів з V-подібними канавками. Кожний модуль з'єднувача розрахований на розміщення ОВ одного кабелю. Торці ОВ полірують.



Два модулі стикують з третім елементом механізму юстирування і кріплять за допомогою клею.

В іншій конструкції з'єднувача Rapid Ribbon Splice компанії Lucent Technologies (рис. 6.22) використовують стрічкові елементи 1, в яких ОВ зачищають та розділяють. ОВ 2 обох стрічкових елементів юстирують в спільних пазах безкорпусного елемента (підкладки) 3, що виконаний з пластмаси зі скловолоконним зміцненням. ОВ закріплюють в пазах і захищають за допомогою кришки-футляра 4 та еластичних муфт 6. Цей пристрій має спеціальні пружинні затиски 5. Величина втрат в з'єднанні, як правило, не перевищує 0,3 дБ.

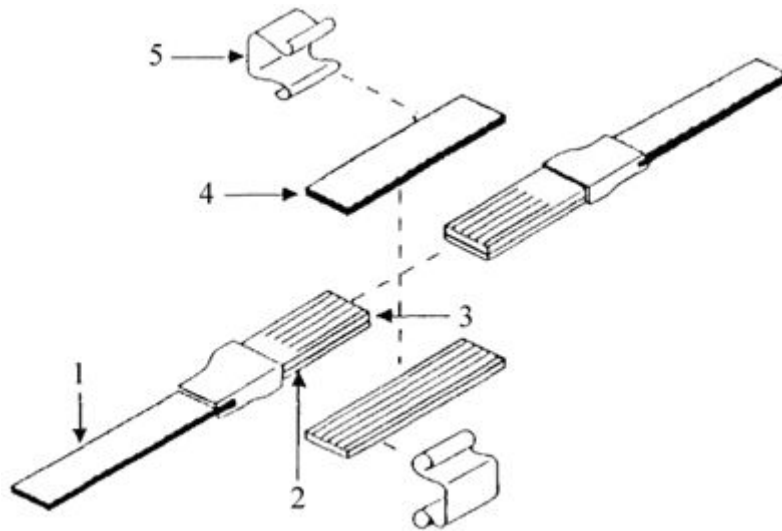


Рисунок 6.21 – Механічний з'єднувач Аггау Splice:  
1 – стрічковий елемент, 2 – блок з'єднувача, 3 – кінці ОВ,  
4 – еластична муфта, 5 – пружинні затискачі

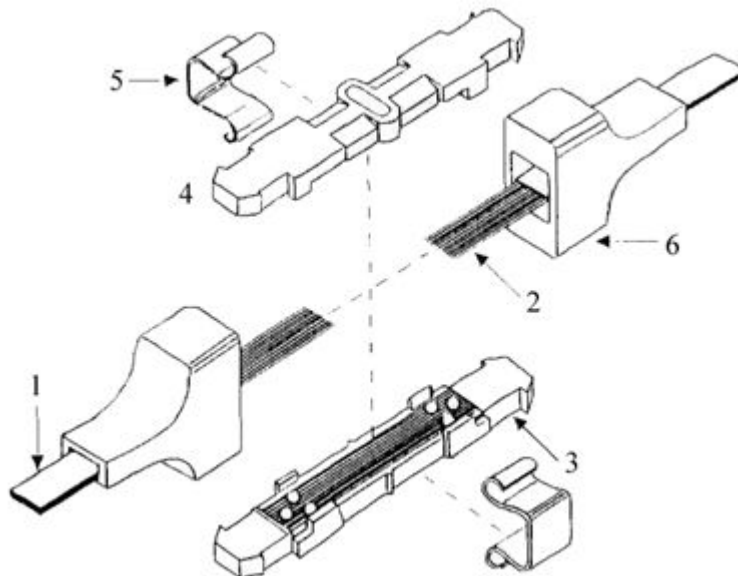


Рисунок 6.22 – Механічний з'єднувач Rapid Ribbon Splice:  
1 – стрічкові елементи, 2 – ОВ, 3 – безкорпусний елемент (підкладка),  
4 – кришка-футляр, 5 – пружинні затискачі, 6 – еластична муфта





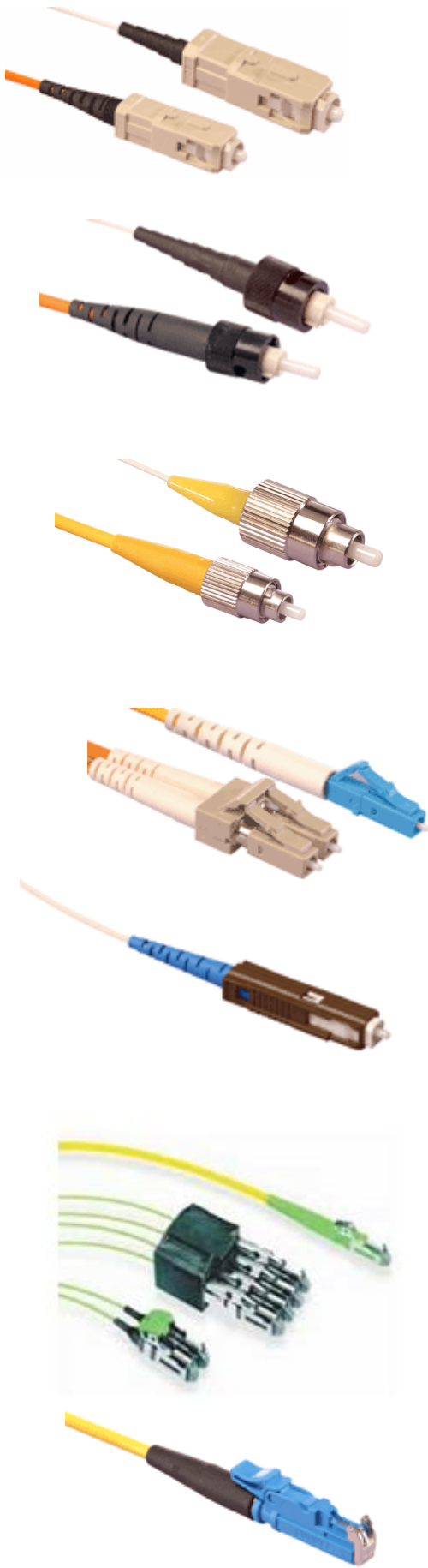
## 6.6 Роз'ємні з'єднання

Потреба в роз'ємних з'єднаннях виникає при багаторазовому підключенні ОВ до джерел (приймачів) випромінювання та стикування ОВ між собою, забезпечуючи мінімальні втрати в місцях з'єднань. Конструктивні рішення роз'ємних з'єднань, як правило, істотно розрізняються. Це обумовлено специфічними особливостями активних елементів лінійного тракту (джерел випромінювання – світлодіода, лазерного діода, та фотодетекторів).

При розробці оптичних роз'ємних з'єднувачів намагаються забезпечити малі втрати, створити прості, дешеві і, одночасно, надійні конструкції. Повне задоволення усіх цих вимог в одній конструкції оптичного з'єднувача проблематично. Тому в даний час розроблена велика кількість типів і конструкцій оптичних роз'ємних з'єднувачів, що можуть використовуватись у різних системах.

Основними елементами таких роз'ємних з'єднувачів є два штекери–кінцевики, в яких закріплюються ОВ та муфта, що служить для з'єднання штекерів. Похибки (поперечний зсув осей та кут між ними) при виготовленні цих елементів викликають появу втрат в роз'ємному з'єднувачі.

В наш час в мережах зв'язку широко використовуються роз'ємні з'єднувачі першого покоління типу FC, ST, SC та другого покоління – LC та MT-RJ (рис. 6.23). Їх характеристики наведено в табл. 6.2.



**Роз'єм SC (subscriber connector - абонентський роз'єм)**

**Роз'єм ST (straight tip connector – "прямий роз'єм"; іноді використовується неофіційна розшифровка цього скорочення - Stick-and-Twist – "встав і поверни")**

**Роз'єм FC-PC (Flat Contact- Physical Contact)**

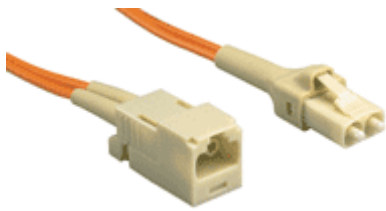
**Роз'єм LC (Link Control, також дуже поширена розшифровка цієї аббревіатури як Lucent Connector)**

**Роз'єм MU (Mini Unit - малогабаритний варіант роз'єму SC, що іноді підкреслюється позначенням "Mini-SC")**

**Роз'єм F-3000 (вдосконалена версія роз'єму E-2000)**

**Роз'єм E-2000 (Європа, 2000 рік)**





**Роз'єм FJ (Fibre Jack) або Opti-Jack**



**Роз'єми Mini-MT і MT-RJ (Mini Mass Termination)**



**Роз'єм Optoclip II**



**Роз'єм типу VF-45 (VG-45 )**

**Рисунок 6.23 – Оптичні роз'ємні з'єднувачі**



Таблиця 6.2 - Характеристики деяких типів роз'ємних з'єднувачів

Тип (фірма розробник)	Характеристика	Типові втрати, дБ	
		Одномодові ОВ	Багатомодові ОВ
FC (NTT)	Роз'єм зроблено з металу. Різьбове кріплення з ключем. Металевий або керамічний штекер	0,3	0,3
ST (AT&T)	Роз'єм зроблено з металу. Байонетний замок. Керамічний штекер	0,25	0,25
SC (NTT)	Роз'єм зроблено з пластику. Штекер з цирконію		0,2
LC	Пластмасовий роз'єм з підпружинним керамічним наконечником	0,15	0,5
MT-RJ	Роз'єм і адаптер дуплексного типу із з'єднувачем push-pull		
DN	Використовується в мережах кабельного телебачення. Корпус зроблений з металу і має невеликі габарити	0,25	0,5
E-2000 (LSH або FLSH)	Корпус роз'єму і адаптера зроблений з пластмаси	0,15	0,15
FJ	Відповідає формату SFF. Випускається лише в дуплексному варіанті	0,2	0,1
LX5	Застосовується в СКС Enterprise. Випускається як в симплексному так і в дуплексному варіанті	0,12	0,2
F3000	Модифікований роз'єм E2000. Зроблений так, що дозволяє вставити його вилку в розетку роз'єму LC	0,15	0,2

На сьогодні у світі розроблено понад 70 типів роз'ємних з'єднувачів. Практично усі роз'ємні з'єднувачі виконують з'єднання окремих ОВ. Для з'єднання стрічкових конструкцій з окремими ОВ або іншими стрічковими елементами використовують багатоволоконний роз'ємний з'єднувач.

На рис. 6.24 показано невеликий литий роз'ємний з'єднувач для чотирьохволоконних стрічкових елементів, який може використовуватись в заводських або польових умовах. Між торцями ОВ використовується імерсійний матеріал.

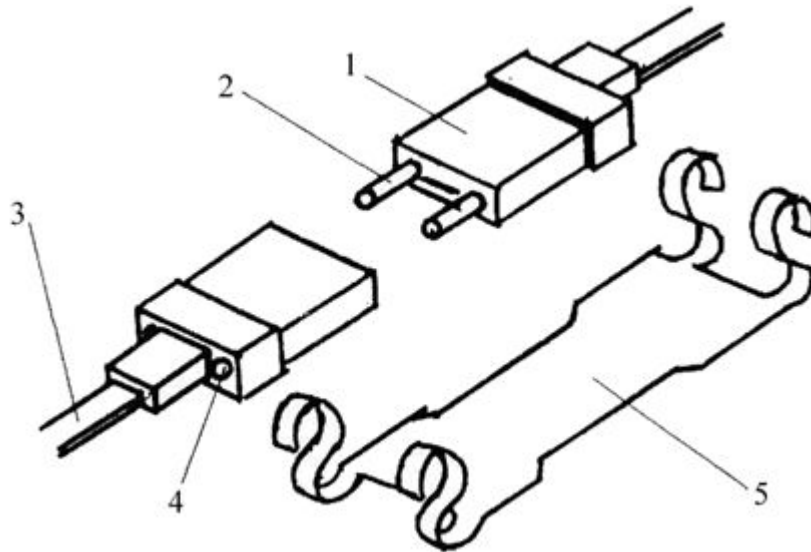


Рисунок 6.24 – Литий роз'ємний з'єднувач для чотирьох волоконних стрічкових елементів: 1 – гільза, 2 – спрямовуючий стрижень, 3 – стрічковий елемент, 4 – спрямовуючий отвір, 5 – пружний затискач

Однією, чи не головною, з причин виникнення втрат в роз'ємних з'єднувачах є френелеве відбиття. З метою мінімізації рівня цих втрат було запропоновано кілька способів закріплення та підготування торців ОВ у штекерах. Один з таких способів отримав назву „фізичний контакт” (physically contact – PC). При цьому способі ОВ фіксуються в штекері, після чого їх кінці певним чином поліруються з метою досягнення повного контакту торцьових поверхонь.

На рис. 6.25 наведено три базові методи отримання фізичного контакту. Роз'єми з фізичним контактом мають типовий рівень френелевого відбиття понад – 40 дБ.

Іншим способом зниження рівня енергії відбитого сигналу є метод полірування торців ОВ під кутом  $7^{\circ}$ ... $12^{\circ}$  від перпендикуляра до вісі ОВ.

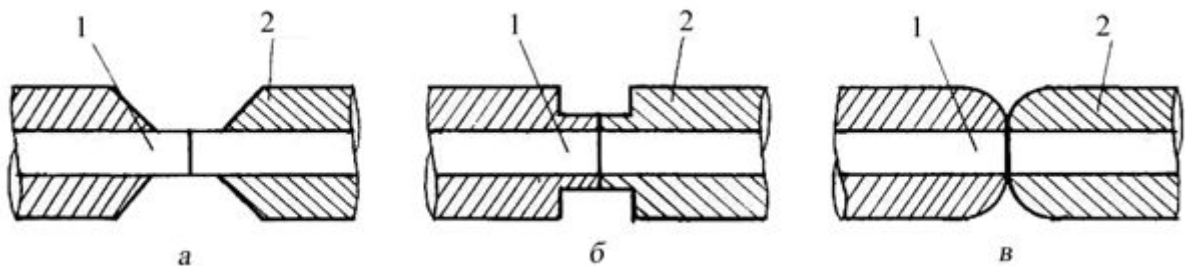


Рисунок 6.25 – Базові методи отримання фізичного контакту: ОВ, що виступає (а); створення п'єдесталу (б); заокруглювання торця (в); 1 – ОВ, 2 – штекер



Зниження рівня досягається тому, що відбите світло намагається розповсюджуватись з більшим кутом ніж кут, під яким ОВ приймає його. Кутіві з'єднання можуть досягати рівня енергії відбитого світла більше ніж – 55 дБ. Рівень втрат в роз'ємах з кутовим поліруванням торців ОВ дещо більший ніж при наявності фізичного контакту, але їх можна знизити за рахунок створення кутового фізичного контакту (Angle Physical Contact – APC).

## 7 АНАЛІЗ ВТРАТ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ПРОЦЕСІ МОНТАЖУ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ

З'єднання ОК призводить до виникнення втрат енергії оптичного сигналу. В порівнянні з коаксіальними кабелями, втрати в з'єднаннях ОВ можуть бути досить великими, досягати і навіть перевищувати по величині рівня кілометричного загасання самих ОВ. Вибір типу ОВ визначається не тільки технічними вимогами, але і у багатьох випадках його вартістю. Для зв'язку на невеликі відстані можуть використовуватися з'єднувачі й ОВ з відносно великими втратами і низькою вартістю, зокрема багатомодові ОВ.

### 7.1 Класифікація втрат у з'єднаннях ОВ

Типові розміри найпоширеніших східчастих ОВ показано на рис. 7.1, а їх основні характеристики наведено в табл. 7.1.

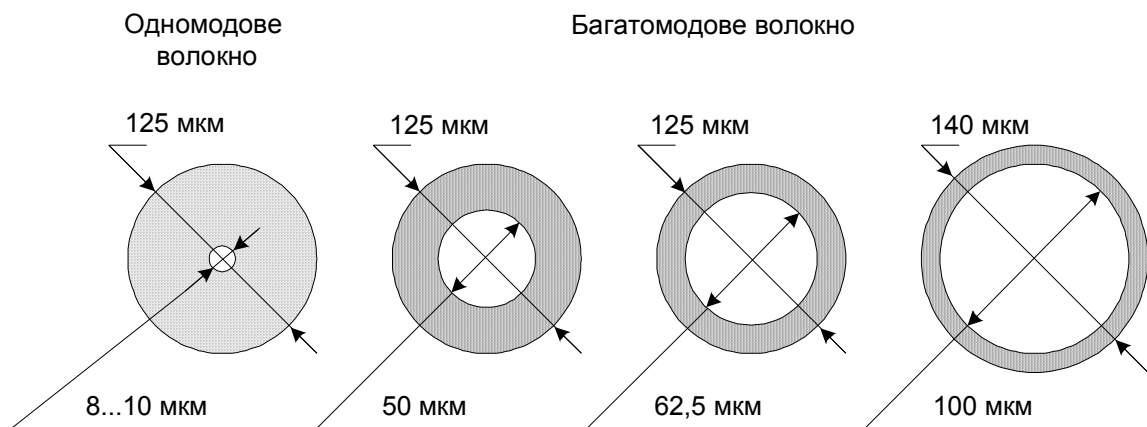


Рисунок 7.1 – Типові розміри східчастого ОВ

Нагадаємо, що до з'єднань ОВ пред'являють наступні основні вимоги: малі втрати, що вносяться, мале зворотне відбиття, стійкість до зовнішніх механічних, кліматичних і інших впливів, висока надійність і простота конструкції, незначне погіршення параметрів після багатократних з'єднань/роз'єднань.



Таблиця 7.1– Характеристики деяких ОВ

Тип ОВ	Діаметр серцевини/оболонки, мкм	Оптичні втрати, дБ/км			Смуга пропускання (λ=1300 нм), МГц·км
		λ=0,85 мкм	λ=1,31 мкм	λ=1,55 мкм	
Багатомодове східчасте	50/125	3	1	–	100
Багатомодове градієнтне	62,5/125	3	1	–	160...500
	85/125	3	1	–	500...2000
	100/140	3	1	–	500...2000
Одномодове східчасте	4...5/80	–	0,4	0,3	>1000
	8...9/125	–	0,5	0,25	>10 <sup>5</sup>
Пластмасове	1000	~1000 (λ=0,665)	–	–	~5

Втрати, що вносяться, залежать від типу ОВ (одномодове або багатомодове), типу і якості з'єднання і складають, наприклад, для роз'ємних з'єднань 1...3 дБ. Коефіцієнт передачі оптичної потужності при з'єднанні волокон торець до торця визначається як

$$K_T = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{отр}}}{P_{\text{ВХ}}} < 1, \quad (7.1)$$

а відповідні йому втрати (дБ), що вносяться з'єднанням, -

$$a_T = -\lg K_T = -10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}, \quad (7.2)$$

де  $P_{\text{ВХ}}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}}$ ,  $P_{\text{отр}}$  – оптичні потужності на вході, виході й відбиття, відповідно.

Причини, що викликають втрати в місцях з'єднань ОВ, можна умовно поділити на дві групи: внутрішні та зовнішні (рис. 7.2).

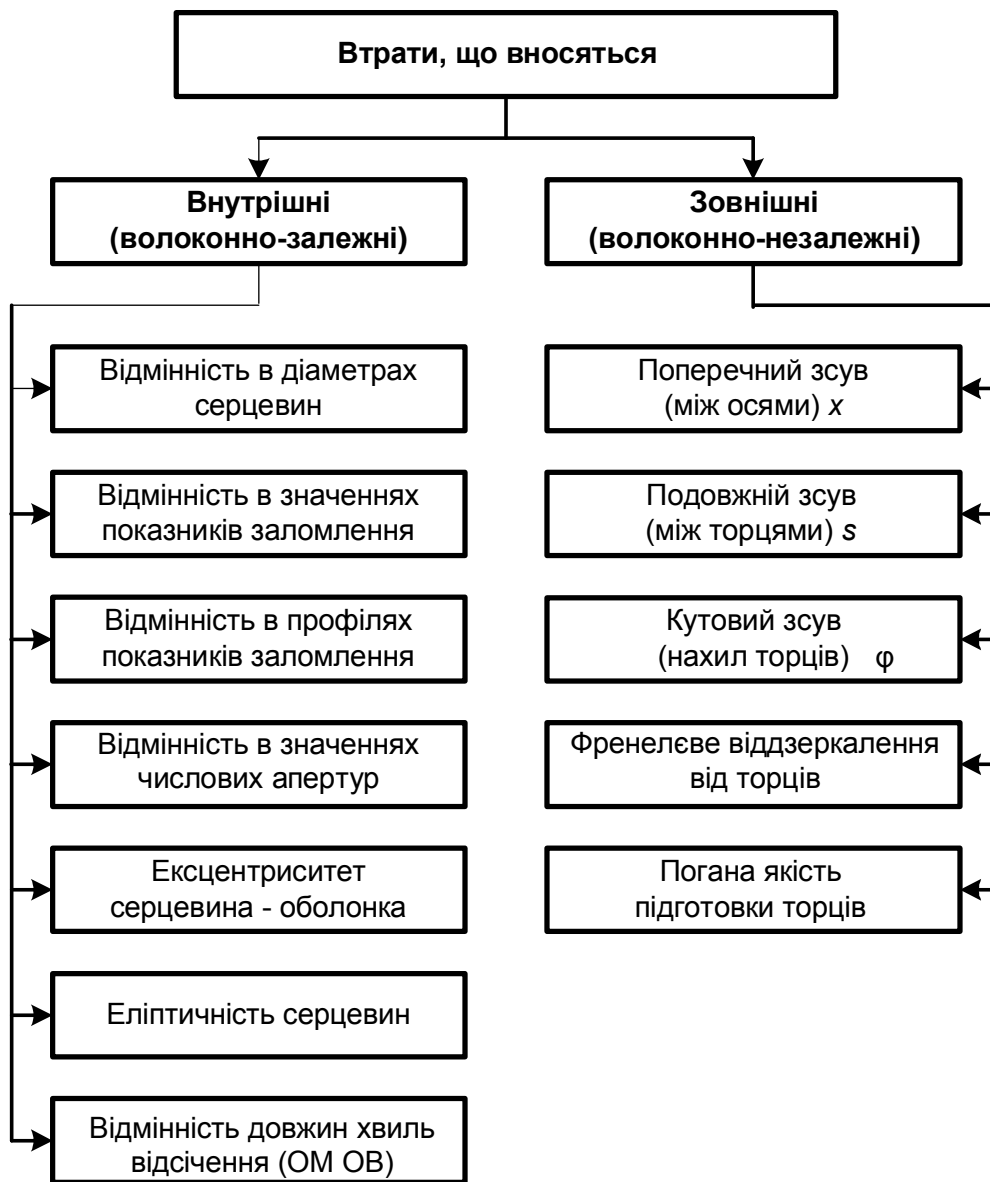


Рисунок 7.2 – Втрати, що вносяться при з'єднанні ОВ

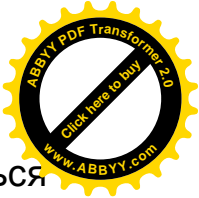
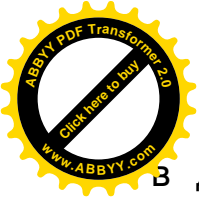
Внутрішні втрати викликані чинниками, які неможливо контролювати і вони складаються аддитивно. Величина цих втрат змінюється випадковим чином навіть у разі одного стандарту ОВ і одного виробника. На внутрішні втрати впливає технологія виробництва ОВ і критерії контролю його параметрів при витяжці, але не конструкція з'єднувача.

Зовнішні втрати визначаються механічними (геометричними) погрешностями, поганою якістю підготовки торців ОВ (шорсткістю), забрудненням зазору між торцями ОВ, а також френелєвим віддзеркаленням.

## 7.2 Розрахунки втрат

Слід зазначити, що розрахунки втрат при з'єднаннях ОВ, особливо за наявності зазору між ними, є складним математичним завданням, яке





в даний час повністю не вирішене, тому на практиці користуються наближеними співвідношеннями.

Для оцінки якості з'єднання використовуються такі параметри як коефіцієнт віддзеркалення

$$R_{\text{фр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (7.3)$$

і втрати зворотного віддзеркалення

$$b_{\text{фр}} = 10 \lg R_{\text{фр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}}, \quad \text{дБ}, \quad (7.4)$$

де  $n_1, n_2$  – показники заломлення речовин по обидві сторони межі розділу (рис. 7.3).

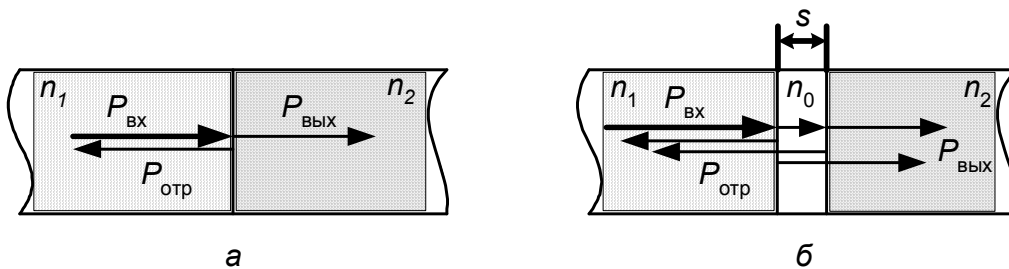


Рисунок 7.3 – Зворотне віддзеркалення оптичної потужності

Наприклад, для межі розділу серцевина ОВ – повітря отримуємо з (7.3):  $n_1=1,64$ ;  $n_2=1,0$ ;  $R_{\text{фр}}=0,035$ ;  $b_{\text{фр}} = -14,6$  дБ. Тобто 3,5 % оптичної потужності відбивається від гладкого торця ОВ.

Основний внесок в зворотне віддзеркалення вносить френелеве віддзеркалення через зазор  $s$  (зазвичай повітря) між торцями ОВ (рис. 7.3, б). Тому найбільш загальний вираз для коефіцієнта віддзеркалення має наступний вигляд:

$$R_{\text{фр}} = \frac{(n_1 - n_0)^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi n_0 s}{\lambda} \right)}{4n_1^2 n_0^2 + (n_1 + n_0)^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi n_0 s}{\lambda} \right)}, \quad (7.5)$$

де  $n_1, n_0$  – показники заломлення серцевин ОВ (однакові для обох ОВ) і середина в зазорі, відповідно. Зазвичай нехтують різницею в показниках заломлення ОВ, що сполучаються. Відповідно до закону збереження енергії  $R_{\text{фр}} + K_{\text{T}} = 1$ . Непаралельність торців приводить до різних значень зазору для різних ділянок серцевини. В цьому випадку зворотні втрати  $b_{\text{фр}}$ , дБ визначаються по усереднених значеннях  $\overline{R_{\text{фр}}}$



$$b_{\text{фр}} = 10 \lg \overline{R_{\text{фр}}} = 10 \lg \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_1 + n_0)^2}, \quad (7.6)$$

Наприклад, можна порахувати, що при  $n_1=1,5$  і  $n_0=1,0$   $b_{\text{фр}} = -11$  дБ.

Теоретично коефіцієнт віддзеркалення  $R_{\text{фр}}$  може бути і нульовим при деяких значеннях зазору  $s$ , але практично цього не буває. Більш того, це виконувалося б тільки для однієї довжини хвилі або вузького діапазону довжин хвиль. Тобто тільки зменшенням зазору можна декілька понизити зворотні втрати.

У табл. 7.2 приведені значення втрат, що вносяться і зворотних втрат, для деяких відносин  $\frac{s}{\lambda}$  при  $n_1=1,5$  і  $n_0=1,0$ .

**Таблиця 7.2 – Залежність втрат від величини зазору**

$\frac{s}{\lambda}$	Коефіцієнт передачі, $K_T$	Втрати, що вносяться, $a_T$ , дБ	Коефіцієнт віддзеркалення, $R_{\text{фр}}$	Зворотні втрати, $b_{\text{фр}}$ , дБ
0,250	0,85001	0,69530	0,14795	-8,4
0,100	0,94339	0,25293	0,05657	-12,6
0,050	0,98360	0,07140	0,01633	-18,0
0,020	0,99722	0,01187	0,00275	-25,8
0,010	0,99930	0,00295	0,00067	-31,8
0,005	0,99980	0,00075	0,00018	-37,6
0,002	0,99997	0,00013	0,00003	-45,2
0,001	0,99999	0,00004	0,00001	-51,3

Віддзеркалення не тільки ослабляє прямий світловий потік, але і збільшує зворотний потік, який може досягати передавального устаткування і значно погіршувати параметри випромінювання, наприклад, модовий склад, ширину спектральної лінії випромінювання і рівень власних шумів. З табл. 7.2 видно, що при значеннях  $\frac{s}{\lambda} < 0,1$  внесок френелєвого віддзеркалення у втрати, що вносяться, малий, проте, саме воно погіршує параметри випромінювання.

На практиці створення перпендикулярних осей плоских торців ОВ для забезпечення їх фізичного контакту (Physical Contact – PC) скрутно. Навіть невеликі відхилення на кут  $\alpha = 0,05^\circ$  між площинами кінців ОВ приводять до зазору близько 1 мкм (при діаметрі кінця 2,5 мм) (рис. 7.4, а).

При сферично опуклих поверхнях обох торців стикування завжди відбувається в околиці світлонесучої серцевини волокон (рис. 7.4, б).

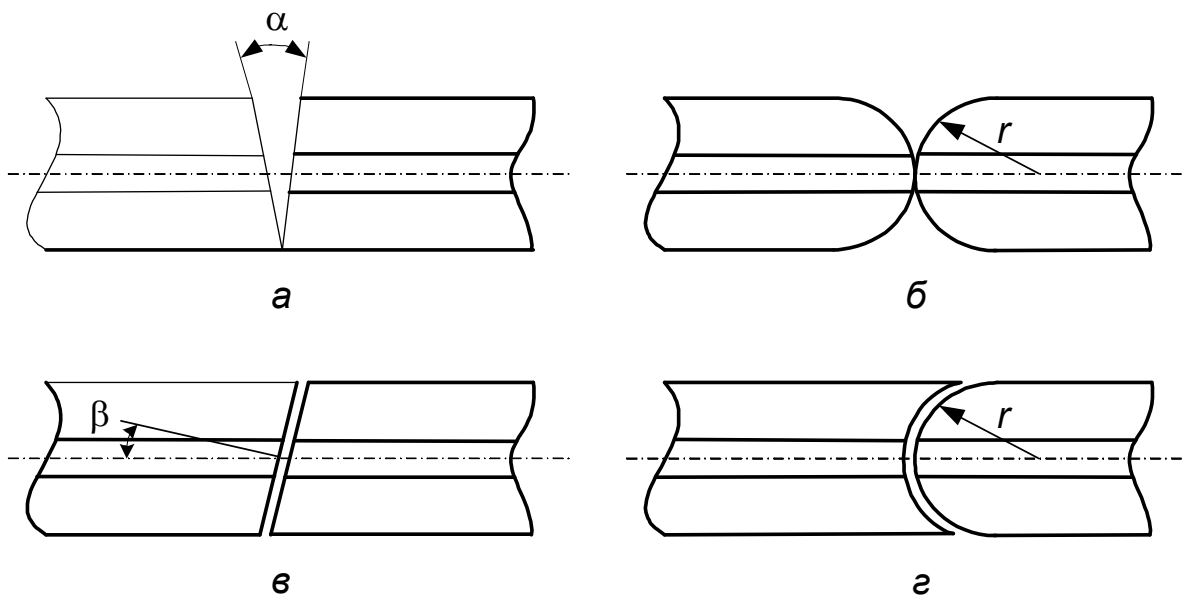
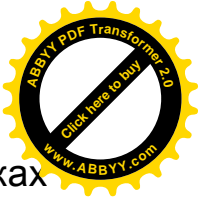
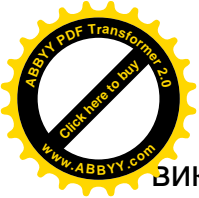


Рисунок 7.4 – Види фізичного контакту ОВ

На практиці розрізняють три види фізичних контактів, що відрізняються рівнем втрат зворотного віддзеркалення: PC<-30 дБ, Super PC<-40 дБ, Ultra PC<-50 дБ. Радіус кривизни  $r$  в PC – з'єднаннях лежить в діапазоні 15...25 мм. При цьому такий широкий діапазон значень  $r$  пояснюється не технологією процесу полірування торців, а вимогами, що пред'являються до конструкцій і елементів з'єднувачів (металеві, керамічні).

Величина зворотного розсіяння може бути істотно знижена при використанні з'єднувачів з кутовим фізичним контактом (Angled PC - APC) (рис. 7.4, в). При нахилі торців, навіть за відсутності фізичного контакту, відбита частина потужності не розповсюджується назад по серцевині ОВ, а йде в оболонку. Втрати на зворотне віддзеркалення для APC - з'єднувачів нижче мінус 60 дб. Для стандартного східчастого одномодового ОВ кут нахилу  $\beta = 8^\circ$ , що приводить до втрат на зворотне віддзеркалення близько мінус 70 дб. При використанні одномодового ОВ із зміщеною дисперсією, яке має велику числову апертуру в порівнянні із східчастим, для забезпечення низьких втрат на зворотне віддзеркалення кут нахилу роблять більше, зазвичай  $\beta = 12^\circ$ .

Як варіант APC - з'єднання може бути використаний сферично опуклий-увігнутий фізичний контакт (рис. 7.4, г). При цьому опуклий торець щільно входить в увігнутий торець співвісно серцевинам. Втрати на зворотне віддзеркалення такого з'єднувача нижче мінус 75 дб. Проте для нього має значення напрям передачі світлового потоку, тому що інакше відбита частина потужності не йде в оболонку. APC - з'єднувачі зважаючи на складність технології виготовлення і високої вартості



використовуються в гібридних волоконно-коаксіальних мережах широкопasmового доступу і високошвидкісних цифрових оптичних магістралях.

При з'єднанні волокон за допомогою неузгоджених механічних або оптичних роз'ємних з'єднувачів, коли існує дві (скло/повітря/скло) межі розділу середовищ, коефіцієнт передачі з'єднання  $K_3$  знаходиться за формулою:

$$K_3 = \left[ \frac{4n_1n_0}{(n_1 + n_0)^2} \right]^2 = \frac{16(n_1/n_0)^2}{[1 + (n_1/n_0)]^4}, \quad (7.7)$$

де  $n_1$  - показник заломлення серцевини ОВ;  $n_0$  - показник заломлення оточуючого середовища (повітря).

Якщо  $n_1=1,46$  - показник заломлення кварцового скла, а  $n_0=1$  - показник заломлення повітря, тоді  $K_3=0,93$  і втрати  $a_{\text{фр}} \approx 0,315$  дБ, що є теоретичним мінімумом втрат на таких з'єднаннях. Для їх зменшення використовують імерсійні речовини, які мають показник заломлення, що збігається, або майже збігається з показником заломлення серцевини ОВ і світлова хвиля переходить з одного ОВ до іншого з невеликим відбиттям, тобто з малими втратами (як правило, не більше 0,2 дБ).

При наявності поперечного зсуву потужність світлової хвилі залежить від профіля показника заломлення, величини поперечного зсуву та діаметра серцевини (рис. 7.5). Для східчастих та градієнтних багатомодових ОВ коефіцієнти передачі з'єднання визначаються за формулами, відповідно:

$$K_{3x}^{\text{cx}} = \frac{16\gamma^2}{\pi(1+\gamma)^4} \left\{ 2 \cos^{-1} \left( \frac{x}{2a} \right) - \left[ \frac{x}{a} \left( 1 - \frac{x^2}{4a^2} \right) \right]^{1/2} \right\}; \quad (7.8)$$

$$K_{3x}^{\text{ep}} = \frac{16\gamma^2}{\pi(1+\gamma)^4} \left\{ 2 \cos^{-1} \left( \frac{x}{2a} \right) - \frac{x}{a} \left( 4 - \frac{x^2}{a^2} \right)^{1/2} \left[ 1 - \frac{1}{12} \left( 2 + \frac{x^2}{a^2} \right) \right] \right\}. \quad (7.9)$$

де:  $\gamma = \frac{n_2}{n_1}$ ,  $n_1$  - показник заломлення серцевини ОВ (для градієнтних ОВ - найбільше значення показника заломлення);  $n_2$  - показник заломлення відбиваючої оболонки ОВ;  $x$  - величина поперечного зсуву;  $2a$  - діаметр серцевини ОВ.

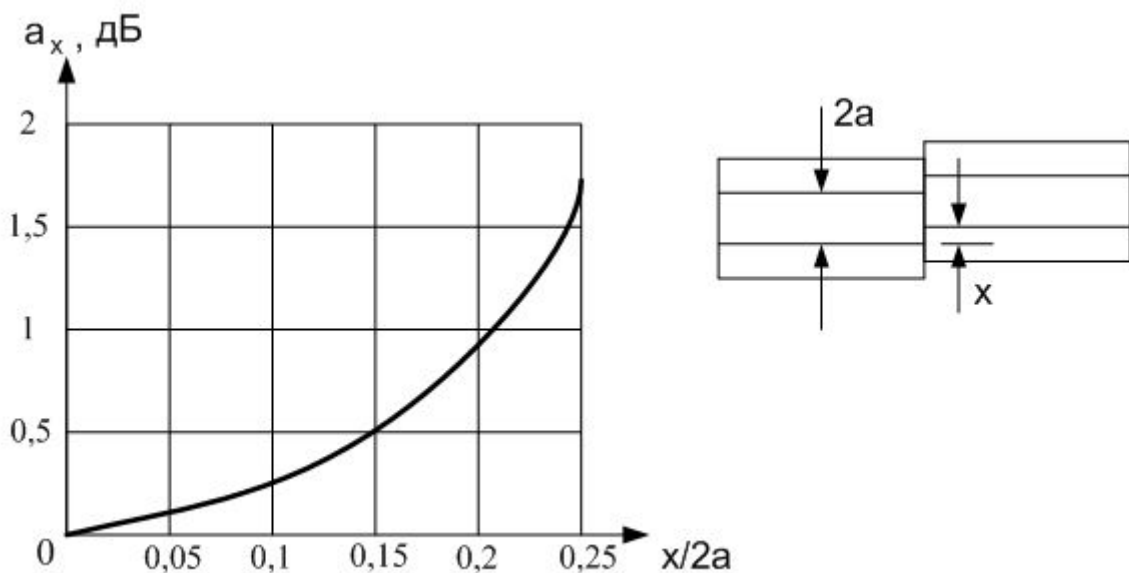


Рисунок 7.5 – Втрати в з'єднаннях при наявності поперечного зсуву

Для одномодових ОВ, з гаусовим розподілом поля, коефіцієнт передачі з'єднання можна знайти за формулою:

$$K_{3x}^{OM} = \frac{16\gamma^2}{(1+\gamma)^4} e^{-(x/W)^2}, \quad (7.10)$$

де  $W$  – діаметр модового поля – величина, що характеризує область перетину ОВ, за яким розповсюджується більша частина енергії робочої хвилі.

Для гаусового розподілу діаметр  $W$  наближено можна розраховувати за формулою:

$$W = a(0,65 + 1,619V^{-1,5} + 2,879V^{-6}), \quad (7.11)$$

де  $V \approx \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ;  $\lambda$  – робоча довжина хвилі.

Втрати в з'єднаннях з поперечним зсувом можна знайти за формулою  $10 \lg K_3$ .

Кутові зсуви ОВ (рис. 7.6) досить часто виникають при з'єднанні волокон за допомогою механічних та роз'ємних з'єднувачів. Енергія світлової хвилі, яка пройшла через з'єднувач залежить:

- від показника заломлення серцевини, оболонки ОВ, і кутового зсуву при використанні багатомодового ОВ;
- від показника заломлення серцевини, оболонки ОВ, кутового зсуву, діаметра модового поля, і довжини хвилі при використанні одномодового ОВ.

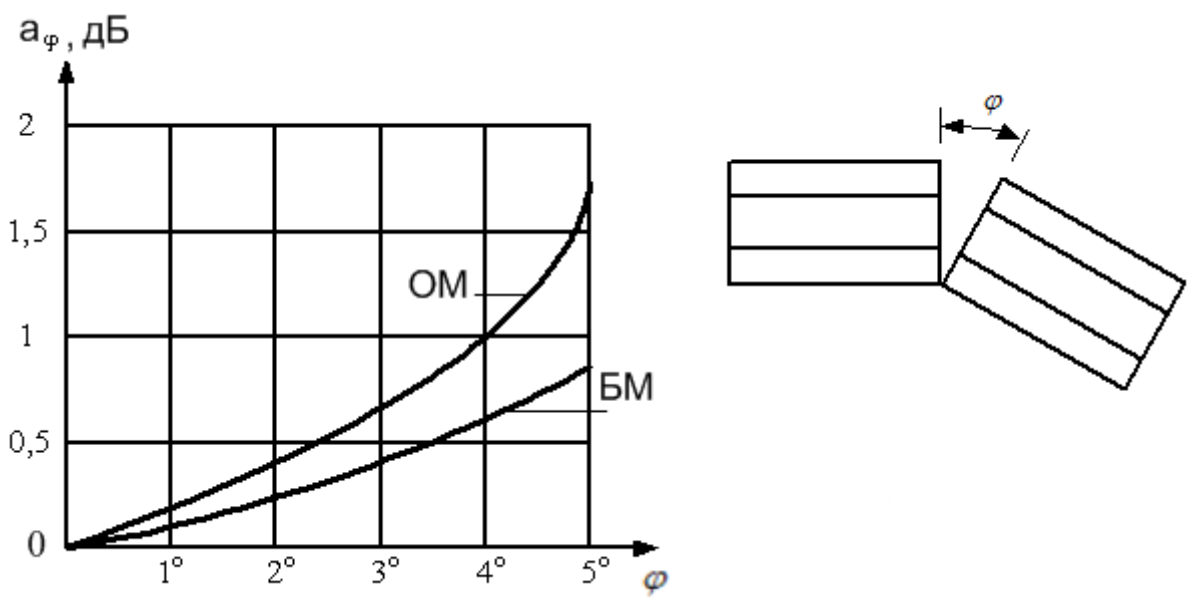


Рисунок 7.6 – Втрати в з'єднаннях при наявності кутового зсуву

Таким чином, втрати на з'єднаннях з кутовим зсувом ОВ можна також визначити як  $10 \lg K_3$ , а коефіцієнт передачі для багатомодових ОВ зі східчастим та градієнтним профілем показника заломлення за формулами:

$$K_{3\varphi}^{cx} = \frac{16\gamma^2}{(1+\gamma)^4} \left[ 1 - \frac{\varphi}{\pi k (2\Delta)^{1/2}} \right]; \quad (7.12)$$

$$K_{3\varphi}^{ep} = \frac{16\gamma^2}{(1+\gamma)^4} \left[ 1 - \frac{8\varphi}{3\pi k (2\Delta)^{1/2}} \right]. \quad (7.13)$$

Для одномодових ОВ:

$$K_{3\varphi}^{OM} = \frac{16\gamma^2}{(1+\gamma)^4} e^{-(\pi n_2 W \varphi / \lambda)^2}, \quad (7.14)$$

де  $\varphi$  – кутове зміщення,  $\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ .

При використанні механічних з'єднувачів досить часто виникають втрати енергії світлової хвилі внаслідок наявності зазору між торцями ОВ (рис. 7.7). Такі втрати можна знайти за формулою  $10 \lg K_3$ , а коефіцієнт передачі з'єднання для багатомодового ОВ за формулою:

$$K_{3s}^{BM} = \frac{16\gamma^2}{(1+\gamma)^4} \left[ 1 - \frac{s}{4a} \gamma (2\Delta)^{1/2} \right]; \quad (7.15)$$

Для одномодового ОВ:

$$K_{3s}^{OM} = \frac{(2\pi n_2 W^2)^2}{1 + (\lambda s)^2}; \quad (7.16)$$

де  $s$  – відстань між торцями ОВ.  
 $a_s$ , дБ

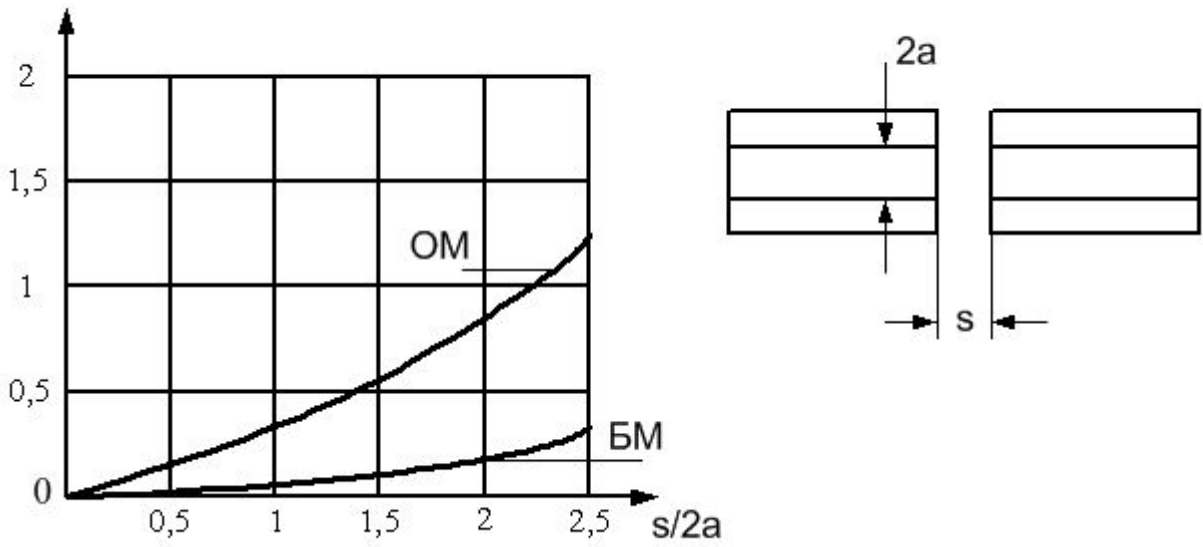


Рисунок 7.7 – Втрати в з'єднаннях при наявності зазору

Серед факторів, які обумовлюють внутрішні втрати в з'єднаннях ОВ найбільш істотними є різниця в діаметрах серцевин (рис. 7.8) та числових апертурах (рис. 7.9).

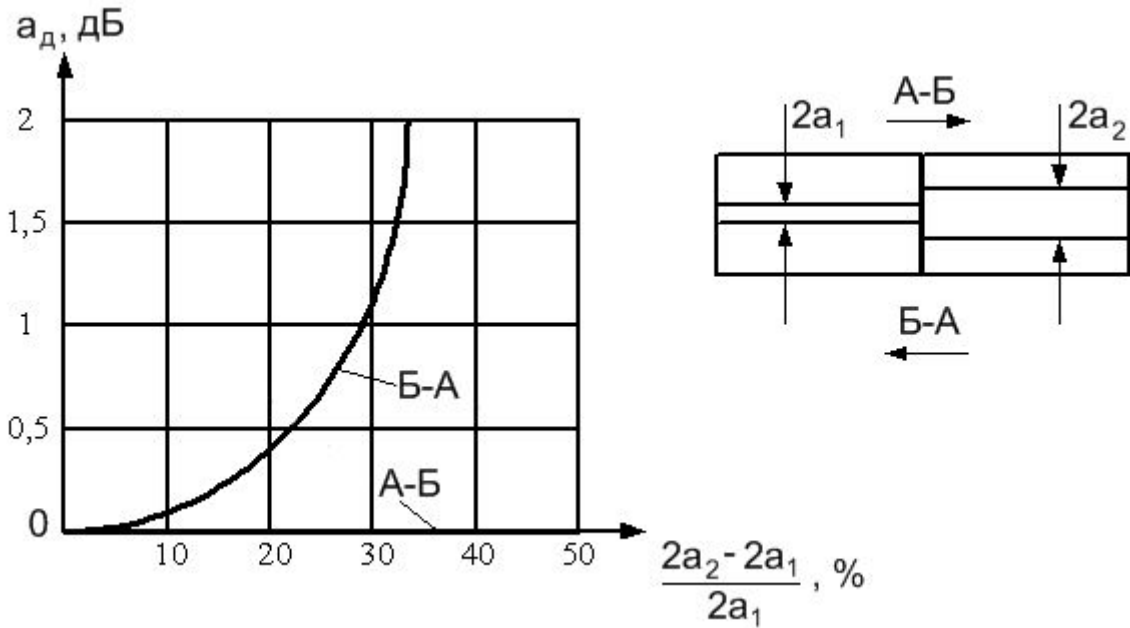


Рисунок 7.8 – Втрати в з'єднаннях при різниці в діаметрах серцевин ОВ

Наведені співвідношення є досить точними, але вони були отримані методом наближення і можуть використовуватись лише для вузького класу ОВ.



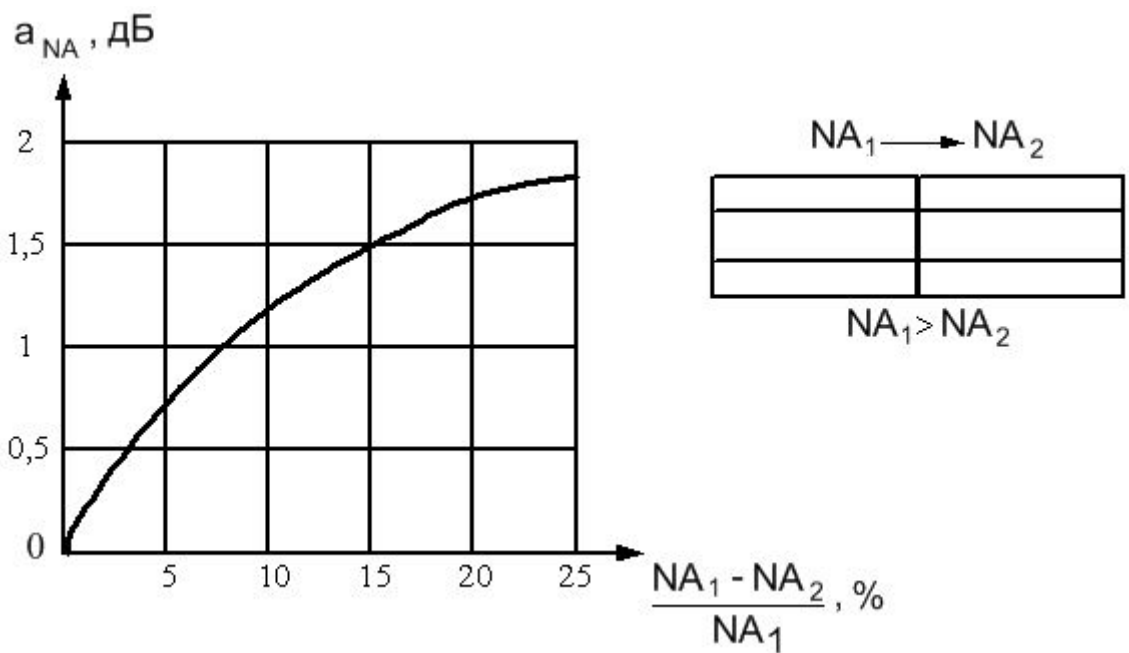
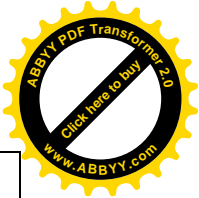
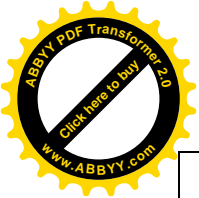


Рисунок 7.9 – Втрати в з'єднаннях при різниці апертур

Формули для розрахунку втрат, що вносяться, при ідеальному з'єднанні неідентичних ОВ приведені в табл. 7.3 для одномодових і багатомодових ОВ.

Таблиця 7.3 – Втрати при ідеальному з'єднанні ОВ

Тип ОВ	Чинники, що обумовлюють втрати	Розрахункова формула, дБ
БМ	Відмінність в діаметрах серцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Відмінність в значеннях числових апертур $NA_1 > NA_2$	$a_{NA} = -10 \lg \frac{NA_1^2 - NA_2^2}{NA_1^2}$
	Поперечний зсув (між осями) $x$	$a_x = -10 \lg \frac{4x}{\pi d}, \quad d = 2a$
	Кутовий зсув (нахил торців) $\varphi$	$a_\varphi = -10 \lg \left( 1 - \frac{2\varphi}{\pi\sqrt{2\Delta}} \right), \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
	Френелеве віддзеркалення від торців	$a_\varphi = -10 \lg \left[ 1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$
ОМ	Відмінність в діаметрах модових полів $2w_1 > 2w_2$	$a_w = -10 \lg \frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2}$
	Відмінність в діаметрах серцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Поперечний зсув (між осями) $x$	$a_x = -10 \lg \left[ \exp \left( -\frac{x^2}{w^2} \right) \right]$



	Кутовий зсув (нахил торців) $\varphi$	$a_{\varphi} = -10 \lg \left[ \exp \left( -\frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
	Френелєве віддзеркалення від торців	$a_{\varphi} = -10 \lg \left[ 1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$

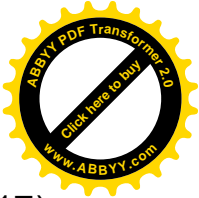
Втрати через відмінності діаметрів ОВ виникають, коли діаметр передавального ОВ  $2a_1$  більше діаметру приймального ОВ  $2a_2$ . Інакше втрати не виникають. Аналогічно, якщо числова апертура  $NA_1 < NA_2$ , те втрати відсутні. Втрати внаслідок френелєвого віддзеркалення існують завжди через відмінності показників заломлення серцевин ОВ незалежно від напрямку розповсюдження світлової хвилі.

Формули для розрахунку зовнішніх втрат, що виникають в з'єднаннях однакових ОВ різних типів зведені в табл. 7.4.

**Таблиця 7.4 – Зовнішні втрати при з'єднанні ОВ різних типів**

Тип ОВ	Подовжній зсув $s$ , дБ	Поперечний зсув $x$ , дБ	Кутовий зсув $\varphi$ , дБ
Багатомодове східчасте	$a_s = -10 \lg \left( 1 - \frac{sNA}{4an_o} \right)$	$a_x = -10 \lg \left[ \frac{2}{\pi} \left( \arccos \frac{x}{2a} - \frac{x}{2a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{4a^2}} \right) \right]$ , $a_x = 10 \lg \left( 1 - \frac{2x}{\pi a} \right)$ , $\frac{x}{a} < 0,2$	$a_{\varphi} = -10 \lg \left( 1 - \frac{n_o \varphi}{\pi NA} \right)$
Багатомодове градієнтне	$a_s = -10 \lg \left( 1 - \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{sNA}{an_o} \right)$ (для малих $s$ )	$a_x = -10 \lg \left( 1 - \frac{8x}{3\pi a} \right)$ (для малих $x$ )	$a_{\varphi} = -10 \lg \left( 1 - \frac{8\varphi}{3\pi \frac{n_1}{n_o} \sqrt{2\Delta}} \right)$ , $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
Одномодове східчасте	$a_s = -10 \lg \left[ \frac{4(z^2 + 1)}{(4z^2 + 2)^2 + 4z^2} \right]$ , $z = \frac{3\lambda}{2\pi n_2 w^2}$	$a_x = -10 \lg \exp \left( -\frac{x^2}{w^2} \right)$	$a_{\varphi} = -10 \lg \exp \left[ -\left( \frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
Втрати френелєвого віддзеркалення	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left( \frac{2n_1 n_o}{n_1^2 + n_o^2} \right)$	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left[ \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$	–

Повні світлові втрати в з'єднанні багатомодових ОВ визначаються як:



$$\alpha_{\Sigma}^{\text{БМ}} = \sqrt{a_d^2 + a_{\text{ВА}}^2 + a_x^2 + a_{\varphi}^2 + a_{\text{ФР}}^2} . \quad (7.17)$$

Повні світлові втрати в з'єднанні одномодових ОВ визначаються за формулою:

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{ОМ}} = \sqrt{a_d^2 + a_{\text{В}}^2 + a_x^2 + a_{\varphi}^2 + a_{\text{ФР}}^2} . \quad (7.18)$$

Із зробленого вище аналізу видно, що не всі фактори однаково впливають на втрати в з'єднаннях при різних типах ОВ та з'єднувачів. Для багатомодових ОВ з градієнтним ППЗ найбільш істотними є внутрішні фактори: різниця діаметрів серцевин та числових апертур. А із зовнішніх впливів – поперечна неузгодженість та непаралельність вісей ОВ.

