

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

[Signature] Вітюк О.С.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
[Signature] Барась С.Т.

« 7 » грудня 2023 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС
[Signature] Осадчук Я.О.

« 7 » грудня 2023 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ
[Signature] д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 13 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)
 Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)
 Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“ 19 ” 09 2023 року



З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Вітюку Олександр Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18. 09. 2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року


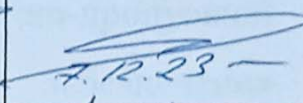
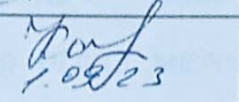
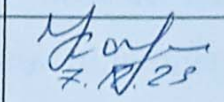
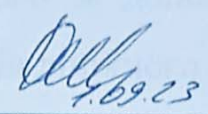
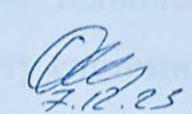
3. Вихідні дані до роботи Робоча довжина хвилі 1,55 мкм; загальні втрати в усіх роз'ємних з'єднувачах на ЕКД 2 дБ; експлуатаційний запас енергетичного потенціалу апаратури 3 дБ; максимальне значення коефіцієнта згасання оптичного сигналу 0,22 дБ/км; середня будівельна довжина кабелю 4 км; динамічний діапазон рівня приймального сигналу (7-19) дБ; швидкості передачі інформації – 140, 155, 622 Мбіт/с.

4. Зміст текстової частини: Огляд методів підвищення ефективності ВОСП; підвищення пропускну здатності ВОСП за допомогою технологій TDM та WDM; порівняльний аналіз пропускну здатності ВОЛЗ на основі технологій TDM та WDM; оптимізація параметрів ВОСП для високошвидкісної передачі даних; розрахунок пропускну здатності та довжини регенераційної ділянки; комп'ютерне моделювання; економічна частина; охорона праці та безпека життєдіяльності.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) нормування коефіцієнтів помилок; структурна схема регенератора; часові діаграми роботи регенератора; узагальнена структурна схема ВОСП;

залежності чутливості фотодіодів від довжини хвилі; структурна схема регенераційної ділянки; результати комп'ютерного моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

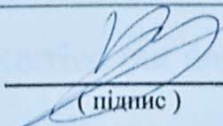
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ	 7.09.23	 7.12.23
Аналіз економічної ефективності розробки	Кавецький В.В. к.е.н., доцент	 7.09.23	 7.12.23
Охорона праці та безпека життєдіяльності	Нелібіцька С.В. д.тер.н. професор	 7.09.23	 7.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

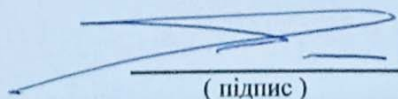
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Огляд методів підвищення ефективності ВОСП	17.09.2023р.	
3.	Аналіз підвищення пропускну здатності ВОСП за допомогою технологій TDM та WDM	06.10.2023р.	
4.	Оптимізація параметрів ВОСП для високошвидкісної передачі даних	27.10.2023р.	
5.	Методи підвищення швидкості передавання даних. Комп'ютерне моделювання	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Вітюк О.С.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С.Т.

АНОТАЦІЯ

Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних. Магістерська кваліфікаційна робота / О. С. Вітюк – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 134 с., 42 рис., 23 – табл., 28 – бібл.– українською мовою.

Метою магістерської роботи є підвищення інформаційно-пропускну здатності волоконно-оптичної системи передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних. Виконано огляд методів підвищення ефективності волоконно-оптичних систем передачі за допомогою технологій TDM та WDM. Проведено оптимізацію параметрів лінійного тракту системи за допомогою відповідних розрахунків та порівняльного аналізу різних технологій. Проведено комп'ютерне моделювання основних пристроїв лінійного тракту.

Проведені економічні розрахунки та виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Analysis and optimization of parameters of fiber-optic transmission systems to ensure high-speed data transmission. Master's qualification thesis / O. S. Vityuk - Vinnytsia: VNTU, 2023. - 134 p., 42 fig., 23 tables, 28 - the bible - In ukrainian.

The purpose of the master's thesis is to increase the information throughput of the fiber-optic transmission system to ensure high-speed data transmission. A review of methods of increasing the efficiency of fiber-optic transmission systems using TDM and WDM technologies was performed. Optimization of parameters of the linear path of the system was carried out with the help of appropriate calculations and comparative analysis of various technologies. Computer modeling of the main devices of the linear tract was carried out.

Economic calculations were carried out and the section on labor protection and life safety was completed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ	8
1.1 Побудова лінійного тракту ВОСП.....	8
1.2 Перспективи розвитку волоконно-оптичних систем передачі	16
1.3 Значення нанотехнологій у збільшенні швидкості передачі інформації...19	
1.4 Фізичні та технологічні обмеження підвищення швидкості передавання інформації.....	22
1.5 Висновки до розділу	24
2 ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОСП ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM.....	26
2.1 Енергетичний та часовий баланси ВОСП	26
2.2 Порівняння інформаційної ємності ВОСП на основі технологій TDM та WDM.....	27
2.3 Порівняння енергетичного балансу ВОСП на основі технологій TDM та WDM	30
2.4 Порівняльний аналіз часових балансів ВОСП на основі технологій TDM та WDM.....	33
2.5 Порівняльний аналіз пропускної здатності ВОЛЗ на основі технологій TDM та WDM.....	36
2.6 Висновки до розділу.....	40
3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВОСП ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ	42
3.1 Узагальнена структурна схема лінійного тракту ВОСП з WDM.....	42
3.2 Вибір параметрів джерела випромінювання та фотоприймача	43
3.3 Розрахунок параметрів лінійного тракту	48
3.3.1 Вибір робочої довжини хвилі.....	48
3.3.2 Розрахунок пропускної здатності та довжини регенераційної ділянки...53	
3.4 Методи підвищення швидкості передавання даних	59

	7
3.4.1 Технологія часового мультиплексування.....	60
3.4.2 Технологія хвильового мультиплексування.....	61
3.4.3 Модове мультиплексування	65
3.4.4 Технологія багатосерцевинних волокон	67
3.5 Висновки до розділу.....	67
4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	69
4.1 Опис програмного пакету.....	69
4.2 Результати комп'ютерного моделювання.....	69
4.3 Висновки до розділу.....	83
5 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ.....	84
5.1 Оцінювання наукового ефекту	84
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	87
5.2.1 Витрати на оплату праці	87
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	90
5.2.3 Сировина та матеріали	90
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	91
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	92
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	93
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	94
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	95
5.2.9 Службові відрядження.....	95
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	96
5.2.11 Інші витрати.....	96
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	97
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	98
5.4 Висновки до розділу.....	99
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	100
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	100

6.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	103
6.2.1	Мікроклімат.....	103
6.2.2	Склад повітря робочої зони.....	103
6.2.3	Виробниче освітлення	104
6.2.4	Виробничий шум.....	105
6.2.5	Виробничі випромінювання.....	106
6.3	Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів НС.....	107
6.3.1	Дія сейсмічних коливань на виробничі приміщення.....	107
6.3.2	Оцінка безпеки роботи виробничого приміщення в умовах сейсмічних коливань.....	107
6.3.3	Розробка превентивних заходів з підвищення стійкості роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.....	108
6.4	Висновки до розділу.....	109
	ВИСНОВКИ.....	110
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	115
	Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	130

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне життя характеризується постійним зростанням обсягів інформації, яка необхідна у різноманітних сферах людської діяльності. Існує низка технологій, за допомогою яких забезпечується ефективний доступ до мережі Інтернет з метою отримання її інформаційних ресурсів [1-3]. До таких технологій відноситься технологія, що базується на використанні оптичних волокон (ОВ), тобто на основі волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП). Основним завданням є підвищення пропускної спроможності та швидкості передачі сигналів ВОСП. Швидкість та пропускна здатність ВОСП визначаються можливостями оптичних хвилеводів, швидкодією елементної бази електроніки та оптоелектроніки. Удосконалення елементної бази залежить від рівня розвитку технології виробництва та від успіхів у створенні нових матеріалів. Тому максимальна робоча частота пристроїв обробки та передачі інформації залежить від електронних характеристик матеріалу та геометричних розмірів мікроелементів. Зі зменшенням геометричних розмірів точність виготовлення елементної бази має збільшуватися. Однак існують технологічні межі, пов'язані з розкидом параметрів, енергоспоживанням та тепловиділенням, а також фізичні межі зменшення розмірів.

Лінійний тракт волоконно-оптичної системи передачі вважають якісним, якщо у ньому має місце хороша якість доставки інформаційних даних. Для виконання високих вимог лінійний тракт може бути резервований повністю або частково. Робочі та резервні тракти проектуються за заданими показниками якості, основним з яких є коефіцієнт помилок передачі двійкового сигналу на швидкості шістдесят чотири кілобіти на секунду на загальній довжині двадцять сім тисяч п'ятсот кілометрів. Національна ділянка при організації міжнародного з'єднання в каналі шістдесят чотири кілобіти за секунду має припустимий коефіцієнт помилок $K_{\text{пом}} = 0,4 \cdot 10^{-6}$. Величини коефіцієнтів помилок на магістральній, внутрішньозоновій, місцевій ділянках покладені в основу вимог

до коефіцієнта помилок регенератора, який визначається співвідношенням сигнал/шум на його вході.

Аналіз останніх досліджень. Повноцінне використання ВОСП почалося приблизно 30 років тому, коли технології виготовлення ОВ виявилися прийнятними для побудови ліній значної дальності. У нашому житті широко застосовуються волоконно-оптичні інтерфейси Ethernet, FDDI, FastEthernet, GigabitEthernet, АТМ в локальних і регіональних обчислювальних мережах. Волоконно-оптичний тракт все частіше стає невід'ємним елементом в абонентських мережах кабельного телебачення.

Технологія щільного хвильового мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) відноситься до числа найбільш прогресивних. Вона дозволяє значно збільшити пропускну здатність існуючих волоконно-оптичних магістралей. В 1996 р. був досягнутий терабітний бар'єр передачі даних по одному волокну. Тоді успішно продемонстрували рекордну пропускну здатність за рахунок мультиплексування в одне волокно 55 DWDM каналів, при швидкості передачі на канал 20 Гбіт / с, що забезпечило сумарну швидкість 1,1 Тбіт / с [2, 3].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є підвищення інформаційно-пропускну здатності волоконно-оптичної системи передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних за рахунок удосконалення WDM-технології.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- огляд методів підвищення ефективності ВОСП;
- підвищення пропускну здатності ВОСП за допомогою технологій TDM та WDM;
- оцінка енергетичного та часового балансів ВОСП;
- оптимізація параметрів ВОСП для високошвидкісної передачі даних;
- розрахунок параметрів лінійного тракту;
- комп'ютерне моделювання;
- економічні розрахунки;

- охорона праці та безпека життєдіяльності.

Об'єкт дослідження є процеси передачі та прийому оптичних сигналів.

Предмет дослідження є методи та засоби, які забезпечують підвищення ефективності та оптимізацію ВОСП для високошвидкісного передавання даних.

Методи досліджень базуються на використанні: теорії передачі інформації, теорії багатоканальних систем передачі та аналізу дисперсії і параметрів швидкодії світловодів.

Новизна одержаних результатів:

а) показано, що генеральним напрямом у підвищенні пропускної спроможності волоконно-оптичних ліній зв'язку є удосконалення та створення елементної бази; подальше підвищення пропускної спроможності можливе лише у разі переходу на квантові принципи передачі та обробки інформації;

б) на основі аналізу методів мультиплексування WDM та TDM за критерієм досяжної пропускної здатності волоконно-оптичних систем передачі показано, що WDM-технологія має незаперечну перевагу перед іншими технологіями за якими будуються телекомунікаційні транспортні системи.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ЛІІ науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає в можливості використання її результатів при плануванні та експлуатації ВОСП, а також у навчальному процесі.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

1.1 Побудова лінійного тракту ВОСП

Якість лінійного тракту волоконно-оптичних систем передачі визначає в більшості випадків якість доставки самої інформації. З цієї причини до лінійних трактів волоконно-оптичної передачі висуваються такі вимоги:

1. Хороша заводо захищеність та мінімальна кількість помилок цифрової передачі.

2. Висока надійність (відмовостійкість).

Для доставки інформаційних даних лінійний тракт може бути повністю зарезервованим (режим 1 + 1 - один робочий та один резервний) або частково (1: n - один резервний для n робочих $n = 1, 2, \dots, 14$). Робочі та резервні тракти розроблені відповідно до визначених показників якості, основною з яких є помилка передачі двійкового сигналу (сигнал з імпульсно-кодовою модуляцією - ІКМ) на швидкості шістдесят чотири кілобітів на секунду при загальній довжині двадцять сім тисяч п'ятсот кілометрів.

Для проектування лінійних трактів використовуються нормативні показники аналогових трактів - це співвідношення сигналу/шум на виході приймача в заданій смузі частот. Якщо волоконно-оптичний тракт цифровий - це ймовірність помилки (опорне коло: двадцять сім тисяч п'ятсот кілометрів - початкова норма. Велике з'єднання, яка включає міжміське та національне з'єднання - з'єднання основного цифрового каналу (шістдесят чотири кілобітів на секунду).

Використовуються нормативи для національного з'єднання: $0,4 \cdot 10^{-6}$; для міжміської з'єднання: $0,2 \cdot 10^{-6}$. Відповідно до рекомендацій МСЕ-Т, схема організації міжнародної комунікації відповідає рисунку 1.1.

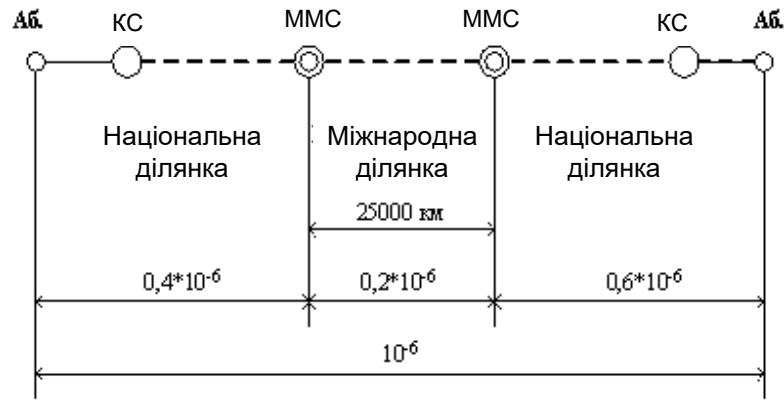


Рисунок 1.1 - Нормування коефіцієнтів помилок при міжнародному з'єднанні

Кожна національна ділянка ділиться на: місцеву, внутрішньозонову, магістральну.

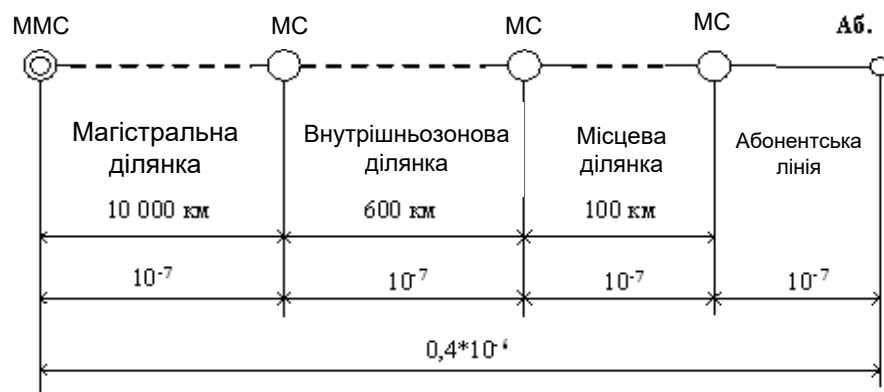


Рисунок 1.2 - Нормування коефіцієнтів помилок в основному цифровому каналі при міжнародному з'єднанні

На рисунках 1.1 та 1.2 позначені: КС - кінцева станція; ММС – міжміська станція, МС - мережева станція. Національна ділянка при організації міжміського з'єднання каналом шістдесят чотири кілобітів в секунду (основний цифровий канал - ОЦК) має прийнятний коефіцієнт помилок $K_{\text{пом}} = 0,4 \cdot 10^{-6}$.

Враховуючи, що під час цифрової передачі ОЦК помилки додаються, можна отримати умову допустимого значення коефіцієнта помилок на довжині лінійного тракту в один кілометр:

- для магістральної ділянки $K_{\text{помМ}} = 10^{-7}/10000 = 10^{-11}$;

- для внутрішньозонової ділянки $K_{\text{помВ}} = 10^{-7}/600 = 1,67 \cdot 10^{-10}$;

- для місцевої ділянки $K_{\text{помМц}} = 10^{-7}/100 = 10^{-9}$.

Зазначені значення коефіцієнтів помилок є основою для вимог до коефіцієнта помилок регенератора

$$K_{\text{пом рег}} = K_{\text{пом х}} \cdot L_{\text{рег}}, \quad (1.1)$$

де $L_{\text{рег}}$ – довжина регенераційної ділянки; $x = \text{М, В, Мц}$.

$K_{\text{пом рег}}$ визначається співвідношенням сигналу/перешкода на вході регенератора для заданого імпульсного сигналу. Для лінійних трактів волоконно-оптичних систем передачі характерна передача однополярних імпульсів. Відношення сигналу/шум відіграє вирішальну роль у пристрої регенерації.

Вирішальний пристрій (ВП) приймає рішення про прийом імпульсу або паузи. Рішення повинно бути прийнято при найбільш вірогідній амплітуді імпульсу, тобто на половині такту T . Для цього, використовуючи видільник тактової частоти (ВТЧ) та формувальний пристрій (ФП) створюється послідовність коротких стробуючих імпульсів середини тактових інтервалів передачі інформаційних символів (одиниць та нулів). У цьому випадку спотворений імпульсний сигнал відновлюється в його первісному вигляді. На рисунку 1.3 наведена структурна схема регенератора.

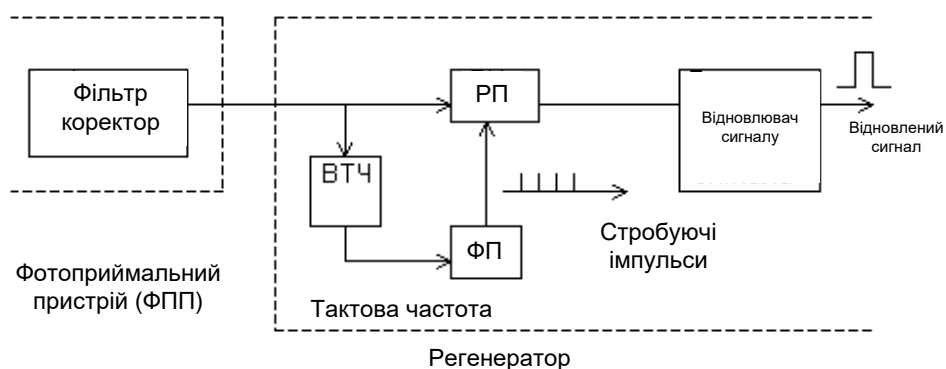


Рисунок 1.3 – Структурна схема регенератора

Помилки виникають у вирішальному пристрої, а відношення сигнал/шум виявляє появу помилок. На оптимізацію відношення сигнал/шум впливають: модулятор передавача, оскільки вносить спотворення; канал оптичної передачі (через дисперсію міжсимвольних перешкод), шуми фотодіода та підсилювача. Щоб зробити оптимальним відношення сигнал/шум, потрібні заходи, пов'язані з обмеженням смуги частот з одного боку, з іншого, це обмеження не повинно вплинути на міжсимвольні перешкоди. Щоб відношення сигнал/шум було оптимальним, треба побудувати систему коригування таким чином, щоб прибрати перешкоди з спектру, що не співпадає зі спектром сигналу.

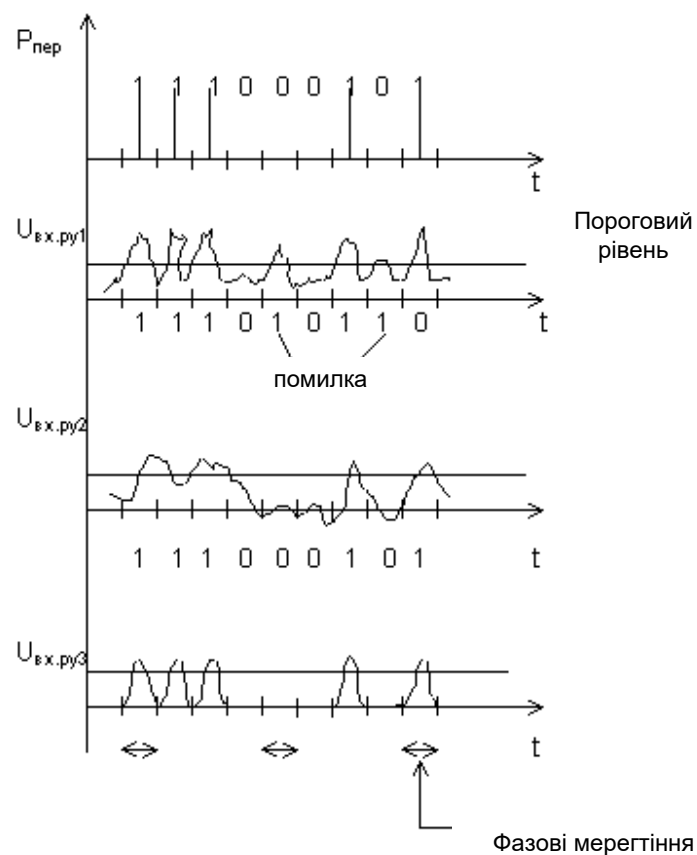


Рисунок 1.4 – Часові діаграми

На часовій діаграмі зображені тактові інтервали, які жорстко фіксовані за тривалістю. Але в реальних сигналах ці такти можуть відхилитися і в передавачі, і в системі виділення тактової частоти (джиттер - фазові тремтіння).

Напруга на вході вирішального пристрою описується нормальним законом розподілу. В результаті, у випадкові моменти часу можуть бути викиди.

Перешкоди додаються із сигналом, у результаті виникають помилки. Для вирішального пристрою створюється поріг розрізнення інформаційних одиниць та нулів. Якщо врахувати, що перешкода має гаусівський імовірнісний закон розподілу, то рівень порога дорівнює половині амплітуди одиничного імпульсу. При цьому ймовірність помилкового прийому визначається

$$p_{\text{пом}} = p(0) \cdot p(1/0) + p(1) \cdot p(0/1), \quad (1.2)$$

де $p(0)$ і $p(1)$ апіорні ймовірності появи одиниці та нуля; $p(1/0)$ та $p(0/1)$ – ймовірності хибного прийому. Величини $p(0) = p(1) = 0,5$, що забезпечується лінійним кодом ВОСП, а ймовірності хибного прийому визначаються через розподіл Гауса

$$P_{\text{пом}} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\frac{U_{\text{од}}}{2\sigma} \right) \right], \quad (1.3)$$

де $\Phi \left(\frac{U_{\text{од}}}{2\sigma} \right)$ – інтеграл ймовірності, табульований та наведений у математичних довідниках, $U_{\text{од}}$ – напруга одиничного імпульсу, σ – дисперсія напруги шуму (перешкоди). Найнижчий поріг відношення сигнал/шум служить нормативом для визначення мінімального рівня оптичного сигналу на вході фотоприймального пристрою. Навіть невелике відхилення від цього нормативу може призвести до різкого збільшення числа помилково прийнятих символів. Це потрібно враховувати при визначенні довжини регенераційного ділянки.

