

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки

«Затверджую»
Зав. кафедри теоретичної та
прикладної системотехніки
_____ д.т.н., проф. С. І. Шматков
«___» грудня 2023 р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **«МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ ЗА
НАЯВНОСТІ ХРОМАТИЧНОЇ ДИСПЕРСІЇ»**

Захищено на засіданні
Атестаційної комісії № 40
протокол № __ від __.12.2023 р.
Оцінка ____ / ____
Голова Атестаційної комісії
_____ **СКОБ Ю. О.**

Виконав:

студент 2 курсу, групи КІ– 61
за спеціальністю 123 – Комп'ютерна
інженерія.

Галузь знань: 12 – Інформаційні
технології

КОРОВІН Марко Ігорович _____

Керівник: д.т.н., професор кафедри
теоретичної та прикладної
системотехніки

ДОЛЯ Григорій Миколайович _____

Рецензент: д.т.н., професор кафедри
безпеки інформаційних систем і
технологій

ЄСІН Віталій Іванович _____

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до магістерської атестаційної роботи складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 80 сторінок, із яких 63 сторінки основної частини з 42 рисунками, 7 таблиць, 22 найменуваннями списку використаних джерел та чотирьома додатками.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка імітаційної моделі ВОЛЗ за умов хроматичної дисперсії та дослідження якості передачі даних.

Об'єкт дослідження – Фізичні процеси розповсюдження лазерних імпульсів у світловодах за умови хроматичної дисперсії та їх моделювання.

Предмет дослідження – Вплив хроматичної дисперсії в волоконно оптичних лініях зв'язку на їхню ефективність роботи.

Проблема, яка вирішується в кваліфікаційній роботі, полягає в тому, щоб розробити ефективну імітаційну модель, що дозволить детально вивчати вплив хроматичної дисперсії на параметри оптоволоконних ліній зв'язку.

Область застосування — оптоінформатика. Застосування в освітніх цілях у рамках курсу "Оптоінформатика" для візуалізації ефектів хроматичної дисперсії та дослідження закономірностей проходження лазерних променів в оптоволоконних лініях зв'язку.

Ключові слова: Волоконно-оптичні лінії зв'язку, Хроматична дисперсія, Коефіцієнт бітових помилок (BER), Світловий імпульс, Комп'ютерне моделювання.

ABSTRACT

The explanatory note to the master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references and four appendices. The total volume of the work is 80 pages, including 63 pages of the main part with 42 figures, 7 tables, 22 references and four appendices.

The purpose of the qualification work is to develop a simulation model of a fiber optic line under conditions of chromatic dispersion and to study the quality of data transmission.

Object of research - Physical processes of laser pulse propagation in light guides under the condition of chromatic dispersion and their modeling.

The subject of the study - The influence of chromatic dispersion in fiber optical communication lines on their performance.

The problem solved in the qualification work is to develop an effective simulation model that will allow for a detailed study of the effect of chromatic dispersion on the parameters of fiber optic communication lines.

The field of application is optoinformatics. Application for educational purposes in the course "Optoinformatics" for visualization of chromatic dispersion effects and study of the regularities of laser beams in fiber optic communication lines.

Keywords: *Fiber optic communication lines, Chromatic dispersion, Bit error rate (BER), Light pulse, Computer modeling.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1.....	9
ПРИНЦИПИ ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ВОЛОКОННО ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ	9
1.1 Загальносистемні відомості.....	9
1.1.1 Структура оптичного волокна. Устрій світловода	13
1.1.2 Типи оптоволокна	27
1.2 Обчислення коефіцієнту бітових помилок BER у волоконно оптичних комунікаційних системах	41
Висновки за розділом 1	42
РОЗДІЛ 2.....	44
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХРОМАТИЧНОЇ ДИСПЕРСІЇ НА ТРИВАЛІСТЬ ВИХІДНОГО ІМПУЛЬСУ	44
2.1 Визначення хроматичної дисперсії	44
2.2 Технологія компенсації дисперсності волокон	53
Висновки за розділом 2	56
РОЗДІЛ 3.....	58
РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У СВІТЛОВODІ ІЗ ЗАДАНИМ ПРОФІЛЕМ.....	58
3.1 Вибір мови програмування та середовища розробки.....	58
3.2 Методика розрахунків	59
Висновки за розділом 3	62
РОЗДІЛ 4.....	63
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	63
Висновки за розділом 4	65
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТКИ.....	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВС - волоконний світловод.

ОВ - оптичне волокно.

BER (англ. bit error rate) - коефіцієнт бітових помилок.

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку.

WDM – (англ. wavelength division multiplexing) - мультиплексування з поділом по довжині хвилі.

CWDM - (англ. coarse wavelength division multiplexing) - грубе мультиплексування з поділом по довжині хвилі.

DWDM – (англ. dense wavelength-division multiplexing) - щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі.

EDFA – (англ. erbium doped fiber amplifier) - волоконний підсилювач, легований сполуками ербію.

FTTx – (англ. fiber to the “x”) - волокно до "x".

PONs – (англ. passive optic networks) – пасивні оптичні системи.

ЛД – лазерний діод.

СІД - світловипромінювальний діод.

NA – (англ. numerical aperture) – числова апертура.

SI - (англ. step index) – ступінчастий індекс.

GI - (англ. graded index) - градуйований індекс.

IEC - (англ. international electrotechnical commission) - міжнародна електротехнічна комісія.

EF - (англ. encircled flux) - окружний потік.

MFD - (англ. mod diameter field) - діаметр поля моди.

IOR - (англ. index of refraction) - показник заломлення.

DCF – (англ. dispersion compensation fiber) – волокно компенсуюче дисперсію.

FBG – (англ. fiber Bragg grating) - волоконна решітка Брегга.

ВСТУП

Однією з найважливіших складових частин комп'ютерної інженерії є сучасні та перспективні системи передачі інформації. Сучасний світ насичений обміном інформацією, і це стало ключовою складовою нашого повсякденного та професійного життя. Необхідність ефективної передачі даних зумовила розробку високошвидкісних і надійних систем комунікації та інфраструктури. Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) грають ключову роль у задоволенні цих потреб, дозволяючи передавати великі обсяги даних на великі відстані з вражаючою швидкістю і надійністю.

Актуальність проблеми хроматичної дисперсії в оптичних волоконних лініях зв'язку стає особливо нарізною у зв'язку із зростанням вимог до передачі даних в сучасному інформаційному суспільстві. Введення волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) в комунікаційні системи визначеною мірою є стратегічним кроком для вирішення потреб у високошвидкісній та надійній передачі даних на великі відстані. Хроматична дисперсія, яка характеризує залежність групової швидкості сигналу від довжини хвилі, виникає як ключовий фактор, що обмежує збільшення пропускної спроможності ВОЛЗ та впливає на їхню швидкість передавання даних. Збільшення пропускної здатності є важливим завданням у зв'язку з зростанням обсягу передаваної інформації, особливо в контексті високовимірних мультимедійних даних, великих файлів та інших вимог сучасних додатків та послуг.

Існуючі обмеження, пов'язані з хроматичною дисперсією, можуть призвести до розширення оптичного імпульсу та зменшення швидкості передачі даних, що стає чинником, що обмежує ефективність волоконно-оптичних ліній зв'язку. Отже, вирішення проблем хроматичної дисперсії є критично важливим для подальшого розвитку та оптимізації ВОЛЗ, забезпечуючи найвищу можливу швидкість та ефективність передачі даних у сучасних мережах зв'язку.

Наступним важливим кроком є зниження втрат під час передачі сигналу. Коефіцієнт помилок (BER) являє собою кількісну міру збереження даних і

визначається як імовірність того, що переданий біт буде інтерпретований помилково. Менший коефіцієнт помилок вказує на більш ефективну роботу системи. У реальних умовах вимірювання BER у системі зв'язку включають передачу певної кількості бітів і підрахунок помилково інтерпретованих бітів під час прийому. Коефіцієнт помилок оцінюється як відношення числа помилково інтерпретованих бітів до загального їх числа. Точність оцінки збільшується зі збільшенням загального числа переданих бітів, прагнучи до нескінченності.

Метою даної дипломної роботи є розробка моделі поширення лазерних променів у багатомодовому волокні з метою поліпшення розуміння та оптимізації систем передавання даних в оптичних мережах.

Мета дослідження включає наступні завдання:

- Провести аналіз властивостей оптоволокна та його характеристик.
- Дослідити вплив факторів на якість передачі інформації в оптоволоконних кабелях.
- Аналізувати розрахунок помилок, які можуть виникнути під час передачі даних по оптоволоконним кабелям.
- Розробити імітаційну модель для вивчення поширення лазерних променів у багатомодовому оптоволокні з визначеним профілем.
- Оцінити результати передачі даних по оптоволоконному кабелю та виміряти величину допустимих помилок.

РОЗДІЛ 1.

ПРИНЦИПИ ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ВОЛОКОННО ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Загальносистемні відомості

До 1980-х років оптоволоконна технологія не могла досягти такого розвитку, який дозволив би їй стати комерційно вигідним рішенням для зв'язку. Однак міжнародні стандарти зв'язку, що розвивалися, вимагали дуже високої швидкості передачі даних. Традиційні кабельні, мікрохвильові та супутникові технології могли надавати необхідну пропускну здатність, але у них були обмеження щодо максимальних швидкостей передачі даних. Оптоволоконні системи здатні подолати ці обмеження та забезпечити величезну продуктивність, що сприяє розвитку міжнародних телекомунікацій та "стисканню планети". Очевидно, що оптоволоконна технологія має великий потенціал і стане основним засобом передачі інформації у майбутньому. Інтернет, яким ми його знаємо сьогодні, став можливим завдяки цій технології. Проте, важливо пам'ятати, що оптоволоконні системи мають свої обмеження і виклики, які слід подолати.

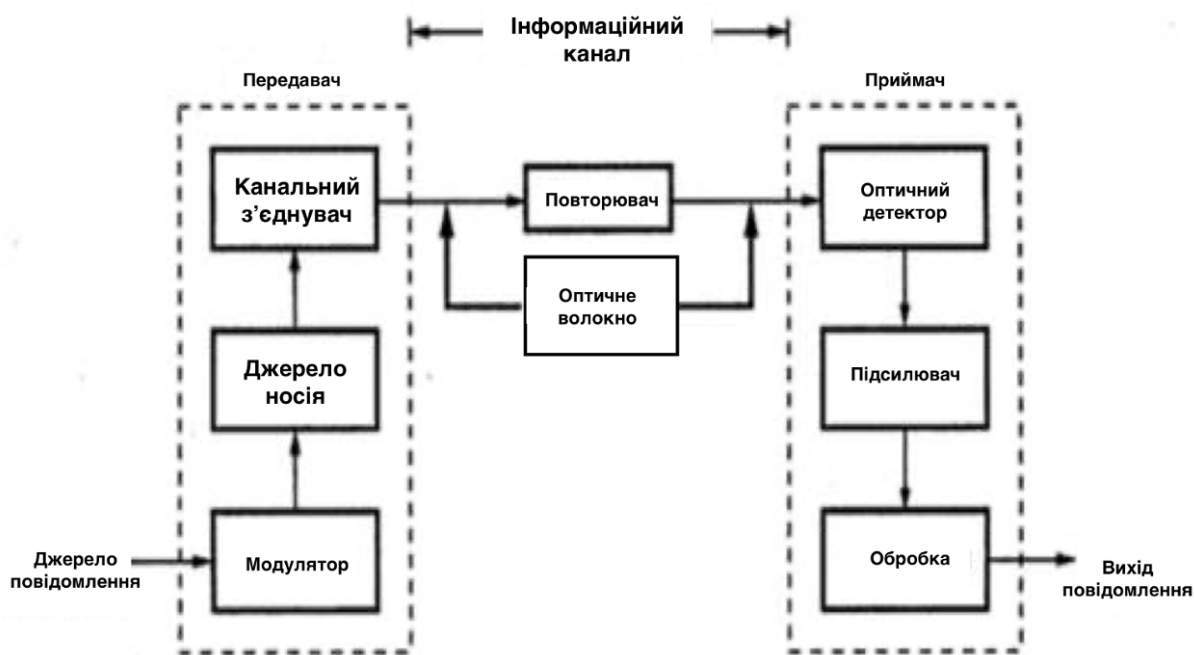


Рис. 1.1. Блок-схема системи оптико-волоконного зв'язку.

На (Рис. 1.1) представлена блок-схема типової системи оптико-волоконного зв'язку.

Походження повідомлення: Зазвичай, сигнал для передачі в мережі починається як неелектричне повідомлення, яке потрібно перетворити на електричний сигнал. В якості прикладу можна навести пристрої для перетворення звукових хвиль в електричний струм, такі як мікрофони, або пристрої для перетворення зображення в електричний струм, як відеокамери (телевізори). При передачі даних між комп'ютерами повідомлення вже має форму електричного сигналу, оскільки комп'ютери працюють з електричними сигналами.

Модулятор виконує дві основні функції.

- 1) Перетворює електричне повідомлення у відповідний формат, що готовий для передачі через засіб зв'язку.
- 2) Накладає цей сигнал на хвилю, що генерується джерелом сигналу, і в результаті створює модульований сигнал, який має певні характеристики для передачі через канал зв'язку.

Використовуються дві різні категорії модуляції: аналогова та цифрова. Аналогова модуляція використовується для передачі аналогових сигналів, таких як аналоговий аудіосигнал, тоді як цифрова модуляція використовується для цифрових сигналів, таких як дані в комп'ютерних мережах.

Джерело носія: Несуче джерело генерує хвилю, на якій передається інформація. Ця хвиля називається несучою. У волоконно-оптичній системі використовується лазерний діод (ЛД) або світловипромінювальний діод (СІД) як джерело світла. Ці прилади можна назвати оптичними генераторами, оскільки вони забезпечують стабільні одночастотні хвилі з достатньою потужністю для поширення сигналу на великі відстані в оптичному волокні.

Канальний з'єднувач: З'єднувач подає енергію в інформаційний канал. У волоконно-оптичній системі канальний з'єднувач може бути виготовлений у вигляді лінзи, яка служить для координації світла, що випромінюється джерелом, та направлення цього світла на приймач. З'єднувач повинен ефективно передавати модульований світловий пучок від джерела до оптичного волокна. Конструкція

канального з'єднувача є важливою частиною волоконно-оптичної системи через можливість великих втрат світла при з'єднанні.

Інформаційний канал: Інформаційний канал - це шлях між передавачем і приймачем. У волоконно-оптичному зв'язку таким каналом є скляне або пластикове волокно. Бажаними характеристиками інформаційного каналу є низьке загасання і великий кут конуса прийому світла. Оптичні підсилювачі підвищують потужність слабких сигналів. Підсилювачі необхідні в дуже довгих лініях зв'язку для забезпечення достатньої потужності приймача. Повторювачі можуть використовуватися тільки в цифрових системах. Вони перетворюють слабкі і спотворені оптичні сигнали в електричні, а потім регенерують вихідні цифрові імпульсні послідовності для подальшої передачі. Іншою важливою властивістю інформаційного каналу є час поширення хвиль, що йдуть по ньому. Сигнал, що поширюється волокном, зазвичай містить діапазон волоконно-оптичних частот і ділить свою потужність на кілька променевих траєкторій. Це призводить до спотворення сигналу, що поширюється. У цифровій системі це спотворення проявляється у вигляді розкиду і деформації імпульсів. Розкид настільки великий, що сусідні імпульси починають накладатися один на одного і стають невпізнаними як окремі біти інформації.

Оптичний детектор: Передана інформація розпізнається детектором. В оптоволоконній системі оптична хвиля перетворюється на електричний струм за допомогою фотодетектора. Струм, що розвивається детектором, пропорційний потужності падаючої оптичної хвилі. Вихідний струм детектора містить передану інформацію. Вихідний струм детектора фільтрується для усунення постійного зміщення і потім посилюється. Важливими властивостями фотодетекторів є малі розміри, економічність, тривалий термін служби, низьке енергоспоживання, висока чутливість до оптичних сигналів і швидкий відгук на швидкі зміни потужності оптичного випромінювання.

Обробка сигналів включає фільтрацію та посилення. Правильна фільтрація дозволяє максимізувати відношення потужності корисного сигналу до потужності небажаного сигналу. У цифрових системах схема прийняття рішення є допоміжним

блоком. Для забезпечення якісного зв'язку коефіцієнт бітових помилок (BER) повинен бути дуже низьким.

Виведення повідомлення: Електрична форма повідомлення, що виходить із сигнального процесора, перетворюється на звукову хвилю або візуальне зображення. Іноді ці сигнали можна використовувати безпосередньо для підключення комп'ютерів або інших пристроїв через оптоволоконну систему.

Електромагнітний спектр (Рис. 1.2) охоплює широкий діапазон електромагнітних хвиль, включаючи радіохвилі та світло. Частота цих хвиль вимірюється в герцах (Гц), і вона визначає, скільки коливань відбувається за секунду. Швидкість електромагнітної хвилі в вакуумі (вільному просторі) дорівнює приблизно 3×10^8 метрів на секунду (м/с). Довжина хвилі (λ) - це відстань, яку проходить хвиля за один її цикл коливань. У волоконній оптиці зручніше використовувати довжину хвилі світла, і ця довжина хвилі часто вимірюється в мікронах (μm) або нанометрах (нм):

- 1 мікрон (μm) = 1 мікрометр = 10^{-6} метрів.

- 1 нанометр (нм) = 10^{-9} метрів.

У волоконній оптиці використовуються різні діапазони довжин хвиль, зокрема видиме та інфрачервоне світло. Інфрачервоне світло має довжини хвиль, що охоплюють широкий діапазон, і зазвичай використовується для різних типів волоконно-оптичного зв'язку. Видиме світло використовується для короткодійних передач даних за допомогою пластикового волокна.

Довжина хвилі світла в оптичних волокнах грає важливу роль у визначенні характеристик передачі сигналу та інших параметрів оптоволоконної системи.

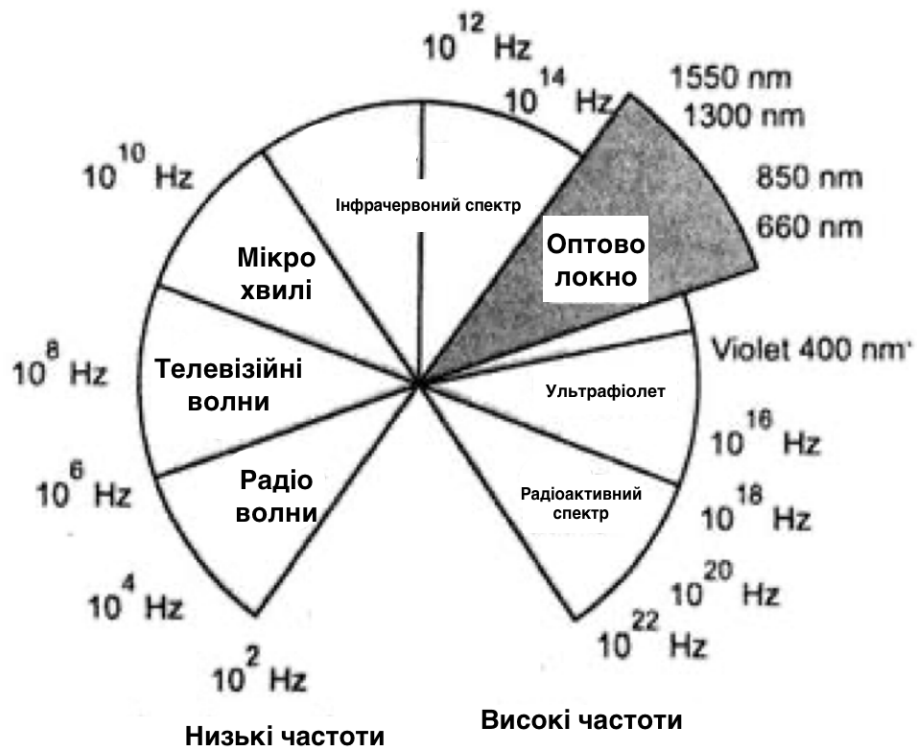


Рис. 1.2. Електромагнітний спектр.

1.1.1 Структура оптичного волокна. Устрій світловода

У просторі відбувається рух світла з максимальною можливою швидкістю, що становить 3×10^8 метрів на секунду або близько 186 тисяч миль в секунду. Коли світло взаємодіє з матеріалом, воно демонструє певні характеристики, які пояснюються законами відбиття і заломлення.

