

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ЛОЕТМ-19-1  
Патлань М. В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Курський Ю. С.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Мачехін Ю. П.  
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Фізичних основ електронної техніки \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» \_\_\_\_\_

(код і повна назва)

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Лазерна і оптоелектронна техніка» \_\_\_\_\_

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Патланю Михайлу Вікторовичу \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Розвиток методів оптичного зв'язку \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від " 27 " жовтня 2020 р. № 1451 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 17 грудня 2020р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи  $A_0 = 1$  В;  $\tau_0 = 2$  пс;  $t = -10 \text{ — } 10$  пс з кроком 0,1 пс;  $\lambda = 800$  нм. \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Принцип роботи відкритих та закритих ліній зв'язку. 2 Структурні елементи ліній зв'язку. 3 Проблеми, з якими можна зустрітись при створенні ліній зв'язку. 4 Розгляд шляхів вдосконалення лійній зв'язку. \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)  
Демонстраційний матеріал – 14 шт.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел з історії та розвитку оптоволоконного зв'язку	03.11.2020—10.11.2020	Виконано
2	Дослідження властивостей та характеристик оптичних солітонів	11.11.2020—20.11.2020	Виконано
3	Аналітичний розрахунок огинаючої та спектрів оптичного солітону	21.11.2020—29.11.2020	Виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	30.11.2020—04.12.2020	Виконано
5	Оформлення демонстраційного матеріалу	05.12.2020—09.12.2020	Виконано
6	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії на роботу	10.12.2020—18.12.2020	Виконано
7	Підготовка та захист атестаційної роботи	19.12.2020—22.12.2020	

Дата видачі завдання   2   листопада 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. каф. ФОЕТ Курський Ю. С.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 53 с., 15 рис., 2 додаток, 15 джерел.

ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ФЕМТОСЕКУНДНИЙ ЛАЗЕР, КОЕФІЦІЄНТ РОЗСИЮВАННЯ, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, ОПТИЧНИЙ СОЛІТОН, МОДУЛЯЦІЯ, ДЕМОДУЛЯЦІЯ, САМОМОДУЛЯЦІЯ, ОПТИЧНІ ВТРАТИ

Об'єкт дослідження — системи оптичного зв'язку.

Метою атестаційної роботи є дослідження напрямків розвитку систем оптичного зв'язку.

Для досягнення мети, було розглянуто.

1. Принцип роботи відкритих ліній зв'язку
2. Принципи роботи волоконо–оптичних ліній зв'язку.
3. Структурні елементи (ВОЛЗ).
4. Проблеми з якими зустрічаються при створенні ВОЛЗ
5. огляд шляхів вдосконалення та подальшого розвитку ліній зв'язку.

Методи дослідження — аналітичні та чисельні за допомогою системи комп'ютерної математики MathCAD.

## ABSTRACT

Explanatory note to attestation work: 53 p., 15 fig., 1 appendices, 15 sources.

OPTICAL FIBER, FEMTOSECOND LASER, SCATTERING COURSE,  
REFRACTION INDICATION, OPTICAL SOLITON, MODULATION,  
DEMODULATION, SELF-MODULATION, OPTICAL LOSS

The object of research is optical communication systems.

To achieve the goal, the following were considered.

1. The principle of operation of open communication lines.
2. Principles of operation of fiber-optic communication lines.
3. Structural elements (FOCL).
4. Problems encountered when creating fiber-optic communication lines.
5. Consideration of ways to improve and further develop communication lines.

Research methods — analytical and numerical using the computer mathematics system MathCAD.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к аттестационной работе 53 с., 15 рис., 1 приложение., 15 источников.

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО, ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР,  
КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ, ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ОПТИЧЕСКИЙ  
СОЛИТОН, МОДУЛЯЦИЯ, ДЕМОДУЛЯЦИЯ, САМОМОДУЛЯЦИЯ,  
ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Объект исследования — системы оптической связи.

Целью аттестационной работы является исследование направлений развития систем оптической связи.

Для достижения цели, были рассмотрены.

1. Принцип работы открытых линий связи.
2. Принципы работы волоконно–оптических линий связи.
3. Структурные элементі (ВОЛС).
4. Проблемы с которыми сталкиваются при создании ВОЛС.
5. Рассмотрение путей совершенствования и дальнейшего развития линий связи.

Методы исследования — аналитические и численные с помощью системы компьютерной математики MathCAD.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Розвиток оптоволоконного зв'язку .....	11
1.1 Принцип роботи відкритих ліній зв'язку .....	11
1.2 Типи оптоволоконна .....	16
1.3 Переваги та недоліки ВОЛЗ .....	23
1.4 Перспективи розвитку ВОЛЗ .....	27
1.5 Нові стандарти та технології ВОЛЗ .....	28
2 Оптичні солітони в волоконно-оптичних лініях передачі інформації .....	31
2.1 Фізика оптичних солітонів .....	31
2.2 Оптичні солітони. Їх властивості та різновиди. ....	36
2.3 Схеми формування дисипативних оптичних солітонів .....	41
2.4 Історія дослідження дисипативних солітонів .....	46
3 Розрахунок оптичного солітону.....	48
3.1 Теоретичне описання оптичного солітону, як лазерного імпульсу .....	48
3.2 Аналітичний розрахунок огинаючої та спектру оптичного солітону .....	54
Висновки .....	51
Перелік джерел посилання .....	52
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	54

## ВСТУП

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) зароджувались в середині 70-х років ХХ століття коли фірма Corning освоїла виробництво волоконних світловодів з низьким загасанням, з'явилися надійні лазери, і з цього часу почалося практичне використання ВОЛЗ, стрімкий розвиток волоконних систем. За 30 років ВОЛЗ зайняли провідну позицію в системах передачі інформації, стали найважливішою ланкою в інформаційній інфраструктурі сучасного суспільства.

Історія розвитку ліній оптичного зв'язку в датах.

1. 1790 р. — оптичний телеграф у Франції.
2. 1860 р. — демонстрація А. Беллом модуляції оптичного сигналу дзеркалом.
3. 1881 р. передача мови за допомогою світлового променя.
4. 1970 р. — Ж. І. Алфьоров розробив напівпровідниковий лазер, що працює при кімнатній температурі.
5. 1970-1973 рр. — Corning Glass Company освоєє виробництво оптичного волокна з загасанням менше 20 дБ/км.
6. 1973 р. — отримані лазерні діоди з терміном служби 1000 год..
7. 1974 р. — розроблено градієнтне багатомодове волокно.
8. 1975 р. — перший комерційний напівпровідниковий лазер, що працює при кімнатній температурі.
9. 1976 р. — термін служби лазерів збільшений до 100000 год. (10 років).
10. 1976 р. — відкрито третє вікно в спектральному діапазоні роботи ВОЛЗ ( $l = 1,55$  мкм).
11. 1977 р. — термін служби лазерів збільшений до 1 млн. год. (100 років).
12. 1978 р. — тестування ВОЛЗ зі швидкістю передачі інформації 32 Мбіт/с, довжина ділянки 53 км і робоча довжина хвилі  $l = 1,3$  мкм.



13. 1978 р. — отримано загасання в оптичному волокні 0,2 дБ/км ( $l = 1,55$  мкм).
14. 1980 р. — перша комерційна ВОЛЗ (між Бостоном і Ричмондом — США), три робочих довжини хвилі, градієнтне багатомодове волокно, швидкість передачі інформації 45 Мбіт/с.
15. 1980 р. — передача по волоконній лінії відеосигналу з Зимової Олімпіади в Лейк Плесіді (градієнтне багатомодове волокно,  $l = 0,85$  мкм).
16. 1981 р. — отримана швидкість передачі сигналу 140 Мбіт/с в одномодовому волокні довжиною 49 км,  $l = 1,3$  мкм. Початок робіт з одномодовими волокнами зі зміщеною дисперсією.
17. 1982 р. — швидкість передачі в одномодовому волокні досягла 400 Мбіт/с ( $l = 1,3$  мкм).
18. 1987 р. — розроблений ербієвий оптичний підсилювач. Початок робіт по ВОЛЗ зі спектральним ущільненням.
19. 1988 р. — перший трансокеанський ВОЛЗ — ТАТ-8 (одномодові волокна,  $l = 1,3$  мкм).
20. 1993 р. — початок практичного використання оптичних підсилювачів.
21. 1995 р. — початок практичного використання ВОЛЗ зі спектральним ущільненням.
22. 1997 р. — розробка оптичних мультиплексорів адресного вводу/виведення.
23. 1998—2000 рр. — створення систем щільного (DWDM) і надщільного (HDWDM) спектрального ущільнення.
24. 1999—2000 рр. — створення оптичних перемикачів спектральних каналів.
25. 2000 р. — використання систем "грубого" спектрального ущільнення (CWDM).
26. 2000—2002 рр. — DWDM-системи з пропускною спроможністю до 1,6 Тбіт/с.

Одним із напрямів ВОЛЗ є розгляд зв'язку з використанням оптичних солітонів. Оптичні солітони — стійкі структури світла, локалізовані внаслідок балансу лінійного розпливання та нелінійного стиснення у середовищі, оптичні характеристики якого залежать від інтенсивності випромінювання.

Неоптичні дисипативні солітони у літературі вперше описані у 1831 р. М. Фарадеєм, який проводив експерименти з мілким порошком, що розташовувався на поверхні, що коливається.

Тема оптичних солітонів стала актуальною лише у лазерну еру, коли оптична нелінійність виявилась досить доступною для експериментів. Першим прикладом є передбачення Г. А. Аскар'яном просторово консервативного солітону у прозорому середовищі з самофокусуючою нелінійністю (показник заломлення середовища зростає з ростом інтенсивності випромінювання).

## 1 РОЗВИТОК ОПТОВОЛОКОНОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 1.1 Принцип роботи відкритих ліній зв'язку

Оптика відкриває широкі можливості там, де потрібні високошвидкісні комунікації з високою пропускнуою здатністю. У аудіо-візуальній області вона відкриває нові перспективи і надає рішення, недоступні за допомогою інших методів. Оптика проникла в усі ключові напрями — системи спостереження, диспетчерські та ситуаційні центри, на військові і медичні об'єкти, в зони з екстремальними умовами експлуатації. ВОЛЗ забезпечують високу ступінь захисту конфіденційної інформації, дозволяють передавати стиснені дані типу графіки з високою роздільною здатністю і відео з точністю до пікселя. Нові стандарти і технології ВОЛЗ. Волокно — майбутнє СКС (структурованих кабельних систем).

Оптоволоконний (він же волоконно-оптичний) кабель — це принципово інший тип кабелю в порівнянні з розглянутими двома типами електричного або мідного кабелю. Інформація по ньому передається не електричним сигналом, а світловим. Головний його елемент — це прозоре скловолокну, по якому світло проходить на величезні відстані (до десятків кілометрів) з незначним ослабленням.

Структура оптоволоконного кабелю дуже проста і схожа на структуру коаксіального електричного кабелю (рис. 1.1).

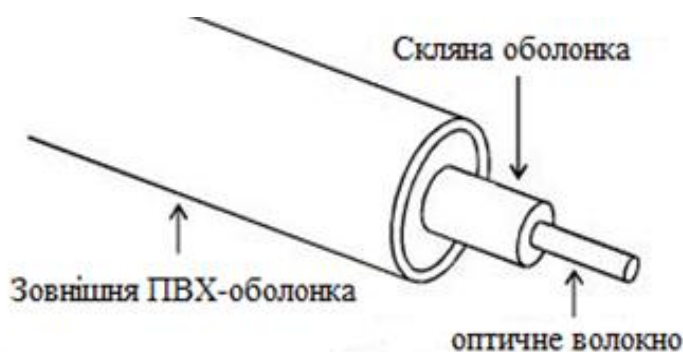


Рисунок 1.1 — Структура оптоволоконного кабелю

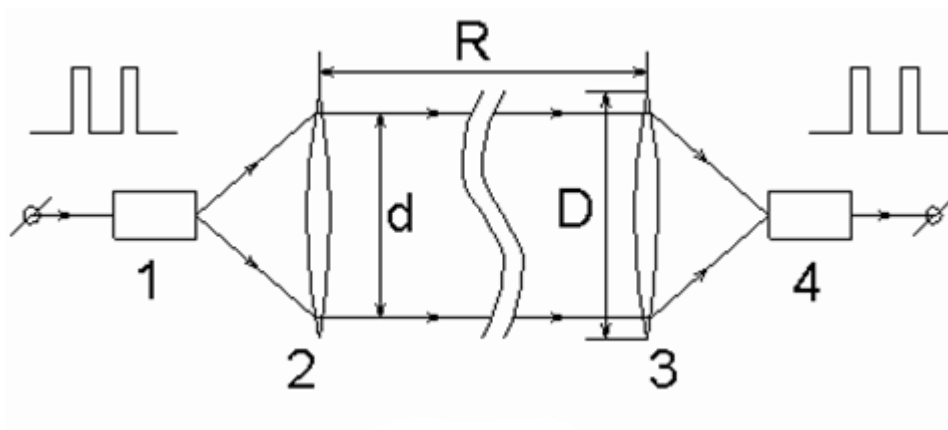
Тільки замість центрального мідного дроту тут використовується тонке (діаметром близько 1—10 мкм) скловолокно, а замість внутрішньої ізоляції — скляна або пластикова оболонка, що не дозволяє світлу виходити за межі скловолокна. В даному випадку мова йде про режим так званого повного внутрішнього відбиття світла від кордону двох речовин з різними коефіцієнтами заломлення (у скляній оболонці коефіцієнт заломлення значно нижче, ніж у центрального волокна).