Помітне підвищення співвідношення сигнал/шум може дати фільтр-коректор (ФК), якщо він узгоджений з імпульсним сигналом по смузі частот і оптимізований стосовно міжсимвольної перешкоди. Узгодження смуги частот дозволяє згладити імпульсні перешкоди, тобто усунути шуми поза основною частиною смуги сигналу.

Смуга пропускання фільтр-коректора: $\Delta F \leq \frac{B}{2}$, де B – швидкість передачі двійкових імпульсів. Якщо смуга пропускання фільтр-коректора обрана менше,

ніж $B/2$, це призведе до відсікання шумів поза смугою сигналів і до додаткових міжсимвольних завад. Необхідно знайти оптимальну характеристику фільтр – коректора, яка зменшить величину перешкод поза смугою сигналу, не збільшить міжсимвольні перешкоди і не сприятиме накопиченню фазового тремтіння. Оптимізація по міжсимвольній перешкоді дозволяє домогтися стійкого виділення тактової частоти і формування стробувальних імпульсів з мінімальними фазовими тремтіннями. Найкращі результати дає фільтр – коректор косинусного типу. Його передатна характеристика підпорядковується наступному

$$K_{\text{пер}}(f) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi f}{B} \right), & \text{якщо } 0 < f < B; \\ 0, & \text{якщо } f > B. \end{cases} \quad (1.4)$$

де f – поточна частота, B – швидкість передачі бінарних імпульсів.

Графічне зображення цієї характеристики виглядає так

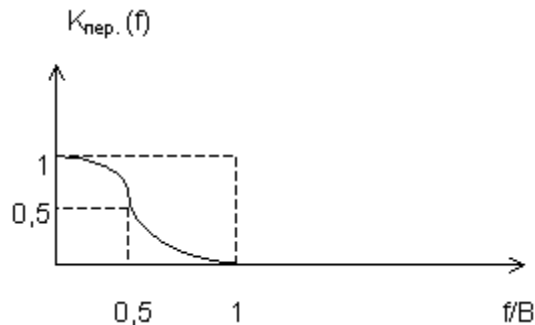


Рисунок 1.5 – Передатна характеристика косинусного фільтра-коректора

Це необхідно для того, щоб на вході вирішального пристрою оптимізувати відношення сигнал/шум.

Розглянемо особливості обробки лінійних сигналів у тракті прийому та призначення коректора та видільника тактової частоти.

Оптичний лінійний сигнал перетворюється у фотоприймачі у лінійний електричний сигнал. Зауважимо, що у загальному ці сигнали є аналоговими. Потім сигнал разом з перешкодами, що виникають, в основному, у фотоприймальному пристрої, подаються в регенератор (рисунок 1.3), що

складається з вирішального пристрою, видільника тактової частоти та пристрою формування. Вирішальний пристрій протягом тактового інтервалу T стробує лінійний сигнал і порівнює його з деякою граничною напругою $U_{пор}$. Якщо $U \geq U_{пор}$, $U_c = 1$; якщо $U \leq U_{пор}$, $U_c = 0$. Тут U - миттєве значення напруги на вході вирішального пристрою, U_c - напруга на виході вирішального пристрою. З наведеного алгоритму роботи випливає, що кодова комбінація імпульсів може бути відтворена з помилкою. Справді, якби пік перешкоди у другому тактовому інтервалі припав на момент стробування, була б прийнята одиниця замість нуля. Помилковий прийом оцінюється ймовірністю помилки:

$$P_{пом} = \frac{\text{число неправильно прийнятих імпульсів}}{\text{загальне число прийнятих імпульсів в одиницю часу}}.$$

Призначення коректора.

Відомо, що електричний сигнал на виході фотоприймача не є цифровим. Через дисперсію в оптичному волокні імпульси мають післядію: один попередній впливає на кілька наступних, що призводить до інтерференційних перешкод, які часто називають міжсимвольними. Внаслідок цього погіршується можливість розрізнення імпульсів вирішальним пристроєм. Крім того, помилкове спрацьовування вирішального пристрою може спричинити перешкоду $W_e(t)$, що надходить на його вхід з виходу фотоприймального пристрою. Тому виникає необхідність увімкнення перед вирішальним пристроєм коректора, який вирішує такі завдання:

- зменшує тривалість вхідного імпульсу таким чином, що міжсимвольні перешкоди стають мінімальними;
- зменшує вплив перешкод на вирішальний пристрій.

Як видно з рисунка 1.6, вирішення першого завдання можливе, якщо максимальна тривалість імпульсу τ_1 на виході коректора менша за тривалість двох тактових інтервалів

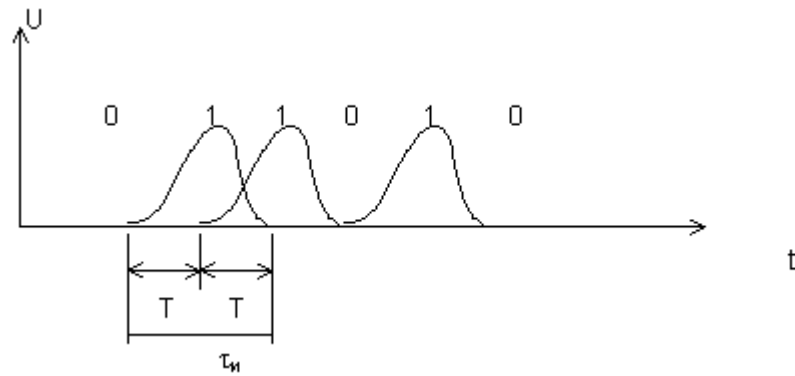


Рисунок 1.6 – Характеристика імпульсів з помилкою

$$\tau_i < 2T \quad (1.5)$$

Тоді в моменти спрацьовування вирішального устрою (моменти стробування) міжсимвольні перешкоди відсутні.

Щоб вирішити друге завдання, необхідно обмежити спектр перешкоди зверху, тобто коректор повинен мати властивості фільтра нижніх частот. Відомо, що чим менша смуга пропускання фільтра нижніх частот, тим слабший вплив перешкоди на вирішальний пристрій. Щоб зменшити і міжсимвольні перешкоди, і смугу пропускання коректора, частотну характеристику (ЧХ) коректора апроксимують такими функціями, які відповідають критерію:

$$\tau_i \cdot \Delta f_k \rightarrow \min = \text{const}, \quad (1.6)$$

тобто, добуток тривалості імпульсу τ_i на виході коректора на його (коректора) смугу пропускання Δf_k має прагнути деякої мінімальної постійної величини (константи). Критерію (1.6) задовольняє апроксимація частотної характеристики коректора гаусовою кривою, або "піднятим" косинусом. Відповідно на виході коректора формуються імпульси або гаусової, або косинусквадратної форми.

Але смуга пропускання такого коректора вдвічі ширша, ніж коректора типу ідеального ФНЧ. Проте коректор косинусного типу близький до оптимального. Оптимальним коректором називають електричний фільтр, який за мінімально можливої смуги пропускання формує з вхідних імпульсів з тривалою

післядією вихідні імпульси такої форми, що міжсимвольні перешкоди між ними відсутні. Зауважимо, що часто фотоприймальний пристрій та коректор конструктивно поєднують в одному блоці – приймальному оптичному модулі (ПРОМ), смуга пропускання якого визначається смугою пропускання коректора.

Призначення видільника тактової частоти (ВТЧ).

Видільник тактової частоти відновлює тактову частоту лінійного сигналу із послідовності сигналів, сформованих на виході коректора. Якщо в дискретному спектрі лінійного сигналу міститься тактова частота, вона може бути виділена вузькосмуговим фільтром (наприклад, з лінійного сигналу в кодї СМІ). За інших випадків тактова частота виділяється шляхом нелінійної обробки сигналу. Наприклад, лінійний сигнал у форматі NRZ не містить у своєму дискретному спектрі лінійного сигналу. У видільнику тактової частоти цей сигнал диференціюється та випрямляється. Отримана послідовність імпульсів містить тактову частоту.

1.2 Перспективи розвитку волоконно-оптичних систем передачі

Підвищення ефективності волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) багато в чому визначається загальними тенденціями розвитку оптичних технологій. Це пов'язано з постійним збільшенням обсягів інформації, які потрібно передавати за допомогою телекомунікаційних систем. Тому збільшення пропускної спроможності, швидкості передачі інформації по волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) є головними завданнями для підвищення ефективності ВОСП. Вирішення цих завдань можливе за умови подальшого розвитку інформаційних та нанотехнологій. Сучасні телекомунікаційні системи призначені для організації цифрових інформаційних мереж передачі даних, голосу, відеозображень. Найбільш перспективними є волоконно-оптичні системи передачі [1, 6]. Вони складаються з хвилеводів (напрямого середовища для передачі оптичних сигналів від джерела до приймача випромінювання), передавача (джерела світла та оптичного

модулятора), приймача, що перетворює за допомогою фотодетектора оптичні сигнали в електричні. Передача інформації по оптичним хвилеводам має багато переваг над іншими лініями зв'язку, головні з яких є широка смуга пропускання, мале згасання світлового сигналу, низький рівень шумів, несприйнятливність електромагнітних перешкод [3, 4].

Швидкість та пропускна здатність оптичних хвилеводів визначаються можливостями ВОСП, а саме: швидкодією елементної бази електроніки та оптоелектроніки, форматом оптичної модуляції, характеристиками лазерів та фотодетекторів. Отже, для підвищення ефективності ВОСП необхідно розвивати елементну базу за допомогою впровадження нових наноструктурованих матеріалів (для лазерів, фотодетекторів, оптичних модуляторів) та нових форматів оптичної модуляції (кодування, методу модуляції оптичної несущої сигналу). Перший спосіб підвищення ефективності ВОСП залежить від розвитку нанотехнологій, оскільки пов'язаний, насамперед, із зменшенням розмірів елементної бази, другий спосіб – від удосконалення інформаційних технологій.

Під інформаційними технологіями в широкому розумінні маються на увазі сучасні комп'ютерні, мережеві, інтернет-технології, а також різноманітні телекомунікаційні технології обробки та передачі інформації щодо методів стиснення повідомлень, кодування та модуляції. Нанотехнологія – це сукупність методів і засобів, що забезпечують створення структур, що складаються з окремих атомів, молекул і макромолекулярних блоків з типовими розмірами від одиниць до сотень нанометрів, а також матеріалів та функціональних систем на їх основі» [5]. Для цифрових ВОСП пропускна здатність C оптичного волокна (ОВ) можна визначити як добуток ширини смуги частот ΔF «вікна прозорості» BB та кількості біт інформації, що припадає на один елементарний імпульс. При цьому максимальна кількість біт для двійкового кодування дорівнює одиниці. Швидкість передачі ν чисельно дорівнює ширині смуги частот F , необхідної для організації оптичного каналу зв'язку (величині, зворотної тривалості елементарного імпульсу). Звідси, пропускна здатність C оптичного волокна на базі сучасних ВОСП є швидкість передачі одного оптичного каналу ν на число

каналів, тобто $N = \Delta F/F$, організованих у «вікні прозорості» волокна шириною ΔF . Тому збільшення швидкості v призводить до підвищення величини C .

Існують два варіанти збільшення пропускної спроможності та швидкості передачі інформації. Перший - це розширення оптоелектронних можливостей пристроїв для реалізації частотного ресурсу вікна прозорості ОВ. Другий - підвищення числа біт інформації, що припадає на один імпульс. У першому випадку головну роль відіграють геометричні розміри та якість матеріалу елементної бази ВОСП, а також технології виробництва [5, 6]. У другому – досконалість інформаційних технологій (стиснення сигналів, багатопозиційне кодування, формати оптичної модуляції, підвищення відношення потужностей сигналу та шуму в приймачі, зменшення шумів квантування в передавачі тощо).

Зауважимо, що збільшення швидкості v та числа каналів N ВОСП за рахунок нанотехнологій відбувається у вигляді лінійної функції. Підвищення числа біт інформації, що переноситься одиничним імпульсом за рахунок інформаційних технологій, згідно з формулою Шеннона описується логарифмічною функцією [6]. При однакових значеннях аргументів швидкість зростання лінійної залежності більша, ніж логарифмічної функції. Отже, ступінь впливу нанотехнологій на пропускну здатність оптичного волокна з урахуванням ВОСП значно вище, ніж інформаційних технологій. Тому ефективність розвитку нанотехнологій має виняткове значення для вдосконалення телекомунікаційних пристроїв [5, 6]. Слід зазначити, що наведене порівняння не враховує взаємний вплив один на одного інформаційних та нанотехнологій. Так, певними стимулами у розвитку нанотехнологій є потреби в реалізації наукових ідей, що виникають у рамках інформаційних технологій. У той же час, можливості нанотехнологій щодо вдосконалення напівпровідникових лазерів та фотодетекторів дозволяють інформаційним технологіям пропонувати нові формати оптичної модуляції. Крім того, існують інформаційні технології, наприклад, хвильового ущільнення, які спрямовані на раціональне використання ресурсів оптичного волокна (ΔF), що підвищує економічну ефективність вкладень у нанотехнології.

Таким чином, в даний час найбільш перспективним способом підвищення пропускної спроможності та швидкості передачі інформації за допомогою волоконно-оптичного зв'язку є вдосконалення пристроїв електроніки та оптоелектроніки. Нині головним напрямом наукових пошуків у цій галузі є створення нових матеріалів на базі моделі надграток, яка дозволяє отримати напівпровідники із заданими оптоелектронними характеристиками. Це необхідно для покращення якісних параметрів лазерів, фотодетекторів, оптичних модуляторів, які безпосередньо визначають інформаційну, спектральну та енергетичну ефективність ВОСП [7, 8, 9]. У вирішенні цього завдання основним фактором є результати досліджень у галузі потенційних можливостей існуючих оптоелектронних пристроїв та шляхів підвищення їх ресурсів за допомогою нових матеріалів, які не можна створити без удосконалення нанотехнологій.

1.3 Значення нанотехнологій у збільшенні швидкості передачі інформації

Вирішальна роль нанотехнологій у підвищенні швидкості передачі та пропускної спроможності ВОСП пояснюється тим, що вони дозволяють збільшити швидкодію оптоелектронних приладів. Це відбувається за рахунок зменшення розмірів елементної бази та покращення якісних характеристик технологій виготовлення. У багатьох джерелах вказується, що існують два принципи формування наноструктур: «зверху-вниз», рисунок 1.7, та «знизу-вгору», рисунок 1.8.



Рисунок 1.7 – Формування наноструктур «зверху-вниз»

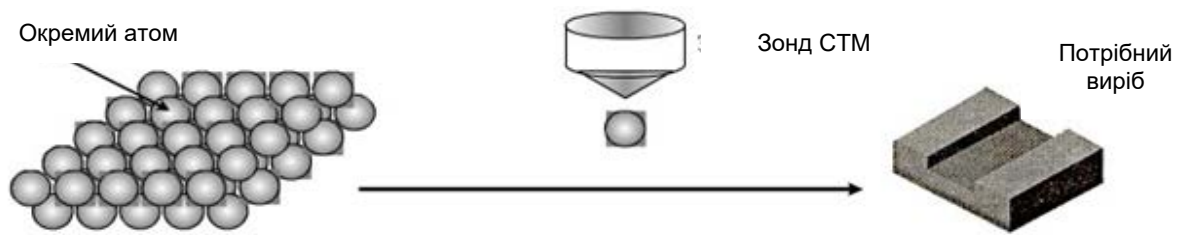


Рисунок 1.8 – Формування наноструктур «знизу-вгору»

У першому випадку передбачається створення структур з мікророзмірами або наноструктур з необхідними розмірами та формою шляхом вибіркового видалення матеріалу, заздалегідь нанесеного на підкладку (різні літографічні методи). У другому випадку формування таких наноструктур здійснюється шляхом селективного осадження атомів та молекул на задані ділянки поверхні підкладки (різні методи епітаксії). Тут потрібно відзначити третій можливий спосіб формування наноструктур методом нейтронного трансмутаційного легування (НТЛ), що дозволяє моделювати необхідну конфігурацію просторового обмеження усередині матеріалу із власних ізотопів вихідної речовини [4]. Різні методи епітаксії (молекулярно-пучкової, газової на основі металоорганічних сполук) можуть забезпечити високу точність виготовлення геометричних розмірів наноструктур, але витратні та малопродуктивні [3, 4]. Більш перспективні з погляду масового виробництва є літографічні методи, наприклад, на основі надтвердого ультрафіолетового випромінювання. У цих методах основним фактором, що обмежує точність виготовлення (роздільна здатність), є дифракційні ефекти. При цьому мінімальний розмір наноструктури, що виготовляється, визначається довжиною хвилі використовуваного випромінювання. Так, останні досягнення в галузі літографії дозволяють досягти величини роздільної здатності близько 10 нм [90]. Отже, для виготовлення структур менше 10 нм будуть потрібні інші рішення. Так, використовуючи аналогічні схеми опромінення, але інші джерела опромінення з довжиною хвилі менше 10 нм можна створювати наноструктури менших розмірів. Такими

джерелами є теплові нейтрони, що широко застосовуються для виготовлення мікроелектроніки методом НТЛ. Основними перевагами цього методу є:

1) точність легування, контрольована часом опромінення потоком нейтронів;

2) висока однорідність розподілу одержуваних ізотопів в опроміненій речовині, що досягається за рахунок рівномірності нейтронного потоку;

3) висока економічна ефективність (у США та Європі цим методом одержують сотні тонн легованого кремнію на рік на базі дослідних ядерних реакторів [2, 3]).

В основі методу НТЛ лежить реакція поглинання нейтронів ядрами речовини і перехід одного ізотопу до більш важкого ізотопу з можливим подальшим перетворенням на інший хімічний елемент (наприклад, нестабільний ізотоп кремнію Si^{31} розпадається на фосфор та γ – випромінювання). Таким чином, на основі нейтронної технології можна отримувати різні ізотопічні шари певної конфігурації, забезпечуючи просторове обмеження за рахунок різниці заборонених зон стабільних ізотопів вихідного хімічного елемента. Такий метод застосовується при створенні багатошарових структур і *p - i - n* надграт, наприклад, з ізотопів германію (Ge^{70} , Ge^{72} , Ge^{74}). Він отримав назву ізотопної інженерії. Переваги цього методу пояснюються тим, що у ньому розділені процеси зростання верств та його легування. При цьому шари вирощуються без домішок і мають досконалу структуру, оскільки ізотопи германію є ідентичними у хімічному відношенні. Це дозволяє уникнути розмиття кордонів «гетеропереходу» та досягти зменшення кількості дефектів з допомогою відсутності хімічних домішок.

Використання цього методу для створення наноструктур з різною конфігурацією та розмірами шляхом штучної зміни ізотопічного складу, дозволяє назвати його методом ізотопічної наноінженерії. Головна перевага ізотопів – можливість отримати надграти без механічних напруг у «гетеропереходах» та енергетичну структуру нового матеріалу з мінімальними флуктуаціями дозволених та заборонених зон, від яких залежать основні

характеристики лазерів, фотодетекторів, оптичних модуляторів. Для низькорозмірних надграт особливе значення має роздільна здатність нанотехнології. З цього погляду найбільші перспективи має метод НТЛ [6, 7].

Стосовно кремнію, то можливості такої наноінженерії обмежені через малу різницю в ширині заборонених зон власних ізотопів (десяті частки meV). Однак існують матеріали, наприклад, LiH та LiD , у яких ця різниця значна (десяті частки eV).

1.4 Фізичні та технологічні обмеження підвищення швидкості передавання інформації

Відомо, що гранична робоча частота електронних та оптоелектронних пристроїв залежить від розмірів окремих елементів [7]. Вона визначається часом прольоту електрона, отже, його швидкістю та довжиною затвора транзистора. Впроваджені унікальні технології дозволяють створювати тонкий оксидний шар затвора товщиною 1,2 нм та досягати робочої частоти транзистора 1ТГц. Проте зменшення розмірів електронних приладів не може відбуватися нескінченно. Тому подальше підвищення швидкодії елементної бази має сповільнитись. Це пояснюється існуючими межами, зумовленими фундаментальними законами природи. Перша межа – релятивістська, яка говорить про те, що швидкість поширення сигналу не може бути вищою за швидкість світла. Тому з урахуванням мінімальної довжини затвора транзистора можна підрахувати мінімальний час прольоту електрона (соті частки фемтосекунди) та максимальну робочу частоту. Друга межа пов'язана з принципом невизначеності Гейзенберга, згідно з яким у транзисторі зі зростанням частоти легко досягається квантова межа (добуток часу та енергії процесу обмежений постійною Планка) [10]. Існують також і технологічні обмеження, пов'язані з розкидом параметрів, який неможливо контролювати при пропорційному зменшенні розмірів, а також енергоспоживанням та тепловиділенням [10].

Тому для подальшого підвищення швидкодії потрібні нові архітектури, принципи роботи пристроїв, а також нові матеріали та технології виробництва. Так, великі надії вчені пов'язують із графеном. Цей матеріал виявився стабільним, дуже гнучким, міцним та електропровідним. З його допомогою можна створити суперкомп'ютер, де розміри обчислювальних комірок буде зменшено в мільйони разів. Тому знову на перший план виходить розвиток технології виробництва елементної бази, що багато в чому визначається новими ідеями та обсягом вкладених матеріальних засобів. Незважаючи на визначні успіхи в галузі нанотехнологій, існуючі зараз обмеження щодо роздільної здатності (близько 10нм) не дозволяють поки що перейти на якісно новий рівень роботи обчислювальної техніки.

Одним із шляхів переходу на новий рівень є подальший розвиток пристроїв обробки та передачі інформації за допомогою молекулярної електроніки. Як елементну базу передбачається використовувати окремі молекули органічних сполук. Для кодування різних станів елементів можна вибирати різні зміни молекул. Зміна станів може бути швидкою і не вимагати значних витрат енергії, легко керуватися зовнішніми сигналами та реєструватися за допомогою зондових методів. Останні досягнення в області скануючої атомно-силової мікроскопії дозволяють маніпулювати окремими молекулами. Це призведе до ще більшої мініатюризації електронних пристроїв, оскільки характерні розміри елементів молекул значно менші, ніж розміри елементів існуючих електронних схем. Однак поки що не вирішено проблему з'єднання «обчислювальних молекул» з іншими системами. Різновидом молекулярної електроніки є ізотоптроніка [4], що вивчає можливості застосування фізики ізотопів у багатьох галузях науки та техніки від обчислювальних та телекомунікаційних систем до медицини. Основна увага приділяється використанню ізотопічних властивостей хімічних елементів для отримання нових ефектів, створення нових пристроїв та технологій їх виготовлення. При цьому використовуються різні методи дослідження, зокрема моделювання ізотопічного складу речовини лише на рівні атомарних шарів.

Нова елементна база, побудована за допомогою молекулярної електроніки та ізотоптроники, вимагатиме нових фізичних принципів передачі та обробки інформації. Поступово на зміну класичному уявленню про пристрої обробки та передачі інформації придуть квантові системи та квантова теорія інформації.

1.5 Висновки до розділу

Для виконання високих вимог щодо доставки інформаційних даних лінійний тракт може бути резервованим повністю або частково. Робочі та резервні тракти проектуються за заданими показниками якості, основним з яких є коефіцієнт помилок передачі двійкового сигналу на швидкості шістдесят чотири кілобіти на секунду на загальній довжині двадцять сім тисяч п'ятсот кілометрів.

