

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 171 Електроніка

освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **Волоконно-оптичні лінії зв'язку: конструкція та розрахунок параметрів**

Здобувача групи ЕП-91

Бутусова Микити Андрійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Микита БУТУСОВ

Керівник професор кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики, д-р ф.-м.н., професор

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ

_____ І.Ю.Проценко
«16» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Бутусова Микити Андрійовича

Тема роботи **ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: КОНСТРУКЦІЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ**

затверджена наказом по університету від «15» травня 2023 р., № 0499-VI _____

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 12 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Волоконно – оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) – це оптична система, яка складається з пасивних та активних елементів і призначена для передачі інформації у оптичному діапазоні. Оптичне волокно в даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані.

Мета роботи полягає у вивченні фізичних процесів у оптоволоконних системах зв'язку, їх конструктивно-технічних характеристик та впливу зовнішніх фізичних полів на робочі параметри і характеристики ліній; визначення необхідного типу кабеля та розрахунок втрат волоконно-оптичної лінії зв'язку міського значення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізичні принципи та конструктивно-технологічні особливості ВОЛЗ.
2. Переваги і недоліки ВОЛЗ.

3. Розрахунок параметрів ВОЛЗ: нормованої частоти, фазової швидкості, полоси пропускання, кількості мод, відстані передачі сигналу.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи, методи досліджень.

Слайди № 4-8. Фізичні основи роботи і конструкція ВОЛЗ різних типів.

Класифікація зовнішніх факторів, що впливають на параметри оптичного волокна.

Слайди № 9-12 Структура оптичних кабелів та їх застосування.

Слайди № 14-17. Результати розрахунків параметрів ВОЛЗ: нормованої частоти, фазової швидкості, полоси пропускання, кількості мод, відстані передачі сигналу.

Слайд №18. Висновки.

Слайд №19. Публікації.

6. Дата видачі завдання 16.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 04.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 11.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	21.06.2023 р., 10-00 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Бутусов М.А.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра викладена на 36 сторінках, містить 15 рисунків, 4 таблиці, 17 використаних джерел.

Актуальність теми роботи. Оптоелектронна галузь стикається з динамічно зростаючим попитом на частотні ресурси, що пов'язано із зростанням кількості користувачів Internet та міжнародних операторів та обсягів переданої інформації. Постачальники засобів зв'язку при формуванні сучасних інформаційних мереж широко використовують волоконно-оптичні лінії та систем зв'язку (ВОЛЗ) для протяжних телекомунікаційних магістралей і локальних обчислювальних мереж. Оптичне волокно (ОВ) на даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації та перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані.

Мета роботи: вивчення фізичних процесів у оптоволоконних системах зв'язку, їх конструктивно-технічних характеристик та впливу зовнішніх фізичних полів на робочі параметри і характеристики ліній; визначення необхідного типу кабеля та розрахунок втрат волоконно-оптичної лінії зв'язку міського значення.

Методи: розрахунки фізичних параметрів ВОЛЗ з урахуванням вихідних значень параметрів оптичних кабелів.

Отримані результати:

1. Вивчено конструкцію та принципи функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку, розглянуті основні типи волокон та їх параметри, способи зменшення втрат сигналу.
2. На основі аналізу літературних даних встановлено, що ВОЛЗ залишаються основним методом передачі великої кількості даних на великі відстані. Продемонстровані новітні дослідження щодо покращення параметрів оптичного волокна. Показані основні причини втрат сигналу, такі як втрати через розсіяння, втрати на поглинання, втрати від роз'ємних та зварних з'єднань, втрати на згини і втрати від потужності випромінювача.

3. Проведені розрахунки характеристик і параметрів ВОЛЗ, що використовуються при проектуванні ліній. Визначені і описані параметри та їх вплив на швидкість передачі, відстань передачі даних без пошкоджень і втрат.
4. Розрахований максимальний діаметр серцевини оптичного волокна становить 9.96 мкм, для цього волокна можливе пропускання 740 мод на відстань 333 м.

Рекомендації щодо використання: врахування параметрів ВОЛЗ при конструюванні ліній та врахуванні впливу зовнішніх факторів на зміну параметрів та загальне функціонування системи зв'язку.

Ключові слова: оптоволокно, волоконно-оптична система зв'язку, одно- і багатомодове волокно, дисперсія, повне внутрішнє віддзеркалення, показник заломлення.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ	7
1.1 Загальні відомості про волоконно-оптичні лінії зв'язку.....	7
1.2 Сучасні і перспективні напрями волоконної оптики.....	12
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВОЛЗ ...	16
2.1. Принципи дії покладені у волоконно-оптичний зв'язок.....	16
2.2. Конструктивно-технічні особливості ВОЛЗ.....	19
2.3. Втрати при передачі сигналу у ВОЛЗ.....	24
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВОЛЗ МІЖМІСЬКОГО ЗНАЧЕННЯ	29
3.1. Теоретичні розрахунки основних характеристик ВОЛЗ.....	29
3.2. Розрахунок основних параметрів роботи ВОЛЗ.....	32
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Загальні відомості про волоконно-оптичні лінії зв'язку

Виникнення волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) пов'язане з розвитком оптики та телекомунікаційної галузі. Вже в 1920-х роках інженери та вчені використовували волокна з кварцового скла для передачі світла. Проте, цей метод був досить незвичним для телекомунікаційної галузі та мав деякі технічні обмеження. Щоб зазирнути всередину недоступних ділянок людського тіла, німецький студент-медик Генріх Ламм у 1930-х роках вперше продемонстрував здатність передавати світло та зображення за допомогою системи кварцових волокон [1].

Але лише у 1960-х роках вчені зайнялися вирішенням основних проблем передачі інформації через ВОЛЗ та розробили перший прототип волоконно-оптичного кабелю, що містив одну оптичну нитку. Ще одним із основних досягнень для оптоелектроніки у ті роки стало створення лазеру. Проблема полягала в носіях сигналу, таких як оптичне волокно, яке, за дослідженнями Чарльза Као та Джорджа Хокмана мало загасання 1000 дБ/км, для порівняння навіть у ті роки згасання у коаксіального кабелю були від 5–10 дБ/км. Досягнення великої пропускної здатності забезпечили розробки в 1970-х роках, коли були створені волоконно-оптичні кабелі зі здатністю передачі сигналу на відстань більше 100 км. Роберт Маурер і його колеги з Corning Glass Works розробили високоякісні волоконно-оптичні лінії зв'язку, що вирішували цю проблему. У той час також були розроблені компактні напівпровідникові лазери на основі поєднання GaAs, і ці кабелі мали загасання 17 дБ/км. Така система працювала на швидкості 45 Мбіт/с, ретранслятори були розташовані на відстані 10 км один від одного. Оптоволокно з втратою 0,47 дБ/км на довгих хвилях 1,2 м було розроблено в 1976 році Масахару Хорігучі з NTT Lab і Хіроші Осанай з Fujikura Cable. Це дало змогу застосувати волоконно-оптичні лінії зв'язку для довгих

відстаней та збільшення пропускної здатності[1-3].

У 1980-х та 1990-х роках волоконно-оптичні лінії зв'язку стали використовуватися у широкому масштабі телекомунікаційної галузі та замінили традиційні мідні кабелі. Вони забезпечували велику швидкість передачі даних, більшу якість сигналу та зниження витрат на енергопостачання. Системи, які використовували лазери InGaAsP, працювали на швидкості 1,7 Гбіт/с у 1987 році та мали повторювачі кожні 50 км. У 1988 році TAT-8, перший підводний волоконно-оптичний кабель, був прокладений між США та Європою.

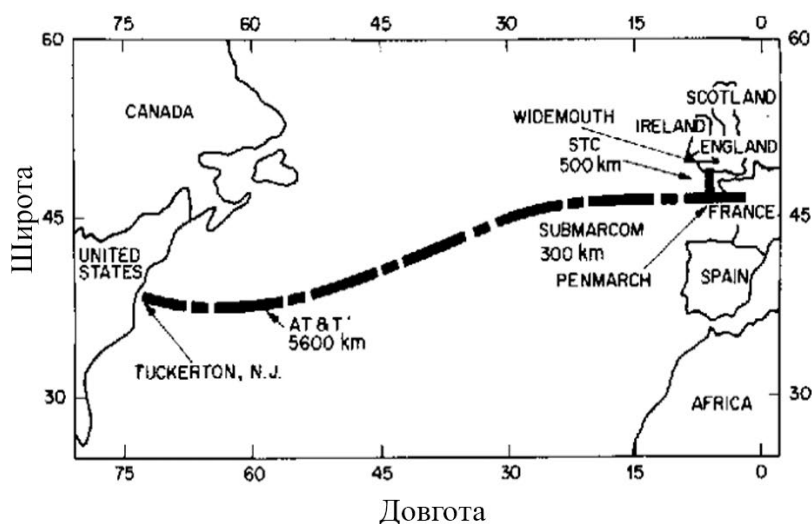


Рисунок 1.1 – Перший підводний ВОЛЗ TAT-8 між США та Європою:
зліва – вигляд кабелю в перерізі; справа – карта прокладення кабелю.