Оптичний хвилевід (Рис. 1.3) - це структура, яка спрямовує хвилю світла та керує її рухом в певному бажаному напрямку. Якщо поперечні розміри світловоду в набагато перевищують довжину хвилі світла, яка спрямовується, то роботу оптичного хвилевода можна пояснити, використовуючи принципи геометричної оптики та явища повного внутрішнього відбиття.

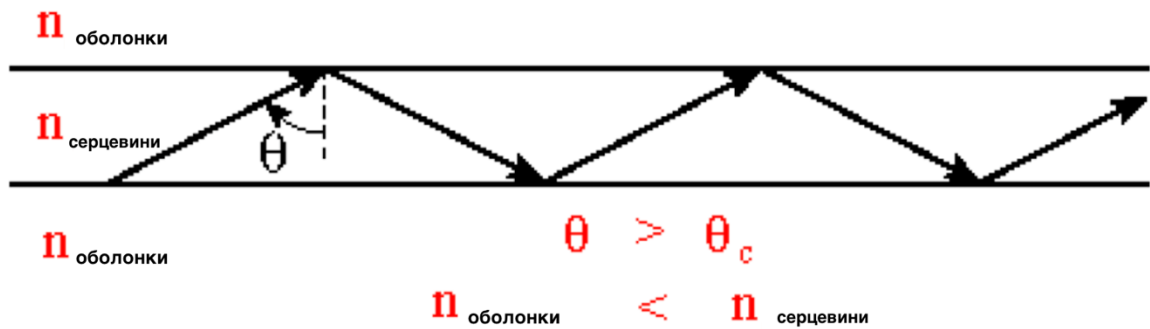


Рис. 1.3. Устрій хвилеводу.

Хвилевід затримує світло, оточуючи направляючу область, яка називається серцевиною, виготовлену з матеріалу з показником заломлення n серцевини, матеріалом, який називається оболонкою, виготовленим з матеріалу з показником заломлення n оболонки $< n$ серцевини. Світло, що потрапляє всередину, затримується доти, доки $\sin\theta > n_{\text{облицювання}} / n_{\text{серцевини}}$.

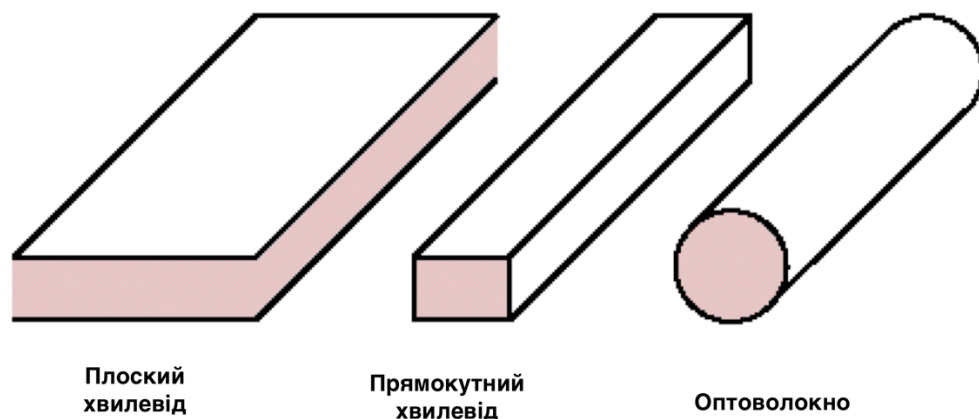


Рис. 1.4. Типи хвилеводів.

Світло може бути направлено за допомогою плоских або прямокутних хвилеводів, а також оптичних волокон (Рис. 1.4). Оптичне волокно складається з трьох концентричних елементів: (Рис. 1.5) серцевини, оболонки та зовнішнього покриття, яке часто називається буфером. Зазвичай серцевина виготовляється зі скла або пластику і є світлоносною частиною волокна. Оболонка оточує серцевину і зазвичай виготовляється з матеріалу з нижчим показником заломлення, ніж

серцевина. Ця різниця в показниках заломлення призводить до повного внутрішнього відбиття на межі серцевини і оболонки по всій довжині волокна. Світло передається вниз по волокну і не виходить через бокові сторони волокна.

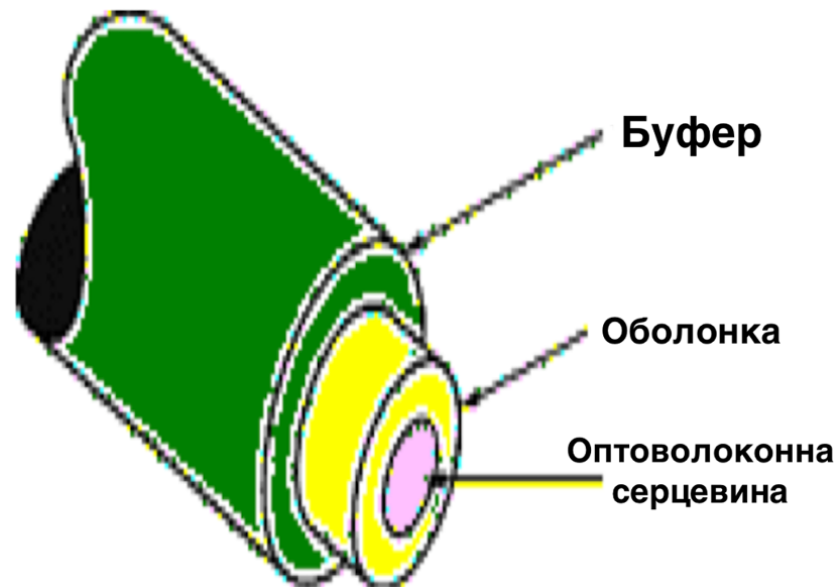


Рис. 1.5. Частини хвилеводів.

- Оптоволоконна серцевина:

внутрішній світлопровідний елемент з високим показником заломлення.

- Оболонка:

середній шар, який служить для обмеження світла до серцевини. Він має нижчий показник заломлення.

- Буфер:

зовнішній шар, який слугує "амортизатором" для захисту серцевини та оболонки від пошкоджень. Покриття зазвичай складається з одного або декількох шарів пластикового матеріалу для захисту волокна від фізичного середовища. Іноді до покриття додають металеві оболонки для додаткового фізичного захисту.

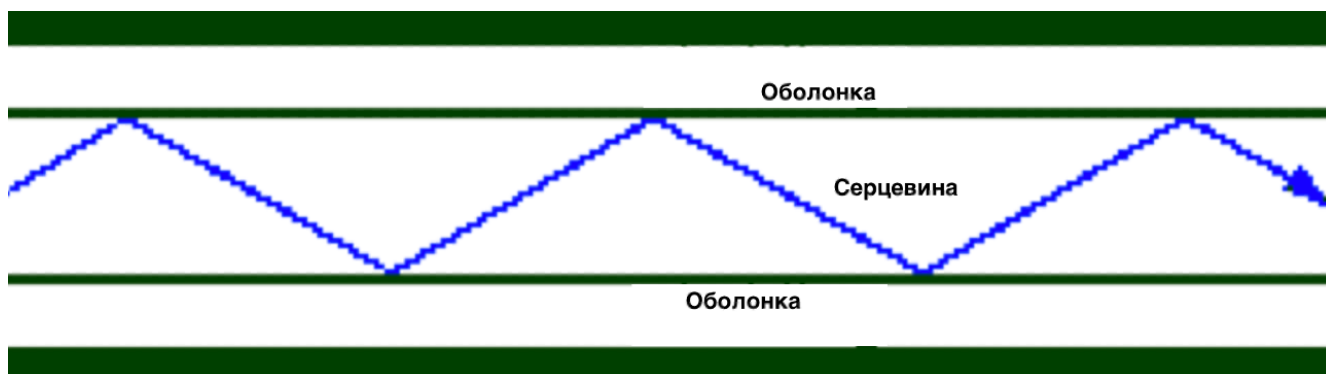


Рис. 1.6. Відбивання світла у хвилеводі.

Світло, яке введене в серцевину оптоволокна і падає на межу між серцевиною і оболонкою під кутом, більшим за критичний, відбивається назад в серцевину (Рис. 1.6). Оскільки кути падіння і відбиття однакові, світловий промінь продовжує падати зигзагоподібно вниз по довжині волокна. Світло залишається в серцевині. Однак світло, що падає на межу розділу під кутом, меншим за критичний, потрапляє в оболонку і втрачається.

Теорія променів

Явище розщеплення білого світла на складові називається дисперсією. Поняття відбивання та заломлення світла ґрунтуються на теорії, відомій як теорія променів або геометрична оптика, в якій світлові хвилі розглядаються як хвилі і зображуються простими геометричними лініями або променями. Основні закони теорії променів/геометричної оптики

- В однорідному середовищі світлові промені є прямими лініями.
- Світло може поглинатися або відбиватися
- Відбитий промінь лежить у площині падіння, а кут падіння дорівнює куту відбиття.

На межі двох середовищ з різними показниками заломлення заломлений промінь буде лежати в площині падіння. Закон Снелла дасть залежність між кутами падіння і заломлення.

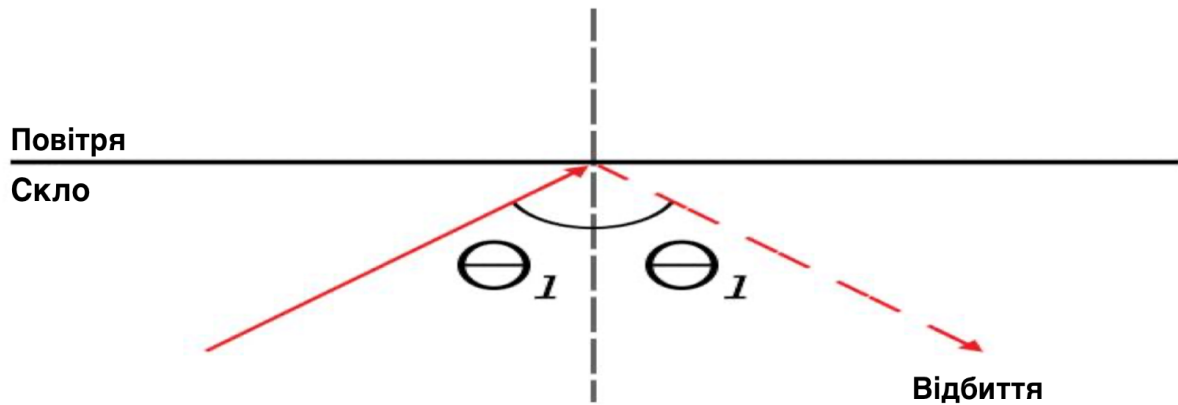


Рис. 1.7. Відбиття променю (скло - повітря).

Відбиття залежить від типу поверхні, на яку падає світло. Важливою умовою відображення на глянцевих поверхнях є те, що кут, який утворює падаючий промінь світла з нормаллю в точці контакту, повинен дорівнювати куту відбиття з цією ж нормаллю (Рис. 1.7). Зображення, отримані в результаті такого відбиття, мають різні властивості залежно від форми поверхні.

Наприклад, для плоского дзеркала зображення є вертикальним, має такий самий розмір, як і об'єкт, і знаходиться на такій самій відстані від поверхні дзеркала, як і реальний об'єкт.

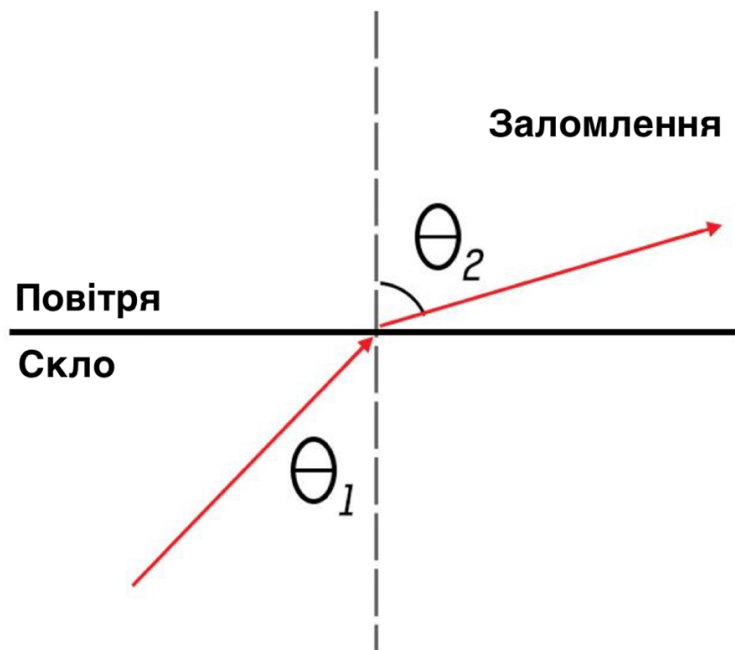


Рис. 1.8. Заломлення променю.

Заломлення (Рис. 1.8) - це викривлення світла в певному середовищі, зумовлене швидкістю світла в цьому середовищі. Швидкість світла в будь-якому середовищі може бути задана формулою:

$$V = \frac{c}{n} ; \quad (1.1)$$

n – показник заломлення, C – швидкість світла в повітрі, V - швидкість світла в середовищі.

Показник заломлення для вакууму і повітря дорівнює 1,0, для води - 1,3, а для скла - 1,5, де n - показник заломлення відповідного середовища.

Коли промінь світла падає на межу розділу двох середовищ з різними показниками заломлення, він викривляється або в бік, або в сторону від нормалі, залежно від показників заломлення середовищ.

Відповідно до закону Снелла, заломлення можна представити у вигляді:

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) ; \quad (1.2)$$

n_1, n_2 – показники заломлення, θ_1, θ_2 – кути променів.

Для $n_1 > n_2$, θ_2 завжди більше, ніж θ_1 , або, іншими словами, світло, що рухається від середовища з високим показником заломлення (скло) до середовища з низьким показником заломлення (повітря), буде відхилятися від норми.

Повне внутрішнє відбивання

Для розгляду поширення світла в оптичному волокні з використанням моделі теорії променів необхідно враховувати показник заломлення діелектричного середовища. Оптичні матеріали характеризуються показником заломлення, який позначається n . Показник заломлення середовища визначається як відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в середовищі. Заломлення - це викривлення світла в певному середовищі, обумовлене швидкістю світла в цьому середовищі.

Якщо кут падіння більший за критичний кут для межі розділу (зазвичай близько 82° для оптичних волокон), світло відбивається назад у середовище

падіння без втрат завдяки процесу, відомому як повне внутрішнє відбиття (Рис. 1.9).

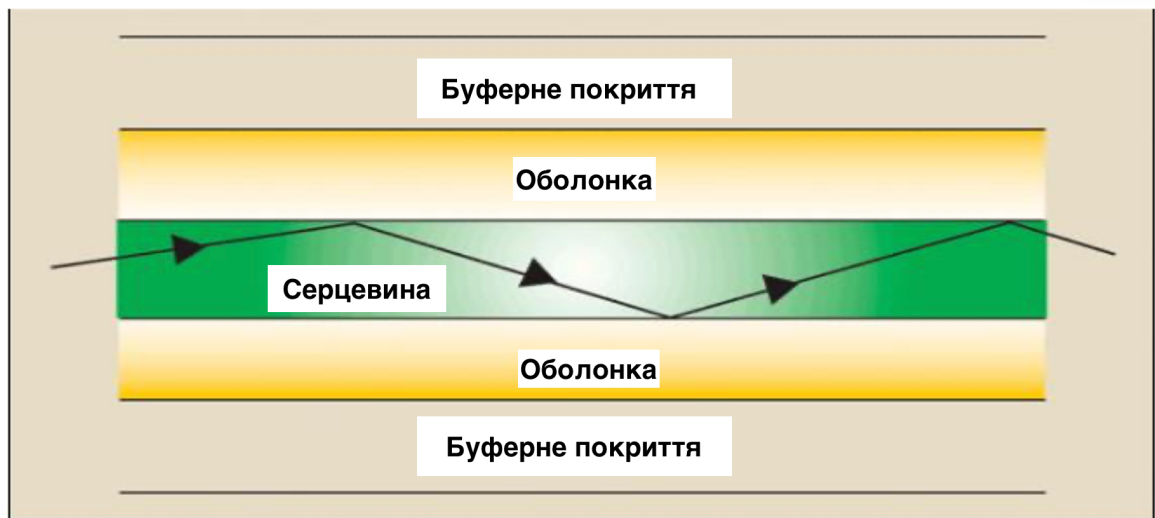


Рис. 1.9. Повне внутрішнє відбиття дозволяє світлу залишатися всередині всередині серцевини волокна.

Заломлення описується законом Снелла:

Промінь світла рухається повільніше в оптично густому середовищі, ніж у менш густому, і показник заломлення дає міру цього ефекту. Коли промінь падає на межу розділу між двома діелектриками з різними показниками заломлення (наприклад, скло-повітря), відбувається заломлення, як показано (Рис. 1.10). Можна помітити, що промінь, який наближається до межі розділу, поширюється в діелектрику з показником заломлення n і знаходиться під кутом ϕ до нормалі до поверхні розділу.

Якщо діелектрик по інший бік межі поділу має показник заломлення n , менший за n_1 , то заломлення таке, що шлях променя в цьому середовищі з меншим показником заломлення лежить під кутом до нормалі. Кути падіння і заломлення пов'язані між собою і з показниками заломлення діелектриків законом заломлення Снелла (1.2).

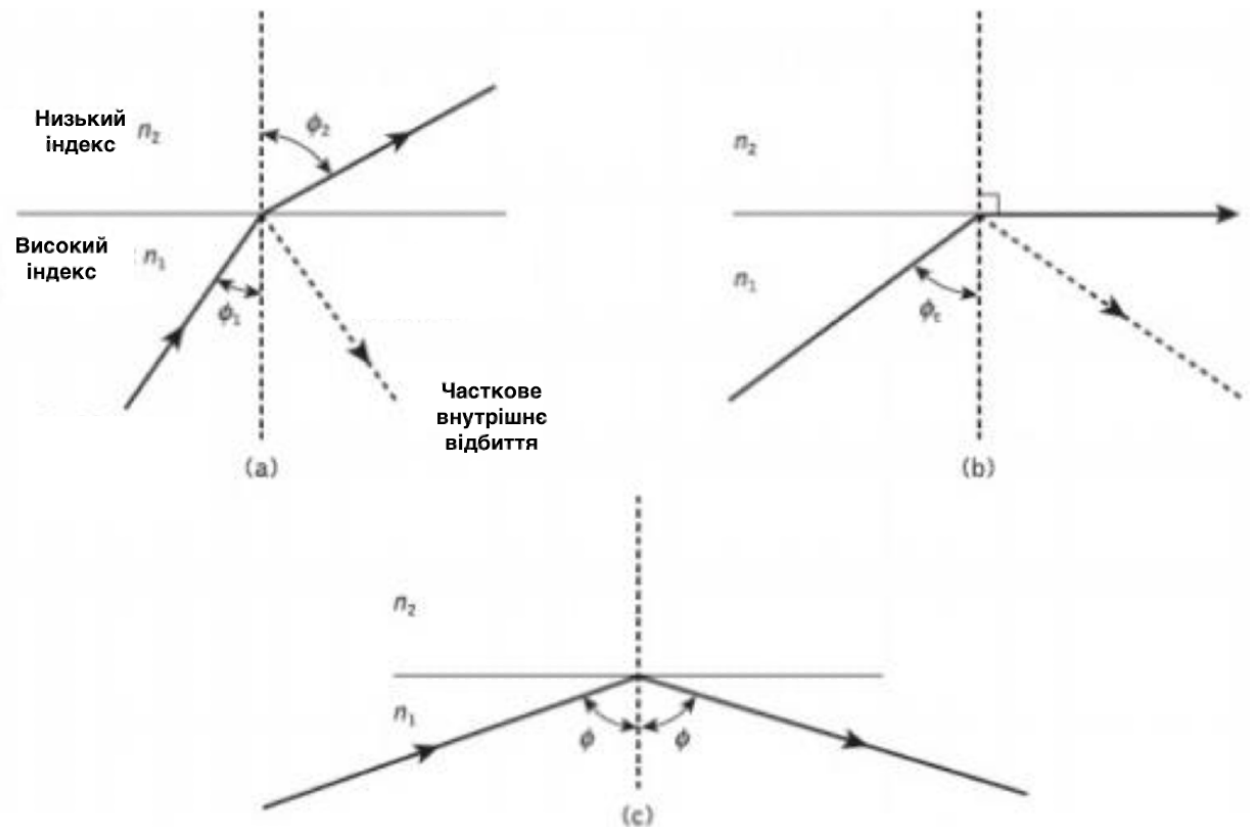


Рис. 1.10. Світлові промені падають на межу розділу з високим і низьким показником заломлення (наприклад, скло-повітря): (а) заломлення, (b) граничний випадок заломлення, що показує критичний промінь під кутом ϕ_c , (c) повне внутрішнє відбиття, де $\phi > \phi_c$.