Величини коефіцієнтів помилок на магістральній, внутрішньозоновій, місцевій ділянках покладені в основу вимог до коефіцієнта помилок регенератора, який визначається співвідношенням сигнал/шум на його вході. Вирішальний пристрій приймає рішення про прийом імпульсу чи паузи. Для цього за допомогою видільника тактової частоти і формуючого пристрою створюється послідовність коротких імпульсів, що стробують, середини тактових інтервалів (одиниць і нулів).

Помітне підвищення співвідношення сигнал/шум може дати фільтр-коректор, якщо він узгоджений з імпульсним сигналом по смузі частот і оптимізований міжсимвольною перешкодою. Оптимізація по міжсимвольній перешкоді дозволяє домогтися стійкого виділення тактової частоти і формування стробувальних імпульсів з мінімальними фазовими тремтіннями. Найкращі результати дає фільтр-коректор косинусного типу.

Головним напрямом у підвищенні пропускної спроможності є створення елементної бази за допомогою нових матеріалів, що використовують модель надградки. Найбільш перспективним матеріалом для створення надграток є ізотопи вихідного хімічного елемента. Для отримання низькорозмірних

ізотопічних надграток необхідно удосконалювати технології виготовлення, наприклад, використовуючи нейтронний пучок, що має найменші дисперсійні спотворення, в порівнянні з іншими джерелами опромінення. Подальше підвищення пропускної спроможності можливе лише у разі переходу на квантові принципи передачі та обробки інформації.

2 ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОСП ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM

2.1 Енергетичний та часовий баланси ВОСП

Довжини регенераційних та підсилювальних ділянок залежать від часового та енергетичного балансів волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). Довжину підсилювальної ділянки L_{en} визначає енергетичний баланс ВОЛЗ, довжину регенераційної ділянки $L_{чс}$ – часовий баланс. Обидва вони залежать від потенційних можливостей ОБ (інформаційного обсягу V), швидкості передачі інформації ν , оптичних технологій використання ресурсів ОБ (TDM, WDM) [3, 4]. Проаналізуємо чинники, що впливають на часовий та енергетичний баланси ВОЛЗ. Для цього скористаємося формулою Шеннона і визначимо максимальний обсяг інформації V , який можна передати безперервним каналом за допомогою оптичного волокна в смузі частот F (Гц) протягом часу T (с):

$$V = T \cdot F \cdot D, \text{ біт} \quad (2.1)$$

де $D = \log_2(P_c/P_{ш})$ – динамічний діапазон оптичного каналу;

P_c - потужність оптичного сигналу на вході приймача;

$P_{ш}$ - потужність шуму на вході приймача, що складається з оптичного шуму підсилювача та теплового шуму фотодетектора.

Динамічний діапазон D визначається кількістю біт інформації, що припадає на одну вибірку сигналу. Після квантування безперервного сигналу на 256 рівнів та двопозиційного кодування отримаємо восьмирозрядну структуру, в якій кожен оптичний імпульс несе таку кількість біт інформації:

$$D = (\log_2 \rho) / n, \quad (2.2)$$

де n – число розрядів у кодовому слові.

Формулу Шеннона можна отримати, якщо поділити ліву та праву частини виразу (2.1) на час T . Отримаємо пропускну здатність C оптичного волокна ВОСП. Це – максимальна кількість інформації, передана за час T . Видно, що пропускну спроможність ВОСП прямо пропорційно залежить від параметрів F та D .

Значення параметрів T , F , D для оптичних цифрових каналів відповідають періоду тактової синхронізації, ширині вікна прозорості оптичної несущої, відношенню потужностей корисного сигналу та шуму на вході приймача. Для звукових повідомлень розрахунковий період T тактової синхронізації 125мкс. Величина F визначається амплітудно-частотною (хвильовою) характеристикою оптичного підсилювача (ОП) в множині значень оптичних несущих. Для сучасних ОП значення F не перевищує 1ТГц [1], хоча потенційні можливості ОВ значно вищі (для вікна прозорості (1360 ... 1430нм) ширина смуги частот оптичного волокна складає 15 ТГц). На значення динамічного діапазону D впливає вихідна потужність лазера та чутливість фотодетектора, тривалість елементарного імпульсу та максимально допустима пікова потужність сигналу на вході оптичного волокна. При передачі синхронного транспортного модуля STM-16 мінімально допустима величина D становить 20дБ. Зазначимо, що граничні значення ширини смуги F та динамічного діапазону D за рахунок удосконалення параметрів приймачів та оптичного волокна можна збільшити. Інформаційне стиснення переданих повідомлень можна сприймати як розширення часового параметра T .

2.2 Порівняння інформаційної ємності ВОСП на основі технологій TDM та WDM

На основі формули Шеннона для ОВ з урахуванням критерію якості порівняємо технології TDM та WDM та визначимо, яка з них найкращим чином може збільшити:

- 1) число каналів та інформаційну ємність ВОЛЗ;

- 2) довжину підсилювальної ділянки (ПД);
- 3) пропускну здатність оптичного волокна.

Формула Шеннона дозволяє оцінити найбільш перспективні шляхи вдосконалення ВОСП.

З цією метою перетворимо вираз для інформаційної ємності V так, щоб він залежав від показника якості зв'язку ρ , довжини регенераційної ділянки (РД складається з декількох підсилювальних ділянок ПД), кількості каналів K , яка в загальному випадку дорівнює добутку числа часових (тайм-слотів) N та числа частотних (хвильових) каналів K_f .

Величина N розраховується як відношення періоду тактової синхронізації T_{mc} до тривалості часового каналу $\tau_k = \tau_e \cdot n$, де τ_e - тривалість елементарного імпульсу. Число частотних каналів K_f обчислюється як відношення ширини «вікна прозорості» F_{en} до ширини одного частотного каналу $\Delta f_k = b/\tau_e$, де коефіцієнт b визначає величину частотного рознесення між оптичними каналами і залежить від апаратури ВОСП, що використовується.

Динамічний діапазон, виражений у дБ:

$$\log_2 \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right) = \lg 2 (\lg P_c - \lg P_{ш}) = 0,301(a_c - a_{ш}) = 0,301a_з, \quad (2.3)$$

де a_c , $a_{ш}$, $a_з$ - відповідно значення рівнів оптичного сигналу, шуму фотоприймача та величини захищеності передачі.

Використаємо очевидне співвідношення:

$$a_{вх} - \alpha \cdot L = a_c, \quad (2.4)$$

де $a_{вх}$, a_c - відповідно вхідний та вихідний рівні ВОСП; α - кілометричний коефіцієнт загасання ОВ, що залежить від типу ОВ та величини оптичної несущої; L - довжина підсилювальної ділянки.

Вхідні рівні всіх частотних каналів технології WDM не повинні в сумі перевищувати максимально допустимий рівень $A_{\text{вх}}$ для оптичного волокна, що відділяє лінійний та нелінійний режими роботи. Це значення знаходять з формули

$$A_{\text{вх}} = a_{\text{вх}} + 10 \lg K_f, \quad (2.5)$$

яке можна отримати із співвідношення $(P_{\text{об}}/P_1) = K_f$, що означає відношення сумарної пікової потужності $P_{\text{об}}$ на вході ОВ, розділеної між частотними каналами з потужністю P_1 . Для технології TDM $K_f = 1$, тому значення $A_{\text{вх}}$ у формулі (2.5) може дорівнювати $a_{\text{вх}}$.

Таким чином, інформаційну ємність оптичної лінії у загальному вигляді можна записати:

$$V^1 = \frac{V}{0,301} = (\sum \Delta f_k \sum \tau_k) (a_{\text{вх}} + 10 \lg K_f), \quad (2.6)$$

де підсумовування відбувається по всіх каналах K_f і N .

Тепер потрібно врахувати особливості поширення світла в ОВ. Це не тільки згасання енергії сигналу, а й збільшення тривалості імпульсу через хроматичну дисперсію, яку оцінюють за допомогою коефіцієнта W – питомої смуги пропускання. Величина $W = L/\tau_e$, [МГц·км] залежить від типу ОВ, розташування «вікна прозорості» (значення оптичної несущої), ширини спектра випромінювання лазерного діода $\Delta\lambda$ [2, 3].

Звідси вираз Шеннона для оптичного волокна з однаковими для всіх каналів значеннями τ_k і Δf_k матиме вигляд:

$$V_{\text{об}}^1 = K_f \left(\frac{b}{\tau_e}\right) \cdot N \cdot \left(\frac{L}{W}\right) \cdot n \cdot (a_{\text{вх}} + 10 \lg K_f) = K_f \cdot N \cdot b \cdot n \cdot (a_{\text{вх}} + 10 \lg K_f). \quad (2.7)$$

З цієї формули видно, що загальна кількість каналів за технологією WDM становить $K = K_f \cdot N$. Вона обмежена шириною смуги F_{ov} і часом T_{mc} .

Для технології TDM ($K_f = 1$) весь частотний ресурс F_{ov} може витратитися на організацію часових каналів N , отже, на швидкість передачі інформації v , яка для двійкового кодування за величиною не відрізняється від швидкості передачі сигналів v .

Для технології WDM збільшення кількості частотних каналів K_f зменшує число часових N і, навпаки, зменшення тривалості елементарного імпульсу τ_e та відповідне розширення смуги до Δf_k знижує значення K_f . Це свідчить про те, що загальна кількість каналів ВОЛЗ, яка витікає із співвідношення Хартлі $K = K_f \cdot N$, однакова для технологій TDM та WDM.

Між значеннями K , K_f , N встановлена лінійна залежність, тобто не існує оптимальної тривалості елементарного імпульсу τ_e , яка б дозволила забезпечити максимальне значення пропускної спроможності ОВ.

В результаті зазначаємо, що розглянуті технології можуть створити однакову кількість каналів у ВОЛЗ. Ці канали можна організувати розділивши загальну смугу між окремими каналами (хвильове ущільнення ОВ). Оптичні сигнали передаються у цьому випадку одночасно у кількох частотних каналах (WDM). При часовому ущільненні (технологія TDM) передача сигналів здійснюється у строго відведених часових проміжках, які займають всю смугу «вікна прозорості» ОВ.

Отже, обидві технології за наявності однакового енергетичного запасу P_{ov} мають однакову інформаційну ємність.

2.3 Порівняння енергетичного балансу ВОСП на основі технологій TDM та WDM

Проаналізуємо можливості технологій TDM та WDM з точки зору енергетичного балансу на прикладі розрахунку довжини підсилювальної ділянки

ВОСП. Для технології TDM величина A_{ex} повністю витрачається на енергію оптичного сигналу. Тому довжина підсилювальної ділянки L залежить від енергії оптичного імпульсу (добутку квадрата амплітуди на тривалість імпульсу), кілометричного згасання α та рівня сигналу $a_c = a_{ш} + a_3$. Відповідно до енергетичному балансу ВОЛЗ можна визначити максимально можливу довжину підсилювальної ділянки:

$$L_{пд} = \frac{A_{вх} - a_c}{\alpha}. \quad (2.8)$$

Однак у цей вираз входять рівні сигналів, які не враховують зменшення дальності зв'язку зі збільшенням швидкості передачі сигналів. Два імпульси однакової амплітуди, але різної тривалості матимуть різні енергії, рисунок 2.1.

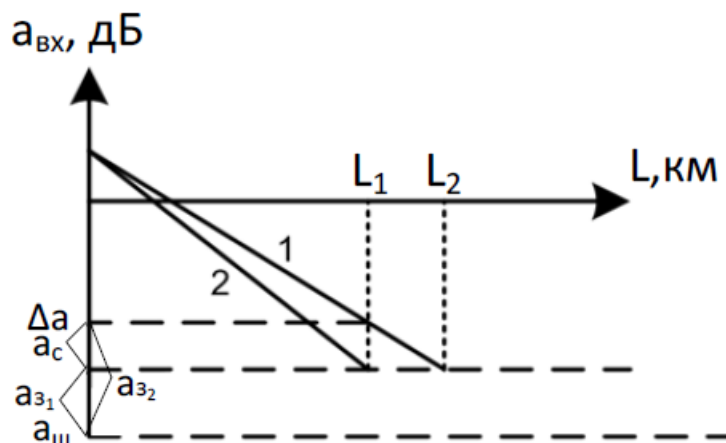


Рисунок 2.1 - Діаграма рівнів ВОЛЗ

Для простоти міркувань як приклад на рисунку 2.1 вибрано імпульси прямокутної форми. У лінії зв'язку, як відомо, згасає енергія сигналу, величина якої і визначає довжину ПД. Чим менше енергія сигналу, тим швидше він загасне в лінії зв'язку, тим коротша довжина ПД. При тому ж самому значенні вхідного рівня a_{ex} , але різній тривалості елементарного імпульсу τ_e , швидкість згасання (втрати енергії імпульсу) в оптичній лінії буде пропорційна величині τ_e . Системи ВОСП з такими параметрами та однаковою величиною захищеності забезпечать дальність зв'язку, рівну відповідно L_1 і $L_2 < L_1$. Щоб ці відстані були рівними,

необхідно підвищити вхідний рівень другої системи. У цьому випадку аналізуються потенційні можливості технологій TDM та WDM. Тому як вхідний рівень приймається максимально можливе значення для вибраного оптичного волокна $A_{\text{вх}}$. Такі ж графіки виходять, якщо використовувати різні оптичні лінії зв'язку з різними коефіцієнтами кілометрового згасання ОВ $\alpha_1 < \alpha_2$. Тому вираз (2.8) справедливий і для енергетичних розрахунків ВОЛЗ, організованих за допомогою різних оптичних кабелів. Для того, щоб врахувати швидкості передачі у формулі (2.8) потрібні додаткові уточнення:

- 1) взяти за основу розрахунків як еталонну систему, наприклад, графік 1;
- 2) знайти додаткову величину Δa ;
- 3) отримати нове значення захищеності $a_{z_2} = a_{z_1} + \Delta a$ для системи з іншою швидкістю передачі сигналів;
- 4) згідно з розрахованою величиною a_{z_2} визначити дальність ПД для нової системи L_2 .

Таким чином, зменшення енергії елементарного імпульсу за рахунок скорочення його тривалості пропонується врахувати у формулі (2.8) збільшенням значення захищеності a_z для збереження якості зв'язку. На підставі рис. 2.1 можна зробити висновок, що величина Δa залежить від відношення енергій початкових імпульсів і за умови однакової їх амплітуди (вхідному рівні $A_{\text{вх}}$) визначається відношенням тривалостей елементарних імпульсів.

Тому введемо в чисельник формули (2.8) додатковий доданок, $\Delta a = 10 \lg B / \tau_e$. Це доповнення враховує необхідні зміни величини захищеності еталонної системи в залежності від швидкості передачі інформації ВОСП, для якої розраховується $L_{\text{ен}}$. Тоді величина максимальної дальності за енергетичним балансом $L_{\text{ен}}$ для технології TDM визначиться як:

$$L_{\text{ен}} = [A_{\text{вх}} - (a_c + 10 \lg B / \tau_e)], \quad (2.9)$$

де B - величина, що дорівнює тривалості імпульсу еталонної ВОСП;

$a_c = (a_{\text{ш}} + a_{z_1})$ - значення рівня вхідного сигналу еталонної ВОСП;

τ_e - тривалість елементарного імпульсу ВОСП, причому $\tau_e < B$.

Отже, можливості ОБ по дальності для технології TDM обмежені величиною $A_{\text{вх}}$, швидкістю передачі інформації та обраним значенням якості a_3 .

Для технології WDM довжина ПД порівняно з TDM при однакових каналній швидкості та захищеності буде значно меншою згідно з формулами (2.9) та (2.5).

Отже довжина підсилювальної ділянки по енергетичному балансу $L_{\text{ен}}$ для технології WDM з урахуванням виразів (2.5) та (2.9) дорівнює:

$$L_{\text{ен}} = [A_{\text{вх}} - 10\lg K_f - (a_c + 10\lg B/\tau_e)]/\alpha. \quad (2.10)$$

З цього виразу видно, що при зменшенні τ_e піднімається рівень захищеності за рахунок доданку $10\lg B/\tau_e$, що зменшує дальність. Скорочення числа хвильових каналів K_f , що відбувається при цьому, і підвищення $a_{\text{вх}}$ кожного каналу збільшує дальність зв'язку за рахунок зменшення величини $10\lg K_f$ у формулі (2.10). Якщо в результаті вийде, що величина K_f зрівняється з величиною B/τ_e , то значення $10\lg K_f$ та $10\lg B/\tau_e$ врівноважують один одного, а дальність зв'язку не зміниться. Цей висновок справедливий за умови повного використання технологією WDM ресурсів ОБ за смугою частот $F_{\text{ов}}$ та вхідному рівню $A_{\text{вх}}$.

2.4 Порівняльний аналіз часових балансів ВОСП на основі технологій TDM та WDM

Для порівняльного аналізу можливостей ВОСП щодо дальності зв'язку на прикладі технологій TDM і WDM розглянемо розрахунок довжини регенераційної ділянки технології TDM. Довжина регенераційної ділянки ВОСП вибирається з урахуванням величини хроматичної дисперсії ВОЛЗ. Так, вплив хроматичної дисперсії допускає таке значення довжини регенераційної ділянки технології TDM, яка розраховується як відношення коефіцієнта W на кінцеву швидкість v :

$$L_{\text{чс}} = T_{\text{тс}} \cdot \frac{W}{N \cdot n \cdot m^l}, \quad (2.11)$$

де коефіцієнт m^l враховує можливе підвищення швидкості передачі за рахунок лінійного коду. У цьому випадку дальність зв'язку обмежується швидкістю передачі v (кількістю часових каналів N), параметром оптичного волокна W , шириною смуги лазерного випромінювання $\Delta\lambda$. Залежно від швидкості передачі сигналів, лінійного коду та параметрів ОВ (α , W) відстань $L_{\text{чс}}$ може бути більшою або меншою відстані $L_{\text{ен}}$.

Зазвичай довжина підсилювальної ділянки менша за довжину регенераційної ділянки. Якщо порівняти значення $L_{\text{чс}}$ і $L_{\text{ен}}$ за формулами (2.9) та (2.11), то отримаємо вираз, за допомогою якого можна підбирати параметри ВОСП (α , W , v , m^l , $\Delta\lambda$, K), що забезпечують максимально можливу дальність зв'язку волоконно-оптичних ліній при використанні всіх доступних ресурсів (за шириною смуги $F_{\text{ов}}$ та входного рівня $A_{\text{вх}}$) оптичного волокна.

Для технології WDM зменшення тривалості τ_e тягне за собою розширення спектрів сигналу та зниження числа частотних каналів K_f , а також перерозподіл допустимого входного рівня $A_{\text{вх}}$ між хвильовими каналами у бік збільшення входних рівнів $a_{\text{вх}}$ згідно з формулою (2.5). При цьому енергія оптичного імпульсу може залишатися незмінною за рахунок одночасного зменшення τ_e та можливого збільшення амплітуди імпульсу.

Для аналізу часового балансу ВОЛЗ необхідно проаналізувати фактори, що впливають на довжину регенераційної ділянки технології WDM. Якщо врахувати вплив хроматичної дисперсії на розширення тривалості імпульсу, то можна розрахувати дальність зв'язку для технології WDM (довжину регенераційної ділянки) за часовим балансом. Так, при розподілі смуги $F_{\text{ов}}$ на окремі частотні канали можна записати:

$$K_f = F_{\text{ов}} \cdot \frac{\tau_e}{b} \quad \text{або} \quad K_f = F_{\text{ов}} \cdot \frac{L_{\text{чс}}}{b \cdot W}. \quad (2.12)$$

Звідси довжина регенераційної ділянки дорівнює:

$$L_{\text{чс}} = K_f \cdot b \cdot W / F_{\text{ов}}. \quad (2.13)$$

Прирівнявши вирази дальності зв'язку по енергетичному (2.10) та часовому (2.13) балансам для технології WDM, за аналогією з TDM можна отримати параметри ВОСП, що забезпечують максимально можливу дальність зв'язку за умови використання ресурсів ОВ по ширині смуги частот і вхідному рівню.

Порівняння дальності зв'язку ВОСП, організованих за допомогою технологій WDM та TDM, дозволяє отримати цікаву закономірність. Так, за однієї і тієї ж захищеності передачі a і швидкості передачі сигналів величина $L_{\text{ен}}$ для технології WDM (2.10) виявиться меншою, ніж для TDM (2.9) у K_L разів:

$$K_L = \frac{(A_{\text{вх}} - a_c)}{(A_{\text{вх}} - a_c - 10 \lg K_f)} = \frac{\lg\left(\frac{P_{\text{ов}}}{\rho}\right)}{\lg\left(\frac{P_{\text{ов}}}{\rho \cdot K_f}\right)} = \log\left(\frac{P_{\text{ов}}}{\rho \cdot K_f}\right) \left(\frac{P_{\text{ов}}}{\rho}\right). \quad (2.14)$$

Отже, збільшення кількості частотних каналів у системі передачі з WDM зменшує $L_{\text{ен}}$ не пропорційно числу K_f , а згідно логарифмічної залежності (2.14), що знижує довжину ПД з підвищенням K_f повільніше, ніж у разі лінійної залежності.

Незважаючи на те, що технологія WDM має певні обмеження щодо дальності зв'язку у порівнянні з TDM, технологія хвильового ущільнення є найперспективнішою для повністю оптичних мереж зв'язку.

Порівняємо тепер технології TDM та WDM за пропускною здатністю.

2.5 Порівняльний аналіз пропускної здатності ВОЛЗ на основі технологій TDM та WDM

Для порівняння технологій часового та хвильового ущільнення з точки зору пропускної здатності розглянемо докладніше формулу (2.1). Так, розділивши формулу (2.1) для розрахунку інформаційної ємності ОВ на час тактової синхронізації, отримаємо в загальному вигляді вираз для пропускної здатності C оптичного волокна.

$$\text{Тобто, } C = F_{\text{ОВ}} \log_2(\rho/n) \text{ або } C = \left(K_f \cdot b / \tau_e \right) \cdot \log_2 \rho / n.$$

Існуюча тенденція до скорочення частотного рознесення між оптичними несущими у технології WDM, при якій вже ширина оптичного каналу близька до ширини спектра оптичного сигналу ($1/\tau_e$) [2], дозволяє записати:

$$C = K_{f/} \cdot v \cdot \log_2 \rho / n. \quad (2.15)$$

Незважаючи на те, що для TDM $K_f=1$, технологія часового ущільнення не відстає за пропускною спроможністю, оскільки може компенсувати відсутність частотного ущільнення підвищенням швидкості передачі сигналів v .

Порівняльний аналіз оптичних технологій TDM та WDM показав, що кожна з цих технологій здатна за наявності елементної бази повністю освоїти ресурси ОВ. Однак стосовно повністю оптичних мереж більш перспективною є технологія хвильового ущільнення ВОЛЗ. Ця технологія дозволить значно підвищити гнучкість оптичних мереж за рахунок різних варіантів логічних топологій, реалізованих в одному оптичному волокні з використанням різних оптичних несущих та алгоритмів хвильової маршрутизації [4, 5]. Цей висновок справедливий за умови повного використання ресурсів ОВ. Однак, для реалізації технології TDM поки що не існує відповідної швидкодії елементної бази. Високу пропускну здатність ВОСП можна досягти з нижчими каналними швидкостями за допомогою відповідної кількості хвильових каналів. Існуюча елементна база дозволяє досягти максимальної каналної швидкості передачі в 40 Гбіт/с. Причому найвужчим місцем у збільшенні швидкості передачі інформації в даний час оптичні модулятори. Для подальшого збільшення пропускної

спроможності та швидкості передачі інформації для обох технологій необхідне технічне освоєння частотних ресурсів ОВ.

