

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ
В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ФТОІм-21-1
Глибокий М.Ю.
(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 «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. каф. _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
(код і повна назва)

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

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Глибокому Максиму Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ущільнення оптичних каналів для передачі інформації в інформаційно-вимірвальних технологіях

затверджена наказом університету від « 03 » листопада 2023 р. № 1285 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Фізичні основи систем передачі інформації на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку; існуючі методи ущільнення каналів; метод ущільнення каналів на основі використання фемтосекундних лазерів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Дослідити принципи роботи систем передачі інформації на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку.

2 Дослідити існуючі методи ущільнення каналів.

3 Дослідити новий метод ущільнення каналів на основі використання фемтосекундних лазерів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел на тему ущільнення каналів	01.09.23–02.10.23	Виконано
2	Дослідження існуючих методів ущільнення каналів у волоконно-оптичних лініях зв'язку	06.10.23–27.10.23	Виконано
3	Дослідження нового методу ущільнення каналів на основі використання фемтосекундних лазерів	02.11.23–25.11.23	Виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	19.11.23–25.11.23	Виконано
5	Оформлення демонстраційних матеріалів	02.12.23–18.12.23	Виконано
6	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	22.12.23–03.01.24	Виконано
7	Проходження перевірки на плагіат	04.01.24–15.01.24	Виконано
8	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	18.01.24–19.01.24	Виконано
9	Інформаційно-тематичний пошук та огляд	22.01.24–23.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 31 с., 6 рис., 1 табл., 12 джерел.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ, МЕТОДИ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ, НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЛАЗЕРИ, УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛІВ, ФЕМТОСЕКУНДНІ ЛАЗЕРИ.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз існуючих методів ущільнення оптичних каналів за допомогою технологій CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) та DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) для підвищення ефективності передачі інформації в інформаційно-вимірювальних системах. Робота спрямована на визначення найбільш оптимальних методів ущільнення, з огляду на вимоги до пропускної спроможності, відстань передачі, економічну ефективність та технічні обмеження в різних галузевих застосуваннях, а також огляд нового методу ущільнення на фемтосекундних лазерах.

Об'єкт – методи ущільнення каналів у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання:

1. Виконати пошук та огляд літературних джерел на тему ущільнення каналів у волоконно-оптичних лініях зв'язку.
2. Провести теоретичне дослідження існуючих методів ущільнення каналів у волоконно-оптичних лініях зв'язку.
3. Дослідити новий метод ущільнення каналів на основі використання фемтосекундних лазерів.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 31 pp., 6 figures, 1 table, 12 sources.

FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES, METHODS OF OPTICAL CHANNEL DENSIFICATION, SEMICONDUCTOR LASERS, CHANNEL DENSIFICATION, FEMTOSECOND LASERS

The purpose of this qualification work is to research and analyze the existing methods of optical channel densification using CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) and DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) technologies to improve the efficiency of information transmission in information-measurement systems. The work is aimed at identifying the most optimal methods of densification, considering the requirements for bandwidth, transmission distance, economic efficiency, and technical limitations in various industry applications, as well as reviewing a new method of densification on femtosecond lasers.

Object – methods of optical channel densification in fiber-optic communication lines.

The research method is theoretical.

To achieve the goal, the following tasks were set and solved in the work:

1. Conduct a search and review of literature sources on the topic of channel densification in fiber-optic communication lines.
2. Carry out a theoretical study of existing methods of channel densification in fiber-optic communication lines.
3. Investigate a new method of channel densification based on the use of femtosecond lasers.

ЗМІСТ

Зміст	6
Скорочення та умовні позначки	7
Вступ.....	8
1 Теоретичні основи ущільнення оптичних каналів	9
1.1 Огляд існуючих методів ущільнення каналів	9
1.1.1 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).....	11
1.1.2 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).....	13
1.1.3 WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)	16
1.2 Порівняльний аналіз систем CWDM і DWDM.....	17
2 Фемтосекундні лазерні мережі	18
2.1 Огляд проблематики DWDM.....	19
2.2 Спектральні характеристики випромінювання фемтосекундного лазера	21
2.3 Структура спектра, яка підтримує частотний план ITU	23
2.4 Стабілізація частотної гребінки за оптичним стандартом частоти	25
Висновки.....	29
Перелік джерел посилання	30
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	32

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;

CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing;

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing;

FLN – Femtosecond Laser Networks (фемтосекундні лазерні мережі);

OADM – optical add-drop multiplexer;

WDM – Wavelength Division Multiplexing;

WWDM – Wide Wavelength Division Multiplexing.

ВСТУП

В сучасному світі, де обсяги інформації що передаються зростають з кожним днем, потреба в ефективних методах передачі даних стає все більш актуальною. Ущільнення оптичних каналів в інформаційно-вимірювальних технологіях є однією з ключових технік, що дозволяє значно збільшити пропускну спроможність мереж без потреби в прокладанні додаткових ліній. Враховуючи сучасні тенденції у розвитку телекомунікаційних систем та збільшення потреб у швидкісному інтернеті, розгляд даної теми є надзвичайно важливим.

Основною метою даного дослідження є аналіз сучасних методів ущільнення оптичних каналів, таких як CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) і WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), та їх застосування в мережах передачі на волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ), зв'язку між програмованими логічними контролерами і т.п. А також огляд нового методу ущільнення каналів на основі використання фемтосекундних лазерів («femtosecond laser networks – FLN»).

Ключовими завданнями є:

- вивчення теоретичних основ ущільнення оптичних каналів;
- аналіз переваг та недоліків кожної з технологій.

Дослідження базуватиметься на комплексному підході, що включає аналіз наукової літератури. Буде проведено порівняльний аналіз різних технологій ущільнення оптичних каналів з акцентом на їх застосуванні в конкретних умовах. Особливу увагу буде приділено аналізу ефективності та надійності систем на основі цих технологій.

Цей вступ визначає основну сферу і напрямки дослідження, які будуть детально розглянуті в наступних розділах роботи.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ

У цьому розділі розглядаються основні концепції та технології, що лежать в основі ущільнення оптичних каналів. Розпочинаючи з огляду оптичних комунікаційних систем, описуються історичний розвиток та ключові переваги використання оптичних волокон над традиційними мідними кабелями. Особлива увага приділяється аналізу основних компонентів цих систем та їх взаємодії для ефективної передачі даних.