На рисунку (Рис. 1.10 а) також видно, що невелика кількість світла відбивається назад у вихідне діелектричне середовище (часткове внутрішнє відбиття). Оскільки n_1 більше за n_2 , кут заломлення завжди більший за кут падіння. Таким чином, коли кут заломлення становить 90° і заломлений промінь виходить паралельно межі поділу між діелектриками, кут падіння повинен бути меншим за 90° .

Це граничний випадок заломлення, і кут падіння тепер відомий як критичний кут ϕ_c , як показано на (Рис. 1.10 b) З рівняння (1.1) значення критичного кута визначається як (1.3).

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}; \quad (1.3)$$

При кутах падіння, більших за критичний, світло відбивається назад у вихідне діелектричне середовище (повне внутрішнє відбиття) з високою ефективністю (близько 99,9%). Отже, на (Рис. 1.10 с) видно, що повне внутрішнє відбиття відбувається на межі двох діелектриків з різними показниками заломлення, коли світло падає на діелектрик з меншим показником від діелектрика з більшим показником, а кут падіння променя перевищує критичне значення. Це механізм, за допомогою якого світло під досить малим кутом (менше 90°) може поширюватися по оптичному волокну з низькими втратами.

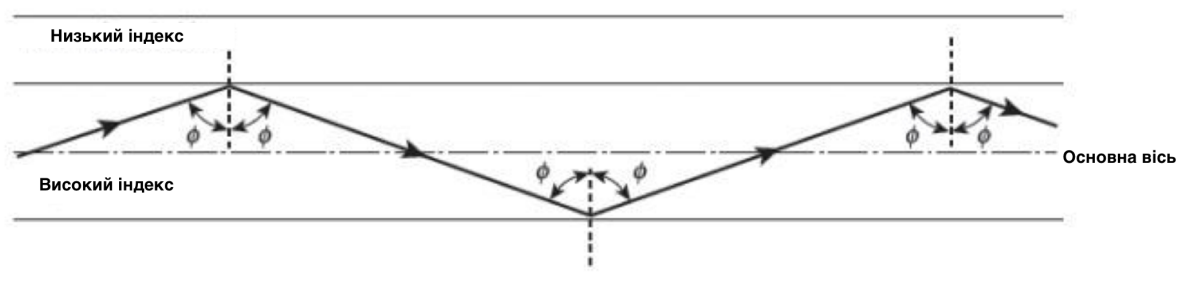


Рис. 1.11. Передача світлового променя в ідеальному оптичному волокні.

(Рис. 1.11) ілюструє передачу світлового променя в оптичному волокні через серію повних внутрішніх відбиттів на межі розділу кремнеземної серцевини і кремнеземної оболонки з дещо нижчим показником заломлення. Промінь має кут падіння ϕ на межі розділу, більший за критичний, і відбивається під тим самим кутом до нормалі.

Промінь світла, показаний на (Рис. 1.11), називається меридіональним променем, оскільки він проходить через вісь серцевини волокна. Цей тип променя є найпростішим для опису і зазвичай використовується для ілюстрації фундаментальних властивостей передачі світла в оптичних волокнах. Слід також зазначити, що передача світла, показана на (Рис. 1.11), передбачає ідеальне волокно, і що будь-які розриви або недосконалості на межі розділу серцевини і оболонки, ймовірно, призведуть до заломлення, а не до повного внутрішнього відбиття, з подальшою втратою світлового променя в оболонці.

Критичний кут

При поступовому збільшенні кута падіння (ϕ_1) буде відбуватися прогресивне збільшення кута заломлення (ϕ_2). При певній умові (ϕ_1) кут заломлення (ϕ_2) стає рівним 90° до нормалі. Коли це відбувається, заломлений промінь світла рухається вздовж межі розділу. Кут падіння (ϕ_1) в точці, в якій кут заломлення (ϕ_2) стає 90° , називається критичним кутом. та позначається ϕ_c або θ_c (Рис. 1.12).



Рис. 1.12. Критичний кут.

Якщо кут падіння більший за критичний кут для даних умов, то такий тип відбиття називається повним внутрішнім відбиттям, і він є основою оптоволоконного зв'язку.

Кут приймання

В оптичному волокні світловий промінь проходить перше заломлення на межі розділу повітря і серцевини. Кут, під яким відбувається це заломлення, має вирішальне значення, оскільки саме від цього кута залежить, чи будуть наступні внутрішні відбиття відповідати принципу повного внутрішнього відбиття. Цей кут, під яким світловий промінь вперше стикається з серцевиною оптичного волокна, називається кутом прийняття.

Числова апертура

Числова апертура (Рис. 1.13) є характеристикою будь-якої оптичної системи. Наприклад, фотодетектор, оптичне волокно, лінзи тощо - все це оптичні системи. Числова апертура - це здатність оптичної системи збирати все світло, що падає на неї, в одній області.

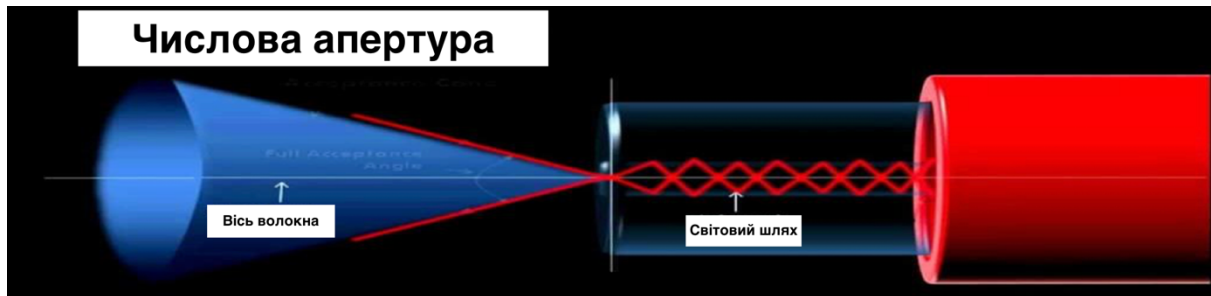


Рис. 1.13. Числова апертура.

Синій конус відомий як конус приймання. Як ви можете бачити, він залежить від кута прийняття оптичного волокна. Світлові хвилі в межах конуса приймання можуть бути зібрані в невеликій області, яку потім можна відправити в оптичне волокно.

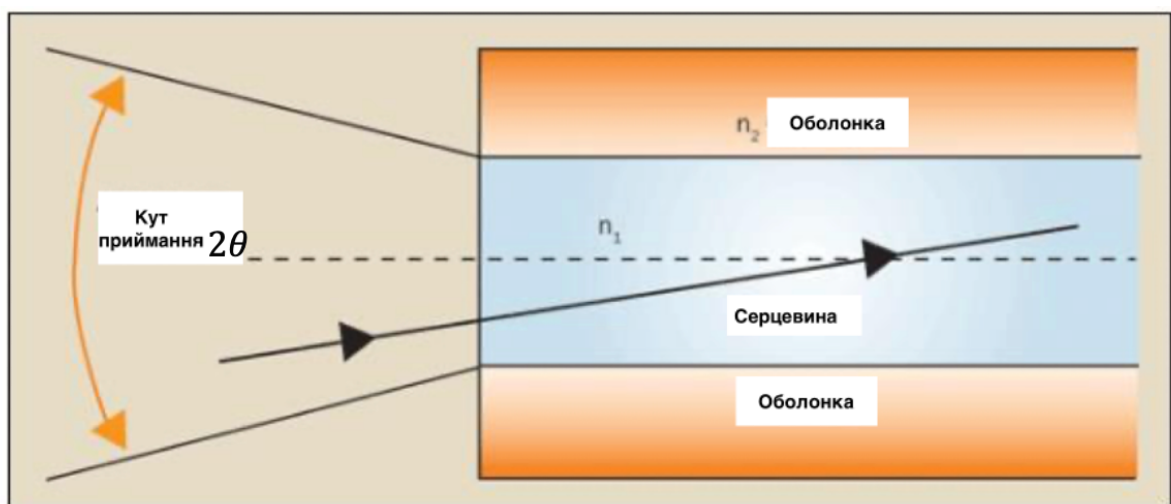


Рис. 1.14. Числова апертура з позначеннями.

Числова апертура (NA), показана на (Рис. 1.14), є мірою максимального кута, під яким світлові промені будуть входити і проходити по волокну. Це представлено наступним рівнянням (1.4):

$$NA = \sqrt{n_{\text{ядра}}^2 - n_{\text{оболонки}}^2} = \sin \theta ; \quad (1.4)$$

Перекіс променів: У багатомодовому оптичному волокні зв'язаний промінь, який рухається по гвинтовій траєкторії вздовж волокна і, таким чином, (а) не паралельний осі волокна, (b) не лежить в меридіональній площині і (с) не перетинає вісь волокна, називається косим променем

1. Косі промені - це промені, які проходять через оптичне волокно, не проходячи через його вісь. Числова апертура, показана на рисунку вище, є мірою максимального кута, під яким світлові промені будуть входити і проводитися по волокну.

2. Можливий шлях розповсюдження косих променів показаний на рисунку. На (Рис. 1.15), вид (а), показано вигляд під кутом, а вид (b) - вигляд спереду.

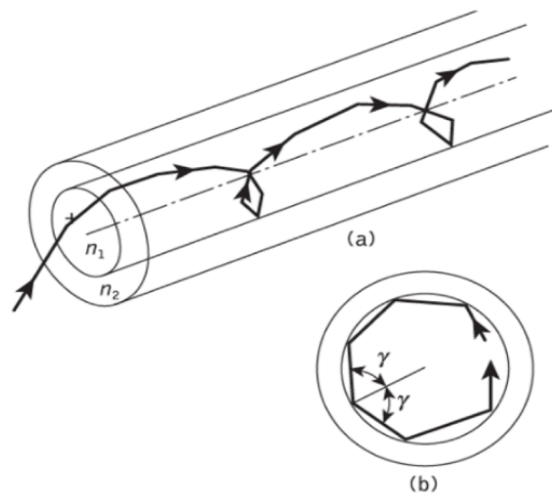


Рис. 1.15. Шлях розповсюдження косих променів.

3. Косі промені - це промені, які йдуть по гвинтовій траєкторії, але не обмежуються однією площиною. Косі промені не обмежуються певною площиною, тому їх не можна легко відстежити. Для отримання результату достатньо проаналізувати меридіональні промені, а не косі промені, оскільки косі промені призводять до більших втрат потужності.

4. Косі промені поширюються, не проходячи через центральну вісь волокна. Кут прийому для косих променів більший, ніж кут прийому для меридіональних променів.

5. Косі промені часто використовуються при розрахунку світлоприйняття в оптичному волокні. Додавання косих променів збільшує світловіддачу волокна. У великих волокнах NA це збільшення може бути значним.

6. Додавання косих променів також збільшує кількість втрат у волокні. Косі промені мають тенденцію поширюватися біля краю серцевини волокна. Значна частина кількості косих променів, які затримуються в серцевині волокна, вважається променями витоку.

7. Передбачається, що промені витоку повністю відбиваються на межі серцевини і оболонки. Однак ці промені частково заломлюються через вигнуту природу межі волокна. Теорія мод також використовується для опису цього типу втрат витікаючих променів.

Циліндричне волокно

1. Мод

Коли світло проходить по волокну (як мікрохвилі проходять по хвилеводу), фазові зсуви відбуваються на кожній відбиваючій границі. Існує скінченна дискретна кількість шляхів по оптичному волокну (відомих як моди), які створюють конструктивні (фазові і, отже, адитивні) фазові зсуви, що підсилюють передачу. Оскільки кожна мода виникає під різним кутом до осі волокна, коли промінь рухається по довжині, кожна з них проходить різну довжину по волокну від входу до виходу. Тільки одна мода, мода нульового порядку, проходить по довжині волокна без відбиття від бокових стінок. Таке волокно називається одномодовим. Фактична кількість мод, які можуть поширюватися в даному оптичному волокні, визначається довжиною хвилі світла, а також діаметром і показником заломлення серцевини волокна.

2. Зв'язок мод

Дотепер ми розглядали аспекти поширення хвиль в ідеальних діелектричних хвилеводах. Однак збурення хвилеводу, такі як відхилення осі волокна від

прямолинійності, зміни діаметра серцевини, нерівності на межі розділу серцевина-оболонка і зміни показника заломлення, можуть змінити характеристики поширення у волокні. Це призведе до ефекту переходу енергії зв'язку з однієї моди в іншу в залежності від конкретного збурення. Теорія променів допомагає зрозуміти це явище, як показано на (Рис. 1.16), який ілюструє два типи збурень. Можна помітити, що в обох випадках промінь більше не утворює однакового кута з віссю. У теорії електромагнітних хвиль це відповідає зміні режиму поширення світла.

Таким чином, окремі моди зазвичай не поширюються по всій довжині волокна без значної передачі енергії сусіднім модам, навіть якщо волокно виключно хорошої якості і не деформується і не згинається під впливом навколишнього середовища. Таке перетворення мод називається модовим зв'язком або змішуванням. Зазвичай його аналізують за допомогою рівнянь зв'язаних мод, які можна отримати безпосередньо з рівнянь Максвелла.

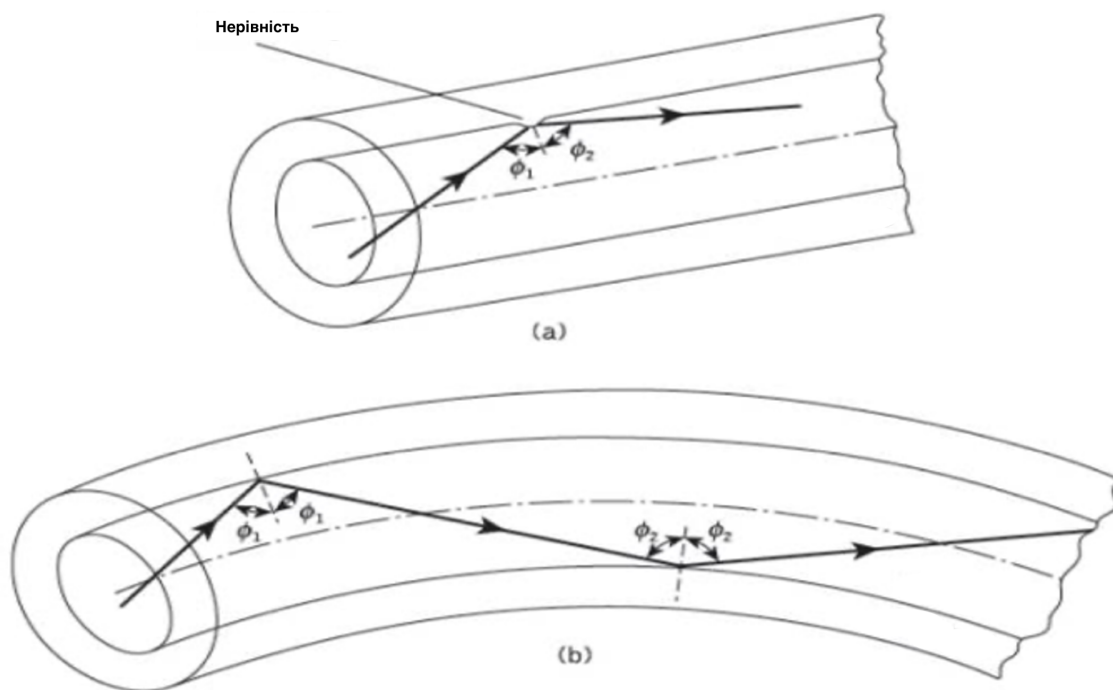


Рис. 1.16. Ілюстрації променевої теорії, що показують два можливих збурення волокна, які дають модовий зв'язок: (а) нерівність на межі розділу серцевина-оболонка; (б) вигин волокна.

1.1.2 Типи оптоволоконна

Волокно класифікується як багатомодове або одномодове (Рис. 1.17), залежно від того, як світло проходить крізь нього. Тип волокна тісно пов'язаний з діаметром серцевини і оболонки, а також з тим, як світло проходить крізь нього.

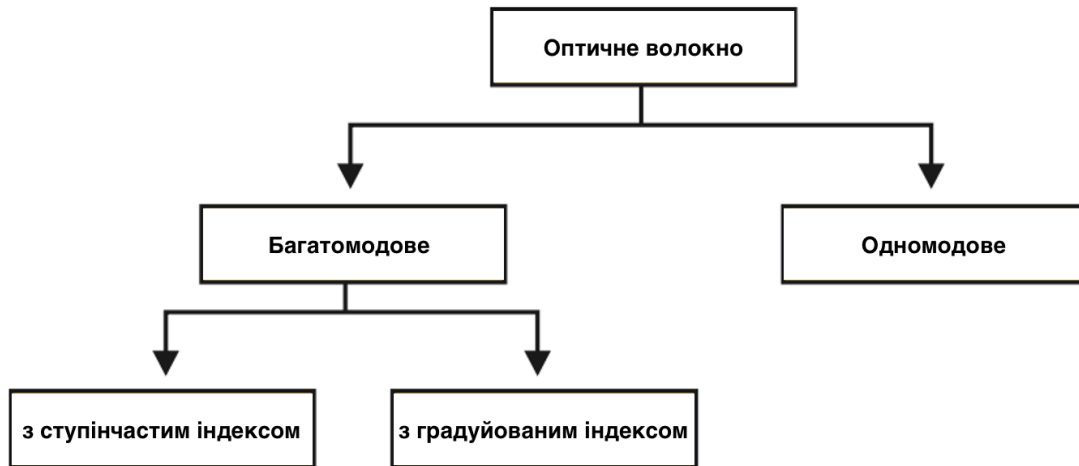


Рис. 1.17. Типи оптоволоконна.

Багатомодове волокно

Багатомодове волокно (Рис. 1.18), завдяки своїй великій серцевині, дозволяє передавати світло різними шляхами (декількома модами) вздовж лінії зв'язку, що робить багатомодове волокно досить чутливим до модальної дисперсії.

Основними перевагами багатомодового волокна є простота з'єднання з джерелами світла та іншими волокнами, нижча вартість джерел світла (передавачів), а також спрощення процесів з'єднання та зрощування. Однак відносно високе загасання і низька пропускну здатність обмежують передачу світла по багатомодовому волокну на короткі відстані.

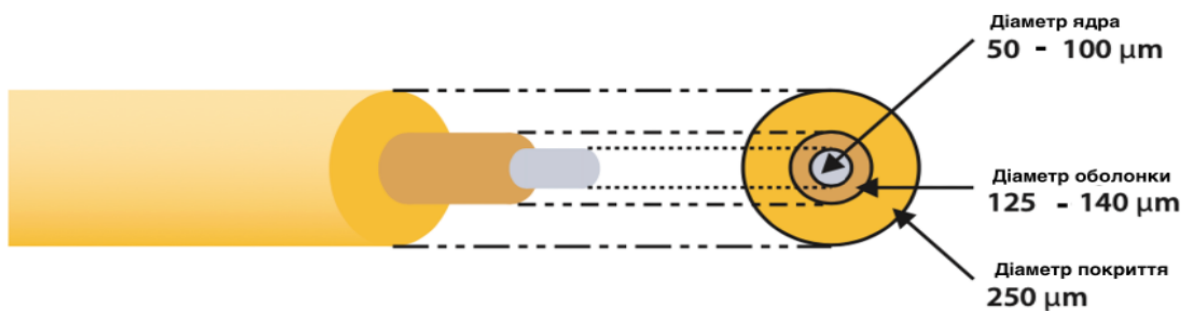


Рис. 1.18. Склад багатомодового волокна.