Тому головним напрямом досліджень у галузі ВОСП є розширення частотних меж оптичного волокна F_{ov} , а також підвищення допустимих значень P_{ov} (або зменшення інтенсивності випромінювання на одиницю площі перерізу серцевини ОВ, наприклад, за рахунок збільшення цього перерізу). Цього можна досягти шляхом удосконалення конструкцій та технологій виготовлення ОВ.

Крім оптичних хвилеводів, слід покращувати амплітудно-хвильові характеристики оптичних підсилювачів та знижувати шуми, що вносяться ОП. Важливу роль відіграють технології виробництва оптичних пристроїв (чистота вихідних матеріалів, точність виготовлення геометричних розмірів оптоелектронних пристроїв). Слід відзначити, що для реалізації потенційних можливостей оптичного волокна на базі хвильового та часового ущільнення необхідно, перш за все, удосконалювати оптичні формати модуляції та підвищувати максимальну швидкість оптичних модуляторів.

Технології WDM і TDM передбачають об'єднання декількох вхідних “низькошвидкісних” потоків в один високошвидкісний. Різниця у тому, що в ВОСП TDM – технології застосовується одна довжина хвилі (λ), а в ВОСП WDM-технології – декілька центральних довжин хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$).

Через це чотирикратне збільшення кількості трактів (TDM – технологія ієрархії (PDH)) дає збільшення пропускної здатності телекомунікаційної транспортної системи (ТТС) з кожною сходинкою у 4 рази, а при WDM-технології – шляхом додавання нових оптичних несущих $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \dots, \lambda_{N+i}$ або шляхом зменшення рознесення між центральними довжинами хвиль.

При високій швидкості передач ТТС починають проявляти себе такі характеристики ОВ, як модова та хроматична дисперсія. При цьому більшою мірою зростає складність кінцевого та проміжного обладнанн ТТС та в цілому значно підвищується загальна вартість проекту.

Зазвичай нарощування кількості трактів за WDM-технологією відбувається шляхом використання k потоків TDM-технології, які модулюються

окремо в оптичні сигнали на різних довжинах хвиль оптичних трактів (ОТр). ОТр об'єднуються в єдиний груповий сумарний сигнал виду $\lambda_{1+2+3...N}$ в оптичному мультиплексорі. Цей сигнал передається по лінійному тракту ТТС. Таким чином пропускна здатність ВОСП збільшується в k разів.

Використання WDM-технології одночасно дає зменшення тих обмежень, зокрема, по дисперсії, які були характерні для технології TDM. Отже, WDM-технологія може використовуватися паралельно з технологією TDM для підвищення її ефективності, але при цьому залишається практично без змін більша частина мережевого та кінцевого обладнання.

Порівняльні характеристики двох методів мультиплексування наведені в таблицях 2.1 та 2.2. З наведених даних таблиць видно, що WDM-технологія має переваги в порівнянні з часовим методом мультиплексування - TDM-технологією.

Наприклад, виділення та введення складних цифрових потоків в проміжних пунктах при часовому мультиплексуванні ієрархії PDH вимагає наявності великого обсягу обладнання, тоді як при WDM-технології для виділення трактів достатньо декількох пасивних елементів.

WDM-технологія та TDM-технологія застосовуються для збільшення інформаційної пропускної здатності ВОСП. Вони, власне, доповнюють одна одну, тому при порівнянні оцінюють гнучкість структури ліній зв'язку та швидкість передачі на телекомунікаційних транспортних мережах (ТТМ).

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики

Параметри	TDM – часове мультиплексування	WDM – хвильове мультиплексування
Надійність	Висока	Висока
Пропускна здатність	Висока	Дуже висока
Комутаційні пристрої	Складні	Складні
Завантаженість ОВ	Середня	Висока
Обсяг апаратури	Великий	Середній

Таблиця 2.2 – Економічні характеристики

Параметри	TDM – часове мультиплексування	WDM – хвильове мультиплексування
Вартість кінцевих пунктів	Практично однакові	
Вартість лінійного тракту	Середня	Середня
Вартість тракту	Низька	Низька
Вартість передачі інформації	Низька	Низька

Щодо гнучкості структури ліній передачі, технологія TDM дає можливість передачі по лінії зв'язку трактів різнорідних за типом та швидкістю передачі. Системи ТТС за технологією TDM також дозволяють створювати по ОК тракти і канали, по яких з різними швидкостями передаються різні типи трафіку, шляхом застосування різних способів розподілу тайм-слотів. Можна змінювати тривалість тайм-слотів або якісь з них вилучати. При вилученні тайм-слотів трафік передається у вигляді окремих пакетів, кожен з яких включає адресу джерела і відправника.

У той же час зазначимо, що технологія TDM працює найкраще, коли на всіх логічних трактах передається один тип трафіку, а всі тайм-слоти мають однакову тривалість і постійно закріплені за окремими трактами. Цей варіант технології TDM досить простий в реалізації і управлінні, і його експлуатаційні витрати також мінімальні.

У WDM-технології (хвильового мультиплексування) тракти повністю незалежні, трафік передається по ОTr, що створюються за принципом точка-точка. Тобто формується комбінована технологія, наприклад, IP over WDM. Отже - WDM-технологія у порівнянні з TDM-технологією характеризується більшою гнучкістю для структур ліній і мереж зв'язку.

Звернемо увагу на швидкодію обладнання. В технології TDM пропускна здатність збільшується за рахунок збільшення швидкості передачі в лінійному тракті системи передачі. Але тут вона обмежується можливостями електронних компонентів, що використовуються у цьому тракті. Прийом цифрових потоків, зберігання, передача тощо – все це вимагає застосування цифрових інтегральних схем. Їх швидкодія повинна бути сумірною з пропускною здатністю лінії зв'язку.

Обладнання WDM-технології повинно підтримувати лише швидкість передачі по окремому оптичному тракту, яка є значно меншою від повної швидкості інтегрального сигналу. Таким чином, повна пропускна здатність в оптичному каналі не обмежена швидкодією електронних пристроїв. Мова про те, що найшвидший канал, що використовує TDM-технологію, може бути як один з багатьох трактів в ОВ WDM-технології. Наведене порівняння показує, що WDM-технологія має незаперечну перевагу перед іншими технологіями за якими будуються телекомунікаційні транспортні системи.

2.6 Висновки до розділу

Виконано порівняння методів мультиплексування: хвильового WDM і часового TDM (WDM-технологія та TDM-технологія) за критерієм досяжної пропускної здатності ВОСП у лінійних трактах одномодових оптичних волокон.

Технології WDM і TDM передбачають об'єднання декількох вхідних відносно низькошвидкісних потоків в один високошвидкісний потік, але в ВОСП TDM – технології застосовується одна довжина хвилі (λ), а в ВОСП WDM-технології – декілька центральних довжин хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$).

Попередньо з'ясовано, що потенційні можливості ущільнення ОВ за пропускною здатністю однакові для технологій TDM та WDM. Показано, що технічна реалізація потенційних можливостей технологій TDM та WDM залежить від наявності відповідної елементної бази. При однакових швидкостях передачі сигналів та захищеності довжина підсилювальної ділянки для технології WDM менша, ніж для технології TDM. Зменшення відбувається не пропорційно числу хвильових каналів, а відповідно до логарифмічної залежності.

Аналіз показує, що найшвидший канал, що використовує TDM-технологію, може бути використаний як один з багатьох трактів в ОВ WDM-технології. Це означає, що WDM-технологія має незаперечну перевагу перед іншими технологіями за якими будуються телекомунікаційні транспортні

системи. Технологія WDM дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність лінії зв'язку, дає можливість організувати двосторонню передачу даних по одному волокну, причому нарощування пропускнуї здатності може відбуватись на вже існуючому волоконно-оптичному кабелі.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВОСП ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

3.1 Узагальнена структурна схема лінійного тракту ВОСП з WDM

У попередньому розділі було встановлено про незаперечну перевагу технології WDM, тому в подальшому розглядається оптичний лінійний тракт, побудований саме за цією технологією. Узагальнена спрощена структура ВОСП представлена на рисунку 3.1. Передавач забезпечує перетворення первинного електричного сигналу у світловий вихідний сигнал. При цьому швидкість передачі в SDH становить 2,5 - 40 Гбіт/с. Така швидкість потребує тривалості імпульсу оптичного випромінювання у межах 0,2 - 0,05 нс. Отже, повинні використовуватися когерентні джерела випромінювання - лазери.

Передавач містить лазерний діод (ЛД), модулятор (М) і кодек, на який надходить кодова послідовність від цифрової системи передачі (ЦСП).

Модулятор здійснює модуляцію оптичної несущої.

Кодек перетворює код ЦСП в лінійний код оптичної системи передачі.

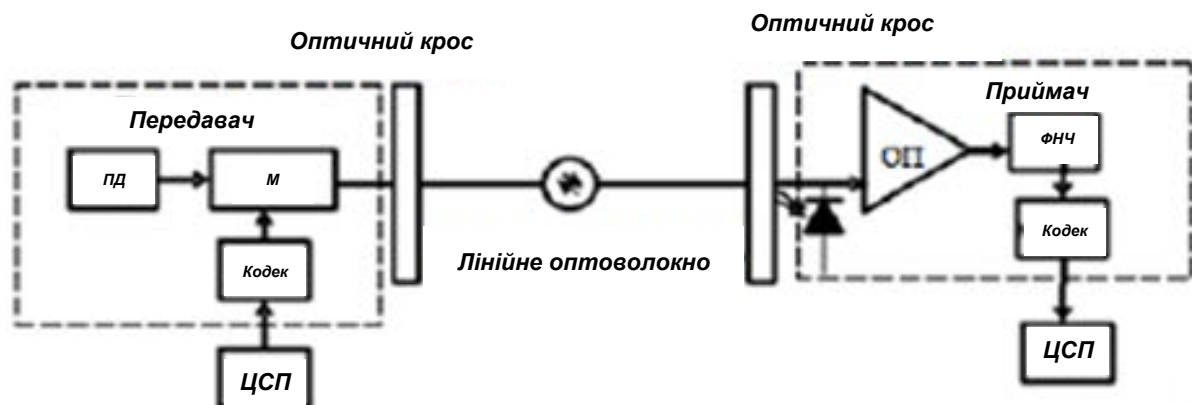


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема ВОСП

Приймач перетворює вхідні оптичні імпульси у вихідні імпульси електричного струму. До його складу входить фотодіод (ФД), фільтр нижніх

частот (ФНЧ), операційний підсилювач (ОП) і кодек. ФД повинен мати дуже малу інерційність. Застосовуються ріп або лавинні фотодіоди.

Для оперативного з'єднання і роз'єднання оптичних волокон станційних і лінійних оптичних кабелів в процесі технічної експлуатації ВОЛП служить оптичний крос, який показаний на схемі, рис. 3.1.

3.2 Вибір параметрів джерела випромінювання та фотоприймача

Джерело випромінювання повинне випромінювати енергію на довжині хвилі λ , яка відповідає мінімуму спектральних втрат ОВ (це одне з вікон прозорості, очевидно). Загальні вимоги: конструкція повинна забезпечувати високу потужність випромінювання і ефективно її введення в ОВ; повинна бути висока надійність і великий термін служби; мінімальні габаритні розміри, маса і потужність споживана тощо.

Особливі вимоги висуваються до динамічних характеристик джерел світла, особливо у випадку високошвидкісних систем. Це можуть бути оптичні випромінювачі, що допускають пряму модуляцію частоти, фази або інтенсивності без істотних змін інших параметрів.

Джерелами випромінювання з прямою модуляцією є напівпровідникові світловипромінюючі діоди (СВД) або лазери. Передавачі на їх основі використовуються у низькошвидкісних системах передачі на короткі відстані. Їх основні недоліки: низька швидкість передачі інформації, широка смуга спектра, мала вихідна потужність.

У ВОСП зі швидкістю до 2,5 Гбіт/с використовуються найпростіші лазери з резонатором Фабрі - Перо і прямою модуляцією. Якщо швидкість $V = 2,5$ Гбіт/с і вище, то доцільно використовувати лазери з розподіленим зворотним зв'язком DFB, у яких забезпечується звуження спектра випромінювання, або VCSEL, для яких характерні вузька смуга випромінювання, значний час напрацювання на відмову, круговий перетин променю. Певне обмеження - доступна потужність випромінювання не перевищує 7 мВт на діод в багатомодовому режимі.

Збільшення вихідної потужності досягають синхронною роботою кількох випромінювачів.

При проектуванні ВОСП на швидкість 10 Гбіт/с і $\lambda = 1550$ нм як джерело випромінювання краще використовувати DFB лазер. Він працює в необхідному оптичному діапазоні, забезпечує потужність 10 мВт (1 дБм). DFB лазер має вузький спектр випромінювання ($\lambda < 0,1$ нм), забезпечує максимальну швидкість передачі 10 Гбіт/с, має високий ступінь придушення бічних мод (35дБ).

В таблиці 3.1 наведені основні характеристики низки лазерних модулів.

Таблиця 3.1 – Порівняння лазерних модулів

Характеристики	Тип лазерного модуля					
	ПОМ-03545	ЛПН-602м	JDSU 54TM-3XYZ	CyOptics D2500	CyOptics E3500	DFB (Nel NLK3C8C A KB)
Діапазон робочих довжин хвиль, нм	1500-1550	1500-1550	1500-1580	1530-1570	1530-1563	1530-1565
Потужність випромінювання, дБм	0	0	-1,5...2	1	0	-1...2
Граничний струм накачки, мА	25	30	20...50	12...50	5...35	15...30
Опір терморезист., кОм	19	10	15	10	10	10
Макс. струм мікроохолоджув, А	0,5	1	1	1	1,3	1,2
Рівень придушення бічних мод, Дб	=	=	30	30	30	35
Час зрост/спаду (за рівн 20/80%), пс	=	=	150	130	125	125
Макс. швидкість передачі, Гбіт / с	0,155	0,622	2,5	2,5	2,5	10

Перейдемо до приймальної частини. Найбільше поширення у ВОСП знайшли два типи фотодетекторів: *pin*-фотодіод та лавинний фотодіод (APD).

Використовують *pin*-фотодіоди на основі кремнію і InGaAs. Важливим параметром для них є чутливість (виражається у А/Вт або В/Вт) – рівень електричного сигналу на виході як функція вхідної світлової потужності. На рисунках 3.2 і 3.3 наведені залежності їх чутливості від довжини хвилі.

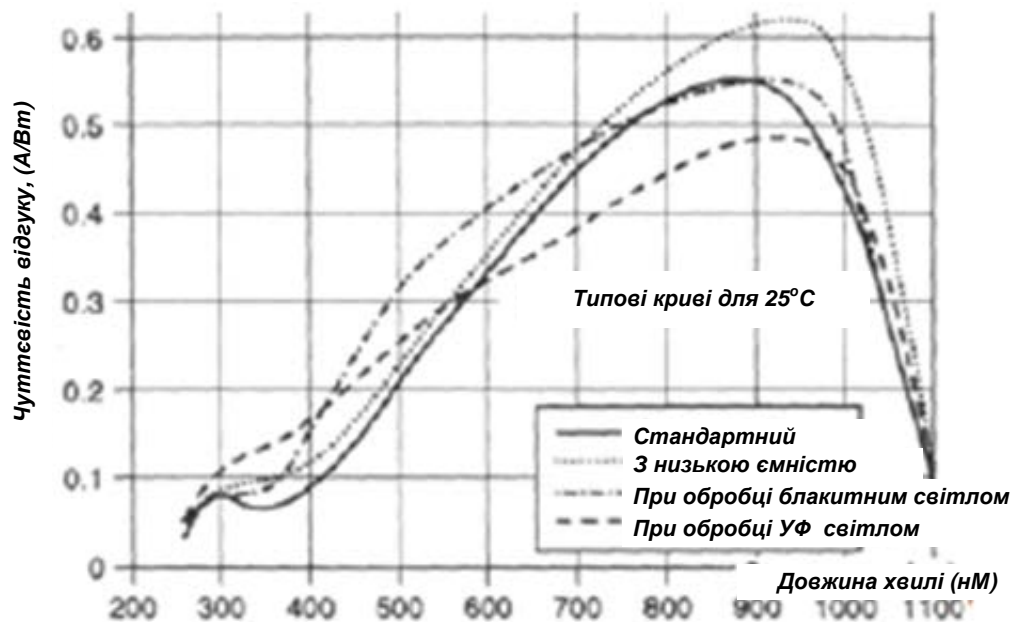


Рисунок 3.2 – Залежність чутливості від довжини хвилі для кремнієвих фотодіодів

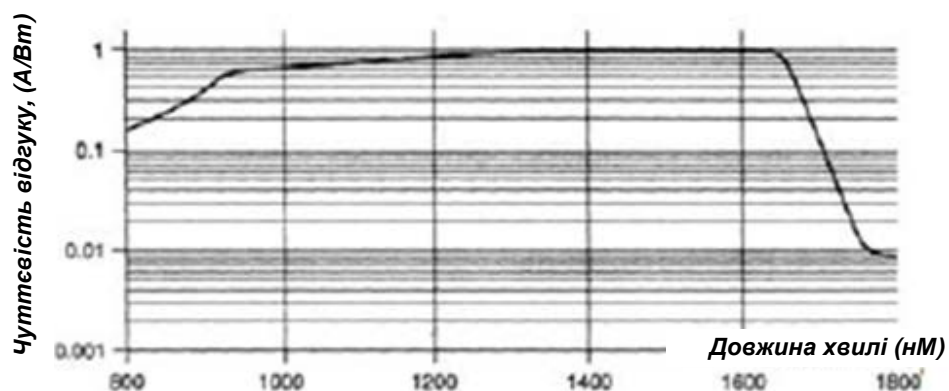


Рисунок 3.3 – Залежність чутливості від довжини хвилі для фотодіодів типу InGaAs

З рисунків видно, що кремнієві фотодіоди можуть використовуватися в діапазоні хвиль 850 нм, а фотодіоди типу InGaAs - в діапазонах хвиль 1310 і 1550 нм.

Pin діод з підсиленням - APD фотодіод. Може забезпечити корисне підсилення близько 100 дБ для кремнієвих APD і 10-40 дБ - для германієвих і InGaAs APD. Недолік APD фотодіодів - мають коефіцієнт надлишкового шуму F , оскільки разом з підсиленням вони вносять в сигнал додатковий шум.

Якість зв'язку визначає важлива робоча характеристика ВОСП - коефіцієнт помилок (BER). Визначається як відношенню числа помилково інтерпретованих символів до загальної кількості переданих. Причиною виникнення помилок зазвичай є шуми. У реальних системах зв'язку значення фотоструму, що відповідає логічним 1, і 0, змінюються у часі через наявність шумів. Це часові флуктуації струму, які впливають на правильну інтерпретацію інформаційного символу. Природу виникнення помилок в ЦСП з амплітудною модуляцією пояснює рисунок 3.4.

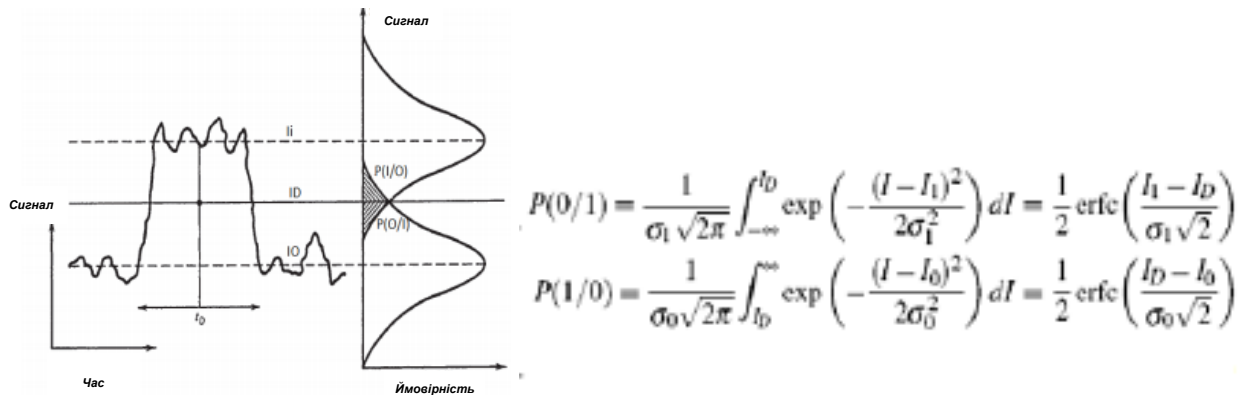


Рисунок 3.4 – Електричний інформаційний сигнал з шумом на вході схеми порівняння

Позначення на рисунку: рівень нуля I_0 , рівень одиниці I_1 , рівень порівняння I_D , тривалість такту t_D і функції розподілу ймовірностей визначених значень струму сигналу. Частина зафарбованої області показують ймовірності помилок: $P(1/0)$ - ймовірність прийому 1, якщо надійшов 0; $P(0/1)$ - ймовірність прийому 0, якщо надійшла 1.

При рівній ймовірності передачі 0 і 1 коефіцієнт помилок визначається простим виразом:

$$K_{\text{пом}} = \frac{1}{2} [P(1/0) + P(0/1)]. \quad (3.1)$$

У припущенні гаусівського розподілу шуму з нульовими середніми значеннями інтенсивності і зі середньоквадратичними відхиленнями σ_1 і σ_2 для 1 і 0 відповідно коефіцієнт помилки визначається виразом:

$$K_{\text{пом}}(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty dx \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (3.2)$$

де $Q = \frac{I_1 - I_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$ - показник якості сигналу.

При фіксованій швидкості передачі $K_{\text{пом}}$ зменшується при збільшенні амплітуди корисного сигналу і збільшується при її зменшенні. Чутливість оптичного приймача – це мінімальне значення середньої потужності оптичного випромінювання, що необхідне для передачі сигналів із заданим BER.

Зі збільшенням швидкості передачі інформації чутливість погіршується (кількісно цифра мінімальної потужності зростає приблизно пропорційно швидкості B [біт/с]).

Для фотодіодів InGaAs/InP APD, призначених для ВОСП, що працюють з великою довжиною хвилі, можна отримати кращу чутливість принаймні на 7 дБ у порівнянні з рпн діодами на швидкості 2.5 Гбіт/с і 5 - 6 дБ на швидкості 10 Гбіт/с. Це і визначило остаточний вибір фотодіода приймача на користь InGaAs рпн діода. Визначальні фактори:

- а) рпн діоди мають значне напрацювання на відмову;
- б) рпн діоди менш чутливі до зміни температури;
- в) рпн діоди значно дешевші ніж APD.

3.3 Розрахунок параметрів лінійного тракту

3.3.1 Вибір робочої довжини хвилі

Математична модель оптичних імпульсів – це часова залежність потужності. На практиці використовують повну тривалість оптичного імпульсу - це час, протягом якого потужність імпульсу постійно перевищує половину від максимального значення. Мірою тривалості є корінь квадратний з часової дисперсії. Часова дисперсія визначається за формулою:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 P(t) dt - t_0^2, \quad (3.3)$$

де $\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt$ - енергія імпульсу і $t_0 = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 P(t) dt = \langle t \rangle$ координата центру імпульсу, яка інтерпретується як час надходження імпульсу.