Досить часто, в процесі монтажу ОК, при знятті оптичного модуля відбувається часткове витягування ОВ із захисної трубки. Після закінчення монтажу ОВ повертається до первинного стану. При цьому виникають мікрОВигини, що являють собою малі відхили вісі ОВ від прямої лінії. Втрати енергії, що виникають внаслідок утворення таких мікрОВигинів  $A_{i.A}$  можна знайти за формулою:

$$\alpha_{\text{МБ}}^{\text{БМ}} = \frac{h_{\text{МБ}}^2 a^4}{D^6 \Delta^3} , \quad (7.19)$$

де  $h_{\text{МБ}}$  – висота або радіус мікрОВигинів;  $a$  – радіус серцевини ОВ;  $D$  – зовнішній діаметр ОВ;  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  – відносна різниця показників заломлення.

На відміну від багатомодового ОВ, втрати на мікрОВигинах в одномодовому ОВ залежать від довжини хвилі та знаходяться за формулою:

$$\alpha_{\text{МБ}}^{\text{ОМ}} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{h_{\text{МБ}}^2 a^2}{D^6 \Delta^3} \cdot \frac{W^6}{\lambda^4} , \quad (7.20)$$

На перший погляд з ростом довжини хвилі втрати на мікрОВигинах повинні зменшуватись. Але це не так, оскільки з ростом довжини хвилі зростає і діаметр модового поля, що в свою чергу призводить до зростання втрат на мікрОВигинах (рис. 7.10).

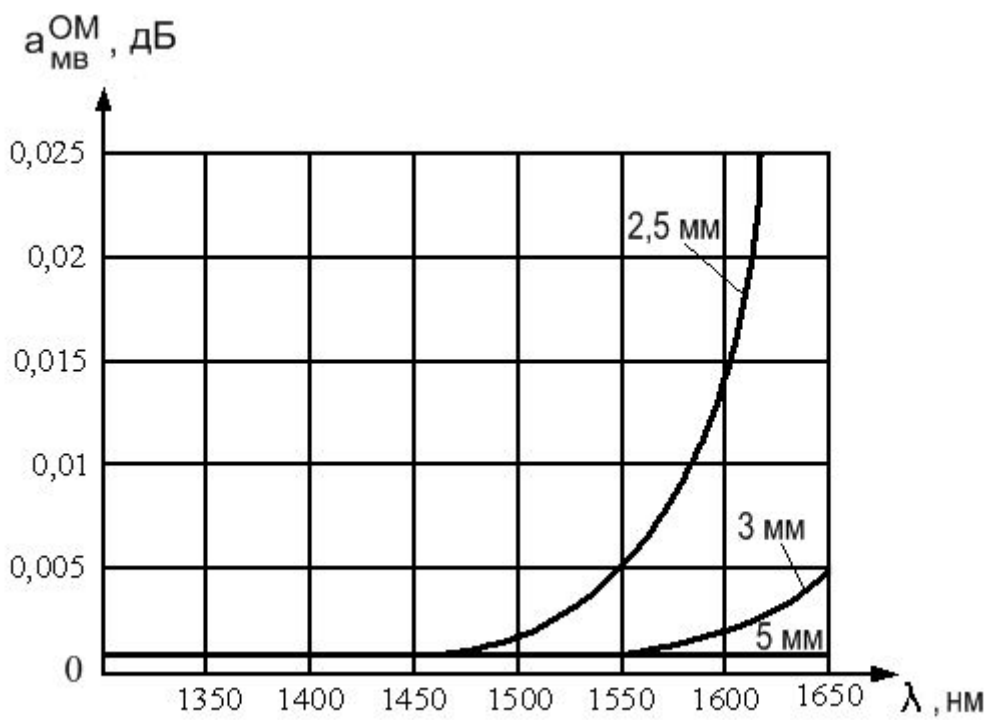


Рисунок 7.10 – Втрати на мікрОВИГАХ одномодового ОВ при різних значеннях  $h_{ГЕ}$

При укладанні технологічного запасу ОВ на касеті з'єднувальної муфти виникають значні вигини ОВ. Вони призводять до того, що частина світла перестає відбиватись від оболонки, а починає в ній розповсюджуватись і таким чином втрачатись. Такі вигини мають назву макровигини. Теоретично, енергія, що при цьому розсіюється експоненціально залежить від радіусу вигину  $R_{\text{дв}}$ , тобто втрати на нього будуть пропорційні  $\exp(-R/R_{\text{кр}})$ , де  $R_{\text{кр}} \approx a/2n \cdot \Delta n$  – критичний радіус вигину. На практиці втрати на макровигинах можна визначити за формулою:

$$a_{\text{МКВ}}^{\text{ОМ}} = 10 \lg \left[ \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - \frac{(R+1)^2}{(R-1)^2} \cdot n_2^2} \right], \quad (7.21)$$

де  $R = R_{\text{дв}} / 2a$ , (рис. 7.11).

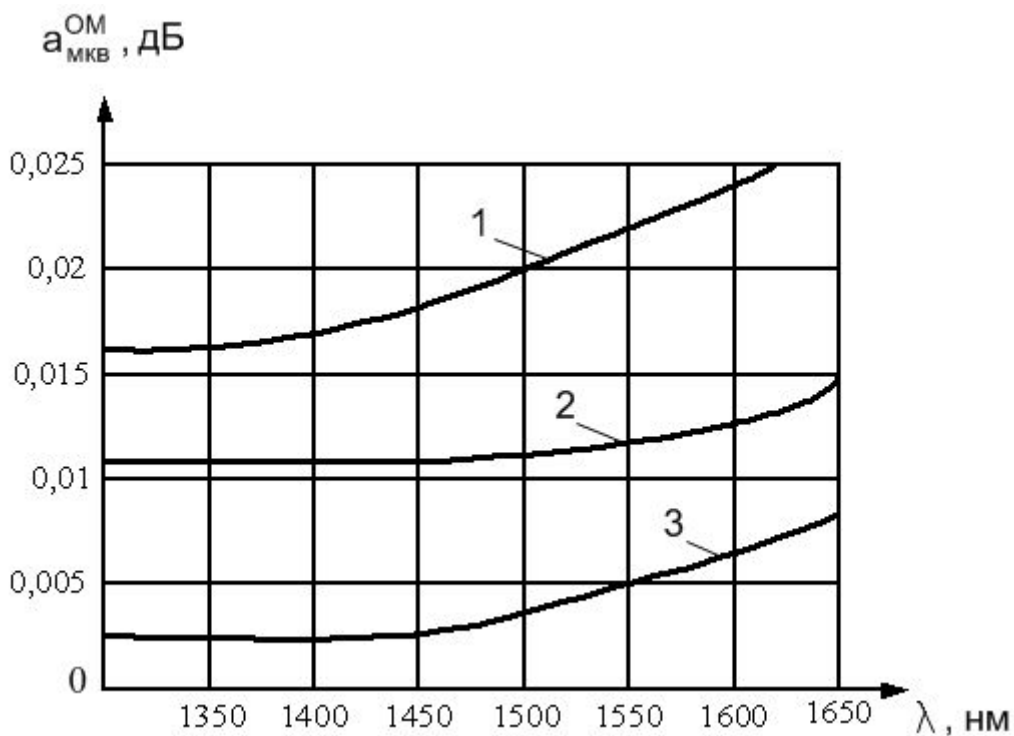
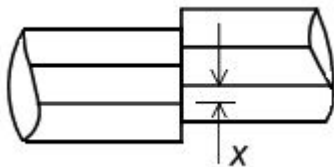


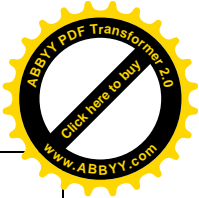
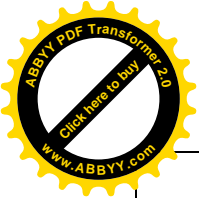
Рисунок 7.11 – Втрати на макровигинах одномодового ОВ:  
 1 –  $W=10$  мкм,  $a=9$  мкм; 2 –  $W=9,5$  мкм,  $a=8,3$  мкм;  
 3 –  $W=8,8$  мкм,  $a=8,3$  мкм

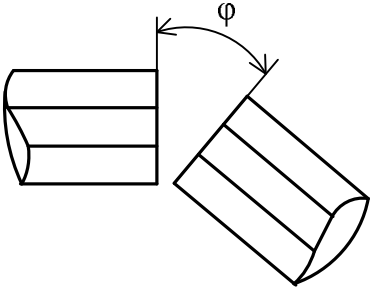
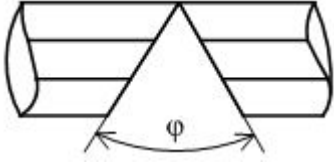
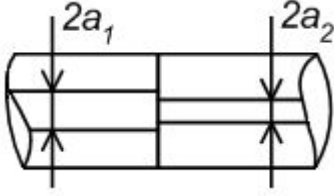
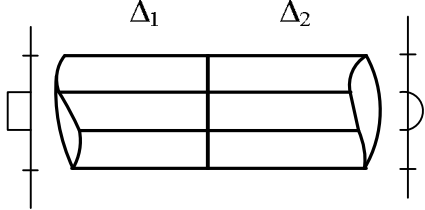
На практиці, мінімально дозволений радіус вигину ОВ визначається, не з мінімуму втрат енергії, а з механічних властивостей ОВ. Таким чином, мінімальний дозволений радіус вигину ОВ прийнято рахувати рівним 37,5 мм. Його прийняли для запобігання відказів ОВ через механічну втому. Додаткові втрати при цьому, як правило, незначні. Але при досить великих довжинах регенераційних ділянок (70...80 км і більше) значно зростає кількість муфт, що призводить до зростання кількості макровигинів. Тому рекомендовано, щоб загальна кількість витків, що виникають при укладанні технологічного запасу ОВ, не повинна перевищувати ста, а додаткові втрати, що вносяться цими витками, не повинні перевищувати 1,0 дБ.

Результати розрахунків втрат, що виникають при з'єднаннях ОВ, виконаних за наведеними вище формулами, подано в табл. 7.5.

Таблиця 7.5 – Результати розрахунків втрат при з'єднаннях ОВ

Вид фактору	Вигляд з'єднання ОВ	Одномодові	Багатомодові
Поперечний зсув		$x=2$ мкм $a=0,74$ дБ	$x=2$ мкм $a=0,06$ дБ



Кутовий зсув		$\varphi=1^\circ$ $a=0,46$ дБ	$\varphi=1^\circ$ $a=0,15$ дБ
Неякісне сколювання		$\varphi=1^\circ$ $a=0,21$ дБ	$\varphi=1^\circ$ $a=0,03$ дБ
Різниця діаметрів серцевин при їх співвісності		$2a_1=10$ мкм $2a_2=8$ мкм $a=0,02$ дБ	$2a_1=50$ мкм $2a_2=48$ мкм $a=0,15$ дБ
Різниця профілів при співвісності серцевин		$\Delta_1=0,2$ % $\Delta_2=0,25$ % $a=0,03$ дБ	$\Delta_1=1,0$ % $\Delta_2=0,8$ % $a=0,32$ дБ

## 8 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

### 8.1 Вимірювання втрат, що вносяться

Для вимірювання втрат, що вносяться пасивним оптичним ланцюгом (з'єднувач, розгалужувач, і ін.), необхідно виконати вимірювання двох значень потужності: на вході  $P_{\hat{a}\hat{o}}$  і виході  $P_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}$  (або відповідних ним рівнів потужності  $p_{\hat{a}\hat{o}}$  і  $p_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}$  дБм). Після цього знаходимо

$$a_{\hat{o}\hat{e}} = \begin{cases} 10 \lg \frac{P_{\hat{a}\hat{o}}}{P_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}, & \hat{a}\hat{A} \\ p_{\hat{a}\hat{o}}(\hat{a}\hat{A}\hat{i}) - p_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(\hat{a}\hat{A}\hat{i}), & \hat{a}\hat{A} \end{cases} \quad (8.1)$$

Вимірювання цього параметра для оптичних з'єднувачів виконується одним з наступних методів.

1. **Метод обриву** полягає в наступному. Спочатку до входу і виходу відрізка короткого волокна (міні-кабелю) приєднують відповідно джерело

випромінювання (ДВ) і вимірник оптичної потужності (ВОП) і реєструють потужність  $P_{\text{вв}}$ . Потім розривають волокно (кабель) і після торцювання кінців, що утворилися відповідними частинами з'єднувача, знов сполучають і реєструють нове (менше) значення оптичної потужності і по формулах (8.1) розраховують втрати, що вносяться.

Втрати, що зазвичай вносяться з'єднувачем, залежать від типу волокна і конструкції з'єднувача і складають 0,3... 0,5 дБ. Приведена методика вимагає спеціального лабораторного устаткування для оснащення волокон з'єднувачами. Зокрема необхідні пристрої сколювання і ручної (машинної) поліровки торців волокон, піч для прискорення полімеризації епоксидного клею, тощо. За відсутності такого устаткування використовують стандартний метод.

2. **Стандартний метод** полягає в тому, що збирають стенд відповідно до рис. 8.1. На цьому рисунку ДВ - світлодіодне джерело випромінювання; ВОП - вимірник оптичної потужності; ОК1 і ОК2 - відрізки оптичних кабелів, оторцьованих з'єднувачами 1-2 і 3-4. Втрати вимірюють в з'єднувачі 2-3 (обведений пунктиром) і виконують в два етапи.

На першому етапі (рис. 8.1, а) вимірюють потужність  $P_{\text{вх}}$  (рівень  $p_{\text{вх}}$ ). На другому етапі (рис. 8.1, б), після приєднання до ОК1 відрізка ОК2, вимірюють потужність  $P_{\text{вв}}$  (рівень  $p_{\text{вв}}$ ) на виході останнього. Втрати розраховують, як і раніше, за формулами (8.1).

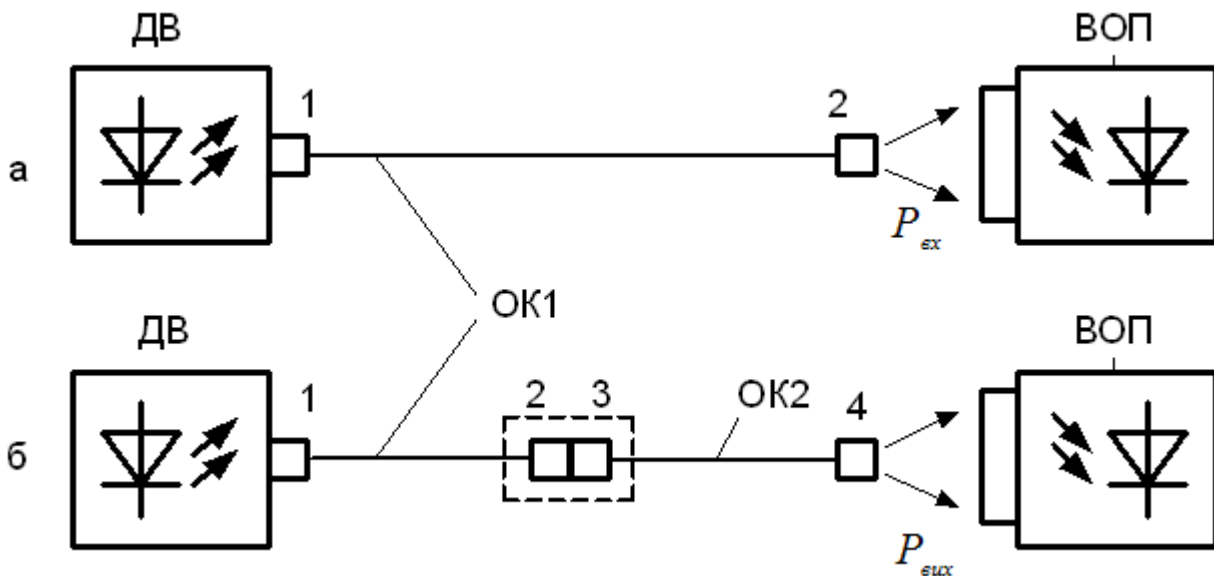
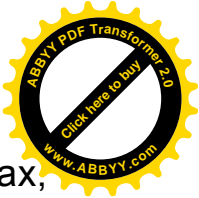


Рисунок 8.1 - Структурна схема вимірювання втрат, що вносяться, стандартним методом

Існує ряд необхідних умов вимірювань вказаними методами:

1. Джерело випромінювання на основі СД повинне забезпечувати необхідну стабільність потужності випромінювання.
2. Втрати у вхідному з'єднувачі 1 повинні мати добру повторюваність для забезпечення постійності вхідної потужності.





3. Для БОВ з'єднувачів, які використовуються в локальних мережах, необхідне збудження всіх мод, що направляються.

4. Для БОВ з'єднувачів, вживаних в мережах зв'язку, необхідно забезпечити сталий модовий склад випромінювання і видалити моди оболонки на ділянці до вимірюваного з'єднувача (пара 2-3).

5. Для ООВ необхідно забезпечити збудження тільки основної (фундаментальної) моди.

6. ВОП повинен мати ФД з великою площею для реєстрації всіх променів в конусі випромінювання зі з'єднувача 2 або 4.

Виробники оптичних компонентів в документації на з'єднувач часто указують значення втрат, відповідне випадку його стиковки з добрим (еталонним) протилежним з'єднувачем. Тому для визначення реальних втрат необхідно провести вимірювання "кожного з кожним" і знайти середнє і максимальне значення втрат для з'єднувачів.

3. **Метод МСЕ** (Міжнародного союзу електрозв'язку) заснований на вимірюванні усередненого загасання, що вноситься з'єднувачами при їх послідовному з'єднанні. З партії виробів вибирається як мінімум 10 відрізків кабелю, оторцьованих з'єднувачами і відповідно 10 перехідних розеток. Вимірювання виконуються у декілька етапів. На першому етапі (режим калібрування) збирається вимірювальний стенд (рис. 8.2), що складається зі світлодіодного джерела випромінювання 1, змішувача мод 2, фільтру мод оболонки 3, вимірника оптичної потужності з ФД великої площі 4, кабелів введення світла, аналогічних вимірюваним зразкам 5; кабелів для виведення світла, що мають ОВ з великими діаметрами серцевин і значеннями числових апертур, тобто більше ніж у вимірюваних ОВ.

Світло від СД вводиться в кабель 2, намотаний на облямовування діаметром близько 20 мм, що є одним з варіантів реалізації змішувача мод. Потім фільтр мод оболонки 3 видаляє оболонкові моди і підготовлений таким чином вимірювальний сигнал подається в кабель введення 5. Кабель виводу 6, як уже згадувалося, має волокно з великими серцевиною і числовою апертурою, щоб звести до мінімуму вплив поперечного зсуву в з'єднувачі. У цьому з'єднувачі повинен бути створений повітряний зазор не менше 25 мкм.

На першому кроці (рис. 8.2, а), записують величину оптичної потужності  $P_0$ , що випромінюється торцем кабелю 6 (це значення відповідає вхідній оптичній потужності).

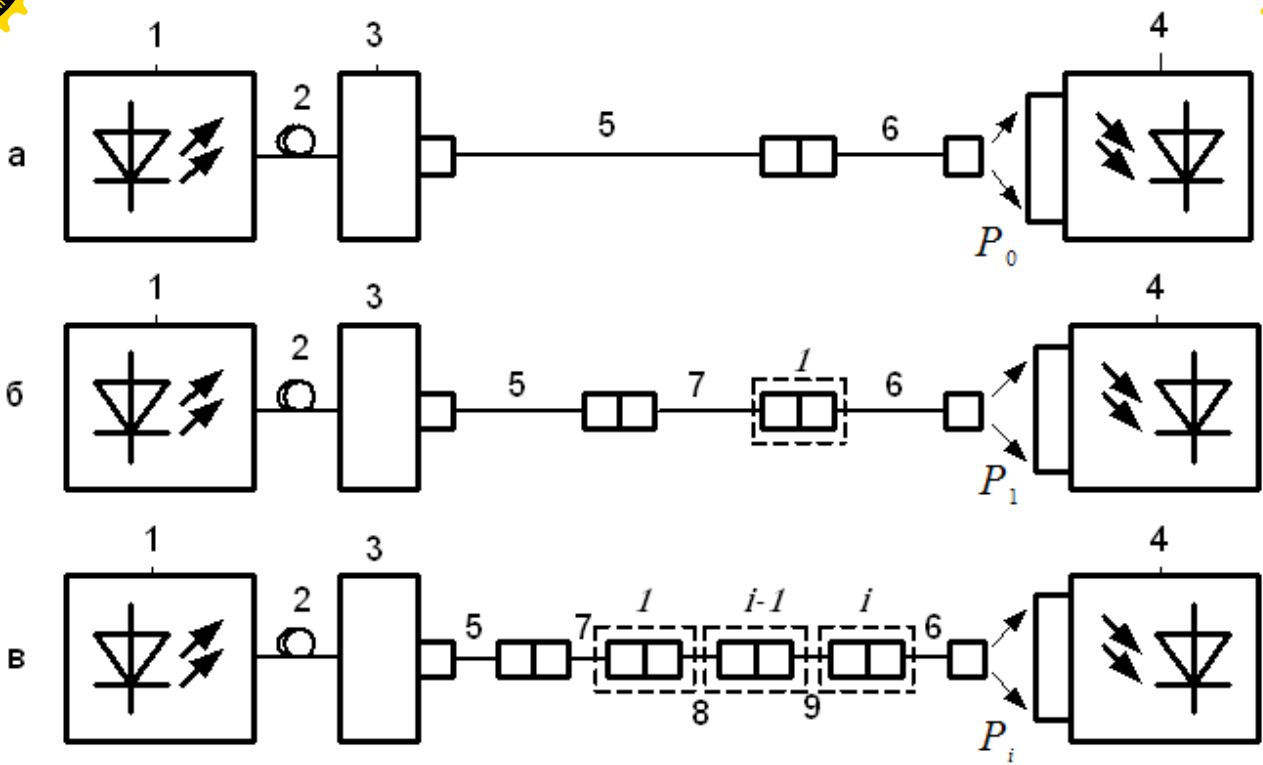


Рисунок 8.2 – Структурна схема вимірювального стенду методом МСЄ

На другому кроці (рис. 8.2, б) між кабелями введення 5 і прийому 6 включають перший кабель 7 за допомогою з'єднувачів, що підлягають вимірюванню. Вимірюють і записують величину потужності  $P_1$  на виході кабелю прийому 6. Втрати, що вносяться з'єднувачем (обведений штриховою лінією), рівні  $a_1 = -10 \lg \frac{P_1}{P_0}$ , дБ. На  $i$ -му кроці між кабелями введення 5 і прийому 6 включаються кабелі 7, 8 ...,  $i$  (оснащені з'єднувачами), як показано на рис. 8.2, в. Величина втрат в з'єднувачі між кабелями  $i-1$  та  $i$ :  $a_i = -10 \lg \frac{P_i}{P_{i-1}}$ , дБ.

Цю процедуру повторюють для всіх десяти вимірюваних зразків. Після проведення випробувань обчислюється середнє значення втрат в з'єднувачі і стандартне відхилення. У кожній країні встановлюється граничне значення загасання, що вноситься з'єднувачами. Типовими є значення:

- для багатомодових ОВ з'єднувачів:  $a_{\text{нб}} \leq 0,6 \text{ дБ}$ ,  $a_{i \text{ дбн}} \leq 1,5 \text{ дБ}$ ;
- для одномодових ОВ з'єднувачів:  $a_{\text{нб}} \leq 0,5 \text{ дБ}$ ,  $a_{i \text{ дбн}} \leq 1,0 \text{ дБ}$ .

Як приклад на рис. 8.3, а приведена діаграма розподілу втрат одномодового ОВ, що вносяться з'єднувачами типу Diamond HMS-10/HP. Для них середня величина загасання, що вноситься – 0,36 дБ, стандартне відхилення – 0,17 дБ.

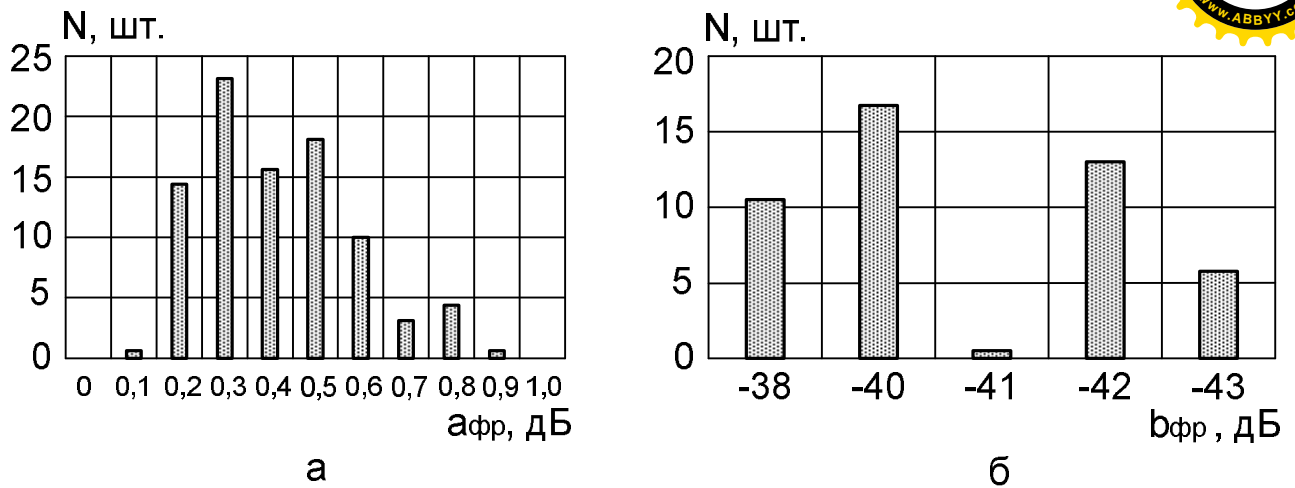


Рисунок 8.3 – Діаграми розподілу втрат в одномодових ОВ з'єднувачах HMS-10/HP: а – втрати, що вносяться, б – зворотні втрати

## 8.2 Вимірювання зворотних втрат

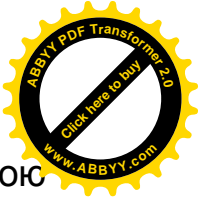
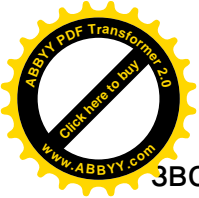
Для визначення зворотних втрат необхідно зміряти два значення потужності: падаючої  $P_{\ddot{a}\ddot{a}}$  та відбитої  $P_{\ddot{a}\ddot{o}}$  (або відповідні ним рівні оптичної потужності  $p_{\ddot{a}\ddot{a}}$  і  $p_{\ddot{a}\ddot{o}}$ ). Після цього розраховується

$$b_{\ddot{o}\ddot{o}} = \begin{cases} 10 \lg \frac{P_{\ddot{a}\ddot{a}}}{P_{\ddot{a}\ddot{o}}}, & \ddot{a}\ddot{A} \\ p_{\ddot{a}\ddot{a}}(\ddot{a}\ddot{A}i) - p_{\ddot{a}\ddot{o}}(\ddot{a}\ddot{A}i), & \ddot{a}\ddot{A}. \end{cases} \quad (8.2)$$

Основною проблемою при вимірюванні зворотних втрат є реєстрація вельми низьких рівнів відбитої (розсіяною назад) потужності, оскільки для з'єднувачів з фізичним контактом  $b_{\ddot{o}\ddot{o}} \approx -40$  дБ, тобто потужність відбитого сигналу складає 0,01% від падаючого. Для вимірювання цього параметра використовуються два методи.

**1. Рефлектометрія в часовій області** (розділ 9) може бути використана для вимірювання віддзеркалених сигналів. Рефлектометр може бути відкалібрований за допомогою рефлектора – добре сколюваного торця волокна, який дає  $b_{\ddot{o}\ddot{o}} = -14,5$  дБ, для ОВ з  $n_1 = 1,46$ . Рефлектометром (або іншим пристроєм) часто не вдається зміряти зворотні втрати в з'єднувачі із-за недостатньої роздільної здатності рефлектометра по довжині, коли тестується короткий відрізок кабелю із з'єднувачем.

**2. Стандартний метод** використовує зварний розгалуджувач, лазерне джерело випромінювання і ВОП. На рис. 8.4 показана структурна схема стенду для вимірювання зворотних втрат в одномодових ОВ з'єднувачах. Одномодовий ОВ розгалуджувач (ООВР) оторцьован з'єднувачами 1-4, ОК1 і ОК2 - короткі відрізки одномодового ОВ кабелю, оснащеного з'єднувачами 4-5 і 6-7, відповідно. Величина



зворотних втрат вимірюється для з'єднувача 6-7 (обведений пунктирною лінією), з'єднувач 4-5 – допоміжний. Вимірювання проводять в три етапи.

Етап 1. Стенд калібрується по рівню зворотних втрат -14,5 дБ (відбиття від з'єднувача 6); записуються результати  $P_1$ .

Етап 2. Вимірюється небажана відбита від допоміжного з'єднувача 4-5 потужність. Для запобігання відбиттям від торця ОК1, з'єднувач 6 поміщають в іммерсійну рідину з  $n_p \approx n_1$ . Фіксуються результати ВОП –  $P_2$ .

Етап 3. Вимірюється сума відбитих потужностей від з'єднувача, який тестується (пара 6-7) і небажаний потужності від з'єднувача 4-5. Вільний кінець ОК2 (з'єднувач 8) поміщають в іммерсійну рідину. Визначаються результати ВОП –  $P_3$ .

Шукана величина зворотних втрат тестованого з'єднувача 6-7 знаходиться за формулою

$$b_{\delta\delta} = -14,5 \text{ дБ} - \lg \frac{P_1 - P_2}{P_3 - P_2}, \text{ дБ.}$$

Приведений метод дозволяє вимірювати зворотні втрати - 40 дБ і менше. Відзначимо основні вимоги, які необхідно виконувати при проведенні вимірювань:

- бажано застосовувати лазерне ДВ для збільшення низьких рівнів назад відбитої потужності;

- довжина ОК1 повинна бути більше, ніж довжина когерентності лазера, оскільки вимірювання базуються на підсумовуванні відбитих потужностей (а не електричних полів) від пар з'єднувачів 4-5 і 6-7;

- з'єднувач 4-5 повинен бути кращої якості, чим тестований з'єднувач 6-7;

- ВОП повинен мати високу лінійність в широкому діапазоні вимірюваних потужностей;

- розгалуджувач повинен мати слабку залежність параметрів від стану поляризації випромінювання, оскільки прямий і зворотний сигнали мають різну поляризацію;

- розташування кінців 6 і 8 ОК1 і ОК2 (етапи 2 і 3) в поглинаючу (іммерсійну) рідину забезпечує рівень відбитої від них потужності набагато менший, ніж від вимірюваних на цих етапах з'єднувачів 4-5 і 6-7. Відзначимо, що якість полірування торців ОК1 і ОК2 надає істотний вплив на рівень відбиття від торців, які розміщені в поглинаючій рідині.

Зворотні втрати в БОВ з'єднувачах можуть бути виміряні аналогічним чином при заміні розгалуджувача, з'єднувачів і кабелів ОК1 і ОК2 на багатомодові.

На рис. 8.3, б приведені діаграми розподілу зворотних втрат в одномодових з'єднувачах HMS-10/HP. Середнє значення зворотних втрат - 49,9 дБ, стандартне відхилення 1,39 дБ.



## 9 ВІМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

### 9.1 Класифікація обладнання

Вимірвальне обладнання волоконно-оптичних систем доцільно класифікувати по області спектра - оптичне, електричне (часове і частотне), в якій виконуються вимірювання, а також по місцю його використання - будівництво, монтаж, експлуатація (рис. 9.1).

Прилади для оптичної області спектра або генерують оптичний вимірвальний сигнал (стабільні джерела випромінювання), або послаблюють сигнал (аттенюатори), або вимірюють параметри оптичного випромінювання, наприклад, потужність (ВОП). Тестери, мультиметри та вимірювачі оптичних втрат - це прилади, до складу яких входять і джерела випромінювання, та ВОП, а також інші пристрої. Перераховані прилади можуть працювати на фіксованій хвилі, або перебудовуватися по спектру. Аналізатори спектру використовуються для вимірювання спектральних параметрів сигналів і пристроїв.

В електричній частині спектру виміри проводяться в частотній або часовій області. В частотній області для вимірювання використовують оптоелектричне або електрооптичне перетворення для дослідження характеристики пасивних і активних пристроїв залежно від частоти модуляції. Вимірювачі параметрів компонент застосовуються для дослідження характеристик електрооптичних або оптоелектронних компонент і модулів, наприклад, амплітудно-частотної характеристики. Генератори стандартних оптичних сигналів створюють аналогові або цифрові випробувальні сигнали. Вимірювачі параметрів оптичних сигналів необхідні для дослідження параметрів оптичного випромінювання.

Прилади для вимірювань в часовій області застосовуються для дослідження часових параметрів електричних сигналів на вході (виході) обладнання, дослідження око-діаграм, фазового тремтіння (джиттера) тощо, в устаткуванні синхронної цифрової ієрархії (СЦІ) або асинхронної передачі (АТМ).

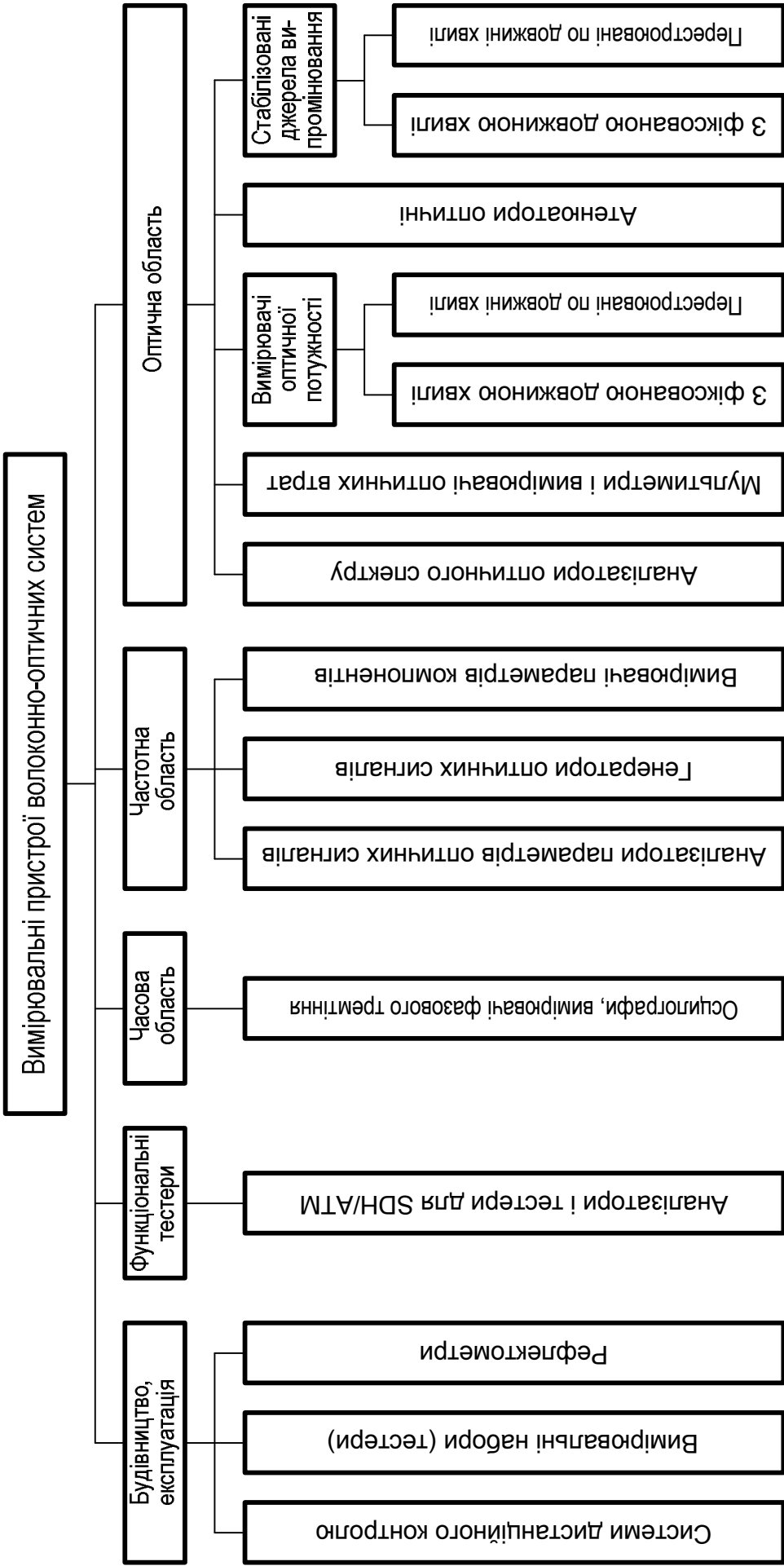
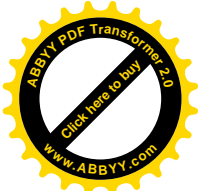
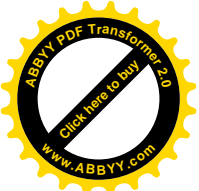
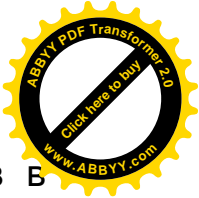


Рисунок 9.1 – Класифікація вимірювальних пристроїв волоконно-оптичних систем





Функціональні тестери вимірюють параметри цифрових потоків в устаткуванні синхронної цифрової ієрархії або асинхронної передачі. При будівництві, монтажі та експлуатації використовуються рефлектометри ближньої та дальньої дії, а також вимірювальні набори (джерело випромінювання + аттенюатор регульований + вимірювач оптичної потужності).

## 9.2 Прилади для вимірювань в оптичній області

### 9.2.1 Стабілізовані джерела випромінювання

У стабілізованих ДВ використовуються три типи випромінювачів: **лазерні, світлодіодні та білого світла** на основі вольфрамової лампи розжарювання. Іноді, як вимірювальний, використовується оптичний сигнал лінійного обладнання.

**Лазерні** ДВ мають: велику потужність випромінювання; вузький спектр опромінення (монохроматичність), високий рівень когерентності; великі нелінійні спотворення; високу вартість і значну температурну залежність параметрів (три останні якості негативні). Лазерні ДВ доцільно використовувати для вимірювання втрат у протяжних одномодових ОВ.

**Світлодіодні** ДВ володіють: малою уводимою в ОВ потужністю випромінювання; більш широким спектром (40...200 нм); кращою лінійністю і температурною стабільністю параметрів при невисокій вартості. Світлодіодні ДВ частіше застосовують для вимірювання втрат в багатомодових ОВ невеликої довжини (локальних), а в довгих лініях вони можуть викликати значну хроматичну дисперсію сигналів.

Джерело **білого світла** є альтернативним світлодіодам і дешевим ДВ із широким спектром. У поєднанні з кремнієвим ФД він може бути використаний для вимірювання втрат у ОВ на довжині хвилі 850 нм, а в поєднанні з ФД на основі InGaAs – на довжині хвилі 1300 нм. Джерела білого світла можуть використовуватися для спектральних вимірів (спільно з монохроматором), а також вимірювань, які не вимагають високої точності. Вони застосовуються для візуального контролю цілісності волокна.

**ДВ з фіксованою довжиною хвилі.** Стабілізовані ДВ призначені для формування безперервного або модульованого оптичного випромінювання зі стабільними параметрами: потужності, довжини хвилі, смуги спектра. Структурна схема ДВ наведена на рис. 9.2. Тут 1 і 3 - внутрішній і зовнішній генератори електричного модулюючого колювання; 2 - комутатор; 4 - блок температурної стабілізації ДВ; 5 - ДВ; 6 - компаратор; 7 - відрізки ОВ; 8 - мікропроцесор, що керує роботою приладу; 9 - відгалужувач оптичний; 10 - контрольний ФД; 11 - джерело електроживлення; 12 - пристрій оптичного узгодження; 13 - джерело опорної напруги.



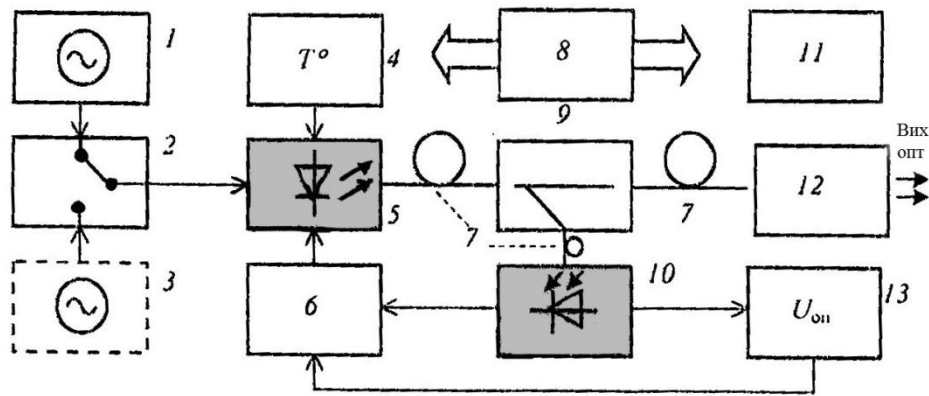


Рисунок 9.2 – Структурна схема джерела випромінювання з фіксованою довжиною хвилі

Температурна і часова стабілізація потужності і довжини хвилі випромінювання ДВ здійснюються: термостатуванням охолодженого за допомогою мікрохолодильника (елемента Пельтьє) ДВ; оптичним зворотним зв'язком. Випускаються ДВ для роботи в одному або декількох вікнах прозорості кремнієвого ОВ.

Для стабілізованих ДВ нормуються наступні параметри: тип ДВ (лазерний, світлодіодний); потужність випромінювання; центральна довжина хвилі; ширина спектру випромінювання; максимальне відхилення довжини хвилі випромінювання від робочої; стабільність рівня потужності випромінювання (дБ/год, дБ/доба); можливість здійснення внутрішньої чи зовнішньої модуляції інтенсивності випромінювання; наявність внутрішнього аттенюатора, та ін.

**Перестроювані по спектру ДВ.** Для вимірювання спектральних характеристик оптичних та оптоелектронних компонентів і модулів, використовують перестроювані по спектру (зазвичай в межах одного з вікон прозорості ОВ) стабілізовані ДВ. На рис. 9.3 наведена структурна схема на основі ЛД із зовнішнім резонатором. Тут 1 - обертаюча дифракційна решітка; 2 - фільтр, який здійснює селекцію основної моди лазера; 3 - лінза; 4 - лазерний кристал (герметичний) з антивідбивним покриттям з боку дифракційної решітки; 5 - оптичний вентиль; 6 - спрямований відгалужувач; 7 - контрольний ФД; 8 - відрізки ОВ; 9 - аттенюатор оптичний; 10 - вихід оптичний.

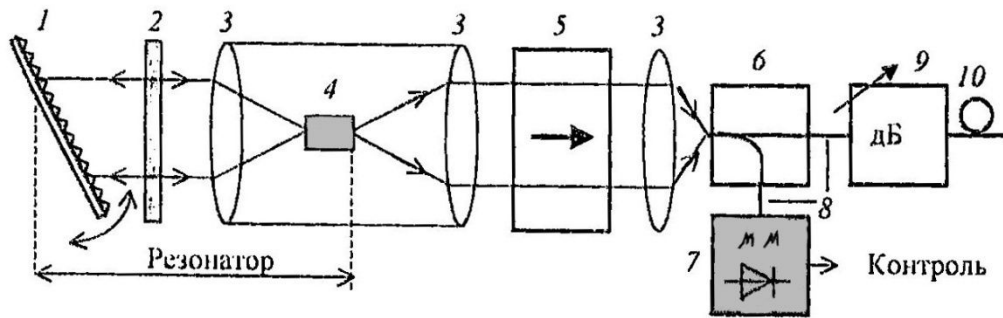


Рисунок 9.3 – Структурна схема перестроюваного по спектру джерела випромінювання

Для перестроюваних ДВ додатково контролюють наступні параметри: діапазон спектрального перестроювання; спектральну роздільну здатність (мінімальний крок перестроювання за довжиною хвилі); точність встановлення довжини хвилі; стабільність значення встановленої довжини хвилі; нерівномірність потужності випромінювання в діапазоні перебудови, тощо.

**Широко смугові ДВ.** Це джерела з широким спектром і (бажано) великою потужністю випромінювання. Вони використовуються для вимірювання параметрів компонентів з великим рівнем внесених втрат.

### 9.2.2 Вимірювання оптичної потужності

Пряких (безпосередніх) методів вимірювання оптичної потужності немає. Тому використовуються непрямі методи, при яких оптична енергія перетворюється в інші, легко вимірювані види. Перетворення здійснюється за допомогою приймачів випромінювання, які за принципом дії поділяються на два класи - теплові і фотоелектричні (квантові).

Класифікація вимірювачів оптичної потужності (ВОП) наведена на рис. 9.4. Термоелемент, болометр, термістор, піроелектричний приймач є найбільш характерними типами теплових приймачів випромінювання. Найбільший розвиток останнім часом отримали піроелектричні приймачі. Піроелектричний ефект проявляється в створенні ЕРС при нагріванні піроелектричного кристалу. Зміна температури відбувається за рахунок поглинання падаючого випромінювання. Перевагами теплових вимірювачів є: неселективність (здатність реєструвати опромінення в широкій спектральній області 0,33...10,6 мкм); великий діапазон вимірюваних потужностей 1 мкВт...1 Вт, а з аттенюатором - до 100 Вт. До недоліків слід віднести: порівняно низьку чутливість (~ 1 мкВт для піроприймача та ~1 мВт для термобатареї); велику інерційність; значну похибку (56%). Для покращання чутливості теплових вимірювачів використовується переривання (модуляція) оптичного випромінювання та синхронне детектування на прийомі.

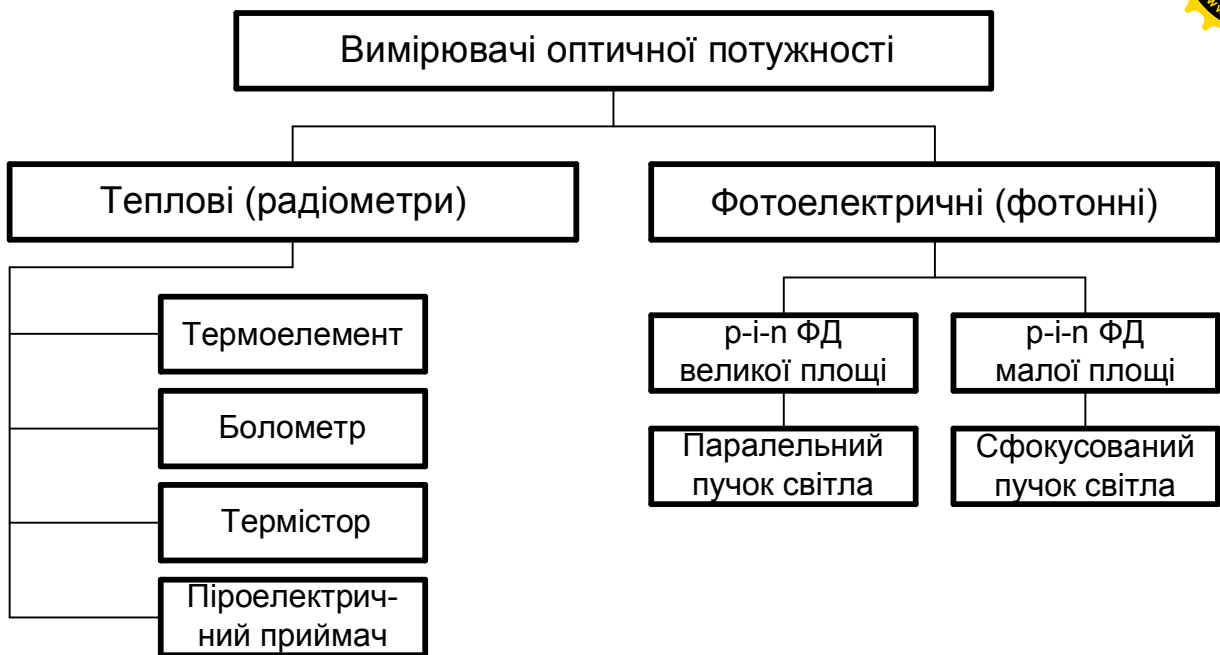


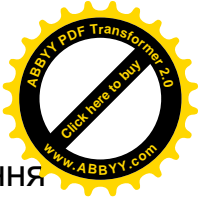
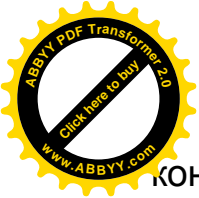
Рисунок 9.4 – Класифікація вимірювачів оптичної потужності

Іншим і основним в оптичних системах є фотоелектричний метод. Як приймач випромінювання тут використовується  $p-i-n$  ФД. Фотоелектричні ВОП можуть бути розділені на два підкласи: у першому, формується рівнобіжний пучок світла, що падає на  $p-i-n$  ФД великої площі; у другому, створюється фокусований пучок, що падає на  $p-i-n$  ФД малої площі (рис. 9.4). При певній довжині хвилі випромінювання  $\lambda$  значення оптичної потужності може бути розраховано (за результатами вимірювання фотоструму) з точністю, що дорівнює точності вимірювання квантової ефективності. Таким чином, якщо похибка вимірювання  $\eta$  для  $p-i-n$  ФД, становить 1%, то точність вимірювання оптичної потужності також може наближатися до 1%.

У фотоелектричному ВОП великої площі використовують  $p-i-n$  ФД з діаметром світлочутливої поверхні близько 5 мм. Такий ФД здатний захоплювати не тільки всі направляючі волокном моди, але також і оболонкові (якщо вони є). Рівнобіжний пучок формується за допомогою лінз і вибіру апертур. Наприклад, у випадку розбіжного пучка, випромінюваного кінцем волокна, використання лінзи дозволяє одержати колімований (рівнобіжний) пучок.

Метод великої площі забезпечує високу абсолютну чутливість вимірів (звичайно не гірше 5%) при помірних витратах. Важливо і те, що точність оптоелектронного перетворення ВОП великої площі може бути легко перевірена, оскільки всі національні лабораторні стандарти використовують метод рівнобіжного пучка.

Недоліком методу великої площі є значний темновий струм (і його дрейф), а також підвищена потужність електронних шумів. У практичних



конструкціях ці проблеми вирішуються шляхом термостатування охолодженого до  $-10^{\circ}\text{C}$  германієвого  $p-i-n$  ФД.

У фотоелектричному ВОП малої площі використовується сфокусований пучок, що падає на  $p-i-n$  діод з діаметром чутливої поверхні меншим 1 мм. Перевагами цього методу є краща чутливість (нижче потужність електронного шуму), більш широкий діапазон вимірюваних потужностей, менша вартість. Однак тут присутні труднощі в перевірці точності калібрування. Звичайно похибка таких вимірювачів перевищує 5%. При вимірах потужності за допомогою ФД виникає низка проблем.

Перша полягає в тому, що частина світла може відбиватися від активної поверхні вимірювального ФД. Поширюючись в зустрічному напрямку, вона може у свою чергу відбиватись елементами тракту (наприклад, з'єднувачами) і знову повертатися (частково) на ФД, погіршуючи точність вимірів. У вимірювачах компанії „Hewlett Packard” ця проблема вирішується за допомогою: нанесення антивіддзеркалюючого покриття на ФД; вибіру аперттури; нахилу вимірювального ФД (рис. 9.5).

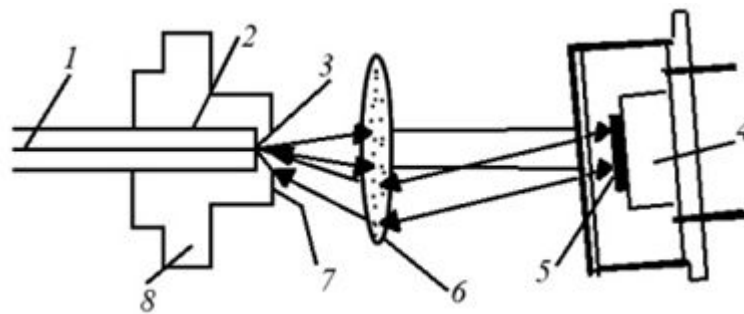


Рисунок 9.5 – Схема зменшення віддзеркалення світла

На цьому рисунку: 1 – волокно; 2 – затискач; 3 – аперттура; 4 – мікрохолодильник (елемент Пельтьє); 5 – фотодіод; 6 – лінза; 7 – антивіддзеркалююче покриття; 8 – з'єднувач.

Друга проблема полягає у необхідності поліпшення точності при вимірах потужності випромінювання світлодіодів внаслідок їх широкої спектральної лінії.

Третя проблема виникає при вимірах у системах з лазерними діодами. Тут дуже важливо запобігти відбиттю від поверхні ФД. Ці віддзеркалення, потрапляючи в резонатор лазера, можуть істотно впливати на режим генерації. Тут обов'язково потрібно використовувати антивіддзеркалююче покриття ФД, а при рівнобіжному пучку – нахил фотодіода. У випадку сфокусованого пучка нахил не допомагає. Фотодіод завжди буде відбивати частину світла убік джерела. Це негативний результат застосування лінз.

Структурна схема вимірювача середньої оптичної потужності показана на рис. 9.6. Вимірюване випромінювання через оптичний з'єднувач 1 подається на оптичний вхід приладу. Лінза 2, встановлена в

З'єднувачі, формує рівнобіжний (або сфокусований) пучок, що подається на фотодіод, розташований у термостатованому блоці фотоелектричного перетворювача. Між лінзою і фотодіодом 5 розташовані оптичний атенюатор 3 з ослабленням -20 дБ і шторка 4, що перемикаються автоматично. Якщо вимірювана потужність перевищує 100 мкВт, оптичний атенюатор автоматично включається в оптичний тракт. Це забезпечує лінійність характеристики оптоелектронного перетворення приладу. Шторка служить для перекриття оптичного входу і дозволяє перевірити встановлення нульового рівня незалежно від наявності оптичної потужності на вході приладу.

У структурній схемі на рис. 9.6 струм, що генерується під впливом оптичного випромінювання фотодіода надходить на підсилювач-перетворювач струм-напруга (ППСН) 6, підсилюється і далі подається на АЦП 7 і індикатор 8.

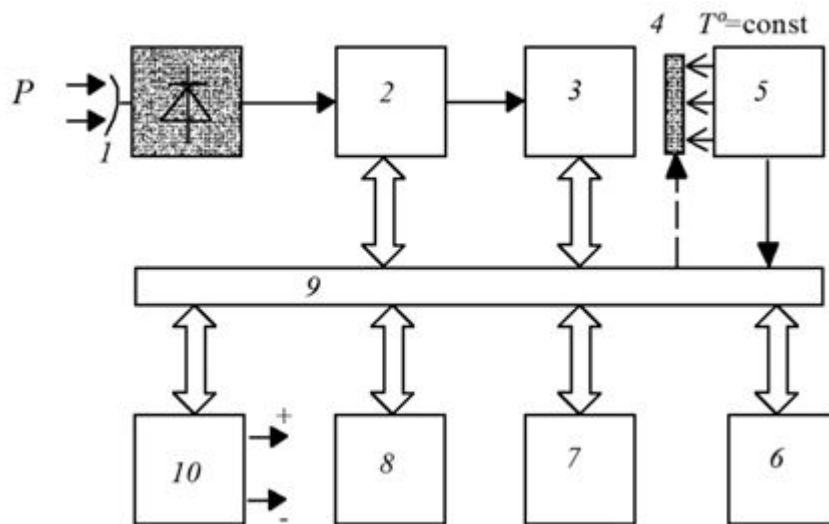


Рисунок 9.6 – Структурна схема вимірювача середньої оптичної потужності

Вибір коефіцієнта перетворення ППСН, коефіцієнта підсилення, керування індикацією, атенюатором і шторкою виконується мікропроцесором 9. Останній також робить корекцію спектральної характеристики ФД та здійснює математичну обробку даних. Керують роботою приладу за допомогою клавіатури. Електроживлення здійснюється від автономного або мережевого блоку живлення 10.