Металева обплетення кабелю зазвичай відсутня, так як екранування від зовнішніх електромагнітних перешкод тут не потрібно. Однак іноді її все-таки застосовують для механічного захисту від навколишнього середовища (такий кабель іноді називають броньовим, він може об'єднувати під одним оболонкою кілька оптоволоконних кабелів).

Оптоволоконний кабель має виняткові характеристики по перешкодозахищеності і секретності переданої інформації. Ніякі зовнішні електромагнітні перешкоди в принципі, не здатні спотворити світловий сигнал, а сам сигнал не породжує зовнішніх електромагнітних випромінювань. Підключитися до цього типу кабелю для несанкціонованого прослуховування мережі практично неможливо, так як при цьому порушується цілісність кабелю. Теоретично можлива смуга пропускання такого кабелю досягає величини 1 кГц, що незрівнянно вище, ніж у електричних кабелів. Номінальна частота силового Алюмінієві кабелю 50 Гц. Вартість оптоволоконного кабелю постійно знижується і зараз приблизно дорівнює вартості тонкого коаксіального кабелю.

Типова величина загасання сигналу в оптоволоконних кабелях на частотах, використовуваних в локальних мережах, становить від 5 дБ/км до 20 дБ/км, що приблизно відповідає показникам електричних кабелів на низьких частотах. Але в разі оптоволоконного кабелю при зростанні частоти переданого сигналу загасання збільшується дуже незначно, і на більших частотах (особливо понад 200 МГц) його переваги перед електричним кабелем незаперечні, у нього просто немає конкурентів [1].

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) дозволяють передавати аналогові і цифрові сигнали на далекі відстані, в деяких випадках на десятки кілометрів. Вони також використовуються на малих, більш «керованих» відстанях, наприклад, всередині будівель (рис. 1.2). Приклади рішень з побудови СКС (структурованих кабельних систем) для побудови мережі підприємства.



1 — джерело випромінювання; 2, 3 — об'єктиви; 4 — фотоприймач.

Рисунок 1.2 — Відкрита оптична система зв'язку

При врахуванні тільки дифракційних ефектів розбіжність світла потужність  $P_R$  випромінювання, що падає на фотоприймач, описується рівнянням дальності:

$$P_R \approx 0,45 \frac{P_A \tau d^2 D^2}{R^2 \lambda^2}, \quad (1.1)$$

де  $P_A$  — потужність джерела випромінювання;

$\tau$  — коефіцієнт пропускання середовища розповсюдження;

$d$  та  $D$  — лінійна апертура (діаметр дзеркал);

$R$  — відстань;

$\lambda$  — довжина хвилі.

Коефіцієнт пропускання атмосфери дорівнює:

$$\tau = e^{-aR}, \quad (1.2)$$

де коефіцієнт  $a$  дорівнює сумі коефіцієнта поглинання Бугера  $a_B$  і коефіцієнта розсіювання  $a_s$ :

$$a = a_B + a_s. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт поглинання  $a_B$  для атмосфери помітно залежить від довжини хвилі випромінювання, і досягає мінімуму лише в кількох «вікнах прозорості» в околицях довжин хвиль 0,4—0,8; 1,5; 2; 3,5; 10,5 мкм. Коефіцієнт розсіювання  $a_s$  дорівнює сумі коефіцієнтів розсіювання Релея  $a_{SR}$  і розсіювання Мі  $a_{SM}$ :

$$a_s = a_{SR} + a_{SM}. \quad (1.4)$$

Розсіювання Релея є розсіювання світла на частинках, розміри яких набагато менше довжини світлової хвилі, і його вплив найбільш помітно в області коротких довжин хвиль:

$$a_{SR} = 0,83 \frac{NA^3}{\lambda^4}, \quad (1.5)$$

де  $A$  — площа поперечного перерізу частинок-розсіювачів;

$N$  — щільність розсіювачів.

Емпірична формула для коефіцієнта розсіювання  $Mi$  (розсіювання на частинках розмірами набагато більшими, ніж  $\lambda$ ) має вигляд:

$$a_{SM} = \frac{3,9}{\gamma} \left( \frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,58\gamma^{1/3}}, \quad (1.6)$$

де  $\gamma$  — метеорологічна дальність бачення, км.

Наприклад, при  $\gamma = 5$  км,  $\lambda = 1$  мкм,  $a_{SM} = 0,43$  км,  $\tau = 0,65$  [2].

Очевидно, на дальність (і надійність) відкритих систем зв'язку в атмосфері помітно впливають метеорологічні умови: туман, дощ, сніг, дим, турбулентність атмосфери та ін. Для великих відстаней  $R$  (кілометри і більше), внаслідок явищ рефракції і розсіювання, ускладнюється проблема точного наведення світлового променя на фотоприймальний систему, а також впливу фону (розсіяне випромінювання, небесні світила). Сучасні наземні відкриті системи зв'язку великий, понад 10 км, протяжності діють, в основному, в діапазоні довжин хвиль близько 10,6 мкм в режимі когерентного фотодетектування сигналу. Більш перспективно, з точки зору дальності зв'язку, застосування таких систем в космосі. У міських умовах, при дальності зв'язку близько 1 км, зручний діапазон довжин хвиль хвиль передачі сигналів знаходиться в області 0,8—0,9 мкм.

Переваги оптики добре відомі: це імунітет до шумів і перешкод, малий діаметр кабелів при величезній пропускну здатності, стійкість до злому і перехоплення інформації, відсутність потреби в ретрансляторах і підсилювачах і т.д. [3].

Проблеми з крайовим закладенням оптичних ліній на сьогодні в основному вирішені, так що працювати з цією технологією стало набагато простіше. Є, однак, ряд питань, які треба розглядати виключно в контексті областей застосування. Як і у випадку з передачею по «міді» або радіоканалу, якість волоконно-оптичного зв'язку залежить від того, наскільки добре узгоджені вихідний сигнал передавача і вхідний каскад приймача. Некоректна специфікація потужності сигналу призводить до збільшення коефіцієнта бітових помилок при передачі; потужність занадто велика — і підсилювач приймача «перенасичується», занадто мала — і виникає проблема з шумами, оскільки вони починають заважає корисного сигналу. Це два найбільш критичних параметри

ВОЛЗ: вихідна потужність передавача і втрати при передачі — загасання в оптичному кабелі, який з'єднує передавач і приймач.

Схема ВОЛЗ з когерентною демодуляцією сигналів представлена на рис. 1.3.

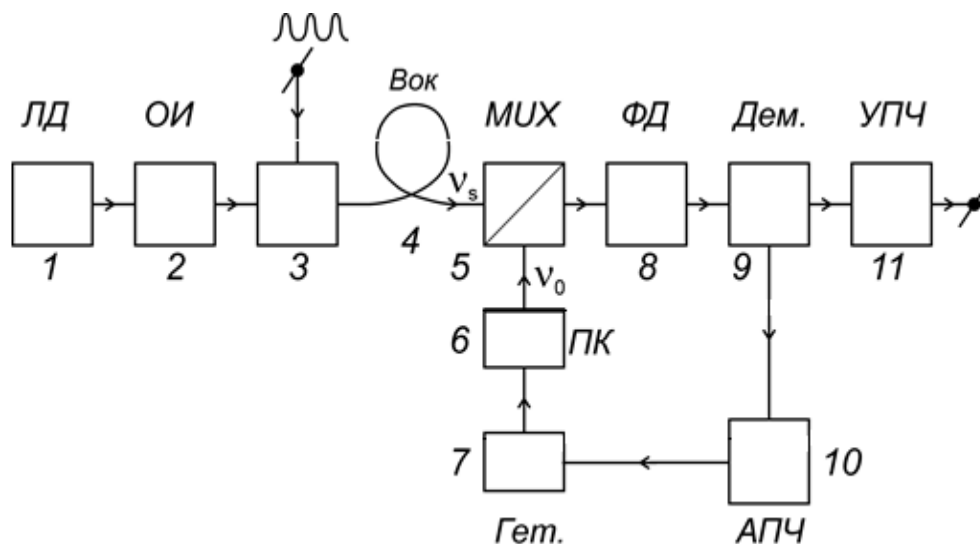


Рисунок 1.3 — Схема ВОЛЗ з когерентною демодуляцією сигналів

До схеми входять такі елементи: одночастотний лазер 1, оптичний ізолятор 2, модулятор (АМ, ЧМ або ФМ) сигналу 3, одномодове оптоволокно (оптична лінія передачі) 4, мультиплексор (змішувач) 5, поляризаційний контролер 6, гетеродин (лазер) 7, фотодетектор 8, демодулятор сигналу 9, пристрій автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) 10, підсилювач низької частоти 11.

## 1.2 Типи оптоволокна

Існують два різних типи оптоволоконного кабелю

1. Одномодовий кабель — дешевший, але менш якісний.
2. Багатомодовий кабель—дорожчий, але має кращі характеристики в порівнянні з першим.



Тип кабелю визначають кількість режимів поширення або «шляхів», за якими світло проходить всередині кабелю. На рис. 1.4 показані відмінності фізичних параметрів цих кабелів.

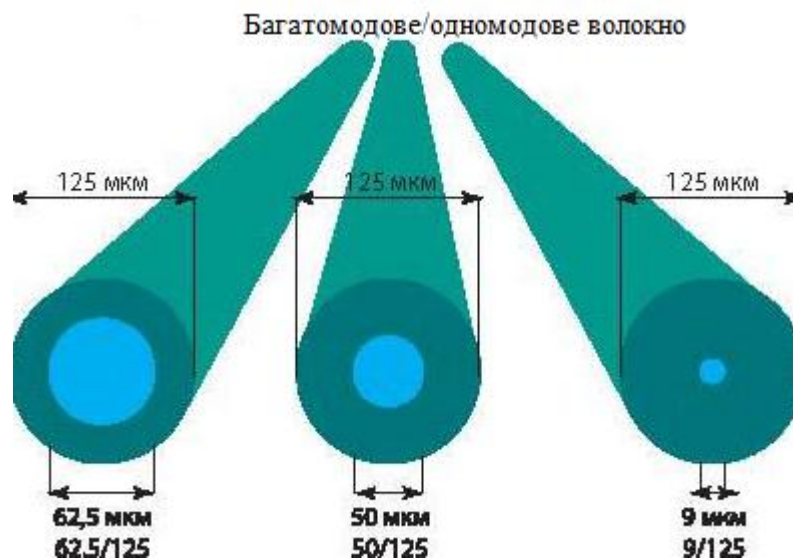


Рисунок 1.4 — Відмінності в фізичних параметрах одномодового і багатомодових оптичних кабелів

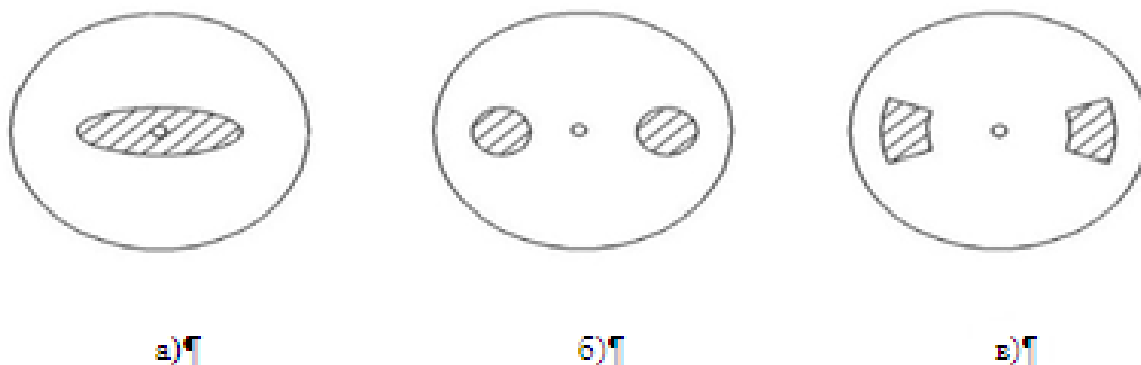
Багатомодовий кабель, найбільш часто використовуваний в невеликих промислових, побутових і комерційних проектах, має найвищий коефіцієнт ослаблення і працює тільки на коротких відстанях. Більш старий тип кабелю, 62,5/125 (ці цифри характеризують внутрішній/зовнішній діаметри світловода в мікрометрах), який часто називають «OM1», має обмежену пропускну здатність і використовується для передачі даних зі швидкістю до 200 Мбіт/с. Нещодавно стали застосовувати кабелі 50/125 «OM2» і «OM3», що пропонують швидкості 10 Гбіт/с на відстанях до 500 м і 10 Гбіт/с на до 300 м.