Проаналізуємо декілька типів імпульсів. Матмодель гаусівського імпульсу:

$$F(t) = \exp\left(-t^2/T_0^2\right), \quad (3.4)$$

Повна тривалість для такого імпульсу становить

$$T_{FWHM} = 2 \ln 2 \cdot \frac{1}{2} T_0 = 1,665 T_0 = 2,35 \sigma_t.$$

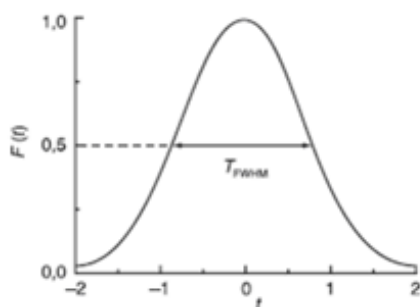
Математична модель супергаусівського імпульсу

$$F(t) = \exp\left[-\left(t / T_0\right)^{2m}\right]. \quad (3.5)$$

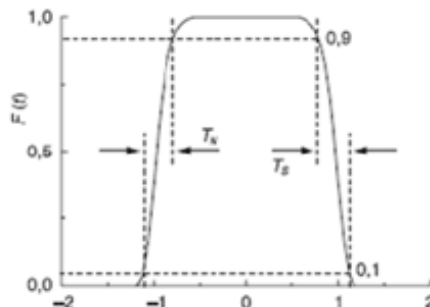
Якщо $m = 1$, то імпульс (3.5) перетворюється у звичайний гаусівський імпульс. Зі збільшенням m фронти супергаусівського імпульсу стають крутішими. Можна визначити тривалість фронту (час, за який потужність імпульсу зростає від 10 до 90% його пікової потужності). Отримаємо

$$T_N = \ln 9 \cdot \frac{T_0}{2m} = 1.1 \frac{T_0}{m}. \quad (3.6)$$

На рисунку 3.5 наведені нормовані форми імпульсів.



**Нормована форма
гауссового імпульсу**



**Нормована форма супергауссового імпульсу
при $m=5$. T_F - тривалість переднього фронту.
 T_S - тривалість заднього фронту**

Рисунок 3.5 – Нормовані форми імпульсів

З виразу (3.6) видно, що збільшення m дає зростання крутизни фронту. При великих m супергаусівський імпульс трансформується в імпульс прямокутної форми.

Математична модель прямокутного імпульсу:

$$F(t) = \begin{cases} 1, & -T_0 \leq t \leq T_0 \\ 0, & t < -T_0, t > T_0 \end{cases} \quad T_{FWHM} = 2T_0 = 2\sqrt{3}\sigma_t = 3,46\sigma_t. \quad (3.7)$$

Для кожного оптичного волокна існує критична частота або частота відсічки, яка характеризує максимальне значення довжини хвилі, що може передаватися даним ОВ (передача можлива за умови виконання $\lambda < D$). На рисунку 3.6 схематично показано характер оптичної траєкторії для оптичних сигналів різної довжини хвилі.

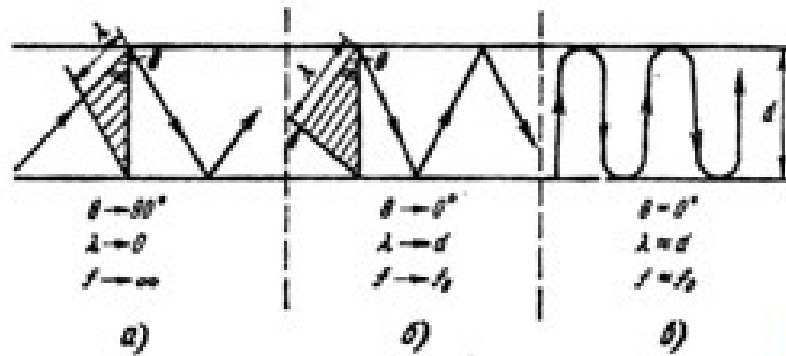


Рисунок 3.6 – Поширення хвилі в ОВ для частот:
 а – вищих за критичну; б – менш високих; в - критичних

Вибраний лазерний модуль та фотодіод, які забезпечують найвищу швидкість передачі інформації, працюють на довжині хвилі 1550 нм. Визначимо згасання оптичного сигналу на цій довжині хвилі.

Згасання оптичних кабелів (α_k) складається з власних втрат в оптичних волокнах (α_c) та додаткових втрат, обумовленими їх деформацією та вигинами:

$$\alpha_k = \alpha_c + \alpha_{\text{дод.}} \quad (3.8)$$

У свою чергу власні втрати створюються поглинанням та розсіюванням.

Обидві ці складові залежать від довжини хвилі: поглинання обернено пропорційне першому ступеню довжини хвилі, а розсіювання – четвертому:

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot \frac{\text{tg} \delta}{\lambda}, \text{ дБ/км} \quad (3.9)$$

де $\text{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат матеріалу серцевини ОВ;

λ - довжина хвилі випромінювання, виражена в км.

$$\alpha_{\text{р}} = \frac{K_{\text{р}}}{\lambda^4}, \text{ дБ/км} \quad (3.10)$$

де $K_{\text{р}}$ - коефіцієнт розсіювання матеріалу серцевини ОВ, дБ мкм⁴/км;

λ - довжина хвилі випромінювання, виражена в мкм.

Через наявність мікро- та макрозгинів оптичних волокон у процесі переважно прокладки та експлуатації з'являються додаткові втрати в оптичних кабелях. Зазвичай макрозгини мають більший, ніж 5 мм радіус згину, тому втрати тут нехтовно малі. А мікрозгини можуть суттєво впливати на значення α_k . На одному мікрозгині втрати можуть змінюватися в межах (0,01÷0,1) дБ. Основними причинами їх появи є локальні неосесиметричні механічні зусилля різного походження, які можуть виникнути на дуже малих ділянках ОВ. Крім цього на мікрозгинах проявляється недосконалість волокна, що ще збільшує загальне згасання на 0,005 дБ/км.

Розрахуємо власні втрати у ОВ на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм для таких параметрів: $tg\delta = 10^{-9}$; $K_p = 1,25$ дБ·мкм⁴/км; показник заломлення серцевини $n_1 = 1,497$.

Втрати на поглинання:

$$\alpha_{\Pi} = 8,69 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot \frac{tg\delta}{\lambda} = 8,69 \cdot 3,14 \cdot 1,497 \cdot \frac{10^{-9}}{(1,55 \cdot 10^{-6})} = 0,0264 \text{ дБ/км.}$$

Втрати на розсіювання:

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4} = \frac{1,25}{1,55^4} = 0,2166 \text{ дБ/км.}$$

Отже, власні втрати в оптичному волокні:

$$\alpha_c = 0,0264 + 0,2166 = 0,243 \text{ дБ/км.}$$

З урахуванням недосконалості ОВ коефіцієнт затухання складе

$$\alpha_k = 0,243 + 0,005 = 0,248 \text{ дБ/км.}$$

Серцевина ОВ і його оболонка мають різні показники заломлення, тому фазова швидкість характеризується мінімальним (в серцевині) і максимальним (в оболонці) значеннями фазової швидкості, відповідно:

$$v_{\phi} = c/n_1, \text{ км/с} \quad (3.11)$$

$$v_{\phi} = c/n_2, \text{ км/с} \quad (3.12)$$

Відомо, що обмеження пропускної здатності ОВ має місце через таке явище, як дисперсія. Це фактично збільшення тривалості імпульсу оптичного випромінювання при його поширенні по оптичному волокну за рахунок розсіювання в часі спектральних складових оптичного сигналу. Визначимо розширення імпульсу на км-ій довжині одномодового волокна при довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм, величині питомої дисперсії $B(\lambda) = 8 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$, ширині спектральної лінії лазерного діода $\Delta\lambda = 0,7$ нм та питомої матеріальної дисперсії $M(\lambda) = -4 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$.

Розширення імпульсу через хвильову дисперсію:

$$\tau_x = \Delta\lambda \cdot B(\lambda) \cdot L = 0,7 \cdot 8 \cdot 1 = 5,6 \text{ пс.}$$

Розширення імпульсу через матеріальну дисперсію:

$$\tau_m = \Delta\lambda \cdot M(\lambda) \cdot L = 0,7 \cdot (-4) \cdot 1 = -2,8 \text{ пс.}$$

Середньоквадратична сума, що характеризує величину розширення імпульсу на одному кілометрі довжини лінії зв'язку:

$$\tau_{\text{рез}} = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_m^2} = \sqrt{5,6^2 + (-2,8)^2} = 6,26 \text{ пс.}$$

3.3.2 Розрахунок пропускної здатності та довжини регенераційної ділянки

Інформаційна пропускна спроможність каналу зв'язку безпосередньо залежить від ширини смуги частот каналу та відношенням сигнал-шум у приймачі. Джерела випромінювання, модулятори, дисперсія оптичних волокон, фотодетектори та електронні елементи приймача оптичного випромінювання зазвичай обмежують смугу частот ВОЛЗ.

Позначимо оптичну та електричну смуги пропускання відповідно $(\Delta f)_{\text{опт}}$ і $(\Delta f)_{\text{ел}}$. На практиці виконується умова $(\Delta f)_{\text{опт}} \approx 2 \cdot (\Delta f)_{\text{ел}}$.

Відношення сигнал-шум визначається ефективним рівнем шуму на вході підсилювача приймача та корисною потужністю оптичного сигналу на вході фотодетектора.

Відмінною особливістю оптичних систем зв'язку є те, що шум приймача містить складову, прямо пропорційну потужності оптичного сигналу, що приймається. Тому в більшості звичайних оптичних систем зв'язку з модуляцією оптичного сигналу за потужністю рівень шуму залежить від рівня сигналу. Потужність сигналу, що надходить у приймач, залежить від потужності, що випромінюється передавачем та згасання оптичного каналу зв'язку.

В аналогових системах зв'язку відношення сигнал-шум безпосередньо визначає якість канал зв'язку. У цифрових системах воно визначає можливість помилки при прийнятті рішення - був переданий імпульс чи ні.

Структурна схема регенераційної ділянки без використання оптичних підсилювачів показано на рис. 3.7.

Довжина регенераційної ділянки без оптичних підсилювачів залежить від характеристик трьох елементів волоконно-оптичного тракту: передавального оптоелектронного модуля (джерела світлового випромінювання), оптичного кабелю та приймального оптоелектронного модуля (приймача випромінювання). Для оптимізації волоконно-оптичної системи передачі у загальному випадку необхідно розглянути різні варіанти її побудови з названих елементів, а саме різні типи джерел випромінювання (світловипромінювальні діоди та напівпровідникові лазери); оптичні кабелі з різними значеннями передавальних

характеристик; різні приймачі випромінювання (pin - фотодіоди та лавинні фотодіоди), а також можливі комбінації з цих трьох елементів із різними технічними характеристиками.

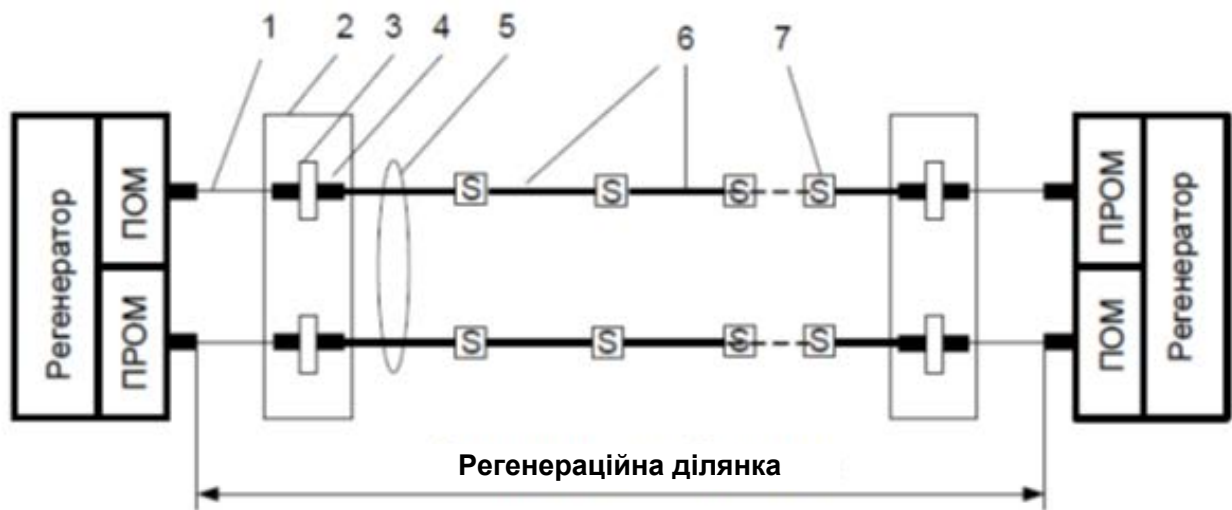


Рисунок 3.7 – Структурна схема регенераційної ділянки

1- станційний одноволоконний оптичний кабель; 2-оптичний крос;
 3- сполучна розетка оптичного роз'єму; 4-конектор оптичного роз'єму;
 5 - будівельна довжина оптичного кабелю; 6 – оптичне волокно; 7- оптична з'єднувальна муфта; ПОМ - передавальний оптоелектронний модуль;
 ПРОМ – приймальний оптоелектронний модуль.

Максимальна відстань між регенераторами при заданій величині енергетичного потенціалу апаратури обмежується характеристиками оптичного кабелю: згасанням та дисперсією. Згасання обмежує довжину регенераційної ділянки за допустимими втратами в лінії передачі; дисперсія призводить до розширення переданих імпульсів, що обмежує швидкість передачі інформації. Максимальна довжина регенераційної ділянки має задовольняти як умови втрат в лінії передачі, так і дисперсії, і лімітується найсуворішою з цих двох умов.

При розрахунку довжини регенераційної ділянки, що враховує допустимі втрати у лінії передачі, використовують енергетичний потенціал системи передачі (W). Він залежить від характеристик джерела та приймача оптичного випромінювання і визначається як різниця між рівнем середньої потужності оптичного сигналу, що вводиться в оптичне волокно (P_1), та мінімально

допустимим рівнем потужності на вході приймача оптичного випромінювання (P_2) при заданому значенні коефіцієнта помилок

$$W = P_1 - P_2, \text{ дБ} \quad (3.13)$$

де P_1 - рівень середньої потужності оптичного сигналу, що вводиться в оптичне волокно;

P_2 - допустимий рівень потужності на вході приймача оптичного випромінювання.

Для виконання розрахунку необхідно знати:

α - коефіцієнт загасання оптичних волокон на експлуатаційній довжині хвилі ВОСП, дБ/км;

$l_{\text{буд}}$ - будівельна довжина оптичного кабелю ($l_{\text{буд}} = 5$ км);

n_1 - кількість додаткових зварних з'єднань, зумовлених технологією будівельно-монтажних робіт ВОЛЗ (зварювання в оптичному кросі та стикові зварювання на переходах);

n_2 - кількість додаткових зварних з'єднань, що з'являються на довжині регенераційної ділянки в процесі експлуатації ВОЛЗ (зазвичай $n_2 = 6$);

$a_{\text{св}}$ - середні втрати на зварювання шляхом плавлення, $a_{\text{св}} = 0,05$ дБ;

$a_{\text{рз}}$ - середні втрати на оптичному роз'ємі, $a_{\text{рз}} = 0,3$ дБ;

Примітка: згасання в оптичних роз'ємах передавального та приймального оптоелектронних блоків не враховуються, оскільки вони вже враховані у значеннях енергетичного потенціалу системи передачі.

Максимальна довжина регенераційної ділянки (L_p) визначається за формулою:

$$L_p = \frac{W - n \cdot a_{\text{св}} - 2 \cdot a_{\text{рз}} - a_e}{\alpha + \frac{a_{\text{св}}}{l_{\text{буд}}}}, \text{ км} \quad (3.14)$$

де n - загальна кількість додаткових зварних з'єднань ($n = n_1 + n_2$);

a_e - енергетичний запас системи передачі, $a_e = 6$ дБм.

Елементарна кабельна ділянка (ЕКУ) - сукупність оптичного волокна та зростків, гнучких з'єднувальних кабелів та роз'ємів, розташованих між двома послідовними закінченнями ділянки. Закінчення ділянки - межа, що обрана умовно як стик між оптичним волокном та регенератором (оптичним підсилювачем).

Розрахунок довжини елементарної кабельної ділянки (ЕКД) виконується по двох критеріях:

згасання оптичного волокна;

хроматична дисперсія.

Виконаємо розрахунок довжини елементарної кабельної ділянки по згасанню оптичного волокна. Вихідні дані для розрахунку:

λ – робоча довжина хвилі 1,3 мкм, 1,55 мкм;

W – енергетичний потенціал WaveStar ADM-16/1;

A_{EZA} – експлуатаційний запас енергетичного потенціалу апаратури 3 дБ;

A_{PC} – загальні втрати у всіх роз'ємних з'єднувачах на ЕКД 2 дБ;

$A_{НСМАКС}$ - максимальне значення втрат нероз'ємної сполуки 0,1 дБ при $\lambda = 1,55$ мкм, 0,2 дБ при $\lambda = 1,3$ мкм;

$A_{EЗК}$ – експлуатаційний запас енергетичного потенціалу для кабелю 3 дБ;

$\Delta\alpha$ - похибка вимірювання згасання оптичного сигналу на ЕКД 1,5 дБ;

$\alpha_{МАКС}$ - максимальне значення коефіцієнта згасання оптичного волокна, задане в технічних умовах (специфікації) на будівельну довжину кабелю ОКМС 0,22 дБ/км при $\lambda = 1,55$ мкм, 0,36 дБ/км при $\lambda = 1,3$ мкм;

\bar{l} - середня будівельна довжина ОКМС 4 км;

ΔA - динамічний діапазон рівня приймального сигналу - 7 - 19 дБ;

$\bar{A}_{НС}$ - середнє значення втрат нероз'ємної сполуки 0,05 дБ при $\lambda = 1,55$ мкм, 0,1 дБ при $\lambda = 1,3$ мкм;

$\bar{\alpha}$ - середнє значення коефіцієнта згасання оптичного волокна 0,2 дБ/км при $\lambda = 1,55$ мкм, 0,32 дБ/км при $\lambda = 1,3$ мкм; $B = 0,067$.

Визначимо номінальне значення елементарної кабельної ділянки.

$$L_{\text{НОМ}} = \frac{W - A_{\text{ЕЗА}} - A_{\text{РС}} - A_{\text{Д}} + A_{\text{НСМАКС}} - A_{\text{ЕЗК}} - \Delta\alpha}{\alpha_{\text{МАКС}} + A_{\text{НСМАКС}}/\bar{l}} = \frac{27 - 3 - 2 + 0,1 - 3 - 1,5}{0,22 + 0,05/4} = 71,8 \text{ км.}$$

$$L_{\text{МИН}} = \frac{W - \Delta A - A_{\text{РС}} + \bar{A}_{\text{НС}}}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{\text{НС}}/\bar{l}} = \frac{27 - 17 - 2 + 0,05}{0,2 + 0,05/4} = 37,9 \text{ км.}$$

$$L_{\text{МАКС}} = \frac{W - A_{\text{ЕЗА}} - A_{\text{РС}} - B\sqrt{L_{\text{НОМ}}} + \bar{A}_{\text{НС}} - A_{\text{ЕЗК}} - \Delta\alpha}{\bar{\alpha} + \frac{B}{\sqrt{L_{\text{НОМ}}}} + \frac{\bar{A}_{\text{НС}}}{\bar{l}}} =$$

$$= \frac{27 - 3 - 2 - 0,067\sqrt{71,8} + 0,05 - 3 - 1,5}{0,2 + 0,067/\sqrt{71,8} + 0,05/4} = 77,0 \text{ км}$$

Результати розрахунків зведені у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку довжини елементарної кабельної ділянки

Розрахункова величина	Довжини ЕКД для оптичних інтерфейсів ADM 16/1		
	SI-L 16.1/1C $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$	SI-L 16.2/1C $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$	SI-L 16.3/1C $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$
W , дБ	27	27	31
$L_{\text{НОМ}}$, км	43,2	71,8	88,1
$L_{\text{МИН}}$, км	23,5	37,9	47,3
$L_{\text{МАКС}}$, км	48,3	77,0	95,2
L_D , км ОВ G.652	53	90	90

Виконаємо розрахунок довжини регенераційної ділянки за критерієм – дисперсія. Розглядаємо волоконно-оптичну систему зв'язку як систему лінійну, що має обмежену смугу пропускання.

Між інформаційною пропускнуою здатністю оптичного волокна (B , біт/с), розширенням імпульсу (ΔT , с) та шириною оптичної смуги пропускання ($\Delta f_{\text{опт}}$, Гц) існує взаємозв'язок. Ширина оптичної смуги пропускання (Гц) має бути не менше швидкості передачі (біт/с). Зв'язок між величиною розширення оптичних

імпульсів (ΔT) та оптичною шириною смуги пропускання оптичного волокна на довжині регенераційної ділянки виражається співвідношенням

$$\Delta f_{\text{опт}} = \frac{k}{\Delta T}, \text{ ГГц} \quad (3.15)$$

де k - коефіцієнт, що враховує форму оптичного сигналу. Для імпульсів гаусової форми $k \approx 0,441$.

Для гаусівського спектру джерела випромінювання та швидкості передачі менше 565 Мбіт/с для практичних оцінок можна використовувати такі співвідношення:

$$\Delta f_{\text{опт}} = \frac{0,441}{\Delta T}.$$

Розширення імпульсу буде визначатися за формулою:

$$\Delta T = \tau_{\text{хр}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L_p, \text{ пс} \quad (3.16)$$

$\tau_{\text{хр}}(\lambda)$ - хроматична дисперсія, пс/нм км;

$\Delta\lambda$ - ширина спектральної лінії джерела випромінювання, нм;

L_p - максимальна довжина регенераційної ділянки виходячи з умови втрат лінії, км.

Виходячи з умови втрат на лінії, максимальна довжина регенераційної ділянки системи передачі для інформаційної швидкості 140 Мбіт/с дорівнює 100 км. При використанні напівпровідникового лазера з експлуатаційною довжиною хвилі $\lambda = 1500$ нм, шириною спектральної лінії $\Delta\lambda = 0,5$ нм та хроматичною дисперсією $\tau_{\text{хр}}(\lambda) = 15$ пс/нм.км розраховуємо розширення оптичного імпульсу та ширину оптичної смуги пропускання на довжині $L_p = 100$ км.

Розширення імпульсу

$$\Delta T = \tau_{\text{xp}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L_p = 15 \cdot 0,5 \cdot 100 = 750 \text{ пс.}$$

Ширина оптичної смуги пропускання оптичного волокна на довжині регенераційної ділянки

$$\Delta f_{\text{опт}} = \frac{0,441}{750 \cdot 10^{-12}} \approx 0,59 \text{ ГГц.}$$

Якщо порівняти отримане значення ширини оптичної смуги пропускання світловода з необхідною смугою частот для різних швидкостей, а саме:

0,14 ГГц для швидкості передачі 140 Мбіт/с;

0,155 ГГц для швидкості передачі 155 Мбіт/с;

0,622 ГГц для швидкості передачі 622 Мбіт/с,

то виявиться, що обмеження довжини регенераційної ділянки, виходячи з втрат лінії, є суворішим, ніж обмеження по дисперсії, і максимальна довжина регенераційної ділянки становитиме $L_p = 100$ км.