Багатомодове волокно зі ступінчастим індексом

Багатомодове волокно зі ступінчастим індексом (SI) (Рис. 1.19), спрямовує світлові промені шляхом повного відбиття на межі між серцевиною і оболонкою. Показник заломлення є однорідним в серцевині. Мінімальний діаметр серцевини SI багатомодового волокна становить 50 або 62,5 мкм, діаметр оболонки - від 100 до 140 мкм, а числова апертура - від 0,2 до 0,5.

Через модальну дисперсію недоліком багатомодового волокна SI є його дуже низька пропускна здатність, яка виражається як добуток пропускної здатності на довжину в МГц-км. Смуга пропускання 20 МГц-км означає, що волокно придатне для передачі сигналу 20 МГц на відстань 1 км, сигналу 10 МГц на відстань 2 км, сигналу 40 МГц на відстань 0,5 км і так далі.

Пластикове покриття оточує багатомодове волокно SI, яке використовується здебільшого для зв'язку на короткі відстані, що може витримувати високі загасання.

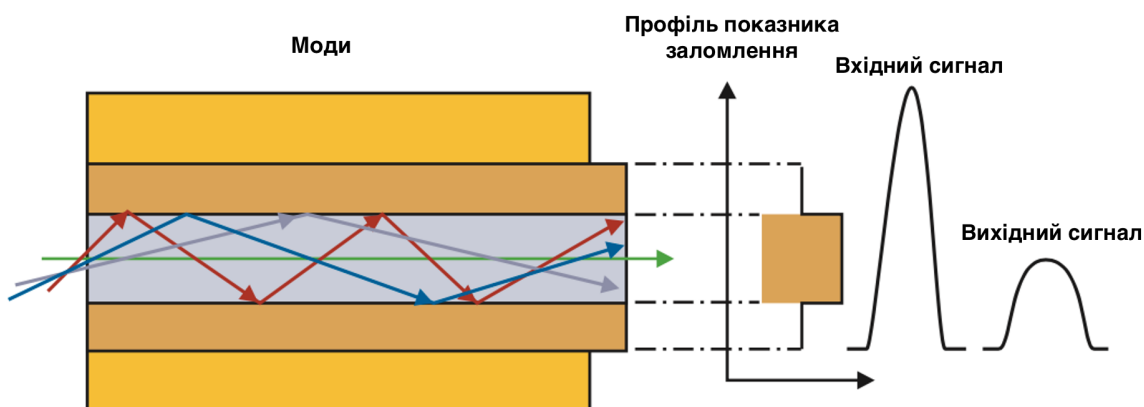


Рис. 1.19. Поширення світла в багатомодовому волокні SI.

Багатомодове волокно з градуйованим індексом

Серцевина багатомодового волокна з градуйованим індексом (GI) має нерівномірний показник заломлення, який поступово зменшується від центральної осі до оболонки. Ця зміна показника серцевини змушує промені світла проходити через волокно по синусоїді.

Моди вищого порядку матимуть довший шлях, але за межами центральної осі в областях з низьким індексом їх швидкість зростатиме. Крім того, різниця в швидкості між модами найвищого порядку і модами найнижчого порядку буде меншою для багатомодового волокна GI, ніж для багатомодового волокна SI.

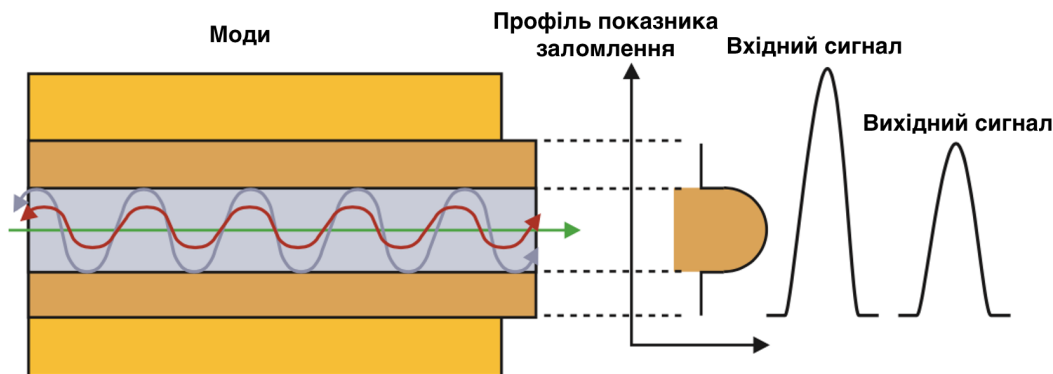


Рис. 1.20. Поширення світла в багатомодовому волокні GI.

Типові загасання для багатомодового волокна GI:

- 3 дБ/км на 850 нм
- 1 дБ/км на 1300 нм

Типова числова апертура для багатомодового волокна GI: 0,2

Типове співвідношення смуги пропускання до довжини для багатомодового волокна з градуїтованим індексом:

- 160 МГц-км на 850 нм
- 500 МГц-км на 1300 нм

Типові значення показника заломлення:

- 1,49 для 62,5 мкм при 850 нм
- 1,475 для 50 мкм при 850 нм і 1,465 для 50 мкм при 1300 нм

Умови запуску та потік обтікання

Умови запуску відповідають тому, як оптична потужність запускається в сердцевину волокна при вимірюванні загасання волокна.

Ідеальні умови запуску повинні мати місце, якщо світло розподіляється по всій сердцевині волокна. Насправді, умови запуску багатомодового оптичного

волокна зазвичай можна охарактеризувати як недозаповнені (Рис. 1.21) або переповнені.



Рис. 1.21. Передача світла в багатомодовому волокні в умовах неповного заповнення.

Вони характеризуються як недозаповнені, коли більша частина оптичної потужності зосереджена в центрі волокна, що відбувається, коли розмір плями запуску і кутовий розподіл менші, ніж серцевина волокна (наприклад, коли джерелом є лазер або лазер з поверхневим випромінюванням з вертикальною порожниною [VCSEL]).

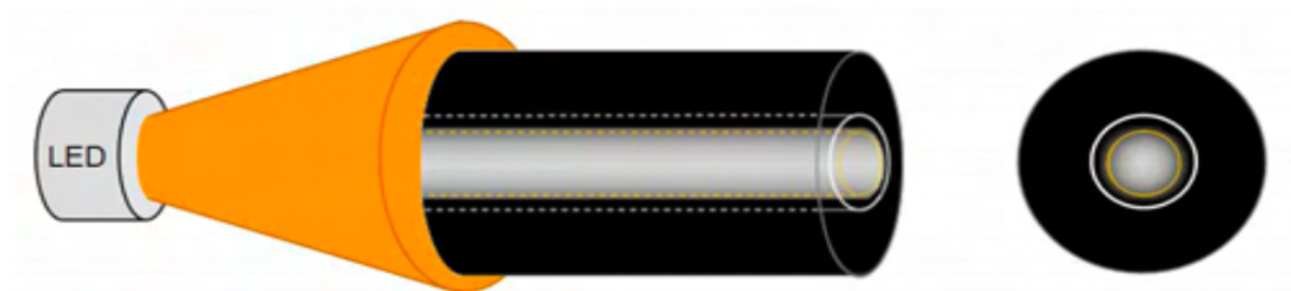


Рис. 1.22. Передача світла в багатомодовому волокні в умовах переповнення

Стан переповненого запуску (Рис. 1.22) виникає, коли розмір плями запуску і кутовий розподіл більше, ніж серцевина волокна (наприклад, коли джерелом є світловипромінюючий діод [LED]). Падаюче світло, яке падає за межі серцевини волокна, втрачається, так само як і світло, яке падає під кутами, що перевищують кут сприйняття серцевини волокна.

Джерела світла впливають на вимірювання загасання таким чином, що джерело, яке не повністю заповнює волокно, показує менше значення загасання,

ніж фактичне, тоді як джерело, яке переповнює волокно, показує більше значення загасання, ніж фактичне.

Неповне/переповнене - що краще?

Ні неповне, ні переповнене волокно не є оптимальним, тому що обидва варіанти призводять до варіацій вимірювань.

Варіації вимірювань не є критичними, коли допустимий бюджет втрат перевищує очікувану пропускну здатність. Але стає важливим знати діапазон варіацій у випадку, коли бюджет втрат близький до його допустимих обмежень. У такому випадку 50-відсоткова варіація може виявитися занадто важливою для сертифікації мережі, що вимагає проведення точних вимірювань.

Метою стандарту Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС) 61280-4-1 є надання рекомендацій, які гарантують, що варіація загасання залишається в межах $\pm 10\%$.

Використання випробувального обладнання, що відповідає стандарту ІЕС 61280-4-1, в польових умовах гарантує, що результати вимірювань загасання будуть відрізнятися менш ніж на $\pm 10\%$ для втрат > 1 дБ і $\pm 0,07$ дБ для втрат < 1 дБ між різними одиницями випробувального обладнання.

Окружний потік

Новий параметр, описаний у стандарті ІЕС 61280-4-1 Ed2 від червня 2009 року, відомий як Encircled Flux (EF), який пов'язаний з розподілом потужності в серцевині волокна, а також з розміром (радіусом) і кутовим розподілом плями запуску.

EF відповідає співвідношенню між потужністю, що передається при заданому радіусі серцевини волокна, і загальною інжектованою потужністю. Наприклад, на малюнку нижче показана потужність, що передається на радіусі 15 мм (світло-блакитний колір). Значення EF на 15 мм дорівнює відношенню між кількістю світла, що передається в цій середній частині, і загальною кількістю світла, випромінюваного в усій серцевині (жовте коло (Рис. 1.23)):

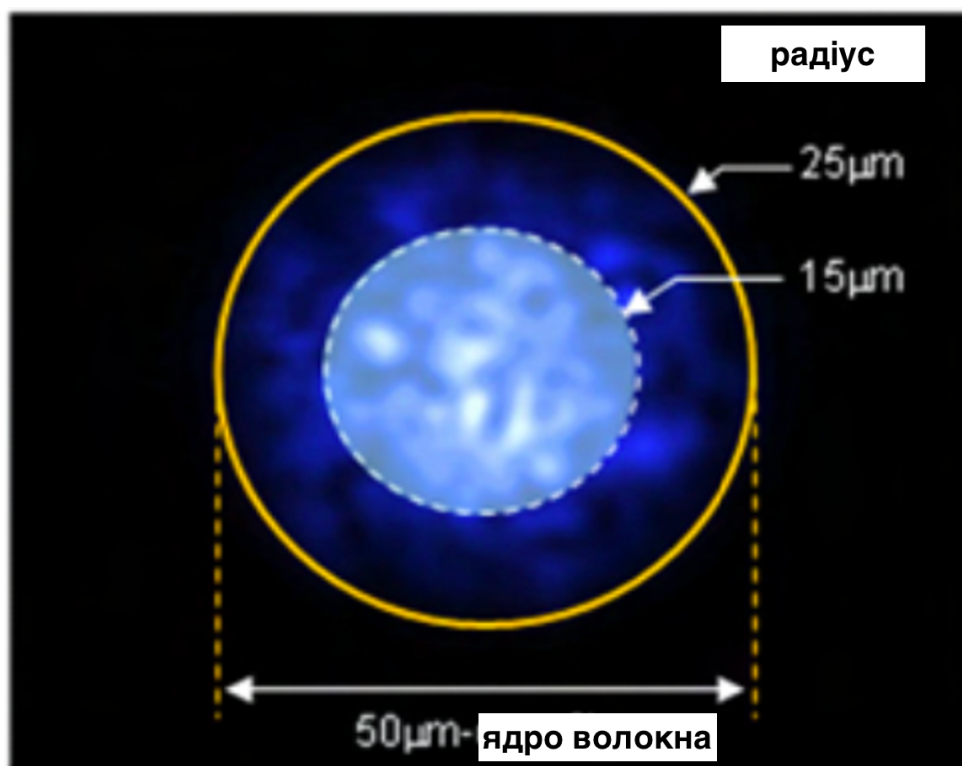


Рис. 1.23. Ілюстрація значення EF при радіусі 15 мкм для волокна з серцевиною 50 мкм.

Стандарт ІЕС 61280-4-1

Рекомендації стандарту ІЕС 61280-4-1 ґрунтуються на визначених нижній і верхній межах значень EF для чотирьох заданих радіусів серцевини волокна (10, 15, 20 і 22 мкм) і для кожної довжини хвилі (850 і 1300 нм).

Типи багатомодових волокон

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-T) G.651 та Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) 802.3 визначають характеристики багатомодового оптичного волоконного кабелю GI. Підвищений попит на пропускну здатність в багатомодових додатках, включаючи Gigabit Ethernet (GigE) і 10 GigE, призвів до визначення чотирьох різних категорій Міжнародної організації зі стандартизації (ISO).

Таблиця 1.1.

Порівняння категорій ISO зі стандартом ITU-T G.651.

Стандарти	Характеристики	Довжина хвилі	Застосування
6.651.1 ISO/IEC 11801:2002 (OM1) amd 2008	Legacy GI багатомодове волокно	850 та 1300 нм	Передача даних у мережах загального доступу
G.651.1 ISO/IEC 11801:2002 (OM2) amd 2008	Legacy GI багатомодове волокно	850 та 1300 нм	Передача відео та даних в мережах загального доступу
6.651.1 ISO/IEC 11801:2002 (OM3) amd 2008	Оптимізовано лазером; Багатомодове волокно GI; 50/125 мкм максимум	Оптимізовано для 850 нм	Передачі Gig E і 10 GigE в локальних мережах (до 300 м)
6.651.1 ISO/IEC 11801:2002 (OM4) amd 2008	Оптимізовано VCSEL	Оптимізовано для 850 м	Передачі 40 і 100 Гбіт/с в дата-центрах

Багатомодові волокна 50 мкм проти 62,5 мкм

Коли оптична передача з'явилася в 1970-х роках, оптичні лінії зв'язку базувалися на багатомодових волоконних хвилеводах 50 мкм і світлодіодних джерелах світла як для коротких, так і для довгих дистанцій.

У 1980-х роках з'явилися одномодові волокна з лазерним випромінюванням, які стали кращим вибором для передачі даних на великі відстані, в той час як багатомодові хвилеводи позиціонувалися як найбільш економічно ефективно рішення для локальних мереж і для з'єднання магістралей будівель і кампусів на відстані від 300 до 2000 м.

Через кілька років нові додатки в локальних мережах вимагали більш високих швидкостей передачі даних, в тому числі 10 Мбіт/с, що підштовхнуло до впровадження багатомодового волокна 62,5 мкм, яке могло передавати 10 Мбіт/с на відстані 2000 м завдяки своїй здатності уловлювати більше світлової енергії від світлодіодів. У той же час, його вища числова апертура полегшила прокладку кабелю і обмежила загасання сигналу, спричинене напруженням в кабелі. Ці вдосконалення зробили багатомодове волокно 62,5 мкм основним вибором для локальних мереж малого радіусу дії, центрів обробки даних і кампусів, що працюють на швидкості 10 Мбіт/с.

Сьогодні стандартом є Gigabit Ethernet (1 Гбіт/с), а 10 Гбіт/с стає все більш поширеним в локальних мережах. Багатомодове волокно 62,5 мкм досягло межі своєї продуктивності, підтримуючи 10 Гбіт/с на відстані 26 м (максимум). Ці обмеження прискорили нещодавнє розгортання нової конструкції економічних лазерів під назвою VCSEL і невеликого ядра волокна 50 мкм, оптимізованого для роботи з лазерами на довжині хвилі 850 нм.

Попит на збільшення швидкості передачі даних і пропускної здатності призвів до широкого використання лазерно-оптимізованих волокон з довжиною хвилі 50 мкм, здатних забезпечити пропускну здатність 2000 МГц-км і високошвидкісну передачу даних на великі відстані. Тенденції в проектуванні локальних мереж полягають у прокладанні сегментів магістралі такими волокнами з метою побудови більш перспективної інфраструктури.

Швидкість передачі даних і довжина передачі

При прокладанні оптоволоконних кабелів важливо розуміти їхні можливості з точки зору пропускної здатності на певній відстані, щоб переконатися, що інсталяція має правильні розміри і буде відповідати майбутнім потребам.

На першому етапі можна оцінити довжину передачі даних відповідно до стандартної таблиці рекомендованих відстаней для мереж Ethernet стандарту ISO/IEC 11801. Ця таблиця передбачає безперервну довжину кабелю без будь-яких пристроїв, з'єднань, роз'ємів та інших факторів втрат, які впливають на передачу сигналу.

Таблиця 1.2.

Рекомендовані відстані для мереж Ethernet стандарту ISO/IEC 11801.

Мережевий додаток (IEEE 802.3)	Довжина хвилі	Максимальна довжина каналу (ISO/IEC 11801)	
		волокно 50 мкм	волокно 62,5 мкм
10BASE-SR/SW	850 нм	300 м	33 м
10BASE-LX4	1300 нм	300 м	300 м

На другому етапі кабельна інфраструктура повинна відповідати максимальному загасанню каналу, щоб забезпечити надійну передачу сигналу на відстань. Це значення загасання повинно враховувати наскрізні втрати в каналі, в тому числі:

Профіль загасання волокна відповідно до 3,5 дБ/км для багатомодових волокон на довжині хвилі 850 нм і 1,5 дБ/км для багатомодових волокон на довжині хвилі 1300 нм (згідно зі стандартами ANSI/TIA-568-B.3 та ISO/IEC 11801). З'єднання (зазвичай до 0,1 дБ втрат), роз'єми (зазвичай до 0,5 дБ втрат) та інші поширені втрати.

Одномодове волокно

Перевагою одномодового волокна (Рис. 1.24) є його вищі характеристики щодо пропускної здатності і загасання. Зменшений діаметр серцевини одномодового волокна обмежує світло лише одним способом поширення, повністю усуваючи модальну дисперсію.

З належними компонентами, що компенсують дисперсію, одномодове волокно може передавати сигнали зі швидкістю 10 і 40 Гбіт/с або вище на великі відстані. Пропускна здатність системи може бути додатково збільшена шляхом введення декількох сигналів з незначною різницею в довжині хвилі (мультиплексування з поділом по довжині хвилі) в одне волокно.

Малий розмір серцевини одномодового волокна, як правило, вимагає більш дорогих джерел світла і систем вирівнювання для досягнення ефективного

з'єднання. Крім того, зрощування і з'єднання також дещо ускладнені. Тим не менш, для високопродуктивних систем або для систем, довжина яких перевищує кілька кілометрів, одномодове волокно залишається найкращим рішенням.

Типові розміри одномодового волокна варіюються від 8 до 12 мкм серцевини і 125 мкм оболонки. Показник заломлення одномодового волокна зазвичай становить 1,465.

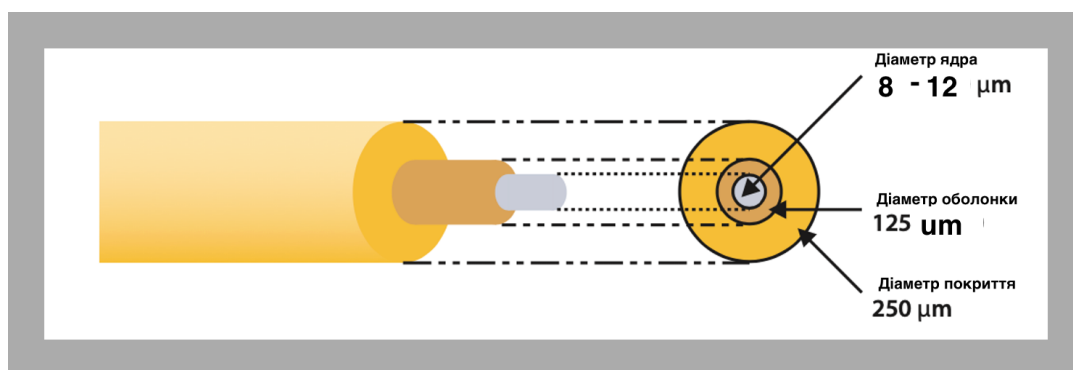


Рис. 1.24. Склад одномодового волокна.

Малий діаметр серцевини одномодового волокна зменшує кількість режимів поширення, тому за один раз по серцевині поширюється лише один промінь світла.

Діаметр поля моди

Діаметр поля моди (MFD) (Рис. 1.25) одномодового волокна можна виразити як ділянку волокна, через яку проходить більша частина світлової енергії. MFD більший за фізичний діаметр серцевини. Тобто, волокно з фізичним діаметром серцевини 8 мкм може мати MFD 9,5 мкм. Це явище відбувається тому, що частина світлової енергії також проходить через оболонку.