В оптичних приладах нерідко застосовуються однорідні кварцові світлопроводи з пластиковою оболонкою і полімерні, повністю виготовлені з полімерних матеріалів, світлопроводи. Як правило, вони відрізняються великою величиною числової апертури (0,3—0,5), великим діаметром сердечини

(150—200 мкм), а по параметрах дисперсії і оптичних втрат значно поступаються кращим зразкам ВС.

У волоконно-оптичних гіроскопах і в волоконних інтерферометрах використовуються світловоди зі збереженням поляризації випромінювання.

У таких одномодових световодах необхідна оптична анізотропія серцевини оптоволокна досягається внаслідок ефекту фотопружності. Різниця пружних механічних напружень уздовж ортогональних напрямків ( $x$ ,  $y$ ) в перерізі світловода створюється завдяки своєрідному розташуванню напружувальних оболонок в структурі ВС. Приклади поперечних перерізів ВС зі збереженням поляризації показані на рис. 1.5.



- а) з еліптичної напружувальною оболонкою;  
 б) тип «PANDA»; в) тип «краватка-метелик».

Рисунок 1.5 — ВС зі збереженням поляризації

Одномодовий кабель використовується в високошвидкісних з'єднаннях (вище 10 Гбіт/с) або на довгих дистанціях (до 30 км). Для передачі аудіо та відео найбільш доцільним є застосування кабелів «OM2» [3].

Віце-президент європейського відділення компанії Extron по маркетингу Райнер Штайль зазначає, що оптоволоконні лінії стали більш доступними, їх

частіше застосовують для організації мережі всередині будинків — це веде до зростання застосування АВ-систем на основі оптичних технологій.

У порівнянні з аналогічною мідно-кабельною інфраструктурою оптика дозволяє використовувати одночасно і аналогові, і цифрові відеосигнали, забезпечуючи єдине системне рішення для роботи з існуючими, а також з перспективними відеоформатами.

Отже, оптика пропонує дуже високу пропускну здатність: той же кабель буде працювати з великими дозволами і в майбутньому. ВОЛЗ легко адаптується до нових стандартів і форматів, які з'являтимуться в процесі розвитку АВ-технологій».

Іншим визнаним експертом в цій галузі є Джим Хейз, президент Американської Волоконно-оптичної Асоціації, створеної в 1995 році, що сприяє зростанню професіоналізму в області волоконної оптики і встановленню та впровадженню оптичних систем. Джим Хейз говорив про зростання популярності ВОЛЗ, про їх вигоду через швидкість інсталяції та дешевизну комплектуючих зростання застосування оптики в сфері телекомунікацій, особливо в системах Fiber-To-The-Home (FTTH) з підтримкою бездротового доступу, а також в сфері безпеки (камери спостереження).

Схоже, що сегмент FTTH зростає швидше за інших ринків у всіх розвинених країнах. В США, на оптиці побудовані мережі управління дорожнім рухом, муніципальних служб (адміністрація, пожежні, поліція), навчальних закладів (школи, бібліотеки).

Зростає кількість користувачів Інтернет — і у нас швидко будуються нові центри обробки даних (ЦОД), для взаємозв'язку яких використовується оптоволокно. Адаже при передачі сигналів зі швидкістю 10 Гбіт/с витрати аналогічні «мідним» лініях, але оптика споживає значно менше енергії.

Сьогодні зв'язок по WiFi став настільки якісним, що користувачі нетбуків, ноутбуків і iPhone'ів віддали перевагу мобільності. І тепер в корпоративних локальних мережах оптику використовують для комутації з точками бездротового доступу.

Дійсно, областей застосування оптики стає все більше, в основному, через зазначених вище переваг перед міддю. Оптика проникла в усі ключові напрямки — системи спостереження, диспетчерські та ситуаційні центри, на військові і медичні об'єкти, в зони з екстремальними умовами експлуатації. Зниження вартості обладнання дозволило використовувати оптичні технології в традиційно «мідних» областях — в конференц-залах і на стадіонах, в роздрібній торгівлі та на транспортних вузлах. Райнер Штайль з Extron коментує: «Волоконно-оптичне обладнання широко використовується в медичних установах, наприклад, для комутації локальних відеосигналів в операційних».

Оптичні сигнали не мають ніякого відношення до електрики, що ідеально в плані забезпечення безпеки пацієнтів. ВОЛЗ прекрасно підходять і для медичних навчальних закладів, де необхідно розподіляти відеосигнали з кількох операційних в кілька аудиторій, щоб студенти могли спостерігати за ходом операції «вживу».

Волоконно-оптичним технологіям віддають перевагу і військові, так як дані, що передаються важко або навіть неможливо «рахувати» зовні.

ВОЛЗ забезпечують високу ступінь захисту конфіденційної інформації, дозволяють передавати стиснені дані типу графіки з високою роздільною здатністю і відео з точністю до пікселя.

Можливість передачі на далекі відстані робить оптику ідеально підходить для систем Digital Signage в великих торгових центрах, де довжина кабельних ліній може досягати декількох кілометрів. Якщо для витої пари відстань обмежена 450 метрами, то для оптики і 30 км не межа ».

Що стосується використання оптоволокна в аудіо-візуальної індустрії, то прогресу тут сприяють два основні чинники. По-перше, це інтенсивний розвиток IP-заснованих систем передачі аудіо- та відео, які спираються на мережі з високою пропускнуною спроможністю — для них ВОЛЗ підходять ідеально. По-друге, повсюдне вимога передавати відео HD і комп'ютерні зображення HR на відстані більші, ніж 15 м — а це межа для передачі HDMI по міді.

Є випадки, коли відеосигнал просто неможливо «роздати» по мідному кабелю і необхідно застосувати оптоволокно — такі ситуації стимулюють розробку нової продукції. Бьюнг Хо Пак, віце-президент з маркетингу компанії Opticis, пояснює: «Для смуги даних UXGA, 60 Гц, і 24-бітового кольору потрібно загальна швидкість 5 Гбіт/с, або 1,65 Гбіт/с на кожний колірний канал. HDTV має дещо меншу пропускну здатність. Виробники «підштовхують» ринок, а й ринок одночасно «підштовхує» гравців використовувати зображення більш високої якості. Є окремі області застосування, де потрібні дисплеї, здатні відображати 3—5 млн пікс або 30—36 - бітову глибину кольору. У свою чергу, для цього буде потрібно швидкість передачі близько 10 Гбіт/с ». Сьогодні багато виробників комутаційного обладнання пропонують версії відео-подовжувачів (екстендерів) для роботи з оптичними лініями. ATEN International, TRENDnet, Rexton, Gefen і інші випускають різні моделі для цілого ряду відео — і комп'ютерних форматів. При цьому службові дані HDCP і EDID — можуть передаватися за допомогою додаткової оптичної лінії, а в деяких випадках — за окремим мідному кабелю, що зв'язує передавач і приймач. «В результаті того, що формат HD став стандартом для ринку мовлення, на інших ринках — інсталяційному, наприклад — теж стали застосовувати захист від несанкціонованого копіювання контенту в форматах DVI і HDMI», — говорить Джим Джачетта, старший віце-президент з розробок компанії Multidyne. За допомогою виробленого нашої компанії пристрої HDMI-ONE користувачі можуть відправити відеосигнал з DVD- або Blu-Ray плеєра на монітор або дисплей, розташований на відстані до 1000 м. Раніше жоден пристрій, що працює з багатомодовими лініями, не підтримувала систему захисту від копіювання HDCP ». На початку шляху на ВОЛЗ в першу чергу покладалися надії щодо вирішення проблеми гострої нестачі смуги пропускання каналів передачі інформації. На початку ери інформатизації, інформаційні потоки бурхливо зростали, а збільшення смуги пропускання систем зв'язку в основному відбувалося за рахунок зростання числа ліній передачі і явно відставало від потреб [4].

Оптичний канал передачі повинен був забезпечити смугу передачі більш 1 кГц, що давало вигаш в порівнянні з існуючими системами передачі не менше чотирьох порядків. За ці роки волоконні системи змогли реально наблизитися до граничних можливостей волокна як каналу передачі інформації, при цьому вперше вирішивши проблему дефіциту пропускної здатності каналів передачі інформації: в даний час актуальною є задача ефективного наповнення трафіком магістральних ВОЛЗ.

Значить хто працює з ВОЛЗ, не повинні забувати і про специфічні інсталяційних проблеми — кінцевий закладенні кабелів. В цьому плані багато виробників випускають як власне роз'єми, так і монтажні набори, що включають в себе спеціалізований інструмент. Тим часом, будь-який елемент ВОЛЗ, будь то подовжувач, роз'єм повинен за допомогою оптичного вимірювача бути перевірений на предмет ослаблення сигналу — це необхідно для оцінки загального бюджету потужності (power budget, основний розрахунковий показник ВОЛЗ). Природно, зібрати роз'єми волоконних кабелів можна і вручну, «на коліні», але дійсно високу якість і надійність гарантується тільки при використанні готових, вироблених на заводі «розібраних» кабелів, підданих ретельному багатоступінчатому тестування.

Незважаючи на величезну пропускну здатність ВОЛЗ, у багатьох все ще залишається бажання «запихнути» в один кабель побільше інформації.

Тут розвиток йде в двох напрямках — спектрального ущільнення (optical WDM), коли в один світловод направляється кілька світлових променів з різними довжинами хвиль, а інше — серіалізація/десеріалізацію даних (англ. SerDes), коли паралельний код перетвориться в послідовний і назад.

При цьому обладнання для спектрального ущільнення коштує дорого через складний проектування і застосування мініатюрних оптичних компонентів, але не збільшує швидкість передачі. Застосовувані в обладнанні SerDes високошвидкісні логічні пристрої також збільшують видаткову частину проекту.

Крім того, сьогодні випускається обладнання, що дозволяє мультиплексувати і демуплексувати із загального світлового потоку

керуючі дані — USB або RS232/485. При цьому світлові потоки можна відправляти по одному кабелю в протилежних напрямках, хоча ціна виконують ці «трюки» приладів зазвичай перевищує вартість додаткового світловода для повернення даних.

Оптика відкриває широкі можливості там, де потрібні високошвидкісні комунікації з високою пропускнуою здатністю. Це добре себе зарекомендувала, зрозуміла і зручна технологія. В аудіовізуальних області вона відкриває нові перспективи і надає рішення, недоступні за допомогою інших методів [5].

Залежно від основної області застосування волоконно–оптичні кабелі поділяються на два основних види.

1. Кабель внутрішньої прокладки — при монтажі ВОЛЗ в закритих приміщеннях зазвичай застосовується Волоконно–оптичний кабель з щільним буфером (для захисту від гризунів). Використовується для побудови СКС в якості магістрального або горизонтального кабелю. Підтримує передачу даних на короткі і середні відстані. Ідеально підходить для горизонтального калібрування.

2. Кабель зовнішньої прокладки: Волоконно–оптичний кабель з щільним буфером, броньований сталевією стрічкою, вологостійкий. Застосовується для зовнішньої прокладки при створенні підсистеми зовнішніх магістралей і пов'язують між собою окремі будівлі. Може прокладатися в кабельні канали. Підходить для безпосереднього укладання в ґрунт. Зовнішній самонесущий оптоволоконний кабель: Волоконно–оптичний кабель самонесучий, зі сталевим тросом. Застосовується для зовнішній прокладки на великі відстані в рамках телефонних мереж. Підтримує передачу сигналів кабельного телебачення, а також передачу даних. Підходить для прокладки в кабельній каналізації та повітряної прокладки.

### 1.3 Переваги та недоліки ВОЛЗ

#### Переваги ВОЛЗ.

1. Передача інформації по ВОЛЗ має цілий ряд переваг перед передачею по мідному кабелю. Стрімке впровадження в інформаційні мережі

ВОЛЗ є наслідком переваг, що впливають з особливостей поширення сигналу в оптичному волокні.

2. Широка смуга пропускання — обумовлена надзвичайно високою частотою несучої 1кГц. Це дає потенційну можливість передачі по одному оптичному волокна потоку інформації в кілька терабіт в секунду. Велика смуга пропускання — це одне з найбільш важливих переваг оптичного волокна над мідної або будь-який інший середовищем передачі інформації.