До основних параметрів ВОП відносять: тип і діаметр чутливого елемента (ФД); область спектральної чутливості; діапазон рівнів вимірюваної потужності; похибка (точність) вимірів; лінійність оптоелектронного перетворення; шуми; роздільну здатність дисплея; використаний тип волокна; періодичність перевірки, тощо.





### 9.3 Оптичні тестери (набори)

Під оптичним тестером в оптичних системах розуміють вимірювальний пристрій, що складається із стабілізованого ДВ, ВОП й аксесуарів, що дозволяють підключати зазначені й інші пристрої до об'єкта вимірювання. В аксесуари звичайно входять відрізки ОК зі з'єднувачами різних типів, адаптери для підключення ОК без з'єднувачів, атенюатори та ін. Існує два варіанти конструктивного рішення такого приладу: у виді моноблоку, що містить стабілізоване ДВ і ВОП; у виді двох окремих автономних блоків (наборів) стабілізованого ДВ і ВОП. Розповсюдженим представником першого варіанту є тестер типу ОМКЗ-76 (Росія): до вимірювального блоку (стабілізоване ДВ + ВОП) підключаються виносні голівки з випромінювачами різних типів (СД, ЛД) і приймачами (*p-i-n* ФД). Інші виробники виготовляють набори з різних блоків ДВ і ВОП, а також широку номенклатуру супутніх аксесуарів.

Параметри оптичних тестерів є сукупністю параметрів ДВ, ВОП, що розглянуті вище. Основним показником тестера є діапазон вимірів: він дорівнює різниці рівнів потужності випромінювання ДВ і мінімальної потужності, що виявляється вимірювачем, дБ.

### 9.4 Мультиметри і вимірювачі оптичних втрат

**Мультиметрами** в оптичних системах називають багатофункціональні пристрої, що дозволяють (у залежності від комплектації змінних модулів) вимірювати основні параметри пасивних волоконно-оптичних компонентів модулів, а саме:

- абсолютне значення потужності випромінювання (функція ВОП);
- загасання оптичних волокон кабелів методом обриву або методом внесених втрат;
- втрати, внесені оптичними з'єднувачами або іншими елементами тракту;
- втрати, як результат зворотного відбиття;
- стабільність потужності ДВ;
- поляризаційну залежність втрат, та ін.

Мультиметри мають модульну конструкцію, що містить блоки: стабілізовані ДВ (на основі лазерних і світлодіодів) з різною довжиною хвилі випромінювання; ВОП, що працюють у відповідних вікнах прозорості ОВ; вимірювачі зворотних втрат; оптичні атенюатори; оптичні інтерфейси, що дозволяють приєднувати до оптичних входів (виходів) оптичні кабелі, оснащені з'єднувачами різних типів (FC, ST, SC) або не оснащені такими.

Мультиметри, що працюють у режимі вимірювання внесених втрат, використовуються для моніторингу волоконно-оптичних ліній передачі. Такий моніторинг може здійснюватися на одній або двох (1310 і 1550 нм)

довжинах хвиль. При цьому програмними засобами, закладеними в мікропроцесор, здійснюється покроковий вимір втрат в основних елементах оптичного тракту, включаючи відрізки ОК, розгалужувачі, з'єднувачі, місця зварювань ОВ та ін.

**Вимірювачі оптичних втрат** є спеціалізованими приладами для виміру втрат у пасивних елементах і коефіцієнту підсилення в активних компонентах і модулях, а при використанні зовнішніх спектрально перестроюваних ДВ – для вимірювання спектральної залежності зазначених втрат (посилення). Також передбачена можливість вимірювання поляризаційної залежності втрат або коефіцієнта підсилення.

Структурна схема вимірювача оптичних втрат приведена на рис. 9.7, де 1 – внутрішні стабілізовані ДВ з довжиною хвилі 1310 і (або) 1550 нм; 2 – спрямований розгалужувач 50/50 %; 3 – контроллер поляризації; 4 – процесор і дисплей; 5 – виносні вимірювальні голівки ВОП; 6 – оптичний вихід; 7 – оптичний вхід зовнішнього ДВ; 8 – відрізки ОК зі з'єднувачами; 9 – пристрій, що тестується.

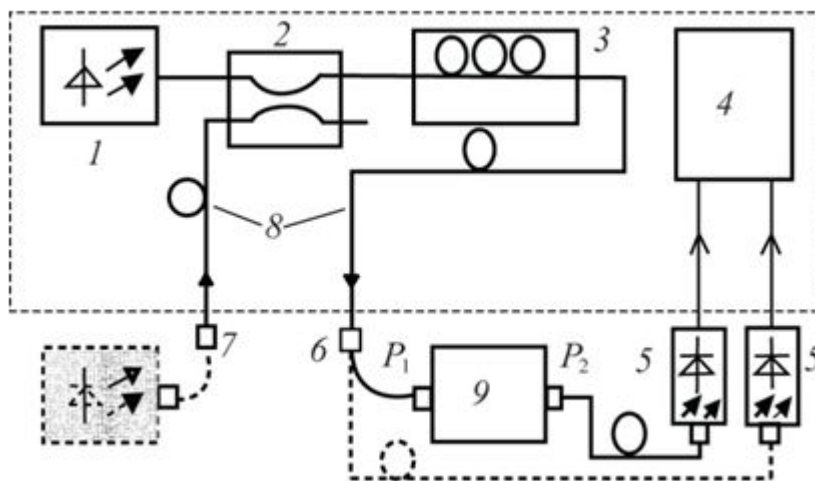


Рисунок 9.7 – Структурна схема вимірювача оптичних втрат

## 9.5 Аналізатори оптичного спектру

Аналізатори оптичного спектру використовуються для виміру: спектральних характеристик пасивних і активних компонентів; поляризаційної залежності втрат або посилення від довжини хвилі; параметрів волоконно-оптичних підсилювачів. Основою будь-якого аналізатора оптичного спектру є монохроматор – оптичний спектральний прилад для просторового поділу випромінювання за довжинами хвиль, виділення спектральних інтервалів і спектрального сканування.



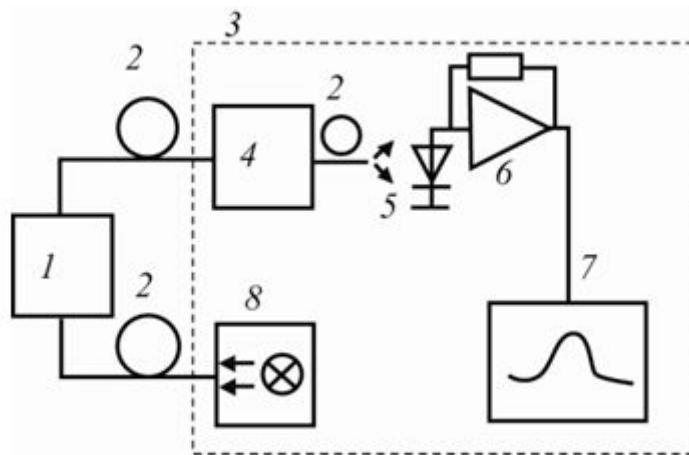


Рисунок 9.8 – Спрощена структурна схема аналізатора оптичного спектру

Спрощена структурна схема аналізатора оптичного спектру приведена на рис. 9.8, де 1 – об'єкт виміру; 2 – відрізки ОК із з'єднувачами; 3 – аналізатор, що складається з подвійного монохроматора 4; 5 – *p-i-n* ФД; 6 – трансімпедансний широкосмуговий підсилювач; 7 – процесор і дисплей; 8 – джерело білого світла. За цією схемою включення звичайно вимірюють спектральні залежності втрат, внесених такими пасивними пристроями, як оптичні волокна, з'єднувачі, розгалужувачі, фільтри, оптичні вентиля, тощо.

Основні параметри оптичного аналізатора спектру компанії HP наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1 - Параметри аналізатора оптичного спектру HP71450

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Спектральний діапазон вимірювань	нм	600...1700
Точність вимірювань (абсолютна)	нм	1(±0,3)
Спектральна роздільна здатність	нм	0,08; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10
Чутливість в інтервалі: 750...900 нм 1100...1600 нм	дБм	- 75 - 90
Вхідна потужність	дБм	>+10
Швидкість сканування	нм/мс	40/50
Втрати зворотного відбиття	дБ	>35
Стабільність	нм	0,005
Тип ОБ	мкм	Одномодове 9/125

## 9.6 Рефлектометри

Імпульсні методи дослідження ОВ засновані на дослідженні відбитого і розсіяного випромінювання, що поширюється в зворотному напрямі при проходженні по ОВ потужних імпульсів світла. До вхідного торця волокна (на який подаються зондуючі імпульси випромінювання від лазера) повертаються сигнали:

- відбиті від крупних неоднорідностей, що мають розміри набагато більші довжини хвилі випромінювання. Це сигнали френелевого відбиття, наприклад, від макро- і мікротріщин, місць зрощення ОВ, вхідного та вихідного торців ОВ, місць вигинів ОВ, що викликають деформацію профілю ПЗ;

- розсіяні в зворотному напрямі, внаслідок мікроскопічних флуктуацій ПЗ (неоднорідності в щільності матеріалу або його складі).

На рис. 9.9 показані напрями розсіяного об'ємом  $\Delta x$  світла, де 1 – серцевина; 2 – оболонка ОВ,  $P_1$  і  $P_2$  – потужності оптичного випромінювання на вході і виході відрізка ОВ, відповідно, причому  $P_2 < P_1$ .

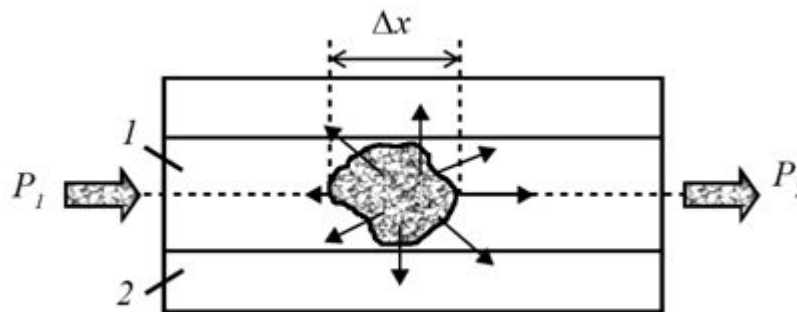


Рисунок 9.9 – Розсіювання світла неоднорідністю в ОВ

Сигнали зворотного розсіювання зазвичай на 20...25 дБ менше сигналів відбиття.

До вхідного торця ОВ через оптичний розгалуджувач приєднують джерело потужних зондуючих оптичних імпульсів та широкопasmовий чутливий приймач оптичної потужності з виходом на реєструючий пристрій. На екрані останнього отримують графічне зображення залежності потужності відбитих  $P_R$  та зворотно розсіяних  $P_S$  сигналів від часу (довжини  $x$ ). Це зображення називають рефлектограмою. Знаючи  $\Delta t$  – відрізок часу між зондуючим та відбитими (розсіяними) імпульсами, можна визначити відстань до місця відбиття (розсіювання)

$$\tilde{\delta} = v \cdot \Delta t / 2 = c \cdot \Delta t / 2 \cdot n_1, \quad (9.1)$$

де  $V$  – швидкість світла в серцевині волокна з найбільшим значенням ПЗ  $n_1$ ;  $C$  – швидкість світла у вакуумі; цифра 2 – враховує пробіг імпульсу в прямому і зворотному напрямках. З формули (9.1) випливає, що для точного визначення відстані до місця відбиття (розсіювання) треба знати дійсне значення показника заломлення серцевини ОВ. Лише в цьому випадку між відстанню  $x$  та часом  $t$  буде точна залежність.

Для дослідження ОВ імпульсними методами необхідний прилад, спрощена структурна схема якого наведена на рис. 9.10. Тут 1 – генератор коротких електричних імпульсів; 2 – джерело потужних оптичних імпульсів (лазер); 3 – відрізки ОВ; 4 – оптичний розгалужувач; 5 – канал синхронізації; 6 – пристрій оптичного узгодження; 7 – приймаючий оптоелектронний модуль; 8 – блок обробки сигналів; 9 – досліджуване ОВ; 10 – реєструючий пристрій (осцилограф, дисплей, та ін.).

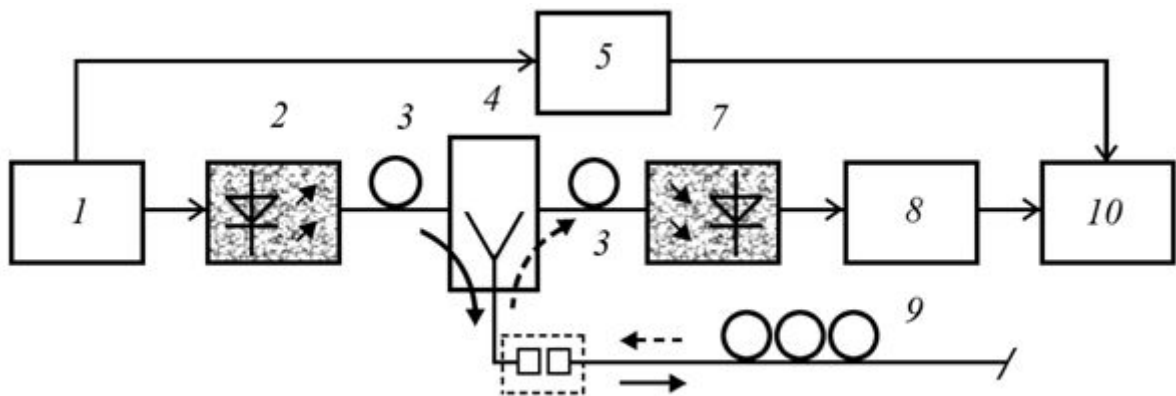


Рисунок 9.10 – Спрощена структурна схема дослідження ОВ імпульсним методом

Прилад, побудований за цією схемою, дозволяє реєструвати як відбиті, так і розсіяні назад сигнали. Якщо в схемі відсутній блок обробки, то такий прилад називається вимірювачем місць пошкодження ОВ, оскільки він дозволяє виявити лише великі за рівнем сигнали френелевого відбиття від великих відбиваючих неоднорідностей. Типова форма сигналу, що реєструється таким приладом, показана на рис. 9.11, де 1, 4 – сигнали, відбиті від вхідного та вихідного торців ОВ, відповідно; 2, 3 – сигнали, відбиті від мікротріщин або місць роз'ємних з'єднань ОВ. Недоліками вимірювача місць пошкодження є: неможливість виявлення неоднорідностей, які не відбиваються; нечутливість до сигналів зворотного розсіювання; залежність рівня френелевого відбиття від характеристик поверхонь зламу (гладка, шорстка) ОВ.

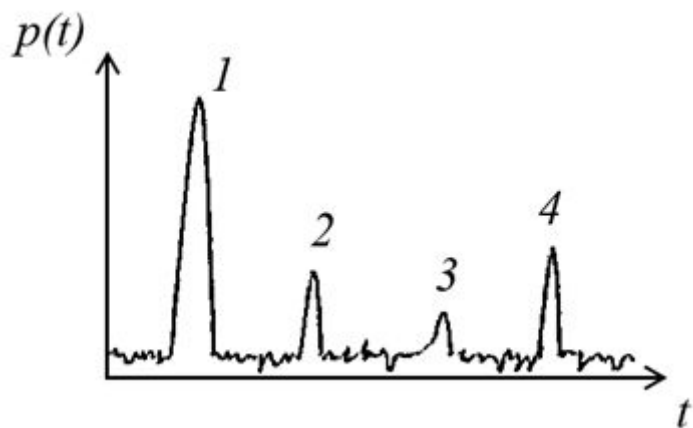


Рисунок 9.11 – Вид сигналу, що реєструється приладом дослідження ОВ імпульсним методом

Прилади, які дозволяють реєструвати як сигнали френелевого відбиття, так і релеєвого розсіювання називаються рефлектометрами. В таких пристроях обов'язково присутній блок обробки сигналів, що дозволяє значно збільшити чутливість приладу (поліпшити співвідношення сигнал/шум на вході реєструючого пристрою) і виділити з шуму корисні сигнали зворотного розсіювання, що мають рівні набагато менші, ніж відбиті сигнали.

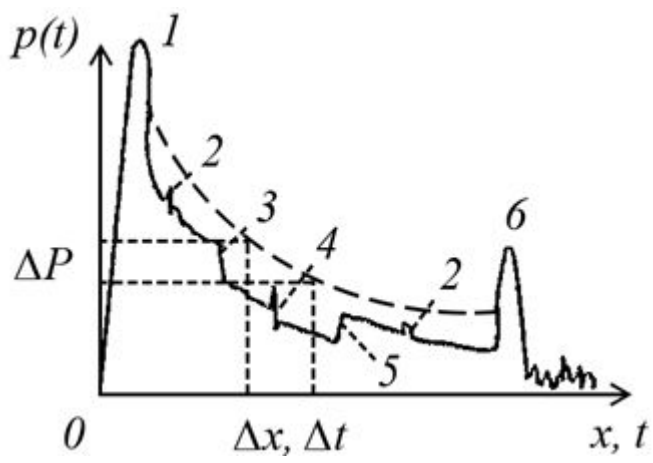
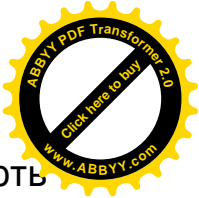
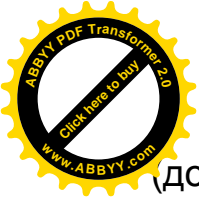


Рисунок 9.12 – Криві розподілу потужності зворотного розсіювання сигналів у часі та на відстані для ОВ з локальними дефектами і без дефектів (пунктирна лінія)

На рис. 9.12 наведена ідеальна, тобто для оптичного волокна без локальних дефектів, (пунктирна) і реальна (суцільна) криві розподілу потужності зворотного розсіювання від відстані (часу). Ідеальна крива є спадаючою експонентою. Її нахил дорівнює коефіцієнту загасання потужності оптичного випромінювання в ОВ. Відмінність реальної кривої зворотного розсіювання від спадаючої експоненти викликано різними неоднорідностями реального лінійного тракту, складеного з декількох довжин ОВ з різними параметрами. Таким чином будь-які включення



(домішки), що мають великі розміри довжини хвилі, викликають збільшення зворотного розсіяного сигналу, що проявляється в вигляді сплесків 2 на рефлектограмі. Скачки загасання 3 викликані дефектами ОВ, що вносять втрати, наприклад, місця з'єднання (зварювання) ОВ. Якщо застосовуються оптичні з'єднувачі або є неякісно виконані зварні з'єднання ОВ, то виникає і відбиття і скачок загасання 4. У випадку, якщо зворотне розсіювання випромінювання в першому з двох зварюваних ОВ менше, ніж в другому, з'являється позитивний скачок загасання 5. Потужні імпульси 1 і 6 викликані відбиттям від вхідного та вихідного торців ОВ.

Рефлектометри дозволяють: дослідити загасання випромінювання вздовж ОВ; визначити характер і місце розташування як відбиваючих, так і невідбиваючих (поглинаючих) неоднорідностей; виміряти втрати потужності в місцях з'єднання ОВ; визначити повне послаблення випромінювання в ОВ; отримати інформацію про стабільність загасання на окремих ділянках ОВ.

Метод зворотного розсіювання, завдяки своїм універсальним можливостям, що значно перевершують можливості інших методів, набув широкого поширення і в даний час є основним методом вимірювань при виробництві ОВ і ОК, будівництві, монтажі та експлуатації волоконно-оптичних ліній передачі. Важливою позитивною якістю методу є можливість вимірювання в польових умовах і за наявності доступу лише до одного кінця кабелю.

## 10 РОЗРАХУНОК КЛІМАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОПТИЧНИЙ КАБЕЛЬ

### 10.1 Вітрові навантаження

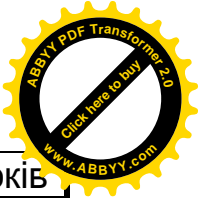
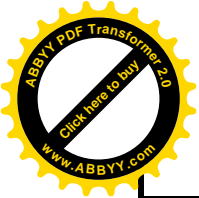
При визначенні вітрових навантажень зручно використовувати величину, яка називається **швидкісним натиском**. Максимальні нормативні швидкісні натиски вітру і товщину ожеледно-паморозових відкладень на оптичному кабелі при перетинанні його з повітряними лініями електропередачі визначають, виходячи з їх повторення 1 раз в 10 років та 1 раз в 15 років.

Максимальні нормативні швидкісні натиски вітру для висоти до 15 м від землі визначаються з табл. 10.1 у відповідності з картою районування по швидкісним натискам вітру (рис. 10.1).

**Таблиця 10.1 - Максимальний нормативний швидкісний натиск вітру на висоті менше 15 м від землі**

Райони України за вітрами	Швидкісний натиск вітру $q_{\max}$ , даН/м <sup>2</sup> , (швидкість вітру $V_{\max}$ , м/с) з повторенням
---------------------------	---





	1 раз у 5 років	1 раз у 10 років	1 раз у 15 років
I	27 (21)	40 (25)	55 (30)
II	35 (24)	40 (25)	55 (30)
III	45 (27)	50 (29)	55 (30)
V	70 (33)	80 (36)	80 (36)

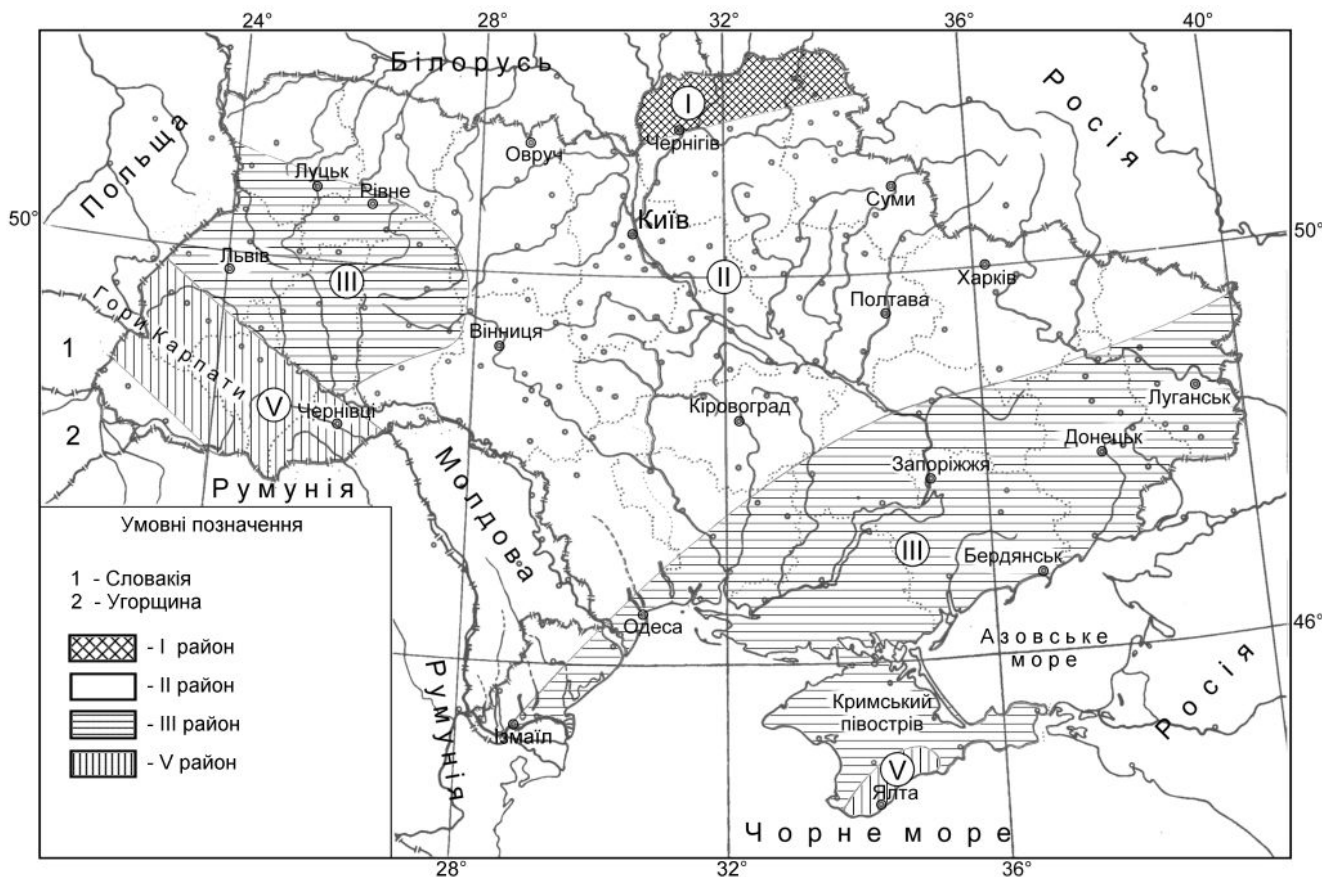
Значення швидкісних натисків вітру  $q_{max}$ , даН/м<sup>2</sup>, з урахуванням результатів фактично виміряних швидкостей визначаються по формулі:

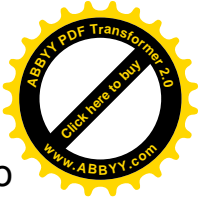
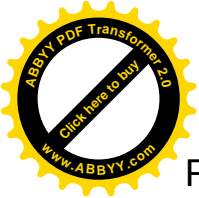
$$q_{max} = (\alpha V_{max})^{2/16}, \quad (10.1)$$

де  $V_{max}$ , м/с - швидкість вітру на висоті 10 м над поверхнею землі (при двохвилинному інтервалі усереднення), яка перевищується в середньому один раз в 5, 10 або 15 років;  $\alpha = 0,75 + 5/V_{max}$  - поправочний коефіцієнт швидкостей вітру із спостережень по флюгеру (приймається не більше одиниці). При використанні малоінерційних анемометрів коефіцієнт  $\alpha$  приймається рівним одиниці.

Отримані значення застосовуються до висоти 15 м. Рекомендується округляти їх до найближчого значення вказаного у табл. 6.1.

Швидкісний натиск вітру на підвішені ОК визначається залежно від висоти розташування центру ваги всіх кабелів. Швидкісний натиск на троси - залежно від висоти розташування центра ваги тросів. При розташуванні центра ваги на висоті до 15 м швидкісний натиск приймається по таблиці 5.1.





## Рисунок 10.1 – Розподіл максимальних нормативних натисків вітру по території України

При висоті більше 15 м швидкісний натиск визначається добутком значення натиску, вказаного в табл. 10.1 для висоти до 15 м, і поправочних коефіцієнтів з табл. 10.2.

Таблиця 10.2 - Поправочні коефіцієнти зростання швидкісних натисків вітру в залежності від висоти над землею

Висота, м	Швидкісний натиск вітру, даН/м <sup>2</sup>	Швидкість вітру, м/с
До 15	1,0	1,0
20	1,25	1,12
40	1,55	1,24
60	1,75	1,32
100	2,1	1,45
200	2,6	1,61
350 і вище	3,1	1,76

**Примітка.** Для проміжних висот значення поправочних коефіцієнтів визначаються за допомогою лінійної інтерполяції.

Для випадків, коли в розрахунках враховуються не швидкісні натиски, а швидкості вітру, в табл. 10.2 наведено також коефіцієнти збільшення швидкості вітру залежно від висоти.

Висота, на якій розташований приведений центр ваги ОК або тросів  $h_{np}$  (м), визначається для габаритного прогону по формулі

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3}f, \quad (10.2)$$

де  $h_{cp}$  - середня висота кріплення ОК або тросів на опорі, яка вимірюється відносно землі в місцях встановлення опор, м;  $f$  - стріла провису ОК або троса, яка умовно приймається найбільшою (при заданій температурі, ожеледі без вітру), м. Отримані значення швидкісних натисків вітру повинні бути округлені до цілого числа.

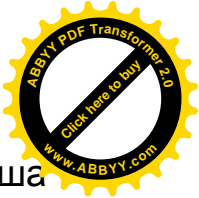
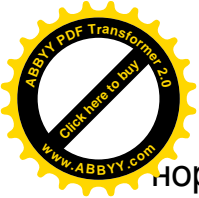
Швидкісний натиск вітру на ОК і троси при прокладанні останніх через значний водяний простір визначається згідно з (10.1) але з урахуванням наступних додаткових вимог:

– для переходу, який складається з одного прогону, висота розташування приведенного центру ваги ОК або тросів визначається по формулі:

$$h_{np} = \frac{h_{cp1} + h_{cp2}}{2} - \frac{2}{3}f, \quad (10.3)$$

де  $h_{cp1}, h_{cp2}$  - висота кріплення тросів або середня висота кріплення ОК до ізоляторів на опорах переходу, яка відраховується від рівня річки або від





нормального горизонту протоки, каналу, водосховища, м;  $f$  - найбільша стріла провису троса або ОК переходу, м;

– для переходу, який складається з декількох прогонів, швидкісний натиск вітру на ОК або троси визначається для висоти  $h_{np}$ , приведених центрів ваги кабелів або тросів у всіх прогонах переходу і вираховується за формулою:

$$h_{np} = \frac{h_{np1}l_1 + h_{np2}l_2 + \dots + h_{npi}l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}, \quad (10.4)$$

де  $h_{np1}$ ,  $h_{np2}$ ,  $h_{npi}$  - висоти приведених центрів ваги ОК або тросів над нормальним рівнем річки, або протоки, каналу, водосховища в кожному із прогонів, м. Якщо водний простір, що перетинається, має високий незатоплений берег, на якому розташовані як перехідні, так і суміжні з ними опори, то висоти приведених центрів ваги в прогоні, суміжному з перехідним, відраховуються від землі в цьому прогоні;  $l_1, l_2, \dots, l_n$  - довжини прогонів, які входять в перехід, м.

Для ділянок повітряних ВОЛЗ, які споруджуються в забудованій місцевості, максимальний нормативний швидкісний натиск вітру допустимо зменшувати на 30% (швидкість вітру - на 16%) у порівнянні з прийнятим для району проходження повітряної ВОЛЗ, якщо середня висота навколишніх будов складає не менше 2/3 висоти опор. Таке ж зменшення швидкісного натиску вітру допускається для повітряних ВОЛЗ, траса яких захищена від поперечних вітрів (наприклад, в лісових масивах заповідників, в гірських долинах та міжгір'ях).

Для ділянок повітряних ВОЛЗ, що знаходяться в місцях з сильними вітрами (високий берег великої річки, височина, що різко виділяється над навколишньою місцевістю, долини та міжгір'я, відкриті для сильних вітрів, прибережна смуга великих озер і водосховищ в межах від 3 до 5 км), максимальний швидкісний натиск слід збільшувати на 40% (швидкість вітру - на 18%) у порівнянні з прийнятим для цього району. Отримані цифри рекомендується округляти до найближчого значення, вказаного у табл. 10.1.

Нормативне вітрове навантаження  $P$ , даН, на ОК і троси, діюче перпендикулярно ОК (тросу), для кожного розрахункового режиму визначається по формулі:

$$P = \alpha K_j C_x q F \sin 2\varphi, \quad (10.5)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт, який враховує нерівномірність швидкісного натиску вітру по прогону повітряної ВОЛЗ (приймається рівним одиниці при швидкісному натиску вітру до 27 даН/м<sup>2</sup>; рівним 0,85 при 40 даН/м<sup>2</sup>; 0,75 при 55 даН/м<sup>2</sup>, 0,7 при 76 даН/м<sup>2</sup> і більше, проміжні значення визначаються лінійною інтерполяцією);  $K_j$  - коефіцієнт, який враховує вплив довжини прогону на вітрове навантаження (рівний 1,2 при довжині

прогону до 50 м; 1,1 при 150 м; 1,0 при 250 м і більше, проміжні значення  $K_j$  визначаються інтерполяцією);  $C_x$  - коефіцієнт лобового опору (приймається рівним 1,1 для ОК і тросів діаметром 20 мм і більше, вільних від ожеледі; 1,2 для всіх ОК і тросів, покритих ожеледдю, и для ОК і тросів діаметром менше 20 мм, вільних від ожеледі);  $q$  - нормативний швидкісний натиск вітру в режимі, що розглядається, даН/м<sup>2</sup>;  $F$  - площа діаметрального перетину кабелю, м<sup>2</sup> (при ожеледі з урахуванням нормативної товщини стінки ожеледі);  $\varphi$  - кут між напрямком вітру і віссю ОК.

## 10.2 Навантаження від ожеледі

Нормативна вага ожеледних відкладень на оптичному кабелі визначається, виходячи з циліндричної форми відкладень з густиною 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Товщина стінки ожеледі визначається у відповідності з картою районування території України за товщиною стінки ожеледі (рис. 10.2). Товщина стінки ожеледі може бути уточнена на основі обробки багаторічних спостережень. При висоті розташування приведенного центра ваги ОК більше 25 м поправки на товщину стінки ожеледі в залежності від висоти і діаметра ОК і тросів не вводяться.

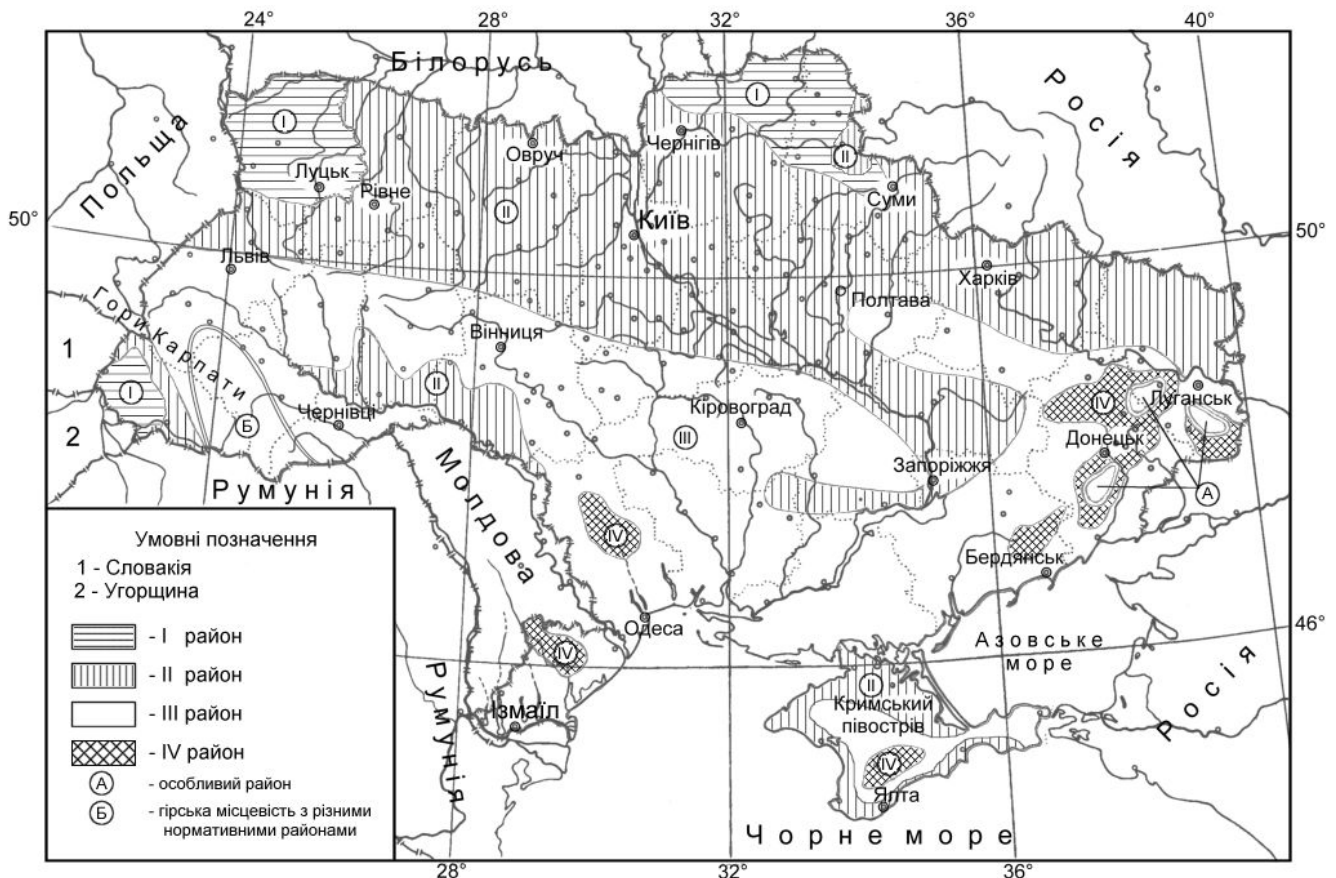


Рисунок 10.2 – Розподіл території України за товщиною стінки ожеледі

При висоті розташування приведеного центру ваги ОК більше 25 м товщина стінки ожеледі визначається такою ж, як для обчислення швидкісного натиску вітру. При цьому вихідну товщину стінки ожеледі (для висоти 10 м і діаметру 10 мм) слід приймати без збільшення.

Товщина стінки ожеледі до 22 мм округлюється до найближчого значення, співвідносного 5мм, а товщина більше 22 мм до 1мм.

Для ділянок повітряних ВОЛЗ, які проходять через греблі гідроелектростанцій і поблизу ставків-охолоджувачів, при відсутності даних спостережень слід приймати товщину стінки ожеледі на 5 мм більше, ніж для всієї лінії.

Температура повітря впливає на роботу повітряної ВОЛЗ, а саме на ступінь натягу і провисання ОК і тросів. Вибір розрахункових температур повітря (максимальної і мінімальної) здійснюється по кліматологічним довідникам та даним багаторічних спостережень метеорологічних станцій, розміщених в районі траси повітряної ВОЛЗ (з округленням до значень кратних п'яти).

Розрахункова середньорічна температура приймається як середнє арифметичне середніх річних температур періоду спостереження. Розрахункову середньорічну температуру можна також приймати по складеним регіональним картам (рис. 10.3).

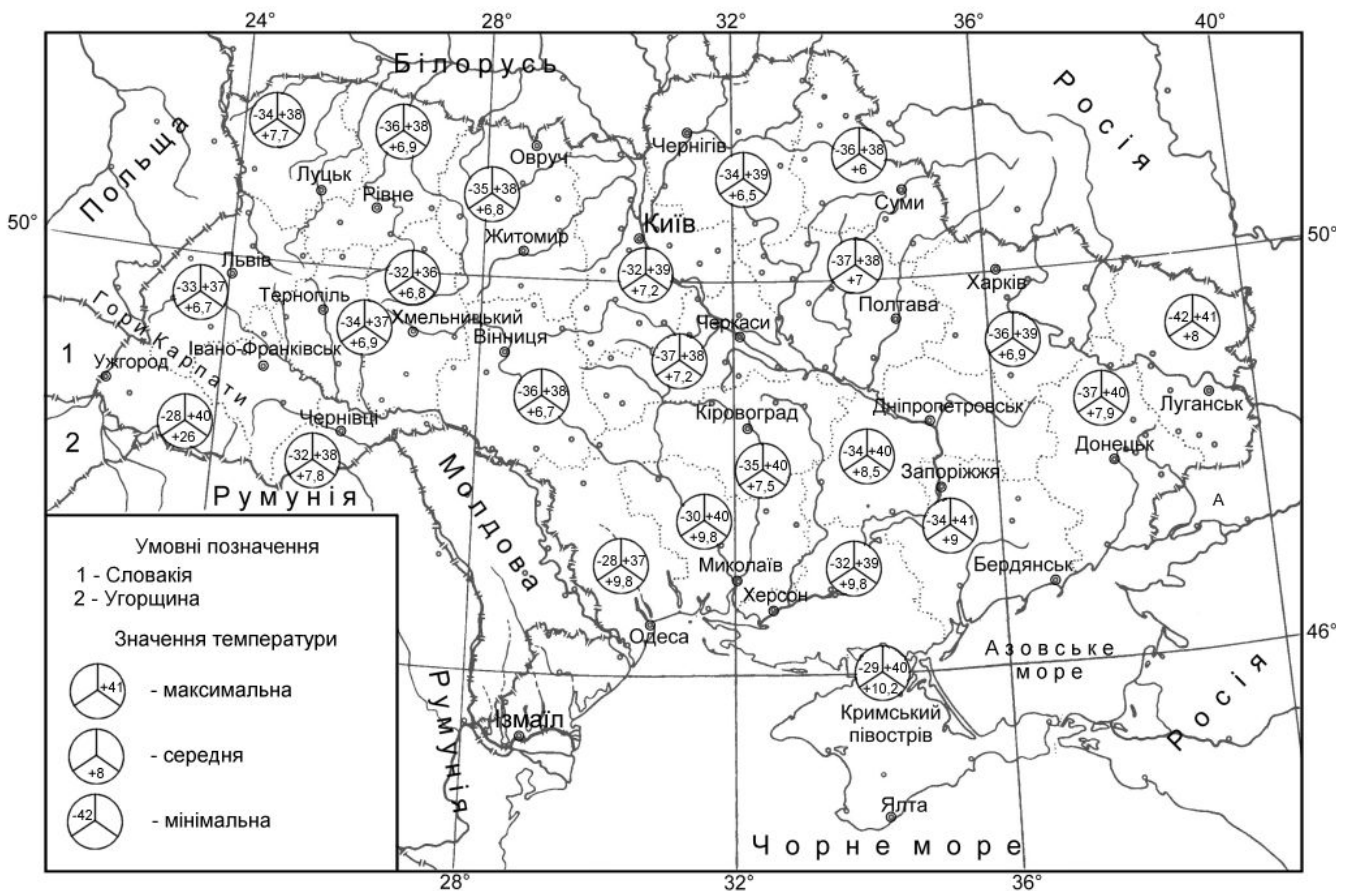


Рисунок 10.3 – Поділ території України за значеннями



## середньорічної температури

Розрахунок повітряних ВОЛЗ по нормативному режиму роботи необхідно проводити для наступних кліматичних умов:

- 1) найвища температура, вітер і ожеледь відсутні;
- 2) низька температура, вітер і ожеледь відсутні;
- 3) середньорічна температура, вітер і ожеледь відсутні;
- 4) ОК і троси покриті ожеледдю, температура мінус 5°C, вітер відсутній;
- 5) максимальний нормативний швидкісний натиск вітру  $q_{\max}$ , температура мінус 5°C, ожеледь відсутня;
- 6) ОК і троси покриті ожеледдю, температура мінус 5°C, швидкісний натиск вітру  $0,25 q_{\max}$  (швидкість вітру  $0,5 V_{\max}$ ). В районах з товщиною стінки ожеледі 15 мм і більше швидкісний натиск вітру при ожеледі повинен бути не менше 14 даН/м<sup>2</sup> (швидкість вітру - не менше 15 м/с);
- 7) середньорічна температура мінус 5°C і нижче. Температура згідно з 5) і 6) приймається рівною мінус 10°C. У всіх випадках швидкісний натиск вітру при ожеледі слід приймати не більше 30 даН/м<sup>2</sup>;
- 8) підвищені швидкості вітру при ожеледі у поєднанні із значними швидкостями вітру з великими розмірами ожеледно-паморозових відкладень з щільністю менше 0,9 г/см<sup>3</sup>, нормативні значення швидкісного натиску вітру і товщини стінки ожеледі повинні бути прийняті у відповідності з даними про існуючі різниці ожеледі і швидкості вітру при ожеледі.

## 11 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ

Оптичні кабелі зв'язку можна класифікувати за призначенням, умовами прокладання та конструкцією складових елементів. За призначенням вони поділяються на кабелі:

- внутрішнього прокладання;
- зовнішнього прокладання;
- спеціальні.

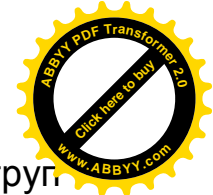
Для підвішування застосовуються лише ОК зовнішнього прокладання.

Для підвішування на опорах різного типу та призначення повинні застосовуватися лише повітряні ОК.

В окремих випадках допускається підвішування на опорах ліній зв'язку ОК, призначених для прокладання в ґрунті, якщо технічна документація на них дозволяє їх підвішування на несучих канатах.

### 11.1 Конструкції оптичних кабелів





В конструкціях оптичних кабелів розрізняють шість основних груп конструктивних елементів:

- оптичні волокна із захисними покриттями;
- оптичні модулі;
- осердя;
- силові елементи;
- гідрофобні матеріали;
- бронепокриття.

Основним елементом ОК є ОВ, усі інші елементи призначені для його захисту та підтримки оптичних характеристик на протязі усього терміну служби ОК. ОВ чутливе до розтягування та згинання, внаслідок чого може зменшуватися строк їх експлуатації та збільшуватися загасання. Конструкція ОК повинна забезпечувати захист ОВ від різних зовнішніх факторів (що залежать від умов експлуатації та навколишнього середовища) без зниження їх пропускнуої спроможності.

Для захисту ОВ використовують:

- покриття;
- конструктивні особливості ОК.

Покриття ОВ, виготовлене з лаків на акриловій основі, наноситься безпосередньо на його зовнішню поверхню оболонки з метою захисту від зовнішніх впливів. Конструктивними особливостями ОК, призначеними для захисту ОВ, можуть бути:

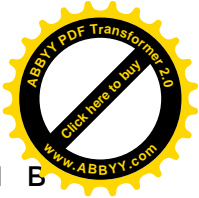
- вільне укладання ОВ в захисній трубці (оптичному модулі) або пазу;
- жорсткі конструкції;
- стрічкові структури.

Для підвішування використовують ОК з вільним укладанням ОВ. Серед ОК з вільним укладанням ОВ розрізняють ОК модульної конструкції, ОК з центральною захисною трубкою та з профільованим осердям.

Сукупність ОВ з захисними покриттями, електричних дротів, заповнювачів, що знаходяться під оболонкою, називається **кабельним осердям**. Кабельне осердя визначає типову конструкцію ОК. Відрізняють три основних види конструкції осердя:

- модульна;
- профільована;
- комбінована.

Модульний вид осердя формується з одного або декількох оптичних модулів, що скручені навколо центрального силового елементу. Профільований вид осердя забезпечує розташування в його пазах ОВ та стрічкових елементів. Осердя виготовляється з поліетилену або поліпропілену. Пази вирізають з постійним або змінним шагом скрутки. Комбінований вид осердя формується з укладання оптичного модулю у пази профільованого осердя.



Для забезпечення механічної міцності до зусиль розтягування в конструкції ОК використовують силові елементи. Силові елементи можуть бути розташовані як у центрі так і на периферії ОК. При розташуванні силового елемента в центрі ОК він називається **центральним силовим елементом** (ЦСЕ), а на периферії ОК – повздовжнім силовим елементом.

ЦСЕ призначається для замкнення на себе короткострокових розтягуючих зусиль, наприклад тих, що виникають при прокладанні ОК. Найчастіше ЦСЕ виконується із склопластикового стрижня або сталевого канату в поліетиленовій оболонці. Іноді зустрічаються ЦСЕ у вигляді пучка синтетичних (арамідних) ниток в поліетиленовій оболонці. Діаметр ЦСЕ залежить від кількості скручених навколо нього оптичних модулів.

Повздовжні (периферійні) силові елементи можуть призначатися для замкнення на себе як короткострокових розтягуючих зусиль (наприклад, ОК з центральною силовою трубкою), так і довгострокових розтягуючих зусиль, що виникають в процесі експлуатації (наприклад, самонесучих ОК).

ОК крім ОВ може мати в своєму складі й інші елементи. До них відносяться: дроти дистанційного живлення та різноманітні заповнювачі – елементи, що служать для заповнення вільних проміжків в кабелі з метою надання потрібної форми (корделі), механічної міцності, поздовжньої герметичності тощо. В разі потреби ОК може мати до двох повітів ОМ. Поверх кабельного осердя накладаються захисні покриття - оболонки, броня та шланг.

Тип та кількість захисних покривів визначаються призначенням, умовами прокладання та технічної експлуатації ОК.

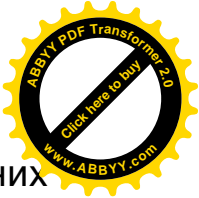
Для повітряних ОК важливим фактором є стійкість до повздовжніх та поперечних механічних навантажень, до вібрацій, що викликаються вітром, а також спроможність ОК витримувати накопичення льоду. В залежності від призначення та умов експлуатації оболонка ОК може бути вироблена з поліетилену або поліетилену з армуванням (силові елементи, броня).

## 11.2 Вимоги до оптичних кабелів

Вимоги до оптичних кабелів, що підвішуються, визначаються виходячи з умов їх експлуатації, під час якої на ОК діють механічні навантаження від їх власної ваги, ожеледі, вітру, морозу та вібрації. Крім цього, ОК, які підвішені на опорах ліній електропередачі чи контактної мережі залізниці, знаходяться під впливом потужних електромагнітних полів.

При виконанні будівельно-монтажних робіт з підвішування ОК та під час його експлуатації, конструкція ОК повинна забезпечувати його стійкість до механічних навантажень.





Значення передавальних характеристик ОК під дією механічних навантажень не повинні виходити за встановлені межі на протязі всього терміну його служби та повинні відповідати стандартам ІЕС, рекомендаціям ІТУ-Т і нормативній документації на конкретний ОК.

У процесі підвішування на ОК діють механічні навантаження – розтягування, згин, закручування, тощо.

Базовими механічними параметрами, у відповідності з якими визначаються умови підвішування ОК, є:

- допустиме зусилля розтягування ( $P_p$ );
- стійкість до роздавлювання;
- стійкість до удару.

В залежності від типу та марки ОК значення величини  $P_p$  задаються в діапазоні від 4,0 до 85 кН. Для повітряного прокладання на опорах ЛЕП використовуються ОК з допустимим зусиллям розтягування  $P_p \geq 80$  кН.

ОК повинні витримувати одноразові удари з енергією удару не менше 30 Дж.

Враховуючи, що в процесі експлуатації ОК на опорах зазнають дії вібрації, оптичні кабелі повинні бути стійкими до вібраційних навантажень в діапазонах частот від 10 до 200 Гц з прискоренням до  $40 \text{ м/с}^2$  ( $4g$ ).

За кліматичними умовами ОК для підвішування на опорах повинні бути:

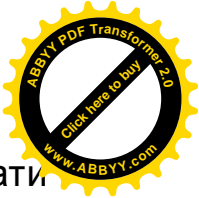
- стійкими до впливу підвищеної робочої температури навколишнього середовища до  $70^\circ\text{C}$ ;
- стійкими до впливу пониженої робочої температури навколишнього середовища до мінус  $40^\circ\text{C}$ ;
- стійкими до впливу циклічної зміни температур від мінус 40 до  $60^\circ\text{C}$ .
- стійкими до впливу підвищеної вологості повітря до 98 % при температурі  $40^\circ\text{C}$ ;
- витримувати вплив пониженого атмосферного тиску до  $5,3 \cdot 10^{-4}$  Па (400 мм рт.ст.).

ОК для підвішування повинні бути стійкими до впливу пліснявих грибів, роси, дощу, інею, соляного туману, сонячного випромінювання (у відповідності з нормативною документацією на конкретний ОК).

Враховуючи те, що під час експлуатації підвішені ОК знаходяться під дією різних хімічних речовин, вони повинні бути стійкими до впливу озону підвищеної концентрації, мінеральних масел, бензину, соляного туману.

ОК для підвішування, конструкція яких містить металеві елементи, повинні відповідати таким вимогам:

- витримувати випробувальну напругу у 8 кВ;
- мати опір ізоляції зовнішньої оболонки не менш  $2000 \text{ Мом/км}$ ;



- бути стійкими до пробивної напруги, тобто повинні витримувати постійну напругу 20 кВ або змінну напругу 10 кВ з частотою 50 Гц на протязі 5 с;

- бути стійкими до дії імпульсного струму, тобто повинні витримувати імпульсний струм розтікання тривалістю 60 мкс величиною 105 кА.

ОК, що вбудовані у грозозахисний канат, повинні відповідати таким вимогам:

- зовнішні металеві повіви повинні мати низький питомий опір (від 0,11 до 0,80 Ом/км);

- зовнішні металеві повіви повинні мати високу щільність струму короткого замикання (КЗ) до 25 кА на протязі 1 с (величина залежить від марки кабелю);

- термічну стійкість до струму КЗ (від 18 до 332 кА на протязі 1 с в залежності від марки кабелю);

- стійкість до грозового розряду (до 85 Кл).

### 11.3 Вибір оптичного кабелю

Траса повітряних ВОЛЗ може проходити по району з різноманітними умовами довкілля, внаслідок чого ОК можуть піддаватись різноманітним природним впливам. Діапазон умов довкілля повинен розглядатись дуже уважно, щоб мати можливість визначити таку конструкцію ОК, яка б дозволила зберегти потрібні характеристики на протязі усього терміну його експлуатації.

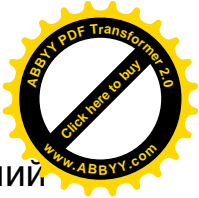
Вибір ОК для повітряного прокладання проводять за даними детального аналізу:

- нормативної документації;
- передатних характеристик;
- технологічності в роботі та при монтажі;
- впливу електромагнітних полів;
- характеристик довкілля;
- вологозахисту;
- вогнестійкості;
- старіння та стійкості до хімічних речовин.

Крім того, вибір типу ОК здійснюється, виходячи з умов його застосування (на яких опорах повітряних ліній зв'язку (ПЛЗ), ЛЕП чи контактної мережі залізниці (КМЗ) він буде підвішуватись).

При будівництві нових ПЛЗ з використанням ОК чи при підвішуванні ОК на опорах діючих ПЛЗ застосовуються самонесучі ОК або такі, що прикріплюються. Рекомендується віддавати перевагу самонесучим ОК.

При будівництві повітряних ВОЛЗ з використанням опор КМЗ застосовуються самонесучі ОК, вбудовані ОК та такі, що навиваються. ОК можуть бути вбудованими як у грозозахисний канат, так і у фазний провід.



Окремі ОК можуть навиватися або підмотуватися на грозозахисний канат або підсилюючий канат на ланцюговому контактному підвісі.

Враховуючи, що відстань між опорами КМЗ не перевищує 90 м та ОК знаходяться під впливом потужних електромагнітних полів, на цих опорах рекомендується підвішувати самонесучі діелектричні ОК.

При будівництві повітряних ВОЛЗ з використанням опор ЛЕП застосовуються ОК: самонесучі, вбудовані (у грозозахисний канат чи фазний провід) та такі, що навиваються на грозозахисний канат чи фазний провід. Напруженість електричного поля на поверхні самонесучих та тих, що навиваються, ОК досягає від 70 до 130 кВ/м, внаслідок чого при покритті оболонок кабелів пилом на їх поверхні утворюється сухорозрядна дуга, що призводить до зниження строку служби ОК.

Крім того, для згаданих ОК при різкій зміні електромагнітного поля виникає стрибкоподібна зміна площини поляризації ОВ, що може призводити до зниження якості передавання сигналу по ОК. Тому, на опорах ЛЕП рекомендується підвішувати ОК, що вбудовані в грозозахисний канат або фазний провід, оскільки ці ОК вказаних недоліків не мають.