Адаптовано з праці [4]

У 2000-х роках волоконно-оптичні лінії зв'язку стали використовуватися не тільки в телекомунікаційній галузі, але й у наукових дослідженнях, медицині, промисловості та інших сферах. Вони також знайшли застосування в мережах передачі даних усіх типів [5].

Оптоелектроніка - це галузь електроніки, що вивчає взаємодію світла з електронами. Основною метою оптоелектроніки є створення пристроїв, що можуть виявляти, передавати та обробляти інформацію за допомогою світла. Оптоелектроніка є основною областю пов'язана з волоконно-оптичними лініями зв'язку через те, що вони використовують оптичні пристрої та елементи, такі як

світловоди, оптичні ізолятори, модулятори, детектори тощо, щоб передавати та приймати інформацію з використанням світла замість електричних сигналів. Наприклад, оптичні волокна, що використовуються в волоконно-оптичних лініях зв'язку, є світловодами, які використовують оптичні явища для передачі інформації. Коли сигнал, що містить дані, проходить через волокно, його перетворюють у світлові імпульси, які передаються від одного кінця волокна до іншого [1].

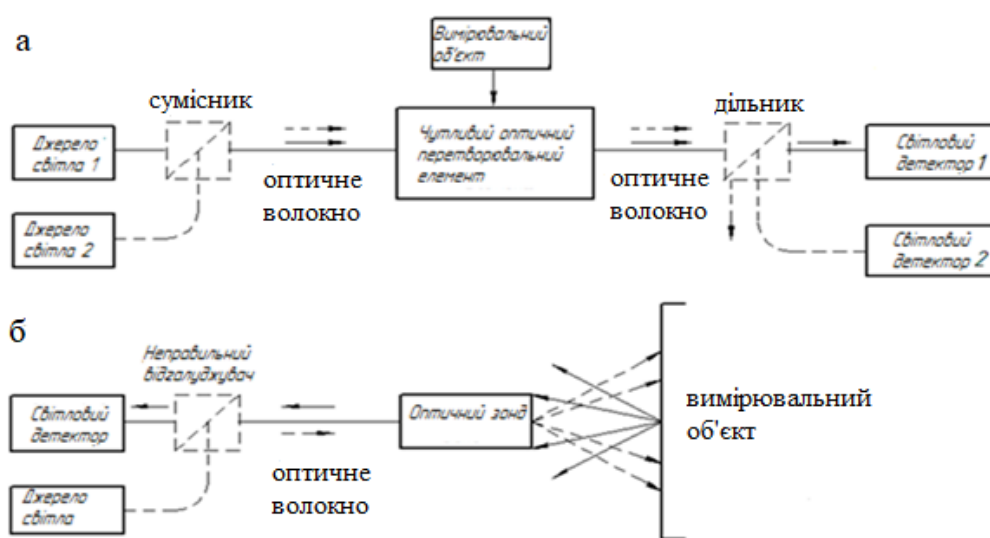


Рисунок 1.2 – Схеми використання ВОЛЗ для визначення параметрів досліджуваних об'єктів: а - з використанням оптичного перетворювача; б - з використанням оптичного зонду [2]

Волоконно-оптичні лінії зв'язку це технологія передачі даних на великі відстані за допомогою тонких волокон, зазвичай зроблених зі скла або пластику, які передають світлові сигнали. Передача даних через ВОЛЗ здійснюється за допомогою світлових сигналів, які кодують інформацію. Сигнали передаються через волокна у вигляді масиву світлових імпульсів, що дозволяє передавати велику кількість даних на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами сигналу. Сучасні ВОЛЗ розповсюдженні по всіх континентах планети. Ріст ринку ВОЛЗ випереджає у 40% в рік темпи інших видів техніки в останні роки. В Україні провідною організацією є «Укртелеком», також Україна включена в систему Європейських проектів по розповсюдженню та підключенню ВОЛЗ.

Також всередині України працюють кільцеві системи зв'язку на основі ВОЛЗ, що охоплюють основні регіони [2].

Основним об'єктом для передачі інформації у ВОЛЗ є світлові хвилі. Світлові хвилі - це електромагнітні хвилі, які поширюються у вакуумі або у різних середовищах з різною швидкістю. Світлові хвилі мають довжину хвилі та частоту, що визначаються їх енергією. В залежності від довжини хвилі, світлові хвилі можуть бути видимими для людського ока, такі як кольори від червоного до фіолетового, або невидимими, такі як інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Світлові хвилі включають в себе:

- Інфрачервоне випромінювання $\lambda = 0,78 \dots 1000$ мкм
- видиме світло $\lambda = 0,38 \dots 0,78$ мкм
- ультрафіолетове випромінювання $\lambda = 0,0001 \dots 0,38$ мкм [1].

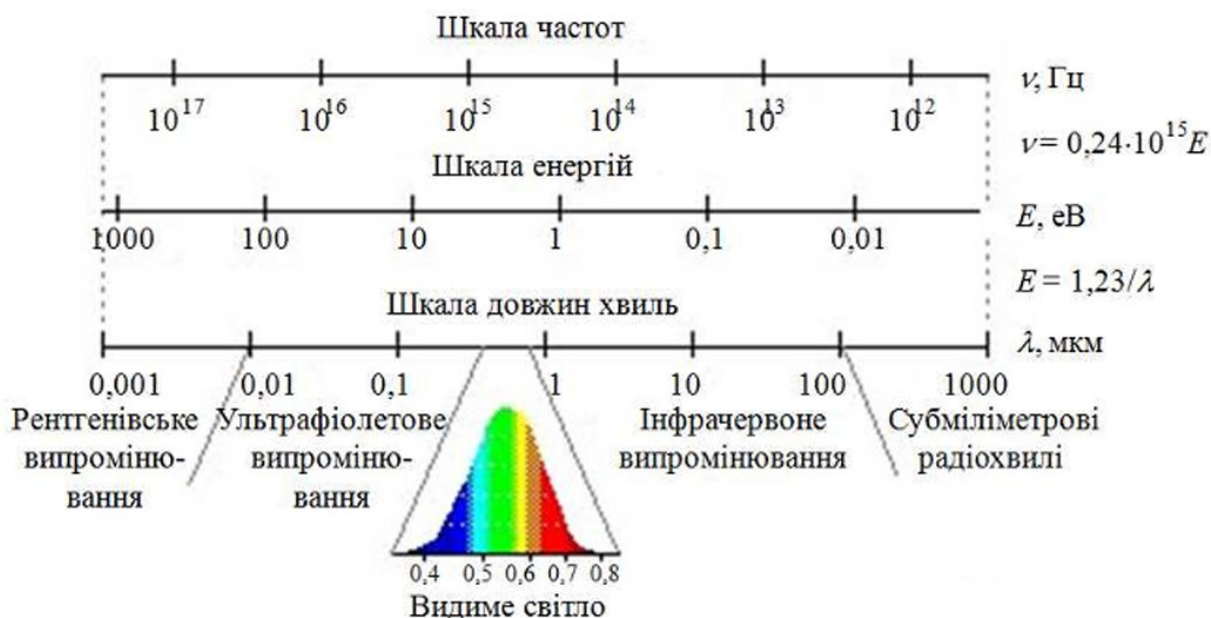


Рисунок 1.3 – Діапазон спектру електромагнітних хвиль. Адаптовано з праці [1]

Інформація передається на відстань за допомогою оптичних волокон через волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП), яка поєднує в собі активний і пасивний компоненти. Зв'язок та передача інформації через інфрачервоні волокна принципово відрізняє ВОСП від більш традиційних методів. Передавач змінює

електричний сигнал від світла, щоб створити сигнал. Перетворення здійснює джерело світловипромінювання, або діодним лазером.

Основні переваги використання волоконно-оптичних ліній зв'язку полягають в їх високій швидкості передачі даних та мінімальних втратах сигналу на великій відстані. Іншими перевагами є:

1. ВОЛЗ дозволяють передавати великі обсяги даних на дуже великі відстані з високою швидкістю. Швидкість передачі даних через ВОЛЗ може сягати до кількох терабіт на секунду.

2. Світло, як джерело передачі інформації дозволяє уникнути електричних перешкод та забезпечує мінімальні втрати сигналу на великій відстані. ВОЛЗ можуть передавати сигнали на відстань більше кількох кілометрів без додаткового підсилення.