3. Мале загасання світлового сигналу у волокні. Випускає в даний час вітчизняними і зарубіжними виробниками промислове оптичне волокно має згасання від 0,2 дБ до 0,3 дБ на довжині хвилі 1,55 мкм в розрахунку на один кілометр. Мале загасання і невелика дисперсія дозволяють будувати ділянки ліній без ретрансляції протяжністю до 100 км і більше.

4. Низький рівень шумів в оптичному кабелі дозволяє збільшити смугу пропускання, шляхом передачі різної модуляції сигналів з малою і точністю коду.

5. Висока перешкодозахищеність. Оскільки волокно виготовлено з діелектричного матеріалу, воно несприйнятливо до електромагнітних перешкод з боку оточуючих мідних кабельних систем і електричного обладнання, здатного індукувати електромагнітне випромінювання (лінії електропередачі, електродвигунні установки і т.д.). У багатоволоконних кабелях також не виникає проблеми перехресного впливу електромагнітного випромінювання, властивою багатопарні мідних кабелях.

6. Мала вага і об'єм. Волоконно–оптичні кабелі (ВОК) мають меншу вагу і об'єм в порівнянні з мідними кабелями в розрахунку на одну і ту ж пропускну здатність. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см, може бути замінений одним волокном з діаметром 0,1 см. Якщо волокно "одягнути" в безліч захисних оболонок і покрити сталевий стрічковою бронею, діаметр такого ВОК буде 1,5 см, що в кілька разів менше розглянутого телефонного кабелю.



7. Висока захищеність від несанкціонованого доступу. Оскільки ВОК практично не випромінює в радіодіапазоні, то передану по ньому інформацію важко підслухати, не порушуючи прийому-передачі. Системи моніторингу (безперервного контролю) цілісності оптичної лінії зв'язку, використовуючи властивості високої чутливості волокна, можуть миттєво відключити "зламувати" канал зв'язку і подати сигнал тривоги.

8. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти розповсюджуваних світлових сигналів (як за різними волокнам, так і різної поляризації) мають дуже високу чутливість до коливань, до невеликих перепадів тиску. Такі системи особливо необхідні при створенні ліній зв'язку в урядових, банківських і деяких інших спеціальних службах, що пред'являють підвищені вимоги до захисту даних.

9. Гальванічна розв'язка елементів мережі. Дана перевага оптичного волокна полягає в його ізолюючій властивості. Волокно допомагає уникнути електричних "земельних" петель, які можуть виникати, коли два мережевих устрою неізолюваною обчислювальної мережі, пов'язані мідним кабелем, мають заземлення в різних точках будівлі, наприклад на різних поверхах. При цьому може виникнути велика різниця потенціалів, що здатне зашкодити мережеве обладнання. Для волокна цієї проблеми просто немає.

10. Вибухо і пожежобезпечність. Через відсутність іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку мережі на хімічних, нафтопереробних підприємствах, при обслуговуванні технологічних процесів підвищеного ризику.

11. Економічність ВОЛЗ. Волокно виготовлено з кварцу, основу якого складає двоокис кремнію, широко розповсюдженого, а тому недорогого матеріалу, на відміну від міді. В даний час вартість волокна по відношенню до мідної пари співвідноситься як 2:5. При цьому ВОК дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані без ретрансляції. Кількість повторителів на протяжних лініях скорочується при використанні ВОК. При використанні солітонних систем передачі досягнуті дальності в 4000 км без регенерації (тобто тільки з

використанням оптичних підсилювачів на проміжних вузлах) при швидкості передачі вище 10 Гбіт/с.

12. Тривалий термін експлуатації. Згодом волокно зазнає деградації. Це означає, що загасання в прокладеному кабелі поступово зростає. Однак, завдяки досконалості сучасних технологій виробництва оптичних волокон, цей процес значно уповільнений, і термін служби ВОК становить приблизно 25 років. За цей час може змінитися кілька поколінь/стандартів приймально-передавальних систем.

13. Віддалене електроживлення. У деяких випадках потрібно віддалене електроживлення вузла інформаційної мережі. Оптичне волокно не здатна виконувати функції силового кабелю. Однак, в цих випадках можна використовувати змішаний кабель, коли поряд з оптичними волокнами кабель оснащується мідним проводячим елементом. Такий кабель широко використовується у всьому світі [6].

#### Недоліки ВОЛЗ.

Найголовніший з них — висока складність монтажу (при установці роз'ємів необхідна мікронна точність, від точності відколу скловолокна і ступеня його полірування сильно залежить загасання в роз'ємі). Для установки роз'ємів застосовують зварювання або склеювання за допомогою спеціального гелю, що має такий же коефіцієнт заломлення світла, що і скловолокно. У будь-якому випадку для цього потрібна висока кваліфікація персоналу і спеціальні інструменти. Тому найчастіше оптоволоконний кабель продається у вигляді заздалегідь нарізаних шматків різної довжини, на обох кінцях яких уже встановлені роз'єми потрібного типу. Слід пам'ятати, що неякісна установка роз'єму різко знижує допустиму довжину кабелю, яка визначається загасанням.

#### Пам'ятка по використанню ВОЛЗ.

1. Використання оптоволоконного кабелю вимагає спеціальних оптичних приймачів і передавачів, що перетворюють світлові сигнали в електричні і назад, що часом істотно збільшує вартість мережі в цілому.

2. Оптоволоконні кабелі допускають розгалуження сигналів (для цього проводяться спеціальні пасивні розгалужувачі (couplers) на 2—8 каналів), але, як правило, їх використовують для передачі даних тільки в одному напрямку між одним передавачем і одним приймачем. Адже будь-яке розгалуження неминуче сильно послаблює світловий сигнал, і якщо розгалужень буде багато, то світло може просто не дійти до кінця мережі. Крім того, в розгалужувачі є і внутрішні втрати, так що сумарна потужність сигналу на виході менше вхідної потужності.

3. Оптоволоконний кабель менш міцний і гнучкий, ніж електричний. Типова величина допустимого радіусу вигину становить близько 10—20 см, при менших радіусах вигину центральне волокно може зламатися. Погано переносить кабель і механічне розтягнення, а також розчавлюють впливу.

4. Чутливий оптоволоконний кабель і до іонізуючих випромінювань, через які знижується прозорість скловолокна, тобто збільшується загасання сигналу. Різкі перепади температури також негативно позначаються на ньому, скловолокно може тріснути.

5. Застосовують оптоволоконний кабель тільки в мережах з топологією зірка і кільце. Ніяких проблем узгодження і заземлення в даному випадку не існує. Кабель забезпечує ідеальну гальванічну розв'язку комп'ютерів мережі. У майбутньому цей тип кабелю, ймовірно, витіснить електричні кабелі або, у всякому разі, сильно потіснить їх.

#### 1.4 Перспективи розвитку ВОЛЗ

У зв'язку з ростом вимог, що пред'являються новими мережевими додатками, стає все більш актуальним застосування оптоволоконних технологій в структурованих кабельних системах. Які ж переваги і особливості використання оптичних технологій в горизонтальній кабельної підсистеми, а також на робочих місцях користувачів?

1. Проаналізувавши зміни мережових технологій за останні 5 років, легко помітити, що мідні стандарти СКС відставали від гонки "мережових

озброєнь". Не встигнувши інсталиювати СКС третьої категорії, підприємствам доводилося переходити на п'яту, зараз вже і на шосту, а не за горами використання сьомої категорії.

2. Очевидно, розвиток мережевих технологій не зупиниться на досягнутому: гігабіт на робоче місце незабаром стане стандартом де-факто, а згодом і де-юре, і для ЛВС (локальних обчислювальних мереж) крупного або навіть середнього підприємства 10 Гбіт/с Ethernet HE буде рідкістю.

3. Тому дуже важливо використовувати таку кабельну систему, яка дозволила б легко справлятися зі зростаючими швидкостями мережевих додатків на протязі як мінімум 10 років — саме такий мінімальний термін служби СКС визначено міжнародними стандартами.

4. Більш того, при зміні стандартів на протоколи ЛВС необхідно уникати повторного прокладки нових кабелів, яка раніше була причиною значних витрат на експлуатацію СКС і просто не припустима в майбутньому.

5. Тільки одне середовище передачі в СКС задовольняє даним вимогам — оптика. Оптичні кабелі використовуються в телекомунікаційних мережах вже більше 25 років, останнім часом вони також знаходять широке застосування в кабельному телебаченні і ЛВС.

6. У ЛВС вони в основному використовуються для побудови магістральних кабельних каналів між будівлями і в самих будинках, забезпечуючи при цьому високу швидкість передачі даних між сегментами цих мереж. Однак розвиток сучасних мережевих технологій актуалізує використання оптоволокна як робоче середовище для підключення безпосередньо користувачів [7].

### 1.5 Нові стандарти та технології ВОЛЗ

За останні роки на ринку з'явилося кілька технологій і продуктів, що дозволяють значно полегшити і здешевити використання оптоволокна в горизонтальній кабельній системі і підключення його до робочих місць користувачів.

Серед цих нових рішень перш за все хочеться виділити оптичні роз'єми з малим форм-фактором — SFFC (small-form-factor connectors), площинні лазерні діоди з вертикальним резонатором — VCSEL (vertical cavity surface-emitting lasers) і оптичне багатомодове волокна нового покоління.

Слід зазначити, що недавно затверджений тип багатомодового оптичного волокна OM-3 володіє пропускною здатністю більше 2000 МГц/км на довжині лазерного випромінювання 850 нм. Даний тип волокна забезпечує послідовну передачу потоків даних протоколу 10 Gigabit Ethernet на відстань 300 м. Використання нових типів багатомодового оптоволокна і 850-нанометрових VCSEL-лазерів забезпечує найменшу вартість реалізації 10 Gigabit Ethernet-рішень.

Розробка нових стандартів оптоволоконних роз'ємів дозволила зробити оптоволоконні системи серйозним конкурентом мідним рішенням. Традиційно оптоволоконні системи вимагали в два рази більшої кількості роз'ємів і комутаційних шнурів, ніж мідні — в телекомунікаційних пунктах була потрібна набагато більша площа для розміщення оптичного устаткування, як пасивного, так і активного.

Оптичні роз'єми з малим форм-фактором, представлені недавно цілу низку виробників, забезпечують в два рази більшу щільність портів, ніж попередні рішення, оскільки кожен такий роз'єм містить в собі відразу два оптичних волокна, а не одне, як раніше.

При цьому зменшуються розміри і оптичних пасивних елементів — кросів і т.д., і активного мережного обладнання, що дозволяє знизити в чотири рази витрати на установку (в порівнянні з традиційними оптичними рішеннями).

Слід зазначити, що американські органи стандартизації EIA і TIA в 1998 році прийняли рішення не регламентувати використання якогось певного типу оптичних роз'ємів з малим форм-фактором, що призвело до появи на ринку відразу шести типів конкуруючих рішень в даній області: MT-RJ, LC, VF-45, Opti-Jack, LX.5 і SCDC. Також сьогодні є і нові розробки [8].

Найбільш популярним мініатюрним роз'ємом є роз'єм типу MT-RJ, який має один полімерний наконечник з двома оптичними волокнами всередині. Його конструкція була спроектована консорціумом компаній на чолі з AMP Netconnect на основі розробленого в Японії мнговолоконного роз'єму MT. AMP Netconnect на сьогодні представила вже більше 30 ліцензій на виробництво даного типу роз'єму MT-RJ.

Своєму успіху роз'єм MT-RJ багато в чому зобов'язаний зовнішньої конструкції, яка схожа з конструкцією 8-контактного модульного мідного роз'єму RJ-45. За останній час характеристики роз'єму MT-RJ помітно покращилися — AMP Netconnect пропонує роз'єми MT-RJ з ключами, що запобігають помилкове або несанкціоноване підключення до кабельної системи. Крім того, ряд компаній розробляє одномодові варіанти роз'єму MT-RJ.

Досить високим попитом на ринку оптичних кабельних рішень користуються роз'єми LC компанії Avaya. Конструкція цього роз'єму заснована на використанні керамічного наконечника зі зменшеним до 1,25 мм діаметром і пластмасового корпусу з зовнішньої засувкою типу важеля для фіксації в гнізді сполучної розетки.

Роз'єм випускається як в симплексному, так і в дуплексному варіанті. Основною перевагою роз'єму LC є низькі середні втрати і їх середньоквадратичне відхилення, яке становить всього 0,1 дБ. Таке значення забезпечує стабільну роботу кабельної системи в цілому. Для установки вилки LC застосовуються стандартна процедура вклеювання на епоксидної смоли ле і полірування. Сьогодні роз'єми знайшли своє застосування у виробників трансиверів.