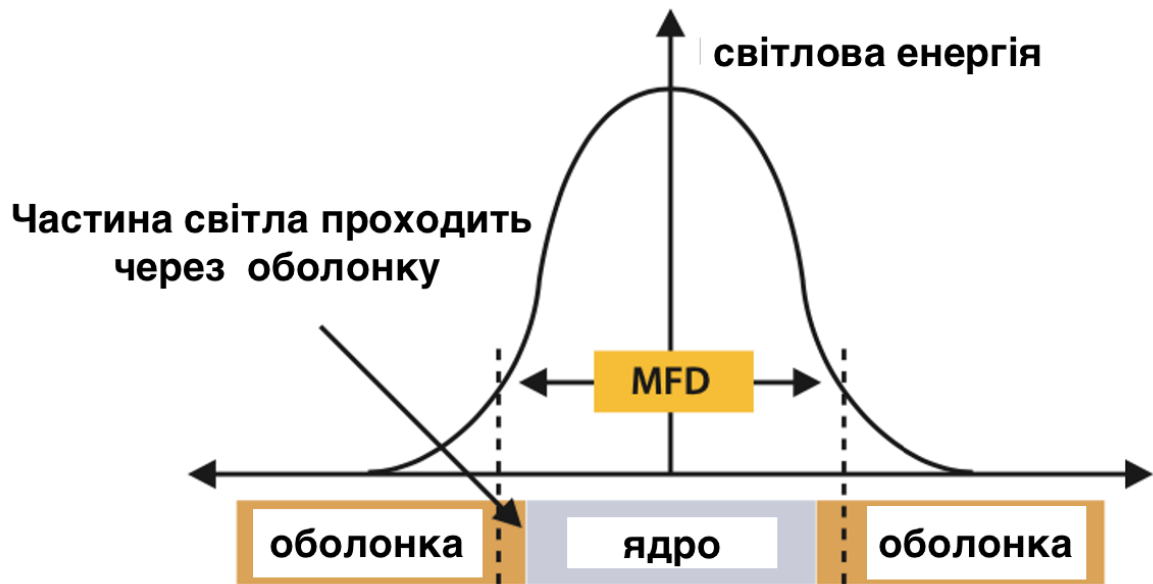


Рис. 1.25. MFD одномодового волокна.

Більші діаметри модових полів менш чутливі до бічного зсуву під час зрощування, але вони більш чутливі до втрат, спричинених згинанням під час монтажу або прокладання кабелю.

Ефективна площа

Ефективна площа (Рис. 1.26) - це ще один термін, який використовується для визначення діаметра поля моди. Ефективна площа - це площа волокна, що відповідає діаметру поля моди.

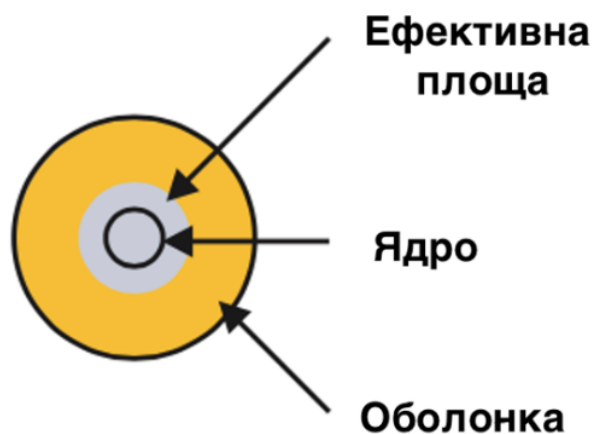


Рис. 1.26. Ефективна площа одномодового волокна.

Ефективна площа (або діаметр модового поля) безпосередньо впливає на нелінійні ефекти, які безпосередньо залежать від густини потужності світла, що вводить у волокно. Чим вища густина потужності, тим вища частота виникнення нелінійних ефектів.

Ефективна площа волокна визначає густину потужності світла. Для заданого рівня потужності мала ефективна площа забезпечить високу густину потужності. Відповідно, при більшій ефективній площі потужність краще розподіляється, а густина потужності стає менш важливою. Іншими словами, чим менша ефективна площа, тим більша ймовірність виникнення нелінійних ефектів.

Ефективна площа стандартного одномодового волокна становить приблизно 80 мкм, а для компенсуючого волокна вона може становити лише 30 мкм. Ефективна площа волокна часто включається в опис назви волокна, наприклад, Corning's LEAF (для волокна з великою ефективною площею).

Типи одномодових волокон

Існують різні типи одномодових волокон, які класифікуються за діапазоном загасання, значеннями хроматичної дисперсії (ХД) і коефіцієнтами поляризаційної модової дисперсії (PMD). ITU-T розробив набір стандартів для класифікації одномодових волокон (Рис. 1.27).

G.652: Characteristics of single-mode optical fiber and cable

	Characteristics	Wavelength Coverage	Applications
G.652.A	Max PMD = $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	1310 and 1550 nm regions (O and C bands)	Supports applications such as those recommended in G.957 and G.691 up to STM-16, 10 Gbps up to 40 km (Ethernet), and STM-256 for G.693.
G.652.B	Maximum attenuation specified at 1625 nm. Max PMD = $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	1310, 1550, and 1625 nm regions (O and C+L bands)	Supports some higher bit rate applications up to STM-64 in G.691 and G.692 and some STM-256 applications in G.693 and G.959.1. Depending on the application, chromatic dispersion accommodation may be necessary.
G.652.C	Maximum attenuation specified at 1383 nm (equal or lower than 1310 nm). Max PMD = $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	From O to C bands	Similar to G.652.A, but this standard allows for transmission in portions of an extended wavelength range from 1360 to 1530 nm. Suitable for CWDM systems.
G.652.D	Maximum attenuation specified from 1310 to 1625 nm. Maximum attenuation specified at 1383 nm (equal or lower than 1310 nm). Max PMD = $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	Wideband coverage (from O to L bands)	Similar to G.652.B, but this standard allows for transmission in portions of an extended wavelength range from 1360 to 1530 nm. Suitable for CWDM systems.

G.653: Characteristics of dispersion-shifted single-mode optical fiber and cable

	Characteristics	Wavelength Coverage	Applications
G.653.A	Zero chromatic dispersion value at 1550 nm. Maximum attenuation of 0.35 dB/km at 1550 nm. Max PMD = $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	1550 nm	Supports high bit rate applications at 1550 nm over long distances.
G.653.B	Same as G.653.A, except: Max PMD = $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	1550 nm	Introduced in 2003 with a low PMD coefficient, this standard supports higher bit rate transmission applications than G.653.

G.655: Characteristics of non-zero dispersion-shifted single-mode optical fiber and cable

	Characteristics	Wavelength Coverage	Applications
G.655.A	Maximum attenuation specified at 1550 nm only. Lower CD value than G.655.B and G.655.C. Max PMD = $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	C bands	Supports DWDM transmission (G.692) applications in the C bands with down to 200 GHz channel spacing.
G.655.B	Maximum attenuation specified at 1550 and 1625 nm. Higher CD value than G.655.A. Max PMD = $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	1550 and 1625 nm regions (C+L bands)	Supports DWDM transmission (G.692) applications in the C+L bands with down to 100 GHz channel spacing.
G.655.C	Maximum attenuation specified at 1550 and 1625 nm. Higher CD value than G.655.A. Max PMD = $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	From O to C bands	Similar to G.655.B, but this standard allows for transmission applications at high bit rates for STM-64/OC-192 (10 Gbps) over longer distances. Also suitable for STM-256/OC-568 (40 Gbps).

Рис. 1.27. Набір стандартів для класифікації одномодових волокон.

Прийнятий пізніше стандарт G.656 (06/2004) є продовженням G.655, але в ньому конкретно розглядається ширший діапазон довжин хвиль для передачі в діапазонах S, C і L (Рис. 1.28).

G.656: Characteristics of non-zero dispersion shifted fiber for wideband transport

	Characteristics	Wavelength Coverage	Applications
G.656	Maximum attenuation specified at 1460, 1550, and 1625 nm. Minimum CD value of 2 ps/nm·km between 1460 and 1625 nm. Max PMD = 0.2 ps/√km	S, C, and L bands	Supports both CWDM and DWDM systems throughout the wavelength range of 1460 and 1625 nm.

G.657: Characteristics of a bending loss insensitive single-mode fiber for access network

	Characteristics	Wavelength Coverage	Applications
G.657.A	At 15 mm radius, 10 turns, 0.25 dB max at 1550 nm, 1 dB max at 1625 nm	Wideband coverage (from 0 to L bands)	Optimized access installation with respect to macro bending, loss, others parameters being like G.652D
G.657.B	At 15 mm radius, 10 turns, 0.03 dB max at 1550 nm, 0.1 dB max at 1625 nm	Wideband coverage (from 0 to L bands)	Optimized access installation with very short bending radii

Рис. 1.28. Набір стандартів для класифікації одномодових волокон.

Огляд одномодового та багатомодового волокна

У наступній таблиці (Табл. 1.3) наведено коротке порівняння багатомодового та одномодового волокна.

Таблиця 1.3.

Огляд одномодового та багатомодового волокна.

	Багатомодове	Одномодове
Ціна	Дороге	Менш дороге
Передавальне обладнання	Базові та недорогі (світлодіодні)	Дорожче (лазерний діод)
Довжина хвиль передачі	850 до 1300 нм	1260 до 1650 нм
Використання	Більша серцевина, простіше в обігу	Більш складні з'єднання
Відстані	Локальні мережі (< 2 км)	Мережі доступу/середнього/далекого радіусу дії (> 200 км)
Пропускна здатність	Обмежена пропускна здатність (100 Гбіт/с на дуже короткі відстані)	Майже нескінченна пропускна здатність (> 1 Тбіт/с для технології DWDM)

Продовження таблиці 1.3.

Висновок	Волокно дорожче, але розгортання мережі відносно недороге.	Забезпечує вищу продуктивність, але побудова мережі коштує дорого.
----------	--	--

1.2 Обчислення коефіцієнту бітових помилок BER у волоконно оптичних комунікаційних системах

Будучи синхронізованим з оптичним сигналом, що приходить, фотоприймач періодично в оптимальні моменти часу проводить обробку прийнятого сигналу - реєструє інтенсивність оптичного сигналу і за певним пороговим значенням вирішує, який сигнал прийнято - 0 або 1 (Рис. 1.29). Якість роботи цифрової системи зв'язку можна оцінити за око-діаграмою.

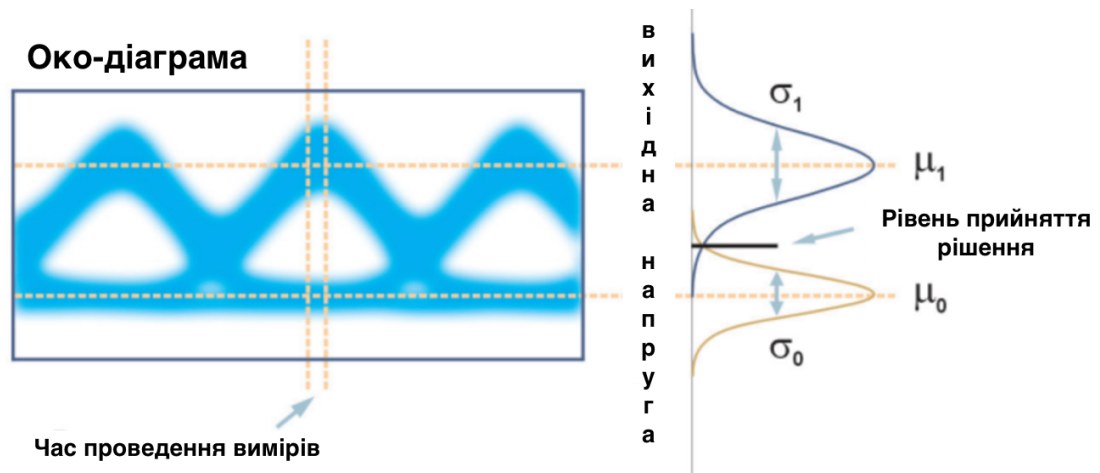


Рис. 1.29. Типовий вигляд око-діаграми при використанні коду RZ (повернення до нуля) під час приймання оптичного сигналу. Праворуч показано модельну схему гауссовських розподілів напруг.

До зниження якості цифрового передавання призводить багато чинників: дисперсія, нелінійні ефекти у волокні, нестабільність нелінійні ефекти у волокні, нестабільність таймерів, посилене спонтанне випромінювання та та ін.

Кумулятивний вплив цих факторів добре описується всього чотирма параметрами:

рівнями μ_0 , μ_1 сигналів, що відповідають 0 і 1, і їхніми середньоквадратичними відхиленнями σ_0 , σ_1 .

Понад те, для розрахунку BER потрібно ще менше інформації, а саме, знання тільки одного параметра – Q-фактора, який визначається таким виразом:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}; \quad (1.5)$$

де μ_1 – рівень корисного сигналу, μ_0 – рівень шуму, σ_1 , σ_0 – середньоквадратичні відхилення корисного сигналу та шуму відповідно.

Можна аналітично виразити BER як функцію Q з використанням функції помилок.

Якщо задано необхідне значення BER, то користуючись виразом (1.6) можна знайти необхідне значення Q-фактора.

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}}; \quad (1.6)$$

Робота цифрових систем зв'язку вважається нормальною тільки в тому разі, якщо коефіцієнт бітових помилок BER не перевищує певний допустимий рівень, що залежить від використовуваного мережевого стандарту. Сучасні оптичні лінії зв'язку будуються так, щоб задовольнити будь-якому мережевому стандарту. Тому під час їх розрахунку та будівництві закладається досить жорстке обмеження рівня помилок (від $BER = 1 \cdot 10^{-11}$ до $BER = 1 \cdot 10^{-15}$).

Висновки за розділом 1

У першому розділі було досліджено основні принципи поширення лазерного випромінювання у волоконно-оптичних лініях зв'язку. Загальносистемні відомості розкрили основні аспекти цієї теми, включно з різними типами оптоволокон та їхніми характеристиками. Аналіз обчислення коефіцієнта бітових помилок (BER) у волоконно-оптичних комунікаційних системах надав поглиблене розуміння ефективності передачі даних у таких системах.

Отримані знання відкривають шлях для подальших досліджень та оптимізації волоконно-оптичних технологій для забезпечення високої якості та ефективності зв'язку.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХРОМАТИЧНОЇ ДИСПЕРСІЇ НА ТРИВАЛІСТЬ ВИХІДНОГО ІМПУЛЬСУ

Хроматична дисперсія (ХД), важливий параметр волокна, обмежує пропускну здатність при збільшенні швидкості передачі, особливо в оптично підсилених лініях зв'язку середньої та великої протяжності. Характеристика ХД волокна має вирішальне значення для розуміння обмежень передачі і впровадження правильного рішення для компенсації, щоб відповідати вимогам системи передачі. Для вимірювання ХД можна використовувати різні методи.

2.1 Визначення хроматичної дисперсії

ХД - це властивість середовища (оптичного волокна), яка змушує різні довжини світлових хвиль поширюватися з різною швидкістю, коли вони рухаються в ньому. В оптичному волокні як залежність довжини хвилі самого матеріалу (скла), так і властивості структури показника заломлення (IOR) створюють світловод, в якому світло утримується і поширюється.

В оптичних телекомунікаціях імпульс світла випускається з джерела світла та складається з декількох довжин хвиль (кольорів), кожна з яких поширюється з різною швидкістю (груповою швидкістю), завдяки ХД.

Джерело світла - це пристрій, який забезпечує безперервну хвилю (БХ) і стабільне джерело енергії для вимірювання загасання. Воно включає в себе джерело, або світлодіод (LED), або лазер, який стабілізується за допомогою механізму автоматичного регулювання посилення. Світлодіоди зазвичай використовуються для багатомодового волокна. З іншого боку, лазери використовуються для одномодових волокон.

Таблиця 2.1.

Порівняння світлодіодів і лазерів.

Характеристики	LED	Лазери
----------------	-----	--------

Продовження таблиці 2.1.

Вихідна потужність	Лінійно пропорційна струму	Пропорційна струму, що перевищує поріг
Струм	Середній	Високий
Швидкість	Менша	Більша
Паттерн виводу	Вищій	Нижчий
Пропускна здатність	Середня	Висока
Доступні довжини хвиль	від 0,66 до 1,65 мм	від 0,78 до 1,65 мм
Спектральна ширина	Ширше (від 40 до 190 нм FWHM)	Вужча (від 0,00001 до 10 нм FWHM)
Тип волокна	Тільки багатомодове	Одномодові та багатомодові
Простота використання	Простіше	Важче
Тривалість життя	Довше	Довге
Вартість	Низька	Висока

Імпульс поширюється (Рис. 2.1), оскільки довжини хвиль надходять через різні проміжки часу. Залежність групової швидкості від довжини хвилі групової швидкості формально називається дисперсією групової швидкості. Однак терміни дисперсія групової швидкості і ХД зазвичай використовуються як взаємозамінні для опису поширення довжин хвиль з різними швидкостями.

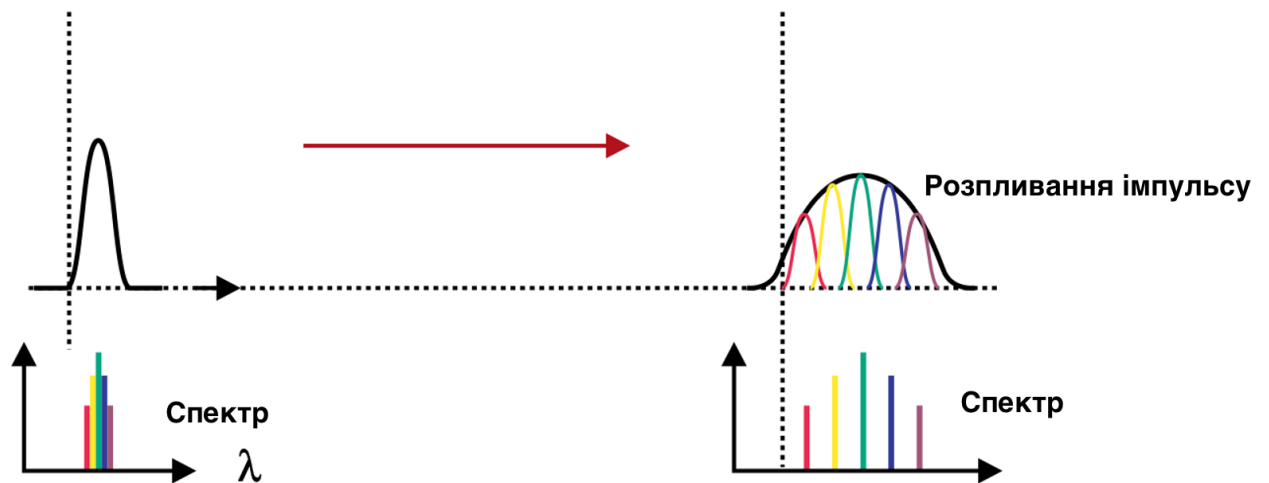


Рис. 2.1. Поширення імпульсу, спричинене довжинами хвиль, що рухаються з різними груповими швидкостями.

Поширення імпульсів (Рис. 2.2) в оптичних передачах з щільним мультиплексуванням з поділом по довжині хвилі (DWDM) може поширюватися на сусідні бітові періоди і погіршувати або знижувати якість передачі, що призводить до поганого прийому сигналу.

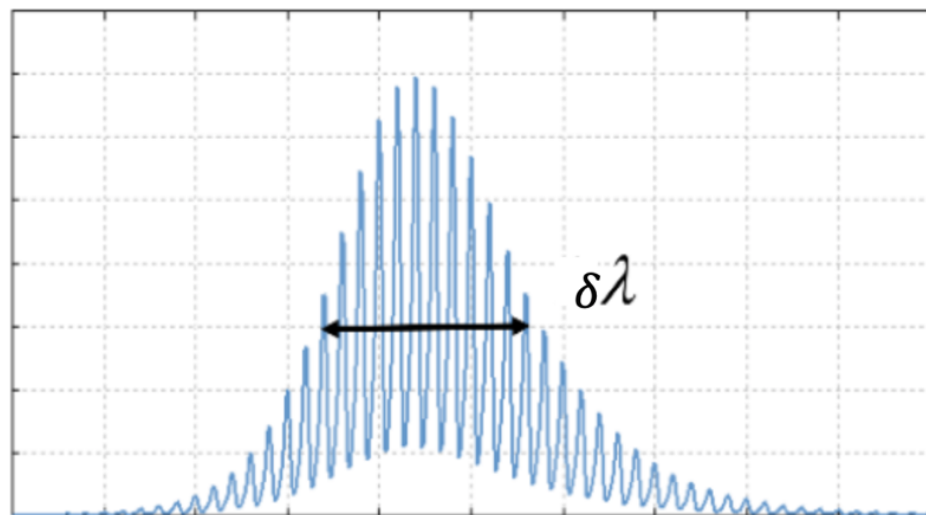


Рис. 2.2. Поширення імпульсу.