Далі будуть розглянуті технології ущільнення каналів, такі як CWDM, DWDM та WWDM. Для кожної технології надається детальний опис принципів роботи, характеристик, а також особливостей застосування. Окрема увага приділяється технічним параметрам та можливостям кожної системи, включаючи типові довжини хвиль і їх застосування в різних умовах.

Порівняльний аналіз CWDM, DWDM та WWDM відіграє важливу роль у цьому розділі. Це дозволяє глибше зрозуміти переваги та обмеження кожної системи, а також ідентифікувати найбільш підходящі застосування для них.

На завершення розділу висвітлюються принципи вибору довжин хвиль для ущільнення каналів. Обговорюються різні критерії та фактори, які впливають на цей вибір, включаючи дисперсію та інші фізичні обмеження. Важливим є розуміння того, як оптимізувати вибір хвиль для досягнення максимальної ефективності в конкретних умовах передачі даних.

Цей розділ має на меті надати всебічне розуміння теоретичних основ ущільнення оптичних каналів та підготувати ґрунт для детального аналізу практичних аспектів їх застосування в наступних розділах роботи.

1.1 Огляд існуючих методів ущільнення каналів

Оптичні комунікаційні системи є фундаментом сучасних мереж зв'язку, надаючи високошвидкісну передачу даних з низьким рівнем затухання та широкою пропускнуою спроможністю. Цей огляд розглядає історію, розвиток,

ключові компоненти та виклики, з якими зустрічаються оптичні комунікаційні системи.

Історія оптичних комунікацій починається з ранніх дослідів у 20 столітті, де головним завданням було створення чистих скляних волокон, здатних передавати світло на значні відстані без втрат. З часом, завдяки технологічним проривам, було досягнуто значного зниження втрат у волокнах, що дозволило використовувати їх для ефективної передачі даних.

Основним елементом будь-якої оптичної комунікаційної системи є волоконно-оптичний кабель, який складається з серцевини та оболонки. Серцевина діє як шлях для світлового сигналу, тоді як оболонка забезпечує внутрішнє відображення світла, дозволяючи йому ефективно переміщатися по волокну. Волокна бувають різних типів, зокрема одномодові та багатомодові, кожен з яких має свої особливості для певних застосувань.

У системах оптичного зв'язку оптичні передавачі перетворюють електричні сигнали в світлові, а оптичні приймачі виконують зворотне перетворення. Як джерела світла часто використовуються лазери та світлодіоди. Ефективність передачі даних також залежить від методів модуляції світлових сигналів [1].

Мультиплексори та демультиплексори грають ключову роль у забезпеченні можливості передачі декількох сигналів через одне волокно, що значно підвищує пропускну спроможність системи. Системи DWDM та CWDM демонструють різні підходи до ущільнення хвильових каналів, кожен з яких має свої переваги та області застосування [2].

Однак, оптичні комунікаційні системи також стикаються з викликами, такими як управління частотним спектром для уникнення перехресних перешкод між каналами. Іншим важливим аспектом є оптимізація пропускну спроможності, що може включати використання нових технологій та матеріалів.

З огляду на майбутні інновації, такі як квантовий зв'язок, оптичні комунікаційні системи продовжують розвиватися, відкриваючи нові

можливості для розширення функціональності та підвищення ефективності мереж зв'язку [3].

1.1.1 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

Технологія CWDM є методом ущільнення оптичних каналів, що використовує відносно широкі проміжки між каналами для передачі даних. Вона дозволяє передавати декілька сигналів через одне волокно, використовуючи різні довжини хвиль. Головною перевагою CWDM є її економічність і простота у впровадженні, оскільки вона не вимагає складного обладнання для фільтрації світла. Ця технологія часто використовується в регіональних мережах, де необхідні невисокі вимоги до пропускної спроможності.

Типові частоти для CWDM зазвичай охоплюють діапазон від 1270 нм до 1610 нм з кроком 20 нм між каналами. Це означає, що канали розташовані на таких довжинах хвиль, як 1270, 1290, 1310 нм і т.д. (рис 1.1). Цей відносно широкий інтервал між каналами дозволяє використовувати менш точні та відповідно менш вартісні компоненти у порівнянні з DWDM системами [3].

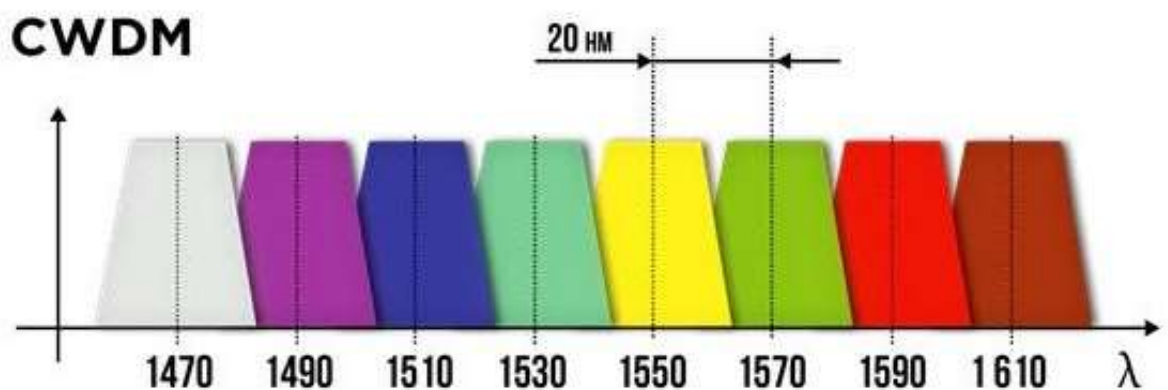


Рисунок 1.1 - Приклад спектрального розподілення каналів CWDM

Типові відстані для використання технології CWDM зазвичай становлять від 10 км до 80 км, що робить її ідеальною для міських або

регіональних мереж. CWDM підходить для застосувань, де потрібно передавати дані на відносно короткі або середні відстані, оскільки використання менш щільного розташування каналів дозволяє знизити вартість обладнання та експлуатації.