3. Оптичне волоконне зв'язок забезпечує надійний захист від несанкціонованого доступу та перехоплення конфіденційної інформації. Дані передаються безпечним шляхом, оскільки не випромінюють електромагнітних полів, що можуть бути використані для перехоплення сигналу. При спробі прослуховування вбудована система управління відключить канал і попередить про можливий злом. Саме з цієї причини ВОЛЗ широко використовуються сучасними банками, дослідницькими центрами, правоохоронними організаціями та іншими структурами, які володіють секретною інформацією

4. Вимагають менше енергії для передачі даних порівняно з традиційними методами передачі даних, такими як мідні кабелі і мають менше втрат, так як ВОЛЗ не нагрівається при передачі.

5. Кабелі мають високу стійкість до зовнішніх впливів, таких як електричні перешкоди, коливання температури та вологості, що дозволяє їм працювати надійно протягом довгого часу без необхідності у ремонті або заміні. Волокна виготовляються з матеріалів, які мають високу стійкість до зношування, що забезпечує їх довговічність. ВОЛЗ можуть бути використані в різних умовах, включаючи високу та низьку температуру, що робить їх універсальними для різних галузей: телекомунікації, медицину, науку та промисловість [2,5].

1.2 Сучасні і перспективні напрями волоконної оптики

Використання ВОЛЗ набуло широкого розповсюдження в останні 20 років, внаслідок розвитку технологій необхідних для побудови ліній великої протяжності [2]. У дослідженні «Останні тенденції бездротового та оптоволоконного зв'язку» і «Огляд оптичних волокон та застосування у волоконних лазерах» автори зосереджуються на порівнянні різних технологій та їх застосуванні в різних сферах, таких як телекомунікації, медична техніка, автомобільна та промислова мережі, енергетика тощо. У статті описані основні виклики, з якими стикаються інженери та вчені при проектуванні бездротових та волоконно-оптичних мереж, такі як інтерференція, перенавантаження мережі, забезпечення безпеки тощо. Висновки статті показують, що бездротові та волоконно-оптичні мережі є ключовими технологіями у сучасному світі, які дозволяють передавати великі об'єми даних на великі відстані з високою швидкістю та забезпечують високу якість передачі даних. Однак, наразі ці технології стикаються з різними викликами, які потребують подальшого дослідження та вдосконалення технічних рішень. Автори статті роблять висновок, що наукові дослідження у цій області мають важливе значення для подальшого розвитку бездротових та волоконно-оптичних мереж [6,7].

Одним із перспективних напрямків є розробка і дослідження нових видів і типів волокон для ВОЛЗ. Прикладом таких розробок є стаття "Розробка фотонно-кристалічного волокна для оптичних комунікацій " розглянуто дизайн фотонно-кристалічного волокна, яке було розроблено для використання в оптичних комунікаційних системах. Автори описують дизайн фізичної структури волокна і його оптичні властивості, такі як дисперсія та втрати сигналу. Дослідники використовували метод чисельного моделювання, щоб дослідити властивості запропонованого фотонно-кристалічного волокна.

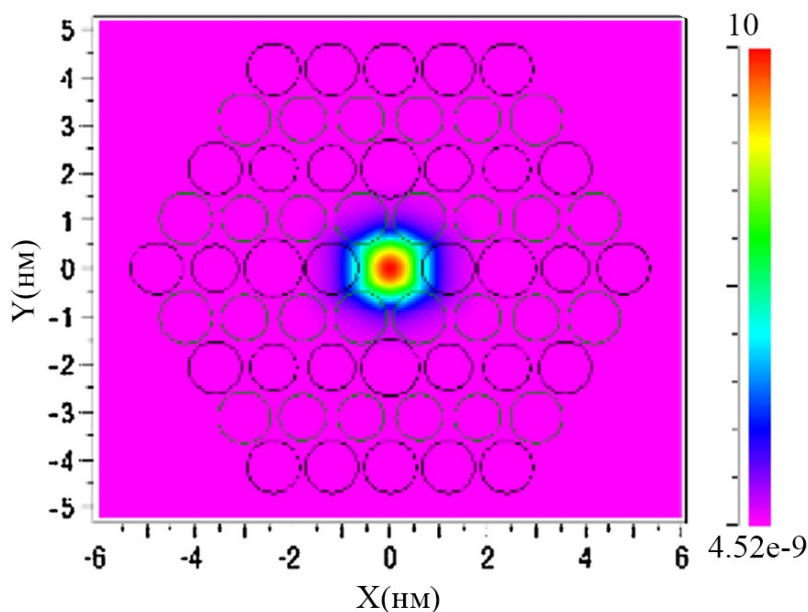


Рисунок 1.4 – Чисельне моделювання профіля фотонно-кристалічного волокна. Колір вказує на ступінь утримання світла, де червоний – найбільше утримання [8]

Висновки дослідження показали, що запропоноване фотонно-кристалічне волокно має переваги перед звичайними волоконно-оптичними лініями зв'язку. Зокрема, запропоноване волокно має низьку дисперсію та високу показникову здатність, що дозволяє передавати сигнали на великі відстані з мінімальними втратами сигналу [8].

Іншим перспективним матеріалом для покращення характеристик є оптичний матеріал на основі літій ніобату (LiNbO_3). У дослідженні використовувалась методика скінченних елементів для моделювання та аналізу оптичних властивостей волоконно-оптичного кабелю на основі LiNbO_3 . За допомогою цього методу було проведено аналіз електричних та механічних властивостей матеріалу та проаналізовано вплив цих властивостей на оптичні параметри кабелю. Дослідження показало, що волоконно-оптичний кабель на основі LiNbO_3 має високу неоднорідність оптичних параметрів та велику чутливість до зовнішніх факторів. Однак, його нелінійні властивості дозволяють використовувати його в різноманітних нелінійних оптичних додатках, таких як генерація другої гармоніки та оптичні модулятори [9].

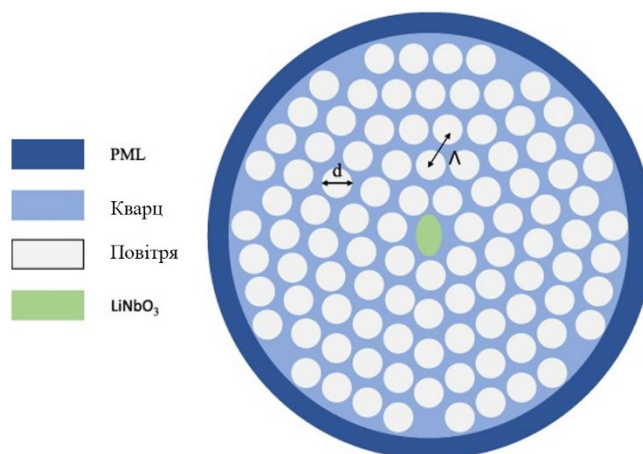


Рисунок 1.5 – Переріз ВОЛЗ з використанням літій ніобату [9]

Продовження і перспективною технологією для передачі даних є вільно-просторова передача даних. Такий спосіб комунікації описано у статті «Вільно-просторовий оптичний зв'язок». Оптичний зв'язок у вільному просторі – це бездротова передача даних через модульований оптичний промінь, спрямований через вільний простір, без волоконної оптики, або інших систем передачі, що направляють світло. Головним чинником для розвитку ідей такого способу передачі були спричинені появою лазерів. У порівнянні з волоконно-оптичним зв'язком основна відмінність полягає у використанні атмосфери, як середовище передачі. Передавальні властивості, визначаються атмосферними умовами, які можуть призвести до втрат, або перенаправлення променю, його спотворення. Основні впливи повинні враховувати атмосферні розсіювання, молекулярне поглинання, ефекти турбулентності, а також вплив погодних умов із недостатньою видимістю, наприклад дощ, туман, сніг.

Автор відмічає, що головною проблемою технології є необхідність прямої безперешкодної видимості між передатчиком і приймачем. Але досяжність підключення високошвидкісного зв'язку з радіусом у декілька кілометрів є привабливою категорією ринку для окремих будинків за містом, де проведення ВОЛЗ залишається дорогим. Слід також відмітити, що системи вільно-просторової оптичної передачі продемонстрували свою універсальність, стабільність та бездоганну інтеграцію в існуючі мережі зв'язку [10].