ХД призводить до розпливання імпульсу. Оцінити збільшення тривалості імпульсу можна формулою (2.1).

$$\Delta\tau_{\text{хр}} = D * L * \delta\lambda ; \quad (2.1)$$

D – показник ХД, L – довжина волокна, $\delta\lambda$ - ширина контуру підсилення.

Однак ця формула не дає змоги оцінити зменшення рівня корисного сигналу $\Delta\mu = \mu_1 - \mu'_1$ за рахунок ХД, як видно на (Рис. 2.3).

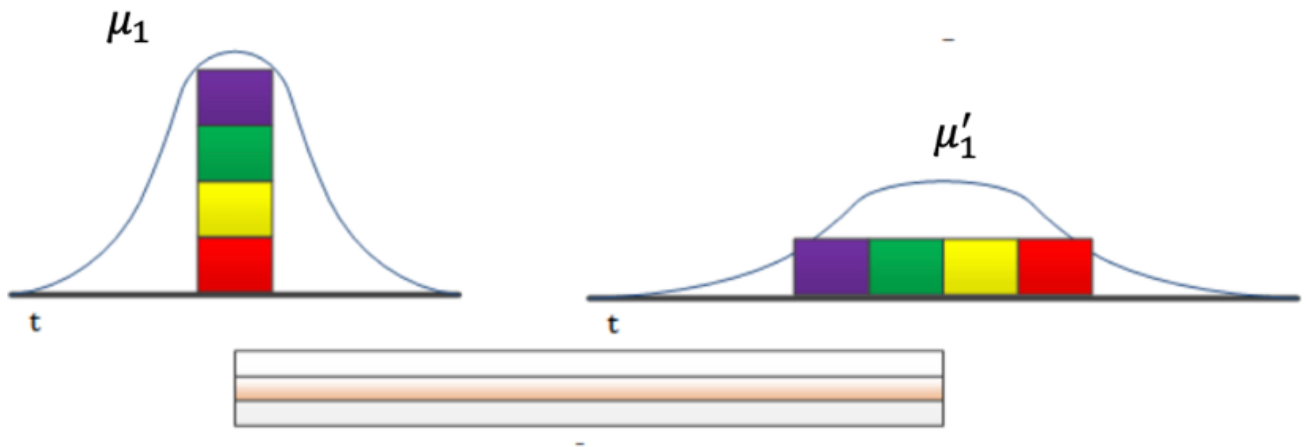


Рис. 2.3. μ_1 – рівень корисного сигналу на початку відрізка ВОЛЗ, μ'_1 – рівень корисного сигналу на виході з відрізка ВОЛЗ.

Виникає завдання розроблення комп'ютерної моделі, що дасть змогу оцінювати зменшення корисного сигналу μ_1 при варіюванні технічних параметрів системи.

Параметри хроматичної дисперсії

ХД даного волокна являє собою відносну затримку приходу (в пс) двох компонентів довжини хвилі, розділених одним нанометром (нм). Розглянемо ці чотири параметри:

Значення ХД для даної довжини хвилі, виражене в пс/нм (ХД може змінюватися в залежності від довжини хвилі).

Коефіцієнт ХД (позначається як D) - значення нормалізоване до відстані зазвичай в один кілометр, що виражається в пс/(нм х км).

Нахил ХД (S) - представляє величину зміни ХД як функцію довжини хвилі, виражену в пс/нм².

Коефіцієнт нахилу ХД - значення нормалізоване до відстані зазвичай в один кілометр, виражене в пс/(нм² х км).

Довжина хвилі з нульовою дисперсією, λ_0 , виражена в нм, визначається як довжина хвилі з ХД, що дорівнює нулю. Робота на цій довжині хвилі не призводить до виникнення ХД, але, як правило, викликає проблеми, пов'язані з оптичною нелінійністю і ефектом змішування чотирьох хвиль в системах DWDM. Нахил на цій довжині хвилі визначається як нульовий дисперсійний нахил (S_0).

Варіація хроматичної дисперсії

ХД зазвичай не змінюється суттєво з часом і умовами монтажу через низьку чутливість до температури, зазвичай -0.0025 пс/(нм $\times$ км $\times$ $^{\circ}\text{C}$) для коефіцієнта і 0.0025 пс/(нм² $\times$ км $\times$ $^{\circ}\text{C}$) для нахилу.

Негативна та позитивна хроматична дисперсія

Коли ХД позитивна, короткі хвилі поширюються швидше, ніж довгі (Рис. 2.4). Коли ХД від'ємна, короткі хвилі поширюються повільніше. Протилежне стосується довгих хвиль, які поширюються повільніше, коли ХД додатна, і швидше, коли ХД від'ємна.

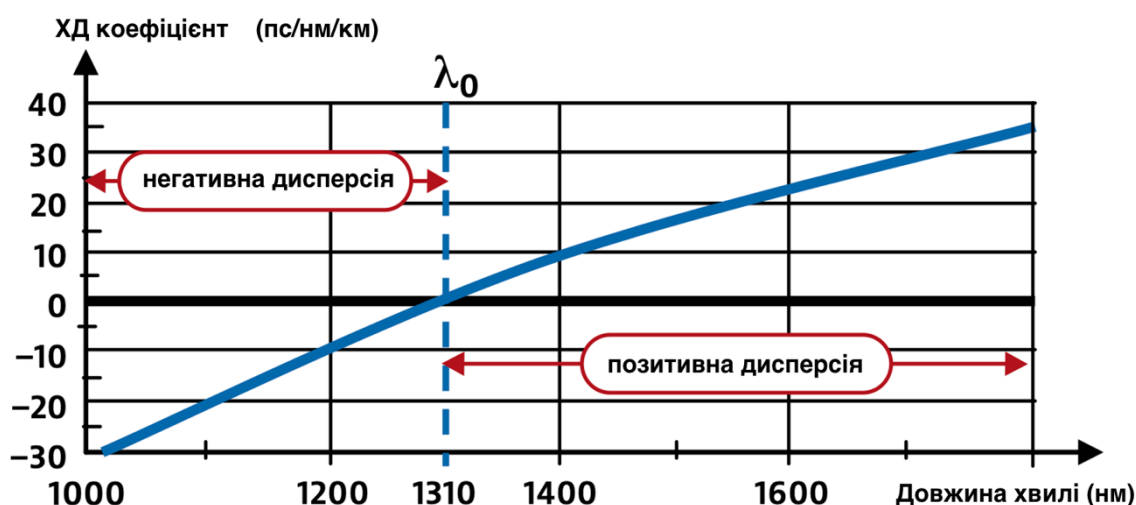


Рис. 2.4. Негативна та позитивна ХД.

Негативна дисперсія часто використовується для компенсації надмірної позитивної дисперсії в оптоволоконній мережі передачі.

Дисперсійний нахил

Дисперсійний нахил (S) описує величину зміни ХД як функцію довжини хвилі. Виражається в одиницях пс/(нм² х км). Нахил при λ_0 позначається як S_0 і виражається в пс/(нм² х км). Як показано нижче (Рис. 2.5), ХД є похідною від відносної затримки імпульсу. Нахил ХД є похідною від значень ХД.

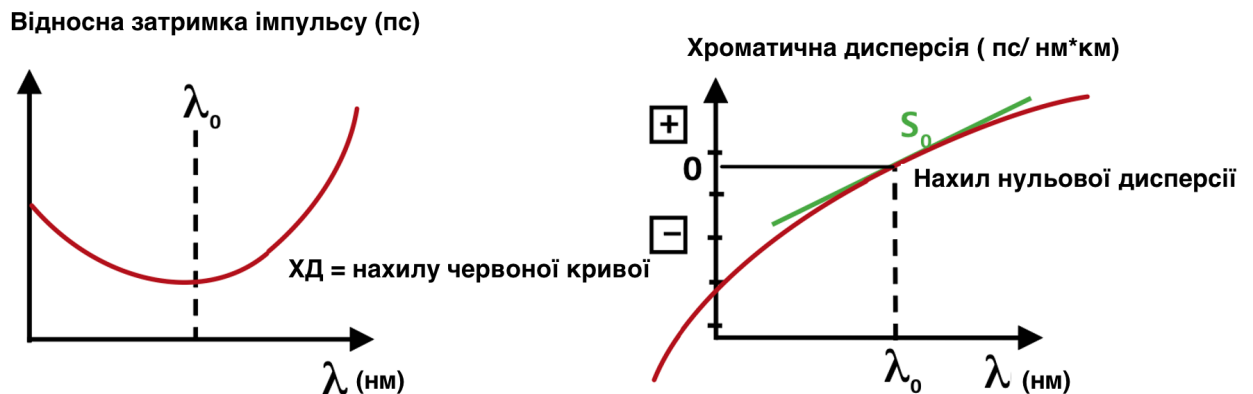


Рис. 2.5. Приклад затримки імпульсу, ХД та дисперсійний нахил.

Виробники оптоволокна використовують коефіцієнт дисперсії (пс/[нм х км]) для визначення параметрів оптоволокна, тоді як виробники обладнання використовують загальне значення дисперсії (пс/нм) для забезпечення придатності оптоволокна для передачі заданої довжини хвилі із заданою швидкістю передачі.

Таблиця 2.2.

Приклад специфікацій коефіцієнта оптичного волокна ХД.

С-діапазон: з 1530 до 1565 нм	2,6 до 6,0 пс/(нм * км)
L-діапазон: від 1565 до 1625 нм	4,0 до 8,9 пс/(нм * км)
Нахил дисперсії на 1550 нм	≤ 0.05 пс/(нм ² * км)

Менший нахил дисперсії призводить до менших змін дисперсії по всій довжині хвилі, і, таким чином, ХД залишається постійним як функція довжини хвилі (Рис. 2.6). Для високошвидкісних багатоканальних DWDM-мереж менший нахил дисперсії забезпечує більш рівномірну, оптимальну продуктивність по всій довжині хвилі DWDM.

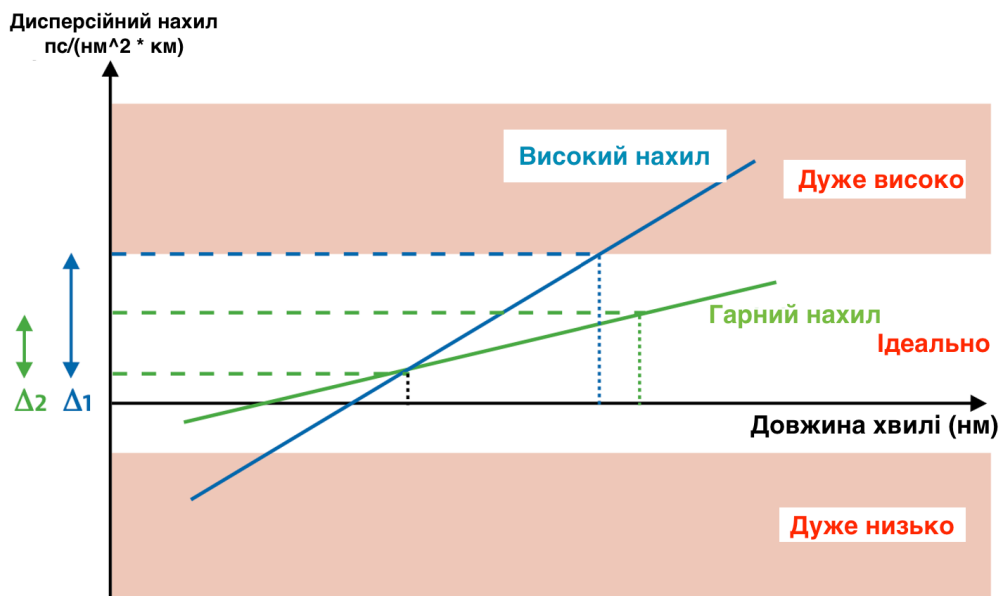


Рис. 2.6. Зміна нахилу дисперсії.

Модулі компенсації дисперсії компенсують як дисперсію волокна, так і нахил дисперсії, таким чином балансуючи ХД по всій довжині хвилі DWDM. Ця можливість є критично важливою для мереж, що підтримують реконфігуровані оптичні модулі додавання/вилучення (ROADM), оскільки необхідна широкопasmтова компенсація дисперсії, як правило, встановлюється на кожному вузлі ROADM.

Причини хроматичної дисперсії

Дисперсія матеріалу і дисперсія хвилеводу разом викликають ХД в одномодових волокнах.

Дисперсія матеріалу

IOR матеріалу, з якого складається серцевина волокна, наприклад, скла і/або домішок, залежить від довжини хвилі. Отже, швидкість (групова швидкість) кожного компонента довжини хвилі може змінюватися залежно від довжини хвилі (Рис. 2.7).

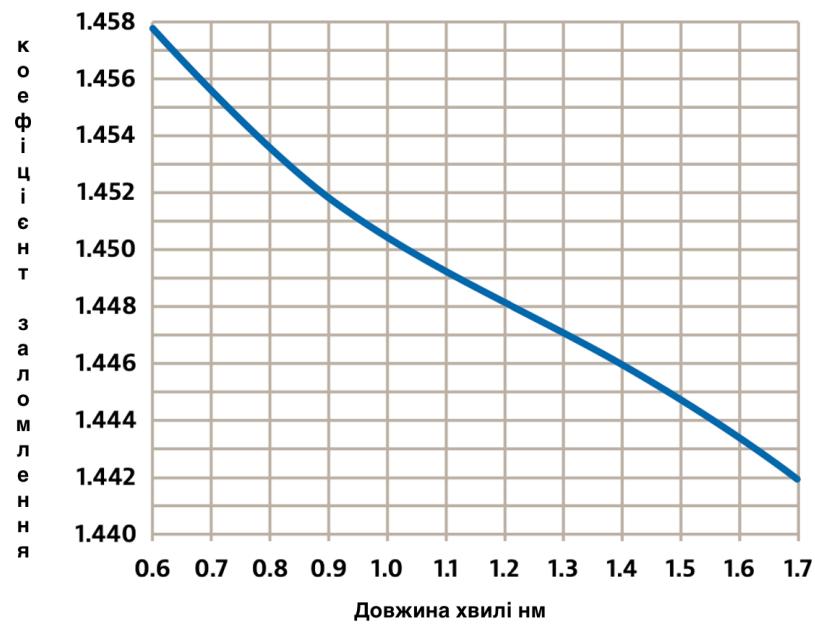


Рис. 2.7. Показник заломлення кварцового скла, що використовується в оптичному волокні, як функція довжини хвилі.

Дисперсія хвильоводу

Хвильоводна дисперсія - це варіація групової швидкості різних за довжиною хвилі компонентів світла, спричинена насамперед діаметром модового поля (MFD), або діаметром світлового пучка в межах довжини хвилі одномодового волокна.

Інженерні відмінності в IOR між серцевиною волокна і областями оболонки призводять до того, що світло поширюється швидше в оболонці, ніж в серцевині. Різниця в швидкості поширення в основному не залежить від довжини хвилі. Тому зі збільшенням MFD більший відсоток світла поширюється в області оболонки, що призводить до більш швидкого поширення (Рис. 2.8).



Рис. 2.8. Зміна MFD в залежності від довжини хвилі.

Довші довжини хвиль мають більшу MFD і, отже, швидше поширюються. Профіль індексу волокна (зміна IOR у волокні) і MFD (світлова поверхня довжини хвилі) разом визначають хвильоводну дисперсію.

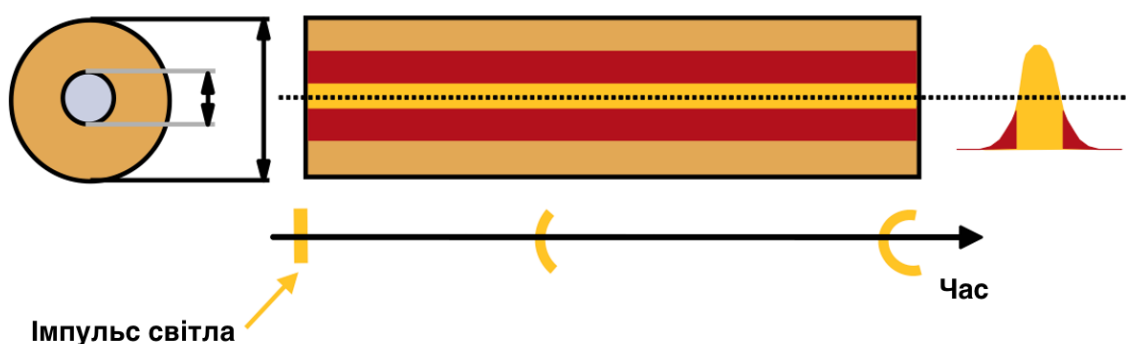


Рис. 2.9. Світло поширюється швидше в обшивці (червоний), ніж в ядрі (помаранчевий).

Дисперсія хвильоводу (на одиницю довжини) залежить від багатьох параметрів:

Δn , різниця між IOR серцевини та IOR облицювання, або індексний профіль.

Діаметр серцевини - зі зменшенням діаметра серцевини дисперсія, як правило, збільшується.

Виготовлення волокна (визначає форму серцевини та оболонки, а також профіль радіального індексу).

Виробники волокон зазвичай регулюють дисперсію хвильоводу для досягнення певних характеристик ХД.

2.2 Технологія компенсації дисперсності волокон

На сьогоднішній день технологія компенсації дисперсії волокна в основному включає в себе волокно, що компенсує дисперсію (DCF), волоконну решітку Брегга (FBG), технологію електричної компенсації дисперсії та інші методи. Технологія компенсації дисперсії DCF з використанням основної моди є відносно зрілою, простою і відносно практичною. Наведена нижче таблиця покаже вам різницю між цими технологіями (Табл. 2.1).

Таблиця 2.3.

Порівняння технологій компенсації ХД.

Типи	DCM	FDCM
Технологія	DCF	FBG
Втрати при введенні	Майже лінійні з довжиною, яку потрібно компенсувати 2 5 дБ-8 дБ	≤ 3.0 дБ максимум
Нелінійні ефекти	Так	Ні
Дисперсність регульована	Ні	Ні
Швидкість передачі даних	10 Г	40 Г / 100 Г
Передача	10-140 км	80 – 120 км

Волокно для компенсації дисперсії

Волокно з компенсацією дисперсії (DCF) - це спеціальне волокно з негативною хроматичною дисперсією, яке є прямою протилежністю волокну і може скасувати ефект звичайної дисперсії.

Як показано на рисунку нижче, для періодичної компенсації дисперсії використовується волокно з компенсацією дисперсії (DCF), знак дисперсії якого протилежний знаку дисперсії передавального волокна. Від'ємний дисперсійний нахил дозволяє ефективно компенсувати дисперсію в більшому діапазоні довжин хвиль, оскільки дисперсійний нахил стандартного волокна зазвичай позитивний.

Як правило, коротка довжина волокна з компенсацією дисперсії зростається з довшою довжиною стандартного волокна для компенсації дисперсії.

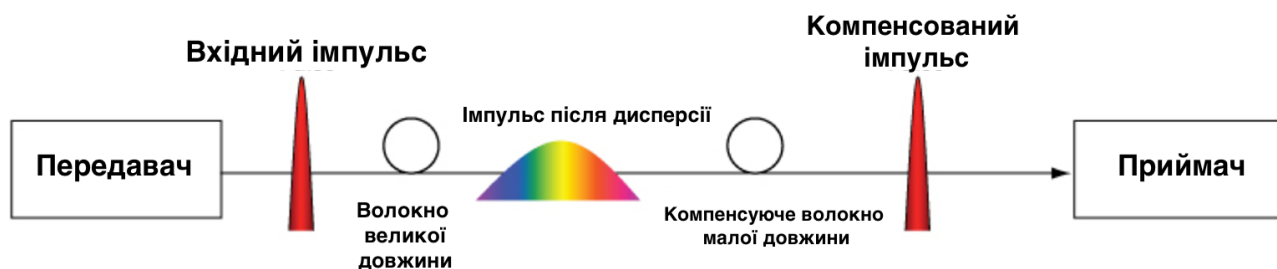


Рис. 2.10. Компенсація дисперсії за допомогою DCF.