3.4 Методи підвищення швидкості передавання даних

Збільшення пропускну здатності волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) може забезпечуватися декількома способами. Зазвичай це зводиться до якогось методу ущільнення компонентних інформаційних потоків в груповий. Подальше нарощування інформаційної ємності систем передачі потребує поєднання одночасно двох або більшої кількості методів. Швидкість передачі оптичного сигналу можна виразити як:

$$B_{\text{заг}} = b \cdot N_k \cdot N_m \cdot N_c, \quad (3.17)$$

де b - бітова швидкість синхронного транспортного модуля в одному спектральному каналі;

N_k - кількість спектральних каналів, створених в оптичному волокні;

N_m – кількість мод, які використовуються для модового ущільнення волокна (мається на увазі, що у кожній моді сформовано N_k спектральних каналів);

N_c – кількість сердцевин в оптичному волокні (вважається, що у кожній сердцевині використовуються N_m мод).

Отже, для установлення потенційних значень інформаційно-пропускної здатності ВОСП проаналізуємо методи мультиплексування, які її забезпечують.

3.4.1 Технологія часового мультиплексування

Це мультиплексування з розділенням у часі. Цифровий сигнал модулює оптичну несущу з бітовою швидкістю b . Такий сигнал формується електронним вузлом, причому для такого виду пристроїв на сьогодні вже помітна гранична межа щодо швидкості роботи – його швидкодії. Стандарт STM-256 визначає граничну швидкість мультиплексування – 40 Гбіт/с. Зафіксований максимум – 100 Гбіт/с.

Якщо звернутися до формули (3.17), то в контексті загальної швидкості дана складова описується першим множником. Подальший пошук збільшення швидкості відбувався двома напрямками. Перший – намагання досягти збільшення швидкості передавання в одному каналі до 160, а потім і до 640 Гбіт/с. Цей напрям привів до впровадження в якості носіїв інформації (на рівні ідеї) використання спеціальних імпульсів – солітонів та появи солітонних мереж зв'язку. Другий шлях пов'язаний з технологією WDM – хвильового мультиплексування, коли у кожному волокні використовують декілька оптичних несущих довжин хвиль.

Згідно з другим напрямком подальше збільшення загальної швидкості передачі підкріплено технологією розділення каналів передачі за довжиною хвилі або спектрального мультиплексування (WDM – wavelength division multiplexing) [3]. Тут має місце одночасна передача по волокну декількох TDM каналів на різних довжинах хвиль. У формулі (3.17) загальної швидкості передачі це множник N_k .

3.4.2 Технологія хвильового мультиплексування

Хвильове або спектральне мультиплексування - це метод з розділенням за довжиною хвилі, Суть методу полягає в об'єднанні на передачі декількох оптичних несущих на різних довжинах хвиль λ_i , передаванні сумарного сигналу $\Sigma\lambda_i$ по одному оптичному волокну і наступному розділенні несущих – кожна у своє волокну. Можливість впровадження технології WDM на мережах зв'язку завдячує оптичним підсилювачам, які дозволяють підсилювати груповий сигнал в оптичній формі без перетворення його в електричну. Ширина діапазону, в якому працює волоконно-оптичний підсилювач (ВОП) з волокном, легованим ербієм, лежить у межах 1530 – 1565 нм. Це, очевидно, обмеження на кількість каналів (несущих), які можна організувати в межах цього частотного діапазону.

Відповідно до стандарту частотний інтервал між несущими становить 50 ГГц. Отже, в діапазоні довжин хвиль від 1528,77 нм до 1560,61 нм, який відповідає смузі підсилення оптичного підсилювача, можна сформувати 81 канал. При частотному рознесенні 100 ГГц таких каналів можна створити 41.

У подальшому для підвищення кількості каналів є крок несущих зменшено ще удвічі - до 25 ГГц і далі - до 12,5 ГГц. Наступна узагальнена формула дає можливість визначити частоти несущих

$$f = 193,1 \pm n \cdot f_s, \quad (3.18)$$

де f_s – крок частотної сітки в ТГц;

n – ціле число: 0, 1, ..., m .

Важливим є вибір кроку частотної сітки. Для 12,5 ГГц потрібна відповідна стабільність частоти (довжини хвилі) несущої – її зміни обмежені вимогами стандарту. Допуски на частоту визначає нерівність:

$$4\Delta f \leq f_s - 2 \cdot B, \quad (3.19)$$

де B – швидкість передавання в Гбіт/с.

У таблиці 3.3 наведені результати розрахунків за формулою (3.19).

Таблиця 3.3 – Верхня межа допусків нестабільності частоти

Крок частотного плану, ГГц	100	50	25	12,5
Швидкість передавання 2,5 Гбіт/с	23	11	5	1,8
Швидкість передавання 10 Гбіт/с	20	7	1,2	-
Швидкість передавання 40 Гбіт/с	5	-	-	-

Зауважимо, що вираз (3.19) не враховує ширину спектральної лінії лазера, яка розширюється внаслідок модуляції. При імпульсній модуляції основна енергія зосереджується в основній пелюстці спектру сигналу, тобто становить $\delta f_c = \frac{2}{\tau}$, де τ – тривалість модульовального імпульсу. Впливає також вид кодування. Для коду NRZ $\delta f_c = 2B$, де B – швидкість передавання у каналі. Якщо використовується код RZ, то спектр сигналу розширюється, тобто збільшується частотний ресурс, який використовує ВОСП. Отже, з точки зору економії частотного ресурсу використання коду цього типу не є бажаним.

У системі передавання WDM важливо правильно вибрати величину частотного інтервалу між каналами f_s . Цей інтервал повинен розраховувати на ширину каналного спектру ($2B$ для коду NRZ), ширину спектральної лінії лазера ΔF та часову нестабільність частоти $\pm \Delta f_\tau$. Ураховуючи зазначене (це демонструє рисунок 3.8), вираз (3.19) прийме такий остаточний вигляд:

$$2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau \leq f_s. \quad (3.20)$$

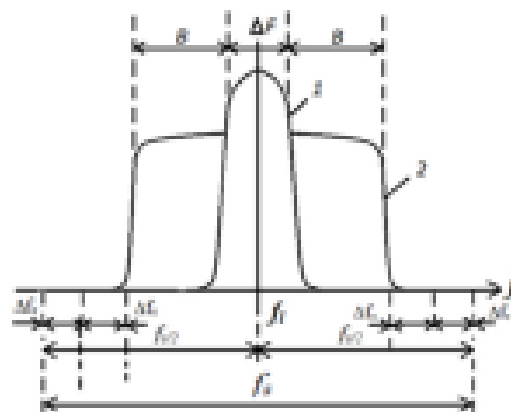


Рисунок 3.8 – Складові частотного інтервалу каналу зв'язку з несучою f_i :

1 – спектральна лінія лазера; 2 – спектр модульованого сигналу; B – швидкість передавання; ΔF – ширина спектральної лінії лазера; Δf_τ – часова нестабільність частоти; f_s – частотний інтервал між сусідніми каналами

Можна визначити кількість каналів у діапазоні $(f_{max} - f_{min})$ (3.21), а також втрати частотного ресурсу, які мають місце при формуванні міжканальних інтервалів (3.22)

$$N = E \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau} \right), \quad (3.21)$$

де E – функція взяття цілої частини.

$$\Delta f_v = N(\Delta F + 4\Delta f_\tau) = E \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau} \right) \cdot (\Delta F + 4\Delta f_\tau). \quad (3.22)$$

Аналіз показує, що при збільшенні B система наближається до одноканальної структури ($N=1$), а відносні частотні втрати $\Delta f_v / (f_{max} - f_{min})$ зменшуються у напрямку $(\Delta F + 4\Delta f_\tau) / (f_{max} - f_{min})$.

Ефективність використання частотного ресурсу, як обернена величина, становить $(f_{max} - f_{min}) / \Delta f_v$ і при збільшенні швидкості B прямує до значення $(f_{max} - f_{min}) / (\Delta F + 4\Delta f_\tau)$. Залежність кількості каналів від швидкості передавання демонструє рисунок 3.9.

N

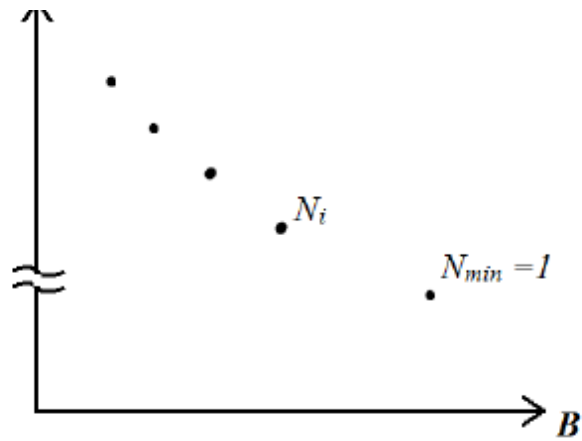


Рисунок 3.9 – Залежність кількості каналів від швидкості B в окремому каналі

Отже, при збільшенні швидкості передавання B зменшується кількість каналів і зменшуються втрати частотного ресурсу. Це означає, що для фіксованого частотного діапазону можна досягти збільшення інформаційно-пропускної спроможності за рахунок зменшення числа каналів, якщо одночасно збільшувати швидкість передачі у них. Граничний випадок - один канал з максимальною швидкістю

$$B = \frac{f_{max} - f_{min} - \Delta F - 4\Delta f_{\tau}}{2}. \quad (3.23)$$

У цьому граничному випадку максимальною також виявляється і спектральна ефективність, оскільки в ширину спектру сигналу додаються складові обмежень на ширину спектру попередніх каналних сигналів.

Зазначена мінімізація втрат частотного ресурсу стикається з проблемою досягнення високої швидкості модуляції. Для її збільшення міжканальні інтервали у 12,5 ГГц можуть бути замінені на інтервали 25, 50 або навіть 100 ГГц. При цьому зменшиться число каналів та величина втрат на міжканальні інтервали. Важливо також використовувати лазери з мінімальною шириною спектральної лінії.

Швидкість передавання у каналі ВОЛЗ обмежує хроматична дисперсія, причому її вплив зростає зі збільшенням цієї швидкості. Тому доцільно

застосовувати компенсатори дисперсії на основі компенсувального волокна або волоконно-оптичних ґраток Брегга. Ще раз зазначимо також, що обмеження щодо збільшення швидкості передавання створюють можливості сучасної електроніки.

3.4.3 Модове мультиплексування

У формулі (3.17) множителем збільшення інформаційно-пропускної здатності ВОЛЗ за технологією маломодових волокон виступає N_M .

Використання технології модового мультиплексування в маломодових оптичних волокнах вважається перспективним. Мала кількість мод (2-3) надає перевагу у селективності і створює умови для впливу на модові спотворення. Цифрова обробка сигналу та мультиплексування N просторових мод підтримують N -кратне збільшення пропускної здатності. Стандартне багатомодове волокно (MMF) підтримує понад сто мод, що створює великі труднощі для формування і обробки (селекції) оптичного сигналу. Маломодове волокно (FMF – Few Mode Fiber – маломодове волокно) підтримує невелику кількість мод, тому в порівнянні зі стандартним воно має потенціал для значного зменшення складності системи обробки.

Структурно технологія модового мультиплексування використовує N передавачів, які формують каналні сигнали. Модовий мультиплексор здійснює мультиплексування цих сигналів. Вони передаються різними просторовими модами, об'єднавшись у маломодовому волокні на одній і тій же довжині хвилі. Подальша обробка відбувається як єдиного цілого у вигляді MDM суперканалу. Модові сигнали підсилюються та одночасно виводяться або вводяться без індивідуальної обробки мод. На прийомі модові демультіплексори їх виділяють.

Демультіплексовані сигнали детектуються окремими когерентними приймачами і трансформуються в електричну форму з подальшою їх цифровізацією. Цифрові сигнали обробляються за допомогою модуля цифрової обробки. Якщо мультиплексор/демультіплексор має унітарну функцію передачі

з рангом N , що дорівнює кількості мод, то пропускна здатність каналу може бути в N раз більшою у порівнянні з одномодовою системою.

Варто акцентувати увагу на трьох основних проблемах при створенні такої системи:

- 1) вибір відповідного маломодового оптичного волокна;
- 2) вибір конвертора мод з моди LP01 в моди вищого порядку і навпаки;
- 3) вибір модового мультиплексора/демультиплексора.

Найпростіший спосіб отримати двомодове оптичне волокно – створення профілю показника заломлення зі значенням нормованої частоти $V > 2,4$ (вище, ніж для одномодового режиму), але менше, ніж для умови трьохмодового режиму, тобто $V < 3,8$.

Інший підхід демонструє рисунок 3.10.

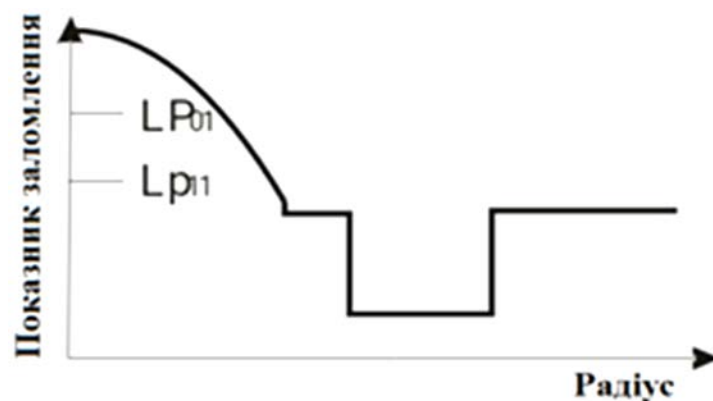


Рисунок 3.10 – Профіль показника заломлення градієнтного двомодового оптичного волокна

На рис. 3.10 показаний профіль показника заломлення волокна з поліпшеними характеристиками. Тут використана серцевина з градієнтним профілем та подвійною оболонкою. Серцевина з градієнтним профілем показника заломлення сприяє зниженню DMD, а траншейна структура оболонки забезпечує низькі втрати для LP11 мод. DMD у найнесприятливішому випадку для мод LP01 і LP11 вимірюється величиною 0,076 пс/м, а втрати для обох мод LP01 і LP11 не перевищують 0,2 дБ/км.

Модовий конвертор перетворює оптичні сигнали моди LP01 в сигнали моди більш високого порядку (наприклад, моду LP11) і навпаки. Це під силу довгоперіодній волоконній решітці (ДПВР).

ДПВР це волоконно-оптична структура з періодичною зміною властивостей уздовж волокна. У ній створюються умови резонансу для взаємодії декількох мод, що поширюються в одному напрямку. Залежно від симетрії збурення, за допомогою якого створюється решітка, зв'язок може бути створений між модами різної симетрії.

3.4.4 Технологія багатосерцевинних волокон

Ця технологія представлена у співвідношенні (3.17) множителем N_C .

Один з варіантів передбачає просторове мультиплексування, коли передані сигнали проходять паралельним оптичними хвилеводами. Такий підхід є привабливим при реалізації просторово обмежених систем (з'єднання між стійками, інші коротші з'єднання). Інший вид просторового мультиплексування – використання багатосерцевинних оптичних волокон.

Технології хвильового та модового мультиплексування стикаються з проблемою обмеження потужності, яка пов'язана з нелінійними спотвореннями сигналу. Подолання цього обмеження можливе при використанні багато серцевинних волокон (БСВ). Найбільш важливим параметром для таких волокон є перехресні завади, а їх придушення має вирішальне значення для передачі сигналів. Низькі втрати і низькі перехресні завади, що є важливими для ліній значної дальності, можуть бути досягнуті в зварних БСВ.

3.5 Висновки до розділу

Проведено розрахунок параметрів оптичного лінійного тракту ВОСП зі спектральним ущільненням, розглянуті особливості структури ОЛП, здійснено вибір робочої довжини хвилі, а також проведена оцінка параметрів оптичного волокна.

Було обрано на основі порівняльного аналізу обладнання джерела випромінювання і фотоприймача. У фотодіодів InGaAs/InP APD, призначених для ВОСП, що працюють з великою довжиною хвилі, можна отримати кращу чутливість, принаймні на 7 дБ, у порівнянні з pin-діодами на швидкості 2,5 Гбіт/с і 5-6 дБ на швидкості 10 Гбіт/с. Це і визначило остаточний вибір фотодіода приймача на користь InGaAs pin діода.

Розрахована довжина регенераційної ділянки за умови досягнення максимальної пропускної здатності каналу. Виявилося, що обмеження довжини регенераційної ділянки, виходячи з втрат лінії, є суворішим, ніж обмеження по дисперсії, тому її максимальна довжина становить $L_p = 100$ км.

Наведено можливі методи підвищення швидкості передавання даних. Технології передавання з часовим розділенням каналів уже значно вичерпали свій інформаційно-пропускний ресурс і тепер взаємодіють в напрямку його нарощування з технологіями хвильового мультиплексування. Перспективними напрямками підвищення інформаційно-пропускної здатності є технології модового мультиплексування, мультиплексування за поляризацією та багатосерцевинних оптичних волокон. Технологія багатосерцевинних волокон дає найбільше підвищення пропускної здатності (сім разів). Значний резерв для нарощування пропускної здатності мають також складні модуляційні схеми, які значно підвищують спектральну ефективність системи.

4.1 Опис програмного пакету

Моделювання здійснювалось з використанням програмного пакету Gain Master™, який призначений для допомоги при проектуванні ербієвих оптичних підсилювачів EDFA. Програмне забезпечення дозволяє промоделювати роботу ділянки волоконно-оптичної лінії зв'язку, на якій відбувається передача оптичного сигналу і яка містить необхідні для роботи вузли.

Інтерфейс (зв'язок користувача з комп'ютером), є простим. Доступ до більшості програм GainMaster™ здійснюється через головне меню на екрані або через підменю шляхом вибору відповідних опцій. Можна оптимізувати роботу використанням різних комбінацій клавіш.

Системні вимоги GainMaster™ наведено в таблиці 4.1 [8].

Таблиця 4.1 - Системні вимоги GainMaster™

Комп'ютер і процесор	86- або 64-розрядний процесор із тактовою частотою 1 ГГц або більше, що підтримує SSE2
Пам'ять	1 ГБ оперативної пам'яті (для 32-розрядної версії)
Жорсткий диск	500 МБ вільного дискового простору
Дисплей	роздільна здатність екрана 1024 x 768
Відеоадаптер	Для апаратного прискорення обробки зображення потрібен відеоадаптер, що підтримує технологію DirectX 10
Операційна система	Windows 7, Windows 8, Windows Server 2008 R2 або Windows Server 2012
Версія .Net	3.5, 4.0 або 4.5

4.2 Результати комп'ютерного моделювання

Наведемо результати моделювання згасання (підсилення) та коефіцієнта шумів, які вносяться такими вузлами системи широкосмугового доступу на базі ВОЛЗ:

- оптичні розгалужувачі;
- оптичні з'єднувачі;
- оптичні ізолятори;

- оптичні мультиплексори/демультиплексори;
- оптичні підсилювачі.

Параметр згасання (підсилення) (gain) наводиться в дБ – додатне значення характеризує підсилення, а від’ємне – згасання сигналу (вихідний сигнал має менший рівень по відношенню до вхідного). Коефіцієнт шуму (noise figure) також подається у дБ – це відношення с/ш на вході вузла до с/ш на його виході. Додатне значення цього коефіцієнта означає, що вихідне співвідношення менше, ніж вхідне, отже вузлом вноситься певна порція шуму. Моделювання всіх вузлів виконувалося на довжинах хвиль 1530-1565 нм. Цей діапазон прийнятий за результатами попередніх міркувань та висновків. Схема для моделювання оптичних з’єднувачів наведена на рисунку 4.1.

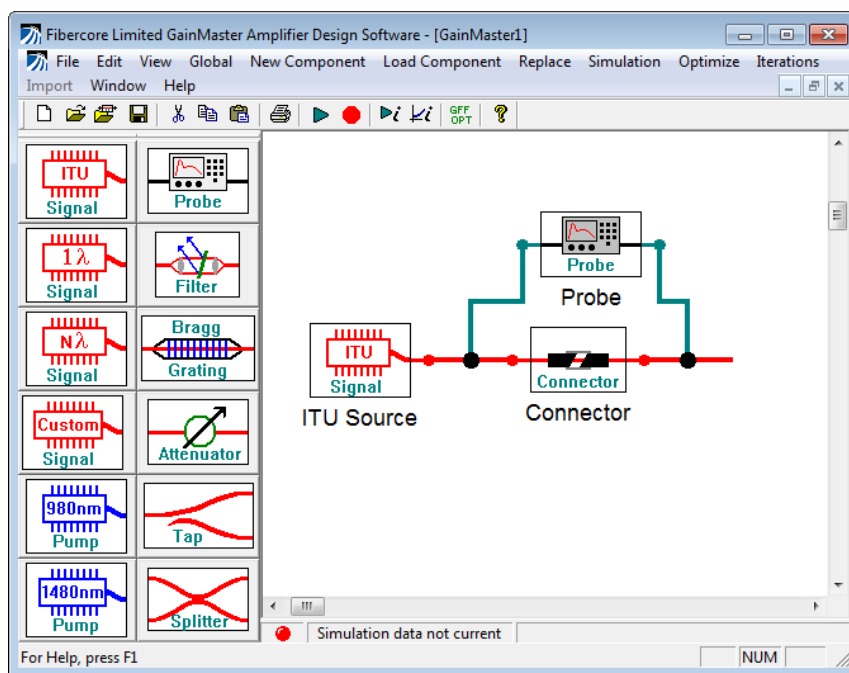


Рисунок 4.1 – Схема для моделювання оптичних з’єднувачів

Рисунок 4.2 демонструє внесене згасання оптичного з’єднувача в залежності від довжини хвилі. В робочому діапазоні хвиль має місце незначне згасання 0,1 дБ. На рисунку 4.3 наведено шуми, які вносяться на оптичному з’єднувачі в залежності від довжини хвилі. Коефіцієнт шуму 0,2 дБ.