CWDM також може бути використана для з'єднання дата-центрів та офісів в рамках одного міста або між невеликими містами. При цьому, додаткове обладнання, таке як оптичні підсилювачі, може знадобитися для забезпечення стабільної роботи на верхньому краї діапазону відстаней.

Технологічні обмеження CWDM, такі як вище затухання сигналу на окремих довжинах хвиль, зокрема водний пік оптичного волокна, обмежують її ефективність на більш довгих дистанціях порівняно з DWDM, яка може забезпечувати стабільну передачу даних на сотні кілометрів без втрат [4].

Корпоративні мережі великих компаній також інтегрують CWDM для забезпечення надійного зв'язку між офісами, що дозволяє ефективно управляти великими обсягами даних та підтримувати корпоративні сервіси, такі як відеоконференції та централізовані бази даних. У сфері широкопasmового доступу CWDM використовується для підключення кінцевих користувачів з високою швидкістю інтернету, особливо в місцях, де інші технології не можуть забезпечити адекватну пропускну спроможність.

Додатково, CWDM знаходить застосування в інтелектуальних транспортних системах, де вона допомагає створювати високопродуктивні комунікаційні канали для передачі даних від датчиків та управління рухом. У додаток, індустрія виробництва використовує CWDM для створення ефективних промислових автоматизованих систем, де потрібна швидка та надійна передача даних між різними частинами виробничого процесу [1–3].

Таким чином, CWDM як універсальна та вартісно ефективна технологія відкриває широкі можливості для покращення мережевих з'єднань у різноманітних секторах, дозволяючи відповідати на сучасні вимоги до обсягів та швидкості передачі даних.

У системах CWDM використовуються декілька типів оптичних волокон, вибір яких залежить від конкретних вимог до мережі та відстаней передачі.

Найбільш поширеним вибором для CWDM є стандартні одномодові волокна, такі як ITU-T G.652. Цей тип волокна ефективний для CWDM через його високу пропускну спроможність та низьке затухання на довжинах хвиль, що використовуються в CWDM системах (зазвичай від 1270 нм до 1610 нм).

Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF) волокна, також відомі як волокна з ненульовим зсувом дисперсії, використовуються для зменшення дисперсії на довгих відстанях, особливо корисно в CWDM системах, де передача відбувається на різних довжинах хвиль.

Cut-Off Shifted Fiber волокна, які оптимізовані для зменшення втрат на вищих довжинах хвиль, що використовуються в CWDM. Вони забезпечують кращу продуктивність на відстанях середньої довжини.

Типова пропускна здатність систем CWDM варіюється в залежності від конкретних параметрів мережі та використовуваних компонентів. В системах CWDM, кожен канал зазвичай здатний передавати дані зі швидкістю від 1 до 10 Гбіт/с. Оскільки CWDM системи можуть включати від 8 до 18 каналів, загальна пропускна здатність цих систем може становити від 8 Гбіт/с до 180 Гбіт/с, виходячи з максимальної швидкості 10 Гбіт/с на канал [5].

1.1.2 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

DWDM представляє собою більш складну та високоефективну технологію ущільнення. Вона використовує значно вужчі проміжки між довжинами хвиль, дозволяючи передавати значно більше каналів через одне волокно. Така щільність каналів забезпечує високу пропускну спроможність, що робить DWDM ідеальною для використання у міжміських та міжнародних мережах, де потреби у пропускій спроможності є високими. Однак, вона вимагає використання більш дорогих лазерів та більш складного обладнання для управління каналами [6].

Типові довжини хвиль для DWDM варіюються, але найбільш розповсюдженими є діапазони від 1525 нм до 1565 нм (С-діапазон) та від 1570 нм до 1610 нм (L-діапазон). Інтервали між каналами в DWDM системах зазвичай становлять 0,4; 0,8; 1,6 нм або більше нм, що дозволяє досягти високої щільності передачі даних (рис. 1.2).

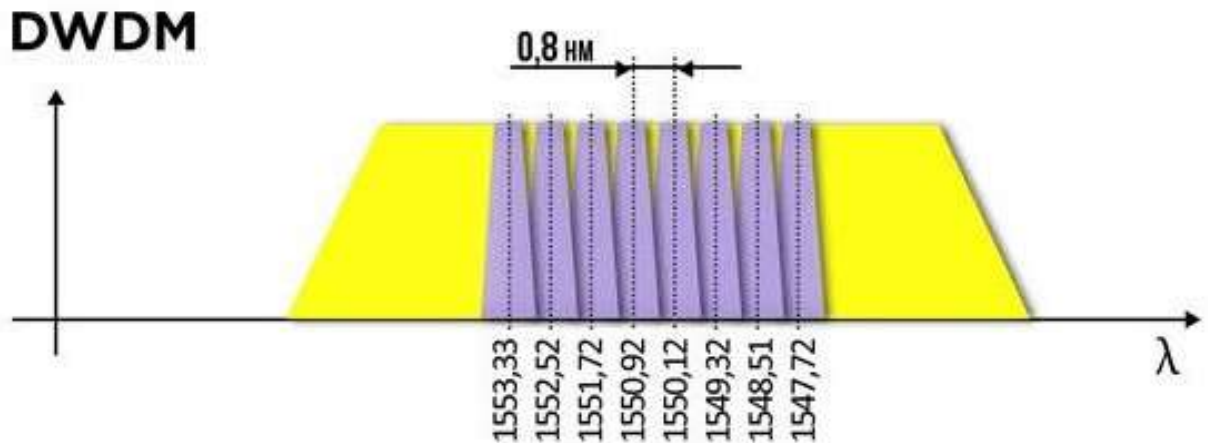


Рисунок 1.2 – Приклад спектрального розподілення каналів DWDM

Технологія DWDM є вдосконаленим методом ущільнення оптичних каналів, який знайшов широке застосування у багатьох галузях завдяки своїй високій пропускну́й спроможності та здатності до передачі даних на великі відстані з низьким рівнем втрат. Так, DWDM стала ключовою для індустрії телекомунікацій, де вона використовується для створення масштабованих мереж зв'язку, здатних передавати великі обсяги даних через міжміські та міжнародні волоконно-оптичні лінії. Технологія дозволяє операторам зв'язку оптимізувати використання існуючої інфраструктури, збільшуючи кількість каналів без потреби у прокладанні нових волокон.