Загальну дисперсію волоконної системи можна оцінити за допомогою:

$$XД_{\text{загальна}} = XД_{\text{повна}} + XД_{\text{компенсована}} + XД_{\text{інша}}; \quad (2.2)$$

$XД_{\text{повна}}$ - повна хроматична дисперсія волокна. $XД_{\text{компенсована}}$ - сумарна хроматична дисперсія систем компенсації дисперсії. $XД_{\text{інша}}$ - сумарна хроматична дисперсія за рахунок інших компонентів.

Компенсація дисперсії за допомогою FBG

Волоконні бреггівські решітки виготовляються шляхом бічного впливу на серцевину одномодового волокна періодичного патерну інтенсивного лазерного випромінювання. Вплив призводить до постійного збільшення показника заломлення серцевини волокна, створюючи модуляцію з фіксованим показником заломлення відповідно до схеми впливу. Ця модуляція з фіксованим індексом називається решіткою.

При кожній періодичній зміні заломлення відбивається невелика кількість світла. Всі відбиті світлові сигнали когерентно об'єднуються в одне велике відбиття на певній довжині хвилі, коли період решітки становить приблизно половину довжини хвилі вхідного світла. Це називається умовою Брегга, а довжина хвилі, на якій відбувається це відбиття, називається довжиною хвилі Брегга. Світлові сигнали з довжинами хвиль, відмінними від довжини хвилі Брегга, які не узгоджені за фазою, по суті, прозорі. Цей принцип показаний на (Рис. 2.9).

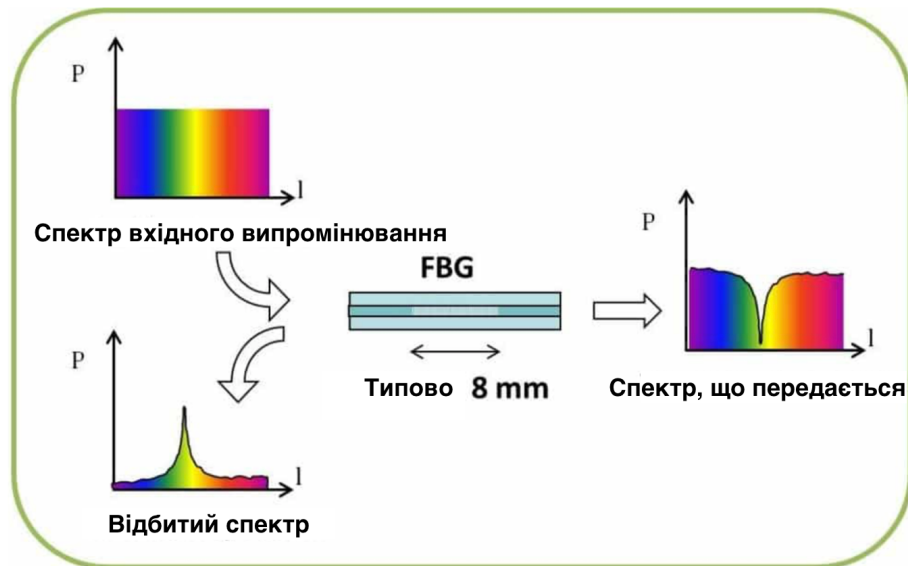


Рис. 2.11. Принцип роботи FBG.

Тому світло поширюється через решітку з незначним ослабленням або зміною сигналу. Тільки ті довжини хвиль, які задовольняють умову Брегга, зазнають впливу і сильного зворотного відбиття. Можливість точно встановлювати і підтримувати довжину хвилі решітки є фундаментальною особливістю і перевагою волоконних брегівських решіток.

Центральна довжина хвилі відбитої компоненти задовольняє співвідношенню Брегга: $\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda$, де n - показник заломлення, а Λ - період зміни показника заломлення FBG. Через температурну і деформаційну залежність параметрів n і Λ , довжина хвилі відбитої компоненти також буде змінюватися як функція температури і/або деформації (Рис. 2.10). Ця залежність добре відома, що дозволяє визначати температуру або деформацію за довжиною відбитої хвилі FBG.

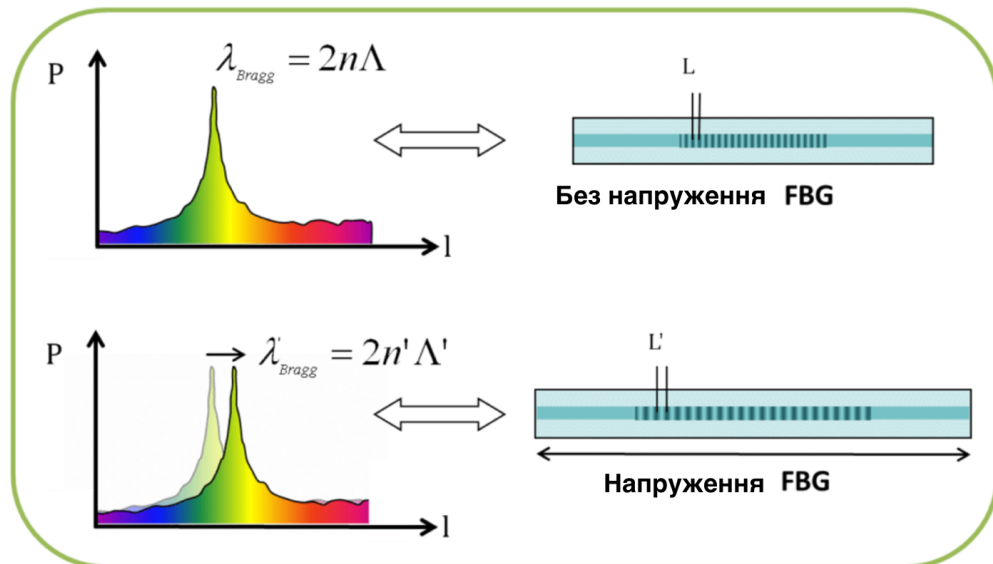


Рис. 2.12. Співвідношення Брегга.

Таким чином показано що ХД призводить до зменшення рівня корисного сигналу і критично важливим є необхідність розрахунку параметрів системи з урахуванням цього фактору.

З цією метою було розроблено імітаційну комп'ютерну модель.

Висновки за розділом 2

У цьому розділі було проведено глибокий аналіз впливу хроматичної дисперсії на тривалість вихідного імпульсу в оптоволоконних комунікаційних системах. Здійснено визначення та розгляд параметрів хроматичної дисперсії, включаючи її вплив на розпливання імпульсу. Запропонована формула для оцінки збільшення тривалості імпульсу стала основою для подальших розрахунків.

Важливим викликом, що виник, є необхідність розроблення комп'ютерної моделі, яка дозволить ефективно оцінювати зменшення рівня корисного сигналу внаслідок хроматичної дисперсії при зміні технічних параметрів системи. Ця модель буде важливим інструментом для попередження та компенсації негативних впливів дисперсії на якість передачі сигналу.

Також було розглянуто різницю між негативною та позитивною хроматичною дисперсією, а дисперсійний нахил був визначений як важливий показник в оцінці впливу хроматичної дисперсії на сигнал.

Аналіз причин виникнення хроматичної дисперсії і вивчення можливостей використання спеціального волокна для її компенсації дозволяють зрозуміти основні механізми цього ефекту та розробити стратегії для його ефективного управління.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У СВІТЛОВODІ ІЗ ЗАДАНИМ ПРОФІЛЕМ

3.1 Вибір мови програмування та середовища розробки.

Додаткові інструменти

Mathcad - це система обчислень і аналізу інженерних та наукових даних, яка дозволяє виконувати математичні обчислення, побудову графіків, статистичний аналіз та інші наукові завдання у середовищі зручному для інженерів та науковців.

Mathcad використовує власну мову програмування, яка є унікальною та специфічною для цього програмного забезпечення. Нижче наведено детальний опис основних характеристик цієї мови програмування:

1. Виразність:

Мова програмування Mathcad створена так, щоб інженери та науковці могли виразно виражати свої математичні концепції. Синтаксис спроектований таким чином, щоб математичні вирази виглядали аналогічно до ручних обчислень на папері.

2. Математичні Операції:

Мова Mathcad включає у себе велику кількість математичних операцій, включаючи арифметичні операції (+, -, *, /), розв'язання рівнянь, інтегрування, диференціювання та роботу зі спеціальними математичними функціями.

3. Символьне Обчислення:

MathCad дозволяє використовувати символьне обчислення, що дозволяє виводити аналітичні вирази, вирішувати системи рівнянь та виконувати символьні маніпуляції з виразами.

4. Графічний Вивід:

Важливою особливістю мови є можливість візуального виводу математичних виразів у графічному форматі, що спрощує розуміння та аналіз результатів.

5. Вбудовані Функції та Оператори:

MathCad постачається з багатим набором вбудованих функцій та операторів для розв'язання різних завдань, від стандартних математичних операцій до спеціалізованих інженерних функцій.

6. Чисельні Методи та Оптимізація:

Мова має вбудовані чисельні методи для оптимізації та розв'язання складних математичних задач.

7. Легкість Використання:

Синтаксис MathCad розроблений так, щоб спростувати введення та редагування математичних виразів, надаючи користувачам зручний інтерфейс для роботи з обчисленнями.

В цілому, мова програмування MathCad орієнтована на зручність та виразність для інженерів та науковців, що використовують програму для розв'язання математичних завдань та аналізу наукових даних.

3.2 Методика розрахунків

Для створення комп'ютерної симуляції проходження променя через волоконно-оптичний кабель (ВОЛЗ) на основі програмного забезпечення MathCad, була розроблена математична модель, яка описує фізичні залежності між змінними, задіяними у процесі передачі світла через оптичне волокно.

Алгоритм роботи моделі ВОЛЗ з урахуванням хроматичної дисперсії:

- Розрахунок довжини хвилі центральної моди (3.1).

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}; \quad (3.1)$$

c - швидкість світла, ν – частота випромінювання.

- Розрахунок відстані окремої моди від сусідньої (3.2).

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot n_{\text{нп}} \cdot l}; \quad (3.2)$$

λ_0 - довжина хвилі центральної моди світлового імпульсу, $n_{\text{нп}}$ – показник переломлення напівпровідника, l – довжина резонатору лазера.

- Розрахунок довжини хвилі окремої моди (3.3).

$$\lambda_i = \lambda_0 \pm m * \Delta\lambda; \quad (3.3)$$

λ_i – довжина хвилі окремої моди, m - кількість мод.

- Розрахунок показника переломлення кожної окремої моди (3.4).

$$n_i = \sqrt{1 + \frac{B_1 * \lambda_i^2}{\lambda_i^2 - c_1} + \frac{B_2 * \lambda_i^2}{\lambda_i^2 - c_2} + \frac{B_3 * \lambda_i^2}{\lambda_i^2 - c_3}}; \quad (3.4)$$

B, C коефіцієнти з довідкової літератури для речовини з якої виготовлена серцевина оптичного волокна.

- Розрахунок швидкості кожної окремої моди (3.5).

$$V_i = \frac{c}{n_i}; \quad (3.5)$$

c - швидкість світла.

- Розрахунок часу проходження відрізка ВОЛЗ кожної окремої моди (3.6).

$$t_i = \frac{L}{V_i}; \quad (3.6)$$

L – довжина відрізка ВОЛЗ.

Для розрахунку BER (3.8) потрібен лише один параметр - Q-фактор (3.7), що визначається наступним виразом:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}; \quad (3.7)$$

де μ_1 – рівень корисного сигналу, μ_0 – рівень шуму, σ_1, σ_0 – середньоквадратичні відхилення корисного сигналу та шуму відповідно.

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}}; \quad (3.8)$$

Таким чином видно, що рівень корисного сигналу μ_1 визначає важливіший технічний параметр волоконно оптичної лінії зв'язку - BER.

Для розрахунку рівня корисного сигналу μ_1 треба визначити кількість мод у яких Δt (Номер формули) – різниця в часі проходження відрізка ВОЛЗ кожної окремої моди та центральної моди $> \tau$ – заданий часовий інтервал довжини імпульсу.

$$\Delta t = t_{i_i} - t_0; \quad (3.10)$$

t_{i_i} – час проходження відрізка ВОЛЗ кожною окремою модою, t_0 – час проходження відрізка ВОЛЗ центральною модою.

Після розрахунку, Δt порівнювали з тривалістю імпульсу – τ . Якщо величина Δt була меншою від тривалості імпульсу, вважали, що відповідна мода бере участь у визначенні величини μ_1 , а якщо часовий інтервал Δt перевищував тривалість імпульсу, ця мода вибувала із загальної кількості мод, що формують параметр μ_1 , і в такий спосіб параметр μ_1 , зменшувався.

- Розрахунок рівня корисного сигналу (Рис. 3.1).

$$\mu_1 := \begin{cases} \mu_1 \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..2m_i \\ \mu_1 \leftarrow \mu_1 + 1 \text{ if } \left(|t_{i_i} - t_0| \right) < \tau \\ \mu_1 \end{cases}$$

Рис. 3.1. Розрахунок рівня корисного сигналу.

(Програмний код на базі середовища розробки мат. моделювання MathCad).

m_i – кількість мод, τ – часовий інтервал довжини імпульсу, t_{i_i} – час проходження відрізка ВОЛЗ кожною окремою модою, t_0 – час проходження відрізка ВОЛЗ центральною модою.

Головною метою розрахунків є отримання графічного представлення залежності коефіцієнта бітових помилок (BER) від довжини волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Наступним кроком буде побудова графіку функції BER від L – довжина відрізка ВОЛЗ за допомогою графічних можливостей середи математичного моделювання MathCad.

Висновки за розділом 3

У цьому розділі була ретельно розглянута розробка імітаційної моделі поширення лазерного випромінювання у світловоді з заданим профілем. Проведено вибір мови програмування та середовища розробки, приділяючи увагу зручності та ефективності в контексті інженерних завдань. MathCad обрано як інструмент для створення математичної моделі та проведення розрахунків.

Методика розрахунків була описана з деталізацією алгоритму роботи моделі волоконно-оптичного кабелю з урахуванням хроматичної дисперсії. Розрахунки рівня корисного сигналу та його впливу на BER стали ключовим етапом аналізу. Зазначено важливість розрахунків за допомогою MathCad для отримання графічного представлення функції BER в залежності від довжини відрізка волоконно-оптичного кабелю.

Отже, результати цього розділу не лише демонструють можливості моделювання в MathCad, але і вказують на значущість розгляду та аналізу параметрів системи для оптимізації передачі світлового сигналу в оптоволоконних комунікаційних системах.

РОЗДІЛ 4.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Описана вище модель дала змогу провести розрахунки довжини ділянки лінії зв'язку – L, на кінці якої параметр BER досягає критичного значення $1 * 10^{-11}$.

З цією метою було проведено сукупність розрахунків параметра BER залежно від довжини – L, за фіксованих параметрів технічної системи – (Табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Параметри технічної системи.

$m = 70$	m - кількість мод
$n_{\text{нп}} = 3.5$	$n_{\text{нп}}$ – показник переломлення напівпровідника
$\lambda_0 = 1.5 * 10^{-3}$ (м)	λ_0 - довжина хвилі центральної моди світлового імпульсу
$l = 1 * 10^{-3}$ (м)	l – довжина резонатору лазера
$\tau = 83000 * 10^{-12}$ (с)	τ – часовий інтервал довжини імпульсу
$B_1 = 1.039612112$	B, C – коефіцієнти з довідкової літератури для речовини з якої виготовлена серцевина оптичного волокна
$B_2 = 0.231792344$	
$B_3 = 1.01046945$	
$C_1 = 6.00069867 * 10^{-3}$	
$C_2 = 2.00179144 * 10^{-2}$	
$C_3 = 1.03560653 * 10^2$	
$\mu_0 = 13$	μ_0 – рівень шуму
$\sigma_0 = 1$	σ_0 – середньоквадратична відхилення корисного сигналу
$\sigma_1 = 7$	σ_1 – середньоквадратична шуму

У результаті розрахунків було побудовано графік (Рис. 4.1). За віссю X відкладено довжину в метрах, а за віссю Y величина BER у логорифмічному масштабі.

Результати імітаційного моделювання показали, що хроматична дисперсія пропорційно залежить від довжини оптичного волокна, що впливає на якість передавання інформації.

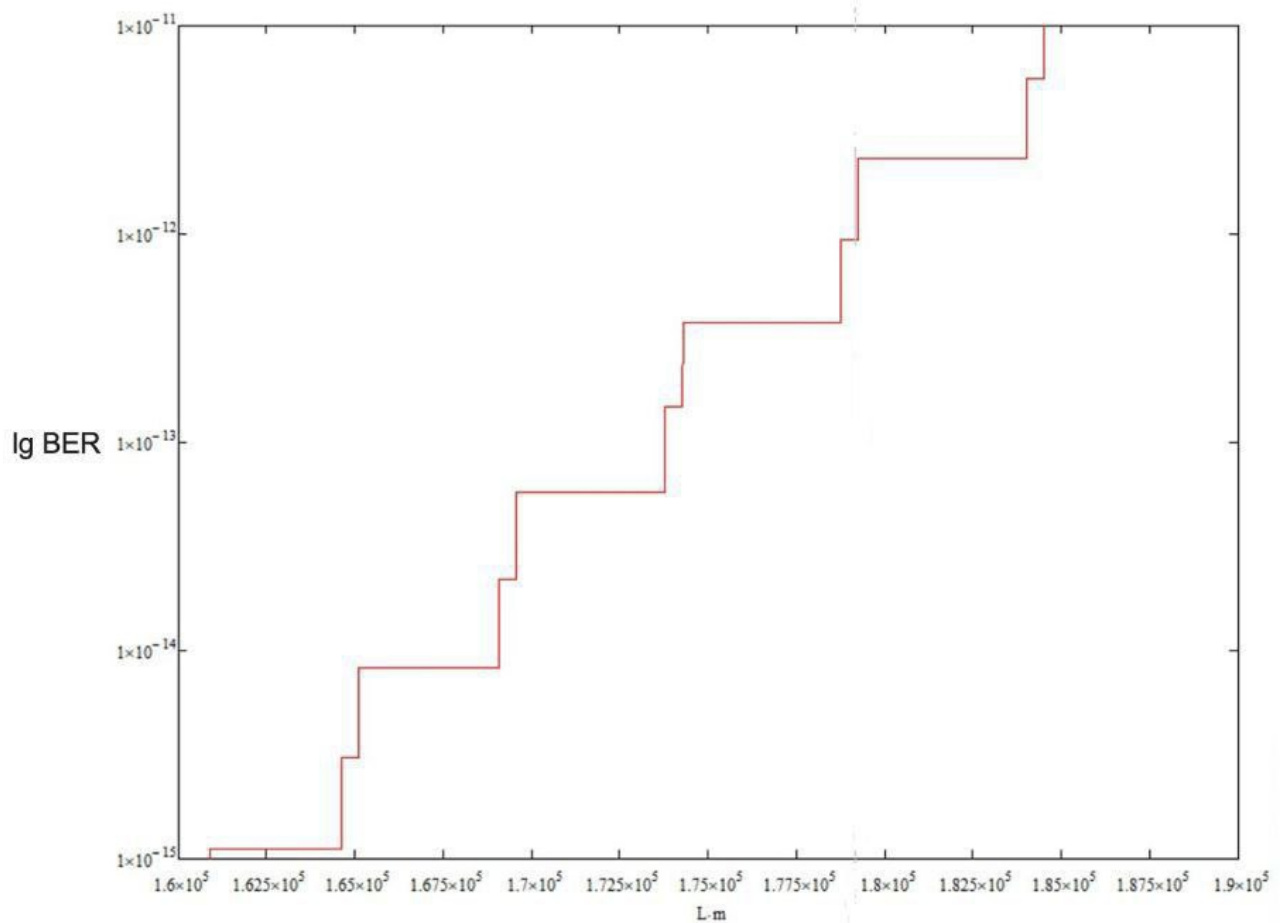


Рис. 4.1. Візуальна репрезентація залежності коефіцієнта бітових помилок BER від довжини системи ВОЛЗ: L – довжина лінії передачі даних.