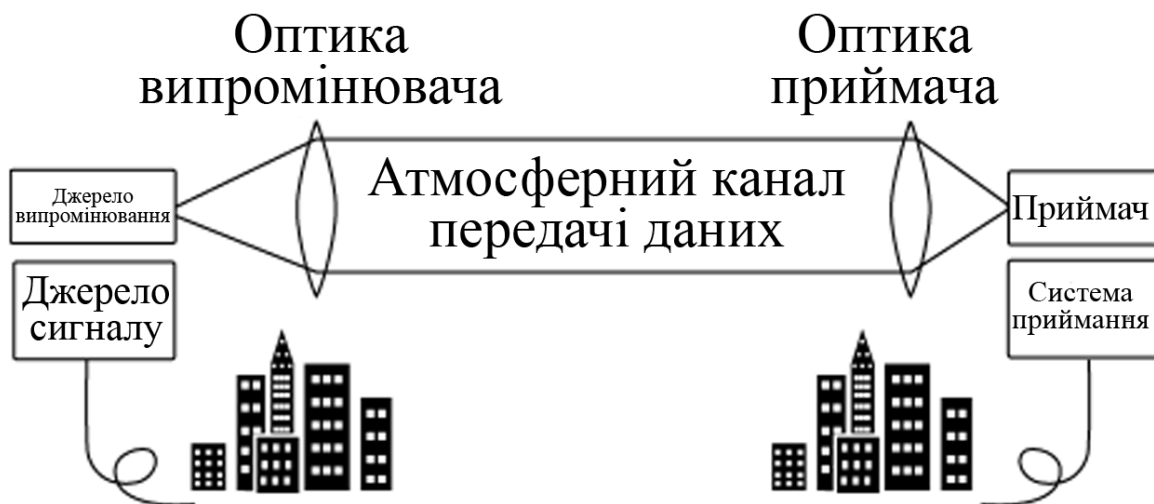


Рисунок 1.6 – Схема вільно-просторової передачі даних [10]

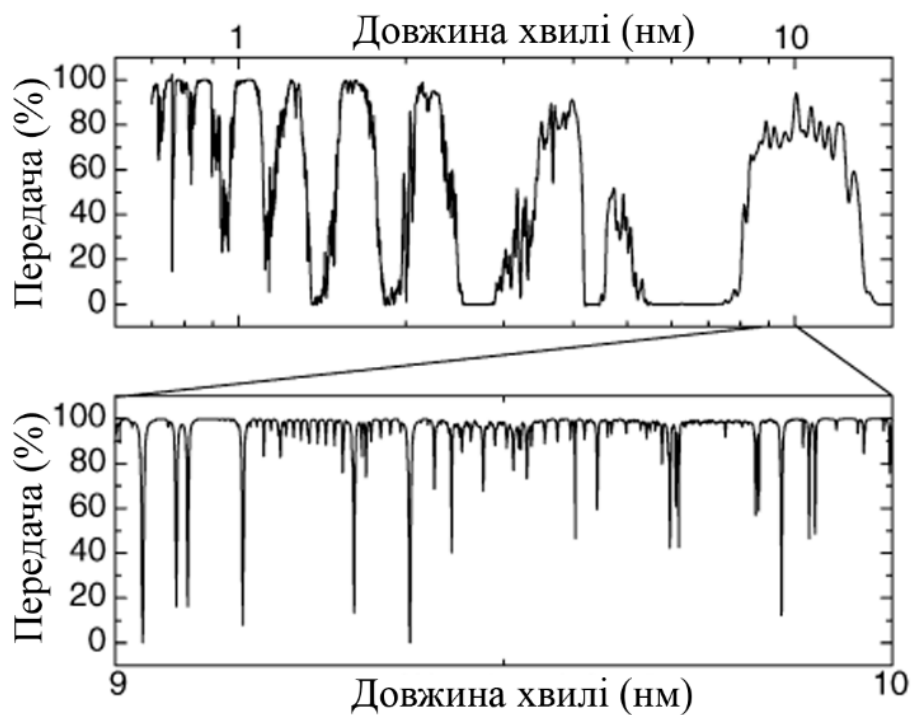


Рисунок 1.7 – Спектр пропускання атмосфери, внаслідок молекулярного поглинання: верхній – низька роздільна здатність; нижній – висока [10]

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВОЛЗ

2.1 Принципи дії покладені у волоконно-оптичний зв'язок

Принцип дії волоконно-оптичних ліній зв'язку базується на передачі інформації через світлові хвилі, які пропадають через оптичні волокна. У волоконних кабелях світло передається через центральне ядро, що оточене оптичними волоконними оболонками, які мають менший індекс заломлення. Передавання світла по волоконно-оптичних світловодах полягає у явищі повного внутрішнього відбиття. Явище є окремим випадком відбиття світла на межі розподілу двох середовищ, коли хвиля падає на поверхню розподілу зі сторони більш густого оптичного середовища. Кут, при перевищенні якого виникає повне внутрішнє відбиття називають критичним. Світло відбивається від внутрішніх стінок ядра та оболонки і проходить через кабель у вигляді оптичних сигналів, які кодують інформацію [7,11].

Явище повного внутрішнього заломлення відомо ще з дослідів Тіндала, який продемонстрував, як водяний струмінь може передавати світло. Воно описується законом Снелля, при потраплянні світла з більш високим показником заломлення у середовищі з меншим. При виконанні умови $0 < \theta < \theta_c$ і $0 < \theta' < \pi/2$ тоді формула набуває вигляду:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta', \quad (2.1)$$

де n_1, n_2 – показники заломлення середовищ;

θ, θ' - відповідні кути падіння.

Якщо кут падіння $\theta > \theta_c$ тоді можливе явище повного внутрішнього відбиття. Його особливістю є відсутність втрат на переході границі розподілу.

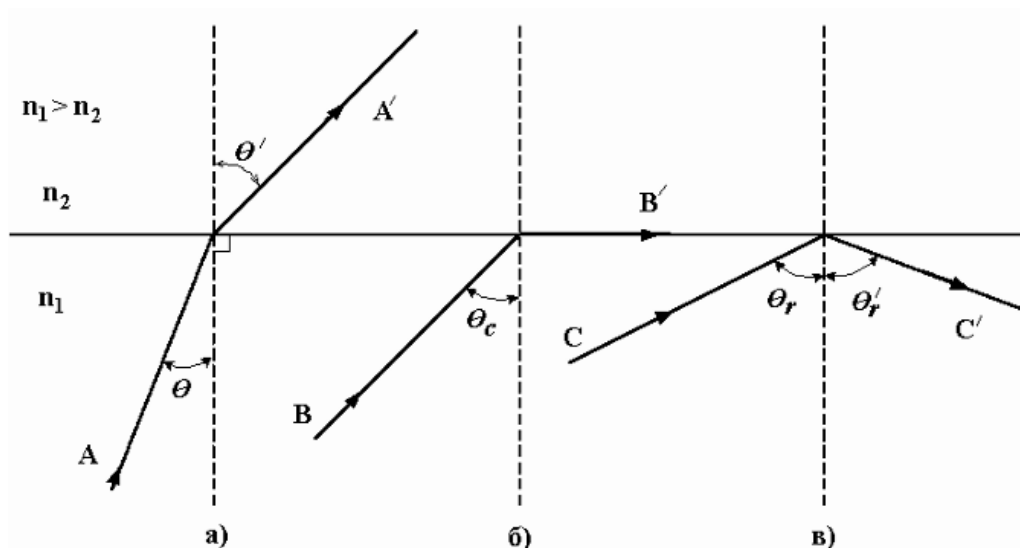


Рисунок 2.1 – Зображення ходу променів при різних показниках куту потрапляння у хвилевід: а – промінь не має достатній кут для повного внутрішнього відбиття і заломлюється; б - промінь потрапляє під критичним кутом; в – повне внутрішнє відбиття, при $\theta_r > \theta_c$ [5]

Розглянемо хід променів і їх введення у оптичне волокно. Виходячи з формулі 2.1, для того що б промінь потрапив у волокно, кут падіння до торця повинен бути менше критичного

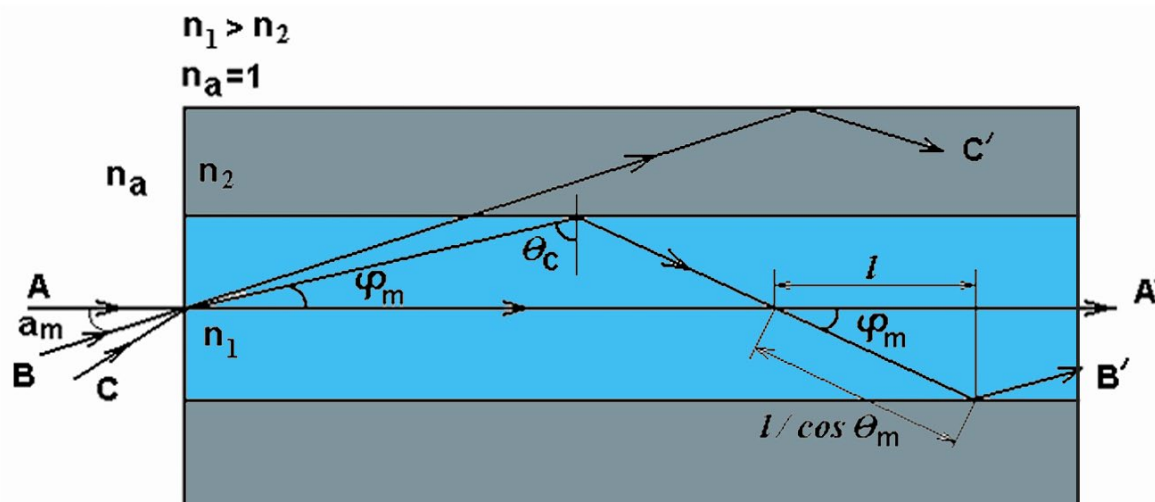


Рисунок 2.2 – Хід променів у оптичному волокні: промінь CC' - входить під кутом більше критичного для n_1n_2 у волокно; BB' - поширюється під критичним кутом; AA' - осьовий промінь. Адаптовано з праці [5]