## 2 ОПТИЧНІ СОЛІТОНИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

### 2.1 Фізика оптичних солітонів

Можливість використання в волоконно–оптичних лініях передачі сигналів надкоротких, тривалістю близько 1—10 пс, оптичних імпульсів — оптичних солітонів — обговорюється вже понад 30 років. Нелінійний за своєю природою, Солітони режим передачі оптичних сигналів є одним із способів реалізації принципу тимчасового ущільнення (TDM) інформації в ВОСПІ. Передбачається, що саме при солітонних режимі будуть досягнуті граничні, порядку одиниць Тбит/с, швидкості передачі даних поблизу однієї спектральної несучої по одномодовому оптоволокну.

Сутність нелінійної волоконної оптики полягає в тому, що при досить великій щільності потужності випромінювання в світловод світло прямо впливає на середу поширення, в результаті чого показник заломлення матеріалу серцевини ВС змінюється. Миттєві зміни показника заломлення  $n(t)$  середовища представляються як оптичний ефект Керра:

$$n(t) = n_1 + n_2 |A(t)|^2, \quad (2.1)$$

де  $n_1$  — середній показник заломлення серцевини;

$A(t)$  — амплітуда електричного поля світлової хвилі;

$n_2$  — коефіцієнт нелінійності матеріалу, для кварцового скла  
 $n_2 \approx 1,2 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2/\text{В}^2$ .

Для опису нелінійних характеристик оптоволокну вводиться хвилеводний коефіцієнт нелінійності  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c \pi w^2}, \quad (2.2)$$

де  $\omega_0$  — частота світла;

$c$  — швидкість світла у вакуумі;

$w$  — ефективний радіус моди.

Якщо  $P_0$  — максимальна (пікова) потужність імпульсного сигналу, що поширюється в хвилеводі, нелінійна довжина  $L_{NL}$  такого оптоволоконна визначається як:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}. \quad (2.3)$$

Дисперсійна довжина  $L_D$  світловода дорівнює:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad (2.4)$$

де  $T_0$  — початкова тривалість імпульсного сигналу;

$\beta_2$  — дисперсія групових швидкостей оптичного хвилеводу.

Хвильове рівняння для амплітуди світлової хвилі, в нехтуванні оптичними втратами в хвилеводі, має вигляд:

$$j \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (2.5)$$

де час  $T = t - \beta_1 z$  описує зміну тривалості імпульсу ( $T = 0$  відповідає центру імпульсу);

$\beta_1$  — зворотна величина груповий швидкості сигналу.

Перший доданок в правій частині рівняння (2.5) описує дисперсійне розширення імпульсів, а другий — нелінійний ефект фазової самомодуляції (ФСМ) світла в волокні. Якщо довжина шляху  $L$  світла в оптоволоконні задовольняє співвідношенню:

$$L \geq L_D \approx L_{NL}, \quad (2.6)$$



то внесок обох доданків рівняння (2.5) порівняємо за величиною і нелінійність спрямовуючого середовища істотно впливає на спектральні і часові характеристики поширюється імпульсного сигналу.

Особливий інтерес викликає випадок негативних значень  $\beta_2$ , відповідний в кварцовому оптоволокну області довжин хвиль, більших 1,27 мкм (рис. 2.1). Довжина хвилі нульової дисперсії дорівнює 1,27 мкм.

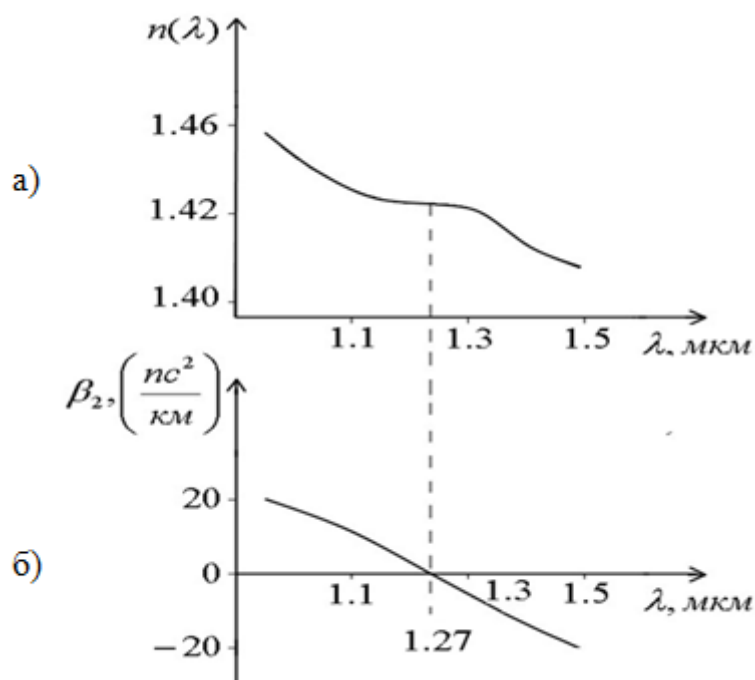


Рисунок 2.1 — Спектральна залежність показника заломлення (а) і дисперсії (б) кварцового скла

У цій області можливе рішення рівняння (2.5) виду:

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \exp\left(\frac{jz}{2L_D}\right), \quad (2.7)$$

де *sech* — гіперболічний секанс.

Вираз (2.7) описує фундаментальний оптичний солітон — імпульсний оптичний сигнал, форма обвідної якого не залежить від прохідної відстані  $z$  (рис. 2.2).

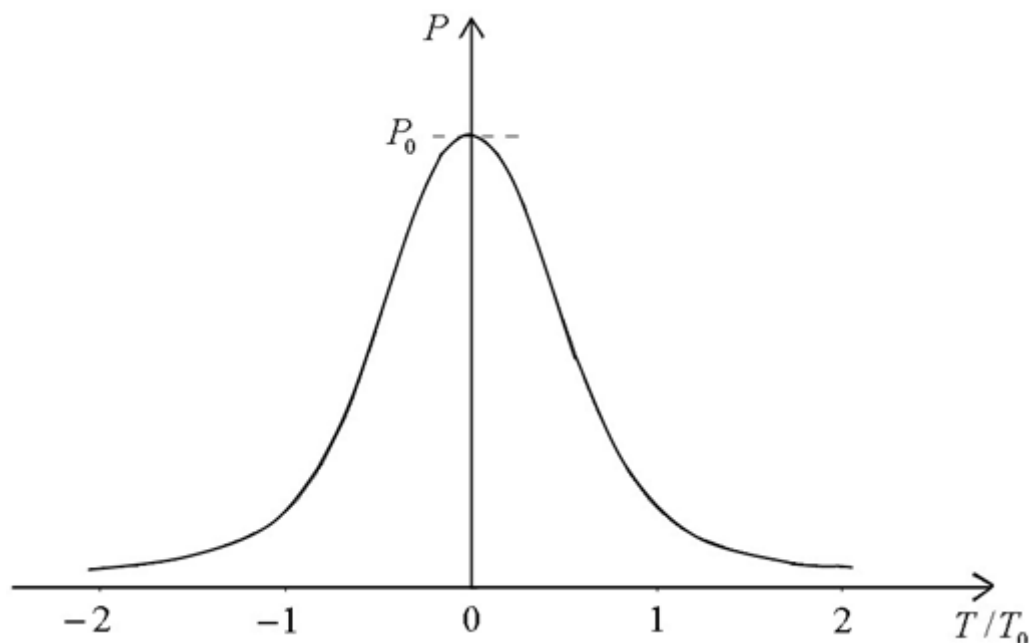


Рисунок 2.2 — Тимчасова залежність миттєвої потужності оптичного солітону

У солітонах режим поширення імпульсного сигналу «фізично» пояснюється так. У середовищі з негативною дисперсією ( $\beta_2 < 0$ ) звичайна (лінійна) дисперсія групових швидкостей (ДГШ) супроводжується збільшенням миттєвої частоти переднього фронту і зменшенням частоти заднього фронту імпульсу (рис. 2.3, а), на якому штрихова лінія — форма імпульсу. Така різниця миттєвих частот обумовлює розпливання (дисперсійне розширення) імпульсу, так як різні спектральні компоненти імпульсу поширюються в оптоволокну з ненульовою дисперсією постійної поширення з різними швидкостями.

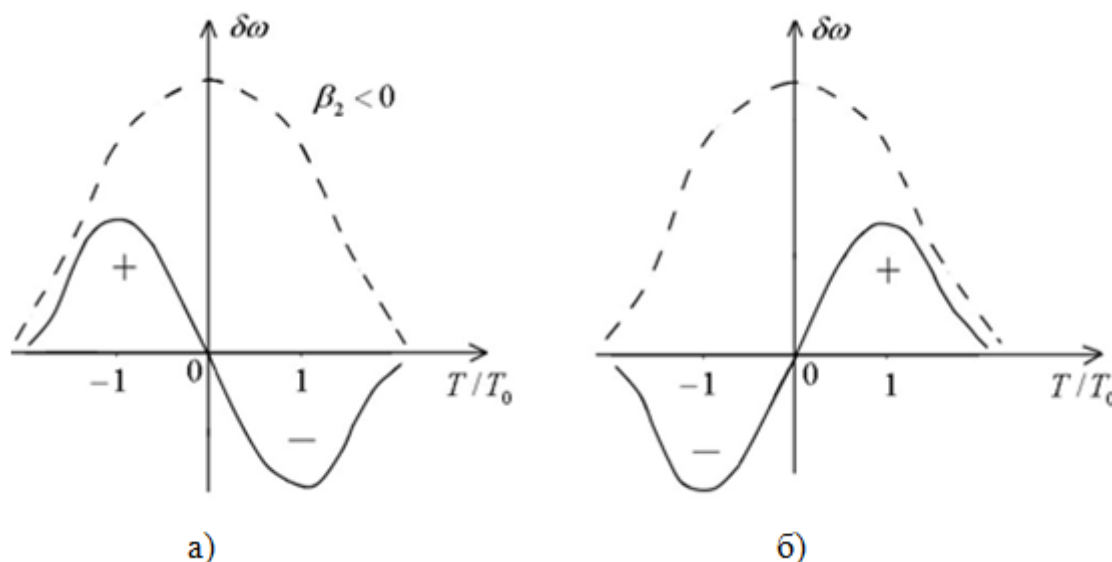


Рисунок 2.3 — Зміна миттєвої частоти  $\delta\omega$  імпульсного сигналу внаслідок ДГШ (а) і внаслідок ФСМ (б)

Внаслідок впливу оптичної нелінійності, виникає додаткова фазова самомодуляція (ФСМ) сигналу, при цьому миттєва частота сигналу на передньому фронті оптичного імпульсу, навпаки, зменшується, а на задньому — збільшується щодо середньої частоти  $\omega_0$  сигналу (рис. 2.3, б). Спільну «зустрічну» дію ДГШ- і ФСМ-ефектів призводить до взаємної компенсації миттєвих зсувів частоти світла на передньому і задньому фронтах імпульсу, внаслідок чого миттєва частота світла протягом тривалості імпульсу приблизно постійна. В результаті в нелінійному середовищі з негативною дисперсією поширення оптичного імпульсу відбувається без зміни його тривалості.

Необхідною умовою освітлення фундаментального солітону («окремої хвилі») є рівність  $L_D = L_{NL}$ , звідки отримуємо вираз для пікової потужності сигналу:

$$P_0 = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2}. \quad (2.8)$$

Наприклад, для звичайного кварцового одномодового волокна на довжині хвилі 1,55 мкм при  $T_0 = 1$  пс пікова потужність солітону  $P_0 = 5$  Вт, а при

$T_0 = 10$  пс,  $P_0 = 50$  мВт. При використанні світловодів зі зміщеною дисперсією величиною  $\beta_2 = -2$  пс<sup>2</sup>/км потужність сигналу для досягнення солітоном режиму поширення знижується приблизно в 10 разів. Наведені оцінки справедливі для оптичного волокна без втрат і з урахуванням ослаблення випромінювання умови освіти оптичних солітонів помітно ускладнюються. Згідно практичним оцінками, оптичні солітони можуть порушуватися в оптоволокну з втратами не більше 0,2 дБ/км і при побудові протяжних ліній передачі таких сигналів для компенсації втрат потужності випромінювання необхідно використовувати оптичні підсилювачі. З іншого боку, солітони режиму поширення сигналів вимагають досить точного узгодження ефектів ДГШ і ФСМ, він чутливий до впливу різних дефектів оптоволокну, наявності сполук, розгалужувачів, впливу інших нелінійних явищ: вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР), вимушене розсіювання Мандельштама-Бріллюена (ВРМБ) та ін.

У лабораторних умовах була продемонстрована можливість передачі оптичних сигналів в солітонних режимі по одномодовому оптоволокну (з включеними в лінію передачі оптичними підсилювачами і перемикачами) на відстань в декілька тисяч кілометрів зі швидкістю понад 30 Гбіт/с.