Для підвішування можна застосовувати:

- повністю діелектричний самонесучий ОК (ADSS – All Dielectric Self Supporting Optical Fiber Cable) (рис. 11.1, 11.2) для місцевих повітряних ВОЛЗ, для підвішування на опорах ЛЕП з напругою від 35 до 220 кВ або на лініях ЛЕП без канату грозозахисту;

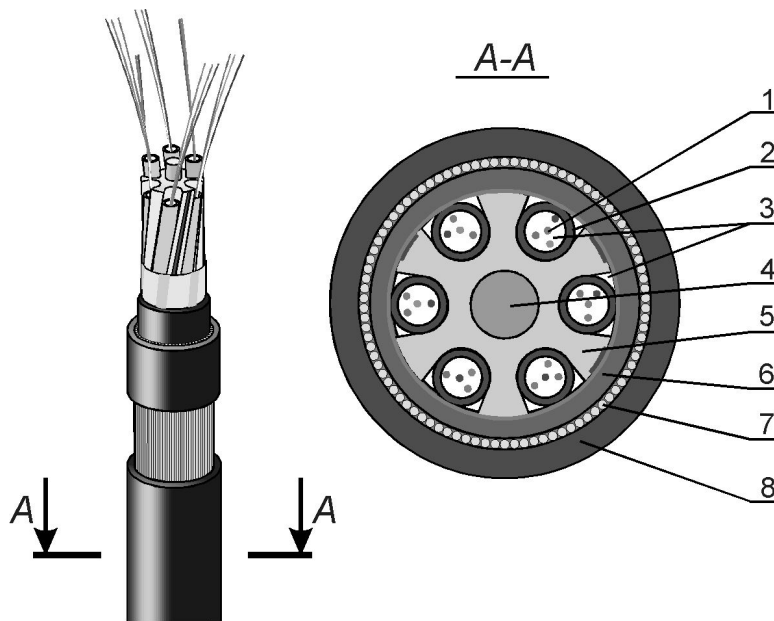


Рисунок 11.1 – Повністю діелектричний самонесучий ОК (ADSS) з профільованим осердям: 1 – ОБ; 2 – оболонка оптичного модулю; 3 – гідрофобний заповнювач; 4 – ЦСЕ; 5 – профільоване осердя; 6 – внутрішня оболонка; 7 – силові елементи; 8 – зовнішня оболонка

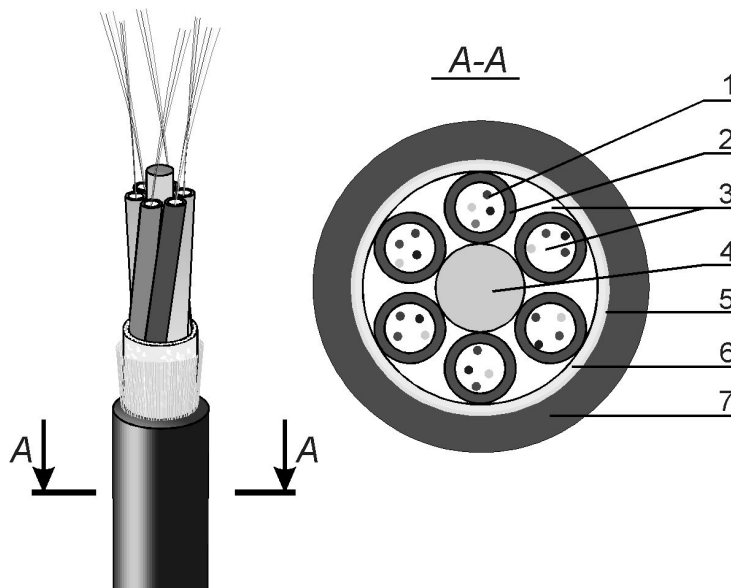


Рисунок 11.2 – Діелектричний самонесучий ОК модульної конструкції (ADSS): 1 – ОБ; 2 – оболонка оптичного модулю; 3 – гідрофобний заповнювач; 4 – ЦСЕ; 5 – силові елементи; 6 – стрічка, що блокує вологу; 7 – оболонка

□ самонесучий ОК, що армований металевими елементами (MASS – Metal Armoring Self Supporting Optical Fiber Cable) (рис. 11.3), для магістральних та місцевих повітряних ВОЛЗ;

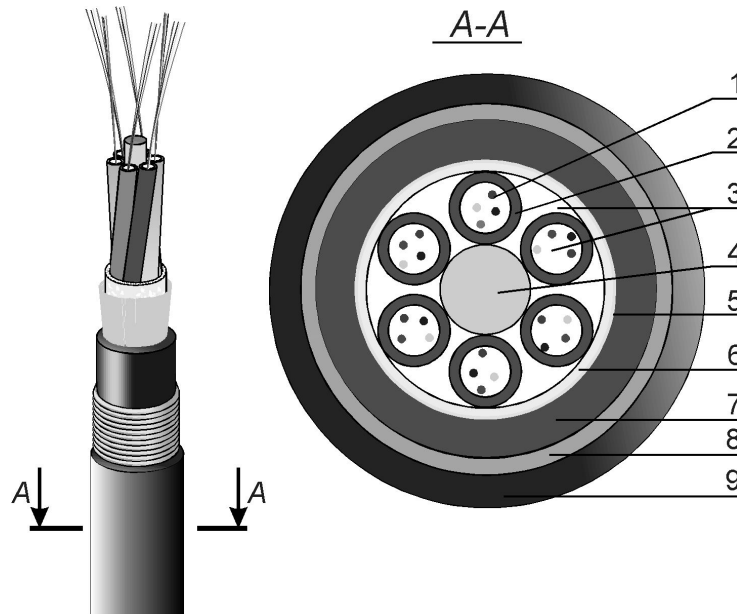


Рисунок 11.3 – Самонесучий ОК модульної конструкції зі сталеву гофрованою оболонкою (MASS): 1 – ОБ; 2 – оболонка оптичного модулю; 3 – гідрофобний заповнювач; 4 – ЦСЕ; 5 – силові елементи; 6 – стрічка, що блокує вологу; 7 – оболонка; 8 – броня; 9 – захисний шланг

□ самонесучий ОК з несучим канатом (ОК типу “вісімка”) (рис. 11.4 – 11.6) при будівництві повітряних ВОЛЗ, для підвішування на опорах з фазними проводами напругою менше 1 кВ;

□ ОК, що навивається на фазний провід (WADC – Wrapped All Dielectric Cable), або ОК, що навивається на канат грозозахисту (GWWOP – Ground Wire Wrapped Optical Fiber Cable), (рис. 11.7) для підвішування на опорах повітряних ЛЕП з напругою від 35 до 220 кВ;

□ ОК, що вбудований у канат грозозахисту (OPGW – Optical Fiber Composite Ground Wire Cable), (рис. 11.8 та 11.9) головним чином для магістральних ВОЛЗ, що будуються з використанням опор повітряних ЛЕП.

В районах із підвищеним ризиком забруднення повітряного простору частками різноманітного пилу (гірничопереробні та гірничодобувні комбінати тощо), де можливе утворення на поверхні оболонки ОК коронуючих електродів (внаслідок забруднення оболонки ОК

різноманітними пиловими осадженнями), доцільно підвішувати ОК типу OPGW.

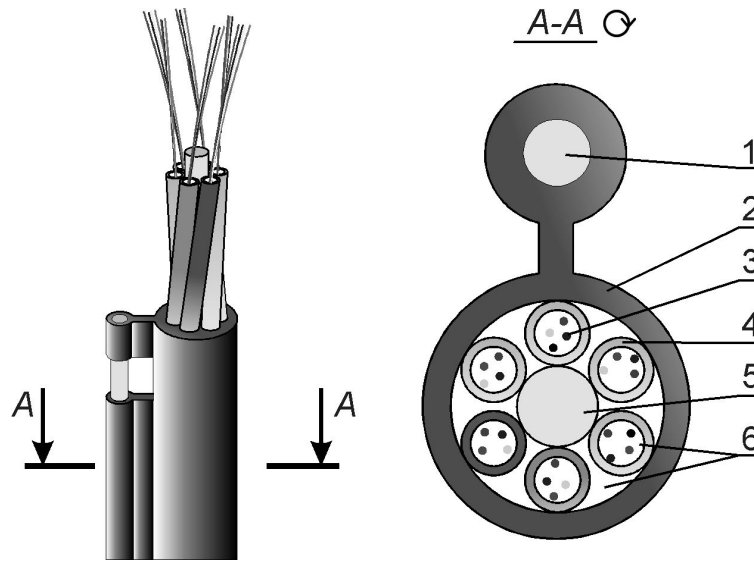


Рисунок 11.4 – ОК типу “вісімка” зі склопластиковим прутком як несучим елементом: 1 – несучий елемент; 2 – оболонка; 3 – ОВ; 4 – оболонка оптичного модулю; 5 – ЦСЕ; 6 – гідрофобний заповнювач

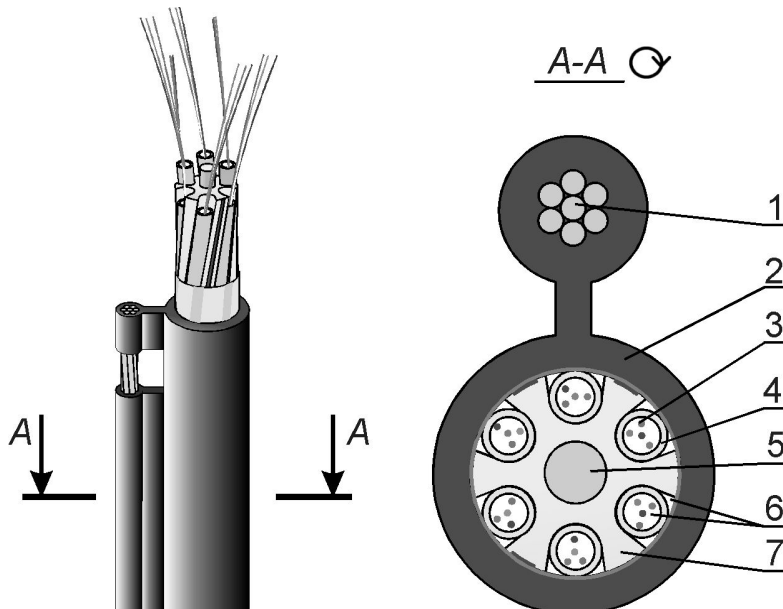
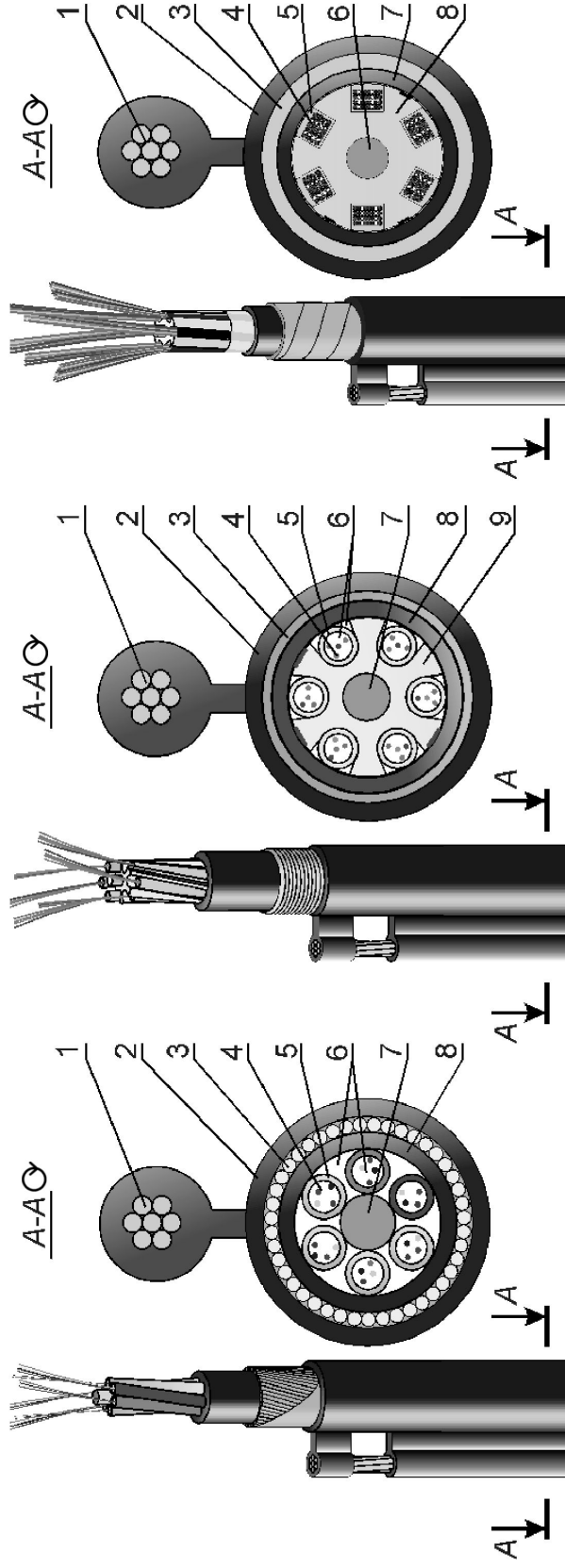


Рисунок 11.5 – ОК типу “вісімка” зі сталевим канатом як несучим елементом: 1 – несучий елемент; 2 – оболонка; 3 – ОВ; 4 – оболонка оптичного модулю; 5 – ЦСЕ; 6 – гідрофобний заповнювач; 7 – профільоване осердя





1 – несучий елемент; 2 – захисна оболонка; 3 – броня; 4 – ОВ; 5 – оболонка оптичного модулю; 6 – гідрофобний заповнювач; 7 – ЦСЕ; 8 – оболонка

а) броня зі сталевих дротів

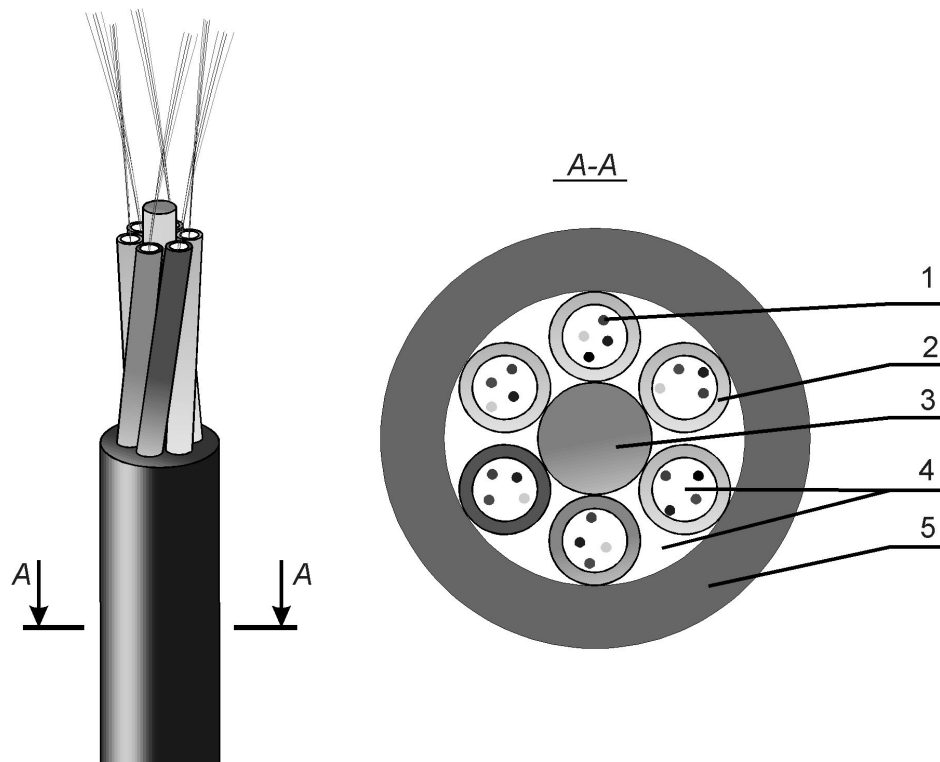
1 – несучий елемент; 2 – захисна оболонка; 3 – броня; 4 – ОВ; 5 – оболонка оптичного модулю; 6 – гідрофобний заповнювач; 7 – ЦСЕ; 8 – оболонка; 9 – профільоване осердя

б) оболонка з гофрованої сталі

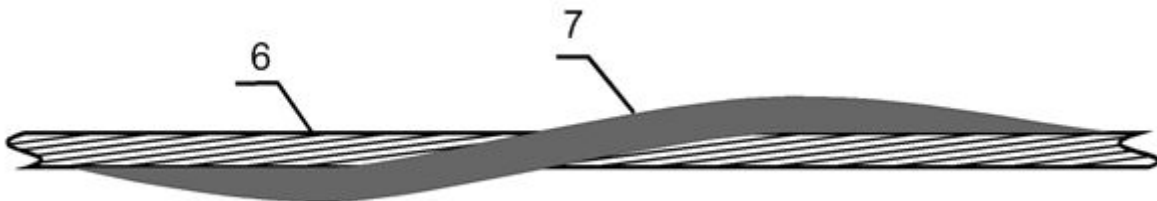
1 – несучий елемент; 2 – захисна оболонка; 3 – броня; 4 – стрічковий елемент; 5 – гідрофобний заповнювач; 6 – ЦСЕ; 7 – оболонка; 8 – профільоване осердя

в) броня – повив зі сталевих стрічок

Рисунок 11.6 – Броньований ОК типу “вісімка”



**a**



**б**

Рисунок 11.7 – Конструкція ОК, що навивається на канат грозозахисту (GWOP) (а) та навивання ОК на канат грозозахисту (б):  
1 – ОВ; 2 – оболонка оптичного модулю; 3 – ЦСЕ; 4 – гідрофобний заповнювач; 5 – оболонка; 6 – канат грозозахисту; 7 – ОК

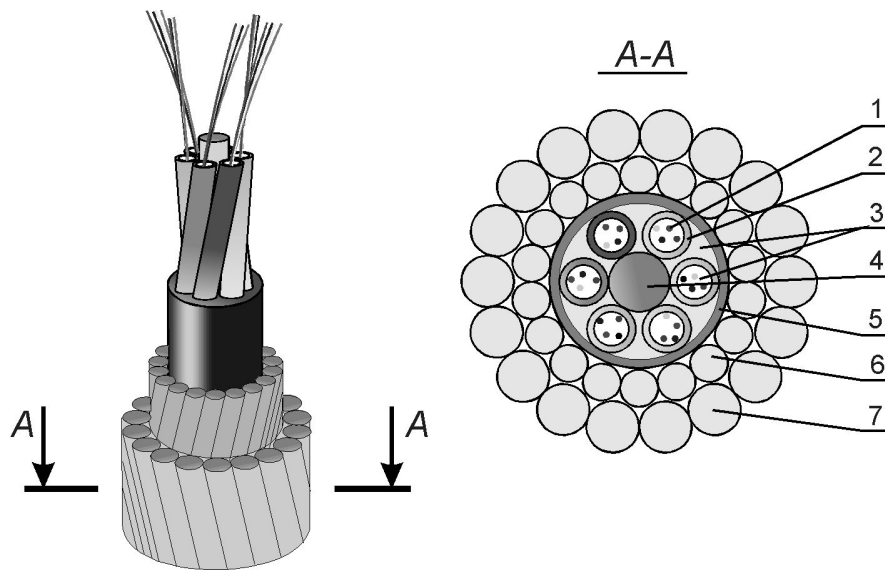


Рисунок 11.8 – ОК, вбудований у канат грозозахисту (OPGW): 1 – ОВ;  
2 – оболонка оптичного модулю; 3 – гідрофобний заповнювач; 4 –  
ЦСЕ; 5 – термовологозахисний прошарок; 6 – сталеві дроти; 7 – дроти  
з алюмінієвого сплаву

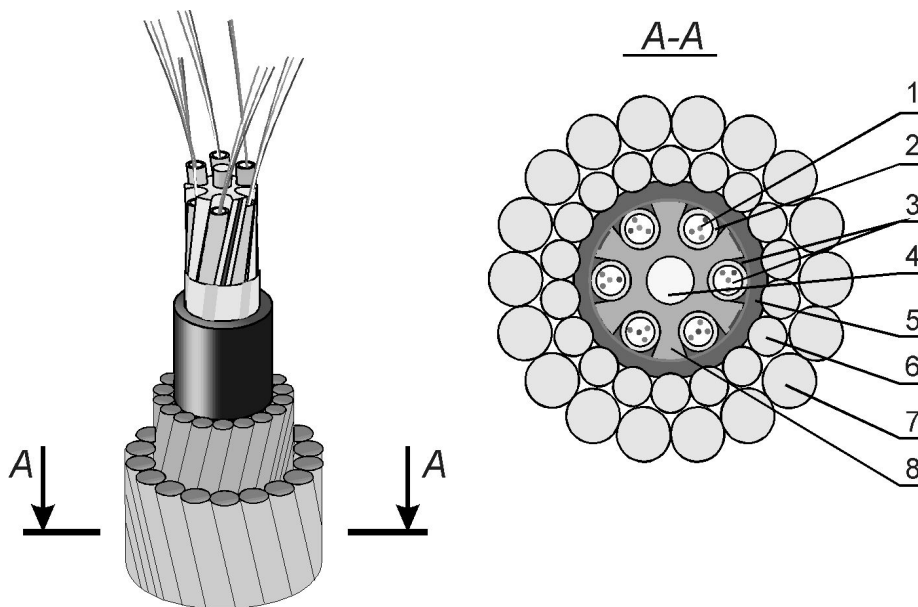
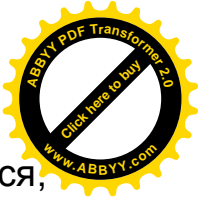


Рисунок 11.9 – ОК, вбудований у канат грозозахисту (OPGW) з  
профільованим осереддям: 1 – ОВ; 2 – оболонка оптичного модулю;  
3 – гідрофобний заповнювач; 4 – ЦСЕ; 5 – термовологозахисний  
прошарок; 6 – сталеві дроти; 7 – дроти з алюмінієвого сплаву; 8 –  
профільоване осереддя



Вибір марки та маркорозміру ОК для підвішування здійснюється, виходячи з вимог ВОЛЗ (за оптичними характеристиками) з урахуванням умов експлуатації повітряної лінії.

## **12 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЩОДО ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ**

Підвішування повітряних ОК на опори виконується так як і підвішування звичайних мідних кабелів. Можливе використання того ж приладдя для підвішування, однак місце зрощування ОК розташовується, як правило, збоку від опори, а не в прогоні, як це часто виконується при з'єднанні мідних кабелів.

До початку монтажу повинні бути виконані наступні роботи:

- підготовка траси повітряної лінії з урахуванням особливостей конструкції опор, розміщення проводів на опорах;
- облаштування захисту на переходах через інженерні споруди;
- доставка на трасу барабанів з ОК і механізмів для його розмотування.

Усі роботи по підвішуванню та монтажу мають проводитись при температурі не нижче мінус 10°C.

Для доставки вздовж траси повітряної ВОЛЗ лінійної арматури і бригадного інструментарію використовується бригана машина, яка укомплектована в обов'язковому порядку медичною аптечкою і бачком для питної води з кухлем.

Комплекти засобів механізації, пристосувань та інструмента повинні бути зазначені у відповідних інструкціях по монтажу ОК, що підвішується на опорах ЛЕП, ліній зв'язку, опорах КМЗ.

### **12.1 Розміщення оптичних кабелів на опорах при відсутності фазових та несучих контактних проводів**

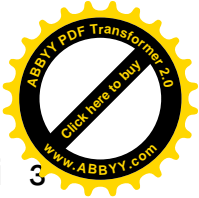
На опорах допускається будь-яке розміщення ОК. З'єднувальні муфти, які встановлюються на опорах, повинні розміщуватись нижче кабелів повітряної ВОЛЗ збоку на опорі.

Відстань між нижчим проводом або кабелем однієї та верхнім проводом (кабелем) іншої лінії зв'язку в місці їх перетину при найнижчій і найвищій температурах повинно бути не менше 60 см.

Відстань між найнижчою точкою ОК і коником даху будівлі повинна бути не менше 1,5 м.

Відстань між ОК які розміщені на опорі і в прогоні (за умов їх зближення) при найбільшій стрілі провисання до 1,2 м повинні бути:

- не більше 20 см при вертикальному розміщенні ОК та їх розміщенні з горизонтальним зсувом; 40 см - в I, II і III районах по ожеледі; 60 см - в особливих районах по ожеледі;



– 40 см при розміщеннях ОК у районах при різній ожеледі з швидкістю вітру до 18 м/с і 60 см - понад 18 м/с.

При стрілі провисання понад 1,2 м вказані відстані повинні бути збільшені пропорційно відношенню найбільшої стріли провисання до стріли провисання, рівної 1,2 м.

При перетині різних повітряних ВОЛЗ на одній опорі відстань по вертикалі між ОК має бути не менше 10 см. Відстань між затискачами та віброгасниками ОК по їх вісям повинна бути не менше 20 см.

Відстань по горизонталі між ОК при спусках на опорі повинна складати не менше 15 см. Відстань від ОК до інших елементів опори повинна бути не менше 5 см.

## **12.2 Розміщення оптичних кабелів при наявності фазових та несучих контактних проводів**

При наявності на опорах фазових проводів ОК повинні підвішуватися в області мінімального потенціалу електромагнітного поля.

Графічне представлення розподілу потенціалу в місцях підвішування ОК (рис. 12.1) є результатом розрахунку, на основі якого визначається стійкість оболонки ОК до поверхневих розрядів, утворення коронуючих електродів.

Необхідна для цього вихідна інформація включає в себе топологію мережі передачі, напругу, вплив електромагнітних полів радіолокаційних станцій і тип ОК.

В районах з товщиною шару льоду 15 та 20 мм, а також в районах з частим коливанням проводів слід застосовувати горизонтальне розміщення ОК повітряної ВОЛЗ.

При товщині шару льоду більше 20 мм і вище слід застосовувати тільки горизонтальне розміщення ОК.

При довжині прогону 500 м і більше та наявності фазних проводів не слід підвішувати ОК на опорах.

Відстань від нижньої точки ОК, підвішеного між опорами КМЗ, до рівня зрізу фундаменту опор контактної мережі при максимальній стрілі провисання повинно бути не менше 5 м.

Відстань від ОК або елементів його кріплення до секційних роз'єднувачів контактної мережі, а також ножів або дугогасних рогів повинно бути не менше 2 м.

Кут відхилення ОК від прямої лінії в точках кріплення в сідлах не повинен перевищувати 10 градусів в будь-якому напрямку.

Відстань між нижчими ОК повітряної ВОЛЗ і тросом, що несе контактний провід електрифікованої залізниці повинна бути не менше 2 м.

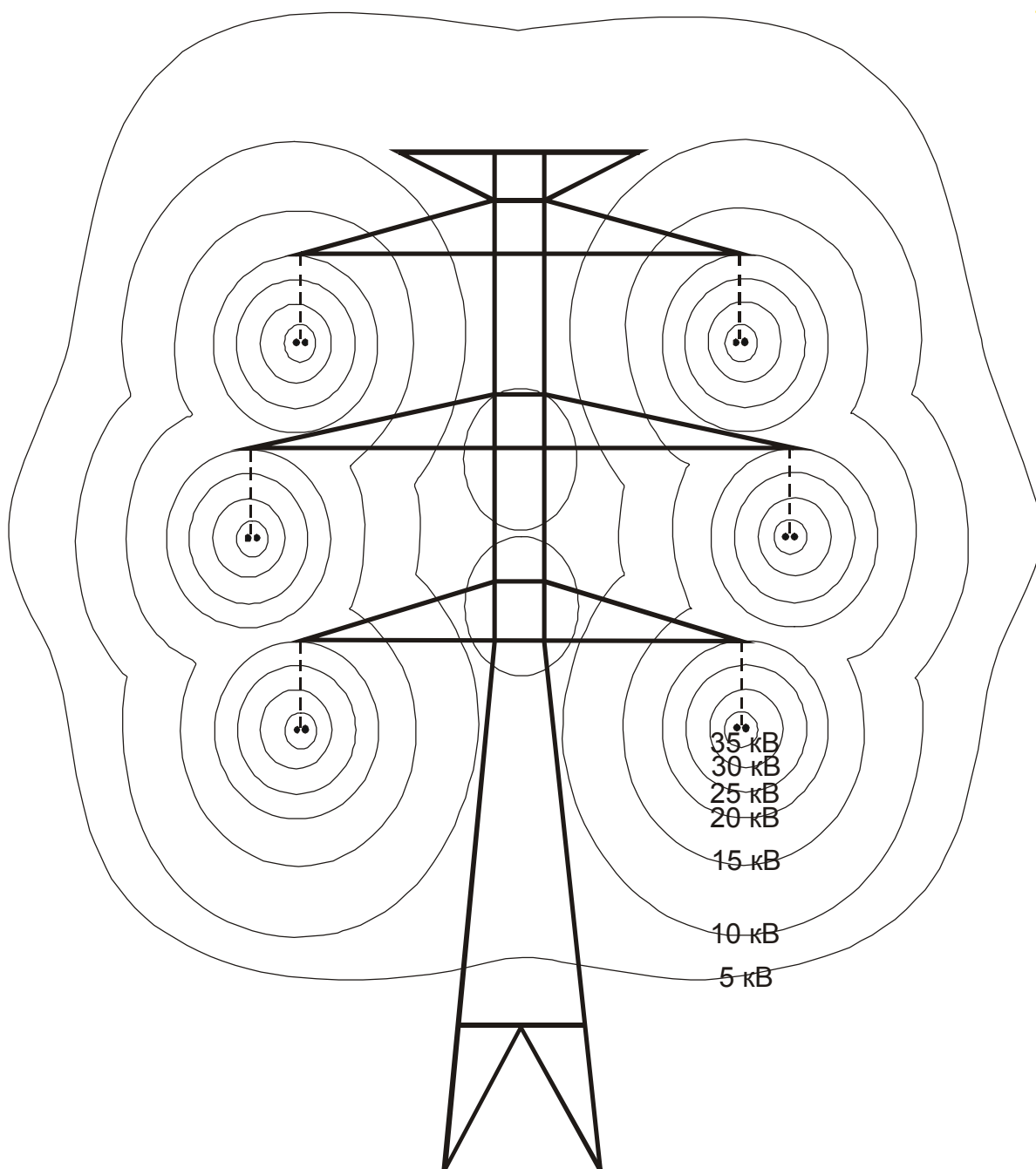


Рисунок 12.1 - Розподіл потенціалу в місцях підвішування ОК

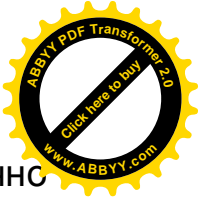
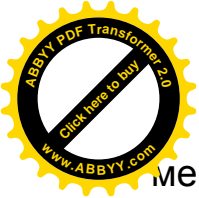
Відстань по горизонталі від опор каліброваних прогонів до найближчого провода потужного струму повинна бути не менше 1 м.

Відстань по горизонталі від місця перетину кабелів повітряних ВОЛЗ і проводів потужного струму до найближчої опори останніх - 5 м.

### **12.3 Перетин оптичного кабелю повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку із залізницею**

При перетині повітряної ВОЛЗ із залізницею відстань від ОК до рівня головки рейки повинна бути (при максимальній стрілі провисання) не





менше 7,5 м. На залізниці з дуже інтенсивним рухом і в деяких технічно обґрунтованих випадках (наприклад, при переході через насипи, на залізничних станціях або в місцях, де обладнання повітряних переходів технічно ускладнено) переходи повітряних ВОЛЗ здійснюють прокладанням ОК в ґрунт.

Перетин ОК повітряних ВОЛЗ із залізницями в місцях сполучення анкерних ділянок контактної мережі забороняється.

Кут перетину повітряних ВОЛЗ із залізницею повинен бути не менше 60°. Бажано по можливості в усіх випадках проводити перетин під кутом, близьким до 80°.

Не допускається застосування опор з будь-якого матеріалу з відтяжками та дерев'яних опор. Дерев'яні проміжні опори повинні бути П - подібними (з Х - або Z - подібними зв'язками) або А - подібними.

При перетині та зближенні ОК повітряних ВОЛЗ із залізницями і високовольтними ЛЕП необхідно керуватися вимогами, що вказані у розділі 12.1.

При перетині залізниць загального користування, електрифікованих та тих, що підлягають електрифікації, опори повітряних ВОЛЗ, які обмежують прогін перетину, повинні бути анкерними нормальної конструкції. На ділянках з особливо інтенсивним та інтенсивним рухом поїздів ці опори повинні бути металевими.

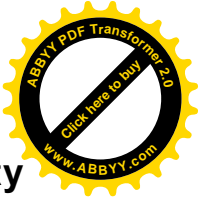
Допускається в прогоні перетину, обмеженого по анкерним опорам, встановлення проміжної опори між шляхами, не передбаченими для проходження регулярних пасажирських поїздів, а також проміжних опор по краях залізничного полотна. Вказані опори повинні бути металевими або залізобетонними. ОК повинен бути прикріпленим до сталевого троса. Затискачі, що підтримують його повинні бути глухими.

При перетині залізниць незагального користування допускається застосування анкерних опор полегшеної конструкції та проміжних опор з підвішуванням ОК на глухих затискачах. Опори всіх типів, встановлені на перетинах залізниць незагального користування, можуть бути стоячими вільно або на відтяжках.

Використання в якості заземлювачів арматури залізобетонних опор і залізобетонних пасинків у опор, що обмежують прогін перетину, забороняється.

При перетині ОК повітряних ВОЛЗ із залізницею, яка має лісозахисні насадження, слід керуватися вимогами розділу 12.4.

Відстань (по горизонталі) від опор стовпової лінії до головки найближчої рейки при проходженні повітряних ВОЛЗ вздовж залізничного полотна повинно бути не менше  $1\frac{1}{3}$  висоти наземної частини опори.



## **12.4 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по лісовим масивам, зеленим насадженням, орним і культурним землям**

З ціллю прокладання повітряних ВОЛЗ по лісових масивах прорубуються просіки. При визначенні ширини просіки повинні враховуватись умови експлуатації повітряних ВОЛЗ і лісового господарства, можливість пошкодження ОК і можливості швидкої ліквідації пошкоджень (породи лісу, характер ґрунтів, доступність траси і таке інше).

В парках, заповідниках, зелених зонах навколо населених пунктів, цінних лісових масивах, захисних смугах вздовж залізниць і шосейних доріг, водяних просторах ширину просік для повітряних ВОЛЗ слід передбачувати такою, щоб відстані від повітряної ВОЛЗ до крони дерев (по горизонталі) були не менше 1 м.

Слід вибирати вирубки лісозахисних насаджень, розташованих вздовж залізниць, ярів і водяних просторів.

При проходженні повітряної ВОЛЗ по орним і культурним землям не слід займати землі, які орошаються дощовими установками.

Відстань від землі до нижнього ОК повітряної ВОЛЗ в межах населених пунктів повинно бути не менше 4,5 м.

Відстань від землі до нижнього ОК повітряної ВОЛЗ на переходах через шосейні, ґрунтові, польові (степові) дороги повинно бути не менше 5,5 м.

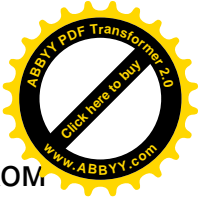
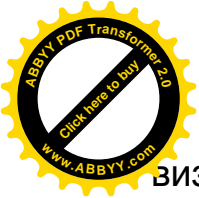
## **12.5 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по мостах**

При проходженні повітряної ВОЛЗ по мостах опори або підтримуючі пристрої, які обмежують прогони від берега до мосту і через розвідну частину моста, повинні бути анкерними нормальної конструкції. Усі інші підтримуючі пристрої на мостах можуть бути проміжного типу з кріпленням проводів глухими затискачами.

На металевих залізничних мостах (з їздою по низу), що забезпечені на всій відстані верхніми зв'язками, оптичні кабелі розташовують вище зв'язок, безпосередньо над прогонною будовою моста, або за його межами. Розміщувати ОК в середині габариту будови моста та в межах ширини, зайнятої елементами КМЗ, не допускається. Відстані від ОК до проводів КМЗ і високовольтних ліній, прокладених по конструкції моста, вибираються згідно з розділами 12.2 та 12.3.

Найменша відстань ОК від найбільш високих щогл суден, що проходять по водному шляху під час найбільшої повені при переході повітряної ВОЛЗ через ріки і канали повинна бути не менше 1 м.

Найменша відстань від ОК до різних частин мостів повинна узгоджуватися з організаціями, яким підпорядковані мости. При цьому



визначення найбільшої стріли провисання ОК здійснюється шляхом порівняння стріли провисання при вищій розрахунковій температурі повітря і при ожеледі.

## **12.6 Проходження повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку по греблях і дамбах**

При проходженні повітряних ВОЛЗ по греблях, дамбах, тощо, відстань від оптичного кабелю при найбільшій стрілі провисання і найбільшому нахилі до різних частин гребель і дамб повинна бути не менша приведених у табл. 12.1.

**Таблиця 12.1 – Найменша відстань від ОК до різних частин гребель і дамб**

<b>Частина гребель і дамб</b>	<b>Найменша відстань, м</b>
Гребінь і бровка відкосу	6
Похила поверхня відкосу	5
Поверхня води, яка переливається через греблю	4

При проходженні повітряної ВОЛЗ по греблях і дамбах (по яким прокладені шляхи сполучення), повітряна ВОЛЗ повинна задовольняти також вимогам, що висуваються до повітряних ВОЛЗ при перетинах і зближеннях з відповідними об'єктами шляхів сполучення.

Найбільша стріла провисання ОК повітряної ВОЛЗ повинна визначатися шляхом порівняння стріл провисання при найвищій розрахунковій температурі повітря і при ожеледі.

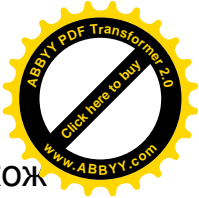
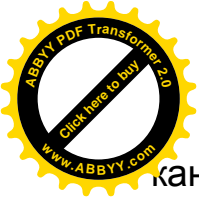
## **12.7 Перетин і зближення повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку із підземними і наземними трубопроводами і канатними дорогами**

Кут перетину ОК повітряних ВОЛЗ з наземними газопроводами, нафтопроводами і нафтопродуктопроводами рекомендується вибирати близьким 90 градусів. Кут перетину повітряної ВОЛЗ з іншими підземними і наземними трубопроводами, а також з канатними дорогами не нормується.

При перетині повітряної ВОЛЗ з підземними і наземними трубопроводами і канатними дорогами опори високовольтних ліній і ліній зв'язку, що обмежують прогін перетину, повинні бути анкерними нормальної конструкції.

При перетині трубопроводів і канатних доріг ОК повітряних ВОЛЗ повинні розташовуватись над трубопроводами і канатними дорогами.

Відстані при перетині, наближенні і паралельному слідуванні ОК повітряних ВОЛЗ з підземними і наземними трубопроводами та



канатними дорогами повинні відповідати вимогам розділу 12.2, а також ПУЕ для високовольтних ліній (при підвішуванні ОК на опорах ЛЕП) і нормативним вимогам для повітряних ліній зв'язку (при підвішуванні ОК на опорах повітряних ліній зв'язку).

### **12.8 Перетин і зближення оптичного кабелю повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку з підземними трубопроводами**

Кут перетину повітряної ВОЛЗ з підземними магістральними газопроводами, нафтопроводами і нафтопродуктопроводами не нормується.

Відстань повітряної ВОЛЗ від діючих і тих, що споруджуються, магістральних газопроводів (тиском більше 1,2 МПа) магістральних нафтопроводів і нафтопродуктопроводів повинна бути не менше 15 м.

ОК необхідно розташовувати не ближче 300 м від продувних свічок, що встановлюються на магістральних газопроводах.

При паралельному слідуванні повітряних ВОЛЗ, а також в місцях їх перетину із трубопроводами відстані (по горизонталі) від заземлювача і підземної частини (фундаменту) опор високовольтних ліній до трубопроводів повинні бути не менше 5 м, до опор ліній зв'язку - не менше 15 м.

При зближенні і перетині повітряних ВОЛЗ з магістральними і розподільвальними газопроводами тиском 1,2 МПа і менше, а також при зближенні і перетині з відгалужуваннями від магістральних газопроводів до населених пунктів і промислових підприємств і з відгалужуваннями від нафтопроводів і нафтопродуктопроводів до нафтобаз і підприємств відстані від заземлювача і підземної частини (фундаментів) опор високовольтних ліній повинні бути не менше 5 м, а від опор ліній зв'язку не менше 1 м.

Відстань від елементів заземлення та підземної частини фундаментів опор високовольтних ліній і ліній зв'язку при зближенні і перетині повітряних ВОЛЗ з теплопроводами, водопроводом, каналізацією (напірною і самопливною), водостоками і дренажами повинні бути не менше 2 м.

## **13 АРМАТУРА ДЛЯ ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ**

Вибір арматури для підвішування ОК на опорах різного призначення здійснюється на стадії проектування виходячи з технічного завдання, що визначає її необхідну механічну стійкість.

Вихідними даними для вибору арматури є:

- тип ОК для підвішування;
- рельєф місцевості проходження траси ВОЛЗ;
- кліматичні умови району проходження траси ВОЛЗ;

- тип опор, на які підвішується ОК;
- матеріал, з якого виготовлені опори.

При цьому механічні навантаження на арматуру в процесі будівництва та експлуатації ВОЛЗ не повинні перевищувати нормованих значень, арматура - негативно впливати на оптичний кабель, а сам ОК - зазнавати стиску, що перевищує дозволені значення, та вигинатися за радіусами меншими припустимих.

ОК для підвішування на опорах ПЛЗ, ЛЕП та КМЗ необхідно комплектувати арматурою, до складу якої відносяться натяжна, підтримувальна та спеціальна арматура, а також антивібраційні пристрої.

Кріплення ОК на опорах ЛЕП, КМЗ чи ПЛЗ здійснюється за допомогою натяжних та підтримувальних затискачів.

Натяжний затискач використовується для кріплення ОК на проміжних опорах чи кутових опорах при кутах зміни напрямку траси більше за  $20^\circ$ , або при зміні висоти підвішування відносно площини горизонту при кутах більше за  $30^\circ$ . За конструкцією натяжні затискачі умовно поділяються на жорсткий та гнучкий типи.

Приклад конструкції натяжного затискача жорсткого типу для ОК типу OPGW наведено на рис. 13.1. Затискач складається з жорсткого дугоподібного корпусу 1 з пазом, в який вкладається ОК і затискується за допомогою накладки 2. Для забезпечення зчеплення ОК з корпусом, поверхня паза виготовляється рифленою. Для приєднання затискача до опор використовується вушко 4.

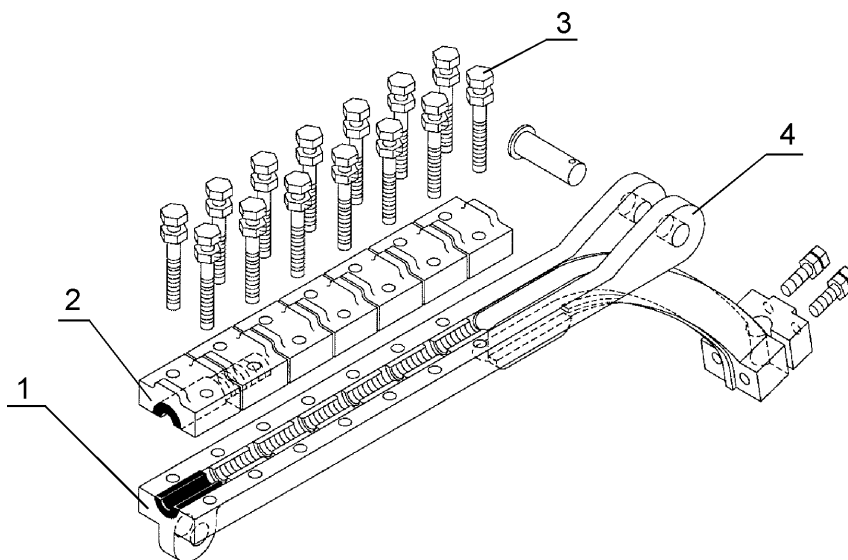
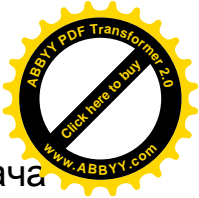
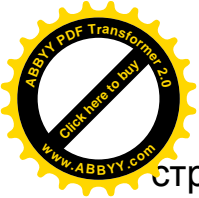


Рисунок 13.1 – Натяжний затискач жорсткого типу: 1 – корпус; 2 – накладка; 3 – болт; 4 – вушко

Приклади конструкції натяжного затискача гнучкого типу для ОК типу OPGW та ADSS подано на рис. 13.2. Затискач складається з круглих або



стрічкових спіралей, що навиваються на ОК. Для приєднання затискача до опор використовується серга з вушком.

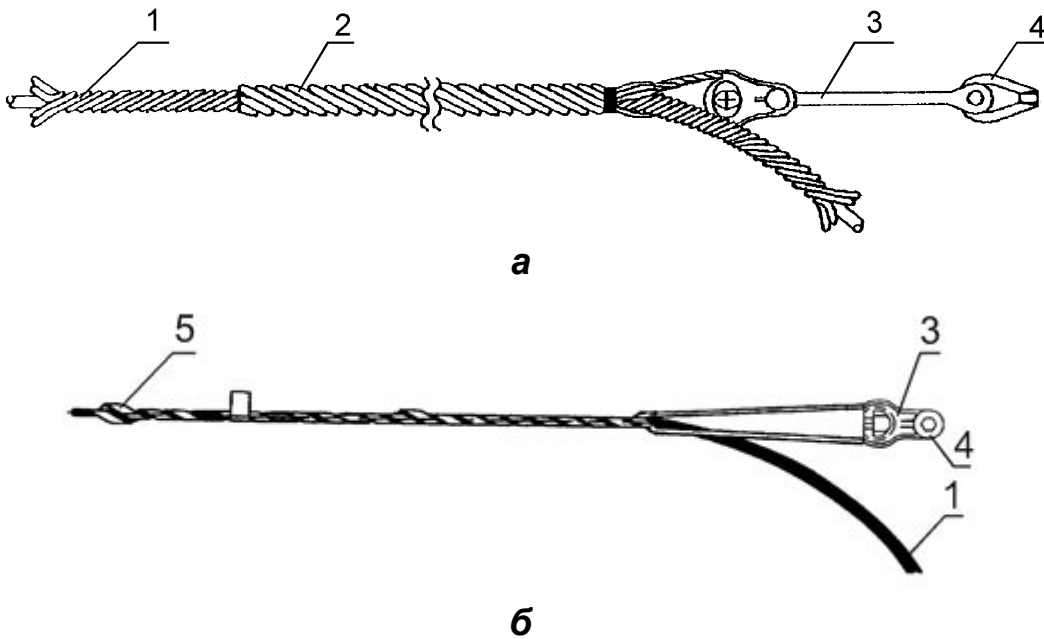


Рисунок 13.2 – Затискач натяжний гнучкого типу з круглими (а) та стрічковими (б) спіралями: 1 – ОК; 2 – кругла спіраль; 3 – серга; 4 – вушко; 5 – стрічкова спіраль

Підтримувальний затискач використовується для закріплення ОК на усіх типах опор, в тому числі при зміні напрямку з кутами до  $20^\circ$ . За конструкцією підтримувальні затискачі умовно поділяються на спіральні, комбіновані, шлейфові та “човникові”. Підтримувальні затискачі спірального типу виготовляються з амортизаторами (рис. 13.3) або без них (рис. 13.4).

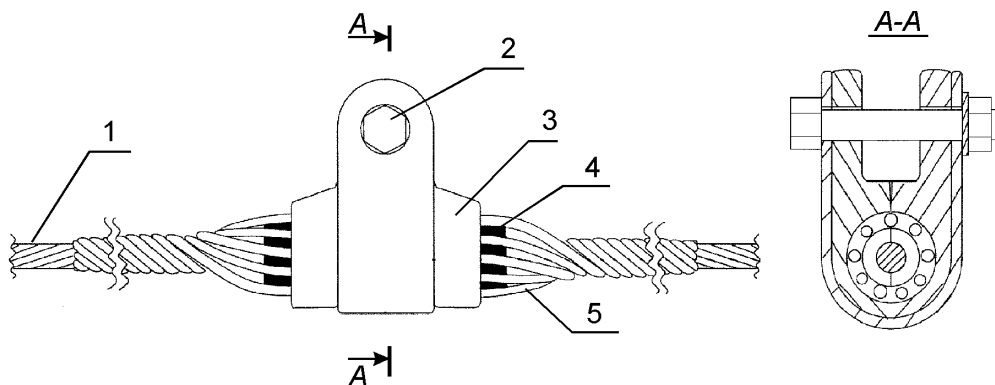
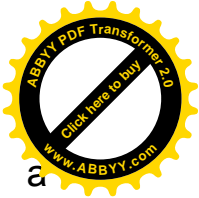
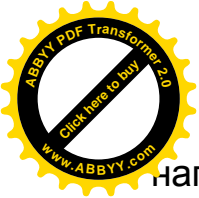


Рисунок 13.3 – Затискач підтримувальний спірального типу з амортизатором: 1 – ОК; 2 – болт; 3 – корпус затискача; 4 – протектор; 5 – амортизатор

У підтримувального спірального затискача, зображеного на рис. 13.3, протектор 4 виконується у вигляді двох гумово-металевих





напіввтулок, що накладаються на ОК 1 чи грозозахисний канат, а амортизатор 5 - це комплект окремих спіралей, що навиваються поверх протектора.

Підтримувальний спіральний затискач, зображений на рис. 13.4, не містить протектора та складається з стрічкових спіралей 1, що навиваються поверх ОК 2. Для приєднання затискача до опор використовується вушко 3.

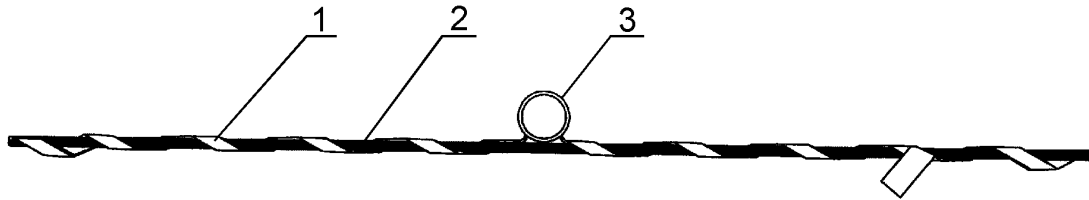


Рисунок 13.4 – Затискач підтримувальний спірального типу без амортизатора: 1 – стрічкова спіраль ; 2 – ОК; 3 – вушко

Підтримувальні затискачі комбінованого (рис. 13.5) та шлейфового типу виготовляються з амортизаторами, чи без них (рис. 13.6).

У підтримувального затискача комбінованого типу, зображеного на рис. 13.5, амортизатор виконується у вигляді двох роликів 5 підтримки ОК 3, що підпружинені натискними поздовжніми пружинами 9. ОК 3 притискується до корпусу 1 затискача за допомогою затискного болта 8 через пересувну планку 7. Для приєднання затискача до опор використовується вушко 2.

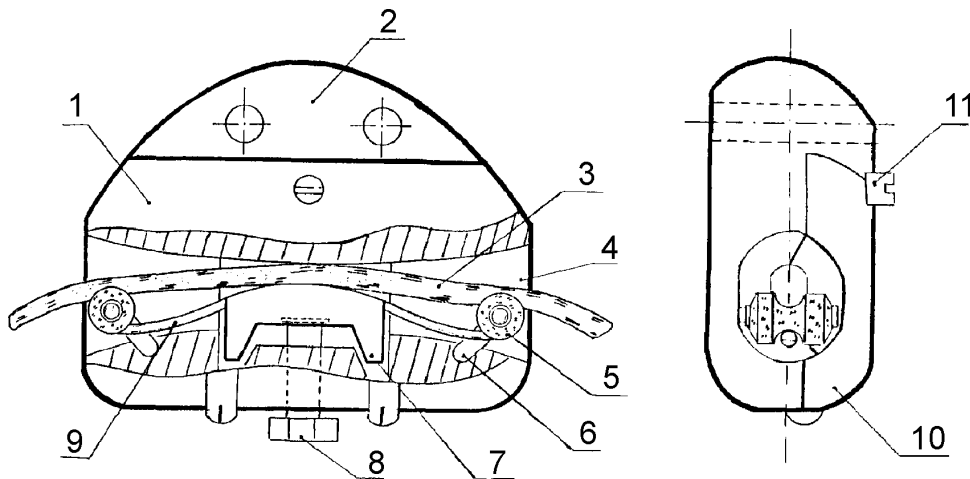


Рисунок 13.5 – Затискач підтримувальний комбінованого типу з амортизатором для підвішування самонесучого ОК: 1 – корпус затискача; 2 – елемент кріплення корпусу до опори; 3 – ОК; 4 – отвір вводу-виводу ОК; 5 – ролик підтримки ОК; 6 – пази для встановлення роликів; 7 – планка пересувна; 8 – болт затискний; 9 – пружина натискна поздовжня; 10 – кришка відкидна; 11 – болт для затиску кришки



Підтримувальний шлейфовий затискач, зображений на рис. 13.6, не містить амортизатора і складається з двох накладок 1, між якими міститься ОК 2 і затискується за допомогою болта 3, який також призначається для приєднання затискача до опори. Вони призначаються для вертикального кріплення ОК в пунктах натягу, на яких розміщуються муфти або організовані відводи ОК.

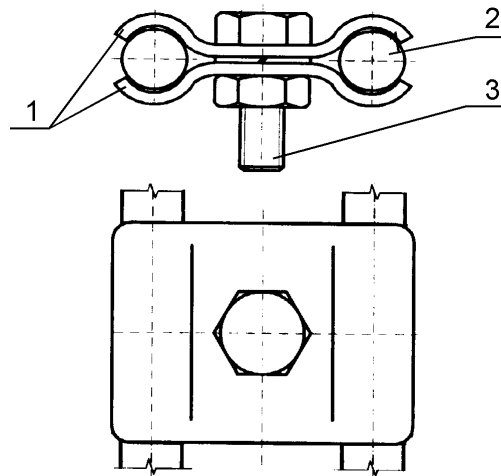


Рисунок 13.6 – Затискач шлейфовий без амортизатора для кріплення ОК: 1 – накладка; 2 – ОК; 3 – болт

У підтримувального затискача “човникового” типу, зображеного на рис. 13.7, оптичний кабель 1 розміщується у направляючій типу “човен” 2 і фіксується за допомогою колодки 4 з гумовими накладками. Фіксація ОК здійснюється за допомогою болтових з’єднань 3. Такий підтримувальний затискач використовується для підвішування ОК типу OPGW.

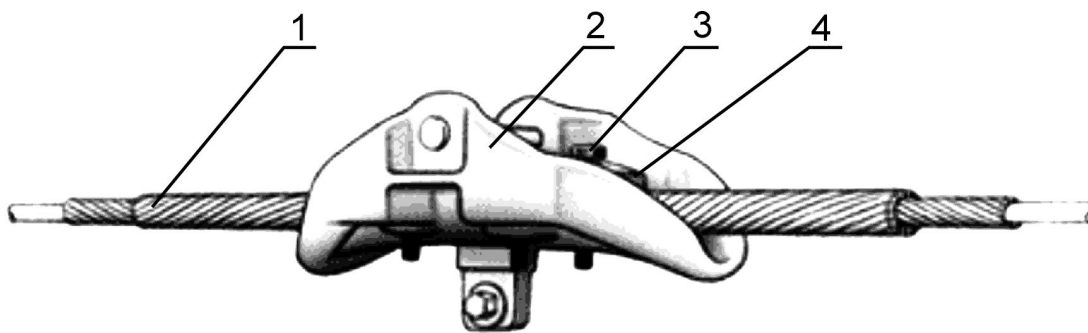
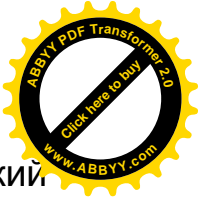
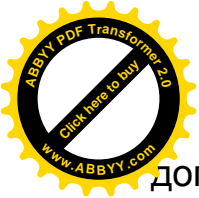


Рисунок 13.7 – Підтримувальний затискач “човникового” типу: 1 – ОК; 2 – човен; 3 – болт; 4 – колодка

У підтримувального затискача “човникового” типу зображеного на рис. 13.8, ОК 1 розміщується у направляючій типу “човен” 4 і фіксується за допомогою колодки 5 та болтових з’єднань. “Човни” кріпляться за допомогою болтів 3 до кронштейну 2, який кріпиться до опори за



допомогою вушка, що розміщується у верхній частині кронштейна. Такий підтримувальний затискач використовується для підвішування ОК типу OPGW або несучого каната.