Для того, щоб промінь поширювався у оптичному волокні через багаторазове відбиття і не буде послаблюватися, необхідно щоб кут між променем і оптичною віссю був меншим за $\varphi_m > \frac{\pi}{2} - \theta_c$. Ще однією умовою є те, щоб кут падіння променя відносно торця був меншим за α_m . Для їх визначення скористаємось формулою 2.1:

$$\sin\alpha = n_1 \sin\varphi = n_1 \cos\theta, \quad (2.2)$$

Якщо кут падіння дорівнює критичному, рівняння набуває вигляду:

$$\sin\alpha_m = n_1 \sin\varphi_m = n_1 \cos\theta_c, \quad (2.3)$$

Кут α_m також можна виразити тільки через показники заломлення середовищ. Кількість променів, які потрапляють на торець оптичного волокна залежить від величини α_m . Здатність збирати світло описується числовою апертурою NA і визначається таким способом:

$$NA = \sin\alpha_m = (2n\Delta n)^{1/2}, \quad (2.4)$$

$$\text{де } n = \frac{(n_1+n_2)}{2};$$

$$\Delta n = n_1 - n_2.$$

Розповсюдження променів у хвилеводі залежить від куту падіння до границі середовища. Тому різні промені будуть розповсюджуватися по різному. Відстані, які проходять промені варіюється від l до максимального $l/\cos\varphi_m$. Внаслідок цього виникає ситуація, коли різні промені мають різний час проходження хвилеводу. Якщо одночасно вводити у волокно осьовий і найбільш похилий промінь, різниця між ними буде мати таке значення:

$$\Delta T = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{l}{c}\right) \Delta n, \quad (2.5)$$

Таким чином світло, що потрапляє в момент часу у хвилевод буде розмитим у часі і час для такого світла розраховується таким чином[5]:

$$\frac{\Delta T}{l} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{\Delta n}{c}\right), \quad (2.6)$$

Оптичні сигнали зазвичай генеруються світловим джерелом, таким як лазер, і передаються через оптичний кабель. Для забезпечення стабільності передачі оптичного сигналу використовуються методи модуляції, демодуляції та підсилення оптичного сигналу вздовж шляху передачі.

Метод модуляції - це процес зміни властивостей сигналу відповідно до додаткової інформації, що має передаватися через цей сигнал. Модуляцію використовують для кодування і передачі аналогових або цифрових сигналів по каналу зв'язку. Демодуляція - це процес відновлення вихідного сигналу з модульованого сигналу. Для демодуляції сигналу використовують спеціальні електронні пристрої, що можуть відрізнити вхідний сигнал від навколишнього шуму і відновити вихідний сигнал з точністю до деякої похибки.

Принцип підсилення оптичного сигналу полягає у використанні оптичних підсилювачів, які дозволяють збільшувати інтенсивність світла в оптичному волокні. Оптичні підсилювачі здатні підсилювати сигнали в широкому діапазоні довжин хвиль, що дозволяє передавати великі об'єми даних на великі відстані без зниження якості сигналу. Оптичні підсилювачі базуються на принципі стимульованої емісії, коли фотони взаємодіють з активними речовинами в підсилювачі та стимулюють емісію додаткових фотонів. Цей процес призводить до підсилення сигналу та збільшення його інтенсивності [6,7].

2.2 Конструктивно-технічні особливості ВОЛЗ

Оптичне волокно складається з двох основних елементів: ядра та оболонки. Ядро - це центральна частина волокна, через яку пропускається оптичний сигнал.

Ядро має високий показник заломлення, що дозволяє світлу розповсюджуватися вздовж волокна, відбиваючись від оболонки і повертаючись у ядро. Обкладка - це зовнішній шар волокна, що оточує ядро. Вона має нижчий показник заломлення, що дозволяє зберігати світло в ядрі волокна за рахунок повного відбивання на межі ядра та оболонки. Обидва елементи оптичного волокна виготовляються зі скла або пластику, залежно від застосування та вимог до характеристик волокна. Оптичне волокно може мати різний діаметр та геометрію ядра та оболонки, що впливає на кінцеві характеристики волокна [11].

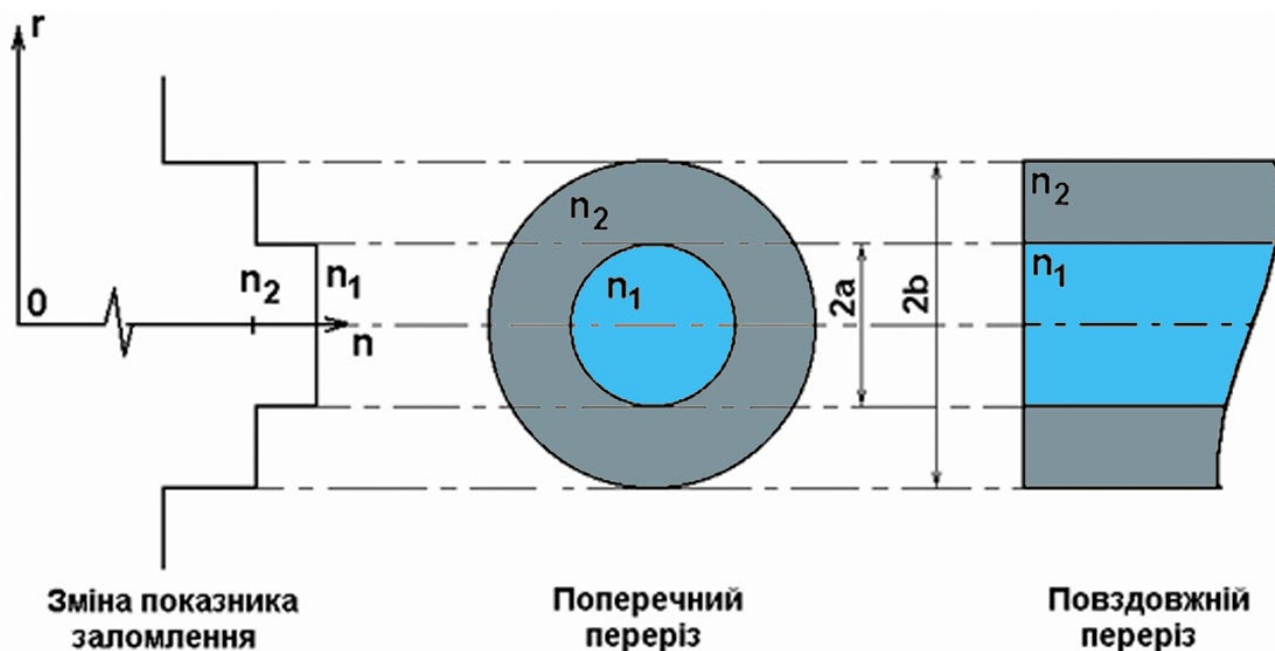


Рисунок 2.3 – Переріз оптичного волокна. Адаптовано з праці [5]

Волоконно-оптичні лінії зв'язку можна поділити на дві основні категорії: одномодові та багатомодові. Одномодові волокна мають малий діаметр ядра, порядку кількох мікрометрів, що дозволяє передавати сигнали тільки в одному режимі - основному моді. Оскільки сигнал передається лише в одному режимі, то одномодові волокна забезпечують високу пропускну здатність та дальність передачі сигналу, що застосовується у міжрегіональних, міжнародних лініях зв'язку.

Багатомодові волокна мають більший діаметр ядра, порядку декількох десятків мікрометрів, тому вони дозволяють передавати сигнали в кількох

режимах - модах. Це дозволяє передавати більше інформації на одній лінії, але з погіршенням якості передачі на великих відстанях. Багатомодові волокна застосовуються в короткій дистанції передачі, наприклад, у локальних мережах, де велика пропускна здатність не є першорядною важливістю.