Типові відстані для використання DWDM значно більші, ніж для CWDM, і можуть сягати від декількох сотень кілометрів до більш ніж 3000 кілометрів без активного підсилення сигналу. З використанням оптичних підсилювачів та регенераторів сигналів, DWDM-системи можуть ефективно

передавати дані на трансконтинентальні відстані, забезпечуючи міжнародні та наддовгі мережеві з'єднання.

У сфері постачання інтернет-послуг DWDM відіграє роль у розширенні пропускної спроможності доступу до широкосмугового інтернету, підвищуючи якість та надійність зв'язку для кінцевих користувачів. Це особливо актуально для областей, де потрібна висока швидкість передачі даних, таких як великі дата-центри та хмарні сервіси, де DWDM може забезпечити швидку та ефективну передачу великих обсягів інформації.

Крім того, DWDM використовується у фінансовому секторі та великих корпораціях для забезпечення швидкісного та захищеного обміну даними між філіями та центрами обробки даних, що розташовані на значних відстанях один від одного. Таке з'єднання є життєво важливим для підтримки високого рівня бізнес-операцій та фінансових транзакцій.

У дослідницькій сфері та в галузях, де вимагається швидка обробка великих масивів даних, таких як геноміка та геопросторовий аналіз, DWDM дозволяє вченим та інженерам обмінюватися даними з високою швидкістю, що необхідно для вирішення складних обчислювальних завдань.

Останнім часом DWDM також знаходить застосування у створенні інтелектуальних транспортних систем, забезпечуючи зв'язок для систем управління рухом, датчиків та інших технологій, що використовуються для покращення безпеки та ефективності дорожнього руху.

Загалом, DWDM є незамінною в галузях, де потрібна велика пропускна спроможність і надійність зв'язку на великі відстані, відкриваючи широкі можливості для розвитку мережевої інфраструктури та підтримки сучасних вимог до передачі даних.

У системах DWDM використовуються як ті ж типи оптичних волокон, що і для CWDM, так і волокна з великою ефективною площею (Large Effective Area Fiber, LEAF), які мають збільшену ефективну площу серцевини, що знижує нелінійні ефекти, особливо важливі при високих рівнях потужності, що використовуються в DWDM [7–8].

Типова пропускна здатність систем DWDM вища, ніж у систем CWDM, і значно залежить від конкретної конфігурації та використаних технологій. У DWDM, кожен канал часто може передавати дані зі швидкістю від 10 Гбіт/с до 100 Гбіт/с, а в деяких випадках навіть більше, залежно від використання передових модуляційних технік та обладнання.

Сучасні DWDM системи можуть підтримувати від 40 до більш ніж 100 каналів, забезпечуючи потенційно загальну пропускну спроможність у кілька терабіт в секунду.

1.1.3 WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)

WWDM є відносно новою розробкою в галузі ущільнення оптичних каналів. Ця технологія об'єднує переваги CWDM та DWDM, використовуючи широкий діапазон довжин хвиль, але з вищою щільністю каналів, ніж у CWDM. WWDM може використовувати інноваційні методи управління спектром, що дозволяє оптимізувати використання волоконних ресурсів. Ця технологія відкриває нові можливості для розширення пропускної спроможності мереж, при цьому зберігаючи баланс між вартістю та ефективністю.

Кожна з цих технологій ущільнення оптичних каналів має свої унікальні особливості, переваги та області застосування. Вибір між CWDM, DWDM та WWDM залежить від конкретних вимог до мережі, включаючи необхідну пропускну спроможність, відстань передачі, бюджет та інші технічні параметри. Розвиток цих технологій продовжує впливати на еволюцію оптичних комунікаційних систем, відкриваючи нові шляхи для покращення якості та ефективності мережевої інфраструктури.

1.2 Порівняльний аналіз систем CWDM і DWDM

Підсумовуючи, CWDM є відмінним рішенням для застосувань, які не вимагають великої кількості каналів або дуже довгих відстаней передачі, оскільки вона пропонує меншу складність та вищу економічну ефективність. З іншого боку, DWDM підходить для мереж з високими вимогами до пропускної спроможності та дальності передачі, надаючи велику гнучкість та масштабованість за рахунок вищих витрат та складності системи (табл. 1).

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця систем ущільнення каналів CWDM і DWDM

Критерій	CWDM	DWDM
Пропускна спроможність	від 8 Гбіт/с до 180 Гбіт/с	До кількох Тбіт/с
Кількість каналів	Від 8 до 18 каналів	Від 40 до 100 і більше каналів
Відстань передачі	Коротші відстані, зазвичай до 80 км	Довгі відстані, сотні або навіть тисячі кілометрів
Економічна ефективність	Зазвичай дешевша, менш складне обладнання	Дорожча, через використання складніших компонентів
Довжини хвиль	Ширші проміжки (зазвичай 20 нм)	Вузькі проміжки (0,4 – 1,6) нм
Застосування	Ідеальна для міських та регіональних мереж	Підходить для міжміських та міжнародних мереж
Нелінійні ефекти	Менш чутливі до нелінійних ефектів	Вища чутливість до нелінійних ефектів
Управління системою	Простіше управління	Більш складне управління
Типова потужність лазерів	від 0,5 мВт до 5 мВт	від 10 мВт до 100 мВт

2 ФЕМТОСЕКУНДНІ ЛАЗЕРНІ МЕРЕЖІ

Основна перевага збільшення щільності каналів полягає у здатності передавати більшу кількість даних через одне оптичне волокно. Це особливо важливо в умовах стрімкого зростання обсягів інформації, які потрібно передавати у цифровому світі. Збільшення щільності каналів дозволяє ефективніше використовувати існуючу інфраструктуру, знижуючи потребу в прокладанні нових ліній зв'язку. Це, в свою чергу, сприяє зниженню витрат на розширення мережевої інфраструктури.

Зі зростанням потреб користувачів та організацій у швидкості передачі даних, збільшення щільності каналів дозволяє мережам легше масштабуватися, щоб задовольнити ці зростаючі потреби, а керування більшою кількістю каналів на одному волокні може зробити управління мережею більш ефективним, оскільки зменшується потреба у фізичних ресурсах та забезпечується більша гнучкість у розподілі мережевих ресурсів.