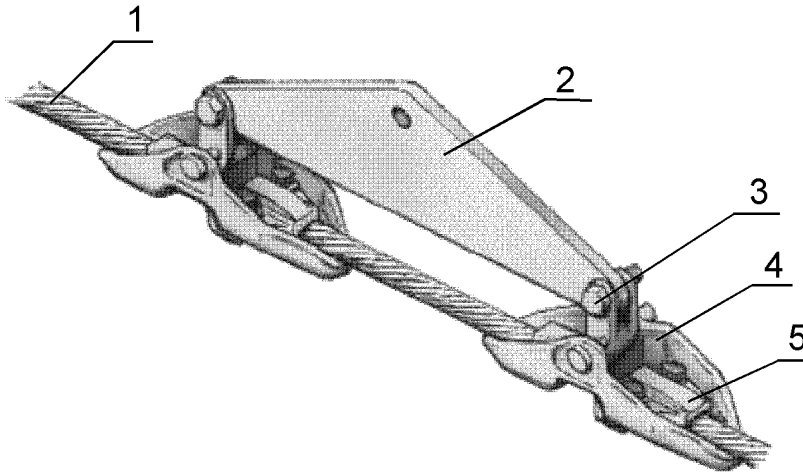


Рисунок 13.8 – Подвійний підтримувальний затискач “човникового” типу з кронштейном: 1 – ОК; 2 – кронштейн; 3 – болт; 4 – човен; 5 – колодка

При виборі затискачів слід враховувати:

- діаметр ОК;
- конструкцію і матеріал несучого канату (для ОК з вбудованим несучим канатом);
- форму і розміри місця, що з'єднує несучий канат з ОК;
- довжину прольоту;
- погонну масу ОК;
- міцність оболонки ОК.

Міцність кріплення ОК у натяжному затискачі – це величина, що визначає прослизання ОК у затискачі та скидання тяжини ОК.

Міцність кріплення оптичного кабелю  $P_з$  (кН), у натяжному затискачі визначається за формулою:

$$P_з = kP_к, \quad (13.1)$$

де  $P_к$  – короточасне значення натягу, що допускається для оптичного кабелю, кН;  $k$  – коефіцієнт запасу (безрозмірна величина).

До спеціальної арматури відносяться кронштейни, струбцини, кінцеві аксесуари та віброгасники.

Для закріплення натяжних та підтримувальних затискачів до опор різного призначення і монтажу відтяжних пристроїв використовують кронштейни. Приклад конструкції кронштейна подано на рис. 13.9.

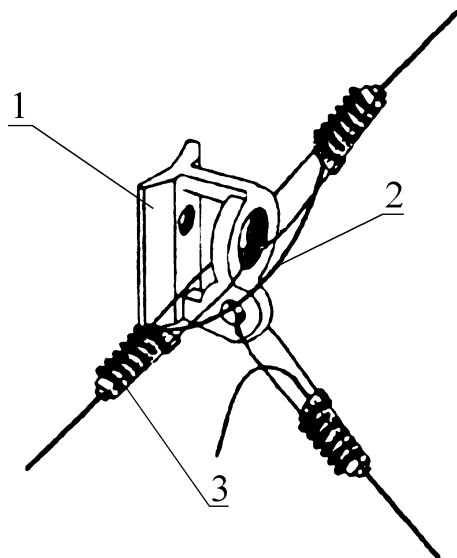


Рисунок 13.9 – Конструкція кронштейну: 1 – корпус кронштейну; 2 - ОК; 3 – затискач

Для закріплення підтримувальних шлейфових затискачів до металевих опор різного призначення застосовують струбцини. Види конструкцій струбцин подано на рис. 13.10.

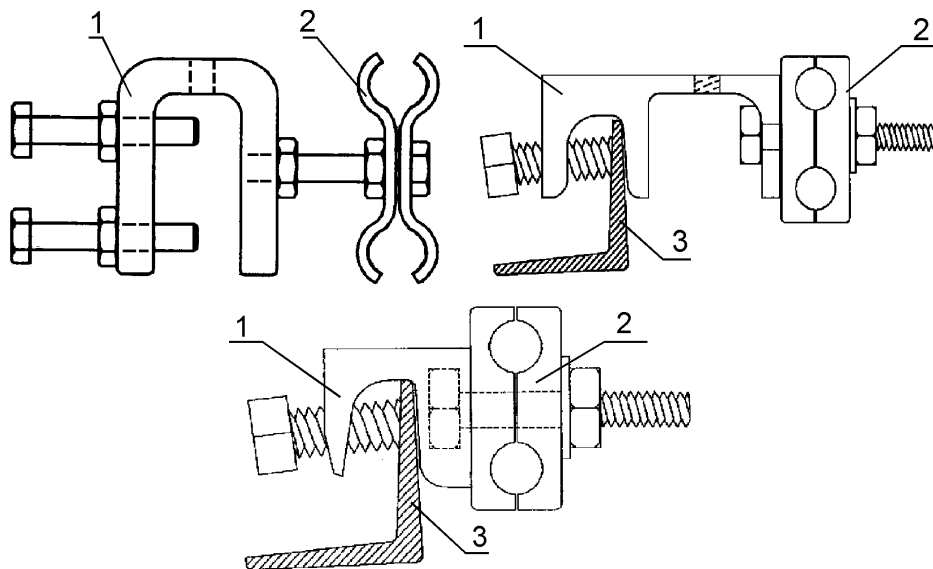


Рисунок 13.10 – Різновиди струбцин для закріплення підтримувальних затискачів шлейфового типу: 1 - струбцина; 2 - підтримувальний затискач шлейфового типу; 3 - елемент конструкції металевої опори

Приклади конструкцій кінцевих аксесуарів різного призначення показано на рис. 13.11.

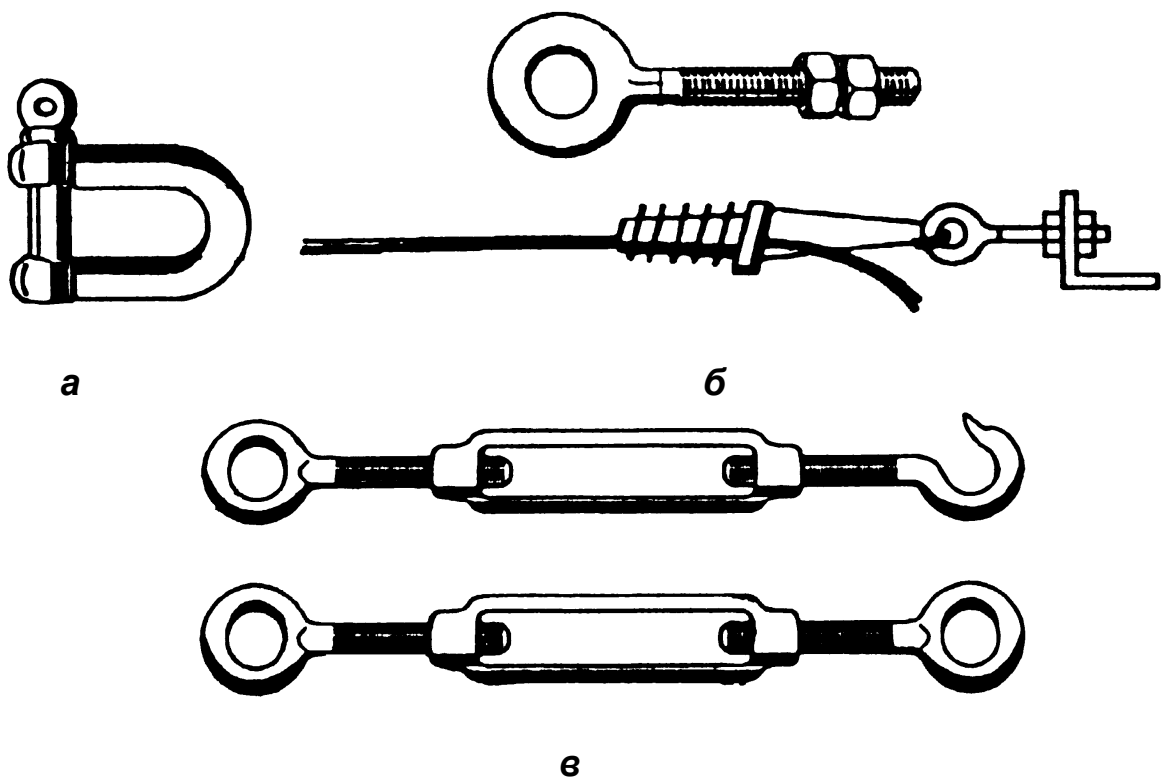


Рисунок 13.11 - Кінцева арматура: скоба (а), гвинт з одворотом (б), натяжний пристрій (в)

Приклади конструкцій пристроїв для захисту ОК від вібрації (віброгасників) показано на рис. 13.12 – 13.14.

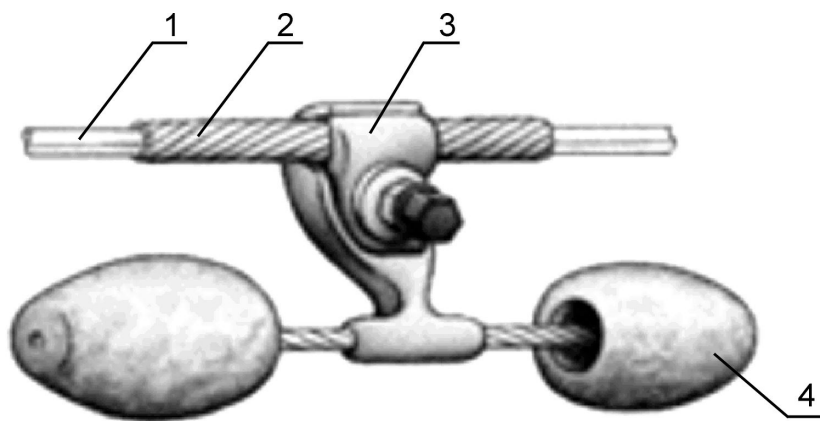


Рисунок 13.12 - Підвісний віброгасник: 1 - ОК; 2 - армуючий елемент; 3 - затискач; 4 – вантаж

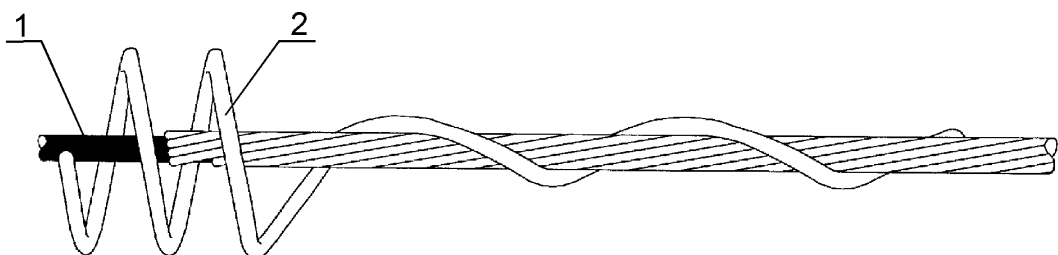


Рисунок 13.13 - Віброгасник спірального типу: 1 - ОК; 2 – дріт

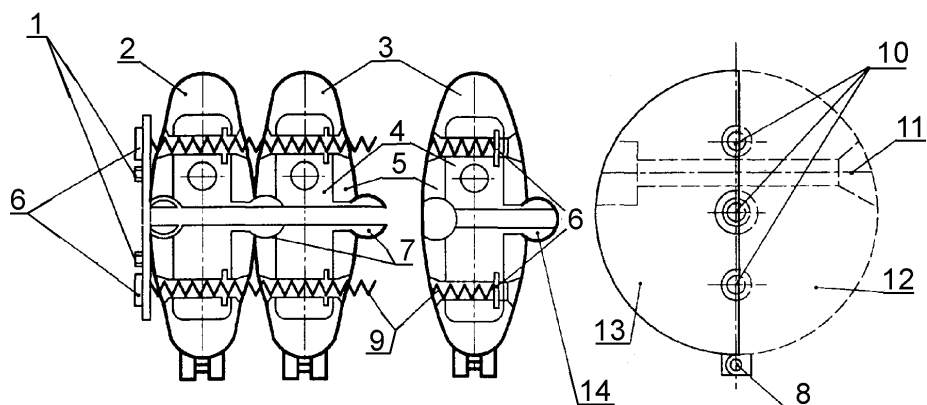


Рисунок 13.14 - Віброгасник пружинного типу: 1 - вузол кріплення основного вантажу; 2 - основний вантаж; 3 - додаткові вантажі; 4 - демпфуюча гума; 5 - керамічний корпус; 6 - пружинні фіксатори основного та додаткового вантажів; 7 - гумові напрямлені фіксатори; 8 - вузол повороту напівкальки – кришки; 9 - пружини; 10 - отвір кріплення основного і додаткового вантажів; 11 - фіксаторний болт; 12 - напівдиск - відкидна кришка; 13 - напівдиски; 14 - канал розміщення ОК

## 14 ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВІШУВАННЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ

### 14.1 Загальні положення

Підвішування оптичних кабелів здійснюється у відповідності до проектної документації.

Перед початком робіт з підвішування ОК необхідно:

- провести старанне обстеження траси, стану опор відповідної лінії (ЛЕП, ПЛЗ чи КМЗ), на які буде підвішуватися ОК;
- впевнитися у відсутності на трасі ПЛЗ дерев, чагарнику та інших перешкод, що ускладнюють роботи з підвішування ОК;
- визначити місце розташування підоб'єктових складів та площадок для встановлення кабельних барабанів, наявність під'їзних шляхів до них та до місця проведення робіт;
- підготувати і узгодити з власником відповідної лінії (ЛЕП, ПЛЗ чи КМЗ), на опори якої підвішуватиметься ОК, графік проведення робіт, де необхідно обговорити питання, пов'язані з безпечним виконанням робіт.

До початку підвішування ОК повинні бути виконані такі роботи:

- підготовка траси повітряної ВОЛЗ з урахуванням особливостей конструкції опор та розташування проводів на них;
- облаштування захисту на переходах через інженерні споруди;
- доставка на трасу барабанів з ОК і механізмів для його розмотування.





Для доставки на трасу повітряної ВОЛЗ бригади, лінійної арматури та інструмента використовують бригадну машину, яка укомплектована в обов'язковому порядку медичною аптечкою і бачком для питної води з кухлем.

При підвішуванні ОК на опорах необхідно обов'язково використовувати комплекти засобів механізації, пристосувань та інструменту, перелік яких приведено у відповідних інструкціях з підвішування ОК на опорах ЛЕП, ПЛЗ та КМЗ.

Підвішування ОК проводиться при температурі не нижче мінус 10°C.

В процесі підвішування ОК треба виконати заходи, які б виключали можливість порушення механічних та оптичних характеристик ОК.

Змотування ОК здійснюється шляхом обертання барабана, який розташований на осі. Забороняється змотувати ОК натягуванням кабелю чи перекочуванням барабану. Забороняється знімати кабель з нерухомого барабана. При змотуванні ОК з барабанів не можна допускати різких вигинів оптичного кабелю та його заломів, які виникають внаслідок злипання або змерзання витків, неправильної заводської намотки, різкої зміни швидкості обертання барабана тощо. При маніпуляціях з ОК не повинні порушуватися нормативні величини на мінімально допустимий радіус вигину оптичного кабелю.

Будівельна довжина ОК повинна закінчуватися на опорі ПЛЗ, ЛЕП чи КМЗ. При цьому необхідно передбачати запас оптичного кабелю (крім вбудованих в грозозахисний канат та фазовий провід) для його монтажу в лабораторії вимірювання і монтажу оптичного кабелю (ЛВМОК).

Пункт інсталяції (ПІ) – місце на опорі де відбувається закріплення підвішеного ОК. Існує два типи ПІ: пункти натягу (ПН) та пункти підвішування (ПП). Вони мають різні характеристики і у кожному випадку використовується різна арматура. В ПН ОК фіксується за допомогою натяжних затискачів, в окремих ПП ОК фіксується за допомогою підтримувальних затискачів.

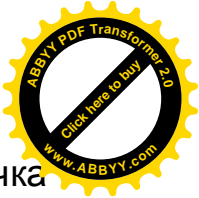
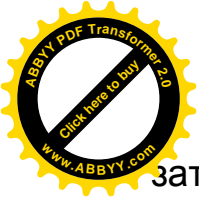
Пункт натягу (анкерівка) являє собою ПІ на кінцевій (анкерній) опорі, в якому ОК натягується з однієї сторони ПН і ослаблюється з іншої. ПН організуються:

- якщо опора є кінцевою;
- якщо відбувається зміна напрямку траси на кут понад 20°;
- якщо відбувається суттєва зміна у висоті підвішування ОК;
- якщо ОК проводиться в будівлі;
- через кожний 1 км траси при підвішуванні ОК великої довжини.

Пункти підвішування являють собою пункти інсталяції, що розміщуються на проміжних опорах, і призначені для підтримування ОК між пунктами натягу.

Довжина прольоту - горизонтальна відстань між осями двох сусідніх опор.

Провис - це вертикальна відстань між найнижчою точкою ОК до затискача на опорі (при постійній висоті підвішування), або найнижчого



затискача на прольоті (при змінній висоті підвішування). Найнижча точка ОК знаходиться між опорами на середині прольоту.

Сегмент – відстань між двома запланованими муфтами. При підвішуванні ОК сегмент не завжди може співпадати з будівельною довжиною ОК.

## **14.2 Підвішування оптичних кабелів на опорах повітряних ліній зв'язку**

До початку підвішування самонесучого оптичного кабелю (крім ОК з несучим елементом) на кінцевих та проміжних опорах повітряних ліній зв'язку встановлюють спеціальні консолі для кріплення затискачів (відповідно натяжних та підтримувальних) і напрямні роликові блоки (нижче чи вище спеціальних консолей).

На траверсах ПЛЗ встановлюють:

- болти з гаками чи гаки підвісні, до яких кріпляться підтримувальні затискачі (на проміжних опорах);
- спеціальні консолі для кріплення натяжних затискачів;
- болти з гаками чи гаки підвісні, до яких кріпляться натяжні затискачі (на кінцевих опорах).

Нижче болтів з гаками чи спеціальних консолей встановлюють напрямні роликові блоки. Після цього тяговий канат лебідки розмотують уздовж лінії опор і піднімають його на ролики направляючих блоків.

До початку підвішування самонесучого ОК з несучим елементом на проміжних опорах ПЛЗ встановлюють консолі для кріплення несучого елемента, вбудованого в ОК.

На траверсах проміжних опор встановлюють болти з гаками чи гаки підвісні, до яких кріпляться консолі для кріплення несучого елемента ОК.

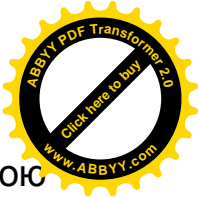
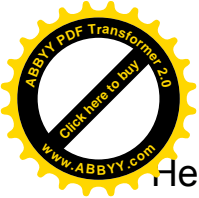
Нижче болтів з гаками чи консолей встановлюють спеціальні напрямні роликові блоки.

Тяговий канат лебідки розмотують уздовж лінії опор і піднімають на ролики напрямних блоків. Від кінця кабелю на відстані, яка дорівнює висоті опори плюс 4 м, від оболонки ОК відділяють вбудований несучий елемент.

Перед підвішуванням несамонесучого ОК на проміжних опорах ПЛЗ встановлюють консолі для кріплення несучого каната. Нижче або вище консолей встановлюють спеціальні напрямні роликові блоки. Несучий канат розмотують вздовж лінії опор, з'єднують будівельні довжини несучого каната.

З'єднання каната в прольотах між опорами ПЛЗ не допускається. Потім несучий канат піднімають на ролики напрямних блоків, натягують і закріплюють. Тяговий канат лебідки розмотують уздовж лінії опор і піднімають на ролики блоків.

Для підвішування несамонесучих ОК на опори ПЛЗ можуть бути використані сталеві канати чи дроти, марки яких подано у таблиці 14.1.



Несамонесучий ОК до несучого каната може кріпитись за допомогою підвісів (типорозміри яких подано у таблиці 14.2).

Відстань між підвісами, якими несамонесучий ОК кріпиться до несучого каната, повинна бути не більше 350 мм.

Підвіс для кріплення несамонесучого ОК зображений на рисунку 14.1.

**Таблиця 14.1 - Марки канатів та дротів**

Марка каната та дроту	Марка підвісу
Канати: - 6,8- Г-1-Н-С-1372 (140)	П-16, П-20, П-24, П-29
- 4,3- Г-1-Н-С-1372 (140)	П-11, П-13
Сталевий оцинкований дріт діаметром 5 (4) мм	П-9, П-11, П-13

**Примітка.** У марках каната цифри та букви позначають: перша цифра - діаметр каната (мм); Г – вантажний; 1 – першої марки, Н – що не розкручується; С, Ж або ОЖ – оцинкований відповідно для середніх, жорстких або особливо жорстких агресивних умов експлуатації (за ГОСТ 15150); 1372 (140) - група маркування 1 372 МПа (140 кг/мм<sup>2</sup>)

**Таблиця 14.2 - Типорозміри підвісів**

Марка підвісу	Розміри, мм				
	а	б	в	г	д
П - 9	9	9	40	17	1
П - 11	11	9	40	17	1
П - 13	13	9	40	17	1
П - 16	16	12	45	25	1
П - 20	20	12	55	30	1
П - 24	24	12	55	30	1
П - 29	29	14	65	30	1

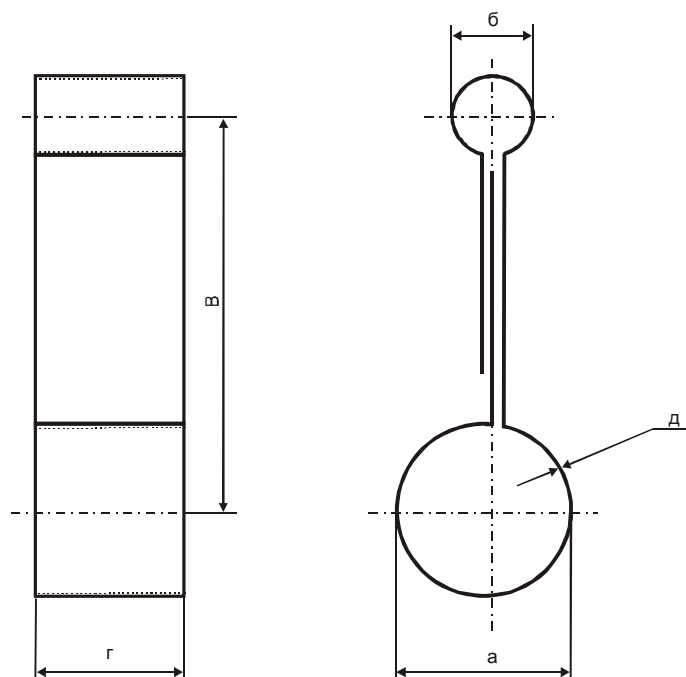
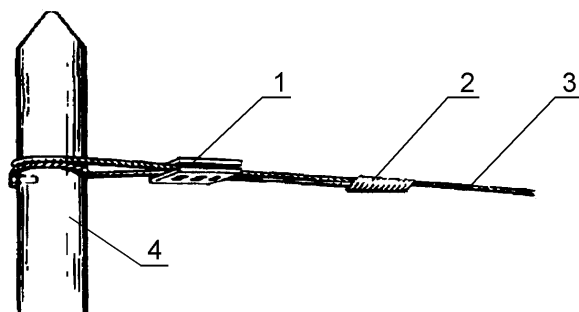


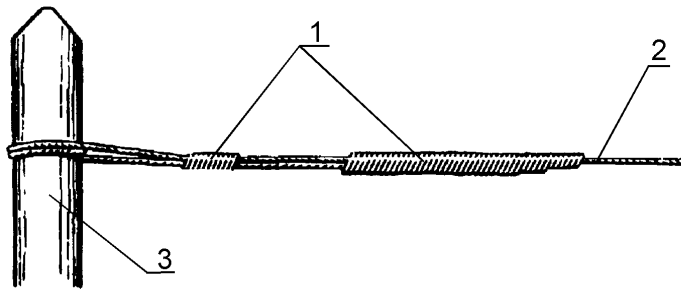
Рисунок 14.1 – Схематичне зображення підвісу для кріплення ОК до несучого канату

Несучий елемент самонесучого ОК (типу “вісімки”) чи несучий канат (дріт) до опор ПЛЗ може кріпитись за допомогою струбцин, спеціальних клем чи кінцевим в'язанням з обмотуванням окремих жил канату в'язальним дротом (рис. 14.2); на проміжних опорах - за допомогою консолей (рис. 14.3); на кутових опорах двома стовповими консолями (при підвішуванні ОК з боку зовнішнього кута, внутрішній кут менше  $160^\circ$ ) або спеціальною скобою (при підвішуванні ОК з боку внутрішнього кута, кут  $\leq 160^\circ$ ).



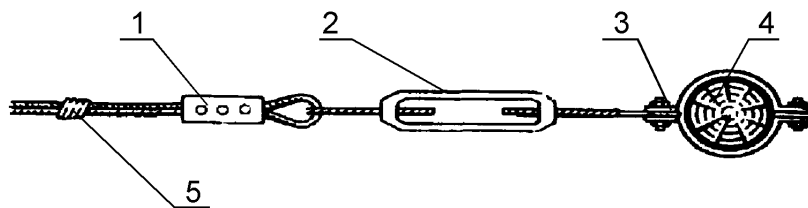
а

1 – клемма; 2 – обмотування окремих жил троса в'язальним дротом;  
3 – канат; 4 – опора



б

1 – клема; 2 – канат; 3 – опора



в

1 – клема; 2 – тарлеп; 3 – хомут; 4 – опора; 5 – обмотування окремих жил каната в'язальним дротом

Рисунок 14.2 – Кріплення несучого канату для підвішування ОК на кінцевих опорах ПЛЗ з використанням клем (а), шляхом кінцевого в'язання та обмотування окремих жил троса в'язальним дротом (б), використанням струбцин та хомутів (в)

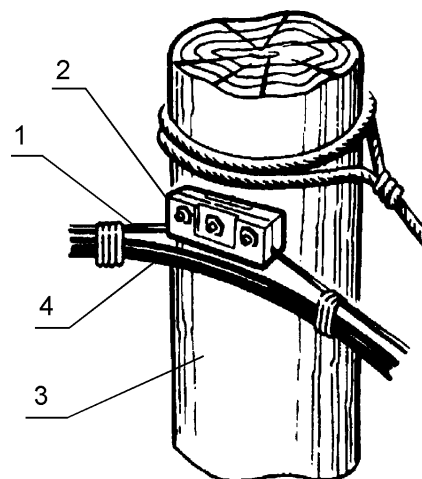
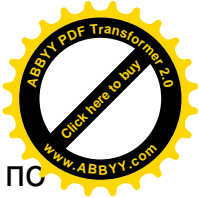


Рисунок 14.3 – Кріплення канату для підвішування ОК на проміжних та кутових опорах (1 – трос; 2 – консоль; 3 – опора; 4 – ОК)



Підйом ОК на опори ПЛЗ здійснюється шляхом протягування його по напрямних роликах за допомогою кабельної лебідки. Барабан з ОК на домкратах встановлюється на відстані 20 м від опори в напрямі, протилежному напрямку протягування. Кінець ОК за допомогою “кабельної панчохи” через компенсатор кручення приєднується до кінця тягового каната лебідки, який заздалегідь укладено на роликах напрямних роликів блоків. Намотуванням тягового канату на барабан лебідки здійснюється протягування ОК по направляючих роликах.

Після того, як весь сегмент буде зтягнутим на опори ПЛЗ, лебідка вимикається і ОК (в залежності від його типу) кріпиться до опор, чи до траверси, чи до несучого канату.

Цей метод зтягування ОК має назву метода стаціонарного барабана. Метод стаціонарного барабана застосовується для підвішування ОК у випадку наявності перешкод для переміщення барабана з кабелем вздовж лінії опор.

Метод рухомого барабана може застосовуватись для підвішування ОК, коли транспортний засіб з барабаном ОК може рухатись уздовж лінії опор за умов відсутності будь-яких перешкод для підйому кабелю на опори або руху транспортного засобу.

Метод є економічно вигідним, оскільки підвішування та закріплення ОК здійснюється у один прохід, не вимагає застосування та попереднього розміщення на опорах направляючих блоків, тягових канатів та лебідок. Крім того, в процесі підвішування не перевищуються дозволені зусилля розтягування на ОК.

Підвішування ОК за методом рухомого барабана здійснюється таким чином. ОК розмотується уздовж лінії опор ПЛЗ. Монтажник, знаходячись у корзині телескопічної вишки-підйомника, піднімає ОК і закріплює його на опорі.

Після підйому ОК, переходять до його натягування та встановлення стріли провисання. Стріла провисання і результуючий натяг ОК залежать від довжини прольоту між опорами, на яких підвішується кабель. Величина стріли провисання визначається із проектною документації.

Встановлення стріли провисання та остаточного натягу ОК проводиться у напрямку тяжіння ОК при застосуванні методу рухомого барабана і у протилежному напрямку при застосуванні методу стаціонарного барабана.

Приклади кріплення самонесучого ОК на проміжних, кутових або анкерних опорах наведено на рисунках 14.4–14.6.



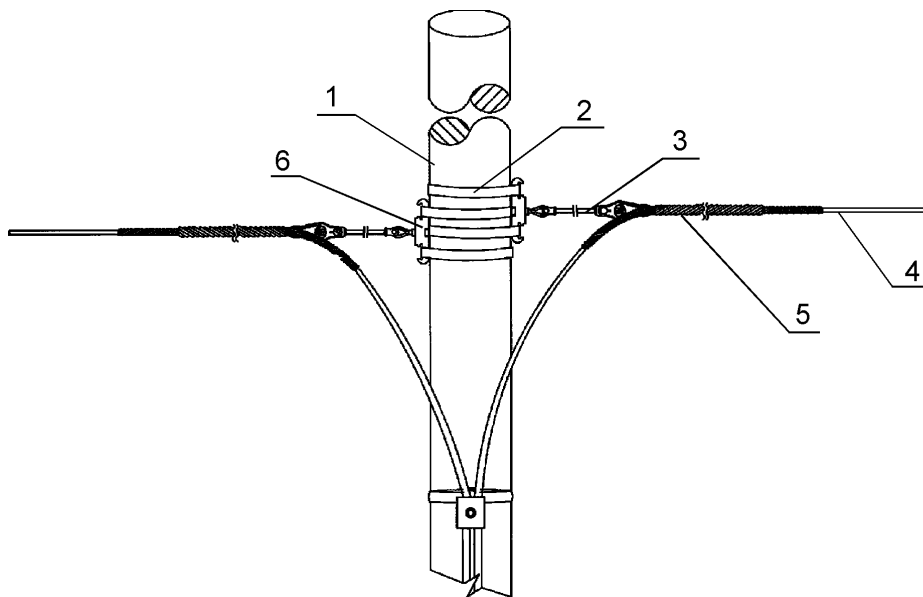


Рисунок 14.4 – Кріплення ОК на ПН (1 – опора; 2 – хомут стрічковий; 3 – штанга вушко-вушко; 4 – ОК; 5 – затискач спіральний натяжний; 6 – вузол кріплення)

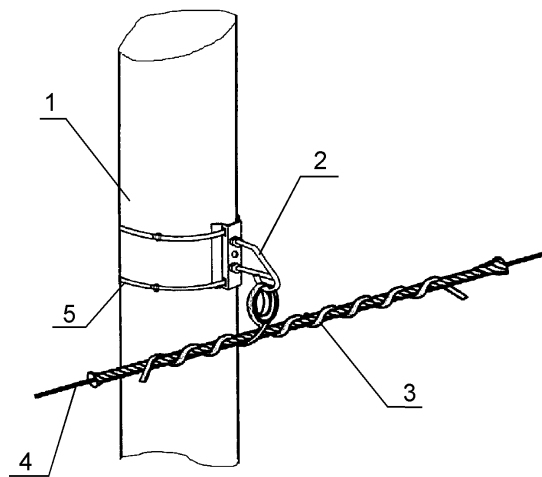


Рисунок 14.5 – Кріплення ОК на проміжній опорі (1 – опора; 2 – вузол кріплення; 3 – затискач підтримувальний спіральний; 4 – ОК; 5 – хомут стрічковий)

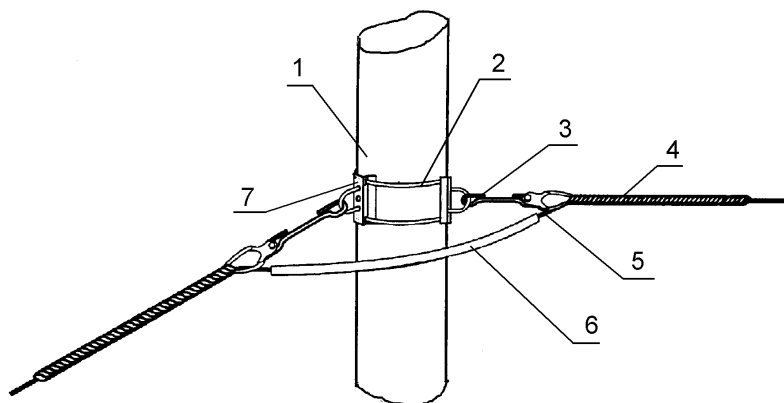




Рисунок 14.6 – Кріплення кабелю на ПП при зміні напрямку траси лінії (1 – опора; 2 – хомут стрічковий; 3 – штанга вушко-вушко; 4 – затискач спіральний натяжний; 5 – ОК; 6 – поліетиленовий спіральний шланг; 7 – вузол кріплення)

## **14.3 Підвішування оптичних кабелів на опорах контактної мережі залізниці**

### **14.3.1 Опори контактної мережі залізниці**

Для контактної мережі залізниці, як правило, використовуються типові опори, що розрізняються між собою як за призначенням, так і за конструкцією. В залежності від призначення та характеру навантажень від проводів контактної підвіски, опори поділяють на проміжні, перехідні, анкерні та фіксуєчі.

Розрізняють також опори живильних і відсмоктувальних ліній та спеціальні опори. Опори живильних і відсмоктувальних ліній у відповідності з класифікацією опор, прийнятою для ЛЕП, поділяють на проміжні, кутові, анкерні (проводи заанкеровані з обох сторін опори) та кінцеві (проводи заанкеровані з однієї сторони опори).

Спеціальні опори призначені для встановлення секційних розмикачів або будь-якого іншого обладнання.

В залежності від типу підтримувальних пристроїв контактної мережі, що кріпляться на опорі, розрізняють:

- консольні опори (рис. 14.7) з кріпленням на консолі контактної підвіски одного, двох або кількох колій;
- опори з жорсткою поперечиною (ригельні, порталні) (рис. 14.8) з кріпленням контактних підвісок електрифікованих колій на жорсткій поперечині (ригелі);
- опори з гнучкою поперечиною (рис. 14.9) з кріпленням на них контактних підвісок електрифікованих колій, що перетинаються цією поперечиною.

В залежності від матеріалу, із якого виготовлені опори вони поділяються на залізобетонні, металеві або дерев'яні.

Залізобетонні опори найбільш розповсюджені. Їх використовують як проміжні, перехідні та анкерні консольні опори, а також як фіксуєчі опори та стояки жорстких поперечин.

Металеві опори КМЗ використовують лише як опори для гнучких поперечин, живильних та відсмоктувальних ліній, для консолей, що застосовуються на двоколійних залізницях, та за призначенням як анкерні самонесучі (без відтяжок) опори.

За наявності необхідних техніко-економічних обґрунтувань металеві опори можуть встановлюватись також як консольні проміжні, перехідні та анкерні опори.



Дерев'яні опори різних типів встановлюють лише як тимчасові опорні конструкції контактної мережі.

Висоту опор – відстань від верхнього або умовного зрізу фундаменту до вершини опори – вибирають в залежності від висоти підвішування контактного проводу та несучого каната ланцюгових підвісок, конструкції підтримувальних пристроїв, розміщення на опорах контактної мережі проводів ліній, пристроїв живлення автоблокування.

Висота консольних залізобетонних опор прийнята рівною 9,6 м. Такої ж висоти опори використовують як стояки жорстких поперечин. При цьому довжина нероздільних опор з урахуванням фундаментної частини складає 13,6 м (рис. 14.7, а), а для опор, що розділяються, з урахуванням встановлення їх у фундамент склянкової форми, довжина дорівнює 13,5 м (рис. 14.7, б).

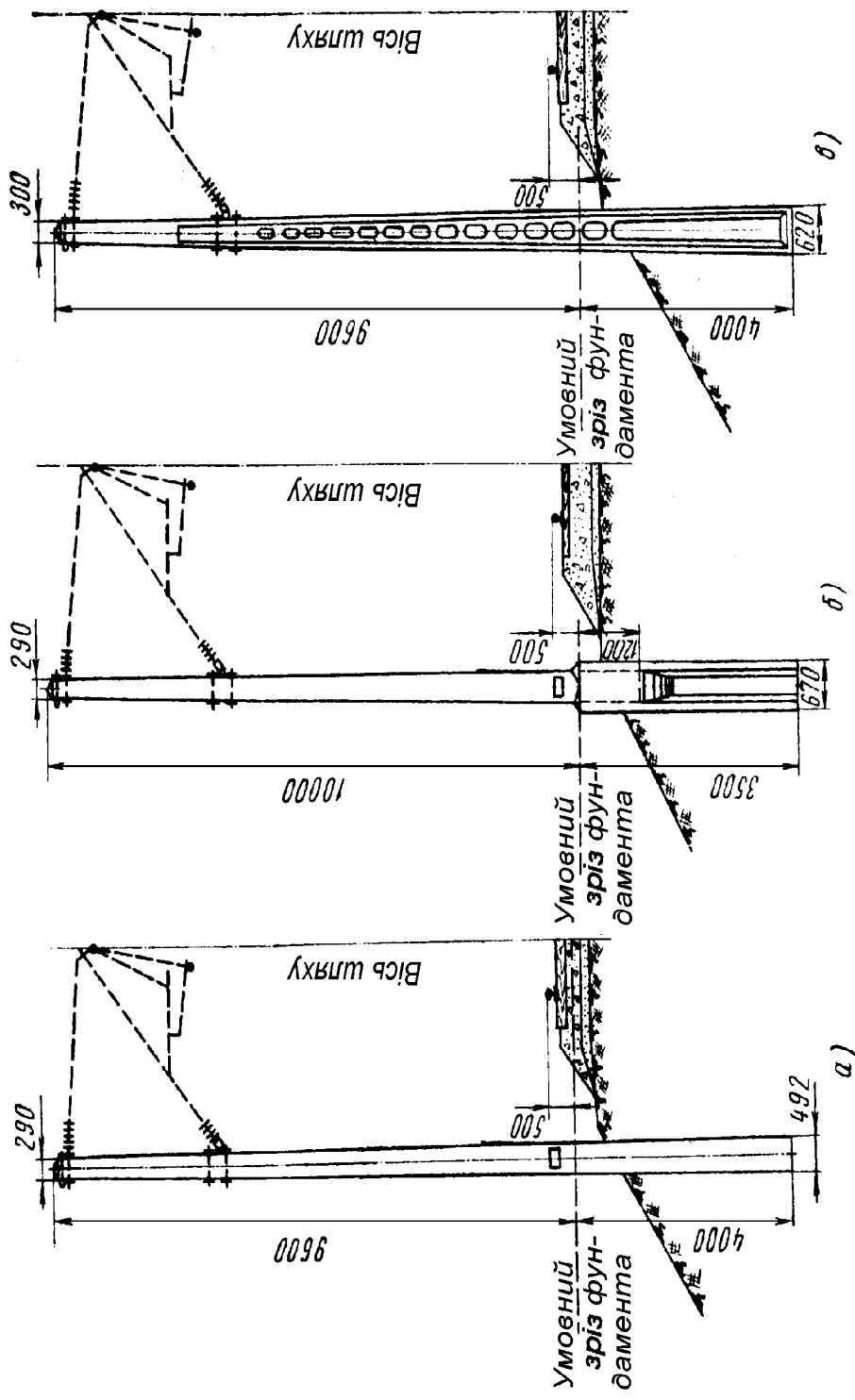
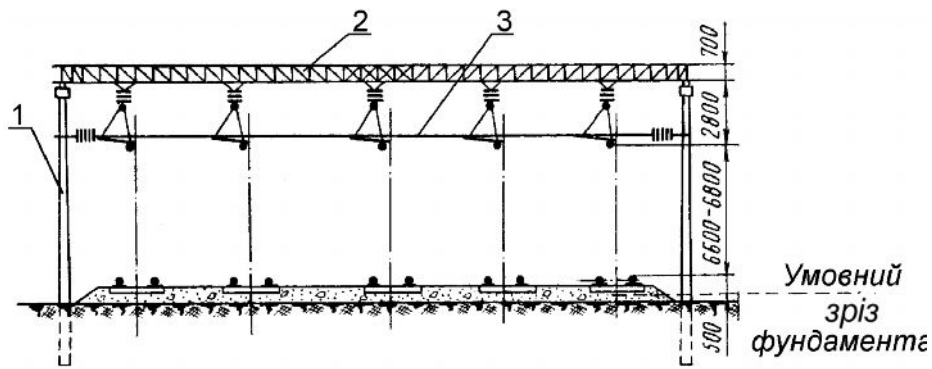
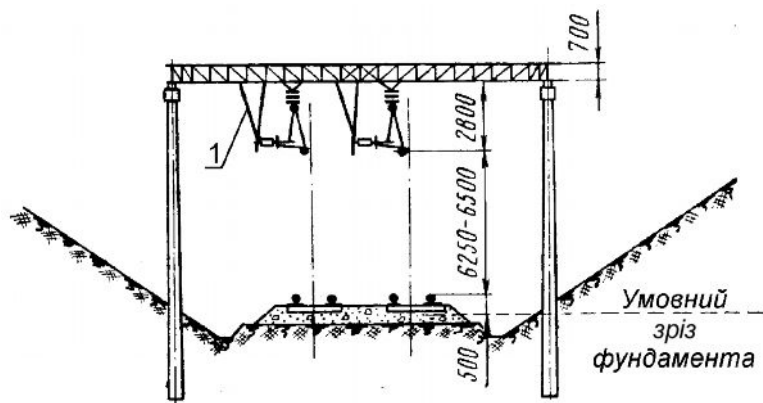


Рисунок 14.7 – Консольні залізобетонні опори: конічна суцільна (а), конічна роздільна з фундаментом (б) та двотаврова суцільна (в)



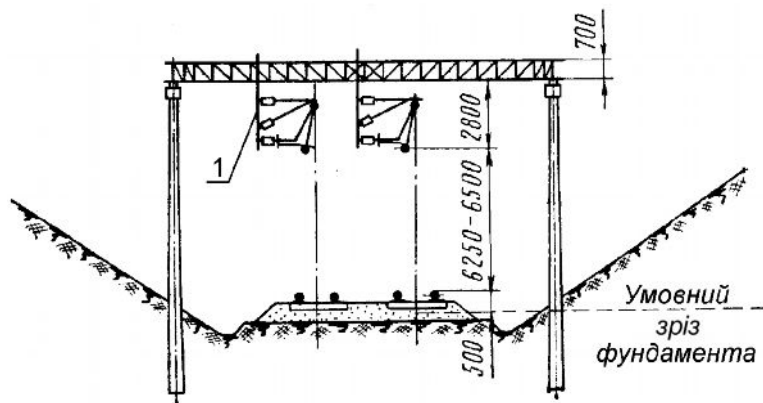
а

1 – опора; 2 – жорстка поперечина; 3 – фіксуючий трос



б

1 – фіксаторний стояк

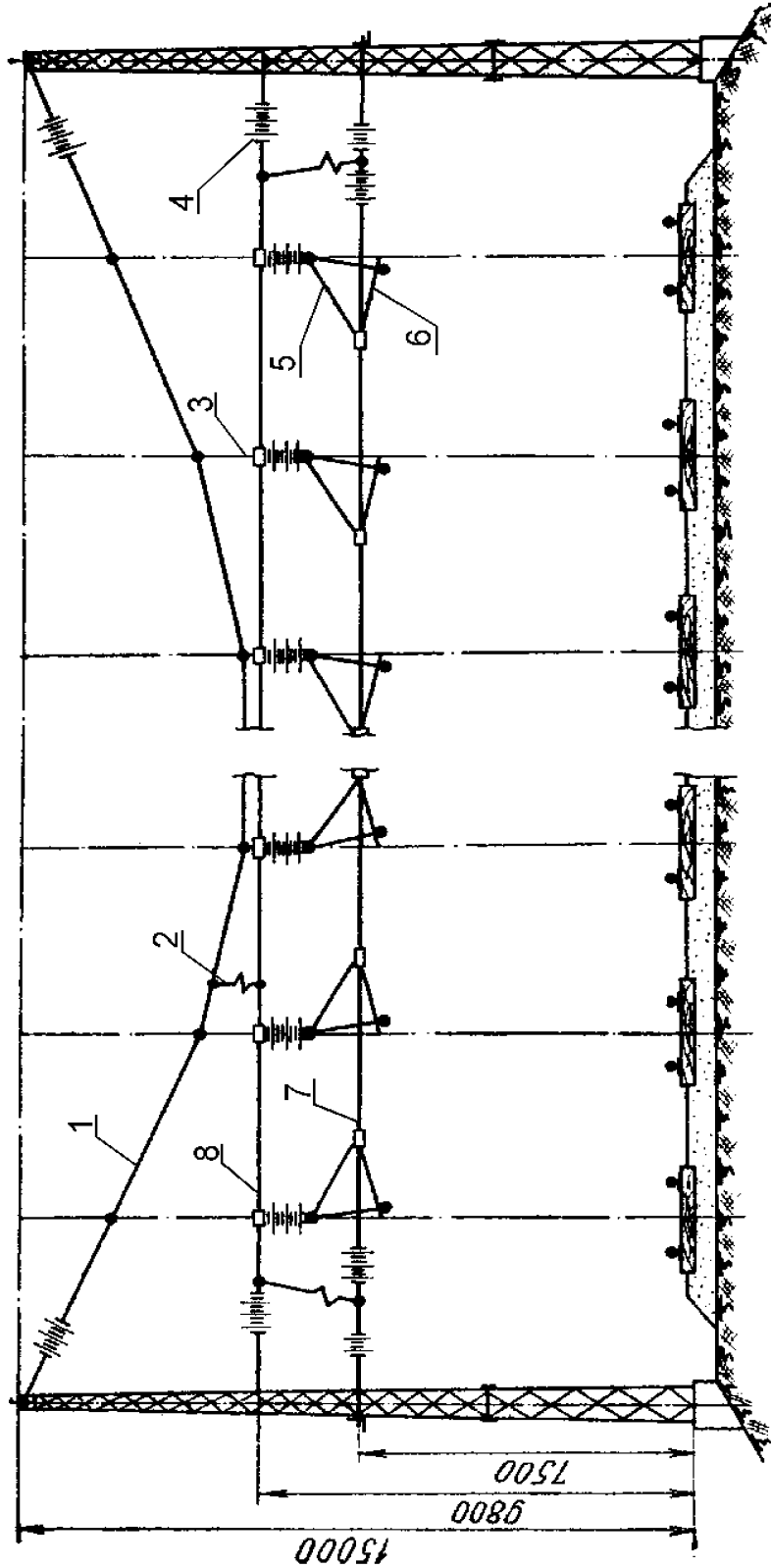


в

1 – консольний стояк

Рисунок 14.8 – Опори з жорсткими поперечинами та з фіксуючим тросом (а), фіксаторними стояками (б) та консольними стояками (в)

Металеві опори для гнучких поперечин виготовляють висотою (довжиною) 15 та 20 м (рис.14.9). Для двоколіїних консолей встановлюють металеві опори висотою 13 м.



1 – поперечні несучі троси; 2 – електричний з'єднувач; 3 – струна гнучкої поперечини діаметром 6 мм; 4 – ізолятори; 5 – струни фіксатора; 6 – фіксатор; 7 – нижній фіксуєчий трос; 8 – верхній фіксуєчий трос.

Рисунок 14.9 – Схема ізольованої гнучкої поперечини





### 14.3.2 Розміщення оптичних кабелів на опорах контактної мережі залізниці

На опорах контактної мережі залізниці оптичні кабелі рекомендується розміщувати з польової сторони опор (рисунок 14.10). Відстань від ОК чи елементів його кріплення до секційних роз'єднувачів КМЗ, а також ножів, дугогасних рогів повинна бути не менше 3 м. Відстань від нижньої точки ОК, підвішеного між опорами КМЗ, до рівня зрізу фундаменту цих опор при максимальній стрілі провисання повинна бути не менше 5 м. Відстань між нижчими ОК повітряної ВОЛЗ і тросом несучим контактний провід електрифікованої залізниці повинна бути не менше 2 м.

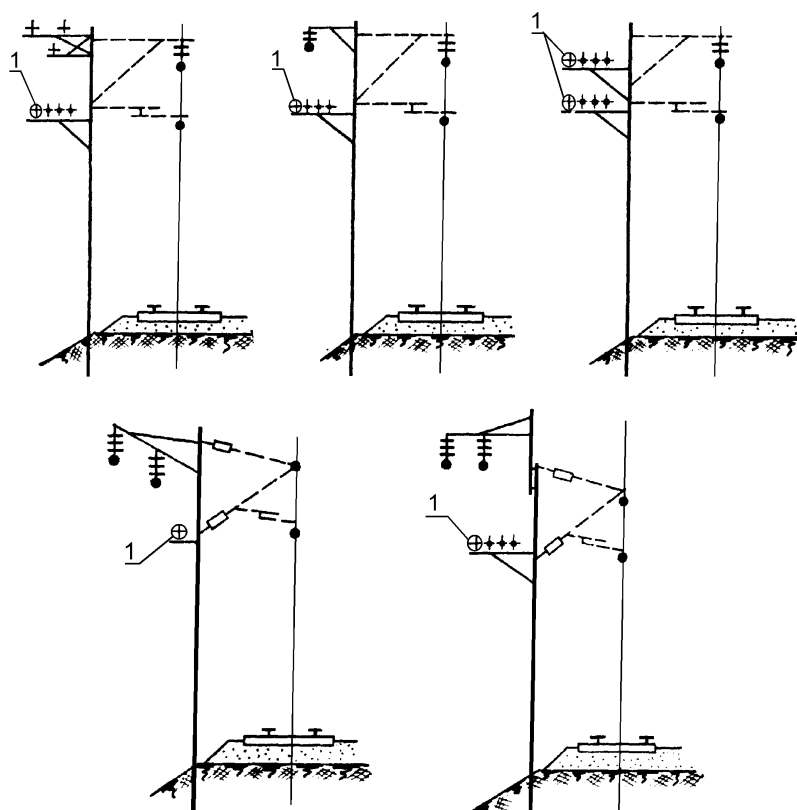
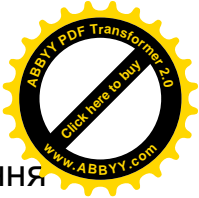


Рисунок 14.10 – Схеми розташування ОК на опорах контактної мережі (1 – ОК)

При перетині повітряної ВОЛЗ із залізницею відстань ОК від рівня головки рейки повинна бути при максимальній стрілі провисання не менше 7,5 м.

На залізниці з дуже інтенсивним рухом, при переході через насипи, на залізничних станціях або в місцях, де для забезпечення обладнання повітряних переходів виникають технічні труднощі переходи повітряних ВОЛЗ слід виконувати прокладанням ОК в ґрунт.



Перетин ОК повітряних ВОЛЗ із залізницями в місцях сполучення анкерних ділянок контактної мережі забороняється.

Кут перетину повітряних ВОЛЗ із залізницею повинен бути не менше 60°. Рекомендується, по можливості, у всіх випадках проводити перетин під кутом, близьким до 90°.

### 14.3.3 Порядок підвішування оптичного кабелю

Проведення робіт по підвішуванню на опори контактної мережі залізниці окремих будівельних довжин ОК вимагає зняття напруги живлення контактної мережі, для чого необхідна перерва (“вікно”) подачі цієї напруги на час проведення робіт.

До початку підвішування самонесучого ОК (крім ОК з несучим канатом) на опори КМЗ необхідно встановити на опорах (кінцевих та проміжних) спеціальні консолі для кріплення затискачів (відповідно натяжних та підтримувальних), напрямні роликові блоки (нижче чи вище спеціальних консолей), розмотати вздовж лінії опор та підняти на ролики напрямних блоків тяговий канат лебідки.

До початку підвішування ОК з несучим канатом на опори КМЗ необхідно встановити на проміжних опорах консолі для кріплення несучого каната, вбудованого в ОК, нижче консолей спеціальні напрямні роликові блоки, розмотати вздовж лінії опор та підняти на ролики напрямних блоків тяговий канат лебідки. Після чого відділяють вбудований несучий елемент від оболонки ОК на відстані від його кінця, яка дорівнює висоті опори плюс 4 м.

Підйом ОК на опори КМЗ може здійснюватись методом рухомого або стаціонарного барабана. Приклади кріплення ОК на опорах КМЗ подано на рисунках 14.11 та 14.12.

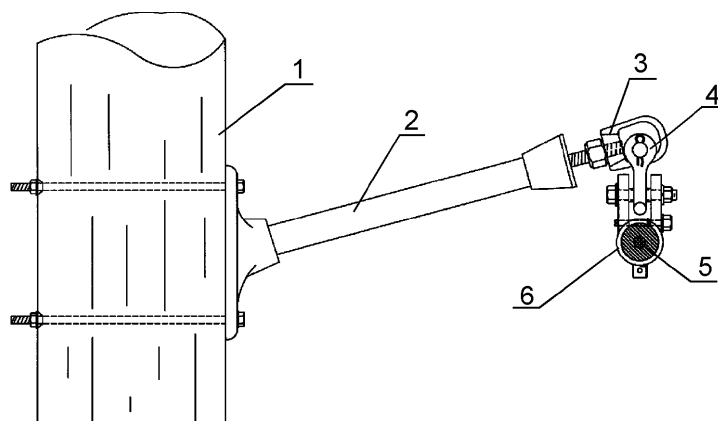


Рисунок 14.11 – Кріплення ОК на опорах КМЗ (1 – опора; 2 – консоль; 3 – овальна гайка; 4 – серга; 5 – ОК; 6 – підтримувальний затискач)

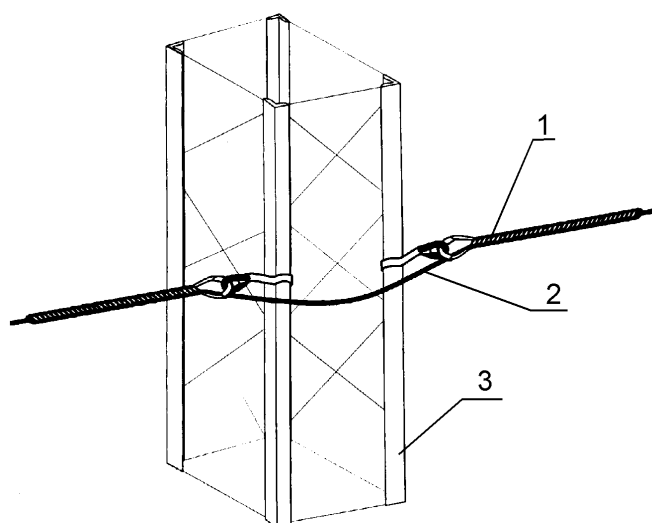


Рисунок 14.12 – Кріплення ОК на проміжній металевій опорі (1 – затискач натяжний; 2 – ОК; 3 – опора металева)

## 14.4 Підвішування оптичних кабелів на опорах ліній електропередачі

### 14.4.1 Опори ліній електропередачі

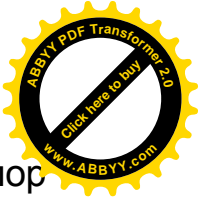
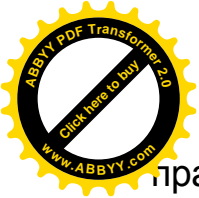
В залежності від способу підвішування фазних проводів опори поділяються на дві основні групи: опори проміжні, на яких фазні проводи закріплюються у підтримувальних затискачах та опори анкерного типу, що призначені для натягування проводів. На цих опорах проводи закріплюються в натяжних затискачах.