При поширенні оптичного сигналу через волоконно-оптичний кабель на початкових метрах розповсюдження, світлові хвилі можуть взаємодіяти та гасити одна-одну через інтерференцію. Рівняння Максвелла для електромагнітних хвиль, яке математично описує моди, описує їх як характерні розподіли електричного поля в поперечному перерізі, які відповідають певним напрямкам вектора електричного поля, швидкості поширення та коефіцієнту ослаблення хвилі. Тому оптичний сигнал — це серія оптичних мод, які проходять волоконно-оптичним кабелем як модульоване випромінювання джерела. Нормалізована частота описує модовий склад у ВОЛЗ:

$$v = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.7)$$

де d – діаметр серцевини.

Тип волокна визначається нормалізованою частотою $v < 2.405$ – одномодове, якщо $v > 2.405$ – багатомодове і $v = 2.405$ – нестійка межа [12].

Гранична частота поширення у волокні мод обмежується максимальною частотою світловода vk .

$$vk = \frac{c \cdot v}{\pi \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (2.8)$$

Як вже було розглянуто, при передачі декількох променів, виникає затримка у часі. Внаслідок цього у багатомодових волокнах, кількість світлових мод, які можуть бути передані, обмежена через дисперсію мод. Щоб уникнути цього, кількість передаваних мод в багатомодових волокнах обмежена.

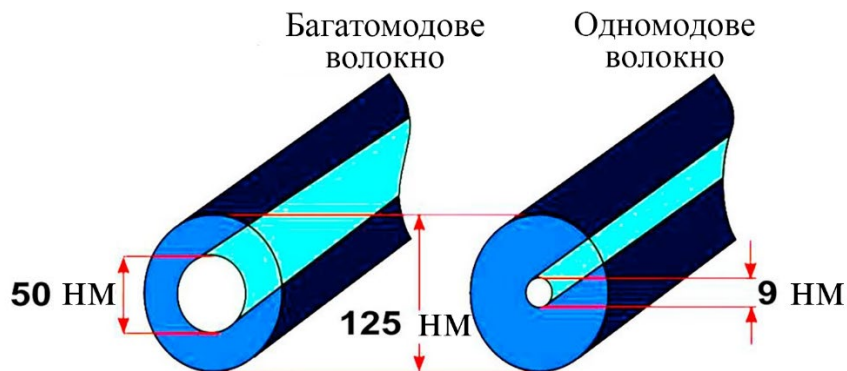


Рисунок 2.4 – Переріз багатомодового і одномодового оптичного волокна.
Адаптовано з праці [7]

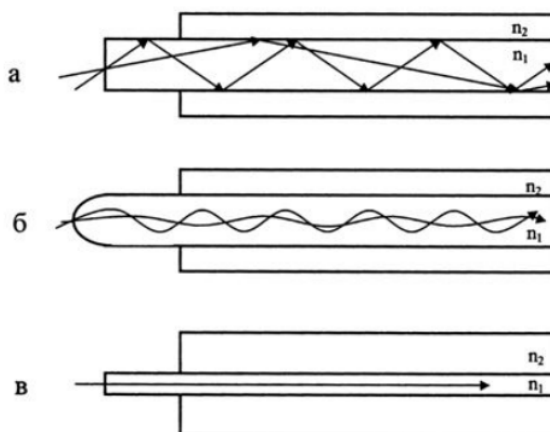


Рисунок 2.5 – Профілі заломлення в залежності від виду оптичного волокна:
а – багатомодове; б – градієнтне; в - одномодове [12]

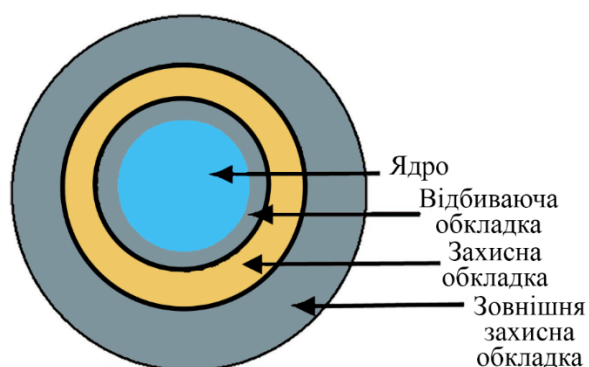


Рисунок 2.6 – Конструкція волоконно-оптичного кабелю. Адаптовано з праці [7]

$$M = \frac{v^2}{2(1+\frac{2}{u})}, \quad (2.8)$$

де u – показник, що описує зміни профіля показника заломлення

Ще одним різновидом оптичних волокон є градієнтні ВОЛЗ. У них показник заломлення матеріалу в ядрі волокна змінюється поступово від центру волокна до його оболонки. Це відрізняє градієнтні волокна від звичайних, в яких показник заломлення матеріалу в ядрі та оболонці залишається постійним. Градієнтні волокна використовуються в різних пристроях, таких як лазери, оптичні підсилювачі, оптичні модулятори та інші.

Серцевина оптичного волокна, або ядро - це найтонший компонент волокна, який пропускає світло. Основними матеріалами є скло або пластик. Скло, яке використовується в ядрі - це надчистий діоксид кремнію (SiO_2). Його прозорість досягає таких величин, що при погляді крізь нього можна без перешкод дивитися на відстань 5 км. Деякі легуючі добавки, такі як германій, п'ятиокис фосфору або оксид алюмінію, використовуються в процесі реформування для підвищення показника заломлення. Показник заломлення серцевини має величину від 1,4 до 1,5 і завжди більше відбиваючої обкладки на різницю близько 1%. Діаметри для багатомодових волокон становлять 50 мкм і 62,5 мкм, залежно від регіону використання. Одномодові мають діаметр 9 мкм.

Відбиваюча обкладка є зовнішнім шаром ядра. Обкладка оточує сердечник і знижує показник заломлення, що необхідно для повного внутрішнього відбивання. Зовнішня обкладка та серцевина виготовляються з одного матеріалу та міцно сплавлені. Щоб підтримувати різницю в показниках заломлення між серцевиною та оболонкою на 1 відсоток, у процесі виробництва до серцевини та оболонки додається різна кількість легуючих добавок. При використанні $\lambda = 1300$ нм типове ядро має показник заломлення 1.49, тоді як оболонка має показник заломлення 1.47. Параметри заломлення залежать від довжини хвилі. На різних довжинах хвиль серцевина одного волокна матиме різний показник заломлення. Обкладка, як і сердечник, виготовляються за стандартними діаметрами. Щоб

оптичне волокно функціонувало належним чином, його показник заломлення має бути нижчим, ніж скляна оболонка серцевини, яка раніше виготовлялася окремо від серцевини та оболонки.

Захисна обкладка захищає сердечник і внутрішню обкладку від подряпин, порізів, вологи та ударів, які інакше можуть призвести до його руйнування. Без захисного покриття оптичне волокно є досить крихким матеріалом. Розрив оптичного волокна без покриття може статися, коли воно згинаються. ВОЛЗ не можна використовувати, поки на нього не буде нанесено захисне покриття. За стандартами зовнішній діаметр покриття зазвичай становить 250 або 500 мкм. Покриття оптичного волокна вибирається з урахуванням навколишнього середовища. Як правило, покриття складається з двох окремих шарів. Коли оптичні волокна згинаються, перше (основне) покриття діє як демпфер, оскільки оптичне волокно доволі крихке через свою структуру. Другий шар це композитні матеріали, такі як поліімід і полікарбонат, що часто використовуються для складних зовнішніх середовищ, таких як аерокосмічна галузь. Звичайний акрилат витримує температуру до 125 градусів Цельсія [7].

2.3 Втрати при передачі сигналу у ВОЛЗ

При передачі сигналу у волоконно-оптичних лініях зв'язку відбуваються різноманітні втрати, які знижують якість та дальність передачі сигналу. Втрати виникають як у самому оптичному волокні, внаслідок не ідеальності структури оптичного матеріалу, нано пошкоджень і інших факторів. Інші втрати виникають при формуванні і введенні сигналу у ВОЛЗ.

Для того, щоб розібратися з можливими втратами пов'язаними з формуванням і введенням сигналу розглянемо узагальнену структурну схему системи передачі інформації за допомогою ВОЛЗ.



Рисунок 2.7 – Схема блоків для передачі та отримання сигналу через волоконно-оптичні лінії зв'язку [12].

Система для створення, передачі та прийому сигналу через ВОЛЗ складається з декількох основних елементів. Перетворювачем інформації є випромінювач. Він генерує оптичний сигнал, який потім передається через ВОЛЗ. В якості випромінювача можуть використовуватися лазери або світлодіоди. Суттєвою перевагою лазерних випромінювачів є вузька ширина спектра випромінювання, що створює хроматичну дисперсію у волоконно-оптичному кабелі. У випадку, коли площа поверхні випромінювання перевищує площу осердя волоконно-оптичного кабелю використовуються пристрої введення випромінювання призначені для зменшення втрат при передачі оптичного сигналу. Відсутність таких пристроїв може призвести до втрат, які перевищують 20 дБ [13].