Розробка системи, яка дозволяє кратно збільшити кількість каналів в одному волокні порівняно з існуючими DWDM системами, змінить пейзаж сучасних телекомунікаційних мереж. Такий прогрес у волоконно-оптичній технології сприяв би значному підвищенню пропускну здатності, що відкрило б нові можливості для швидкої передачі великих обсягів даних. Це було б особливо важливо в контексті глобалізації та цифровізації, де потреба в швидкому та ефективному обміні інформацією стрімко зростає.

Таке збільшення каналів також сприяло б кращому використанню існуючої інфраструктури, знижуючи необхідність у будівництві нових мереж та зменшуючи пов'язані з цим витрати. Крім економічної вигоди, це також мало б позитивний вплив на навколишнє середовище, оскільки зменшення необхідності у фізичному розширенні мереж зменшує екологічний вплив.

Водночас, розвиток такої системи стимулював би інновації у сфері технологій, зокрема у розробці нових методів модуляції та обладнання для управління каналами. Це, у свою чергу, могло би вести до появи нових

сервісів і додатків, які вимагають високої швидкості та обсягу передачі даних, включаючи розвиток сфери хмарних обчислень, великих даних, стрімінгових послуг високої якості, а також підтримку розвитку мереж 5G та інтернету речей [9].

Таким чином, система, здатна кратно збільшити кількість каналів в оптичному волокні, не лише забезпечила б нові технічні можливості для мережевої інфраструктури, але й стала б каталізатором для широкого спектру інновацій у багатьох сферах.

Саме тому пошук і розвиток нових методів ущільнення каналів, які дозволяють збільшити їх кількість при зменшенні вартості обладнання є надзвичайно перспективним напрямком.

2.1 Огляд проблематики DWDM

Сучасні проводові, мобільні та волоконно-оптичні системи зв'язку та передачі інформації є найбільш затребуваними на ринку інформаційних послуг. Їх постійний розвиток спрямований на збільшення обсягів та швидкостей передачі інформації. Одним з головних напрямків збільшення швидкості передачі інформації у волоконно-оптичних магістральних лініях зв'язку є збільшення кількості оптичних каналів або несучих оптичних частот. Існуючі DWDM системи побудовані на дискретному наборі джерел лазерного випромінювання, що обмежує подальший розвиток їх пропускної спроможності та швидкості передачі інформації.

Стандартизація систем WDM, яка здійснюється під керівництвом сектора стандартизації телекомунікацій ITU, призвела до розробки та прийняття набору стандартних оптичних частот ν , заснованих на базовій частоті 193100 ГГц ($\lambda = 1552,52$ нм). Стандартні частоти розташовуються вище та нижче цієї частоти з частотним інтервалом 50 ГГц. Загалом існує 105 стандартних каналів ITU-T у діапазоні від 1521,02 нм до 1605,74 нм.

Успішна робота мереж WDM та DWDM визначається стабільністю частот випромінювання використовуваних лазерів. У DWDM системах частотний план формується за допомогою джерел випромінювання, якими є стабілізовані за частотою напівпровідникові лазери. Стабілізація частоти випромінювання здійснюється шляхом теплового налаштування довжини резонатора напівпровідникового лазера. Встановлена ширина частотних каналів 100 ГГц (0,8 нм) пов'язана не лише з системою стабілізації частот лазерів, але й з пристроями мультиплексування та демуплексування, які використовуються у системах WDM і DWDM для розділення та об'єднання окремих оптичних частот у канали. Розвиток систем WDM та DWDM спрямований на забезпечення більшої щільності оптичних каналів, частотна ширина яких повинна бути значно меншою за 100 ГГц. Тому подальше збільшення щільності каналів вимагає зміни принципів та технологій формування оптичних каналів та, відповідно, принципів стабілізації частоти випромінювання використовуваних лазерів.

В даному розділі буде розглянуто новий підхід до збільшення частотних каналів існуючих DWDM систем (без зміни частотного плану ITU), який полягає у використанні стабілізованого частотного спектру випромінювання фемтосекундного лазера, як джерела випромінювання, замість стабілізованих напівпровідникових лазерів [10–12]. Оскільки використання фемтосекундного лазера призведе до створення принципово нової системи синхронізації частотних каналів, такі системи пропонується називати FLN (Femtosecond Laser Networks).

Використання багаточастотного випромінювання від одного лазерного джерела вимагає розв'язання завдання селекції кожної оптичної частоти для її модуляції інформаційним сигналом та подальшої демодуляції.

2.2 Спектральні характеристики випромінювання фемтосекундного лазера

Існуючі DWDM технології забезпечують формування та перетворення оптичних сигналів, за допомогою яких відбувається передача інформаційних сигналів. Кожен з оптичних сигналів представляє собою одночастотне випромінювання, генерація якого здійснюється окремим напівпровідниковим лазерним джерелом. Оптична частота кожного такого джерела є фіксованою та відповідає частотному плану.

Модуляція оптичного випромінювання здійснюється шляхом модуляції робочого струму напівпровідникового лазера. Потім усі оптичні частоти об'єднуються мультиплексором у багатоканальний складовий оптичний сигнал, який далі поширюється по оптичному волокну. При передачі інформації на великі відстані в лінії зв'язку встановлюється один або кілька проміжних оптичних підсилювачів. Демультиплексор приймає складовий багаточастотний сигнал, розділяє його за довжинами хвиль та направляє їх на відповідні фотоприймачі. На проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені зі складового сигналу за допомогою мультиплексорів вводу/виводу або пристроїв крос-комутації (рис. 2.1).