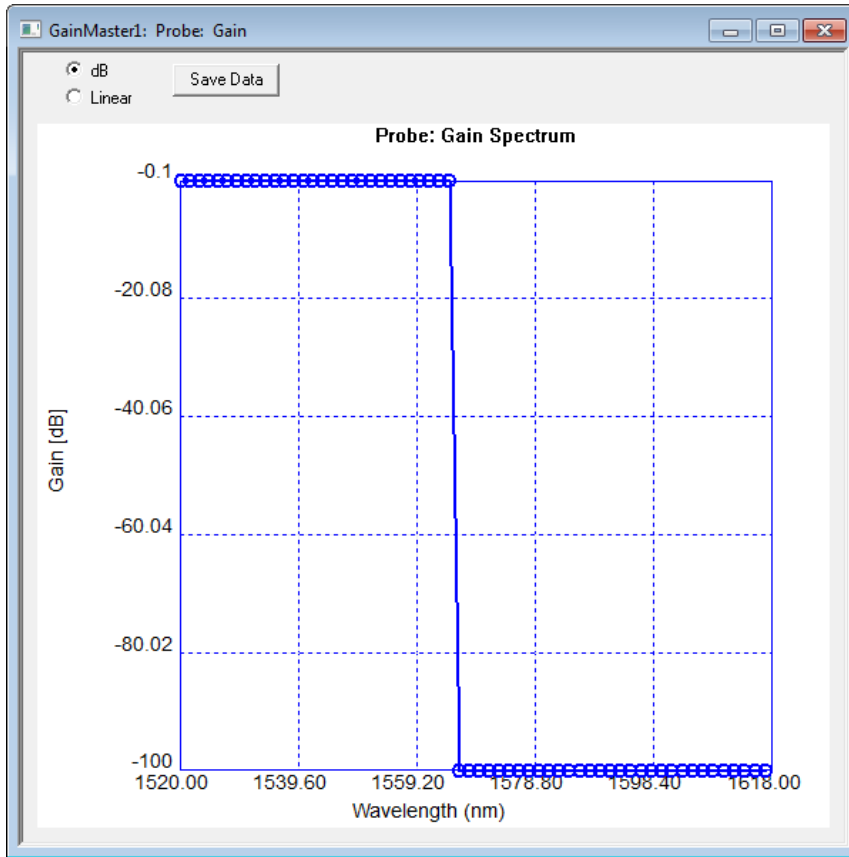


Рисунок 4.2 – Згасання, що вноситься оптичним з'єднувачем

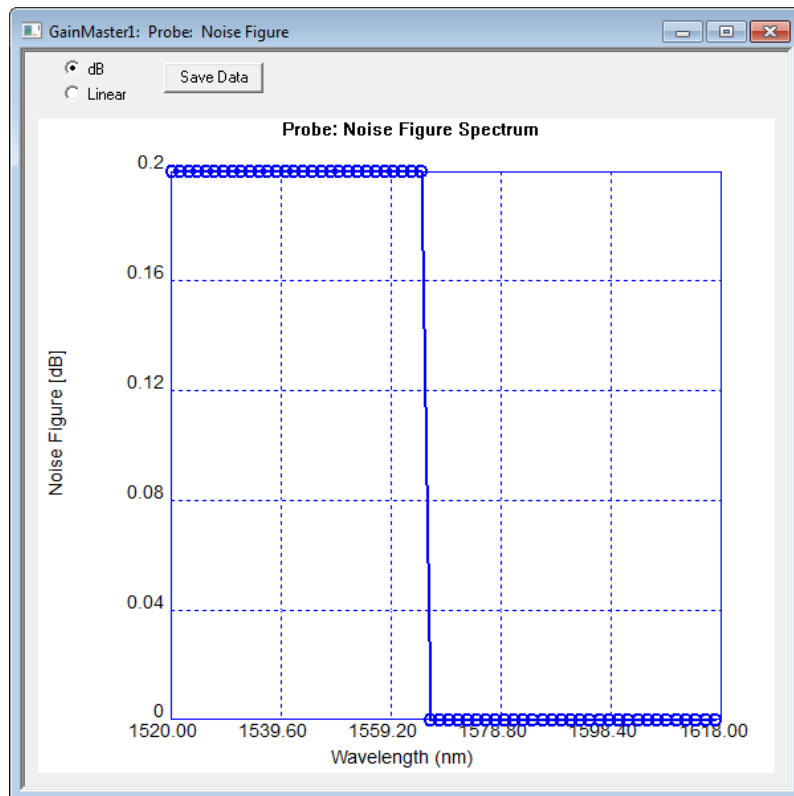


Рисунок 4.3 – Коефіцієнт шуму на оптичному з'єднувачі

Моделювання оптичного розгалужувача проводилось за схемою, яка наведена на рисунку 4.4.

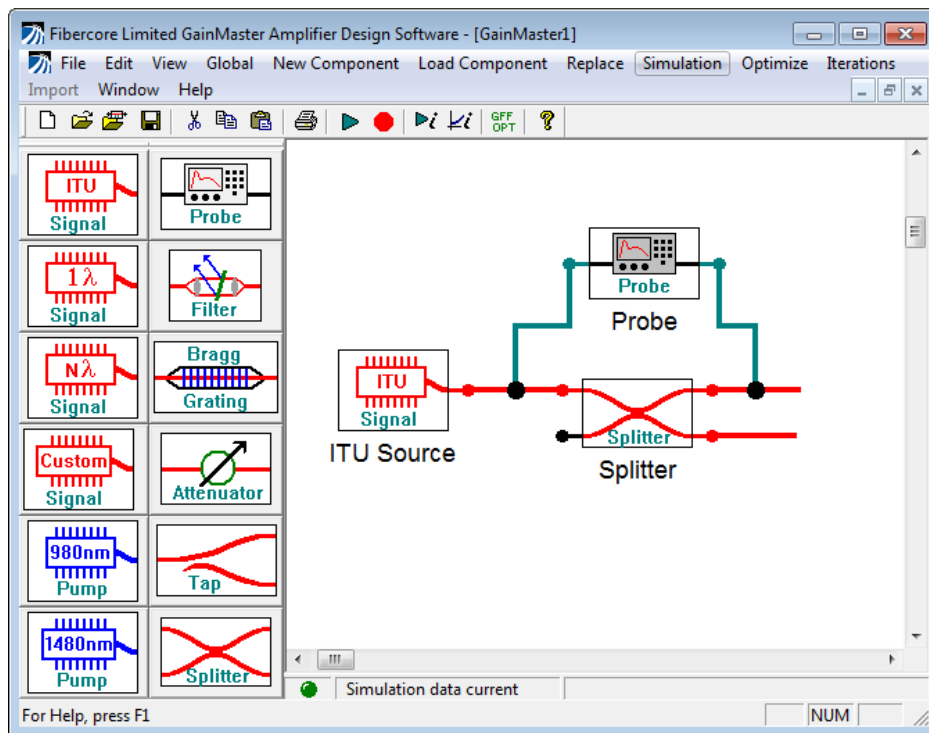


Рисунок 4.4 – Схема моделювання оптичного розгалужувача

На рисунку 4.5 наведено залежність коефіцієнта шуму від довжини хвилі. Проведена оцінка цього коефіцієнта шуму при проходженні розгалужувачем сигналу з входу на перший вихід. Видно, що цей параметр складає біля 3 дБ, отже оптичний розгалужувач «шумить» більше, ніж оптичний з'єднувач.

Рисунок 4.6, на якому показана залежність від довжини хвилі згасання сигналу, демонструє, що в оптичному розгалужувачі також більше і згасання сигналу порівняно зі з'єднувачем. Тут воно становить 3 дБ (підсилення мінус 3 дБ). Крім того, з результатів моделювання видно, що оптичний розгалужувач вносить однакове згасання сигналу при його проходженні з входу на будь-який з виходів. Отже, розгалужувачі рівною мірою розподіляють потужність між всіма вихідними полюсами. Зазначимо також, що для обох пристроїв спостерігається або точна, або дуже близька рівність цих параметрів у числовому вимірі.

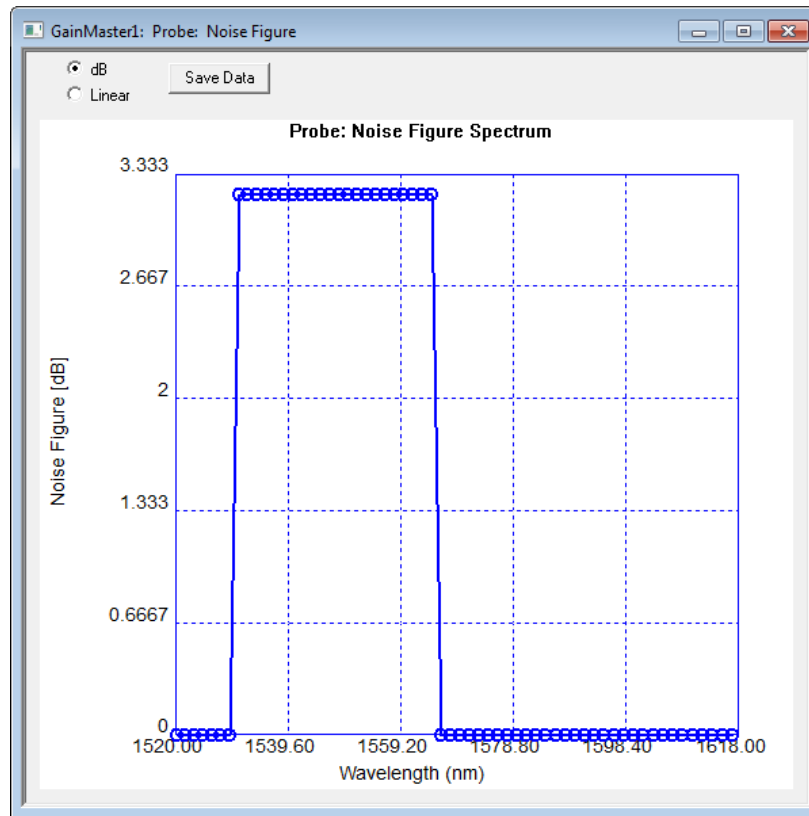


Рисунок 4.5 – Шуми які вносяться оптичним розгалужувачем

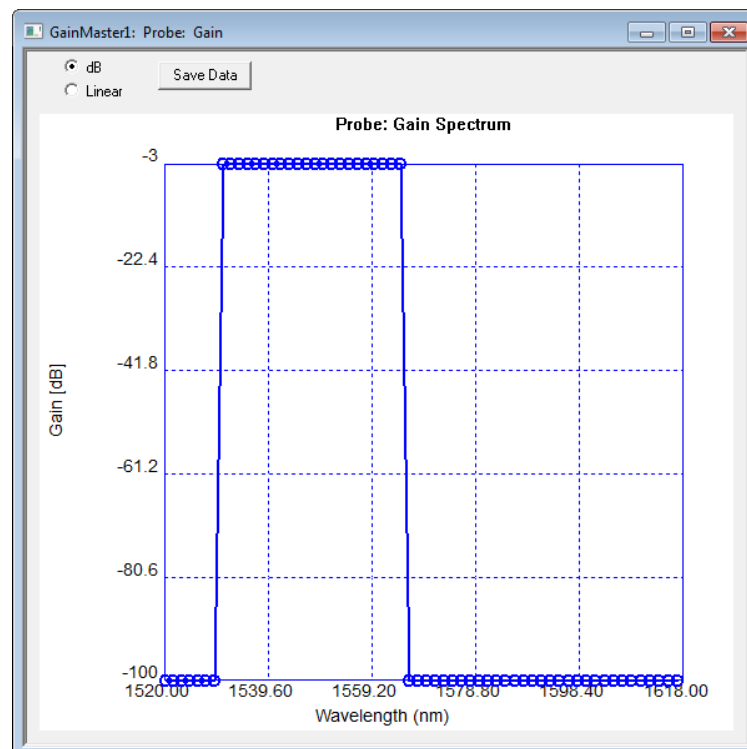


Рисунок 4.6 – Згасання оптичного сигналу на розгалужувачі
На рисунку 4.7 наведена схема моделювання оптичного ізолятора

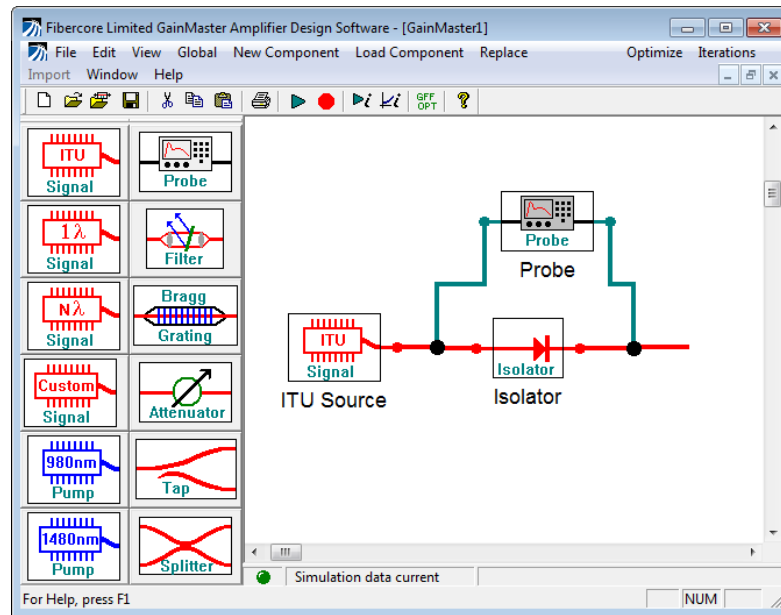


Рисунок 4.7 – Схема моделювання оптичного ізолятора

Досліджувалось згасання, яке вносить оптичний ізолятор, для прямого і зворотного проходження сигналу. На рисунку 4.8 та 4.9 наведено відповідні результати моделювання.

З результатів моделювання видно, що при прямому проходженні сигнал згасає на 0,3 дБ (підсилення «gain» складає мінус 0,3 дБ), а при зворотному – на 45 дБ. Враховуючи, що отримане згасання означає пониження інтенсивності оптичного сигналу у зворотному напрямку більш, ніж у 10000 разів (45 дБ), можна стверджувати, що оптичний ізолятор забезпечує захист від зворотного сигналу.

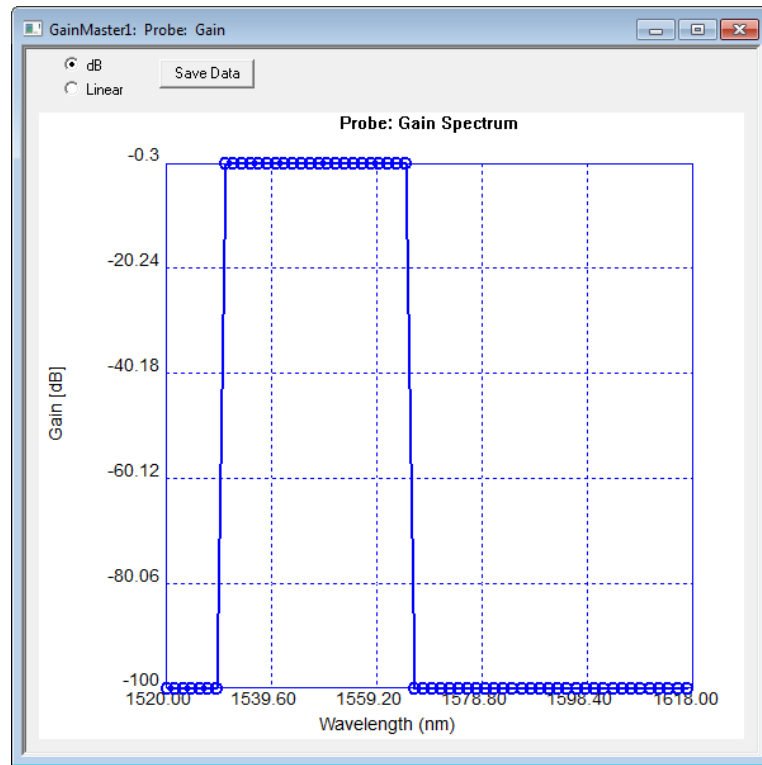


Рисунок 4.8 – Згасання в оптичному ізоляторі при прямому проходженні сигналу

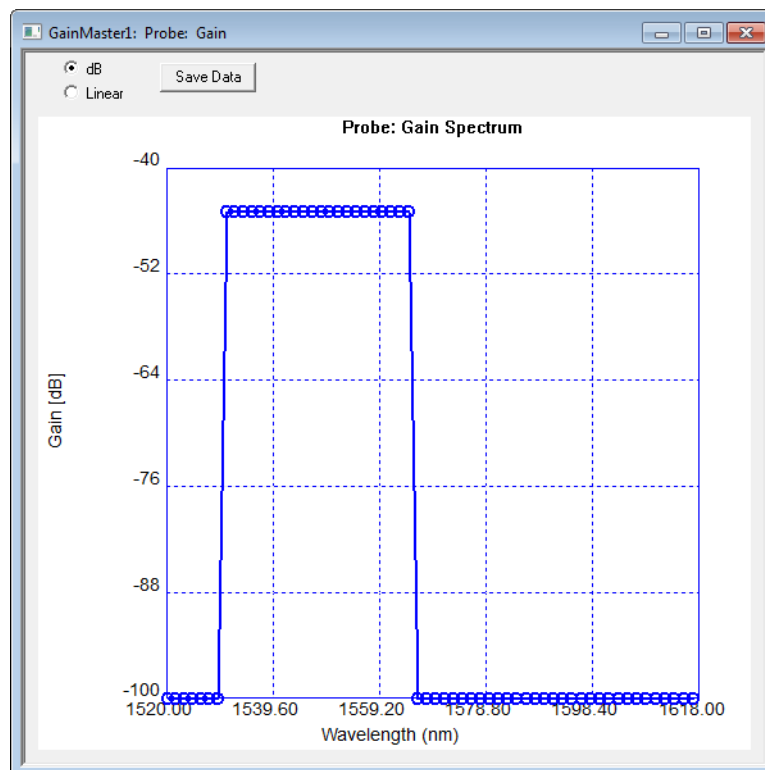


Рисунок 4.9 – Згасання в ізоляторі при зворотному проходженні сигналу

На рисунку 4.10 зображена схема моделювання оптичного мультиплексора.

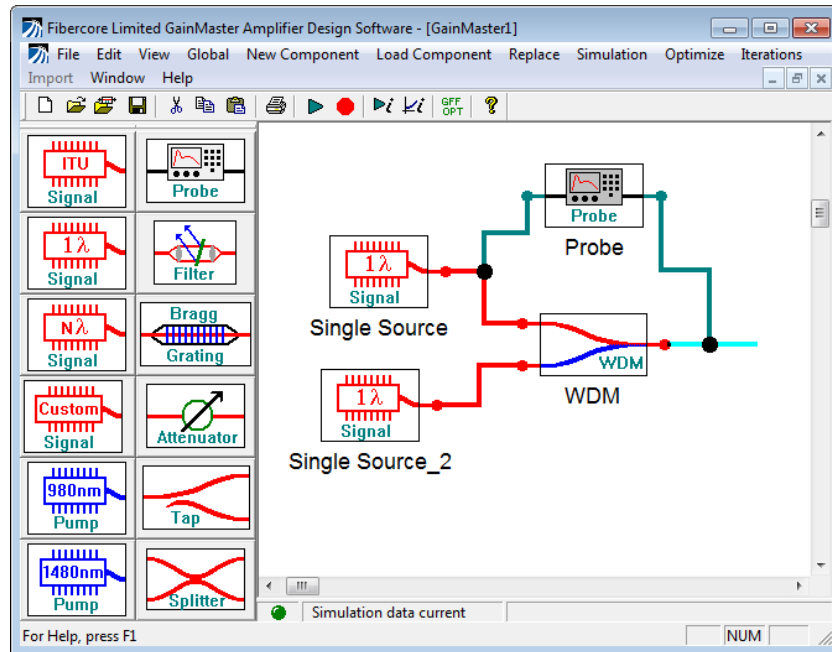


Рисунок 4.10 – Схема моделювання оптичного мультиплексора

Метою моделювання є перевірка функціональної можливості об'єднання мультиплексором двох сигналів на різних робочих довжинах хвиль в один груповий сигнал, сформований на виході цього вузла.

Спектр сигналу (одна спектральна складова), який подається на перший вхід мультиплексора, зображено на рисунку 4.11.

На рисунку 4.12 наведено спектр сигналу (спектральну складову), який надходить на другий вхід мультиплексора.

Вихідний сигнал містить обидві компоненти, що демонструє рисунок 4.13.

Рисунок 4.14 показує залежність згасання, що вносить мультиплексор, в залежності від довжини хвилі. При цьому видно, що із збільшенням довжини хвилі згасання оптичного сигналу в мультиплексорі збільшується.