Кодер каналу волоконно-оптичної лінії зв'язку - пристрій, який перетворює вхідний потік даних в послідовність бітів, що може бути передана через ВОЛЗ. Його основна функція - забезпечити передачу даних з високою надійністю та мінімальною кількістю помилок. Дані можуть передаватися в аналоговому, або цифровому вигляді. Після кодування, отримана послідовність бітів проходить етап модулювання, де вона перетворюється на сигнал, який може бути переданий через волоконно-оптичний кабель. Використовуються різні методи модуляції, такі як амплітудна модуляція (АМ), частотна модуляція (FM) або фазова модуляція (PM). Модулятор контролює інтенсивність оптичного сигналу, який буде передано через ВОЛЗ. Модулятори можуть бути акусто-оптичними, електро-

оптичними або проміжними.

Сформований сигнал проходить по оптичному кабелю і потрапляє на блоки прийому сигналу. Оптичний приймач приймає оптичний сигнал, який передається через ВОЛЗ, та перетворює його на електричний сигнал. Демодулятор використовується для виділення корисної інформації з електричного сигналу, отриманого від оптичного приймача. Декодер приймає електричний сигнал від демодулятора та обробляє його для подальшого використання.

Аддитивний шум є загальною проблемою при передачі сигналу через будь-який канал. Він може бути створений усередині електронних компонентів та називатись тепловим шумом, а також мати інші джерела шуму та інтерференції (накладання), які можуть виникати зовні системи, наприклад, внаслідок перехідних перешкод від інших користувачів каналу [12,13]. Таким чином значення максимального допустимих втрат визначається наступними формулами:

$$A_{max} = \alpha * L + n_{зв} * A_{зв} + n_p * A_p, \quad (2.9)$$

де α – коефіцієнт згасання на заданій λ ;

L – довжина ВОЛЗ;

$n_{зв}$ та n_p – кількість зварних та роз'ємних з'єднань;

$A_{зв}$ та A_p – номінальні втрати на зварному та роз'ємному з'єднанні відповідно.

Енергетичні втрати пов'язані з урахуванням випромінювача та приймача сигналу, максимально допустимих втрат описуються узагальненою формулою:

$$A_{ен} = P_{вип} - P_{прийм} - A_{ЕКА} - A_{ЕЗК} - A_{max}, \quad (2.10)$$

де $P_{вип}$ та $P_{прийм}$ – відповідні потужності випромінювача та приймача;

$A_{ЕКА}$ та $A_{ЕЗК}$ – експлуатаційні запаси апаратури і кабелю.

Не всі довжини хвиль підходять для використання у ВОЛЗ. Це обмежено параметром хвилі відсікання, при перевищенні якої мода перестає існувати. При

наближенні до цієї довжини хвилі радіус моди зростає і кількість енергії значно менше залишається у серцевині волокна [14].

$$r \approx \frac{d}{2} \left(0,65 + 1,62 * v^{-\frac{3}{2}} + 2,88 * v^{-6} \right), \quad (2.11)$$

де d – діаметри серцевини.

Волоконно-оптичні системи працюють у трьох спектральних діапазонах, які характеризуються локальними мінімумами згасання світла в кварцовому волокні. Спектральні діапазони з центральними довжинами хвиль $\lambda = 850$ нм, $\lambda = 1300$ нм і $\lambda = 1550$ нм [14].

Процес згасання та втрат в оптичному волокні відбувається через кілька механізмів, які можуть відбуватися окремо чи одночасно. Одним з головних механізмів є розсіювання, коли частинка світла зіткнулася з дислокацією або неоднорідністю в структурі волокна, і в результаті відбувається розсіювання енергії світла в різних напрямках. Це призводить до втрати енергії та зменшення інтенсивності сигналу в оптичному волокні. Іншим механізмом втрат є поглинання, коли світлова енергія поглинається матеріалом волокна. Це може відбуватися через залежність індексу заломлення матеріалу від довжини хвилі світла, тому певні ділянки спектру світла можуть бути поглинуті волокном.

Також втрати можуть виникати через дисперсію, коли різні довжини хвиль світла розповсюджуються з різною швидкістю. Це призводить до розтягнення пульсів світла та збільшення їх тривалості, що може знизити пропускну здатність та якість сигналу. Втрати у самому оптичному волокні описуються рівнянням:

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{дом}} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{ік}} \quad (2.12)$$

де $\alpha_{\text{п}}$ – втрати на поглинання світлового сигналу;

$\alpha_{\text{р}}$ – втрати, викликані неоднорідністю матеріалу і внаслідок цього релеевського розсіювання;

$\alpha_{\text{дом}}$ – втрати через домішки у оптичному волокні, через які поглинається світловий потік;

$\alpha_{\text{к}}$ – втрати, викликані внаслідок виробничої деформації оптичного волокна;

$\alpha_{\text{ік}}$ – втрати, в залежності від довжини хвилі і поглинання в інфрачервоному спектрі.

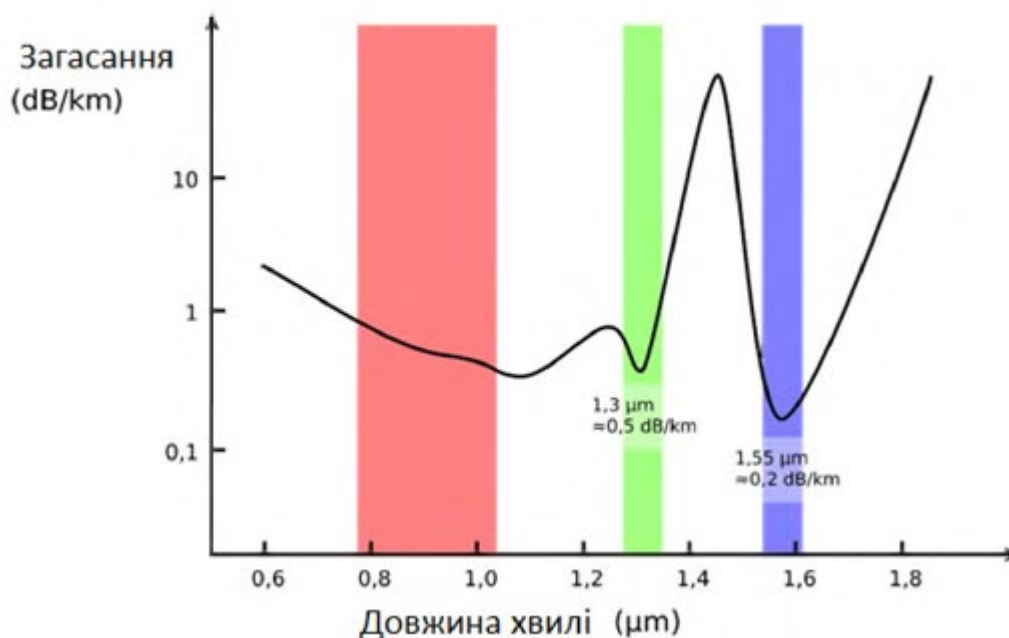


Рисунок 2.8 – Залежність згасання оптичного сигналу від його довжини хвилі у ВОЛЗ [15]

Для зменшення втрат у волоконно-оптичній системі можуть використовуватися спеціальні покриття на волокні, які допомагають зменшити розсіювання та поглинання, а також можуть застосовуватися спеціальні оптичні пристрої, наприклад, підсилювачі сигналу [12].

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ВОЛЗ

3.1 Теоретичні розрахунки основних характеристик ВОЛЗ

При розробці і прокладанні ВОЛЗ важливо враховувати різні фактори, які впливають на їх ефективність та ефективність використання. Проведемо розрахунки параметрів ВОЛЗ з використанням різних методів та формул, що дозволяє оцінити характеристики ВОЛЗ та забезпечити ефективну передачу сигналів на великі відстані з мінімальними втратами. Отримані результати можуть бути корисними для практичного використання ВОЛЗ та розробки нових рішень у галузі зв'язку.

Перше завдання полягає у визначенні максимального діаметру сердцевини двошарового одномодового оптичного волокна з діелектричною проникністю сердцевини n_1 і оболонки n_2 на довжині хвилі λ .

Таблиця 3.1 – Характеристики ВОЛЗ для визначення максимального діаметру сердцевини

n_1	n_2	λ , мкм
2.25	2.24	1.3

Розраховуємо максимальний діаметр сердцевини двошарового одномодового оптичного волокна:

$$d_c = \frac{v_{кр} * \lambda}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (3.1)$$

$$d_c = \frac{2.405 * 1.3 * 10^{-6}}{3.14 \sqrt{2.25 - 2.24}} = 9.96 \text{ мкм}$$

де $v_{кр} = 2.405$, згідно формули 2.7.