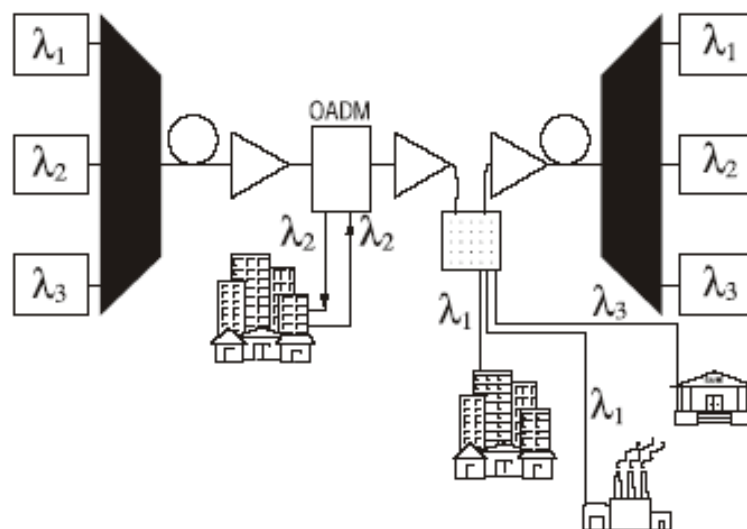


Рисунок 2.1 – Принцип дії технології DWDM

Формування оптичних сигналів із частотами, відповідними частотному плану, та модуляція оптичного випромінювання інформаційним сигналом здійснюється за допомогою одночастотних напівпровідникових лазерів. У зв'язку з тим, що подальше збільшення оптичних частотних каналів пов'язане зі збільшенням кількості напівпровідникових лазерів, необхідно досліджувати умови використання багаточастотних лазерних джерел випромінювання, які б дозволили значно збільшити кількість оптичних каналів, не змінюючи при цьому структури частотного плану DWDM. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї задачі є використання випромінювання фемтосекундного лазера, який характеризується широким спектром випромінювання [10–11].

Спектр випромінювання фемтосекундного лазера зумовлений не лише генерацією великої кількості продольних мод з синхронізованими фазами, але й компресією або часовим стисканням імпульсів випромінювання. Для забезпечення широкого дискретного спектру випромінювання особливо важливо, щоб у активних середовищах була широка смуга підсилення.

У ближньому інфрачервоному діапазоні від 1300 нм до 1600 нм до таких середовищ належать форстерит (Cr^{4+} : YAG) та волоконні ербієві середовища. На даний час розроблені та виготовлені фемтосекундні лазери, які можуть стати основою лазерних джерел для DWDM систем. Для успішного їх застосування характеристики спектру випромінювання мають задовольняти певним вимогам. По-перше, структура спектра повинна підтримувати чинний частотний план ІТУ, а саме встановлені ним частоти, що відповідають центрам частотних каналів, мають збігатися з абсолютними значеннями деяких частот спектра випромінювання лазера. По-друге, у кожному каналі частотного плану ІТУ мають розташовуватися додаткові частоти, тому відстань між спектральними компонентами випромінювання має бути кратною 100 ГГц. По-третє, для формування стабільного у часі спектра випромінювання лазера, сумісного з частотним планом ІТУ, його необхідно стабілізувати за зовнішнім стандартом частоти (довжини хвилі) оптичного

випромінювання. Відповідно до цих умов, були поставлені завдання, вирішення яких представлено у даній роботі.

2.3 Структура спектру, яка підтримує частотний план ІТУ

Дискретний спектр або частотна гребінка, як часто називається в літературі спектр випромінювання фемтосекундного лазера, характеризується двома параметрами. Перший - це частотна відстань між спектральними компонентами або піками гребінки f_r , яка дорівнює частоті послідовності імпульсів лазера та визначається як:

$$f_r = \frac{vg}{L_R},$$

де L – довжина резонатора;

vg – групова швидкість випромінювання всередині резонатора. Залежність цього параметра від довжини резонатора дозволяє встановлювати необхідний частотний інтервал залежно від обраної довжини резонатора;

f_{ceo} – зсув абсолютного значення частот спектральних компонентів відносно нульової частоти $f = 0$ (рис. 2.2) [11].

Наявність частотного зсуву f_{ceo} обумовлено різницею між фазовою та груповою швидкостями поширення випромінювання у резонаторі лазера. Абсолютна частота кожного окремого піка гребінки FN визначається її номером N , частотним інтервалом між піками f_r та f_{ceo} :

$$FN = N \cdot f_r + f_{ceo}.$$

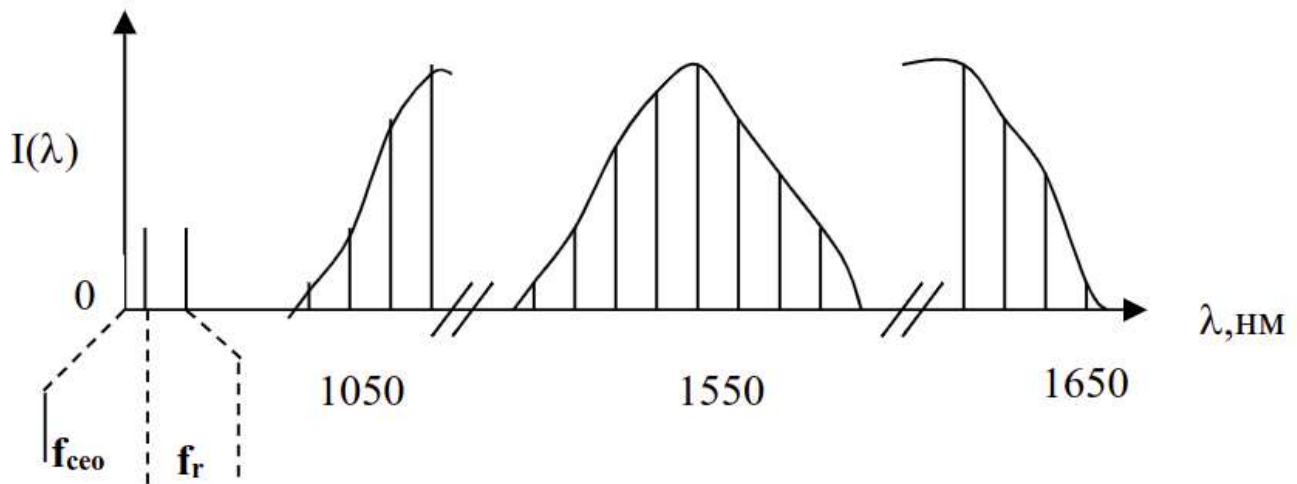


Рисунок 2.2 – Частотна гребінка фемтосекундного імпульсного лазера

Центральна довжина хвилі, яку випромінює імпульсний лазер на основі $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, знаходиться у діапазоні 1550 нм (193 ТГц). Смуга частот випромінювання такого лазера становить від 20 ТГц до 30 ТГц. Оскільки f_r визначається довжиною резонатора, то налаштування спектра, який буде узгоджений з частотним планом, здійснюється за допомогою вибору довжини резонатора. Чим менша величина f_r , тим більше спектральних компонентів може поміститися в межах 100 ГГц частотного каналу.