Згідно отриманим результатам можливо зробити висновки щодо максимальної довжини відрізка ВОЛЗ при якій значення BER залишається в оптимальних показниках.

З графіка видно, що значення $BER = 1 * 10^{-11}$ досягається при довжині лінії зв'язку – $L = 185$ км.

Якщо L перевищує максимальне значення – BER зростає вище допустимих значень сучасних стандартів проектування ВОЛЗ.

Для зменшення BER потрібно встановлювати блоки компенсації ХД кожні 185 км довжини ВОЛЗ.

Розроблена модель дає змогу аналогічним чином розрахувати критичну довжину відрізка ВОЛЗ при зміні параметрів системи.

Висновки за розділом 4

В цьому розділі проведений аналіз результатів імітаційного моделювання, в основу якого була покладена математична модель, що враховує вплив хроматичної дисперсії на параметр BER у волоконно-оптичних лініях зв'язку. Розрахована довжина лінії зв'язку, на якій BER досягає критичного значення $1 * 10^{-11}$.

На основі отриманих результатів було побудовано графік залежності BER від довжини системи ВОЛЗ, де величина BER відображена в логарифмічному масштабі. Визначено, що хроматична дисперсія пропорційно залежить від довжини оптичного волокна, що суттєво впливає на якість передавання інформації.

Графік наглядно демонструє, що значення $BER = 1 * 10^{-11}$ досягається при довжині лінії зв'язку $L = 185$ км. Перевищення цієї максимальної довжини призводить до зростання BER понад допустимі стандарти проектування ВОЛЗ. Запропонована модель дозволяє ефективно розраховувати критичну довжину ВОЛЗ при різних параметрах системи та слугує інструментом для оптимізації довжини ліній зв'язку та встановлення блоків компенсації хроматичної дисперсії для зниження BER .

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження було розглянуто ключові характеристики оптоволоконних каналів зв'язку, що впливають на ефективність передавання інформації. Основна увага приділялася аналізу параметра BER і його залежності від хроматичної дисперсії.

Було проведено аналіз основних закономірностей поширення лазерних променів в оптоволокну. На основі цього аналізу було розроблено алгоритми, що моделюють фізичний процес руху світла в середовищі, а також алгоритми для розрахунку хроматичної дисперсії та параметра BER. Було створено програмний продукт - імітаційну модель поширення лазерних променів у багатомодовому волокну. Ця програма успішно пройшла тестування, і її використання дало змогу отримати результати, що демонструють залежність параметра BER від довжини світловода.

Результати кваліфікаційної роботи дають змогу наочно оцінити вплив ХД оптичного волокна на якість роботи ВОЛЗ. Робота може бути корисною для студентів ФКН, які вивчають дисципліну оптоінформатика.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що поставлене завдання було виконано, і, отже, мету дипломної роботи, яка полягає в розробленні комп'ютерної моделі та аналізі ефективності передачі даних, було досягнуто.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Roger L. Freeman Fiber-Optic Systems for Telecommunications Wiley, 2 Aug. 2002 – С. 315.
2. Доля Г.М., Артюх О.А. Оптиінформатика - Матеріали до навчального посібника. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, кафедра теоретичної та прикладної системотехніки, 2022, – С. 126.
3. Sellmeier equation. Wikipedia: веб-сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sellmeier_equation (дата звернення: 05.10.2023).
4. Refractive index of BK7, optical constants. Refractiveindex: веб-сайт. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT> (дата звернення: 05.10.2023).
5. Smith, J.. Fiber Optic Communication Systems. PublisherX. 2020 – С. 178-181.
6. White, C. M.. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. McGraw-Hill Education. 2018.
7. Agrawal, G. P.. Fiber-Optic Communication Systems (4th ed.). Wiley. 2010 – С. 211-213.
8. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C.. Fundamentals of Photonics. Wiley-Interscience. 2007 – С. 57-.60
9. Keiser, G.. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill Education. 2011– С. 78.
10. Ramaswami, R., & Sivarajan, K. N.. Optical Networks: A Practical Perspective. Morgan Kaufmann. 1998 – С. 215-216.
11. Коровін Макро Ігорович. Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії. Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях : зб. наукових праць IX Міжнар. наук.-техн. конф. Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2023. – С. 32- 37.
12. Alexis Mendez, T.F. Morse. Specialty Optical Fibers Handbook. Academic Press; Illustrated edition. 2007– С. 41-44.
13. Rongaing Hui Ph.D., Maurice O'Sullivan. Fiber-Optic Measurement Techniques. 2022– С. 112.

14. Jim Hayes. The Fiber Optic Association Guide To Fiber Broadband
15. How Fiber Optics Revolutionized Communications And Made Broadband Possible. 2022 – C. 91.
16. R.E. Lewis. Fiber Optic Communications 101. History, Theory, and Application of Optical Fiber in Telecommunications. 2022– C. 417.
17. Jeff Hecht. Instructor's Manual for Understanding Fiber Optics 5th edition. 2022 – C. 341.
18. Tuan Degre. Processes Of Fiber Optic. Understand The Fiber Optic Cabling Networks. 2022 – C. 254-257.
19. Herve C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope, Third Edition. 2022– C. 123-125.
20. James F. Booth. Fiber Optic Telecommunications Networks. Fiber Use Agreements: Second Edition. 2022 – C. 342.
21. Casimer DeCusatis, Carolyn Sher Decusatis. Fiber Optic Essentials. 2010 – C. 198-201.
22. Casimer DeCusatis. Handbook of Fiber Optic Data Communication. A Practical Guide to Optical Networking 2014 – C. 54.

ДОДАТКИ

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) **Магістр**

Галузь знань: **12 – Інформаційні технології**

Спеціальність: **123 «Комп'ютерна інженерія»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри теоретичної та
прикладної системотехніки
д.т.н., проф. Шматков С. І.



«08 » грудня 2022 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Коровін Марк Ігорович

1. Тема роботи «Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії».

керівник роботи Доля Григорій Миколайович, д. т. н., професор.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «10» листопада 2023 року № 4101-5/3197

2. Строк подання студентом роботи 28.11.2023

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1. Волоконно-оптичні лінії зв'язку в комп'ютерних мережах.
2. Хроматична дисперсія в волоконно-оптичних лініях зв'язку.
3. Розробка імітаційної моделі волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії.
4. Ефективність роботи волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	
<u>1</u>	<u>Аналіз вимог:</u>	08.12.22-30.06.23
1.1	Визначення основних вимог до роботи та цілей дослідження.	
<u>2</u>	<u>Ресурсний огляд:</u>	01.07.23-15.07.23
2.1	Аналіз проблематики області дослідження.	
2.2	Огляд наявних джерел та досліджень щодо ВОЛЗ за наявністю хроматичної дисперсії.	
<u>3</u>	<u>Визначення моделі комп'ютерної системи:</u>	15.07.23-30.07.23
3.1	Збір вимог до характеристик і функціоналу моделі комп'ютерної системи.	
3.2	Визначення цифрової комп'ютерної системи для проведення дослідження.	
<u>4</u>	<u>Вибір патернів та метрик:</u>	01.08.23-30.08.23
4.1	Визначення набору патернів та метрик для аналізу, за допомогою яких будуть оцінюватись ефективність передачі даних в моделі ВОЛЗ.	
<u>5</u>	<u>Розробка моделі системи:</u>	01.09.23-30.09.23
5.1	Проектування цифрової моделі комп'ютерної системи.	
5.2	Запуск і відладження системи.	
<u>6</u>	<u>Аналіз даних:</u>	01.10.23-30.10.23
6.1	Оцінка результатів зі зібраних даних з використанням обраних метрик.	
<u>7</u>	<u>Висновки:</u>	01.11.23-15.11.23
7.1	Формулювання висновків про ефективність передачі даних в ВОЛЗ а наявністю хроматичної дисперсії.	
<u>8</u>	<u>Формування звітної документації:</u>	15.11.23-28.11.23
8.1	Оформлення пояснювальної записки та звіту включаючи опис проведених досліджень, результати, висновки та рекомендації.	
8.2	Оформлення доповіді та презентації.	

5. Дата видачі завдання 06.12.2022р

Студент

Коровін М.І.
ініціали, прізвище

Керівник роботи

Доля Г.М.
ініціали, прізвище
підпис

Додаток Б

Затверджую

«_____» _____ 2023 р.

Технічне завдання
на розробку програмного виробу «Модель волоконно-оптичної лінії
зв'язку за наявності хроматичної дисперсії»

1.	Введення	1.1. Назва: Метод аналізу інформативності змінних стану при діагностиці систем з використанням інформаційних критеріїв. 1.2. Галузь застосування: оптоінформатика, оптоволоконні системи зв'язку.
2.	Підстава для розробки	2.1. Навчальний план за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія. 2.2. Завдання на дипломну роботу магістра № 4101-5/3197 від «10» листопада 2023 (представити як Додаток А до пояснювальної записки до дипломної роботи).
3.	Призначення розробки	3.1. Мета розробки: дослідження якості передачі даних у ВОЛЗ за умов хроматичної дисперсії. 3.2. Призначення розробки надає можливість визначати оптимальну наочно оцінити вплив ХД оптичного волокна на якість роботи ВОЛЗ. 3.3. Вихідні дані розробки: графік функції BER від довжини відрізка ВОЛЗ за наявністю хроматичної дисперсії.
4.	Технічні вимоги до програмного виробу	4.1. Вимоги до функціональних характеристик: можливість задання технічних параметрів ВОЛЗ. 4.2. Вимоги до надійності: забезпечувати точність та достовірність визначення параметрів. 4.3. Вимоги до умов експлуатації: немає. 4.4. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів: персональний комп'ютер. 4.5. Вимоги до інформаційної та програмної сумісності: немає. 4.6. Вимоги до маркування та упаковки: немає. 4.7. Вимоги до транспортування і зберігання: на звичайних носіях інформації. 4.8. Спеціальні вимоги: немає.

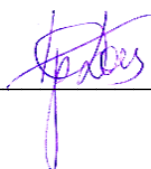
5.	Вимоги до програмної документації	Програмною документацією до виробу «Метод аналізу інформативності змінних стану при діагностиці систем з використанням інформаційних критеріїв» вважати: 1) Справжнє Технічне завдання на розробку виробу (представити у вигляді Додатку Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи). 2) Методику розрахунку (у вигляді глави 3.2 пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).	
6.	Вимоги до техніко-економічних показників	Немає.	
7.	Стадії і етапи розробки	Дата	Назва етапу
		від 15 липня 2023 до 20 липня 2023	Аналіз практики предметної області.
		від 20 липня 2023 до 30 липня 2023	Аналіз існуючого науково-методичного апарату визначення показників BER у ВОЛЗ та обґрунтування актуальності наукової задачі .
		від 30 липня 2023 до 1 вересня 2023	Аналіз існуючого програмного забезпечення обчислення показників BER у ВОЛЗ за наявністю хроматичної дисперсії.
		від 1 вересня 2023 до 30 вересня 2023	Розробка (доопрацювання) методики обчислення показників BER у ВОЛЗ за наявністю хроматичної дисперсії.
		від 30 вересня 2023 до 14 жовтня 2023	Тестування розробленої методики обчислення.

		від 14 жовтня 2023 до 30 жовтня 2023 від 30 жовтня 2023 до 28 листопада 2023	Оформлення результатів. Написання пояснювальної записки. Представлення дипломного проекту керівнику дипломної роботи та рецензенту.
8.	Порядок контролю і приймання програмного продукту (моделі)	1. Перевірку ходу розробки програми виконувати раз в 2 тижні. 2. Захист розробленої моделі провести на засіданні Атестаційної комісії. 3. Пояснювальну записку подати на паперових носіях в 1 примірнику і в електронному вигляді в 1 примірнику на CD-R компакт-диску.	

Виконавець
студент групи КІ- 61
Коровін М.І.



Замовник
д. т. н. професор,
Доля Г.М.



**Програма і методика випробувань
програмного виробу**

«Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку
за наявності хроматичної дисперсії»

1. Об'єкт випробувань

1. Назва програмного виробу : «Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії»
2. Галузь застосування : оптоінформатика.
3. Перераховані відомості запозичуються з відповідних розділів Технічного завдання.

2. Мета випробувань

Перевірка відповідності функціональності програмної реалізації системи заявленим функціональним можливостям в технічному завданні (Додаток Б до пояснювальної записки до дипломної роботи).

3. Загальні положення

1. Підстави для проведення випробувань

Підставою для проведення випробувань є наказ про призначення атестаційної комісії.

2. Місце і тривалість випробувань

Приймальні (приймально-здавальні) випробування проводяться на базі комп'ютерного класу кафедри в період роботи атестаційної комісії.

3. Обсяг випробувань

Приймальні випробування програмного виробу проводяться в обсязі відповідному цієї програми і методики випробувань.

4. Організації, які беруть участь у випробуваннях

Приймальні випробування проводяться атестаційною комісією напередодні засідання (або в процесі засідання) за участю Замовника, Виконавця та інших осіб, присутніх на засіданні.

4. Вимоги до програми або програмного виробу

Модель повинна задовольняти наступним вимогам:

1. працювати на основних операційних системах: Windows, MacOS;
2. вимоги до функціональних характеристик;
3. вимоги до надійності;
4. вимоги до складу і параметрів технічних засобів;
5. вимоги до маркування та упаковки (не висуваються);
6. вимоги до транспортування і зберігання (не висуваються);

Спеціальні вимоги (не пред'являються).

5. Вимоги до програмної документації

Програмою документацією до виробу «Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії» вважати:

1. Програмою документацією щодо розроблюваного програмного продукту вважати:
2. справжнє технічне завдання на розробку програми (представити як Додаток Б до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи);
3. Програму і методику випробувань розробленої програми (представити як Додаток В до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи);
4. Лістинг коду програми (представити як Додаток Г до пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи).

6. Засоби і порядок випробувань

6.1 Засоби випробувань

Для проведення випробувань необхідна модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії в середі MathCad.

6.2 Порядок проведення випробувань

Як правило, випробування проводяться в два етапи:

- ознайомчий (1-й етап);
- випробування програмного виробу (2-й етап).

Перелік перевірок, що проводяться на 1 етапі випробувань, включає в себе:

1. Перевірку комплектності програмної документації.
2. Перевірка комплектності складу програмної документації здійснюється за критерієм наявності зазначеної в ТЗ документації.
3. Перевірку комплектності складу технічних і програмних засобів.
4. Методику проведення перевірок на 1 етапі випробувань.
5. Якість програмної документації перевіряється на відповідність вимогам стандартів ЕСПД.

Перелік перевірок, що проводяться на 2 етапі випробувань, включає в себе:

1. перевірку відповідності технічних характеристик програми вимогам технічного завдання;
 2. перевірку ступеня виконання функціональних вимог до програми;
 3. методику проведення перевірок, що входять до переліку по 2 етапу випробувань.
-
1. Програма працює відповідно до умов експлуатації операційних систем MS Windows та MacOS.
 2. Для роботи необхідна встановлена середа математичного моделювання MathCad.
 3. Порядок проведення випробувань:
 - 3.1. Запуск програми здійснюється за допомогою середи математичного моделювання MathCad, відкриттям файлу моделі.

3.1.1.1. Після відкриття файлу моделі необхідно задати значення для вхідних параметрів системи ВОЛЗ описані у таблиці 4.1;

3.2. Після задання параметрів комп'ютерна модель автоматично виводить результати обчислення на графік.

Тест вважається пройденим, якщо відбуваються вказані операції і їх відображення у програмному продукті.

Висновки: тест успішно пройшов випробування.

Комп'ютерна модель волоконно-оптичної лінії зв'язку за наявності хроматичної дисперсії випробування пройшла успішно.

Виконавець: студент групи КІ-61, Коровін М. І.



Лістинг коду програмного виробу

(у вигляді знімків вікна робочого простору серед MathCad)

«Модель волоконно-оптичної лінії зв'язку
за наявності хроматичної дисперсії»

$$c = 2.99792458E+008 \text{ s}^{-1E+000} \cdot \text{m}$$
$$\lambda_0 := \frac{c}{\nu}$$
$$\lambda_0 = 1.5 \cdot 10^{-6}$$
$$\lambda = 1.5 \cdot 10^{-6}$$
$$m_i := 125$$
$$n_{\text{лп}} := 3.5$$
$$l := 1 \cdot 10^{-3}$$
$$\Delta\lambda := \frac{(\lambda)^2}{2 \cdot n_{\text{лп}} \cdot l} = 3.2142857142857144E-010$$
$$\lambda_{\text{ifunct}}(m_i) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m_i \\ \lambda_{m_i-i} \leftarrow \lambda_0 - i \cdot \Delta\lambda \\ \lambda_{m_i} \leftarrow \lambda_0 \\ \lambda_{m_i+i} \leftarrow \lambda_0 + i \cdot \Delta\lambda \end{array} \right| \lambda_i$$
$$\lambda_i := \lambda_{\text{ifunct}}(m_i)$$
$$B1 := 1.03961212 \qquad C1 := 6.00069867 \cdot 10^{-3}$$
$$B2 := 0.231792344 \qquad C2 := 2.00179144 \cdot 10^{-2}$$
$$B3 := 1.01046945 \qquad C3 := 1.03560653 \cdot 10^2$$

$$m_i :=$$

--	--	--	--	--

$$m_i = 1.6093440000000003E+003 \text{ m}$$

$$+$$

$$l - \text{lenght of lazer resonator}$$

	0
0	1.4598214285714286E-006
1	1.4601428571428572E-006
2	1.4604642857142858E-006
3	1.4607857142857144E-006
4	1.461107142857143E-006
5	1.4614285714285715E-006
6	1.46175E-006
7	1.4620714285714287E-006
8	1.4623928571428573E-006
9	...

$\lambda_i =$

$$n_i := \sqrt{1 + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B1}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C1} + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B2}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C2} + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B3}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C3}}$$
$$V_i \approx \frac{c}{n_i} \qquad L_{\text{max}} \approx 100000\text{m}$$
$$t_i \approx \frac{L}{V_i}$$

$n_i \approx$

	0
0	1.5017681667026026E+000
1	1.5017642315180493E+000
2	1.5017602960678988E+000
3	1.5017563603516615E+000
4	1.501752424368848E+000
5	1.5017484881189698E+000
6	1.501744551601538E+000
7	1.5017406148160657E+000
8	1.5017366777620644E+000
9	1.5017327404390481E+000
10	...

$t0 := t_{i_{mi}} = 5.007711231856659\text{E-}004\text{ s}$ $\tau := 83000 \cdot 10^{-12}\text{ s}$
$$\mu1 := \begin{cases} \mu1 \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..2mi \\ \mu1 \leftarrow \mu1 + 1 \text{ if } \left(\left| t_{i_1} - t0 \right| \right) < \tau \\ \mu1 \end{cases}$$
 $\mu1 = 125$
$$Q(\mu1) := \frac{|\mu1 - \mu0|}{\sigma1 + \sigma0}$$
$$Q(\mu1) = 14$$
$$BER(Q) := \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q \cdot \sqrt{2}}$$
$$BER(Q(\mu1)) = 1.3883460850837415\text{E-}044$$

$t_i \approx$

	0
0	5.0093593972354125E-004
1	5.009346270872662E-004
2	5.009333143623976E-004
3	5.009320015487718E-004
4	5.0093068864622605E-004
5	5.009293756545969E-004
6	5.009280625737215E-004
7	5.0092674940343755E-004
8	5.009254361435818E-004
9	5.009241227939923E-004
10	5.009228093545069E-004
11	5.009214958249632E-004
12	5.0092018220519945E-004
13	5.009188684950538E-004
14	5.009175546943646E-004
15	...

$m1 := 70$

$L := 150000m, 150001m..200000m$

```

 $\mu1(L) := \begin{cases} \lambda_i \leftarrow \lambdaifunct(m1) \\ n_i \leftarrow \sqrt{1 + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B1}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C1} + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B2}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C2} + \frac{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 B3}{(\lambda_i \cdot 10^6)^2 - C3}} \\ V_i \leftarrow \frac{c}{n_i} \\ t_i \leftarrow \frac{L}{V_i} \\ t0 \leftarrow t_{i_{m1}} \\ \mu1 \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..2m1 \\ \quad \mu1 \leftarrow \mu1 + 1 \text{ if } (|t_{i_1} - t0|) < \tau \\ \mu1 \end{cases}$ 

```