Практична доцільність створення солітонних ВОСПІ повинна бути оцінена не тільки з урахуванням досягнення рекордно високих швидкостей передачі даних, але і з урахуванням балансу енергетичного потенціалу лінії зв'язку. Зокрема, слід брати до уваги зменшення порогової чутливості фотоприйомних пристроїв у міру зростання частоти передачі сигналів, а також надійність і вартість обладнання зв'язку.

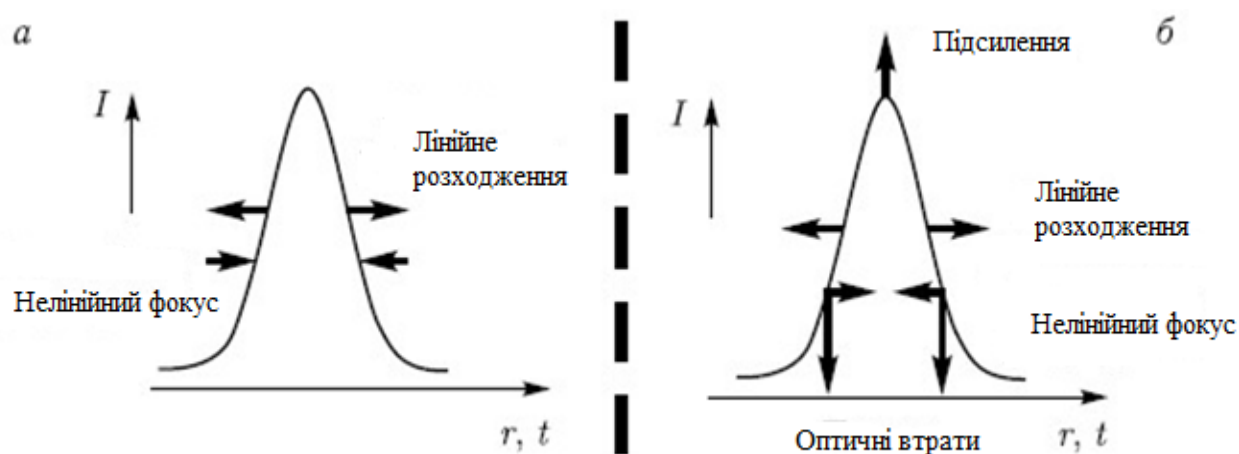
## 2.2 Оптичні солітони. Їх властивості та різновиди

Оптичні солітони — стійкі структури світла, локалізовані внаслідок балансу лінійного розпливання та нелінійного стиснення у середовищі, оптичні характеристики якого залежать від інтенсивності випромінювання [9].

Оптичні солітони поділяються на два класи.

1. Консервативні солітони.
2. Дисипативні солітони (автосолітони).

Консервативні солітони реалізуються у прозорих середовищах, у яких втрати випромінювання настільки малі, що ними можна знехтувати, приплив енергії відсутній та локалізація є наслідком балансу лінійного розпливання (дифракції пучка та/або дисперсії для імпульсу випромінювання) та нелінійного фокусування (рис. 2.4, а).



$I$  — інтенсивність;  $r$  — координата для просторових солітонів;

$t$  — координата для часових солітонів.

Рисунок 2.4 — Консервативний (а) та дисипативний (б) солітони як баланс лінійного розпливання та нелінійного фокусування (а, б) та припливу та відтоку енергії (б)

Оптичні дисипативні солітони (автосолітони) також є стійкими структурами світла, але локалізованими внаслідок балансу припливу та відтоку енергії у нелінійному середовищі чи системі (рис. 2.4, б). Баланс лінійного розпливання та фокусування за рахунок нелінійності показника заломлення середовища для дисипативних солітонів може бути як присутнім, так і відсутнім.

Консервативні та дисипативні солітони як досить нелінійні хвильові об'єкти мають і спільні властивості, і принципові відмінності. У обох випадках необхідна наявність оптичної нелінійності — у лінійному режимі вихід згусток світла розливається. Консервативні солітони складають сімейство з безперервно змінним параметром, наприклад, шириною солітону чи його максимальною інтенсивністю. Вимога енергетичного балансу для дисипативних солітонів додатково обмежує їх параметри, через що набір основних параметрів стає не суцільним, а дискретним. Ця обставина призводить до підвищеної стійкості дисипативних оптичних солітонів, що робить їх перспективними для різноманітних застосувань, у тому числі для оптичної обробки інформації.

Солітони можуть бути просторовими (локалізація у просторі пучка безперервного випромінювання), часовими (локалізація імпульсу за часом) та просторово-часовими (локалізація і у просторі, і у часі). Як консервативні, так і дисипативні солітони характеризуються геометричною розмірністю  $D$ . Під цим розуміють число вимірів, за якими обмеження досягається за рахунок нелінійних факторів, тоді як за іншими вимірами таке обмеження може досягатись неоднорідністю лінійних характеристик середовища або системи, наприклад показника заломлення. На рис. 2.5, а — приклад часового (нелінійний одномодовий світловод) солітону з розмірністю  $D = 1$ ; на рис. 2.5, б — приклад просторового (планарний нелінійний хвилевід) солітону з розмірністю  $D = 1$ ; на рис. 2.5, в — приклад просторового (об'ємне нелінійне середовище) солітону з розмірністю  $D = 2$ ; на рис. 2.5, г — приклад просторово-часового (об'ємне нелінійне середовище) солітону з розмірності  $D = 3$ .

Оптичні солітони можуть бути когерентними та некогерентними. Приплив енергії може бути реалізований введенням в оптичну систему пучка безперервного когерентного випромінювання (рис. 2.6, а) або некогерентним зовнішнім сигналом чи накачкою, що призводить до посилення випромінювання (рис. 2.6, б). Для когерентних солітонів у першому випадку зовнішній сигнал нав'язує випромінюванню частоту та фазу; при цьому солітон накладається на фон з амплітудою, що визначається зовнішнім сигналом. У другому випадку

загальна фаза випромінювання довільна (інваріантність до зсуву фази на сталу величину), а фон для світлих солітонів відсутній.

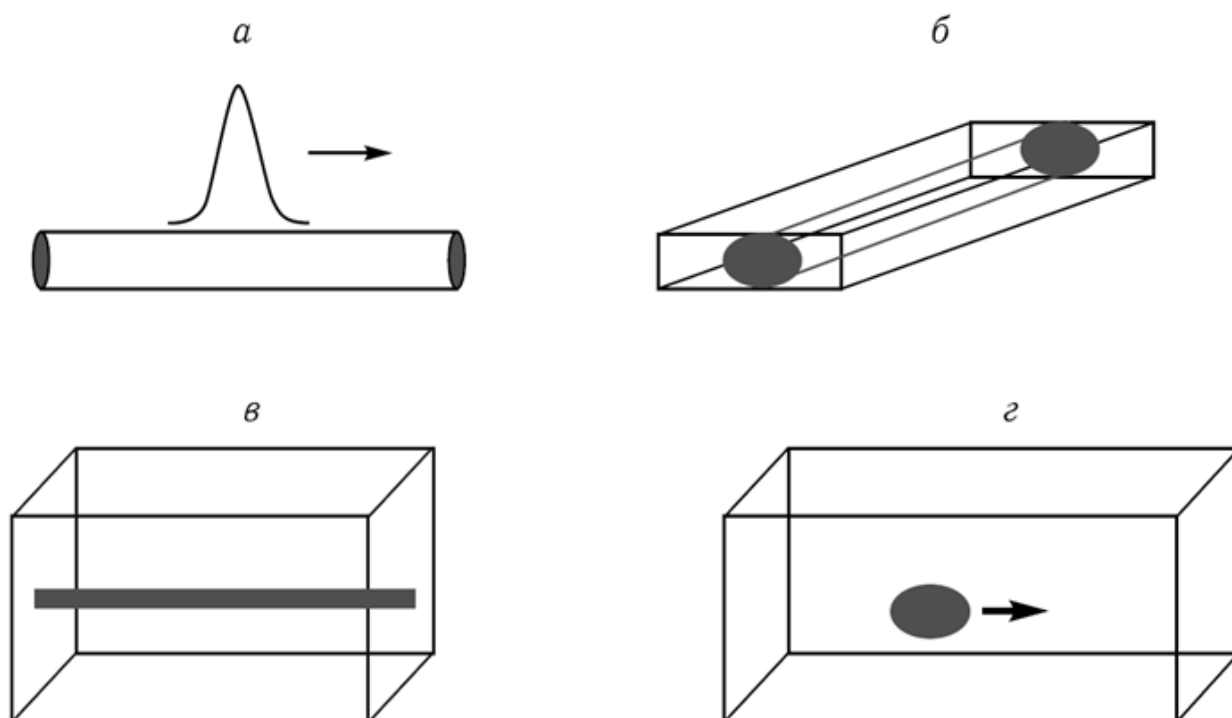
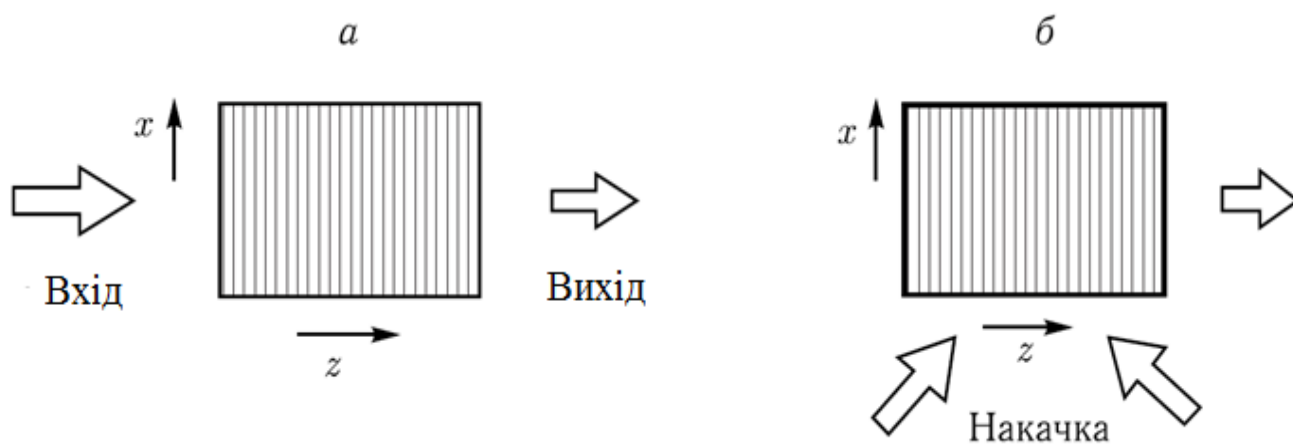


Рисунок 2.5 — Приклади просторових, часових та просторово-часових солітонів



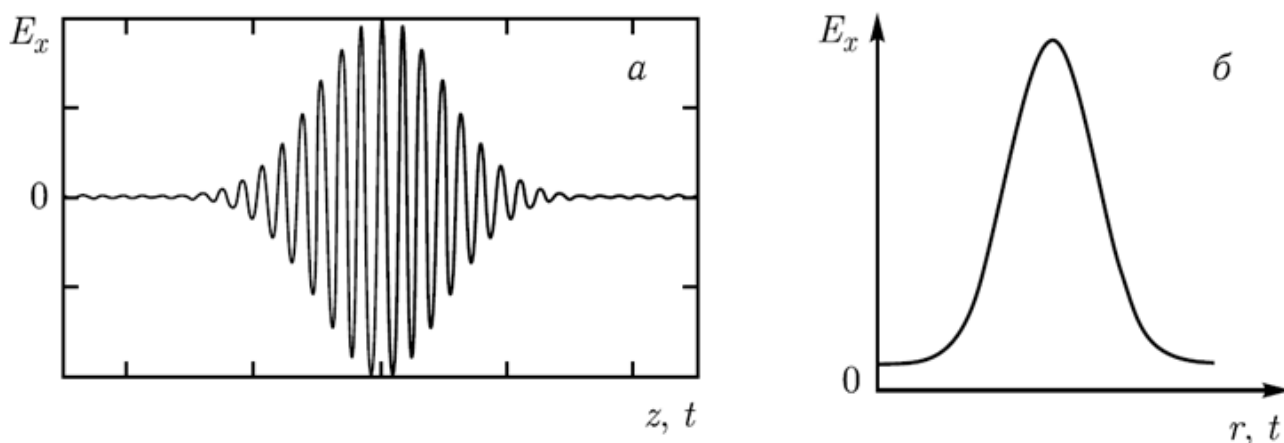
*a* — зовнішній когерентний сигнал;

*б* — некогерентний зовнішній сигнал або накачка;

*z* — поздовжня координата; *x* — поперечна координати.