На вибір f_r впливають методи та способи розділення спектральних компонентів, тобто методи мультиплексування та демультіплексування повинні забезпечувати роботу з частотами, які віддалені одна від одної на сотні мегагерц. У роботі розглянуто можливості різних методів демультіплексування та запропоновано встановити відстань між спектральними компонентами 1 ГГц. При цьому довжина резонатора становитиме 150 мм. Стабілізація довжини резонатора забезпечує стабільність f_r . Основна умова використання обраного частотного спектра полягає в тому, що кожна десята компонента спектра повинна збігатися з центральною частотою кожного каналу. Для забезпечення цієї умови

необхідно встановити відповідне значення f_{ceo} та підтримувати його за допомогою системи стабілізації [11]. Отже, маємо:

$$FN = 193100 \text{ ГГц} = 1 \text{ ГГц} \cdot N + f_{ceo}.$$

За умови, що $f_{ceo} = 0$, всі частоти спектра будуть збігатися з центральними частотами каналів. Це означає, що стабілізація частотного спектра лазера має забезпечувати мінімальне значення f_{ceo} . Ця величина може бути визначена лише експериментально. Значення f_r та f_{ceo} можуть бути визначені з максимально можливою точністю за допомогою високоточних частотомірів, каліброваних за рубідієвими стандартами частоти. Частота повторення імпульсів f_r визначається з сигналу детектування фотодіодом випромінювання фемтосекундного лазера за гомодинною схемою. Частотний зсув f_{ceo} можна визначити кількома способами.

2.4 Стабілізація частотної гребінки за оптичним стандартом частоти

Для забезпечення стабілізації необхідно вирішити завдання вибору відповідного оптичного стандарту частоти. Для цього пропонується наступна структурна схема комплексу апаратури для стабілізації за частотою фемтосекундного лазера (рис. 2.3).

Структурна схема включає такі компоненти комплексу: 1 – фемтосекундний лазер; 2, 4 – дільник; 3 – світловід; 5 – стабілізація f_{ceo} ($fN - f_{1064}$); 6 – YAG:Nd-лазер; 7 – гонролер поляризації; 8 – йодна камера; 9 – рубідієвий генератор; 10 – обробка та стабілізація f_r , Обробка та стабілізація f_{532} [11–12].

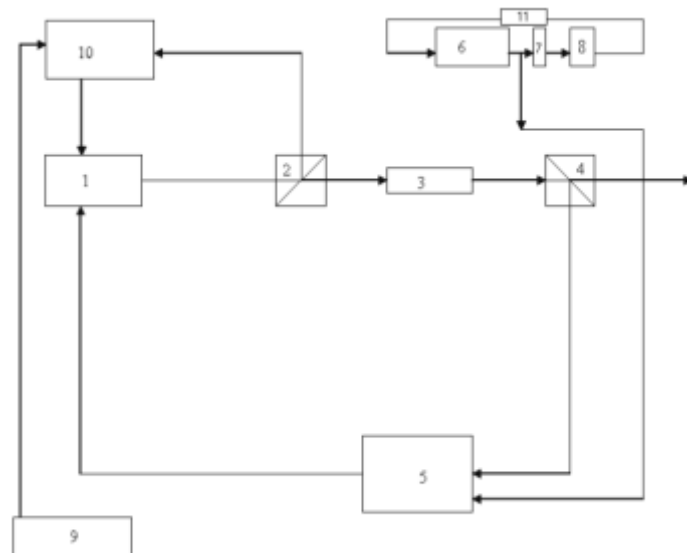


Рисунок 2.3 – Структурна схема комплексу апаратури для стабілізації за частотою фемтосекундного лазера

Розглянемо детальніше дану структурну схему. Імпульс фемтосекундного лазера (1) потрапляє на дільник (2), і одна його частина йде для стабілізації частоти між двома піками нашої гребінки f_r за рубідієвим стандартом (10). Друга частина проходить через волокно (3), на фотонному кристалі, розміщеному в термостаті, для температурної стабілізації, для розширення частотного діапазону гребінки, що дасть нам можливість стабілізувати частотну гребінку фемтосекундного лазера, використовуючи оптичний стандарт частоти на основі Nd:YAG лазера з подвоєнням частоти. Елементи 6, 7, 8, 11 нашої схеми саме для цього і служать. Nd:YAG лазер (6) випромінює на довжині хвилі 1064 нм, частина якої відводиться для стабілізації f_{ceo} , проходячи через нелінійний кристал, виділяється друга гармоніка 532 нм, стабілізація частоти цього стандарту здійснюється за природним оптичним репером, яким є лінії насиченого поглинання в парах молекулярного йоду ^{127}I . Стабілізуючи частоту другої гармоніки (f_{532}) елементом 11, шляхом корекції параметрів лазера стабілізується основна частота випромінювання (f_{1064}) (рис. 2.4) [11–13].

На рис. 2.4 представлена схема стабілізації частотної гребінки фемтосекундного лазера за оптичним стандартом частоти неодимового лазера. Використовуючи стабілізовану частоту $f = 1064$ нм Nd:YAG лазера, ми прив'язуємося до найближчого піку частотної гребінки і знаходимо f_b^{1064} і, стабілізуючи це значення, ми можемо повністю контролювати поведінку всієї частотної сітки. Після цього подаємо коригувальний сигнал на фемтосекундний лазер.