Ці основні групи опор поділяються на типи, що мають спеціальне призначення: проміжні прямі опори, що встановлюються на прямих ділянках ліній; проміжні кутові опори, що встановлюються в місцях повороту ліній з підвішуванням проводів у підтримувальних гірляндах та кінцеві опори, що встановлюються на кінцях ліній. Від цих опор відходять проводи, що підвішуються на порталах підстанцій.

В місцях зміни напрямку повітряних ЛЕП встановлюються кутові опори, на яких фазні проводи можуть бути підвішені у підтримувальних або натяжних затискачах.

Спеціальні опори підрозділяються на: транспозиційні, що призначені для зміни порядку розміщення проводів на опорах; відгалужувальні, що призначені для організації відгалужень від основної лінії та опори великих переходів, що призначені для забезпечення переходів повітряних ліній через річки та водні простори.

За способом кріплення на фундаментах опори поділяються на опори вільностоячі (рис. 14.13) та опори на відтяжках (рис. 14.14). Відтяжки, як



правило, виконуються з сталевих канатів. Розміщення відтяжок опор визначається допустимими навантаженнями на типові збірні фундаменти під стояки та на анкерні плити.

Для виробництва опор високовольтних ЛЕП використовують дерево, сталь та залізобетон.

Перевагою дерев'яних опор є підвищення імпульсної міцності ізоляції від впливу електричного поля фазних проводів; між фазою та землею. Завдяки цьому лінії на дерев'яних опорах будуються без канатів грозозахисту. Лише на підходах до підстанцій підвішується канат грозозахисту апаратури підстанції.

Якщо розглядати кількість відмов для ЛЕП з напругою від 35 до 500 кВ, то найбільше відмов у розрахунках на 100 км траси припадає на пошкодження дерев'яних опор. Порівняно з металевими та залізобетонними опорами кількість пошкоджень дерев'яних опор на порядок вище. При практично однакових зовнішніх впливах, високий рівень пошкоджень високовольтних ліній на дерев'яних опорах пояснюється втратою міцності цих опор внаслідок процесів гниття та неможливості своєчасно виявити і замінити вражені у процесі експлуатації деталі опор.

Для металевих опор відношення кількості конструкцій, що були пошкоджені на протязі року, до загальної їх кількості в Україні складає  $1,3 \cdot 10^{-4}$ . За рекомендаціями ІЕС показник пошкодження для ідентичних конструкцій складає  $1,0 \cdot 10^{-4}$ .

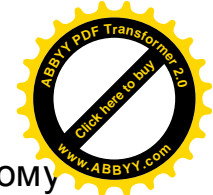
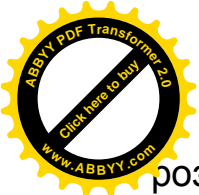
Досвід експлуатації показує, що пошкодження сталевих опор високовольтних ЛЕП від 35 до 750 кВ приблизно вдвічі нижче ніж залізобетонних опор таких ЛЕП. Основна причина значної різниці у пошкодженні металевих і залізобетонних мережених конструкцій полягає у сильній залежності несучої спроможності останніх від якості зашпорування у ґрунт.

Незалежно від конструктивного рішення та схеми сталеві опори виконуються у вигляді просторових решітчастих конструкцій. За конструктивними рішеннями ствола вони можуть бути віднесені до двох основних схем – баштові або одностоякові (рис. 14.13, а) та порталні (рис. 14.13, б та 14.14 б, в).

Для запобігання великого різноманіття конструкцій сталевих та залізобетонних проміжних опор прийнято використовувати опори такої висоти (до нижньої траверси):

- від 12,0 до 15,0 м для ЛЕП 35 кВ;
- 19,0 м для ЛЕП 110 кВ;
- 25,0 м для ЛЕП від 220 до 330 кВ (одноланцюгові);
- 27,5 м для ЛЕП від 220 до 330 кВ (двохланцюгові);
- 29,0 м для ЛЕП 500 кВ.

На опорах високовольтних ЛЕП проводи можуть бути розміщені в один ярус (горизонтальне розміщення), два і три яруси без зміщення по горизонталі проводів, що знаходяться один над одним (вертикальне



розміщення). Розміщення проводів у два і три яруси, при якому розміщені один під другим проводи мають горизонтальне зміщення, називають змішаним (рис. 14.15).

Рекомендації з конструктивного виконання опор в залежності від регіональних умов експлуатації, напруги високовольтної ЛЕП, для різних розміщень проводів подано в “Правилах устроювання електроустановок потребителів”.

#### **14.4.2 Розміщення оптичних кабелів на опорах ліній електропередачі**

Самонесучі оптичні кабелі повинні підвішуватись в області мінімального потенціалу електричного поля.

Графічне представлення розподілу потенціалу в місцях підвішування ОК є результатом розрахунку сумарної напруженості електричного поля залежно від впливу електричних полів фазних проводів та потужних електромагнітних випромінювань (радіолокаційних станцій, атомних електростанцій, тощо).

В районах з метеорологічними умовами, при яких товщина стінки ожеледі, що утворюється на оптичних кабелях, досягає від 15 до 20 мм, а також в районах з частою резонансною вібрацією проводів ЛЕП рекомендується застосовувати схему горизонтального розміщення самонесучих ОК повітряної ВОЛЗ. При товщині шару льоду більше 20 мм слід застосовувати тільки схему горизонтального розміщення ОК.

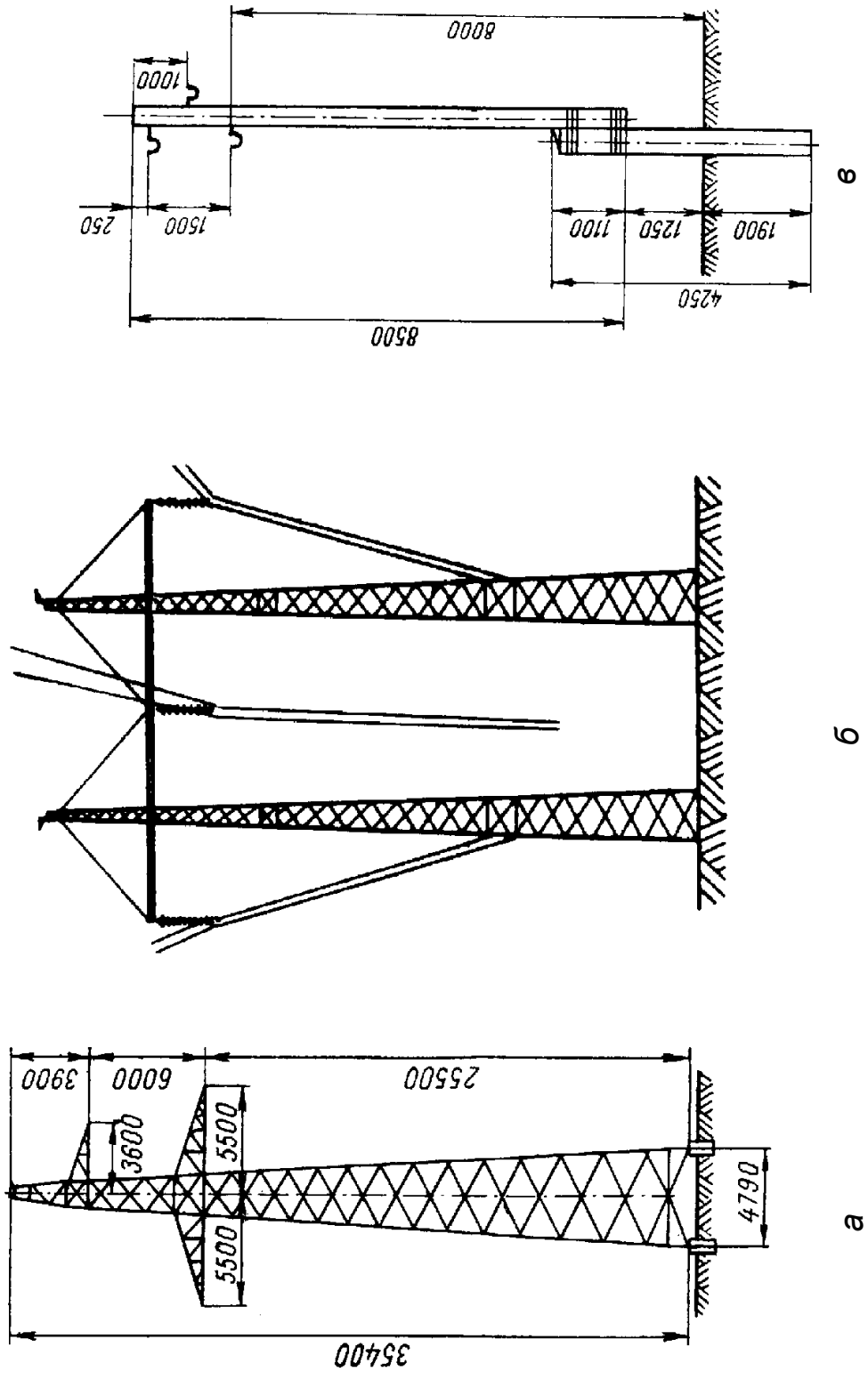
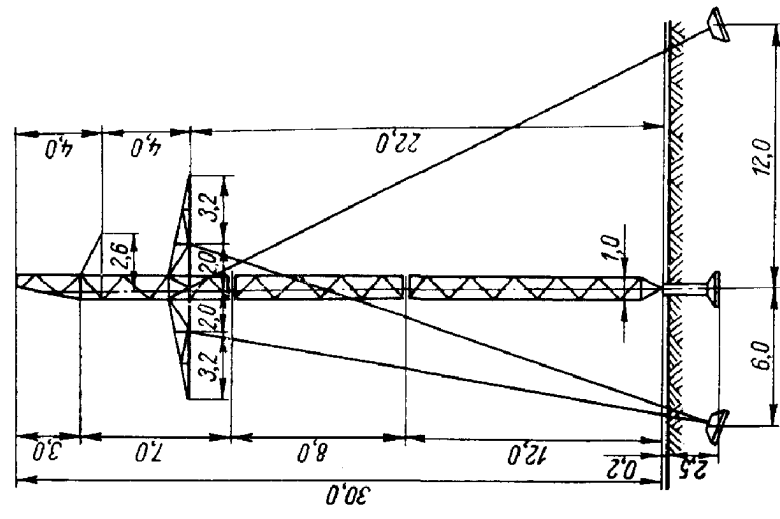
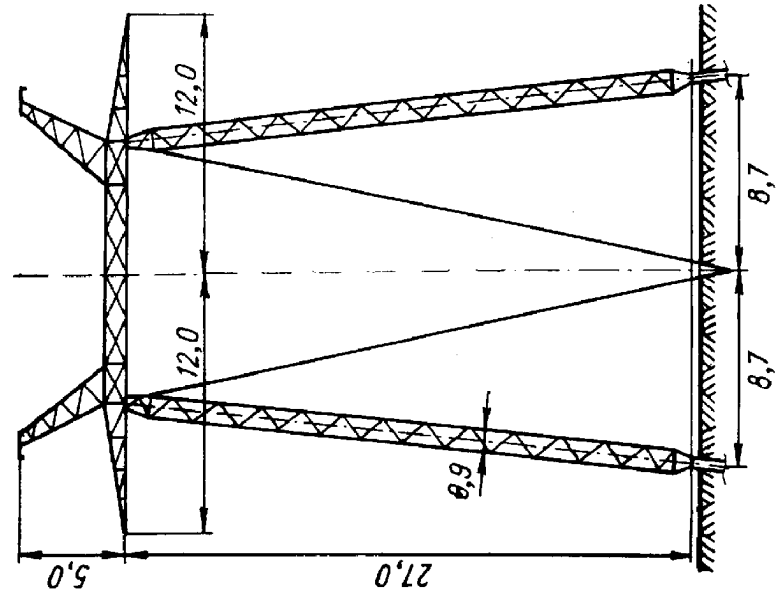
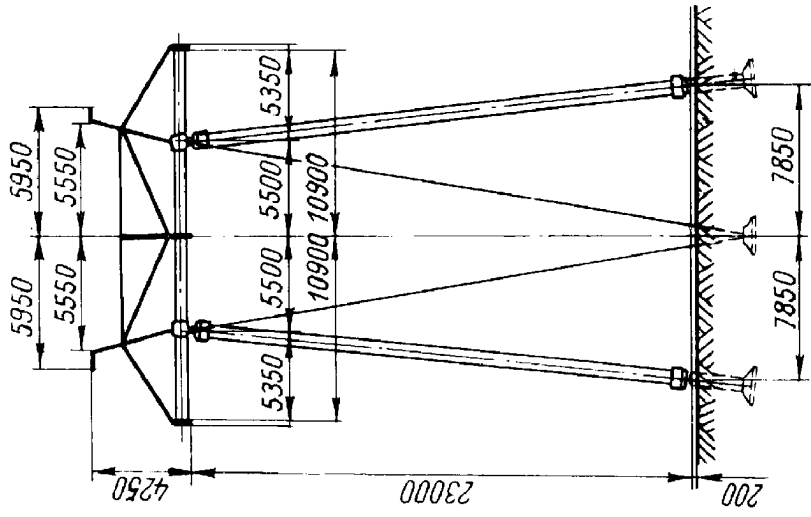


Рисунок 14.13 – Вільностоячі опори: а – проміжна вільностояча опора баштового типу (одиначна), б – проміжна портална опора, в – проміжна опора повітряних ліній





а б б

Рисунок 14.14 – Вільностоячі проміжні опори на відтяжках: а – одностоячна одноцепна опора на відтяжках ЛЕП 110 кВ, б – проміжна опора на відтяжках ЛЕП 500 кВ, в – проміжна залізобетонна опора ЛЕП 500 кВ

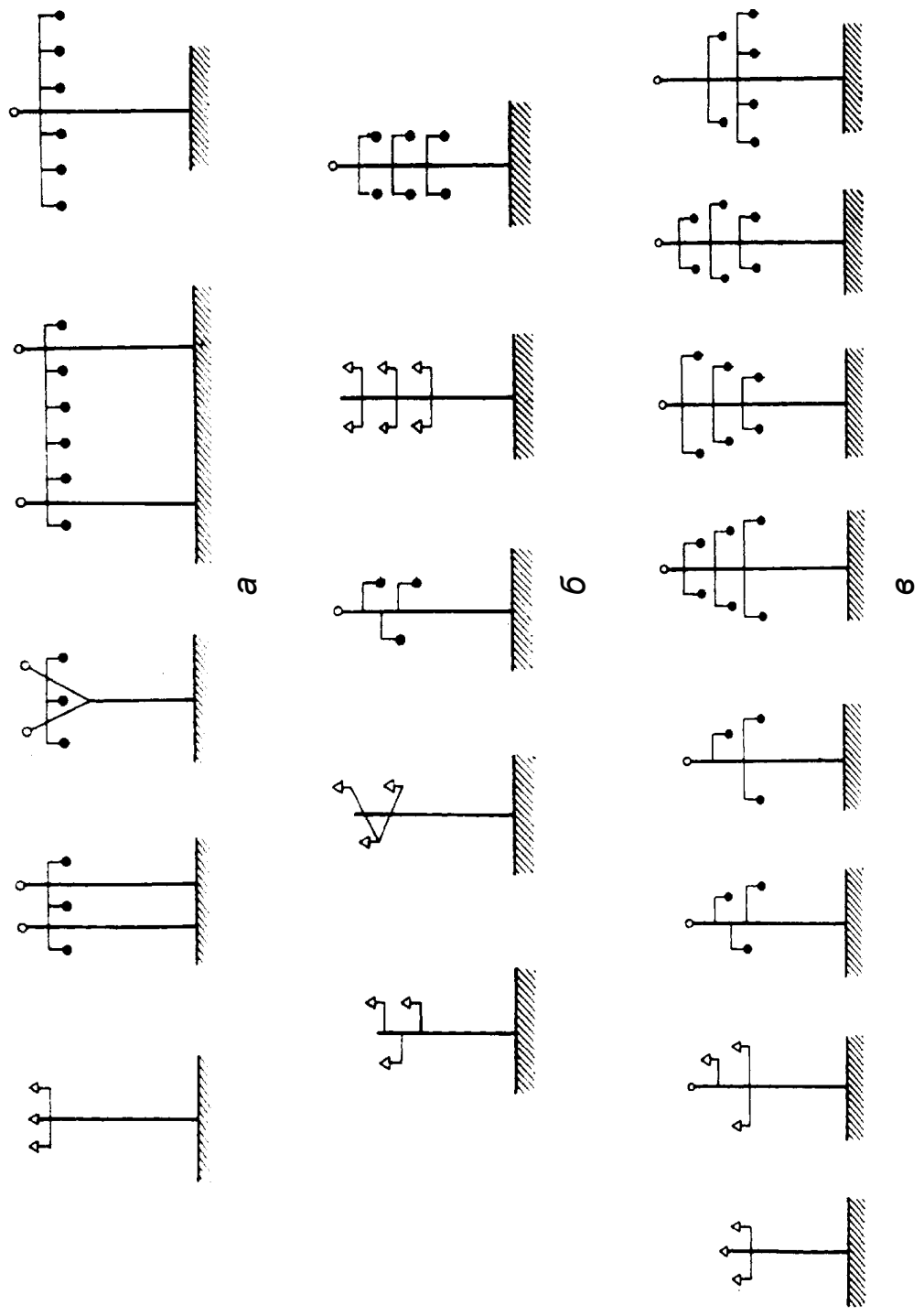
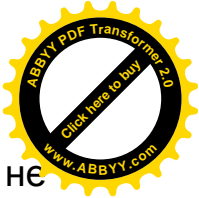


Рисунок 14.15 – Схеми розташування проводів на ЛЕП: а – горизонтальне розташування проводів; б – вертикальне розташування проводів, в – змішане розташування проводів



Кут відхилення ОК від прямої лінії в точках кріплення в сідлах не повинен перевищувати  $10^\circ$  в будь-якому напрямку.

ОК, вбудований в грозозахисний канат, кріпиться на грозостояках опор ЛЕП.

#### **14.4.3 Методи підвішування оптичних кабелів**

При подачі електроенергії по проводах ліній під час проведення підготовчих робіт та робіт з підвішування оптичного кабелю робітникам суворо забороняється знаходитись на опорах ЛЕП.

Під час проведення підготовчих робіт на поверхні землі в охоронній зоні ЛЕП при подачі електроенергії по проводах цих ліній вживаються заходи по забезпеченню захисту працівників від електромагнітного впливу високовольтних ліній електропередачі. Перелік заходів безпеки наведено у "Временных указаниях по защите персонала и сооружений связи и радиотелефонии на участках пересечения и сближения с линиями электропередачи 750 кВ".

Термін знаходження робітників в охоронній зоні ЛЕП при подачі електроенергії по проводах цих ліній не повинен перевищувати терміну, поданого у вищезгаданому документі.

Підвішування ОК, вбудованого в фазовий провід, як правило, виконується при будівництві нової чи реконструкції діючої високовольтної ЛЕП субпідрядними організаціями Міністерства енергетики за технологіями підвішування фазових проводів без ОК.

Підвішування OPGW кабелів здійснюється на грозостояки опор ЛЕП за технологіями підвішування грозозахисних канатів без ОК. До початку підвішування OPGW кабелів на опори ЛЕП необхідно встановити на грозостояках кінцевих та проміжних опор спеціальні консолі для кріплення затискачів (відповідно натяжних та підтримувальних). Підвішування OPGW кабелів може здійснюватись методом розмотування (рухомого барабана) або методом тяжіння (стаціонарного барабана). Вибір того чи іншого методу в значній мірі залежить від того чи йде нове будівництво, чи проводиться реконструкція існуючої лінії.

Метод розмотування (рухомого барабана), головним чином, застосовується при будівництві нових ліній на місцевості, де транспортний засіб переміщується паралельно лінії опор.

Наявність на місцевості перешкод, які не дозволяють застосувати метод розмотування, обумовлює застосування методу тяжіння. Метод полягає у розмотуванні кабелю із стаціонарно розміщеного барабана через систему підтримувальних пристроїв так, щоб кабель знаходився під дією зусиль розтягування на протязі усього часу процедури затягування. Метод тяжіння може здійснюватись шляхом тяжіння кабелю через тимчасові блоки та ролики, що розміщуються на кожній опорі, або підтримувальній структурі. Оптичний кабель розмотується під дією тяжіння, що прикладається до кінця ОК.

Для запобігання пошкодженню ОК рекомендовано, щоб зусилля тяжіння не перевищувало 25% від номінального розривного зусилля кабелю, а підтримувальні блоки були виставлені у лінію і мали діаметр не менше 900 мм.

Натяжні блоки або ролики повинні бути встановлені, вирівняні, мати більший діаметр ніж у випадку прокладання канату грозозахисту або фазового проводу. На більшості прольотів перший і останній ролики сегменту тяжіння повинні мати не менше 900 мм в діаметрі. Ролики, що розміщуються на проміжних опорах, повинні бути не менше 25 діаметрів кабелю.

У випадку нового будівництва, для тяжіння ОК від барабана до тягової лебідки, канат повинен бути попередньо розміщений на усьому сегменті підвішування. Канат повинен мати ті самі направляючі пристосування, що й OPGW кабель, для запобігання кручення під час тяжіння. Перед тяжінням OPGW кабелю, на його кінець, що сходить з барабана, повинен бути встановлений компенсатор обертання.

Якщо OPGW кабель прокладається взамін існуючого канату грозозахисту, останній може бути використаний як тяговий. При цьому OPGW кабель кріпиться до існуючого канату за допомогою спеціального захвату з компенсатором кручення.

Підвішування GWOP кабелів проводиться шляхом намотування ОК на канат грозозахисту, або фазовий провід за допомогою спеціальної машини (рис. 9.16). Машина для намотування може використовуватись у будь-якому з трьох методів, вибір яких залежить від економічної доцільності, топографії, погодних умов, тощо.

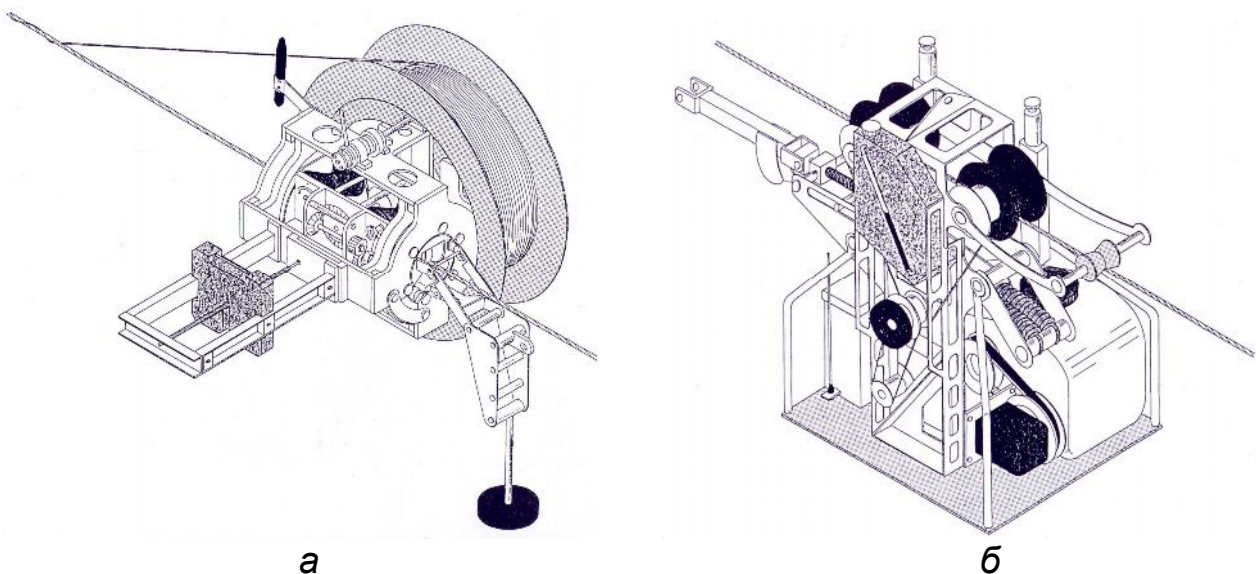


Рисунок 14.16 – Машина для намотування ОК на канат грозозахисту або фазовий провід (а) та тягова машина (б)

До цих методів відносяться:

- метод використання тягової машини (рис. 14.17, а), при якому вільно працююча тягова машина встановлюється перед машиною для намотування ОК і з'єднується з нею за допомогою тяги;

- метод застосування канату та шківів (рис. 14.17, б), при якому управління машиною для намотування здійснюється за допомогою канату, перекинутого через систему блоків, що встановлюються на канаті грозозахисту, або фазовому проводу. Канат приєднується до машини для намотування і через систему блоків протягується до наступної опори у напрямку підвішування ОК. Цей метод застосовується для ліній, на яких канат грозозахисту, або фазовий провід має відносно малий діаметр, або у випадку зміни висоти підвішування каната грозозахисту чи фазового проводу;

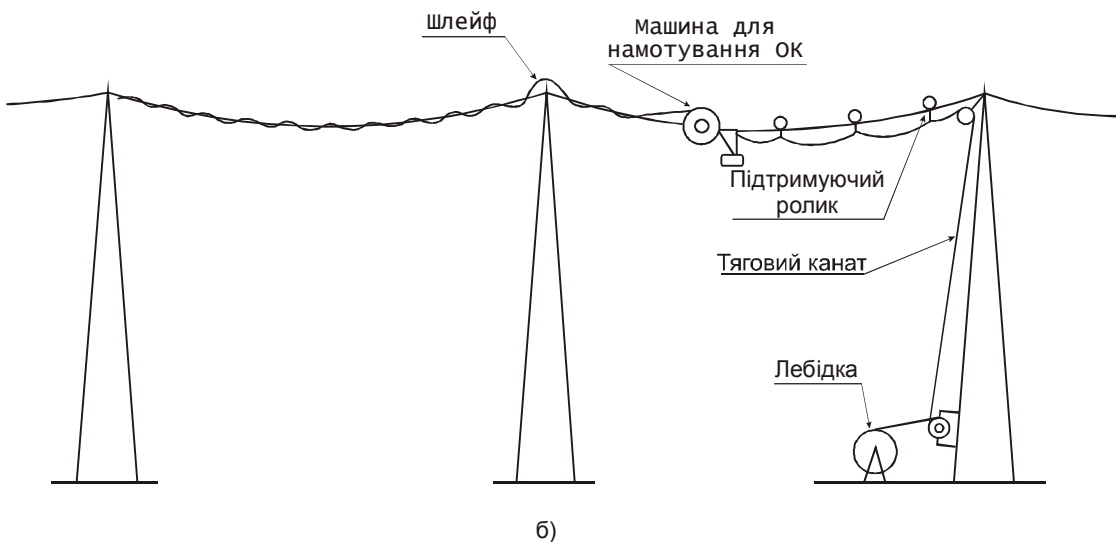
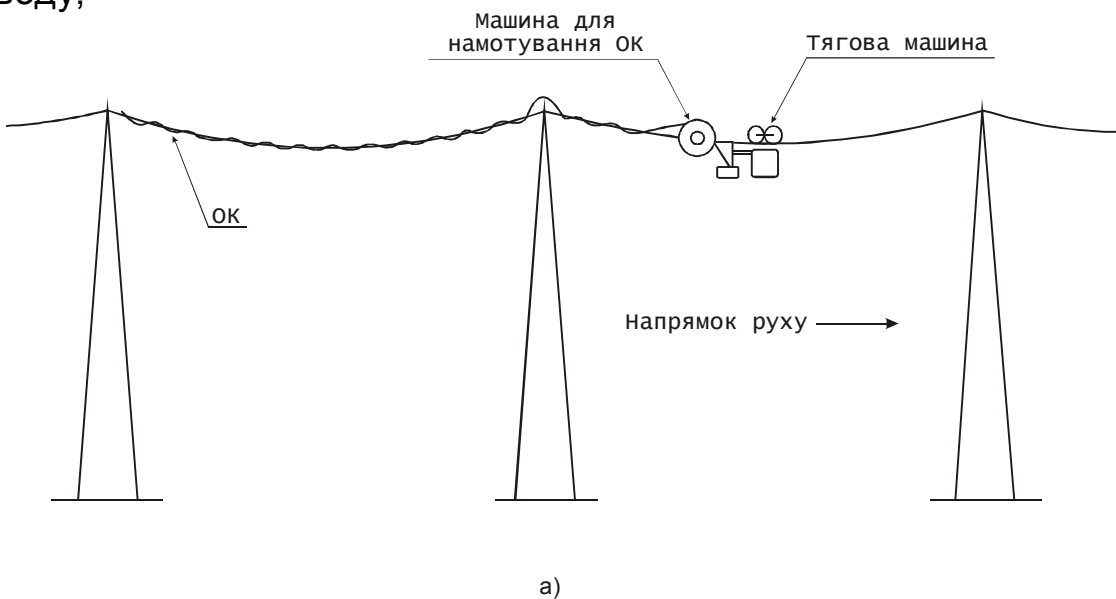
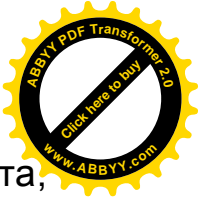


Рисунок 14.17 – Робота машини для намотування ОК з використанням тягової машини (а), канату та шківів (б)



- метод тяжіння машини для намотування за допомогою каната, приєднаного до неї. Тяжіння здійснюється з землі робітником, який переходить від опори до опори. Цей метод застосовується для ліній, на яких канат грозозахисту, або фазовий провід має відносно малий діаметр, або у випадку, коли ландшафт є відносно плоским і вільним від перешкод.

До початку робіт з підвішування усі матеріали, що потрібні для фіксації ОК на опорах, повинні бути доставлені на місце прокладання. Для робіт з підвішування ОК необхідно: встановити тягові канати; підняти необхідні матеріали та технічні пристрої на робочі опори; на проміжних опорах встановити важільні пристрої для перенесення машин на іншу сторону опори; обстежити канат грозозахисту на наявність пошкоджень або переломів; зробити монтаж натяжних та підтримувальних затискачів та видалити усі віброгасники та інші збірки, що можуть заважати процесу підвішування ОК.

Намотування ОК за допомогою тягової машини можна проводити лише на канат грозозахисту, що підвішується не менше ніж за шість місяців до початку намотування ОК.

Намотувати ОК за допомогою канату та шківів можна лише за умов, коли відстань між підтримувальними роликками не більша 30 м. Тяговий канат повинен витримувати натяг не менше 500 кг та виготовляється із матеріалу, що має мале подовження при розтягуванні. Лебідка повинна забезпечувати тяжіння канату з постійною швидкістю.

Після підготовчих робіт переходять до монтажу тягової машини та машини для намотування ОК. Для цього піднімають тягову машину та машину для намотування ОК на відповідну опору і встановлюють їх на канаті грозозахисту. Котушку з ОК піднімають на опору і встановлюють на машину для намотування. З верхніх витків ОК, намотаних на барабан, відмотують необхідну для монтажу довжину. Перевіряють правильність встановлення тягової машини та машини для намотування ОК і запускають їх. Машина повинна повільно рухатись по канату грозозахисту або фазовому проводу.

При наближенні до проміжної опори драбину від'єднують від каната грозозахисту або фазового проводу, зменшують швидкість ходу тягової машини та машини для намотування ОК так, щоб тягова машина м'яко доторкнулась до опори і зупинилась. Потім знову встановлюють драбину на канаті грозозахисту або фазовому проводі, змотують з котушки необхідний запас ОК для одержання шлейфу. Котушку з ОК знімають з машини для намотування і надійно закріплюють в точці, де вона не буде заважати проведенню інших робіт. За допомогою важільного пристрою переносять тягову машину та машину для намотування ОК на другу сторону опори і встановлюють на канат грозозахисту або фазовий провід. На машину для намотування встановлюється котушка з ОК. На ОК уздовж перехідного шлейфу встановлюють захисну трубку, кінці ОК закріплюють і запускають тягову машину.



При досягненні кінцевої опори драбину від'єднують від троса грозозахисту, або фазового дроту, зменшують швидкість ходу тягової машини та машини для намотування ОК так, щоб тягова машина м'яко доторкнулась до опори і зупинилась. Знову встановлюють драбину на канаті грозозахисту, змотують з котушки запас ОК, потрібний для монтажу з'єднувальної муфти.

Котушку з залишком ОК знімають з машини для намотування і опускають на землю.

Приклади кріплення ОК на металевих опорах ЛЕП показано на рисунках 14.18 та 14.19.

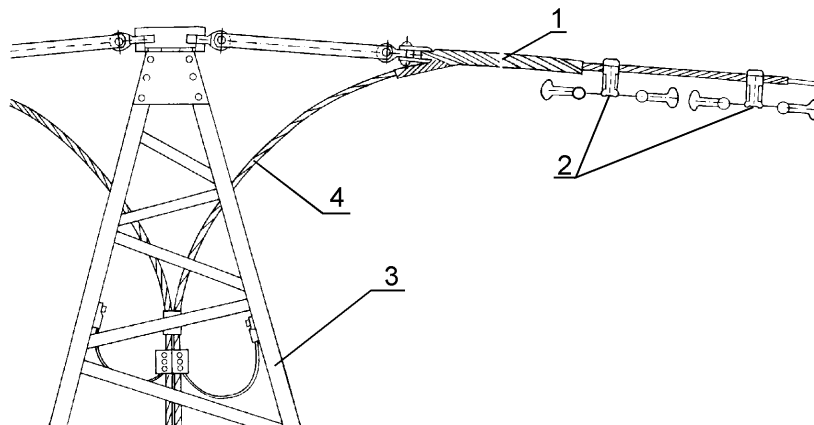


Рисунок 14.18 – Кріплення ОК на металевій анкерній опорі: 1 – затискач натяжний; 2 – віброгасник; 3 – опора металева; 4 – ОК

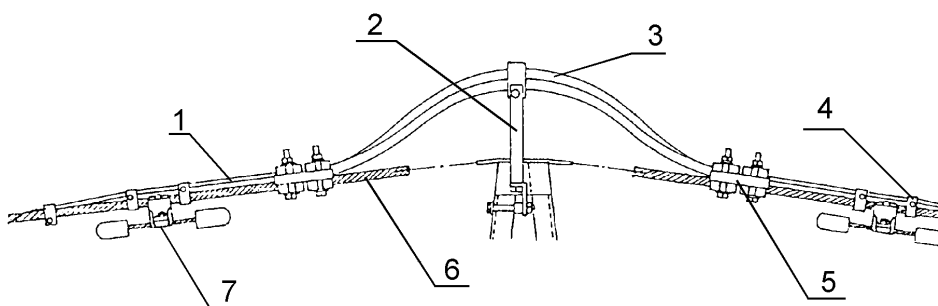


Рисунок 14.19 - Кріплення GWWOP кабелю на металевій анкерній опорі: 1 – захисна трубка; 2 – шлейфовий затискач; 3 – захисна трубка зі шлейфом ОК; 4 – фіксатор; 5 – кінцевий затискач; 6 – канат грозозахисту; 7 – віброгасник



## **14.5 Монтаж оптичних кабелів**

### **14.5.1 Загальні положення**

При будівництві повітряних ВОЛЗ для зрощування окремих будівельних довжин оптичного кабелю проводяться відповідні монтажні роботи. Монтажні роботи необхідно розпочинати одразу ж після підвішування всіх або більшої частини будівельних довжин ОК на регенераційній ділянці та обов'язкового проведення контрольних вимірювань підвішених ОК.

Проведення монтажних робіт зі зрощування окремих будівельних довжин ОК, підвішених на опорах КМЗ, вимагає зняття напруги контактної мережі. Для цього необхідна перерва ("вікно") подачі цієї напруги на час розмотування кінців кабелю.

Знаходження робітників на опорах ЛЕП при подачі електроенергії по дротах цих ліній під час проведення монтажних робіт суворо забороняється.

Монтажному підрозділу при проведенні монтажу ОК подаються такі документи:

- укладальні відомості будівельних довжин ОК за встановленою формою;
- відомості групування будівельних довжин;
- протоколи оптичних вимірювань та електричних вимірювань й випробувань (при наявності металевих елементів в конструкції ОК) будівельних довжин;
- заводські паспорти на будівельні довжини ОК.

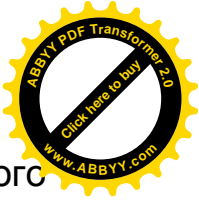
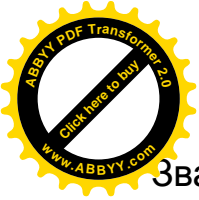
При прийманні ОК в монтаж перевіряються:

- відповідність проекту довжин регенераційних ділянок;
- правильність групування будівельних довжин;
- достатність технологічного запасу ОК для його монтажу;
- правильність розгалужування кінців ОК;
- опір ізоляції шлангових покрів ОК (при наявності в конструкції ОК металевих елементів);
- загасання і цілісність волокон ОК.

Зрощування окремих будівельних довжин ОК полягає у з'єднанні конструктивних елементів ОК. Місце з'єднання захищають муфтою. Монтаж з'єднувальних муфт і контрольні вимірювання на трасі виконуються в ЛВМОК. На змонтовану муфту складається паспорт у двох екземплярах, один з яких повинен вкладатися у корпус муфти. У інструкціях з монтажу ОК повинен бути наведений перелік пристосувань та інструменту, необхідних для монтажу муфт даної марки ОК.

### **14.5.2 Зрощування оптичних волокон**

Оптичні волокна ОК, як правило, зрощуються колір в колір (перше з першим, друге з другим і так далі). Одним з таких способів є зварювання.



Зварювання передбачає розплавлення кінців ОВ під дією потужного джерела теплової енергії - в зоні електричного дугового розряду. Другим способом є використання механічних з'єднувачів. Механічні з'єднувачі можуть бути активними і пасивними. В активних є можливість вирівнювати та оптимізувати положення ОВ за мінімумом втрат.

Вибір того чи іншого методу з'єднання ОВ визначається конкретними умовами будівництва та експлуатації повітряної ВОЛЗ. При виборі слід враховувати, що зварювання ОВ економічно доцільне при великій кількості з'єднань, а використання механічних з'єднувачів доцільно при малій кількості з'єднань.

При підготовці, з'єднанні та укладанні в касету муфти ОВ не повинні згинатися за радіусом, який менше 40 мм.

### **14.5.3 Вимоги до муфт**

За призначенням оптичні муфти поділяються на лінійні, що використовуються для захисту місць з'єднань окремих будівельних довжин лінійного ОК, та станційні – для захисту місць з'єднань лінійного та станційного ОК. Муфти можуть бути “прохідними” (вхід та вихід ОК з різних боків муфти) і “тупиковими” (вхід та вихід ОК з одного боку). В залежності від функціонального призначення з'єднаних ОК, що підведені до муфти, муфти розподіляються на з'єднувальні та розгалужувальні.

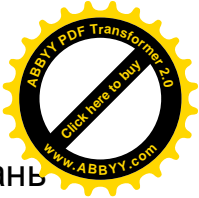
Матеріали, що застосовуються для виготовлення муфт, повинні бути сумісними з матеріалами, з яких виготовляється оболонка ОК. Муфта повинна бути механічно міцною, а організатор (організатори) і зростки, які розміщуються в ній, не повинні пошкоджуватись від вібрації, повзучості ОК або інших механічних навантажень. Розміри корпусу муфти та її компонентів повинні забезпечувати викладку ОВ з номінальним радіусом вигину не менше 40 мм

### **14.5.4 Розміщення муфт**

Місце зрощування підвішених ОК розташовується, як правило, збоку від опори або на опорі, а не в прогоні. Муфти повинні розташовуватись таким чином, щоб забезпечити можливість вільного доступу і простого демонтажу для проведення ремонтних робіт. При наявності на опорах фазових проводів муфти повинні розташовуватись з польової сторони опор.

Муфти ОК повітряних ВОЛЗ можуть встановлюватись:

- безпосередньо на опорі (рис. 14.18 – 14.20);
- на опорі в спеціальному металевому ящику, розміри якого повинні забезпечувати укладання у ньому технологічного запасу оптичного кабелю з допустимим радіусом вигину, а конструкція ящика повинна перешкоджати несанкціонованому доступу до муфти. Встановлення спеціального ящика на опорі зображено на рисунку 14.21;



- в котловані, край якого повинен відступати від опори на відстань від 0,5 до 0,7 м. При цьому ввід оптичного кабелю в котлован повинен здійснюватися за допомогою пластикової труби, яка повинна захищатися металевим жолобом (рис. 14.22).

В особливих випадках (при проходженні траси ВОЛЗ в гірських районах, поблизу підземних переходів та ін.) допускається кріплення з'єднувальних муфт до каната у прольоті (рис. 14.23 ).

Муфти, які встановлюються на опорах, рекомендується розміщувати нижче ОК повітряної ВОЛЗ.

Технологічний запас ОК повинен викладатися у котловані по радіусу, не меншому допустимого для даної марки ОК.

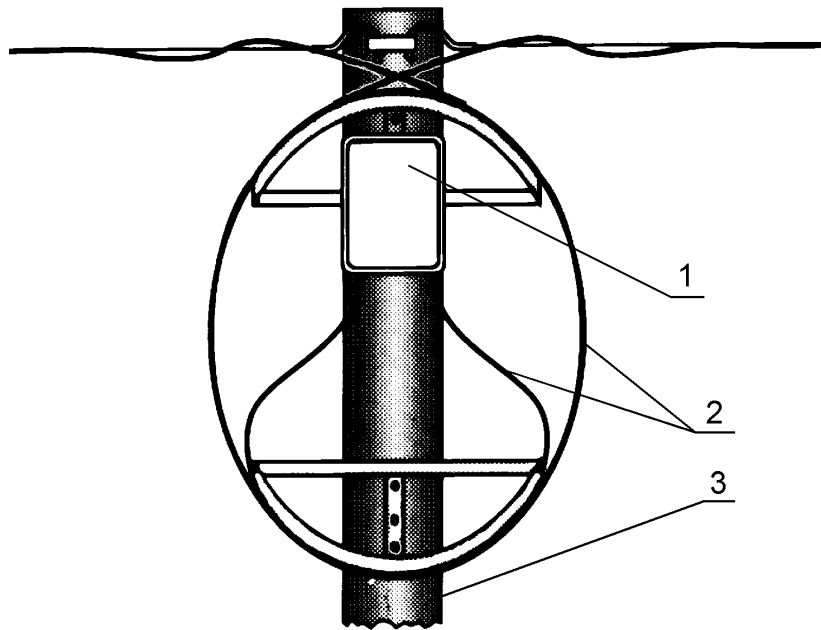


Рисунок 14.20 – Розміщення муфти на опорі ПЛЗ: 1 – муфта; 2 – ОК; 3 – опора

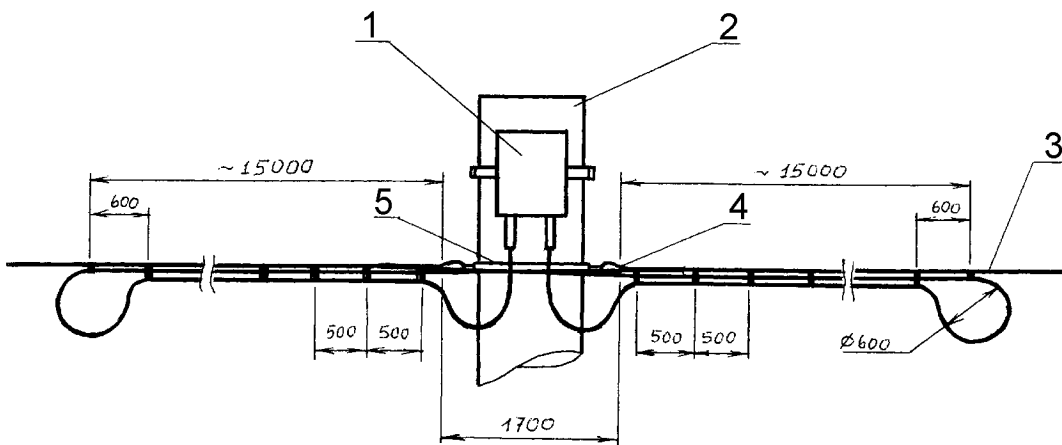


Рисунок 14.21 – Розміщення муфти на опорі КМЗ: 1 – муфта; 2 – опора контактної мережі; 3 – ОК; 4 – анкерний пристрій; 5 – хомут

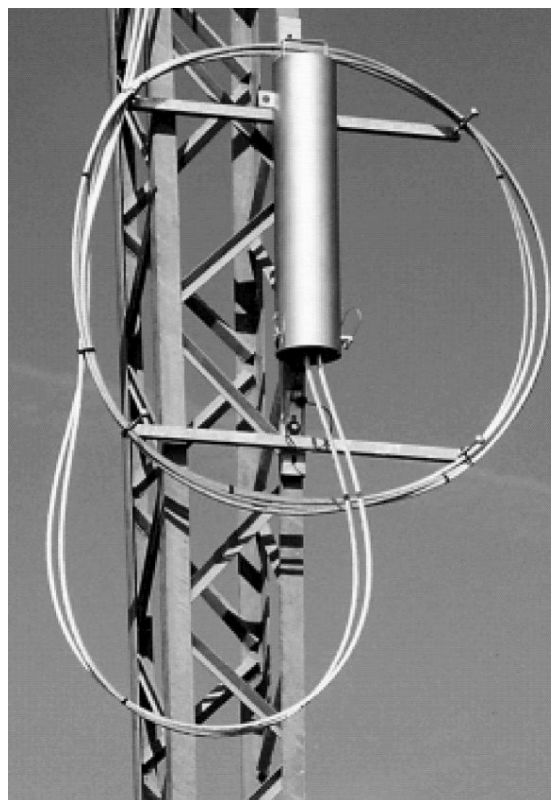


Рисунок 14.22 – Розміщення муфти на опорі ЛЕП

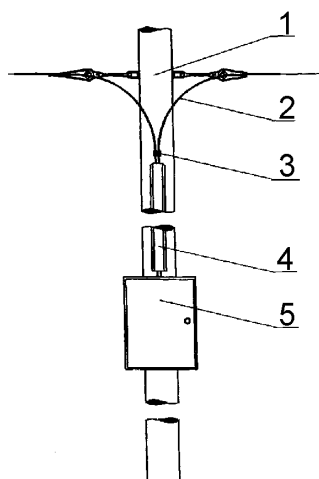


Рисунок 14.23 – Встановлення з'єднувальної муфти ОК повітряної ВОЛЗ на опорі: 1 – опора; 2 – ОК; 3 – скоба; 4 – захисний металевий жолоб; 5 – захисний ящик для муфти та запасу ОК

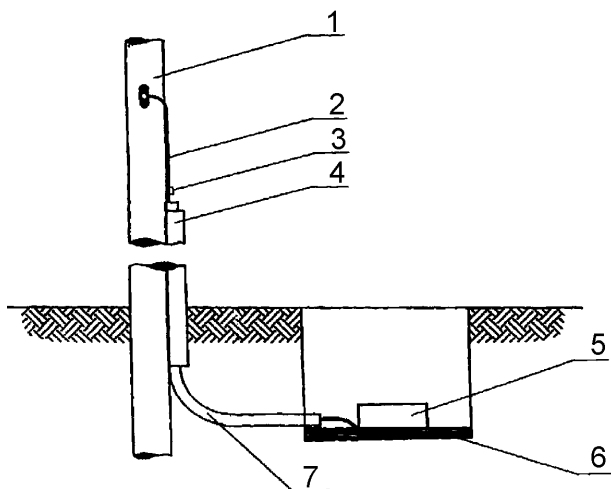


Рисунок 14.24 – Встановлення з'єднувальної муфти ОК повітряної ВОЛЗ в котловані: 1 – опора; 2 – ОК; 3 – скоба; 4 – захисний металевий жолоб; 5 – з'єднувальна муфта; 6 – технологічний запас ОК; 7 – пластикова труба

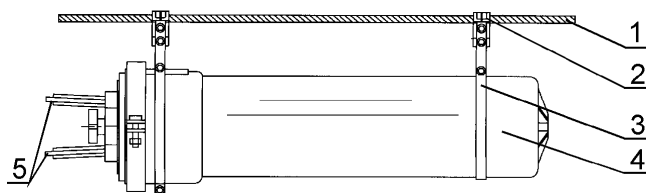


Рисунок 14.25 – Приклад розміщення муфти ОК на несучому канаті: 1 – несучий канат; 2 – підтримувальний затискач; 3 – хомут; 4 – муфта; 5 – ОК

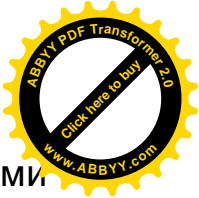
## 15 ТЕХНІЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

### 15.1 Особливості технічної експлуатації повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку

Для своєчасного виявлення пошкоджень підвішених оптичних кабелів, арматури для їх підвішування, несучих канатів (дротів) необхідно проводити контрольні випробування оптичних параметрів ОК та спостереження за ОК, арматурою та несучими канатами.

При контрольних випробуваннях на регенераційній ділянці визначаються загальні загасання в оптичному тракті та розподіл оптичних втрат в ОВ і в місцях їх зрощування.





Спостереження за підвішеним ОК, арматурою та несучими канатами полягає в:

- контролі стріли провисання ОК та канату (дроту);
- визначенні стану арматури (надійність кріплення та відсутність пошкоджень і корозії);
- визначенні якості закріплення ОК в підтримувальних та натяжних затискачах (механічна міцність затиску, відсутність пошкоджень захисної оболонки в місці затиску);
- визначенні стану муфти (відсутність пошкоджень її корпусу) та міцності її закріплення.

Ці спостереження здійснюються шляхом ретельного огляду безпосередньо на опорах та шляхом випробування стріли провисання.

При цьому вимірювання стріли провисання ОК, підвішеного на опорах ПЛЗ та КМЗ, можуть здійснюватися за допомогою мірних рейок. Під час проведення вимірювань напруга живлення з контактних проводів КМЗ повинна бути знятою, вимірювання стріли провисання ОК, підвішеного на опорах ЛЕП, можуть здійснюватися візуванням, при якому зняття подачі напруги по проводах ЛЕП не потрібно, огляд арматури та муфт ОК, підвішених на опорах КМЗ, дозволяється проводити тільки у випадках, коли напруга живлення з контактних проводів знята, огляд же арматури та муфт ОК, підвішених на опорах ЛЕП, дозволяється проводити тільки у випадках відсутності передачі напруги по проводах лінії передавання.

Спостереження мають проводитись два рази на рік (весною та восени) на кожній регенераційній ділянці у середині однієї з будівельних довжин ОК на чотирьох суміжних прольотах. Усі подальші спостереження повинні проводитися на цих прольотах.

При організації технічної експлуатації повітряних ВОЛЗ, побудованих на опорах ПЛЗ чи ЛЕП, слід враховувати, що вони проходять далеко від доріг. Тому час на відновлення ліній після аварій більший, ніж час на відновлення підземних ВОЛЗ. Обстеження ліній утруднено.

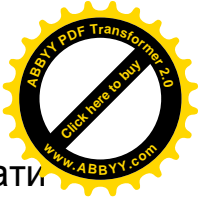
Нормативний час відновлювання пошкоджень при організації аварійно-відновлювальних робіт на повітряних ВОЛЗ, побудованих на опорах ЛЕП такий:

- 12,4 години для ЛЕП напругою 110 та 220 кВ;
- 6,2 години для ЛЕП напругою 330 та 500 кВ.

## **15.2 Випробування оптичних кабелів для підвішування**

### **15.2.1 Загальні положення**

З метою контролю якості проведення будівельно-монтажних робіт і оцінювання стану діючих повітряних ВОЛЗ на всіх етапах її будівництва та протягом усього строку служби проводяться оптичні та електричні (при наявності в конструкції ОК металевих елементів) випробування ОК для підвішування.

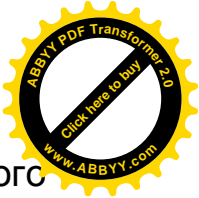


В табл. 15.1 наведені параметри ОК, які рекомендовано вимірювати в процесі будівництва повітряних ВОЛЗ.

**Таблиця 15.1 – Комплекс вимірювань в процесі будівництва повітряних ВОЛЗ**

<b>Етапи робіт</b>	<b>Параметри, що вимірюються</b>	<b>Засоби вимірювальної техніки</b>
Вхідний контроль	Коефіцієнт загасання, довжина ОВ. Електричний опір ізоляції мідних жил, електрична міцність ізоляції.	Рефлектометр Кабельний прилад
Випробування після підвішування ОК	Коефіцієнт загасання, довжина ОВ. Електричний опір ізоляції мідних жил, електрична міцність ізоляції, електричний опір ізоляції металеві оболонки.	Рефлектометр Кабельний прилад
Випробування під час монтажу ОК	Втрати у місці з'єднань ОВ, відстань між з'єднувальними муфтами. Електричний опір ізоляції мідних жил, електрична міцність ізоляції.	Рефлектометр Кабельний прилад
Приймально-здавальні випробування	Загасання ОВ на регенераційній ділянці в обох напрямках. Електричний опір ізоляції мідних жил, електрична міцність ізоляції, електричний опір ізоляції металеві оболонки.	Оптичні тестери Кабельний прилад
<p><b>Примітка 1.</b> Електричні випробування проводяться при наявності в конструкції ОК металевих елементів.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Випробування напругою ізоляції мідних жил проводиться за умови подачі напруги дистанційного живлення по мідних жилах.</p>		

### 15.2.2 Вимірювання при вхідному контролі



Вимірювання оптичних параметрів будівельних довжин оптичного кабелю проводяться на кабельному майданчику перед початком будівельно-монтажних робіт при температурі повітря навколишнього середовища від 10 до 35°C.

Під час вхідного контролю проводиться перевірка ОВ на наявність неоднорідностей і мікротріщин та вимірюється загасання ОВ і їх довжина за допомогою рефлектометра методом зворотного розсіювання. У випадку обриву ОВ або завищення його загасання по відношенню до паспортних даних більше ніж на 0,05 дБ/км для одномодових ОВ і 0,2 дБ/км для багатомодових ОВ складається акт за участю представника замовника і приймається рішення щодо можливості подальшого використання цієї будівельної довжини ОК або повернення її заводу-виробнику.

За одержаною рефлектограмою проводиться перевірка ОВ на наявність неоднорідностей і мікротріщин та вимірюється загасання і довжина ОВ. Виміряні значення порівнюються із паспортними даними.

Електричні випробування при вхідному контролі проводяться на ОК, конструкція якого містить металеві елементи (мідні жили для організації дистанційного живлення регенераційного пункту, що не обслуговується (НРП), металеві оболонки, тощо). Неушкодженість мідних жил перевіряється методом продзвонювання за допомогою електричного тестера.

Вимірювання електричного опору ізоляції кожної мідної жили проводять відносно решти мідних жил, з'єднаних з металевими елементами ОК, способом вольтметра-амперметра за допомогою приладів ПКП-4, ПКП-5 чи подібними до них.

Випробування ізоляції мідних жил між будь-якою мідною жилою і рештою мідних жил, з'єднаних з металевими елементами ОК, проводяться тренувально-випробувальною установкою типу ТИУ-64 чи подібною до неї.

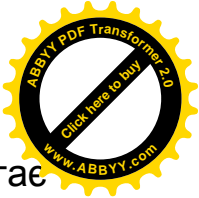
Вимірювання хроматичної та поляризаційної модових дисперсій ОВ здійснюється у випадках, коли по ОК передаються інформаційні потоки зі швидкостями 2,5 Гбіт/с і вище.

Вимірювання електричного опору ізоляції захисного покрову ОК між металевим броньовим покриттям (металевою оболонкою) і землею проводиться за допомогою приладів, наприклад, мегомметра МEG-9, або подібними до нього.