Рисунок 2.6 — Геометрія схем оптичних солітонів

У процесі еволюції солітонів можливе встановлення їх сталої форми або періодичні, квазіперіодичні чи навіть хаотичні пульсації (при збереженні локалізації). Для когерентних оптичних солітонів характерні високочастотні (з оптичною частотою) осциляції компонент електричної напруженості при незмінній огинаючій (рис. 2.7, а). Тоді говорять про солітони огинаючої. Але можливі й гранично короткі (з тривалістю порядку зворотної середньої частоти випромінювання) чи гранично вузькі (з шириною порядку середньої довжини хвилі випромінювання й менше) солітони (рис. 2.7, б).



$E_x$  —  $x$  компонента електричної напруженості.

Рисунок 2.7 — Огинаючий та гранично короткий або вузький солітони

Спочатку під солітонами розумілись локалізовані структури у просторово-однорідному (по  $D$  вимірам) необмеженому нелінійному просторі. При цьому має місце трансляційна інваріантність до зсуву по цим координатам на довільну величину. На рис. 2.8, а зображено одномодовий світловод з нелінійною серцевиною, у схемі формуються часові солітони; на рис. 2.8, б показаний одномодовий світловод з нелінійною серцевиною та брегівською решіткою (поздовжня модуляція показника заломлення зображена насиченістю кольору), можливе формування нерухомих та рухомих солітонів; на рис. 2.8, в зображено набір слабо пов'язаних одномодових нелінійних світловодів, у якому можливе



формування дискретних солітонів. Однак у літературі спостерігається тенденція до розширення визначення солітонів, коли допускається неоднорідність середовища, головним чином періодична (наприклад, «берегівські солітони» (рис. 2.8, б) та дискретні солітони (рис. 2.8, в) [1]. У літературі зустрічаються й такі терміни, як «поверхневі солітони», що пов'язане з важливою роллю різкої межі системи. Звичайно, завжди зберігається вимога того, щоб причиною локалізації світла була оптична нелінійність середовища.

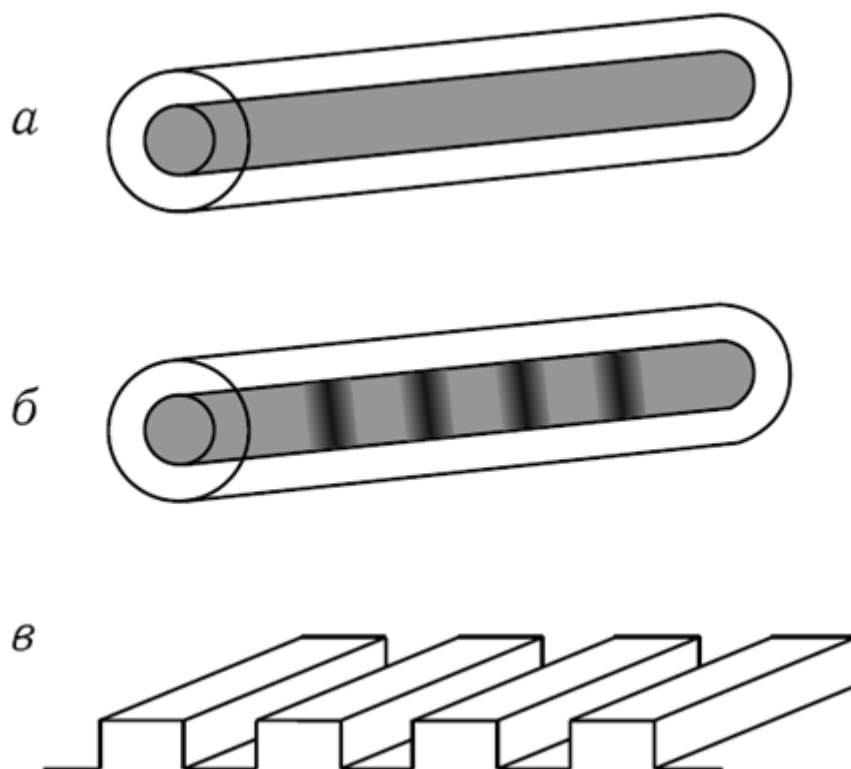


Рисунок 2.8 — Світловодні схеми для формування одномірних солітонів

### 2.3 Схеми формування дисипативних оптичних солітонів

На сьогодні відомо ряд схем, у яких можливе формування дисипативних оптичних солітонів. Звичайно, що у всіх цих схемах принаймні один з розмірів має бути більшим у порівнянні з розмірами солітону (рис. 2.9).

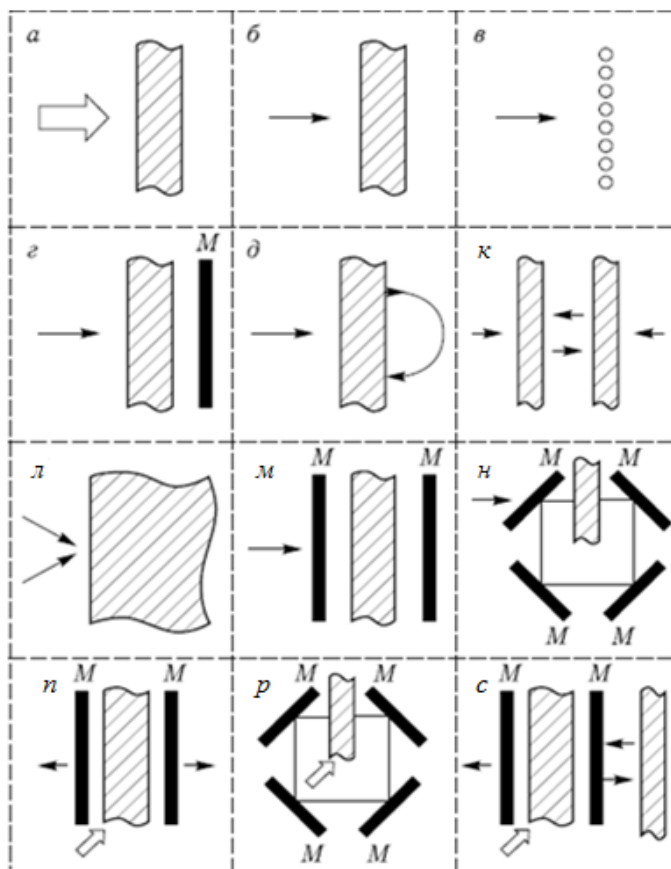


Рисунок 2.9 — Широкоапертурні схеми формування просторових дисипативних солітонів

1. Некогерентне збудження шару напівпровідника. У схемі некогерентного збудження тонкого шару напівпровідника з бозе-ейнштейнівським конденсатом (рис. 2.9, а) середовище володіє коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ , який зростає з ростом інтенсивності випромінювання  $I$ . На тонкий зразок впливає безперервне некогерентне випромінювання з інтенсивністю  $I_{in}$ . Більш наочним є тепловий механізм оптичної нелінійності, у якому коефіцієнт поглинання зростає при збільшенні температури зразка  $T$ . Тоді у деякому діапазоні параметрів виникає наступна ситуація. Якщо спочатку зразок холодний, то через малий коефіцієнт поглинання він майже не нагрівається та зберігає холодний стан. Але початково нагрітий зразок, при тій же інтенсивності  $I_{in}$ , поглинатиме майже все випромінювання та, відповідно, підтримуватиме

гарячий стан. Це є причиною даного типу бістабільності, що був запропонований для концентраційного  $\alpha(n(I))$  та теплового  $\alpha(T)$  механізмів нелінійності коефіцієнту поглинання у напівпровідниках ( $n$  — концентрація носіїв заряду,  $T$  — температура зразка). Некогерентні просторові структури виникають у зразку у вигляді довгого напівпровідникового стрижня чи пластини, що нагріваються інтенсивним випромінюванням. Схема може бути однорідною (за напрямом вздовж осі стрижня чи за поперечними напрямками у пластині) чи неоднорідною з просторовою модуляцією характеристик по вказаним напрямкам.

Дана схема явно дисипативна (енергія зовнішнього випромінювання вкладається у зразок, а втрати теплової енергії відповідає тепловідведенню з його поверхні). Схема безрезонаторна й не містить дзеркал. Оптична нелінійність нелокальна — відгук середовища у даній точці залежить від розподілу інтенсивності випромінювання й в інших точках через теплопровідність. Можна сказати, що ця найпростіша схема однокомпонентна, якщо розуміти під компетентністю число незалежних величин, що повністю визначають стан відповідної точкової (просторово нерозподіленої) системи [3].

2. Схема шару бозе-ейнштейнівського конденсату (напівпровідника), що збуджується когерентним випромінюванням є також безрезонаторною та бездзеркальною дисипативною схемою з нелокальним відгуком тонкого шару середовища (рис. 2.9, б). Відмінність від попередньої схеми полягає в тому, що зовнішнє випромінювання когерентне, а середовище відповідає макроскопічному квантовому стану — конденсату екситонів, що реалізується при температурах нижче критичної та характеризується їх когерентністю [4]. Відповідно, система, принаймні, двокомпонентна (випромінювання та хвильова функція конденсату визначаються двома дійсними величинами — амплітудою та фазою), що призводить до збільшення числа типів просторових структур у порівнянні з попереднім випадком.

3. Молекулярні ланцюжки, що резонансно збуджуються когерентним випромінюванням. Прикладом є орієнтовані J-агрегати ціанінових барвників, що складаються з великого числа молекул з однаково орієнтованими дипольними

моментами (рис. 2.9, в). Зовнішнє лазерне випромінювання розкачує молекулярні диполі, так що дипольне випромінювання однієї молекули впливає на сусідні молекули (механізм нелокальності оптичного відгуку). У таких ланцюжках теоретично продемонстрована бістабільність.

У описаних вище схемах відсутні дзеркала або інші види зовнішнього зворотного зв'язку, а у загальній динаміці структур поширення випромінювання грає допоміжну роль. Наприклад, у наближенні середнього поля характеристики випромінювання всередині системи усереднюються у поздовжньому напрямку та випадають з динамічної моделі. Інакше відбувається у наведених нижчу схемах, у яких або наявні елементи зовнішнього зворотного зв'язку, або істотна поздовжня розподіленість схеми.

4. Споріднені шаруваті схеми. Просторові структури можуть виникати й у схемах з певною мірою більш складною геометрією. Одним з прикладів є широкоапертурна схема, що складається з тонкого шару нелінійного середовища та дзеркала зворотного зв'язку, що знаходиться на деякій відстані від дзеркала. Когерентні просторові структури збуджуються зовнішнім лазерним випромінюванням (рис. 2.9, г). Деяко раніше була вивчена більш загальна схема шару середовища зі зворотним зв'язком, яка могла бути не виключно оптичною та включала додаткові операції повороту поля, просторової фільтрації і т.д. (рис. 2.9, д) [5]. Іншим прикладом є схема двох паралельних та рознесених один від одного нелінійних шарів, що збуджуються з двох боків різними зовнішніми сигналами (рис. 2.9, к). Оптичну нелінійність середовища тут можна вважати локальною з огляду на виражену поздовжню протяжність схеми та відповідного переважання дифракційного поперечного розмазування випромінювання. Принципово можливе й формування просторових структур при відбитті інтенсивного випромінювання від напівобмеженого шару нелінійного середовища, однак у цьому випадку їх спостереження реальне швидше при збудженні двома похиленими пучками чи при просторовій модуляції параметрів схеми чи зовнішнього випромінювання (рис. 2.9, л) [2, 8]. Зменшення потрібного рівня інтенсивності випромінювання до оптимальних величин у схемі, ж

можливе, якщо напівбезкінечне середовище володіє нелінійними посиленням та поглинанням, як у випадку лазерних схем.

5. Нелінійні інтерферометри, що збуджуються когерентним випромінюванням. У цих схемах всередині дводзеркального інтерферометра Фабрі-Перо або кільцевого інтерферометра поміщається нелінійне середовище, а зовні інтерферометр живиться когерентним лазерним випромінюванням (рис. 2.9, м, н). З огляду на резонансне збільшення інтенсивності поля всередині добротного інтерферометра когерентні просторові структури реалізуються вже при порівняно низькій інтенсивності зовнішнього сигналу. Для цієї ж резонаторної схеми оптичну нелінійність середовища також можна вважати локальною. Сама нелінійність може бути майже будь-якою – керрівською (кубічною чи з насиченням) або квадратичною нелінійністю показника заломлення, абсорбційною і т.д.

6. Лазерні схеми. Лазерні схеми можна поділити на резонаторні та безрезонаторні. Історично першою (безвідносно до просторових структур) вивчалась схема лазера з поглиначем, що насичується (всередині дводзеркального або кільцевого лазерного резонатору розташовувалась комірка з середовищем, поглинання у якому зменшувалось зі зростанням інтенсивності випромінювання), причому у експерименті спостерігалась бістабільність (рис. 2.9, п, р). Механізм бістабільності наступний. Параметри схеми вибираються таким чином, щоб для слабкого випромінювання втрати перевищували підсилення, з огляду на що безгенераційний режим є стійким. При збільшенні інтенсивності випромінювання поглинання насичується швидше, чим посилення, тому стає можливим жорстке збудження генерації. Аналогічний випадок лазерного підсилювача з насичуваним поглиначем. У цій схемі дзеркала відсутні, та випромінювання поширюється вздовж одномодового світловоду, планарного хвилеводу чи у суцільному середовищі, причому у середовищі наявні частинки двох видів — активні, з накачкою та насичуваним підсиленням, та пасивні, з поглинанням, що насичується (рис. 2.9, с). Ці частинки можуть бути перемішані рівномірно вздовж траси поширення випромінювання або чергуватись шарами,

причому відмінність між цими двома випадками не є принциповою при досить малій товщині шарів.