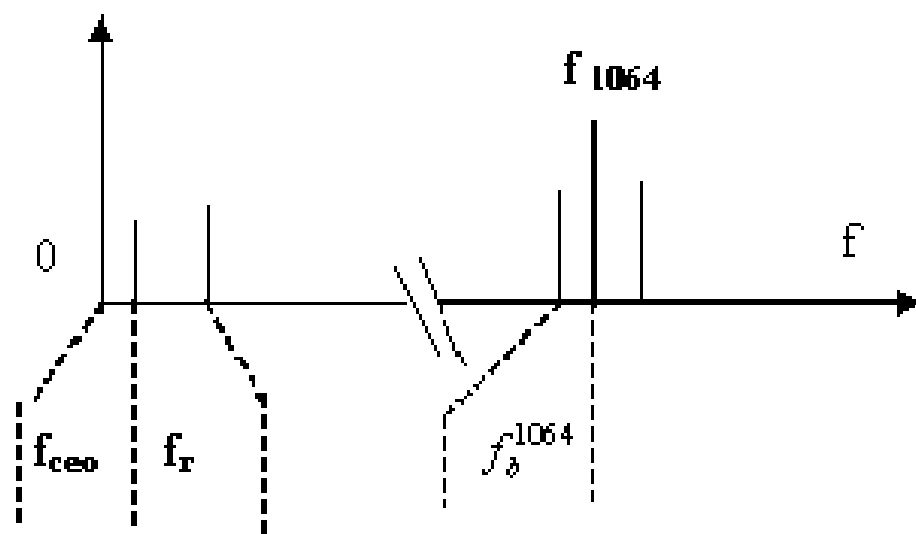


Рисунок 2.4 – Схема стабілізації частотної гребінки фемтосекундного лазера

На даний момент серйозною проблемою є порядок використання, точніше, ефективність використання. Відомо, що неперервна послідовність імпульсів (тривалість одного імпульсу – десятки фемтосекунд, а частотний інтервал між ними строго сталий і може становити від 50 МГц до 1 ГГц) випромінювання лазера в спектральній формі представляє собою частотну гребінку, характеристики якої визначаються умовами генерації лазера. Еквідистантність гармонік встановлюється самим процесом синхронізації мод

у лазері. Якщо в резонаторі лазера виникають умови для взаємодії, вони можуть інтерферувати між собою, у результаті чого виникають биття, які призводять до періодичної послідовності імпульсів. Тривалість імпульсів визначається часом, протягом якого всі моди залишаються синхронізованими. Якщо здійснити спектральне розширення, це призводить до збільшення кількості спектральних компонентів [11].

ВИСНОВКИ

Аналіз різних технологій, включаючи CWDM, DWDM та WWDM, показав, що кожна з них має свої унікальні особливості, переваги та обмеження, які визначають їхню придатність для різних застосувань. CWDM виявилася ефективною в регіональних мережах завдяки своїй економічності та простоті, тоді як DWDM є більш підходящою для високопродуктивних міжміських та міжнародних систем зв'язку. WWDM, як новітня технологія, відкриває нові перспективи для майбутнього розвитку оптичних мереж.

Дослідження підкреслило значення технологій ущільнення оптичних каналів у сучасних комунікаційних мережах. Виявлено, що застосування цих технологій дозволяє значно збільшити пропускну спроможність мереж без потреби у прокладанні нових ліній зв'язку, що є важливим для впорядкування зростаючого обсягу даних та забезпечення високошвидкісного зв'язку.

З огляду на застосування ущільнення каналів в інформаційно-вимірjuвальних технологіях, стало зрозумілим, що ці технології сприяють підвищенню ефективності та надійності систем передачі даних. Зокрема, вони забезпечують важливі можливості для розвитку інтелектуальних мереж та розширення можливостей сучасних інформаційних систем.

У цьому контексті рекомендації для практичного впровадження та подальших досліджень включають врахування специфічних вимог до мережі, вибір оптимальних технологій ущільнення з урахуванням обмежень бюджету та технічних параметрів, а також подальше вивчення інноваційних рішень у цій галузі.

Ключовим аспектом дослідження був аналіз нового методу генерації несучих частот на основі фемтосекундних лазерів, який дозволяє в рази збільшити щільність каналів, порівняно з існуючими технологіями DWDM.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Onyshchenko K., Afanasieva I. (2017). Structured methodology for development of the Service for providing remote control of intelligent Home devices using Internet of Things solutions // *ScienceRise*. 2017. Vol. 5, No 2. P. 30–33.
2. Afanasieva I., Golian N., Hnatenko O., Daniil Y. & Onyshchenko K. (2019). Data exchange model in the internet of things concept // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No 10. P. 869–878.
3. Gnatenko A. S., Machekhin Y. P., Kurskoy Y. S., Obozna, V. P., & Vasianovych, A. V. (2018). Ring fiber lasers for telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(6). 541-548.
4. Hnatenko O. S. The creation of an optical laboratory using modern optical applications / O. S. Hnatenko, V. P. Obozna // *Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018, 5-9 лютого 2018 р. Суми, 2018*. 200 с.
5. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Семенець В.В., Неофітний М.В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення. Харків. 2019. 156 с.
6. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2. Параметри лазерного випромінювання: монографія / Ю. П. Мачехін, О. С. Гнатенко ; Харків : ФОП Панов А.М., 2021. 145 с. ISBN 978-966-637-975-0.
7. Hnatenko O. S., Yu P. Machekhin, M. V. Neofitnyi, and S. V. Gulak. Design and study of a laser system for detecting optical devices. 2019.
8. Machekhin Yu.P., Gnatenko A.S., Kurskoy Yu.S., (2018) Photonic crystal nanolasers as optical frequency standards, *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(13), P. 1169–1177. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i13.50.
9. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій / О. С. Гнатенко ; Харків : Факт, 2023. 130 с. ISBN 978-966-617-8072-88-9.

10. O.S. Hnatenko, Yu. P. Machekhin Information transmission systems based on femtosecond lasers («femtosecond laser networks – FLN»), Telecommunications and Radio Engineering, 76 (X):1-19119 (2019)

11. Machekhin Yu. P. Design and Optimal Parameters of a Small-sized Diode-Pumped Nd:YAG Laser Setup / Yu. P. Machekhin, S. S. Herasymov, O. S. Hnatenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2023. Vol. 15, № 5. P. 05010-1–05010-5.

12. Sivni V. B., & Hnatenko O. S. (2018). Use of femtosecond lasers to encode information. Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції, 23-26.