Результати вимірювань оптичних та електричних параметрів ОК заносяться в протокол вхідного контролю.

### **15.2.3 Випробування після підвішування**

Перед початком монтажних робіт на всіх будівельних довжинах оптичного кабелю, підвішених на регенераційній ділянці, проводиться повний комплекс вимірювань оптичних та електричних параметрів ОК, а також перевіряються ОВ на наявність мікротріщин та обривів.



Проведення вимірювань ОК, підвішеного на опорах КМЗ, вимагає зняття напруги живлення контактної мережі на час розмотування кінців ОК з опор. Для цього необхідна перерва (“вікно”) подачі цієї напруги.

При завищенні загасання ОВ на будівельній довжині ОК більше ніж 0,05 дБ/км від виміряного значення при вхідному контролі, або при виникненні різного роду неоднорідностей у ОВ, при відсутності фактів порушення технології підвішування ОК, замовником разом з підрядником і представником заводу-виробника приймається рішення про подальше використання цієї будівельної довжини.

У разі необхідності проводять вимірювання електричного опору ізоляції захисного покрову ОК. Якщо виміряні значення цього опору нижче норми, то необхідно визначити місце його зниження, наприклад, методом градієнта потенціалів за допомогою приладів - шукачів місць зниження ізоляції таких, як ИМПИ, або мостовим методом за допомогою високовольтного моста типу Р 41270 сумісно з джерелом напруги постійного струму типу П 4110.

Місце зниження електричного опору ізоляції (пошкодження захисної поліетиленової оболонки) підлягає ремонту, у відповідності з “Краткими технічними указаниями по ремонту шлангових оболонок кабелей”.

#### **15.2.4 Випробування під час монтажу**

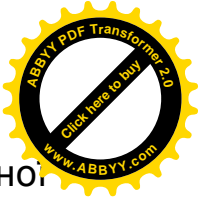
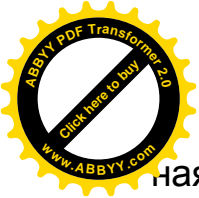
Контрольні вимірювання оптичних втрат в місці з'єднання ОВ під час монтажу муфт на ОК виконуються рефлектометром з двох сторін. Дійсне значення загасання у місці з'єднання ОВ визначається як середньоарифметичне значення вимірювань з двох сторін.

Величини втрат в місці з'єднання ОВ повинні відповідати допустимим нормам, зазначеним у проекті. У випадку перевищення встановленої норми величини загасання в місці з'єднання ОВ проводиться перез'єднання ОВ (до трьох спроб). Якщо і після третьої спроби величина загасання у з'єднанні перевищує норму, то в протокол оптичних вимірювань заноситься дійсне значення загасання, про що інформується замовник.

Виміряні величини втрат в місці з'єднання, загасання ОВ з'єднаних будівельних довжин, відстань між точками монтажу, дані метричних позначок на ОК біля муфти кожної будівельної довжини заносяться в паспорт регенераційної ділянки.

#### **15.2.5 Приймально-здавальні випробування**

Після виконання всіх будівельно-монтажних робіт на регенераційній ділянці будівельною організацією сумісно з представниками замовника проводяться приймально-здавальні випробування. При цьому на регенераційній ділянці проводиться повний комплекс вимірювань оптичних та електричних параметрів ОК, а також перевіряються ОВ на



наявність точкових дефектів та обривів ОВ. За рішенням приймальної комісії можуть бути проведені вибіркові електричні випробування й випробування в кількості від 5% до 10 % обсягів, наведених у ДСТУ 45.005.

При прийнятті повітряної ВОЛЗ в експлуатацію за рішенням робочої комісії можуть проводитися випробування вибірково на 20% регенераційних ділянок.

При цьому рефлектограми регенераційної ділянки на двох довжинах хвиль 1310 та 1550 нм в обох напрямках знімаються та вимірюються у повному обсязі, тобто:

- загасання регенераційної ділянки в обох напрямках передачі;
- електричний опір ізоляції мідних жил (при їх наявності в ОК);
- випробування напругою ізоляції мідних жил (при їх наявності в ОК та за умови подачі по них напруги дистанційного живлення);
- електричний опір ізоляції захисної оболонки.

Випробування загасання кожного ОВ проводять в обох напрямках оптичними тестерами або комплектами пристроїв (джерело випромінювання та вимірювач оптичної потужності) методом внесених втрат.

Випробування загального загасання ОВ можуть проводитися оптичним рефлектометром методом зворотного розсіювання.

Виміряна величина загасання ОВ регенераційної ділянки  $A_{\max}$ , в децибелах, не повинна перевищувати значення, розрахованого за формулою:

$$A_{\max} = \alpha L + n_{36} A_{36} + 2A_p, \quad (15.1)$$

де:  $\alpha$  - граничне значення коефіцієнта загасання ОК за паспортом на заданій довжині хвилі, дБ/км;  $L$  - довжина лінії за даними рефлектометрії, км;  $n_{36}$  - кількість зварних з'єднань ОВ;  $A_{36}$  - втрати на зварному з'єднанні (номінальне значення), дБ;  $A_p$  - втрати на роз'ємному з'єднанні, дБ.

Одержані результати оптичних вимірювань заносяться в паспорт регенераційної ділянки.

### **15.3 Прийняття в експлуатацію повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку**

Прийняття в експлуатацію збудованих повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку здійснюється відповідно до вимог ДНБ А.31-3 та "Керівного документа з прийняття в експлуатацію лінійних споруд зв'язку та дротового мовлення".

Закінчені будівництвом у відповідності з проектом і підготовлені до експлуатації повітряні ВОЛЗ приймаються в експлуатацію Державними приймальними комісіями, призначеними в установленому порядку.





До пред'явлення Державній приймальній комісії повітряної ВОЛЗ, вона повинна бути перевірена і прийнята робочою комісією, що призначається замовником і встановлює ступінь готовності ВОЛЗ до прийняття в експлуатацію.

Підрядні організації пред'являють робочій комісії виконавчу документацію на повітряну ВОЛЗ, що приймається в експлуатацію.

Виконавча документація на закінчені будівництвом повітряні ВОЛЗ складається із титульного аркуша виконавчої документації та паспорта траси в складі:

а) титульного аркуша;

б) робочої документації проекту в обсязі, одержаному від замовника, і відкоректованої у відповідності з виконаними в натурі роботами в процесі будівництва;

□ паспортів на регенераційні ділянки в складі:

а) протоколу оптичних вимірювань;

б) протоколу електричних вимірювань мідних жил (при наявності в конструкції оптичного кабелю металевих елементів);

□ монтажної документації в складі:

а) титульного аркуша;

б) паспортів на змонтовані муфти;

□ робочої документації в складі:

а) титульного аркуша;

б) заводських паспортів (сертифікатів) на будівельні довжини ОК;

в) протоколів вхідного контролю параметрів ОК;

г) укладальної відомості будівельних довжин ОК.

До пред'явлення повітряної ВОЛЗ Державній приймальній комісії робоча комісія:

- перевіряє виконавчу документацію на комплектність, повноту змісту та якість виконання;

- перевіряє відповідність об'єктів проектам;

- перевіряє відповідність виконання будівельно-монтажних робіт вимогам відповідних будівельних норм та правил, інструкцій тощо;

- перевіряє підготовленість об'єктів до експлуатації;

- здійснює вимірювання загасань оптичних волокон ОК на збудованих ВОЛЗ для підтвердження даних, що вказані в паспортах та протоколах на них;

- здійснює вимірювання електричного опору і електричної міцності ізоляції мідних жил та опору ізоляції захисного покрову.

З моменту підписання акта робочою комісією замовник несе відповідальність за збереження всіх лінійних споруд побудованої повітряної ВОЛЗ, прийнятих і включених в цей акт. Датою вводу об'єкта до експлуатації є дата підписання акта Державною комісією.

Експлуатація повітряних ВОЛЗ (чи їх складових частин), які не прийняти Державною комісією, не дозволяється.





## 16 ЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ВІД НЕБЕЗПЕЧНИХ ВПЛИВІВ

### 16.1 Загальна характеристика факторів впливу на оптичний кабель

До джерел зовнішнього впливу на ОК відносяться:

- температура;
- механічні зусилля різного виду і походження;
- вологість;
- агресивність зовнішнього середовища;
- водень, що присутній у зовнішньому середовищі;
- сильні електромагнітні поля;
- іонізуюче випромінювання.

На відміну від традиційних металевих кабелів зв'язку ОК у більшому ступені піддаються впливу температури, механічних зусиль та іонізуючому випромінюванню. Ці фактори впливають на параметри ОК, визначаючи характеристики передачі. Зміна температури навколо кабелю значно впливає на його коефіцієнт загасання.

Механічні зусилля, що прикладені до волокна, та пов'язані з цим деформації призводять до локального збільшення загасання та до порушення структури поля при багатомодових волокнах, - отже, й до зміни передаючих характеристик ОК.

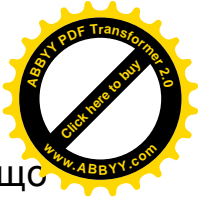
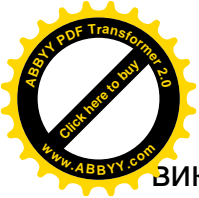
У одномодовому волокні подібний вплив викликає зміни довжини хвилі відсічення  $\lambda_c$  і при достатньо великих зусиллях, прикладених до волокна, з'являються додаткові втрати на розсіювання.

При проникненні в ОК вологи створюються умови, що порушують міцність волокна і неоднорідність його зовнішньої оболонки; останнє може призвести до збільшення значення складової загасання на розсіювання, а при довготривалому впливі вологи знижується міцність волокна й прискорюється його старіння.

Агресивність середовища, у якому може опинитися кабель, характеризується його хімічним складом і перед усім може вплинути на зовнішню оболонку кабелю, а при руйнуванні останньої кабель вважається пошкодженим незалежно від стану його ОВ.

Вплив водню, присутнього у волозі чи у парі оточуючої атмосфери продифундованого в ОВ, при певних умовах (утворення у матеріалі волокна групи ОН) проявляється у значному збільшенні загасання ОВ. Таке явище може мати відновлювальний чи залишковий характер (тобто після вилучення волокна з середовища, що містить водень, підвищене загасання залишається).

Вплив сильних електромагнітних імпульсів на ОК у тих випадках коли він містить металеву оболонку чи живлячий електричний дріт може



викликати, як і у звичайних кабелях зв'язку, небезпечний струм, що може привести до руйнування кабелю.

Слід розглянути дві наслідки впливу імпульсів:

- порушення цілості кабелю, що призводить до остаточного припинення зв'язку;
- тимчасові порушення передачі сигналів інформації за рахунок появи перешкод.

Вплив радіаційного випромінювання має велике значення перш за все для ОВ. У цьому відношенні ОК слід вважати більш схильним до такого впливу ніж звичайні металеві кабелі зв'язку. Під впливом радіації загасання ОВ значно зростає, і це явище може мати тимчасовий або остаточний характер. У першому випадку після припинення дії радіації або зменшення її до деякого рівня загасання відновлюється до початкового значення, у другому - після припинення дії радіації значення загасання залишається більшим, ніж початкове значення.

Наслідком радіаційного опромінювання ОВ може бути також поява шумів, що виникають при радіації, природа яких пов'язана з процесами зміни у часі загасання волокна у різних його ділянках. Ці шуми є причиною порушення зв'язку незалежно від кінцевого значення підвищення загасання волокна.

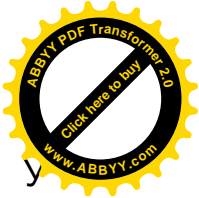
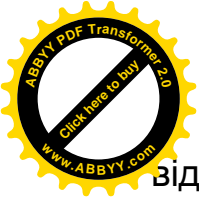
## 16.2 Вплив температури

Загасання якісних ОВ при зміні температури у діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  змінюється трохи. При цьому мається на увазі волокно без захисного покриття та мікровигинів.

У реальних умовах внаслідок різних значень температурного коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР) волокна і оболонки, що пов'язані один з одним у різному ступені (залежно від виду укладки волокна і стану його поверхні), виникають внутрішні напруги у волокні, що змінюють значення показника заломлення.

Незалежно від цього показник заломлення ОВ змінюється безпосередньо під впливом температури (ця зміна залежить від значення термічного коефіцієнту показника заломлення). Внаслідок цього змінюється апертура волокна і довжина хвилі відсіку (при одномодовому режимі). Як наслідок таких порушень, змінюється коефіцієнт розповсюдження світла в одномодовому волокні та модова структура у багатомодовому волокні. Усе це порушує характеристики передачі і викликає зростання втрат на розсіювання, тобто збільшує загасання кабелю.

Виникання пружних напруг, що пов'язані з впливом температури, слід віднести не тільки до ОВ у захисній оболонці, а й до усієї конструкції кабелю, ТКЛР елементів якого значно відрізняється один від одного, а механічні зв'язки між елементами конструкції дуже складні. У цих умовах термічна деформація усієї конструкції кабелю призводить до складних і



відносно великих пружних деформацій у ОВ, які важко врахувати. У результаті може значно збільшитися загасання ОК через зростання втрат на розсіювання.

### 16.3 Вплив механічних зусиль

Межа механічної міцності оптичних кабелів нижча ніж у звичайних металевих кабелів зв'язку. Рівень дозволеного навантаження при прокладанні та протягуванні оптичного кабелю визначається головним чином межею міцності ОВ. Навантаження, що перевищує дозволений рівень може привести до розриву ОК, який відбувається відразу, або дає знати про себе в процесі експлуатації. Тому дозволений рівень навантаження не має бути перевищений, для чого необхідно приймати додаткові запобіжні заходи та використовувати відповідне обладнання для забезпечення успішного прокладання кабелю.

На стабільність властивостей передачі по ОК негативно впливають мікро- та макровигини, а також деформації, що можуть виникнути під час виробництва та прокладання кабелю. Механізм їх впливу на загасання оптичної енергії пов'язаний з розсіюванням останньої та виникненням локальних мікронапруг. Вони можуть погіршити не лише можливості передачі, а й механічні властивості волокон.

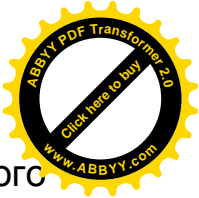
Макровигини ОВ окрім виробничих дефектів можуть бути викликані згинанням кабелю у процесі його прокладання. Фізична сутність деформації ОВ при макровигині майже ідентична з деформаціями розтягування. Навантаження, що призводять до їх виникнення, являє собою поперечний тиск, або напругу уздовж кабелю, яке може бути направлене на стискування волокон, від чого ОВ викривляється і вигинається. Значні вигини, що призводять до зсуву волоконних вісей, збільшують оптичні втрати, а також можуть викликати поверхневі напруги, що призводять до розриву волокон оптичного кабелю.

Мінімальний дозволений радіус вигину ОК прийняте у діапазоні від 10-ти кратного діаметру ОК (при відсутності зусиль, що розтягують), до 20-ти кратного (при їх наявності).

Пружні деформації, викликані механічним зусиллям, призводять до зміни довжини хвилі відсічення, доповнюючи втрати на розсіювання.

Джерела механічних напруг можуть бути первинними, що пов'язані із залишковими деформаціями, які викликані технологією виробництва кабелю; вторинними, що пов'язані з процесами прокладки й експлуатації кабелю.

При прокладанні ОК, внаслідок сил опору необхідне зусилля, що прикладається до кабелю у тому чи іншому ступені, та передається волокнам. Це зусилля може досягати значень, при яких імовірні залишкові деформації у волокнах, а також у виняткових випадках може призвести до деформації цієї конструкції кабелю.



Окрім впливу деформації на загасання кабелю і на його характеристики передачі слід враховувати зниження міцності волокна. Вірогідність руйнування волокна заданої довжини  $L$  під впливом напруги з часом  $t$  описується розподілом Вейбулла:

$$P(L; \sigma; t) = 1 - \exp \left[ -\frac{L}{L_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \left( \frac{t}{t_0} \right)^b \right], \quad (16.1)$$

де  $L_0$  - довжина волокна при випробовуванні його на розрив;  $\sigma_0$  - руйнуюча напруга при розриві (на довжині  $L_0$ );  $m$  - щільність розподілення дефектів по довжині волокна;  $t_0$  - часова стала причини, що є початком руйнування;  $b = 20 \dots 25$  - коефіцієнт.

Дослідженнями було визначено, що при дії первісної напруги  $\sigma_0$  на еліптичну тріщину, радіус кінця якої  $p$ , розмір її з часом змінюється за законом:

$$\frac{dx}{dt} = \left( 2 A \sigma_0 \sqrt{\frac{x}{p}} \right)^b, \quad (16.2)$$

де  $\sigma_0$  - руйнуюча напруга при глибині тріщини  $x$ .

Час росту тріщини від початкового розміру  $x_0$  до розміру  $x_a$ , при якому відбувається руйнування:

$$t_p \approx \left( \frac{2}{b-2} \right) \left( \frac{\sqrt{p}}{2 A \sigma_a} \right)^b \cdot X_a^{\frac{2-b}{2}}, \quad (16.3)$$

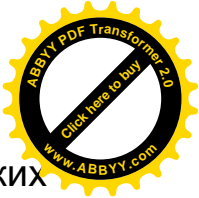
де  $A$  - стала, що залежить від матеріалу волокна, присутності і ступеню вологи.

## 16.4 Вплив вологи

Основний вплив вологи позначається на прискоренні можливого руйнування волокна і на збільшенні загасання через потужні розсіювання внаслідок виникнення і розвитку неоднорідної структури поверхні зовнішньої оболонки. Адсорбція вологи чи водних розчинів поверхнево-активних речовин на поверхні волокна сприяє утворенню мікротріщин і зниженню його міцності. Так як у полі механічних напруг процес дифузії прискорюється, то при наявності залишкових деформацій або при прикладанні зовнішніх зусиль волога швидше дифундує по межах мікротріщин, що прискорює процеси руйнування волокна.

Можливо сказати, що майже для усіх існуючих видів оптичних волокон проникнення вологи може призвести до зниження їхньої міцності (через розвиток мікро тріщин) на 15...30%.

У відносно сухому повітрі у неполярному середовищі і після гідрофобізації поверхні волокна вказані явища не спостерігаються. Слід зазначити, що волога зменшує опір згину волокна.



До розглянутого впливу вологи примикає також вплив рідких **агресивних** середовищ (наприклад, морська вода, рідини, що характеризуються підвищеною кислотністю або лужністю). Вплив таких середовищ на волокно тут не розглядається, тому що такий вплив варто виключати шляхом вибору матеріалу й конструкції ОК.

## 16.5 Вплив водню

У великій кількості праць, що відносяться до дослідження експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку наведено дані щодо впливу водню на загасання ОВ. В основному досліджувалися процеси дифузії водню у волокно і наслідки цього явища (збільшення загасання).

Дослідні ОВ витримували в атмосфері, що містить водень при різному тиску, температурі та концентрації водню. Після утримування на повітрі через десятки та сотні годин (у залежності від ступеня переповнення воднем), загасання зменшувалось і поступово верталось до початкового значення. Час перебування волокна у водні можна було зіставити із часом відновлення загасання і він співпадав із часом, коли наставало насичення (тобто загасання більше не збільшувалось при перебуванні волокна в атмосфері водню). Дослідження показали, що час насичення відповідав часу дифузії водню у волокні.

Досліди з'ясували, що збільшення загасання мало місце тільки під час знаходження волокна у водні і у короткий проміжок часу після видалення волокна із атмосфери водню. Виключенням були випадки одночасного з витримкою у водні підігріву волокна до температури  $(200...300)^\circ \text{C}$ , при цьому спостерігалось підвищене залишкове загасання.

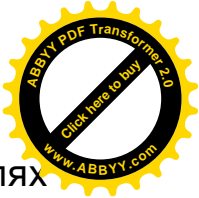
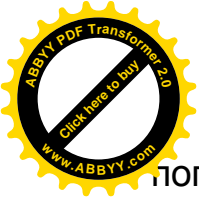
Слід мати на увазі, що водень виникає у процесі виготовлення оптичного кабелю внаслідок хімічних реакцій, що відбуваються поміж деякими матеріалами, що входять до конструкції кабелю. При наявності металевих елементів корозія останніх також є причиною появи водню.

Досліди проводились у діапазоні довжин хвиль  $1,3...1,55$  мкм. Максимуми загасання мають місце у областях  $\lambda = 1,4$  мкм та  $\lambda = 1,53$  мкм. Механізм загасання пов'язаний з фундаментальними втратами, що викликані внаслідок поглинання енергії на основній резонансній частоті спектра молекулярного водню, а також на обертонах спектру. Було зафіксовано утворення груп ОН, що мало залишковий характер при одночасному нагріві до температури  $200^\circ \text{C}$ .

Вплив радикалу ОН та загасання також визначається його спектром поглинання, що істотно в області  $\lambda = 1,3...1,5$  мкм.

Збільшення коефіцієнту загасання  $\Delta\alpha$  під впливом водню можливо охарактеризувати наступними цифрами: у діапазоні  $\lambda = 1,2...1,25$  мкм при первісному загасанні ОВ  $\alpha = 0,5$  дБ/км  $\Delta\alpha = 4$  дБ/км, а при  $\lambda = 1,55$  мкм та  $\alpha = 0,3$  дБ/км  $\Delta\alpha = 4$  дБ/км. Тиск водню  $P = 200$  кПа. Насичення наступало через 250 годин,  $\Delta\alpha = 25$  дБ/км. Дослідженням спектру





поглинання, пов'язаного з дією водню, було встановлено піки на хвилях 1,08; 1,13; 1,2; 1,24; 1,59; 1,64; 1,70; 1,76; 1,88 мкм.

Вплив радикала OH на збільшення загасання суттєво більший впливу молекулярного водню H<sub>2</sub>. Поява кінцевого загасання під впливом температури у процесі насичення волокна воднем пов'язана з появою радикалу OH, утворення якого є наслідком дифузії атомів водню і наступним утворенням під впливом температури стійкого зв'язку Si-OH. Утворенню Si-OH сприяє наявність дефектів у зв'язках, що входять до кварцу Si-O-Si. Джерелом таких дефектів є леговані домішки P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, GeO<sub>2</sub>.

Коефіцієнт дифузії водню у склі при кімнатній температурі  $D = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , а енергія активації  $E = 6,3 \text{ кДж}$ . На базі рішення дифузійного рівняння для волокна було одержано вираз, що визначає співвідношення збільшення загасання через вплив водню у одномодовому волокні:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\gamma_n \frac{Dt_m}{b}\right)}{\gamma_n J_1(\gamma_n)}, \quad (16.4)$$

де  $\gamma_n$  - корінь функції Бесселя;  $t_m = t + w^2 / 8D$ ,  $t$  - час, с;  $w$  - радіус поля першої моди;  $w = a$  (тут  $a$  - радіус серцевини волокна, мкм);  $b$  - зовнішній радіус серцевини волокна, мкм.

Для  $\lambda = 1,4 \text{ мкм}$  встановлено експериментальну залежність приросту загасання від температури та парціального тиску водню:

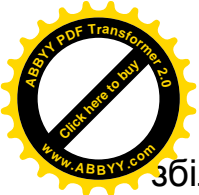
$$\Delta\alpha = A \exp\left(-\frac{15,9}{RT}\right) p_{\text{H}}^{1/2}, \quad (16.5)$$

де  $p_{\text{H}}$  - парціальний тиск;  $A$  - стала, що залежить від концентрації GeO<sub>2</sub> і P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;  $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$  - універсальна газова стала;  $T$  - температура, К;

Коефіцієнт дифузії групи OH у склі менший ніж у водню:  $D = 10^{-17} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , а енергія активації  $E = (82 \pm 6,7) \text{ кДж}$ . Підвищення загасання OH під впливом водню має місце при неперервній присутності кабелю у середовищі, що містить водень при достатньому його парціальному тиску чи в умовах, що сприяють виникненню вільного водню. Наявність мікротріщин, циклічні зміни температури, волога прискорюють процеси дифузії. Волога інтенсифікує появу групи OH та її проникнення у кабель.

Під впливом лазерного випромінювання (що несе сигнали інформації) дифундує у волокно водень утворює стійке утворення OH. Концентрація вільного водню у середині волокна остається достатньо малою, при ній процес дифузії у серцевину буде продовжуватися до тих пір, поки значення концентрації вільного водню не буде визначатися умовами рівноваги між швидкістю надходження дифундуємого водню та швидкістю його переходу у групу OH. У результаті відбувається накопичення іонів OH і утворюється стійке остаточне загасання (навіть при усуненні джерела водню). В цих умовах





Збільшення загасання протікає швидше, ніж при відсутності випромінювання, навіть при малих парціальних тисках водню, наприклад в звичайній атмосфері.

Парціальний тиск водню у звичайній атмосфері (при сухому повітрі)  $p_{H_2} = 0,05$  Па. При наявності водяних парів це значення росте, а зміст водню в атмосфері збільшується від 0,014% на кілька порядків.

При наявності у водяних парах розчинних домішок внаслідок дисоціації й інших причин зміст  $H_2$  також збільшується. Варто мати на увазі, що водень виникає в процесі виготовлення ОК через хімічні реакції, що відбуваються між деякими матеріалами, що входять в елементи конструкції кабелю. Причиною появи водню є також корозія металевих елементів.

## 16.6 Вплив іонізуючого випромінювання

Розрізняють корпускулярні й електромагнітні іонізуючі випромінювання. Перші представлені нейтронами, протонами, електронами, альфа- і бета-частинками, а також осколками розділення ядер. До електромагнітних випромінювань відносять рентгенівські й гамма-випромінювання.

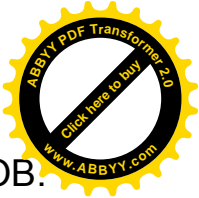
Основні радіаційні ефекти - зсув та іонізація.

Ефект зсуву полягає в зрушенні атомів матеріалу з нормального положення, що вони займають у кристалічних решітках. При цьому утворюються дефекти в структурі решітки (вакансії, міжвузлові впровадження додаткових атомів, дислокації).

Ці дефекти можуть бути нестійкими, релаксуючими, що мають тенденцію до відновлення вихідного стану після припинення дії радіації. Вони можуть також шляхом об'єднання утворити складніші дефекти. Особливо істотне об'єднання дефектів з наявними в матеріалі домішками або з вихідними дефектами решіток.

При опроміненні речовини електронами й фотонами з енергією менше 1 МеВ виникають найпростіші дефекти. Вплив нейтронами, протонами й електронами більш високих енергій викликає переміщення атомів на відстані, що обумовлюють мікроруйнування матеріалу, що мають необоротний характер.

Іонізаційні ефекти проявляються у вигляді перехідних явищ, пов'язаних з утворенням електронно-іонних пар. Зростання числа вільних електронів та іонізованих атомів змінює електричні характеристики матеріалу. Завдяки тому, що вільні носії зарядів мають високу рухливість, ефекти, викликані іонізацією, швидко зникають після припинення опромінення. Якщо носії захоплюються на глибокі енергетичні рівні даного матеріалу, їхня густина зростає з ростом поглиненої дози випромінювання й виникає довгостроковий ефект такого впливу.



Найбільш чутливим елементом ОК до впливу випромінювання є ОВ. У результаті опромінення змінюються первинні оптичні параметри, причому найбільшою мірою – коефіцієнт загасання. Відповідно прийнято оцінювати цей ефект внесеним загасанням.

Ступінь і характер зміни в часі внесеного загасання  $\alpha^i(t_0)$  складно залежать від дози, типу й часу опромінення; тут  $t_0 = t^i + t$ , де  $t^i$  – час опромінення ( $i$  - індекс), при стаціонарному опроміненні  $t^i = t_c^i$ , а при імпульсному –  $t^i = t_u^i$ ;  $t$  – поточний час після припинення опромінення.

Параметри, що визначають  $\alpha^i(t_0)$ , можна розбити на дві групи:

1. Параметри радіаційного впливу:

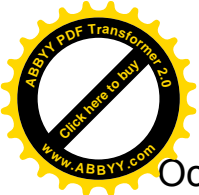
- тип і спектр випромінювання;
- стаціонарне  $t_c^i$ ;
- доза;
- імпульсне  $t_u^i$ ;
- потужність дози;
- навколишня температура при впливі випромінювання на волокно.

2. Параметри ОВ:

- тип волокна;
- склад серцевини, оболонки, добавок, що легують;
- спосіб одержання заготовки;
- робоча довжина хвилі;
- радіаційна передісторія волокна.

Механізм появи внесеного загасання наступний. При впливі випромінювання в матеріалі волокна виникають процеси зсуву, що створюють описані вище дефекти решітки. Крім того, у вихідному матеріалі вже можуть існувати такі дефекти. Під впливом випромінювання на цих дефектах створюються електрони провідності й дірки, комбінації яких з вакансіями утворюють так звані центри фарбування. Тому що центри фарбування поглинають світло в певній частині спектра, у якій власне поглинання матеріалу відсутнє, те з'являється додаткове загасання, що проявляється головним чином у трьох робочих областях хвиль: 0,85; 1,3; 1,4 мкм.

Крім збільшення загасання вплив випромінювання приводить до генерації світла у вигляді люмінесцентного випромінювання. Причиною цього є ефект Черенкова, що виникає тоді, коли комптонівські електрони поширюються зі швидкістю, більшою швидкості світла у волокні. Люмінесцентне випромінювання також може бути результатом збудження світла в центрах фарбування при поширенні робочого (лазерного) випромінювання по ОВ. Інтенсивність такого люмінесцентного випромінювання в порівнянні з основним (робочим) лазерним випромінюванням незначна, однак при великих дозах випромінювання може порушити роботу фотоприймача на виході ОК.



Основний вплив описаного світіння позначається на появі перешкод на прийомі.

Специфічний вплив типу й спектра випромінювання на значення наведених втрат починає позначатися при дозах опромінення більше  $10^6 \dots 10^7$  рад. Внесене загасання  $\alpha^i$  залежить нелінійно від значення поглиненої дози випромінювання. Характер зміни  $\alpha^i(t)$  в часі такий, що значення  $\alpha^i$  зменшується, прагнучи до деякого невеликого постійного значення, що у ряді випадків практично може бути прийнятим рівним нулю. Таким чином, можна говорити про процес відновлення первісного (до опромінення) загасання.

При стаціонарному опроміненні, тобто опроміненні, час якого не менш десятків секунд, процес відновлення загасання має місце вже під час опромінення.

Залишкове загасання може зберігатися протягом декількох років після опромінення. Кінетика відновлення загасання і його кінцеве (стаціонарне) значення залежать від матеріалу волокна, домішок і залишкових напруг. У свою чергу, залишкові напруги визначаються швидкістю й температурою витяжки волокна, а також режимом охолодження при витяжці.

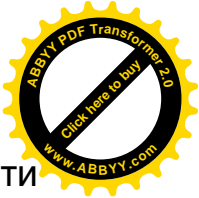
Внесене загасання, а також ступінь його відновлення характеризують радіаційну стійкість волокна. Волокна із серцевиною на основі чистого  $\text{SiO}_2$  (з високим ступенем очищення від домішок) з полімерною оптичною оболонкою є найбільш стійкими. Введення легуючих добавок знижує радіаційну стійкість. Залишкові напруги також діють негативно. Це пояснюється тим, що домішки й деформації, пов'язані із залишковою напругою, активізують виникнення дефектних центрів.

Кварцові волокна з низьким змістом ОН більше чутливі до випромінювання, ніж ці ж волокна з високим змістом цієї гідроксильної групи. Відновленню загасання після опромінення сприяє нагрівання (до  $200 \dots 300^\circ\text{C}$ ), а також лазерне випромінювання, що поширюється по волокну.

Стаціонарний вплив випромінювання є фактором, що сприяє відновленню первісного загасання. Гадана парадоксальність такої ситуації пояснюється тим, що після появи центрів фарбування, що є причиною внесеного загасання, подальший вплив випромінювання при досить великій його дозі приводить до процесів “заліковування”.

Це явище являє собою “радіаційний отжиг”, що усуває неоднорідності, якому відповідає деяка температура отжигу. Ця температура визначається в такий спосіб.

Нехай волокно з наведеним загасанням, що залежить від часу  $\alpha^i(t)$ , піддається плавному нагріванню. При температурі отжигу  $T_{om}$  похідна  $d\alpha^i(t)/dt < 0$  має стрибок.



При нестационарному (імпульсному) опроміненні оптичні втрати більше, ніж при стаціонарному. Це пояснюється відсутністю радіаційного отжигу, що робить мікроструктуру матеріалу волокна більш однорідною. Більше радіаційно-стійкими є волокна із серцевиною з  $\text{SiO}_2$  з полімерною оболонкою. Деякі легуючі домішки (наприклад, фосфор) зменшують значення внесеного загасання, що зворотне дії цієї ж домішки при стаціонарному опроміненні.

Час відновлення вихідного загасання після імпульсного опромінення більше, ніж після стаціонарного. Варто також мати на увазі, що дози імпульсного випромінювання, як правило, істотно більше доз стаціонарного, що пояснюється видом реальних джерел випромінювання.

Явище відновлення вихідного загасання не усуває вражаючої дії випромінювання на передачу інформації по ОК, хоча б і на обмеженому проміжку часу, тим більше, що можливе порушення зв'язку може відбутися в екстремальних ситуаціях, коли оперативне призначення зв'язку особливо істотно.

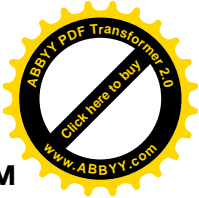
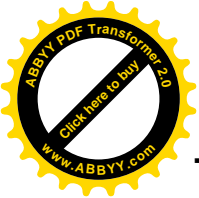
Залежність внесеного загасання і його часової характеристики від дози випромінювання, типу впливу (стаціонарного або імпульсного) для різних видів волокон, їхнього матеріалу досить різноманітна й може становити спеціальний інтерес. Обмежимося деякими характерними даними.

У табл. 16.1 наведені значення внесених загасань для трьох типів ОВ. Найбільш чутливі до випромінювання волокна із силікатних стекол. Абсолютні значення загасання в результаті опромінення досить великі. Фактично волокна перестають бути провідниками сигналів на час, що передуює відновленню первісного загасання або сталого значення залишкового внесеного загасання.

**Таблиця 16.1 – Внесене загасання волокна, дБ/км, при  $\lambda = 0,82$  мкм і стаціонарному опроміненні**

Тип волокна	Потужність дози, рад/хв			
	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
Кварцове волокно з полімерною оболонкою	28	89	195	135
Волокно з легованого кварцового скла:				
$\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ (серцевина)	25	180	1400	12000
$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ (серцевина)	7	40	350	2500
$\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ (оболонка)	140	550	1400	5900
Волокно з боросилікатних стекол	210	1800	>10000	-

У табл. 16.2 наведені значення внесених загасань через короткі проміжки часу після імпульсного опромінення.



Таблиця 16.2 – Внесені загасання волокна, дБ/км, при  $\lambda = 0,82$  мкм й імпульсному опроміненні дозою 3700 рад

Тип волокна	Час після впливу імпульсу, с		
	$10^{-3}$	$10^{-1}$	10
Кварцове волокно з полімерною оболонкою	210	90	5
Волокно з легovanого кварцового скла:			
SiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (серцевина)	670	500	380
SiO <sub>2</sub> -GeO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (серцевина)	98	88	71
SiO <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (оболонка)	720	410	30

Кращі характеристики мають волокна з SiO<sub>2</sub> і полімерною оболонкою.

В області більш довгих хвиль ( $\lambda = 1,3...1,5$  мкм) радіаційна стійкість більше, ніж при  $\lambda = 0,82$  мкм майже в 4 рази в порівнянні з наведеними даними, тобто загасання, викликане радіацією, у стільки ж разів менше.

Крім зміни загасання волокна радіація спричиняє зміну густини його матеріалу й показника заломлення. Однак зміни цих параметрів під впливом випромінювання невеликі й практично їх можна не брати до уваги в порівнянні зі зміною загасання. Підвищення радіаційної стійкості ОВ реалізується в наступних напрямках:

- вибір складу стекл і легуючих добавок при умовах забезпечення необхідного профілю  $n(r)$  серцевини й одержання заданого значення загасання;

- забезпечення високого ступеня очищення вихідних матеріалів;
- раціональні режим і метод одержання заготовок і волокна з них.

Крім того, можливі операції, спрямовані на підвищення радіаційної стійкості готових волокон, а саме:

- попереднє опромінення волокна ("радіаційний отжиг") при деякому обраному режимі (доза, час опромінення);
- фотопросвітління випромінюванням лазера;
- термічний отжиг;
- введення захисних добавок.

Фотопросвітління зручно застосовувати для прискорення процесу відновлення загасання, використовуючи те ж джерело випромінювання, що застосовується для передачі інформації.

На рис. 16.1 показана кінетика просвітління лазерним випромінюванням на хвилі  $\lambda = 0,85$  мкм у діапазоні потужностей від 0,3 мкВт до 1,57 мкВт.

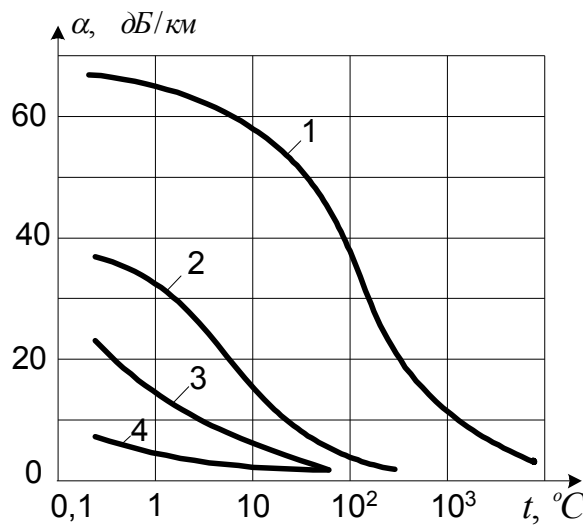


Рисунок 16.1 – Фотопросвітління ОВ лазерним випромінюванням різної потужності: 1– 0,3 мкВт; 2 – 0,014 мкВт; 3 – 0,14 мкВт; 4 - 1,57 мкВт

Перед операцією просвітління кварцове волокно з полімерною оболонкою протягом 20 секунд піддавалося опроміненню дозою 3700 рад. По осі абсцис відкладений час після закінчення опромінення.

Захисною добавкою, зокрема, є бор, захисні властивості якого широко використовуються в атомній промисловості.

Крім впливу на загасання волокна випромінювання впливає на стан полімерних матеріалів, що входять у конструкцію ОК.

Природа цього впливу пов'язана з утворенням у полімерах іонів і вільних радикалів, що обумовлюють протікання різних хімічних реакцій.

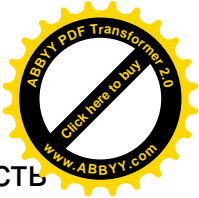
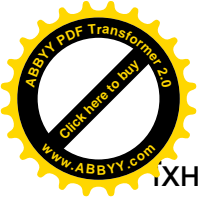
Іонізуюче випромінювання істотно змінює макроскопічні властивості полімерів, що насамперед позначається на зниженні міцності, залишковій деформації й повзучості матеріалу. У цих явищах певну роль грають також порушення зв'язків полімерних ланцюжків.

Ряд ефектів зникає після припинення опромінення, але деякі виявляються необоротними. Залишкові явища пов'язані з порушенням валентних зв'язків полімерних молекул. Можливі ситуації, при яких необоротні зміни механічних властивостей полімерних виробів унеможливають їхнє подальше використання в конструкції ОК. Особливо сильний ефект дає нейтронне опромінення.

Механічна міцність ОВ знижується при більших потужностях дози; так, кварцове волокно при потужності дози  $4 \cdot 10^5$  рад/г стає крихким.

Пошук складів скла для виготовлення радіаційно стійких світловодів показав, що уведення у силікатне скло непофарбованих елементів змінної валентності – олова, сурми, миш'яку, ніобія, вісмуту – покращує





їхні властивості щодо впливу іонізуючого випромінювання, а наявність окислів сурми та алюмінію сприяє збереженню прозорості та її відновленню після опромінення. Плавлений кремнезем сильніше змінює свої якості, ніж кристалічний кварц, а високо кремнеземне волокно значно більше радіаційне стійке ніж свинцово-силікатне та лужно-силікатне.

Використання спеціальної технології варки скла в окислювальних умовах, уведення окису церія або лужних присадок, а також використання чистого кремнезему суттєво розширює діапазон скла, що використовується для створення радіаційностійких ОВ, дозволяє отримати склади скла, що відрізняються радіаційною стійкістю у потрібному оптичному діапазоні.

### 16.7 Ефекти Керра і Фарадея

Під впливом електромагнітного поля в ОВ змінюється площина поляризації світла, що призводить до певних небажаних наслідків для передачі світла. Ще у дев'ятнадцятому сторіччі було відкрито явище обертання площини поляризації світла у поперечному електричному (ефект Керра) та повздовжньому магнітному (ефект Фарадея) полях. У наслідок цих явищ у ОВ можлива поява подвійного променезаломлення і у результаті збільшення загасання сигналу, що передається по ОК.

Ефект Керра проявляється у газах та рідинах. У твердому тілі оптична анізотропія може бути також наслідком механічної деформації при електричній поляризації. Під впливом поперечного електричного поля площина поляризації повертається на кут

$$\varphi = 2\pi KE^2 L, \quad (16.6)$$

де  $E$  – напруженість зовнішнього поля;  $K$  - стала Керра;  $L$  – товщина (чи довжина) шару речовини, що знаходиться під впливом поля.

Величина  $K$  може бути отримана при розгляді процесів поляризації у речовині та залежить від довжини хвилі та температури:

$$K = \frac{1}{30} \cdot \frac{(n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2}{n} \cdot \frac{m\varepsilon_0}{\lambda k T \kappa}, \quad (16.7)$$

де  $n$  - показник заломлення речовини;  $\varepsilon_0$  - діелектрична стала;  $m$  - маса частинок речовини;  $\lambda$  - довжина світлової хвилі;  $k$  - стала Больцмана;  $T$  - абсолютна температура ( $^{\circ}\text{K}$ );  $\kappa$  - густина речовини.

Формула (16.7) не дає інформації про те, у якому агрегатному стані перебуває речовина – газоподібному, рідкому або твердому. Якщо речовина газоподібна або рідка, поворот анізотропних молекул під дією поля здійснюється легко. У твердій фазі цей процес утруднений, однак приблизно співвідношення (16.7) теж виконується. Можна розглядати отриману в такий спосіб величину  $K$  як її верхню межу.

Підставляючи у формулу (16.7) вхідні значення констант для кварцу, одержимо  $K = 0,402 \cdot 10^{-13} \text{ м/В}^2$ . Це значення  $K$  справедливо при  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ ;  $n = 1,5$ ;  $T = 293^\circ\text{К}$ . Величину сталої Керра для інших значень параметрів легко одержати шляхом перерахування.

Більші значення поперечного електричного поля можливі біля точки удару блискавки, поблизу високовольтної лінії електропередачі, а також при впливі електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху.

Якщо удар блискавки відбувається на відстані  $a$  від траси ОК, що прокладений на глибині  $h$ , то напруженість електричного поля поблизу кабелю при однорідній будові землі

$$E = \frac{I\rho}{2\pi(a^2 + h^2 + x^2)}, \quad (16.8)$$

де  $I$  - амплітуда струму блискавки;  $\rho$  - питомий опір землі. Якщо вісь координат  $x$  направити уздовж вісі кабелю, причому  $x=0$  - точка вісі  $x$ , найближча до точки удару блискавки на поверхні землі, вісь  $z$  - вертикально вниз, а вісь  $y$  - перпендикулярно вісям  $x$  і  $z$  (рис. 16.2), тоді поперечна кабелю складова поля визначається як

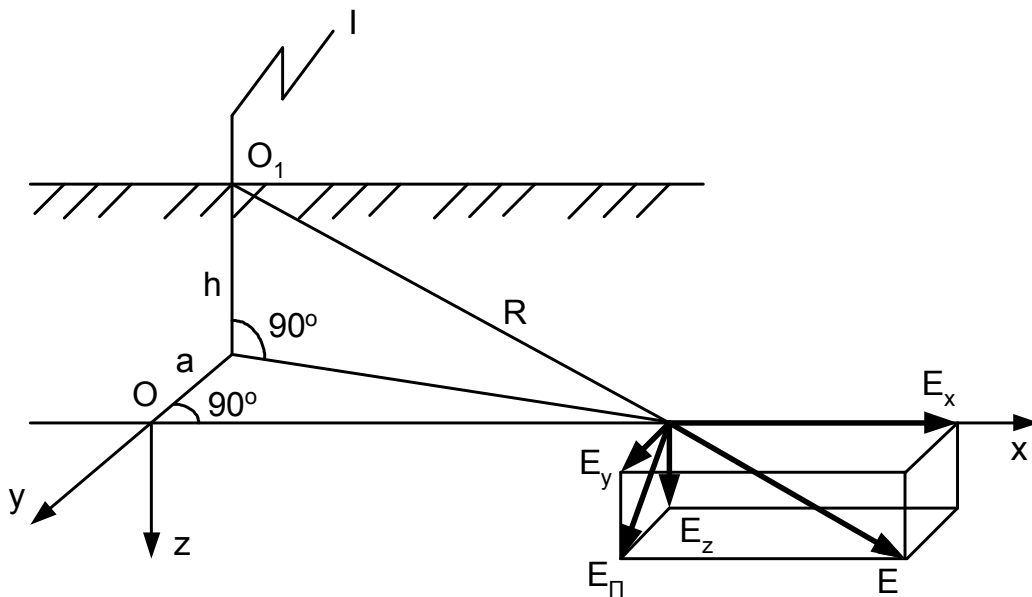


Рисунок 16.2 – Розташування кабелю

$$E_n = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = E \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2 + x^2}} = \frac{I\rho a}{2\pi(a^2 + h^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (16.9)$$

Зміна кута поляризації на довжині  $dl$  буде дорівнювати:

$$d\varphi = 2\pi K E_n^2(x) dx. \quad (16.10)$$

Оскільки вплив поля відбувається по обидві сторони від точки 0, в сторону як позитивних, так і негативних значень  $x$ , при інтегруванні слід



результат збільшити у два рази. Оскільки при інтегруванні слід припустити, що довжина кабелю  $L \gg h$ ,  $L \gg a$ ,  $a \gg h$ :

$$\varphi = 4\pi K \int_0^L E_{II}^2(x) dx = \frac{4\pi KI^2 \rho^2 a^2}{(2\pi)^2} \int_0^L \frac{dx}{(a^2 + h^2 + x^2)^3} \approx \frac{KI^2 \rho^2}{16a^3}, \quad (16.11)$$

адже  $\text{arctg} \frac{L}{\sqrt{a^2 + h^2}} \approx \frac{\pi}{2}$ .

Як видно з (16.11) при близьких ударах блискавки величина  $\varphi$  майже не залежить від довжини кабелю  $L$ , так як усі зміни  $\varphi$  відбуваються на довжині ОК, що безпосередньо знаходиться біля точки удару блискавки, тобто на декількох десятках чи сотнях метрів. Якщо  $I = 50$  кА,  $\rho = 1000$  Ом·м,  $K = 0,402 \cdot 10^{-13}$  м/В<sup>2</sup>, маємо  $\varphi \approx 20'$ . Таким чином, вплив блискавки викликає у ОК незначний ефект Керра.

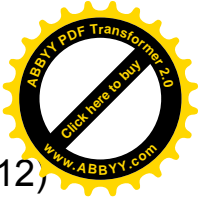
У випадку лінії електропередачі найбільшому впливу піддається кабель, що підвішений на опорах ЛЕП поблизу фазних дротів. Електричне поле залежить від відстані між дротами, кількості кіл, порядку слідування фаз і у середньому має величину 3...5 кВ/м. Довжина кабелю, що піддається впливу, може досягати довжини регенераційної ділянки, тобто декількох кілометрів. Тоді  $\varphi$  складе величину до 10...20°.

Поворот площини поляризації реально призведе до розділення хвилі, що передається на два взаємно перпендикулярні промені різної амплітуди, у відповідності з величиною кута  $\varphi$ , й до появи додаткового загасання. Якщо при ударі блискавки загасання, що вноситься за рахунок електричного поля мале та триває не більше декількох частинок секунди, то при дії високовольтної лінії воно істотне і триває постійно.

Найбільшу величину загасання ефект Керра дає при дії електромагнітного поля висотного ядерного вибуху. Амплітуда електричного поля біля поверхні землі може сягати величини у декілька десятків кВ/м на значній площі. Величина кута повороту площини поляризації у цьому випадку може становити десятки градусів. Чим більше довжина лінії, що знаходиться під впливом, тим сильніше буде додаткове загасання, а при довжині більш ніж 30 км передача сигналів буде неможлива. Після зникнення поля, вихідні властивості поля мають відновитися. Зважаючи на коротку тривалість процесу низькошвидкісної системи передачі, можливо не відчують цього впливу, тоді як високошвидкісні, з великою кількістю каналів, втратять частину інформації.

Ефект Фарадея базується на повороті площини поляризації світла під дією магнітного поля.

Під дією повздовжнього магнітного поля, тобто коли світло розповсюджується вздовж силових ліній магнітного поля, кут повороту  $\Psi$  площини поляризації визначається виразом



$$\Psi = V l_{nc} B, \quad (16.12)$$

де  $V$  – стала Верде;  $l_{nc}$  – довжина шляху, який проходить світло вздовж магнітних силових ліній;  $B$  – магнітна індукція у речовині.

Стала Верде залежить від роду речовини, його фізичного стану та довжини хвилі:

$$V = \frac{e}{8\pi m c} \cdot \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (16.13)$$

де  $e$  – заряд електрона;  $m$  – маса електрона;  $c$  – швидкість світла.

Похідну  $dn/d\lambda$  для кварцу можна знайти з відомої формули Селмейера для  $n = f(\lambda)$ . Наближені значення добутку  $\lambda \frac{dn}{d\lambda}$  для деяких значень  $\lambda$  наведені в табл. 16.3.

**Таблиця 16.3 – Значення добутку  $\lambda \frac{dn}{d\lambda}$**

$\lambda$ , мкм	0,85	1,3	1,55
$n(\lambda)$	1,452	1,447	1,444
$\lambda \frac{dn}{d\lambda}$	0,00987	0,0151	0,018

Так як  $B = \mu_0 \mu_r H$ , для кварцового скла одержимо

$$\Psi = f H l_{nc}, \quad (16.14)$$

де  $f = \frac{e \mu_0}{8\pi m c} \lambda \frac{dn}{d\lambda} = 2,94 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda \frac{dn}{d\lambda} \text{ рад/А} = 1,68 \cdot 10^{-3} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \text{ град/А } \mu_0$ ;  $H$  –

напруженість магнітного поля, А/м;  $\mu_0, \mu_r$  – абсолютна і відносна магнітна проникність.

Для  $\lambda = 1,55$  мкм вираз (16.14) буде мати вигляд:

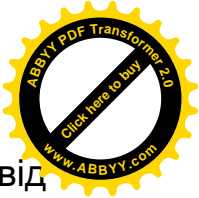
$$\Psi = 1,66 \cdot 10^{-5} l_{nc} H \text{ град}, \quad (16.15)$$

де  $H$  вимірюється в А/м, а  $l_{nc}$  – в м.

Загальна картина полів при ударі блискавки достатньо складна. Однак зрозумілий приблизний вид магнітного поля струму, що розтікається в землі поблизу ОК. Магнітні силові лінії мають форму окружності з центром на вісі, що проходить через точку удару блискавки перпендикулярно поверхні землі. Вектор  $H$  спрямований по дотичній до цієї окружності.

Якщо, як раніше направити вісь  $x$  по вісі кабелю і вважати, що удар блискавки відбувається на відстані  $a$  від траси ОК, а кабель прокладений поблизу поверхні землі, те складова поля  $H_x$ , що спрямована уздовж кабелю,

$$H_x = \frac{Ia}{2\pi(a^2 + x^2)}. \quad (16.16)$$



На глибині прокладки кабелю  $h$  величина поля відрізняється від поля поблизу поверхні. При імпульсах поля малої тривалості, з урахуванням як струмів провідності, так і струмів зсуву, приблизно можна прийняти, що поле на довільній глибині  $z$

$$H(z, t) = H_0 \left( t - z \sqrt{\mu_3 \varepsilon_3} \right) e^{-\gamma z}, \quad (16.17)$$

де  $H_0(t)$  - поле поблизу поверхні;  $\gamma = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_3}{\varepsilon_3}}$  - стала поширення поля в

землі;  $\mu_3, \varepsilon_3$  - магнітна й діелектрична проникність землі;  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  - питома провідність землі. Приблизно  $\gamma \approx 56\sigma$ , 1/м ( $\sigma$  вимірюється в 1/Ом·м). Запізнювання процесу в часі не має значення, тому на глибині  $h$  складова поля, що спрямована вздовж кабелю:

$$H_x = \frac{Ia}{2\pi(a^2 + h^2)} e^{-56\sigma h}. \quad (16.18)$$

На довжині  $dx$  відбувається поворот площини поляризації на кут  $d\Psi$ :

$$d\Psi = fH_x(x)dx. \quad (16.19)$$

В області зміни  $x$  від  $-L$  до 0 поле спрямоване у той самий бік, що і в області  $(0, L)$ , тому загальний поворот площини поляризації на довжині від  $x = -L$  до  $x = L$  складе:

$$\Psi = 2f \int_0^L H_x(x) dx = \frac{2fIa}{2\pi} e^{-56\sigma h} \int_0^L \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{fI}{\pi} e^{-56\sigma h} \operatorname{arctg} \frac{L}{a}. \quad (16.20)$$

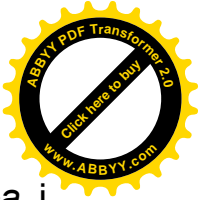
При  $L \gg a$  можна вважати, що  $\operatorname{arctg} \frac{L}{a} \approx \frac{\pi}{2}$ , тоді вираз (16.20) прийме

вид

$$\Psi = \frac{fI}{2} e^{-56\sigma h}. \quad (16.21)$$

При виводі формул (16.20) і (16.21) не враховане те, що на деякій глибині поблизу точки удару блискавки не весь струм бере участь у створенні поля уздовж кабелю, а тільки та його частина, що попадає в тілесний кут  $\theta$ . У середині цього кута перебуває розглянута ділянка ОК довжиною  $x$ . Тілесний кут визначається по формулі:

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{a^2 + x^2}{a^2 + h^2 + x^2}}. \quad (16.22)$$



Величина струму усередині цього кута  $I_\theta = I \frac{2\theta}{\pi}$ . Однак, при  $x \gg a$  і

$x \gg h$   $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ , а  $I_\theta \rightarrow I$ , тому помилка в (16.20) і (16.21) невелика.

Крім цього передбачалося, що швидкість поширення електромагнітної хвилі нескінченна. Малі розміри розглянутої області роблять це припущення також несуттєвим.

Оцінімо кількісно отримані результати. Вважаючи  $I = 50 \cdot 10^3$  А,  $\rho = 10^3$  Ом·м,  $h = 1$  м, з (16.21) знайдемо, що при  $\lambda = 1,55$  мкм кут  $\Psi = 0,392$  град.

Як видно з отриманого результату, величина  $\Psi$  при впливі магнітного поля струму блискавки досить незначна. У загальному випадку при ударі блискавки поворот площини поляризації відбувається одночасно під впливом як електричного, так і магнітного полів, однак обоє ці впливи створюють поворот  $\Psi$  у межах 1 град.

## 16.8 Вплив електричного поля

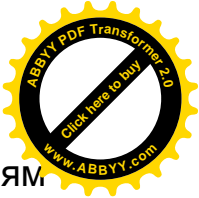
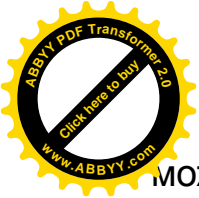
Всі елементи ОК (волокна, силові елементи, захисні трубки та гідрофобний заповнювач), що підвищується на опорах повітряних ліній зв'язку поблизу високовольтних ліній електропередачі піддаються впливу електричного поля. Фізично картина пошкодження полімерної оболонки ОК аналогічна картині пошкодження полімерної (склопластикової) ізоляції, яка застосовується на повітряних лініях електропередачі.