## 2.4 Історія дослідження дисипативних солітонів

Неоптичні дисипативні солітони у літературі вперше описані у 1831 р. М. Фарадеєм [10]. Фарадей проводив експерименти з мілким порошком, що розташовувався на поверхні, що коливається. Він помітив, що порошок збирається у маленькі «купки» різного розміру, які можуть бути нерухомими чи рухомими, одиночними та об'єднаними у «агрегати». Зараз такого роду дисипативні солітони у гранулярних матеріалах на платформі, що коливається, називають осцилонами.

У 20-му столітті дисипативні солітони (автосолітони) активно вивчались у широкому колі різних фізичних, хімічних та біологічних систем, головним чином у рамках моделі реакції-дифузії [3, 6]. Ця модель описує локалізовані структури, що відповідають поширенню імпульсів у нервовому волокні та волокні серцевого м'язу, що виникають у хімічних реакціях активаторів, що сприяють зростанню концентрації якої-небудь речовини, та інгібіторів, що пригнічують це зростання, при протіканні електричного струму у газах, плазмі та напівпровідниках і т.д.

Тема оптичних солітонів стала актуальною лише у лазерну еру, коли оптична нелінійність виявилась досить доступною для експериментів. Першим прикладом є передбачення Г. А. Аскар'яном просторово консервативного солітону у прозорому середовищі з самофокусувальною нелінійністю (показник заломлення середовища зростає з ростом інтенсивності випромінювання) [11]. Слабко інтенсивний пучок випромінювання, для якого нелінійність неістотна, по мірі поширення розширюється через дифракцію. Але для пучка потужного випромінювання, наприклад гаусової форми, показник заломлення поблизу осі більше, чим на периферії. При цьому периферійні промені загинаються до осі та нелінійне середовище стає еквівалентним розподіленій лінзі, що фокусує, яка

здатна компенсувати дифракційне розпливання. У подальшому був знайдений часовий аналог таких солітонів у одномодових світловодах з керрівською нелінійністю [12], а з 2002 р. у Австралії на їх основі діє комерційна лінія передачі інформації [7].

### 3 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО СОЛІТОНУ

#### 3.1 Теоретичний опис оптичного солітону, як лазерного імпульсу

Одним з основних інструментів для опису поширення електромагнітного випромінювання у середовищі є Фур'є-перетворення. У цьому розділі буде описано розрахунок спектру для оптичного солітону [13, 14].

Нехай  $E(t)$  – деяка функція часу (наприклад, електричне поле у будь-якій точці простору), тоді Фур'є-образ (Фур'є-спектр) цієї функції записується у вигляді:

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (3.1.)$$

Відповідне зворотне перетворення Фур'є:

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (3.2.)$$

При описанні поширення лазерних імпульсів часто використовують модельний запис поля імпульсу у вигляді

$$E(t) = \frac{1}{2} A(t) \exp(i\omega_0 t) + \text{к.с.}, \quad (3.3)$$

де  $A(t)$  — огибающая лазерного імпульсу (у загальному випадку комплексна);

$\omega_0$  — основна частота заповнення імпульсу (центральна частота);

«к.с.» — комплексне спряження.

Тоді спектр імпульсу визначатиметься спектром огибающей:

$$A(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(t) \exp(-i\Omega t) dt, \quad (3.4)$$

де  $\Omega = \omega - \omega_0$  — відбудова від центральної частоти.



Для монохроматичного імпульсу ( $A(t) = \text{const}$ ) спектр являє собою дельта-функцію. Обмежений в тривалості лазерний імпульс має спектр з кінцевою шириною. Для описання імпульсів зручно комплексну огинаючу  $A(t)$  записати у вигляді:

$$A(t) = \rho_0(t) \exp(i\varphi_0(t)), \quad (3.5.)$$

де  $\rho_0(t)$  та  $\varphi_0(t)$  — дійсні огинаюча та фаза імпульсу.

Розглядають два види імпульсу.

1. Імпульс з гаусовою огинаючою без фазової модуляції ( $\varphi_0(t) = 0$ ):

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_0^2}\right), \quad (3.6.)$$

де  $A_0$  та  $\tau_0$  — амплітуда та тривалість лазерного імпульсу, відповідно;

2. Фазово-модульований імпульс з гаусовою огинаючою ( $\varphi_0(t) \neq 0$ ):

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_0^2}\right) \exp(i\varphi_0). \quad (3.7.)$$

У даній роботі розраховується перший варіант імпульсу.

### 3.2 Аналітичний розрахунок огинаючої та спектру оптичного солітону

Для розрахунку використаємо формули (3.3) та (3.6).

У результаті проведених розрахунків на основі вхідних даних до роботи за допомогою програми Mathcad, було отримано графіки огинаючої (рис. 3.1) та оптичного солітону (рис. 3.2).

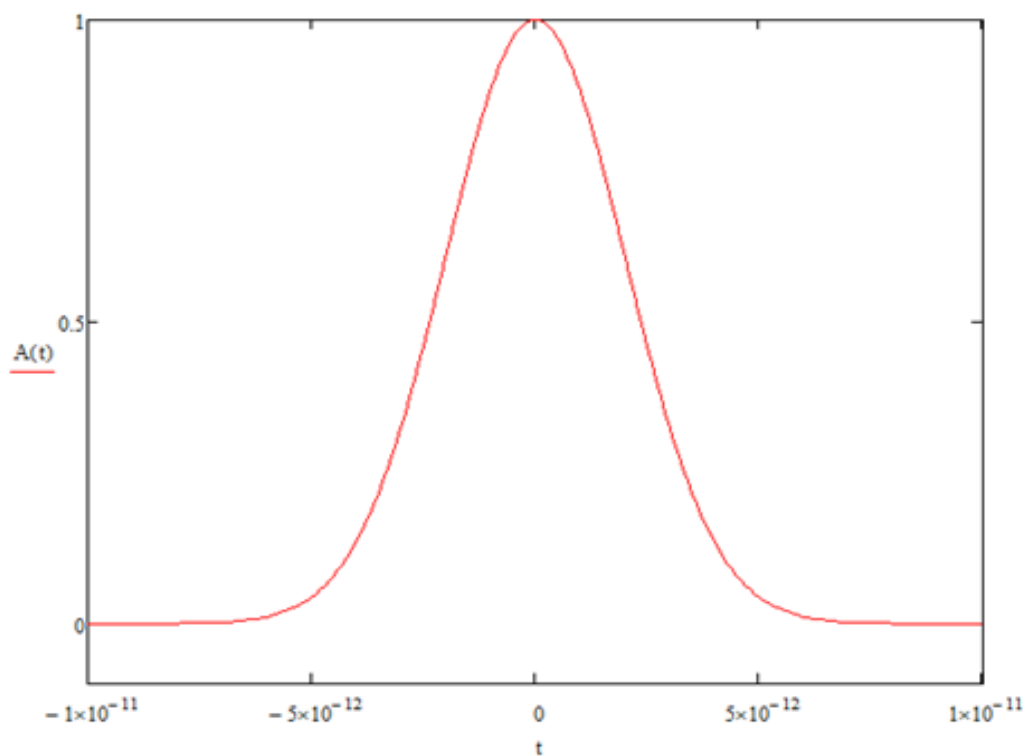


Рисунок 3.1 — Графік огинаючої оптичного солітону

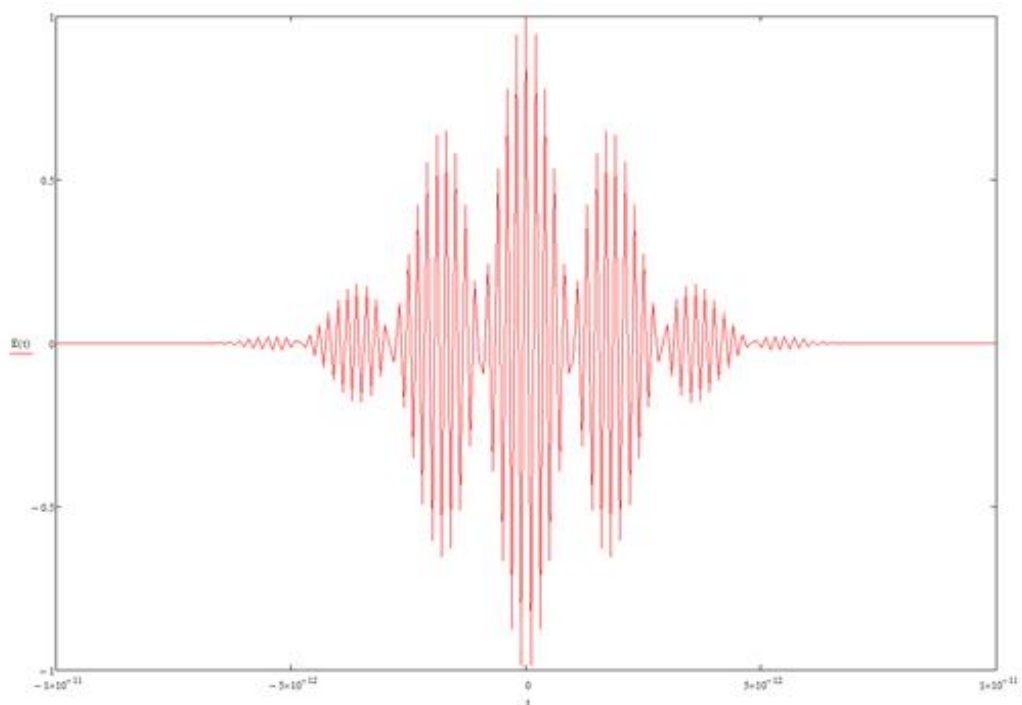


Рисунок 3.2 — Графік оптичного солітону

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи було досліджено напрями розвитку оптичних ліній зв'язку.

Досліджено принцип роботи відкритих та закритих ліній зв'язку, проблеми з якими можна зустріти при створенні ВОЛЗ.

Також розглянуто фізика оптичних солітонів, їх властивості та різновиди.

Перспективи створення солітонних ліній оптичного зв'язку.

Було проведено аналітичний розрахунок оптичного солітону за допомогою системи комп'ютерної програми MathCAD та отримано графіки його спектру.

**СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов / Пер. с англ. под ред. Н. Н. Розанова. – Москва: Физмалит, 2005. 648 с.
2. Розанов Н. Н. Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. Москва: Наука, 1997.
3. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. Москва: Наука, 1987. 240 с.
4. Moskaleiko S. A., Snook D. W. Bose-Einstein condensation of excitons and biexcitons and coherent nonlinear optics with excitons. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000.
5. Ахманов С. А., Воронцов М. А., Иванов В. Ю. // Новые физические принципы оптической обработки информации / Под ред.: С. А. Ахманова и М. А. Воронцова. Москва: Наука, 1990. С. 263.
6. Керенр Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны. – Москва: Наука, 1991. 190 с.
7. Ultra Long-Haul Photonic Line System (June 2004). <http://www.marconi.com> (дата звернення 05.11.2020).
8. Rosanov N. N. Spatial Hysteresis and Optical patterns. Berlin: Springer, 2002. P. 1—15.
9. Розанов Н. Н. Диссипативные оптические солитоны. От микро- к нано- и атто-. – Москва: Физмалит, 2011. 536 с.
10. Faraday M. // Philos. Trans. R. Soc. London. 1831. Vol. 122. Part II. P. 299.
11. Аскарьян Г. А. Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы // ЖЭТФ. 1962. Т. 42, № 6. С. 1567.

12. Hasegawa A., Tappert F. Transmission of Stationary Nonlinear Optical Pulses in Dispersive Dielectric Fibers. I. Anomalous Dispersion // *Appl. Phys. Lett.* 1973. Vol. 23. P. 142 — 144.

13. Яшунин Д. А., Малькова Ю. А., Бодров С. Б. Фемтосекундная оптика (электронное пособие): учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 40 с.

14. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Гнатенко А.С. Измерение величин со сложной динамикой как основная задача нелинейной метрологии. *Метрология и приборостроение.* 2016. № 6. С. 18—21.

15. Методичні рекомендації та вимоги щодо оформлення пояснювальної записки атестаційної роботи / Упоряд.: О.С. Гнатенко, А.І. Крючков, Н.М. Чернишова – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 44 с.