Наступним завданням є визначення оптимальних характеристик оптичного волокна на заданій довжині хвилі λ , мкм, при радіусі серцевини кварцевого волокна d , мкм з показником заломлення серцевини n_1 і оболонки n_2 [11].

Таблиця 3.2 – Характеристики ВОЛЗ для визначення оптимальних характеристик оптичного волокна

n_1	n_2	d , мкм	λ , мкм
1.48	1.45	2.5	1.06

Визначення нормованої частоти є важливим етапом при розрахунку та проектуванні ВОЛЗ. Нормована частота відображає співвідношення діаметру волокна та довжини хвилі оптичного сигналу, що передається через волоконно-оптичний кабель. Вона дозволяє визначити можливі максимальні частотні параметри, які можуть передаватися через волоконно-оптичний кабель без значного зниження якості сигналу. Знання нормованої частоти є важливим для визначення типу волоконно-оптичного кабелю, який підходить для конкретної задачі передачі сигналу. Крім того, воно впливає на вибір різних компонентів системи передачі сигналу, таких як оптичні підсилювачі, модулятори та інші [2]. За формулою 2.7 знайдемо нормовану частоту для даного волокна [13]:

$$v = \frac{2 * 3.14 * 2.5 * 10^{-6}}{1.06 * 10^{-6}} \sqrt{1.48^2 - 1.45^2} = 4.393 \text{ Гц,}$$

Порівняємо знайдену частоту з критичною: $v > v_{кр}$, то оптичне волокно працює в багатомодовому режимі. Далі знаходимо межі зміни фазової швидкості. Фазова швидкість - це швидкість розповсюдження фазової складової електромагнітної хвилі в оптичному волокні. Фазова складова визначає фазову структуру хвилі, а отже, фазову інформацію, що передається в сигналі. Фазова швидкість може змінюватися в залежності від властивостей волокна, наприклад, дисперсії, що може призводити до спотворення сигналу. Її можна визначити за

такими формулами:

$$V_{\text{фмін}} = \frac{c}{n_1}, \quad V_{\text{фмакс}} = \frac{c}{n_2}, \quad (3.2)$$

де c – швидкість світла у оптоволокну.

$$V_{\text{фмін}} = \frac{3 * 10^5}{1.48} = 202702.7 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

$$V_{\text{фмакс}} = \frac{3 * 10^5}{1.45} = 206896.6 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

$$202702.7 \frac{\text{КМ}}{\text{с}} < V_{\text{ф}} < 206896.6 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

Групова швидкість - це швидкість розповсюдження групової складової хвилі, яка відповідає енергії, що переноситься сигналом. Групова складова визначає затримку, яка виникає у різних частин сигналу під час проходження через волокно. Це може призводити до спотворень сигналу та зниження швидкості передачі даних. Розрахуємо мінімальну та максимальну межу зміни групової швидкості [2,11]:

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}, \quad (3.3)$$

$$V_{\text{гмін}} = \frac{c}{n_1} (1 - \Delta), \quad V_{\text{гмакс}} = \frac{c}{n_2} (1 - \Delta), \quad (3.4)$$

$$\Delta = \frac{(1.48 - 1.45)}{1.48} = 0.02.$$

$$V_{\text{гмін}} = \frac{3 * 10^5}{1.48} (1 - 0.02) = 198593.9 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

$$V_{\text{гмакс}} = \frac{3 * 10^5}{1.45} (1 - 0.02) = 202702.7 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

$$198593,9 \frac{\text{КМ}}{\text{с}} < V_{\text{г}} < 202702,7 \frac{\text{КМ}}{\text{с}}$$

3.2 Розрахунок основних параметрів роботи ВОЛЗ

Розрахуємо кількість мод, що направляється однорідним двошаровим волоконним світловодом зі ступінчатим профілем показника заломлення з такими параметрами:

Таблиця 3.3 – Характеристики ВОЛЗ для визначення кількості мод

n_1	n_2	d , мкм	λ , мкм
1.4665	1.452	25	0.84

Кількість мод у волокні можна визначити за співвідношенням:

$$N = \frac{v^2}{2}, \quad (3.5)$$

$$v = \frac{2 * 3.14 * 25 * 10^{-6}}{0.84 * 10^{-6}} \sqrt{1.4665^2 - 1.452^2} = 38.47 \text{ Гц.}$$

$$N = \frac{38.47^2}{2} = 740 \text{ мод.}$$

Полоса пропускання ВОЛЗ - це діапазон частот оптичних сигналів, які можуть проходити через волоконно-оптичний кабель без істотної згуби. Полоса пропускання ВОЛЗ залежить від багатьох факторів, таких як тип волокна, діаметр сердцевини, режим роботи передавача та приймача, і т.д. Чим ширша полоса пропускання, тим більше інформації може бути передано за одиницю часу, але при цьому може збільшуватися рівень шумів та спотворень сигналу. Тому значення полоси пропускання впливає на максимальну дальність передавання даних у ВОЛЗ. Розрахуємо на яку відстань зможе забезпечити передачу цифрового сигналу ВОЛЗ, за полосою пропускання Δf , та тактовою частотою f [16,17].

Таблиця 3.4 – Характеристики пропускної здатності ВОЛЗ

Δf , МГц*км	f , МГц
250	750

Тоді відстань, на яку може бути переданий сигнал:

$$l = \frac{\Delta f}{f}, \quad (3.6)$$

$$l = \frac{250 \cdot 10^6}{750 \cdot 10^6} = 333 \text{ м.}$$

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі вивчено конструкцію та принципи функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку, розглянуті основні типи волокон та їх параметри, способи зменшення втрат сигналу.
2. На основі аналізу літературних даних встановлено, що ВОЛЗ залишаються основним методом передачі великої кількості даних на великі відстані. Продемонстровані новітні дослідження щодо покращення параметрів оптичного волокна.
3. Показані основні причини джерела втрат, такі як втрати через розсіяння, втрати на поглинання, втрати від роз'ємних та зварних з'єднань, втрати на згини і втрати від потужності випромінювача.
4. Проведені розрахунки характеристик і параметрів ВОЛЗ, що використовуються при проектуванні ліній. Визначені і описані параметри та їх вплив на швидкість передачі, відстань передачі даних без пошкоджень і втрат. Розрахований максимальний діаметр серцевини оптичного волокна становить 9.96 мкм, для цього волокна можливе пропускання 740 мод на відстань 333 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корчак Ю. Оптоелектронна інформатика. Том I. Основні принципи та прилади: навчальний посібник – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 406 с.
2. Кучеренко О.К., Колобродов В. Г., Тягур В. М., Русняк І.М. Волоконна та інтегральна оптика. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 216 с.
3. Optical fibre history. Optical Fibre History. URL: <https://opticalfibrehistory.co.uk/> (date of access: 01.05.2023).
4. First optical transatlantic cable TAT-8. IEEE communications society. IEEE Communications Society. URL: <https://www.comsoc.org/node/19856> (дата звернення: 01.05.2023).
5. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно - оптичні системи передачі. навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 227 с.
6. S. Kaur, P. Singh, V. Tripathi. Recent trends in wireless and optical fiber communication // Global transitions proceedings. 2022. Volume 3. Pages 343-348.
7. Addanki S., Amiri I. S., Yurapin P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers // Results in physics. 2018. Volume 10. Pages 743–750.
8. Nyachionjeka K., Tarus H., Langat K. Design of a photonic crystal fiber for optical communications application. Scientific african. 2020. Volume 9. Pages e00511.
9. R. Amin, R. Taha, B.R. Altahan. FEA LiNbO₃: Finite element analysis of novel LiNbO₃ material based fiber for optical communication properties of nonlinear applications // Alexandria engineering journal. 2022. Volume 61, no. 12. Pages 12915-12923.
10. R Martini. Free Space Optical Communications // Optical communication systems. 2005. Pages 402-409.
11. Каток В. Б., Руденко І. Е., Однорог П. М. Волоконно- оптичні лінії зв'язку : навч. посібник для інж.-техн. прац. і студ. - Київ, 2016. 445 с.
12. Розорінов Г. М., Соловйов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. Навчальний посібник. - К.: Кафедра, 2019. - 410с

13. Розорінов Г. М., Соловйов Д.О., Яковенко Л. В. Мережі передавання даних: Напрямні системи оптичного зв'язку. Навчальний посібник. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 128с.
14. О. В. Онищук і К. О. Коваль. Аналіз загасання у волоконно-оптичній лінії зв'язку. // Опт-ел. інф-енерг. техн., вип. 28, вип. 2, 2014. с. 129–133.
15. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.
16. Книгавко М. В., Косова В. В. Лінії зв'язку і автоматики: навч. посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2005. - Ч. 1, 2.
17. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Волоконно-оптичні системи передачі: навч. посібник. Вінниця, 2005. - 225 с.