Як показує аналіз, поблизу вузла кріплення ОК до опори можуть виникати наступні види електричних розрядів:

- коронний розряд, обумовлений різкою неоднорідністю електричного поля у повітрі поблизу поверхні твердого вузла кріплення;
- поверхневий частковий дуговий розряд, зумовлений струмом витікання по забрудненій та зволоженій поверхні кабелю;
- ковзний розряд, зумовлений підсиленням напруженості електричного поля поблизу поверхні твердого діелектрика і наявністю нормальної складової напруженості поля;
- внутрішній частковий розряд, обумовлений підсиленням електричного поля у повітряних вмикаваннях в середині кабелю.

Найбільшу небезпеку для полімерної оболонки кабелю представляє поверхневий частковий дуговий розряд. Зволожений шар забруднення у процесі протікання по ньому струму нагрівається, нерівномірність забруднення та зволоження (волога стікає вниз) викликає нерівномірне підсушування. На підсушених ділянках поверхні ОК з'являються часткові дугові розряди. Дужки, спираючись на зволожений шар, підсушують його, розтягують і, досягнувши критичної довжини, гаснуть. Дужки, що перемежуються, можуть тривало існувати і на поверхні ОК, при цьому





можливе руйнування поверхні полімерної ізоляції з утворенням вуглевмісних шляхів-треків.

До небезпечних впливів на повітряні ВОЛЗ, в конструкції оптичних кабелів яких є металеві елементи, відносяться удари блискавки та наведення електрорушійної сили в металевих елементах кабелю під дією зовнішніх електромагнітних полів ЛЕП. Необхідність і заходи захисту повітряних ВОЛЗ від небезпечних впливів визначаються проектом.

До заходів захисту повітряних ВОЛЗ від небезпечних впливів відноситься заземлення металевих елементів конструкції ОК чи металевих канатів (дротів), на які підвішуються оптичні кабелі.

Металевий несучий елемент ОК типу "вісімки" заземлюється:

- при вводі у НРП;
- на опорах з муфтами, які віддалені від НРП на відстань 1 км та 2 км в кожний бік;
- на опорі з муфтою посередині ділянки НРП-НРП.

Заземлення несучого металевого каната (дроту) повітряних ВОЛЗ виконується на усіх кінцевих та кутових опорах, а на проміжних - у населених пунктах через кожні 250 м та поза межами населених пунктів через кожні 2 км.

Одним із способів захисту ОК від небезпечних впливів ЛЕП чи електрифікованих залізниць є спосіб заземлення його металевої захисної оболонки.

## 16.9 Трекінг – ефект

Трекінг-ефект виникає внаслідок забруднення або зволоження поверхні зовнішньої захисної оболонки ОК, що знаходиться в електричному полі. При зволоженні поверхні зовнішньої захисної оболонки (утворення крапель вологи на оболонці ОК) виникають розряди між краплинами. Аналогічні розряди виникають і при забрудненні поверхні зовнішньої оболонки ОК. Щільність та потужність цих розрядів залежить від ступеня зволоження та забруднення оболонки, а також від напруженості електричного поля. При щільному дощі, утворені ожеледі або ожеледиці та сильному забрудненні, на поверхні оболонки може виникати суцільний постійний розряд у вигляді протікання струму.

Теоретичний розгляд показав, що вектор електричної сили поля, що прикладений до ОК не перпендикулярний. Замість цього має місце дуже сильна складова цього вектору у напрямку ОК. Враховуючи низьку провідність оболонки ОК, виникаючий у результаті цього потенціал не може бути зменшеним.

При протіканні наведеного струму по розрядам виникає теплове розігрівання оболонки ОК. Найбільш це розігрівання відбувається у місці з'єднання ОК із затискачем. Внаслідок розігрівання оболонка ОК може плавитися, обгорати, а в наслідок цього виходить з ладу весь ОК. На

рис.16.3 наведено ОК, що вийшов з ладу за рахунок дії електричного поля.

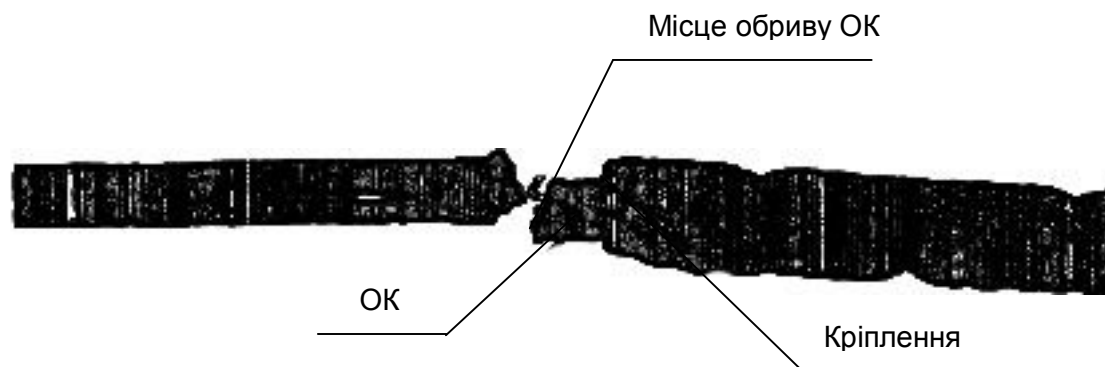


Рисунок 16.3 – Пошкодження ОК за рахунок дії електричного поля

Електричне стійкі та напівпровідникові оболонки (такі, що за рахунок спеціальних додатків частково проводять електричний струм і тим самим перешкоджають протіканню наведеного струму по поверхні оболонки) дозволяють досить успішно боротися з тренінг-ефектом, але їх застосування у комплексі з вибором розташування ОК на опорах обмежується напругою 110...150 кВ. Тому ці засоби захисту можливо використовувати на опорах КИЗ та розподільчих ЛЕП до 150 кВ.

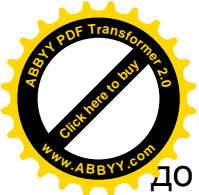
Дуже вагоме значення має місце розташування ОК на опорі. Вірно обране місце забезпечить найменший вплив (мінімальне значення напруженості електричного поля у місці де знаходиться ОК): тим самим полегшить умови роботи зовнішньої захисної оболонки і кабелю у цілому.

У даний час на ЛЕП 330 кВ для уникнення трекінг-ефекту застосовуються ОК типу OPGW, що вбудований у грозотрос. Але цей кабель має вартість у 1,2...2,5 разів більшу ніж повністю діелектричний ОК.

Необхідне також виконання спеціальних розрахунків напруженості електричного поля з метою визначення місця з найменшою напруженістю і необхідність застосування спеціальних заходів захисту ОК.

Температура у каналі часткового дугового розряду при струмі близько 1мА досягає 4000°K і росте при збільшенні струму. При такій температурі значна частина (більш ніж 50%) молекул кисню розпадається на атоми. Дифундуючи, атоми досягають поверхні полімерної ізоляції або безпосередньо, або у складі молекул озону, що легко розпадаються.

Окрім того, атоми кисню та азоту створюють окисли азоту, що на зволоженій поверхні дають агресивну азотну кислоту. Тому поверхня полімерної ізоляції зазнає впливу активних окислювачів, що призводить



до поступової зміни хімічного складу поверхні та збільшення поверхневої провідності на 5...6 порядків.

Отже стійкість полімерної ізоляції до впливу поверхневих часткових дугових розрядів залежить від її стійкості до впливу атомарного кисню і азотної кислоти. Найбільш стійкими матеріалами до цих впливів є фторопласт та різноманітні композиційні матеріали на його основі, а також різноманітні модифікації гуми.

Проте полімерної ізоляції цілком стійкої до впливу часткових дугових розрядів не існує. Завдання складається у зменшенні інтенсивності цих розрядів, для чого необхідно зменшувати струм витікання по поверхні забрудненого та зволоженого ОК.

Потрібно зважати на те, що атомарний кисень і азотна кислота утворюються у невеликій кількості також при коронному, ковзному та внутрішньому часткових розрядах. Тому вузол кріплення ОК повинен бути сконструйований так, щоб виключити коронний і ковзний розряди та звести до мінімуму інтенсивність внутрішнього часткового розряду.

Велику напруженість має магнітне поле біля поверхні землі при висотних ядерних вибухах. Тому мають місце дуже великі значення  $\Psi$ . Для точного розрахунку  $\Psi$  потрібно визначити області, де існує велика величина магнітного поля, визначити напрямок вектора поля, його залежність від питомого опору і геофізичної структури ґрунту, географічної широти місцевості та інших факторів.

При дуже коротких імпульсах електромагнітного поля висотного ядерного вибуху необхідно також врахувати спотворення імпульсу поля на глибині  $h$ .

Таким чином, як у випадку ефекту Керра, при ефекті Фарадея виникає подвійне променезаломлення і у кінцевому рахунку збільшується загасання оптичного волокна.

Інші відомі джерела електромагнітних полів, окрім блискавок, ліній електропередач та висотних ядерних вибухів, не можуть створити потужної напруженості електричних та магнітних полів на великій площині біля ОК

Розглянуті ефекти Керра та Фарадея показали, що при проектуванні та експлуатації мереж з ОК та з високошвидкісними системами передачі необхідно враховувати можливість збільшення загасання внаслідок дії зовнішніх електромагнітних полів, що також може привести до втрати інформації.

## **17 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТА ТЕХНІЧНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ**

При проведенні будівельно-монтажних робіт необхідно керуватися такими документами з охорони праці:

- ДНАОП 5.2.30-1.07;



- НАПБ В.01.001;
- “Санитарними нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров”;
- “Правилами охраны труда в лесной, деревообрабатывающей промышленности, лесном хозяйстве”;
- “Рекомендациями по безопасному проведению работ при вырубке, расчистке просек и заготовке столбов”;
- “Єдиними правилами безпеки при підливних роботах”;
- “Временными указаниями по защите персонала и сооружений связи и радиодификации на участках пересечения и сближения с линиями электропередачи 750 кВ”;
- “Правилами техники безопасности и производственной санитарии в хозяйстве сигнализации и связи железнодорожного транспорта (ЦШ/2729)”.

Всі робітники, зайняті на будівництві ЛС повітряних ВОЛЗ, повинні пройти медичний огляд та навчання безпечним методам ведення робіт, а також відповідним вимогам Правил дорожнього руху.

Забороняється робота безпосередньо під проводами, що знаходяться під напругою.

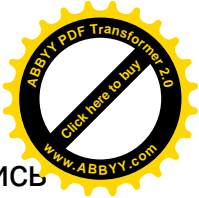
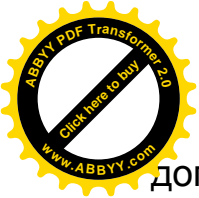
Робота вантажопідійомних машин поблизу лінії, що знаходиться під напругою, допускається в тому випадку, коли відстань по горизонталі від підійомної або висувної частини в будь-якому її положенні, при найбільш допущеному конструкцією підйомі або боковому вильоті до найближчого проводу, що знаходиться під напругою, буде не менш:

- 1,5 м – для лінії напругою до 1 кВ;
- 2,0 м - для лінії напругою від 1 до 20 кВ;
- 4,0 м - для лінії напругою від 35 до 110 кВ;
- 5,0 м - для лінії напругою від 150 до 220 кВ;
- 6,0 м - для лінії напругою до 330 кВ;
- 9,0 м – для лінії напругою до 500 кВ;
- 9,0 м – для лінії напругою (постійного струму) до 800кВ.

При проїзді під ЛЕП вантажопідійомні машини повинні знаходитись у транспортному положенні. Пересування машин поза дороги під дротами лінії, що знаходяться під напругою, слід виконувати не в місці, де дроти мають найбільше провисання, а ближче до опори.

На час виконання робіт з монтажу ОК встановлюються небезпечні зони, в межах яких постійно діють або потенційно можуть діяти небезпечні вірогідні фактори. В цих зонах забороняється знаходження сторонніх осіб, що не зайняті в технологічному процесі. До небезпечної зони відноситься смуга шириною в 10 м по обидва боки від піднятого канату - лідера або оптичного кабелю, а біля опори - ділянка в радіусі 10 м від проекції місця виконаних робіт.

При роботі машин та механізмів на гумовому ході в охоронній зоні ЛЕП, що знаходиться під напругою, вони повинні бути заземлені за



допомогою переносного заземлення. Заземлення повинно виконуватись за допомогою провідника перетином не менш 16 мм<sup>2</sup>.

При пересуванні машин та механізмів на гумовому ході в охоронній зоні ЛЕП, що знаходиться під напругою, вони обладнуються металевим ланцюгом, що торкається землі.

При розробці кінців ОК слід уникати попадання гідрофобного заповнювача на слизисту оболонку очей та відкрити ділянки тіла. Після виконання робіт необхідно руки протерти чистим бензином марки Б-70 (Галоша) і ретельно вимити з милом теплою водою.

При роботах з ОВ слід уникати випадків попадання його відходів на одяг. Роботи з ОВ потрібно виконувати у пластиковому фартусі.

Відходи ОВ після монтажних робіт необхідно збирати в окремий ящик, а після закінчення робіт звільнити ящик від відходів в окремо відведеному місці.

Обстежувати торець ОВ за допомогою збільшувальних приладів (мікроскопа або збільшувального скла) при ввімкнутих оптичних передавальних приладах забороняється.

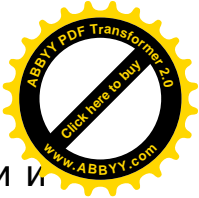
При монтажних та вимірювальних роботах треба не допускати прямого попадання в очі випромінювання з оптичного тестера (іншого приладу) або безпосередньо з ОВ, приєднаного до джерела випромінювання.

Забороняється монтаж ОК під час грози при наявності в його конструкції металевих елементів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

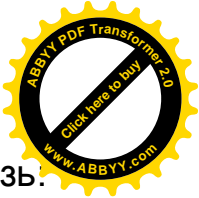
1. *Айфичер Э.С., Джервис Б.У.* Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 992 с.
2. *Бейли Д., Райт Э.* Волоконная оптика: теория и практика. – М.: Кудиц-образ, 2006. – 320 с.
3. *Верник С.М., Гитин В.Я., Иванов В.С.* Оптические кабели связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 144 с.
4. *Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хатате; Под ред. Т. Окоси. Пер. с япон. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990. - 256 с.*
5. *Волоконно-оптические кабели связи российского производства: Справочник / Воронцов А.С., Гурин О.И., Мифтяхетдинов С.Х., Никольский К.К., Питерских С.Э. – М.: Эко-Трендз, 2003. -284 с.*
6. *Волоконно-оптические системы связи на ГТС / Б.З. Берлин, А.С. Брискер, В.С. Иванов – М.: Радио и связь, 1994. – 149 с.*
7. *Временные* технические указания по прокладке, подвеске, монтажу, электрическим измерениям и эксплуатации однокоаксиального кабеля типа ВКПА. - М., 1976.



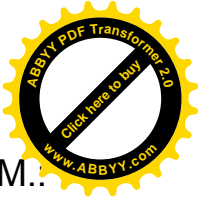


8. *Временные указания по защите персонала и сооружений связи и радиофикации на участках пересечения и сближения с линиями электропередачи 750 кВ.* - М.: Связь, 1980.
9. *Гауэр Дж.* Оптические системы связи / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
10. *Гринфилд Дэвид.* Оптические сети. – К.: ООО "ТИД "ДС", 2002. – 256 с.
11. *Гроднев И.И., Верник С.М.* Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.
12. *Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И.* Оптические кабели. Конструкции, характеристики, производство и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
13. *ДБН А.2.2-3-97.* Склад, порядок розроблення та затвердження проектної документації для будівництва.
14. *ДБН А.31-3-94.* Прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів. Основні положення.
15. *ДНАОП 5.2.30-1.07-96.* Правила безпеки при роботах на кабельних лініях зв'язку і проводового мовлення.
16. *ДСТУ 45.005-97.* Норми електричні на елементарні кабельні ділянки та кабельні секції аналогових і цифрових систем передачі.
17. *Єдині правила безпеки при підривних роботах, затверджені Держгіртехнаглядом України від 25.03.92 р.*
18. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика, компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. - 671 с.
19. *Иванов С.И., Коршунов В.Н., Ксенофонов С.Н.* Сборник упражнений и задач по волоконно-оптическим линиям связи. Учебное пособие. – М.: МЭИС, 1987. – 31 с.
20. *Инструкция по испытанию электрической прочности изоляции междугородных кабелей связи.* - М.: Радио и связь, 1984.
21. *Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В., Дащенко А.Ф., Усов А.В.* Волоконно-оптические кабели: Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация. – Одесса: Астропринт, 2000. – 536 с.
22. *Керівний документ з електричних вимірювань на кабельних лініях міжміського зв'язку.* - Київ, 1996.
23. *Керівний документ з прийняття в експлуатацію лінійних споруд зв'язку та проводового мовлення.* - Київ, 1997.
24. *Кириллов В.И.* Многоканальные системы передачи: Учебник / В.И. Кириллов. – 2-е изд. – М.: Новое знание. 2003. – 751 с.
25. *КНД 45-113-98.* Загасання в одномодовій волоконно-оптичній елементарній кабельній секції. Методики виконання вимірювань.
26. *КНД 45-141-99.* Керівництво щодо будівництва лінійних споруд волоконно-оптичних ліній зв'язку.

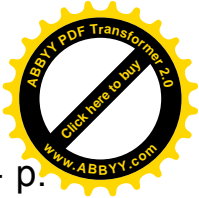




27. *Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М.* Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации / Пер. с фр. – М.: Мир, 1984. – 504 с.
28. *Конструкция*, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. – МСЭ-Т, Женева, 1994. – 161 с.
29. *Корнейчук В.И.* Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебное пособие. - Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. - 323 с.
30. *Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П.* Оптические системы передачи. – К.: Техника, 1994. – 393 с.
31. *Корнейчук В.И., Панфилов И.П.* Проектирование цифровых волоконно-оптических систем передачи. Ч.1: Расчет характеристик subsystem ВОСП. Методическое руководство по дипломному и курсовому проектированию. – Одесса, 1987. – 53 с.
32. *Косяченко Л.А.* Основи інтегральної та волоконної оптики: Навч. посіб. – Чернівці: Рута, 2008. – 348 с.
33. *Краткие* технические указания по ремонту шланговых оболочек кабелей. – М., 1975.
34. *Куприянов М.С., Матюшкин Б.Д.* Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 1999. – 592 с.
35. *Ларин Ю.Т., Рязанов И.Б.* Расчет параметров оптических кабелей. – М.: МЭИ, 1992. – 122 с.
36. *Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В.* Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАРарт, 2003. – 283 с.
37. *Макаров Т.В.* Волоконно-оптические линии передачи. Учебное пособие. ОЭИС им. А.С. Попова. – Одесса, 1990. – 99 с.
38. *Мальке Г., Гёссинг П.* Волоконно-оптические кабели. Основы. Проектирование кабелей. Планирование сетей. – Новосибирск: Издатель, 1997. – 264 с.
39. *МСЭ-Т.* Конструкции, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. – Женева, 1994.
40. *НАПБ В.01.001-98/5.2.00.* Правила пожежної безпеки в галузі зв'язку. Наказ Міністерства зв'язку України №28 від 04.02.1998 р.
41. *Общая* инструкция по строительству линейных сооружений ГТС. – М.: Радио и связь, 1978.
42. *Портнов Э.Л.* Оптические кабели связи: Конструкции и характеристики. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 232 с.
43. *Правила* по охране труда в лесной, деревообрабатывающей промышленности, лесном хозяйстве, утвержд. Министерством лесной и бум. пром. СССР, 1985.
44. *Правила* строительства и ремонта воздушных линий связи и радиотрансляционных сетей. Ч.1. – М.: Связь, 1975.
45. *Правила* техники безопасности и производственной санитарии в хозяйстве сигнализации и связи железнодорожного транспорта (ЦШ/2729), утвержд. МПС СССР 15.07.70.



46. *Правила* устройства электроустановок потребителей. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
47. *Прокис Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ./ Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.
48. Р 45-010-2002. Рекомендації з підвішування оптичних кабелів на опорах повітряних ліній зв'язку, ЛЕП, контактної мережі залізниць. Загальні положення. Загальні технічні характеристики та параметри оптичних кабелів для підвішування.
49. *Рекомендации* по безопасному проведению работ при вырубке, расчистке просек и заготовке столбов, утвержд. Минсвязи СССР, 1986.
50. *Розоринов Г.Н., Свяченый В.Д.* Устройства цифровой магнитной звукозаписи. – К.: Техніка, 1991. – 157 с.
51. *Розоринов Г.М., Соловйов Д.О.* Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. – К.: Ліра-К, 2007. – 198 с.
52. *Санитарные нормы и правила* устройства и эксплуатации лазеров. - М.: Минздрав СССР, 1982.
53. *Семенов А.Б.* Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
54. *Семейкин В.Д.* Волоконно-оптические линии связи. Учебное пособие. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. – 184 с.
55. *Скляр Бернارد.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 1104 с.
56. *Скляров О.К.* Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 272 с.
57. *СНиП 2.01.07 – 85.* Нагрузки и воздействия.
58. *Стеклов В.К., Беркман Л.Н.* Проектування телекомунікаційних мереж: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. за напрямком "Телекомунікації"/За ред. В.К. Стеклова. – К.: Техніка, 2002. – 797 с.
59. *Стерлинг Д. Дж. (мл.)* Волоконная оптика. Техническое руководство. Пер. с англ. – Изд. 2-е. - М.: Лори, 2001. – 304 с.
60. *Телекоммуникационные системы и сети:* Учебное пособие. В 3-х томах. Том 1 – Современные технологии / Б.И. Крук, В.Н. Попантонопуло, В.П. Шувалов / Под ред. проф. В.П. Шувалова. – Изд. 3-е, исп. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 647 с.
61. *Унгер Х.Г.* Планарные и волоконные оптические волноводы. – М.: Мир, 1980. – 656 с.
62. *Фокин В.Г.* Современные оптические системы передачи информации. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2004. – 207 с.
63. *Фриман Р.М.* Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ.- М.: Техносфера, 2003. – 447 с.
64. *Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф.* Цифровая обработка и передача речи / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радио и связь, 2000. – 456 с.
65. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы/ Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 541 с.



66. AMP CORELINK Splice Workstation 503605: Instruction Sheet. – p. 408-413.

67. *International Standard IEC 60794-1-1. Optical fibre cables- Part 1: Generic specification - General.* (Волоконно-оптичні кабелі Частина 1: Загальні технічні умови - Основні положення).

68. *International Standard IEC 60794-1-2. Optical fibre cables- Part 1-2: Generic specification - Basic optical cable test procedures.* (Волоконно-оптичні кабелі Частина 1-2: Загальні технічні умови - Основні методи випробування оптичних кабелів).

69. *International Standard IEC 60794-3. Optical fibre cables - Part 3: Duct, buried and aerial cables* (Волоконно-оптичні кабелі Частина 3: Кабелі для прокладання в каналах кабельної каналізації, в ґрунті і повітряні кабелі).

70. *International Standard IEC 60794-4-1. Optical fibre cables - Part 4-1: Aerial optical cables for high - voltage power lines* (Волоконно-оптичні кабелі - Частина 4-1: Повітряні волоконно-оптичні кабелі для високовольтних ліній електропередач).

71. *International Standard IEC 60885-1. Electrical test methods for electrical cables - Part 1: Electrical tests methods for cables, cords and wires for voltages up to and including 450/750 V* (Методи електричних випробувань для електричних кабелів. Частина 1: Електричні випробування кабелів, шнурів та проводів для напруг не більших від 450/750 В).

72. *Mahlke G., Gossing P. Fiber optic cables: fundamentals, cable engineering, systems planning.* – Berlin; Munchen: Siemens-Aktienges., 1993. – 244 p.

73. *Recommendation ITU-T G.651. Characteristics of a 50/125  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical fibre cable* (1997).

74. *Recommendation ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable.*

75. *Recommendation ITU-T K.25. Protection of optical fibre cable.*

76. *Recommendation ITU-T L.26. Optical fibre cables for aerial application.*

77. *Recommendation ITU-T L.34. Installation of Optical Fibre Ground Wire (OPGW) cable.*

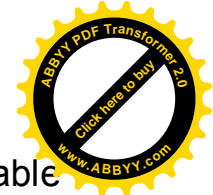
78. *Recommendation ITU-T G.651. Characteristics of a multimode gradient optical fibre cable* (1988).

79. *Recommendation ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* (11/2009).

80. *Recommendation ITU-T G.653. Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable* (07/2010).

81. *Recommendation ITU-T G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable* (1988).

82. *Recommendation ITU-T G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable* (11/2009).



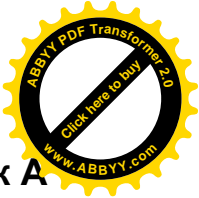
83. *Recommendation* ITU-T G.656. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport (07/2010).

84. *Recommendation* ITU-T G.657. Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network (11/2009).

85. *Refi J.J.* Fiber optic cable – A Light Guide, abcTeleTraining, Geneva, Ill, 1991, 207 p.

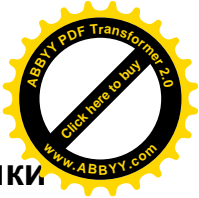
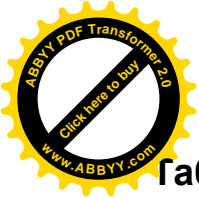
86. *User's Manual.* Fusion Splice FSU 925 RTC. Ericsson. 74ST009R1A. – 39 p.

87. *3M* 1992/93 Communications Produkts for Copper and Fiber Optic Networks Catalog // Austin, TX, 1992.



Таблиця А.1 – Рекомендовані ІТУ-Т G.652.А характеристики одномодових волокон і кабелів при бітових швидкостях передачі STM-16, STM-256, а також для ліній з швидкостями 10 Гбіт/с завдовжки до 40 км (Ethernet)

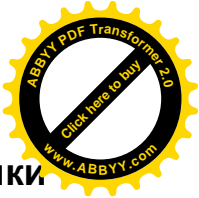
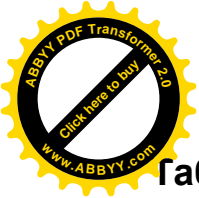
Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310
	Діапазон номінальних значень, мкм	8,6 – 9,5
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1260
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, Гпа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{0min}$ , нм	1300
	$\lambda_{0max}$ , нм	1324
	$S_{0max}$ , пС/нм <sup>2</sup> ·км	0,092
Характеристики оптичного кабелю		
Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання (Примітка 1)	Максимум при 1310 нм, дБ/км	0,5
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 2)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пС/√км	0,5
<b>Примітка 1.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, ІЕС 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.		
<b>Примітка 2.</b> Максимальне значення PMD <sub>Q</sub> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до PMD <sub>Q</sub> кабелю.		



## Таблиця А.2 – Рекомендовані ІТУ-Т G.652.В характеристики одномодових волокон і кабелів при підвищених бітових швидкостях передачі STM-64 і STM-256

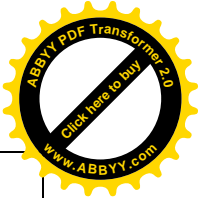
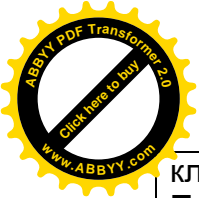
Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310
	Діапазон номінальних значень, мкм	8,6 – 9,5
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1260
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{0min}$ , нм	1300
	$\lambda_{0max}$ , нм	1324
	$S_{0max}$ , пс/нм <sup>2</sup> ·км	0,092
Характеристики оптичного кабелю		
Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання (Примітка 1)	Максимум при 1310 нм, дБ/км	0,4
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
	Максимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 2)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пс/√км	0,20
<b>Примітка 1.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, ІЕС 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.		
<b>Примітка 2.</b> Максимальне значення PMD <sub>Q</sub> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до PMD <sub>Q</sub> кабелю.		





**Таблиця А.3 – Рекомендовані ІТУ-Т G.652.C характеристики одномодових волокон і кабелів, що забезпечують передачу в частинах розширеного діапазону довжин хвиль 1360 – 1530 нм**

<b>Характеристики оптичного волокна</b>		
<b>Характеристика</b>	<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310
	Діапазон номінальних значень, мкм	8,6 – 9,5
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1260
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{0min}$ , нм	1300
	$\lambda_{0max}$ , нм	1324
	$S_{0max}$ , пс/нм <sup>2</sup> ·км	0,092
<b>Характеристики оптичного кабелю</b>		
<b>Характеристика</b>	<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Коефіцієнт загасання (Примітка 1)	Максимум від 1310 нм до 1625 нм, дБ/км (Примітка 2)	0,4
	Максимум при 1383±3 нм, дБ/км (Примітка 3)	0,4
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,3
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 4)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пс/√км	0,5
<p><b>Примітка 1.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Цей діапазон довжин хвиль може бути розширений до 1260 нм додаванням 0,07 дБ/км, викликаних втратами розсіяння Релея, до значення загасання при 1310 нм. В цьому випадку, довжина хвилі відсічення кабелю не повинна перевищувати 1250 нм.</p> <p><b>Примітка 3.</b> Середній коефіцієнт загасання на цій довжині хвилі повинен бути менше або рівний максимальному значенню, визначеному для діапазону 1310 - 1625 нм після водневого старіння. Водневе старіння є типовим випробуванням, якому піддається вибране оптичне волокно за IEC 60793-2-50, відповідне В1.3</p>		

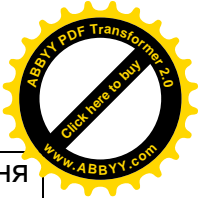
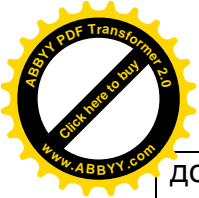


класу оптичного волокна.

**Примітка 4.** Максимальне значення  $PMD_Q$  для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до  $PMD_Q$  кабелю.

**Таблиця А.4 – Рекомендовані ITU-T G.652.D характеристики одномодових волокон і кабелів, аналогічні ITU-T G.652.B, що забезпечують передачу в частинах розширеного діапазону довжин хвиль 1360 – 1530 нм**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310
	Діапазон номінальних значень, мкм	8,6 – 9,5
	Допуск, мкм	$\pm 0,6$
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	$\pm 1$
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1260
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{0min}$ , нм	1300
	$\lambda_{0max}$ , нм	1324
	$S_{0max}$ , пс/нм <sup>2</sup> ·км	0,092
Характеристики оптичного кабелю		
Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання (Примітка 1)	Максимум від 1310 нм до 1625 нм, дБ/км (Примітка 2)	0,4
	Максимум при 1383 $\pm$ 3 нм, дБ/км (Примітка 3)	0,4
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,3
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 4)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум $PMD_Q$ , пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20
<p><b>Примітка 1.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Цей діапазон довжин хвиль може бути розширений до 1260 нм</p>		



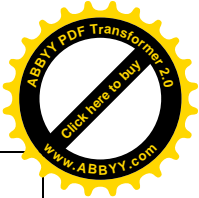
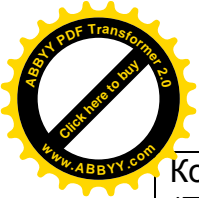
додаванням 0,07 дБ/км, викликаних втратами розсіяння Релея, до значення загасання при 1310 нм. В цьому випадку, довжина хвилі відсічення кабелю не повинна перевищувати 1250 нм.

**Примітка 3.** Середній коефіцієнт загасання на цій довжині хвилі повинен бути менше або рівний максимальному значенню, визначеному для діапазону 1310 - 1625 нм після водневого старіння. Водневе старіння є типовим випробуванням, якому піддається вибране оптичне волокно за IEC 60793-2-50, відповідне В1.3 класу оптичного волокна.

**Примітка 4.** Максимальне значення  $PMD_Q$  для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до  $PMD_Q$  кабелю.

**Таблиця А.5 – Рекомендовані ІТУ-Т G.653.A характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з мінімальним зсувом довжини хвилі, що зберігають оригінальний набір технічних вимог до коефіцієнта дисперсії. Ці волокна і кабелі придатні для систем з нерівномірними канальними інтервалами в області довжини хвилі 1550 нм**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550
	Діапазон номінальних значень, мкм	7,8 – 8,5
	Допуск, мкм	±0,8
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,8
Некруглість оболонки	Максимум, %	2,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1270
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,5
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{min}$ , нм	1525
	$\lambda_{max}$ , нм	1575
	$D_{max}$ , пс/нм·км	3,5
	$\lambda_{0min}$ , нм	1500
	$\lambda_{0max}$ , нм	1600
	$S_{0max}$ , пс/нм <sup>2</sup> ·км	0,085
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Максимум	(Примітка 1)
Характеристики оптичного кабелю		
Характеристика	Параметр	Значення



Коефіцієнт загасання (Примітка 2)	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пС/ $\sqrt{\text{км}}$	0,5

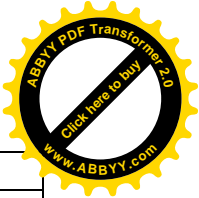
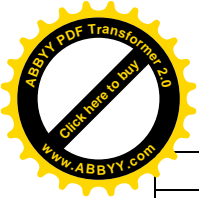
**Примітка 1.** Максимальне значення PMD<sub>Q</sub> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до PMD<sub>Q</sub> кабелю.

**Примітка 2.** Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.

**Таблиця А.6 – Рекомендовані ІТУ-Т G.653.В характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з мінімальним зсувом довжини хвилі та підвищеними вимогами до PMD ліній зв'язку довжиною більш 400 км і швидкостях передачі STM-64 і STM-256**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550
	Діапазон номінальних значень, мкм	7,8 – 8,5
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1270
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$D_{\min}(\lambda)$ : 1460-1525 нм, пС/нм·км	$0,085 \cdot (\lambda - 1525) - 3,5$
	$D_{\min}(\lambda)$ : 1525-1625 нм, пС/нм·км	$3,5/75 \cdot (\lambda - 1600)$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1460-1575 нм, пС/нм·км	$3,5/75 \cdot (\lambda - 1500)$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1460-1575 нм, пС/нм·км	$0,085 \cdot (\lambda - 1575) + 3,5$
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Максимум	(Примітка 1)

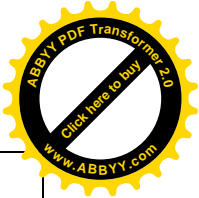
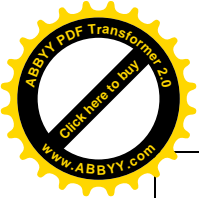
**Характеристики оптичного кабелю**



Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання (Примітка 3)	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пС/√км (Примітка 2)	0,20
<p><b>Примітка 1.</b> Максимальне значення PMD<sub>Q</sub> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до PMD<sub>Q</sub> кабелю.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Більші значення PMD<sub>Q</sub> (тобто, менші або рівні 0,5 пС/√км) можуть бути узгоджені для окремих застосувань між виробником і користувачем.</p> <p><b>Примітка 3.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.</p>		

**Таблиця А.7 – Рекомендовані ІТУ-Т G.655.C характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з ненульовим мінімальним зсувом довжини хвилі, що зберігають оригінальний набір технічних вимог до коефіцієнта дисперсії. Ці оптичні волокна мають негативну дисперсію і можуть використовуватися як ділянки ліній зв'язку з керованою дисперсією, наприклад, у підводних лініях**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550
	Діапазон номінальних значень, мкм	8 – 11
	Допуск, мкм	±0,7
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,8
Некруглість оболонки	Максимум, %	2,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1450
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,50
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії Діапазон довжин хвиль: 1530-1565 нм	λ <sub>min</sub> , λ <sub>max</sub> , нм	1530 и 1565
	Мінімальне значення D <sub>min</sub> , пС/нм·км	1,0
	Максимальне значення D <sub>max</sub> , пС/нм·км	10,0

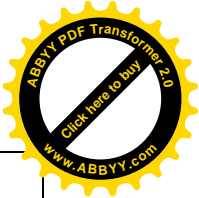
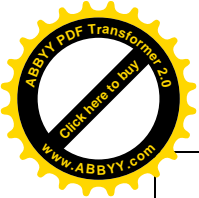


	Знак	Позитивний або негативний
	$D_{max} - D_{min}$ , пС/нм·км	$\leq 5,0$
Коефіцієнт хроматичної дисперсії Діапазон довжин хвиль: 1565-1625 нм	$\lambda_{min}, \lambda_{max}$ , нм	Визначається
	Мінімальне значення $D_{min}$ , пС/нм·км	Визначається
	Максимальне значення $D_{max}$ , пС/нм·км	Визначається
	Знак	Позитивний або негативний
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Максимум	(Примітка 1)
<b>Характеристики оптичного кабелю</b>		
<b>Характеристика</b>	<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Коефіцієнт загасання (Примітка 2)	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
	Максимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 3)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум $PMD_Q$ , пС/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20
<p><b>Примітка 1.</b> Максимальне значення <math>PMD_Q</math> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до <math>PMD_Q</math> кабелю.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.</p> <p><b>Примітка 3.</b> Більші значення <math>PMD_Q</math> (тобто, менші або рівні <math>0,5 \text{ пС}/\sqrt{\text{км}}</math>) можуть бути узгоджені для окремих застосувань між виробником і користувачем.</p>		

**Таблиця А.8 – Рекомендовані ІТУ-Т G.655.D характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з ненульовим мінімальним зсувом довжини хвилі. Вимоги до коефіцієнта хроматичної дисперсії визначені як пара обмежуючих кривих залежно від довжини хвилі для довжин хвиль від 1460 нм до 1625 нм. Для довжин хвиль понад 1530 нм дисперсія позитивна і значної величини, щоб пригнічувати більшість нелінійних спотворень. Для довжин хвиль менших 1530 нм дисперсія негативна, але оптичне волокно може використовуватися в CWDM системах при довжинах хвиль від 1471 нм і вище**

<b>Характеристики оптичного волокна</b>		
<b>Характеристика</b>	<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550



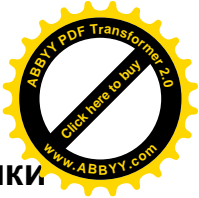
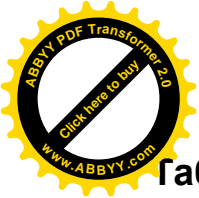


	Діапазон номінальних значень, мкм	8 – 11
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1450
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії Діапазон довжин хвиль: 1530-1565 нм	$D_{\min}(\lambda)$ : 1460-1550 нм	$\frac{7,00}{90}(\lambda - 1460) - 4,20$
	$D_{\min}(\lambda)$ : 1550-1625 нм	$\frac{2,97}{75}(\lambda - 1550) + 2,80$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1460-1550 нм	$\frac{2,91}{90}(\lambda - 1460) + 3,29$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1550-1625 нм	$\frac{5,06}{75}(\lambda - 1550) + 6,20$
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Максимум	(Примітка 1)
Коефіцієнт загасання (Примітка 2)	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
	Максимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 3)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум $PMD_Q$ , пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20

**Примітка 1.** Максимальне значення  $PMD_Q$  для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до  $PMD_Q$  кабелю.

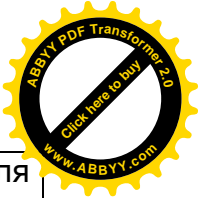
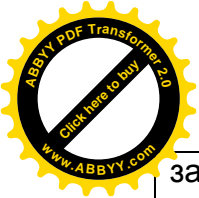
**Примітка 2.** Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.

**Примітка 3.** Більші значення  $PMD_Q$  (тобто, менші або рівні  $0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ ) можуть бути узгоджені для окремих застосувань між виробником і користувачем.



**Таблиця А.9 – Рекомендовані ІТУ-Т G.655.E характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з ненульовим мінімальним зсувом довжини хвилі. Вимоги до коефіцієнта хроматичної дисперсії, відповідають табл. А.8, але параметри мають більші значення, що важливе для систем з меншими канальними інтервалами. Для довжин хвиль понад 1460 нм дисперсія позитивна і ненульова**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550
	Діапазон номінальних значень, мкм	8 – 11
	Допуск, мкм	±0,6
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Макимум, мкм	0,6
Некруглість оболонки	Макимум, %	1,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Макимум, нм	1450
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Макимум при 1550 нм, дБ	0,1
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії Діапазон довжин хвиль: 1530-1565 нм	$D_{min}(\lambda)$ : 1460-1550 нм	$\frac{5,42}{90}(\lambda - 1460) + 0,64$
	$D_{min}(\lambda)$ : 1550-1625 нм	$\frac{3,30}{75}(\lambda - 1550) + 6,06$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1460-1550 нм	$\frac{4,65}{90}(\lambda - 1460) + 4,66$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1550-1625 нм	$\frac{4,12}{75}(\lambda - 1550) + 9,31$
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Макимум	(Примітка 1)
Коефіцієнт загасання (Примітка 2)	Макимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
	Макимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 3)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Макимум $PMD_Q$ , пС/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20
<b>Примітка 1.</b> Максимальне значення $PMD_Q$ для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до $PMD_Q$ кабелю.		
<b>Примітка 2.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні		

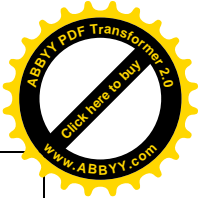
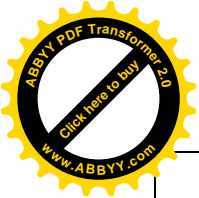


застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі, кабелі для внутрішньої установки і відвідні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.

**Примітка 3.** Більші значення  $PMD_Q$  (тобто, менші або рівні  $0,5 \text{ пС}/\sqrt{\text{км}}$ ) можуть бути узгоджені для окремих застосувань між виробником і користувачем.

**Таблиця 10 – Рекомендовані ITU-T G.656 характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів з ненульовим мінімальним зсувом довжини хвилі для широкосмугової передачі. Вимоги до коефіцієнта хроматичної дисперсії визначені як пара обмежуючих кривих залежно від довжини хвилі для довжин хвиль від 1460 нм до 1625 нм. Оптичні волокна і кабелі можуть використовуватися в CWDM і DWDM лініях зв'язку завдовжки до 2000 км і швидкостях передачі STM-64**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1550
	Діапазон номінальних значень, мкм	7,0 – 11,0
	Допуск, мкм	±0,7
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0
	Допуск, мкм	±1
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,8
Некруглість оболонки	Максимум, %	2,0
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1450
Втрати на вигинах	Радіус, мм	30
	Число вигинів	100
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,50
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69
Коефіцієнт хроматичної дисперсії (Примітка 1)	$D_{\min}(\lambda)$ : 1460-1550 нм, пС/нм·км	$\frac{2,60}{90}(\lambda - 1460) + 1,00$
	$D_{\min}(\lambda)$ : 1550-1625 нм, пС/нм·км	$\frac{0,98}{75}(\lambda - 1550) + 3,60$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1460-1550 нм, пС/нм·км	$\frac{4,68}{90}(\lambda - 1460) + 4,60$
	$D_{\max}(\lambda)$ : 1550-1625 нм, пС/нм·км	$\frac{4,72}{75}(\lambda - 1550) + 9,28$
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) для некабельного волокна	Максимум	(Примітка 2)

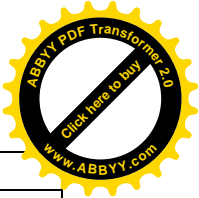
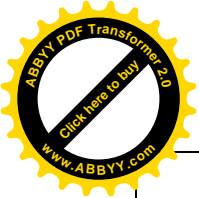


### Характеристики оптичного кабелю

Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання (Примітка 3)	Макимум при 1460 нм, дБ/км	0,4
	Макимум при 1550 нм, дБ/км	0,35
	Макимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Макимум PMD <sub>Q</sub> , пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20
<p><b>Примітка 1.</b> Якщо раманівське накачування використовується за межами цього діапазону довжин хвиль, то властивості оптичного волокна повинні бути відповідними для забезпечення цього накачування.</p> <p><b>Примітка 2.</b> Максимальне значення PMD<sub>Q</sub> для некабельного оптичного волокна визначене для того, щоб встановити початкові вимоги до PMD<sub>Q</sub> кабелю.</p> <p><b>Примітка 3.</b> Значення коефіцієнта загасання, показані в даній таблиці не повинні застосовуватися до коротких кабелів, таких як сполучні кабелі. Наприклад, b-IEC 60794-2-11 визначає коефіцієнт загасання кабелю для внутрішньої установки як 1,0 дБ/км або менш, при 1310 нм і при 1550 нм.</p>		

**Таблиця А.11 - Рекомендовані ІТУ-Т G.657, клас А параметри, що забезпечують оптимізовану установку мережі доступу по відношенню до втрат на вигинах, а інші параметри задовольняють ІТУ-Т G.652.D. Цей клас має два підкласи з різними вимогами до втрат на вигинах: ІТУ-Т G.657.A1 і ІТУ-Т G.657.A2**

Характеристики оптичного волокна						
Характеристика	Параметр	Значення				
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310				
	Діапазон номінальних значень, мкм	8,6 – 9,5				
	Допуск, мкм	±0,4				
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0				
	Допуск, мкм	±0,7				
Неконцентричність серцевини	Макимум, мкм	0,5				
Некруглість оболонки	Макимум, %	1,0				
Довжина хвилі відсічення кабелю	Макимум, нм	1260				
Втрати на вигинах для некабельного волокна (Примітки 1, 2)		ІТУ-Т G.657.A1		ІТУ-Т G.657.A2		
	Радіус, мм	15	10	15	10	7,5
	Число вигинів	10	1	10	1	1
	Макимум при 1550	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5



	нм, дБ					
	Максимум при 1625 нм, дБ	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69				
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	$\lambda_{0min}$ , нм	1300				
	$\lambda_{0max}$ , нм	1324				
	$S_{0max}$ , пС/нм <sup>2</sup> ·км	0,092				

**Характеристики оптичного кабелю**

Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання	Максимум від 1310 до 1625 нм, дБ/км (Примітка 3)	0,4
	Максимум при 1383±3 нм, дБ/км (Примітка 4)	0,4
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,3
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD)	M, кабелів	20
	Q, %	0,01
	Максимум PMD <sub>Q</sub> , пС/ $\sqrt{\text{км}}$	0,20

**Примітка 1.** Оптичне волокно по ІТУ-Т G.652 при радіусі вигину 15 мм як правило може мати втрати на вигинах декілька дБ на 10 вигинів при довжині хвилі 1625 нм.

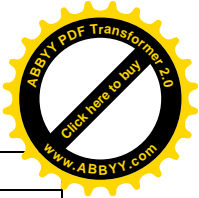
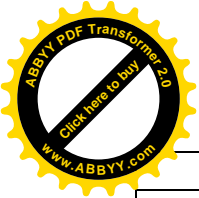
**Примітка 2.** Втрати на вигинах можуть бути розраховані за допомогою методу намотувального облямовування (метод А по ІЕС 60793-1-47), підставляючи радіус вигину і число вигинів, вказаних в даній таблиці.

**Примітка 3.** Цей діапазон довжин хвиль може бути розширений до 1260 нм додаванням 0,07 дБ/км, викликаних втратами розсіяння Релея, до значення загасання при 1310 нм. В цьому випадку, довжина хвилі відсічення кабелю не повинна перевищувати 1250 нм.

**Примітка 4.** Середня величина загасання на вибраній довжині хвилі повинна бути менше або рівна максимальному значенню, вказаному для даного діапазону від 1310 до 1625 нм після водневого старіння, відповідно до b-ІЕС 60793-2-50 для класу оптичних волокон В1.3.

**Таблиця 12 – Рекомендовані ІТУ-Т G.657, клас В параметри, що забезпечують оптимізовану установку мережі доступу по відношенню до втрат на вигинах, а інші параметри задовольняють ІТУ-Т G.652. D. Цей клас має два підкласи з різними вимогами до втрат на вигинах: ІТУ-Т G.657.A1 и ІТУ-Т G.657.A2**

Характеристики оптичного волокна		
Характеристика	Параметр	Значення
Діаметр модового поля	Довжина хвилі, нм	1310
	Діапазон номінальних значень, мкм	6,3 – 9,5



	Допуск, мкм	±0,4					
Діаметр оболонки	Номінальне значення, мкм	125,0					
	Допуск, мкм	±0,7					
Неконцентричність серцевини	Максимум, мкм	0,5					
Некруглість оболонки	Максимум, %	1,0					
Довжина хвилі відсічення кабелю	Максимум, нм	1260					
Втрати на вигинах для некабельного волокна (Примітки 1, 2)		<b>ITU-T G.657.B2</b>			<b>ITU-T G.657.B3</b>		
	Радіус, мм	15	10	7,5	10	7,5	5
	Число вигинів	10	1	1	1	1	1
	Максимум при 1550 нм, дБ	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15
	Максимум при 1625 нм, дБ	0,1	0,2	1,0	0,1	0,25	0,45
Умовна межа текучості	Мінімум, ГПа	0,69					
Коефіцієнт хроматичної дисперсії (Примітка 3)		Визначається					

#### Характеристики оптичного кабелю

Характеристика	Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання	Максимум при 1310 нм, дБ/км	0,5
	Максимум при 1550 нм, дБ/км	0,3
	Максимум при 1625 нм, дБ/км	0,4
Коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії (PMD) (Примітка 4)		Визначається

**Примітка 1.** Втрати на вигинах можуть бути розраховані за допомогою методу намотувального облямовування (метод А по IEC 60793-1-47), підставляючи радіус вигину і число вигинів, вказаних в даній таблиці.

**Примітка 2.** Хоча початкові вимоги при проявах вигинів можуть бути встановлені для некабельних волокон, існуючі конструкції і матеріали кабельних конструкцій можуть вносити зміни до кінцевого результату. Вивчення ефектів вигинів кабелів продовжується і будь-який результат змінюватиме існуючі вимоги до їх параметрів в майбутньому.

**Примітка 3.** Коефіцієнти хроматичної дисперсії не мають істотного значення, оскільки клас В оптичних волокон підтримує частину оптимізованої установки мережі доступу з дуже малими радіусами вигину.

**Примітка 4.** Коефіцієнти поляризаційної модової дисперсії не мають істотного значення, оскільки клас В оптичних волокон підтримує частину оптимізованої установки мережі доступу з дуже малими радіусами вигину.







## Додаток В ОДИНИЦІ ЧАСУ, ДОВЖИНИ ТА ЧАСТОТИ

Таблиця В.1 - Одиниці часу, похідні від секунди

Одиниці	Найменування
1 мс = $10^{-3}$ с	мілісекунда
1 мкс = $10^{-6}$ с	мікросекунда
1 нс = $10^{-9}$ с	наносекунда
1 пс = $10^{-12}$ с	пікосекунда
1 фс = $10^{-15}$ с	фемтосекунда

Таблиця В.2 - Одиниці довжини, похідні від метра

Одиниці	Найменування
1 Мм = $10^6$ м	мегаметр
1 км = $10^3$ м	кілометр
1 м = 1 м	метр
1 дм = $10^{-1}$ м	дециметр
1 см = $10^{-2}$ м	сантиметр
1 мм = $10^{-3}$ м	міліметр
1 мкм = $10^{-6}$ м	мікрометр
1 нм = $10^{-9}$ м	нанометр

Таблиця В.3 - Одиниці частоти, похідні від герца

Одиниці	Найменування
1 кГц = $10^3$ Гц	кілогерц
1 МГц = $10^6$ Гц	мегагерц
1 ГГц = $10^9$ Гц	гігагерц
1 ТГц = $10^{12}$ Гц	терагерц

## Додаток Г ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦОВОГО СКЛА

Таблиця Г.1 - Характеристики кварцового скла

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Щільність $\gamma$	г/см <sup>2</sup>	2,20
Модуль Юнга $E$ (модуль продольної пружності)	Н/мм <sup>2</sup>	72900
Модуль зсуву $G$	Н/мм <sup>2</sup>	33000
Коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha$	К <sup>-1</sup>	$5,5 \cdot 10^{-7}$



## Додаток Д ТАБЛИЦІ ПЕРЕВОДУ

Таблиця Д.1 - Одиниці довжини

Одиниця виміру	Метр	Дюйм	Фут	Ярд	Кілометр	Миля
1 метр	1	39,3701	3,2808	1,0936	0,001	
1 дюйм	0,0254	1	0,0833	0,0278		
1 фут	0,3048	12	1	0,3333		
1 ярд	0,9144	36	3	1		
1 кілометр	1000				1	0,6214
1 миля	1600				1,6093	1

Таблиця Д.2 - Одиниці площі

Одиниця виміру	Квадратний метр	Квадратний дюйм	Квадратний фут
1 кв. метр	1	1550	10,7639
1 кв. дюйм	$0,6452 \cdot 10^{-3}$	1	$6,9444 \cdot 10^{-3}$
1 кв. фут	0,0929	144	1

Таблиця Д.3 - Одиниці об'єму

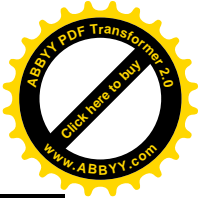
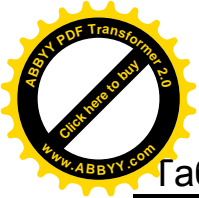
Одиниця виміру	Кубічний дециметр або літр	Кубічний дюйм	Американський галон
1 куб. дм = 1 л	1	61,0237	0,2642
1 куб. дюйм	0,0164	1	$4,3290 \cdot 10^{-3}$
1 ам. галон	3,7854	230,9991	1

Таблиця Д.4 - Одиниці швидкості

Одиниця виміру	Метр за секунду	Кілометр за годину	Миля за годину	Фут за секунду
1 м/с	1	3,6	2,2369	3,2808
1 км/г	0,2778	1	0,6214	0,9113
1 миля/г	0,4470	1,6093	1	1,4667
1 фут/с	0,3048	1,0973	0,6818	1

Таблиця Д.5 - Одиниці маси

Одиниця виміру	Кілограм	Фунт	Унція
1 кг	1	2,2046	35,274
1 фунт	0,4536	1	16
1 унція	$28,3495 \cdot 10^{-3}$	0,0625	1



Таблиця Д.6 - Одиниці маси на довжину

Одиниця виміру	Кілограм на кілометр	Текст	Деньє	Фунт на 1000 футів
1 кг/км	1	$10^3$	$9 \cdot 10^3$	0,671969
1 текс	$10^{-3}$	1	9	$0,6720 \cdot 10^{-3}$
1 деньє	$0,1111 \cdot 10^{-3}$	0,1111	1	$74,6631 \cdot 10^{-6}$
1 фунт/кілофут	1,488164	1488,164	13393,48	1

Таблиця Д.7 - Одиниці тиску

Одиниця виміру	Ньютон на кв. міліметр	Фунт-сили на кв. дюйм
1 Н/мм <sup>2</sup> = 1 МПа	1	145,038
1 фунт-сила/кв. дюйм	$6,8948 \cdot 10^{-3}$	1
Інші одиниці: 1 Па = 1 Н/м <sup>2</sup> = $10^{-6}$ Н/мм <sup>2</sup> = $10^{-5}$ бар		

Таблиця Д.8 - Одиниці сили

Одиниця виміру	Ньютон	Кілограм-сила	Фунт-сила
1 Н	1	0,101972	0,22481
1 кгс	9,80665	1	2,20462
1 фунт-сила	4,44822	0,45362	1

Таблиця Д.9 - Одиниці потужності

Одиниця виміру	Ватт	Кілокалорія за годину	Британська тепла одиниця за годину
1 Вт	1	0,8598	3,4121
1 ккал/г	1,163	1	3,9683
1 бр.тепл.од/г	0,2931	0,2520	1

Таблиця Д.10 - Одиниці роботи, енергії

Одиниця виміру	Кілоджоуль	Кілокалорія	Британська тепла одиниця
1 кДж	1	0,2388	0,9478
1 ккал	4,1868	1	3,9683
1 бр.тепл.од	1,0551	0,2520	1

Таблиця Д.11 - Одиниці температури

Одиниця виміру	Градус Цельсія	Градус Фаренгейта
Т°С	1	$T^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \cdot (T^{\circ}\text{F} - 32)$
Т°F	$T^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \cdot T^{\circ}\text{C} + 32$	1