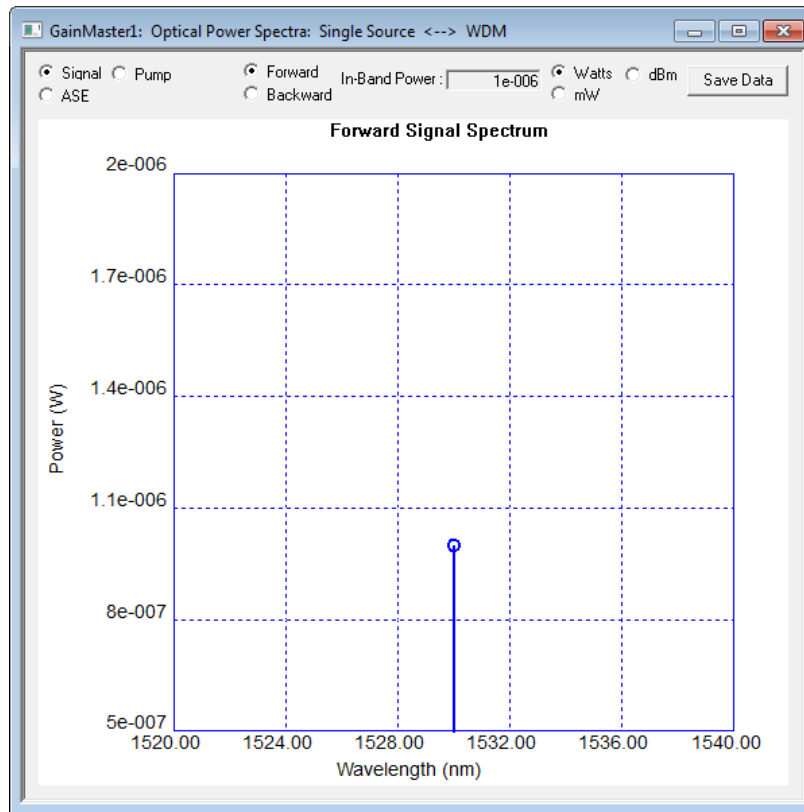


Рисунок 4.11 – Спектр сигналу на першому вході мультиплексора

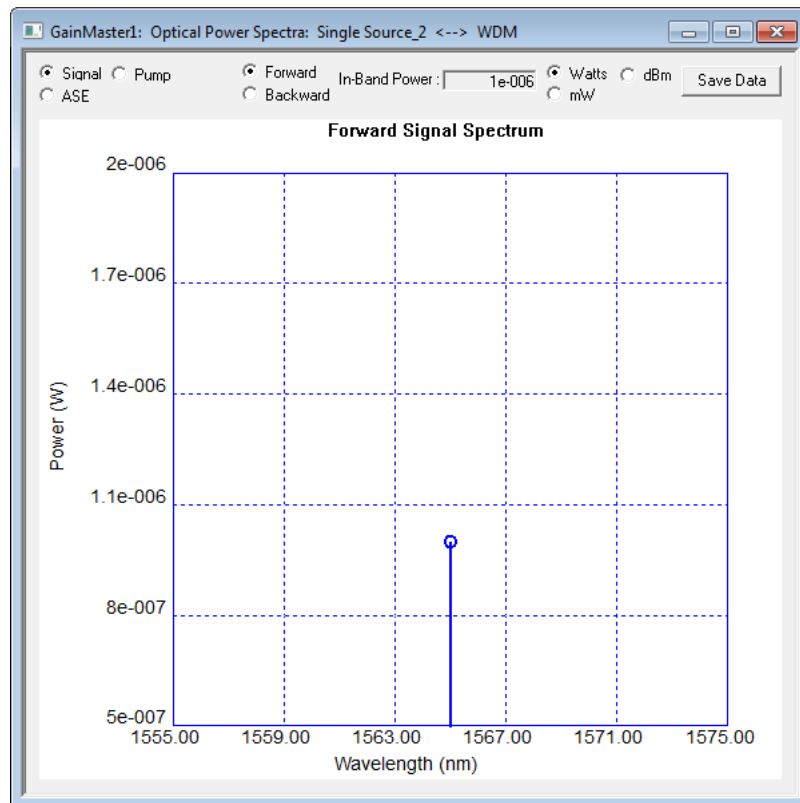


Рисунок 4.12 – Спектр сигналу на другому вході мультиплексора

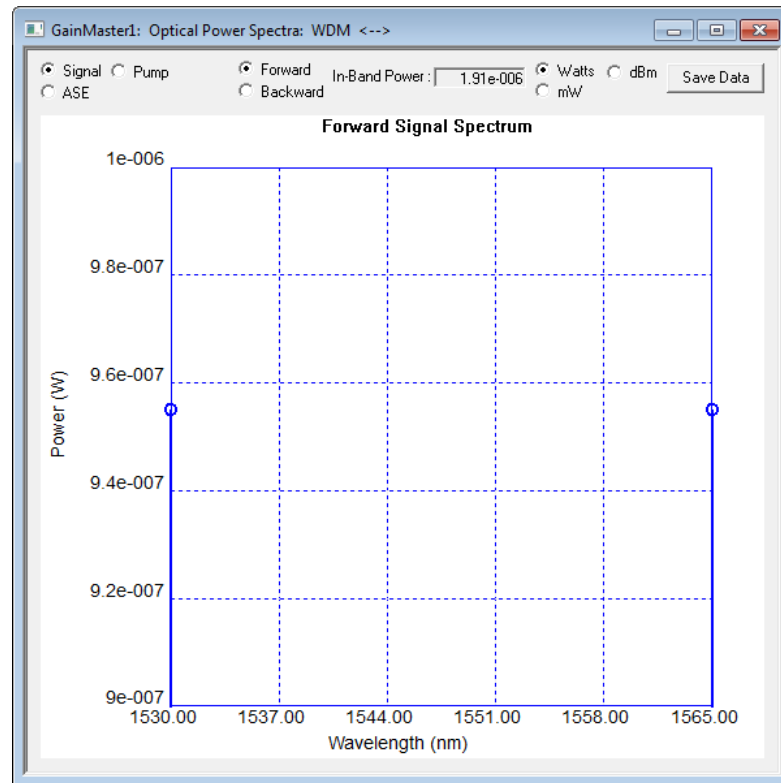


Рисунок 4.13 – Спектр вихідного сигналу мультиплексора

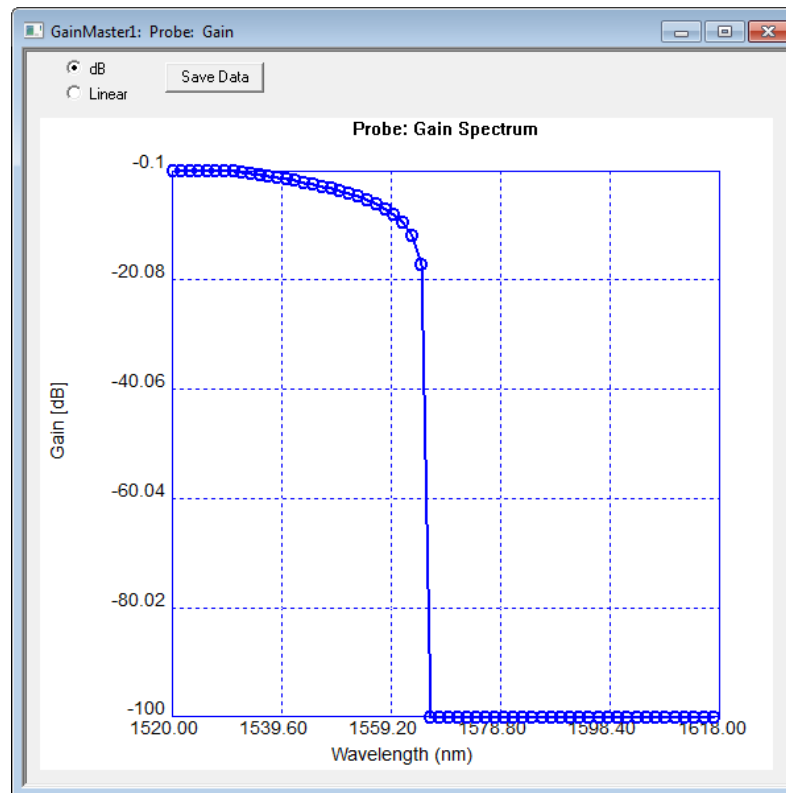


Рисунок 4.14 – Згасання у мультиплексорі залежно від довжини хвилі

Схема моделювання оптичного демультиплексора наведена на рис. 4.15.

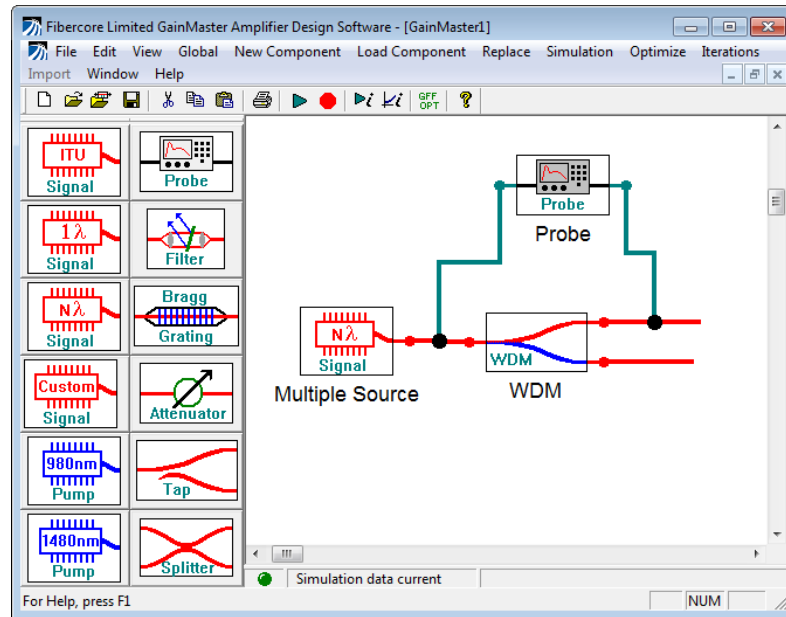


Рисунок 4.15 – Схема моделювання оптичного демультиплексора

На рисунках 4.16, 4.17 та 4.18 наведені відповідно спектри вхідного сигналу та на першому і на другому виходах оптичного демультиплексора.

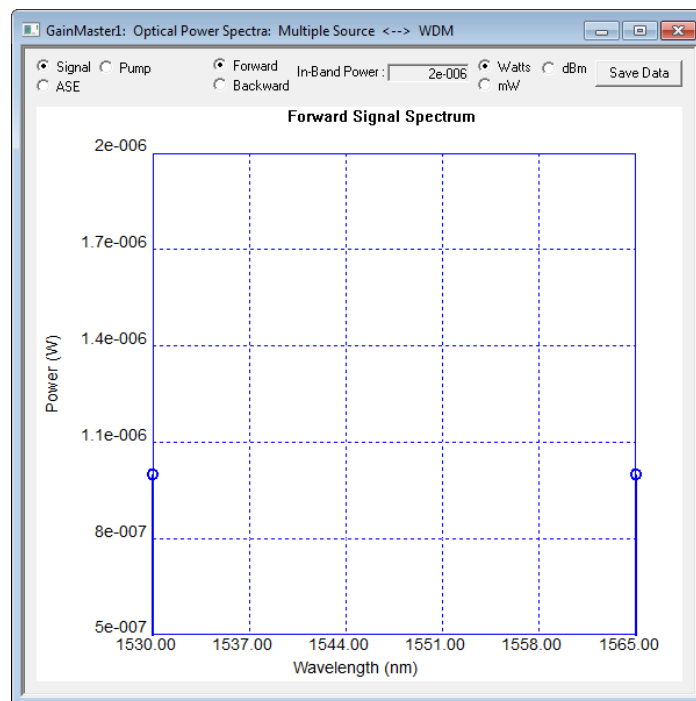


Рисунок 4.16 – Вхідний сигнал оптичного демультиплексора

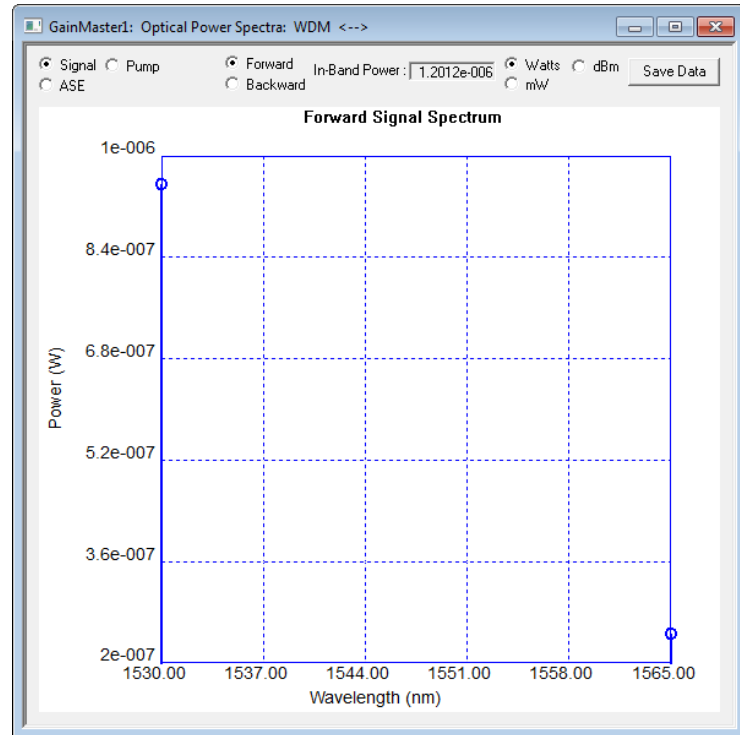


Рисунок 4.17 – Спектр сигналу на першому виході демультиплексора

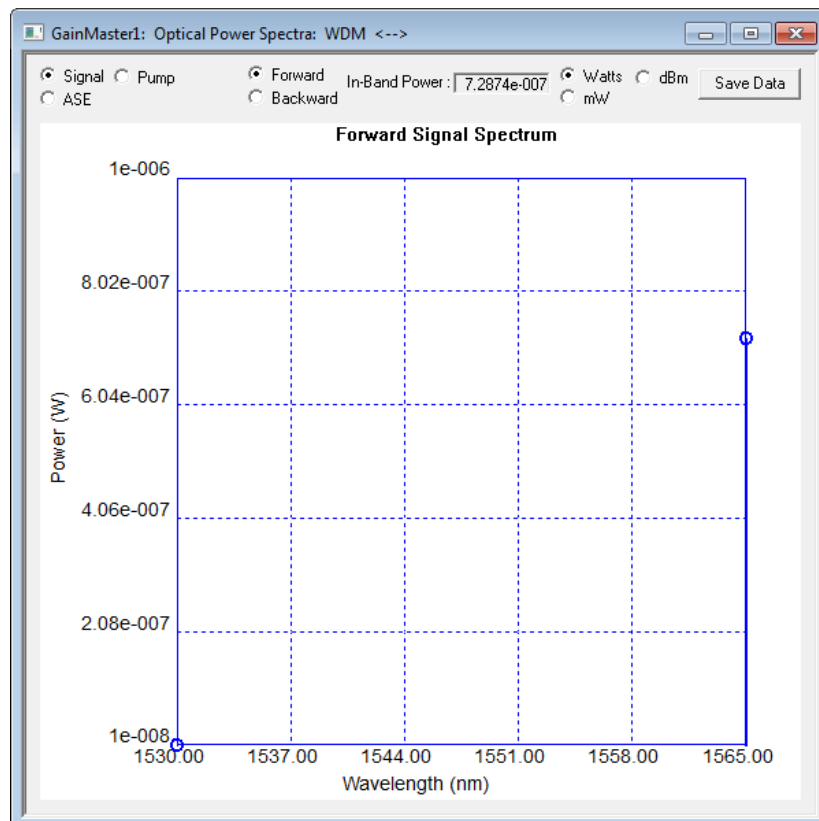


Рисунок 4.18 – Спектр сигналу на другому виході демультиплексора

Схема для моделювання оптичного підсилювача представлена на рисунку 4.19.

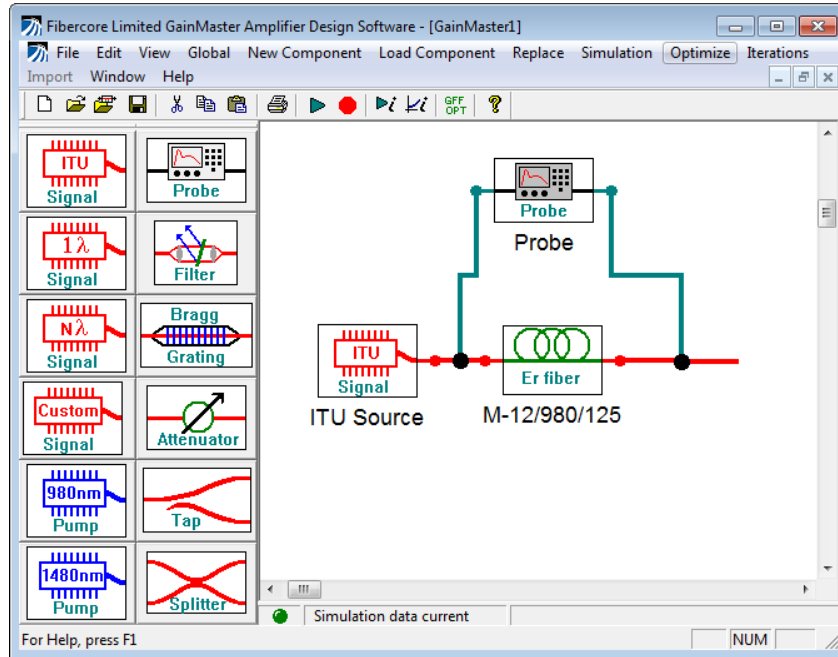


Рисунок 4.19 – Схема для моделювання оптичного підсилювача

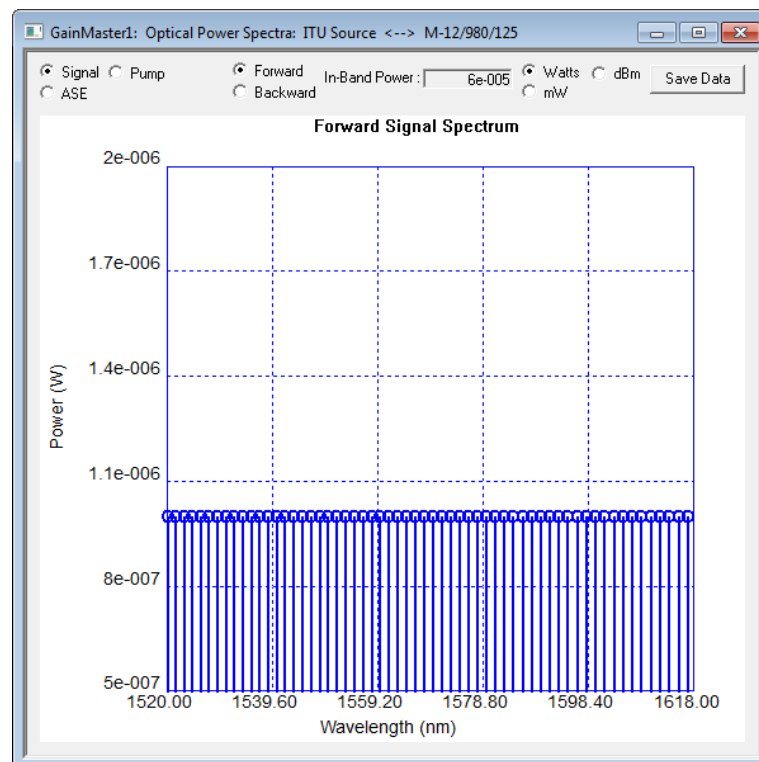


Рисунок 4.20 – Спектр сигналу на вході підсилювача

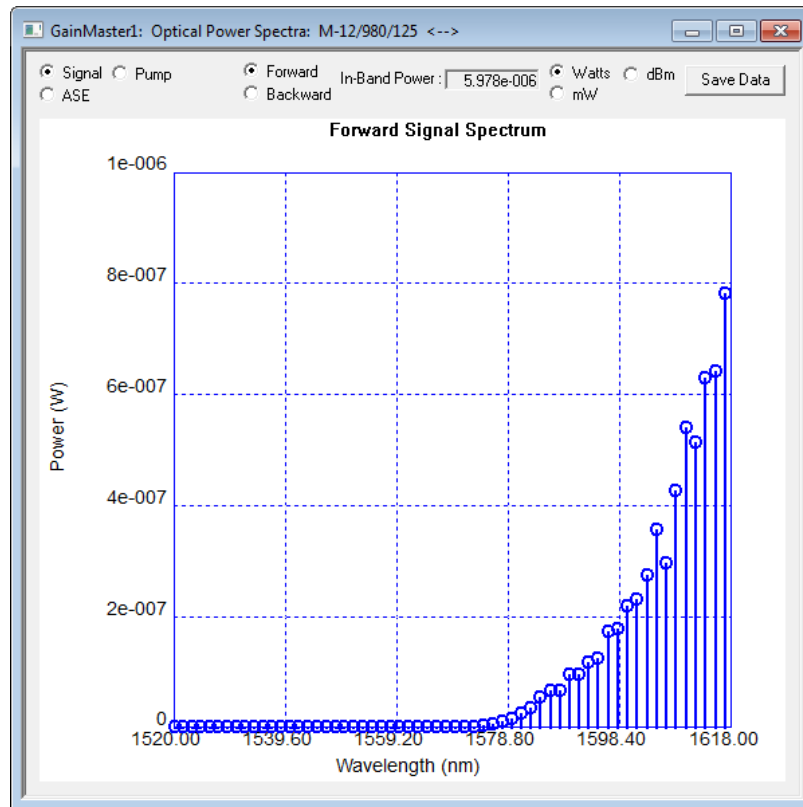


Рисунок 4.21 – Спектр сигналу на виході підсилювача

На рисунку 4.22 наведено залежність коефіцієнта підсилення від довжини хвилі.

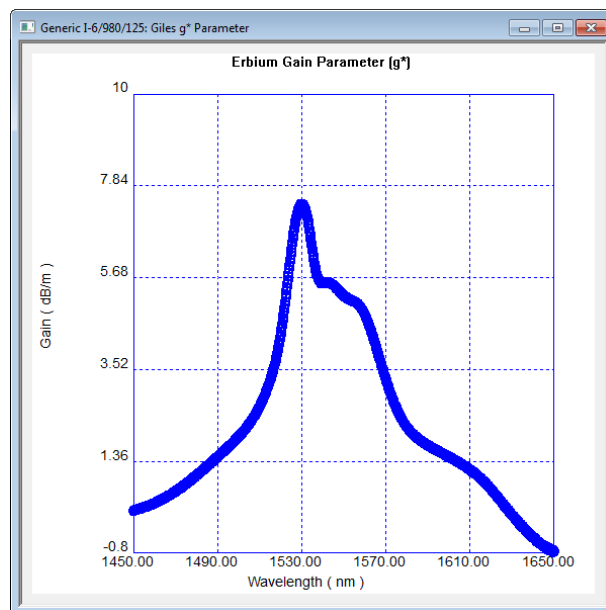


Рисунок 4.22 – Залежність коефіцієнта підсилення від довжини хвилі

На рисунку 4.23 наведено залежність шумів підсилювача від довжини хвилі.

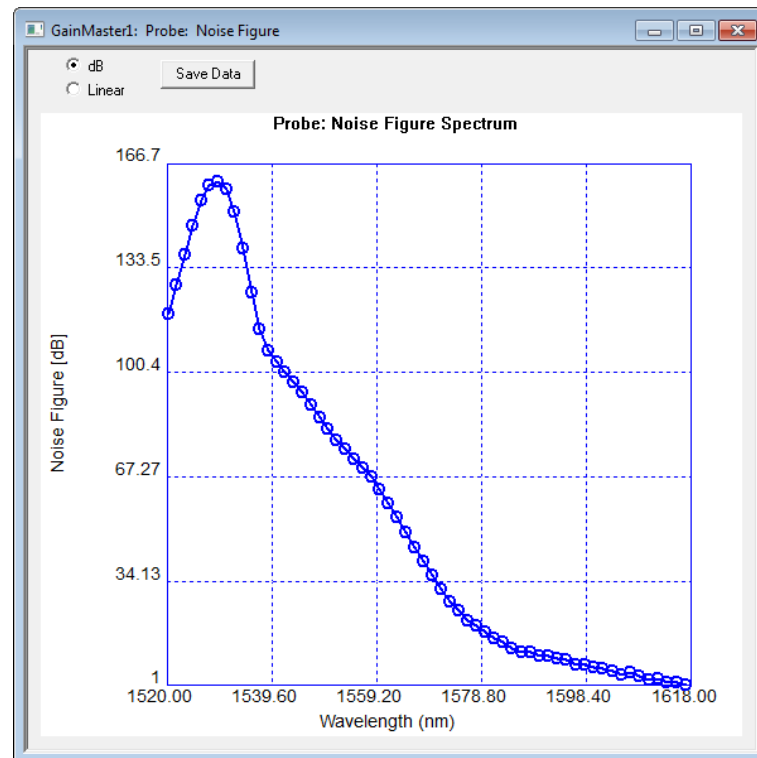


Рисунок 4.23 – Залежність шумів підсилювача від довжини хвилі

Видно, що оптичний підсилювач забезпечує у смузі довжин хвиль 1530-1565 нм підсилення сигналу орієнтовно в 4 рази. При цьому коефіцієнт шуму лежить у межах від 35 до 160 дБ.

4.3 Висновки по розділу

Комп'ютерне моделювання стосувалося пристроїв, які використовуються у ВОСП для високошвидкісного передавання даних. Це оптичні з'єднувачі, оптичні розгалужувачі, оптичні ізолятори, оптичні мультиплексори, оптичні демультимплексори, оптичні підсилювачі. Досліджувались функціональні можливості пристроїв та параметри згасання і коефіцієнта шуму. З'ясовано, що найбільше згасання вноситься оптичними розгалужувачами, а найбільший рівень шумів створює оптичний підсилювач. Спостерігається незначна залежність параметрів від довжини хвилі у заданому діапазоні досліджень.

5 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» можна

охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (повному або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	45	0	45
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	40	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0

Середнє значення балів експертів	43,3
-----------------------------------------	------

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПШБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	63	63	63
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	63,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [14]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 43,3$, $k_{теор} = 63,0$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 43,3 + 0,4 \cdot 63,00 = 51,20 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних», даний рівень становить 51,20 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп,

науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [14]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 16850,00 \cdot 34 / 22 = 26040,91 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16850,00	765,91	34	26040,91
Ст. науковий співробітник	15600,00	709,09	22	15600,00
Інженер-розробник телекомунікаційних мереж 1-ї категорії	14600,00	663,64	22	14600,00
Технік 1-ї категорії	8100,00	368,18	15	5522,73
Всього				61763,64

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду [14];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 56,53 \cdot 7,90 = 446,60 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця розробника телекомунікаційних мереж	7,90	2	1,10	56,53	446,60
Інсталяція програмного забезпечення середовища розробки і моделювання	7,30	3	1,35	69,38	506,47
Компіляція програмних блоків моделювання	5,80	4	1,50	77,09	447,11

Всього	1400,18
--------	---------

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (61763,64 + 1400,18) \cdot 10 / 100\% = 6316,38 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (61763,64 + 1400,18 + 6316,38) \cdot 22 / 100\% = 15285,64 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому

дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{\text{в}j}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 212,00 \cdot 1,01 - 0,0 \cdot 0,0 = 642,36 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір А4 500	212,00	3,0	0,0	0,0	642,36
Папір для записів А5 250	161,00	2,0	0,0	0,0	325,22
Органайзер офісний	198,00	5,0	0,0	0,0	999,90
Набір канцелярський офісний	216,00	5,0	0,0	0,0	1090,80
Картридж для принтера	1110,00	2,0	0,0	0,0	2242,20
Диск оптичний CD-RW	22,10	4,0	0,0	0,0	89,28
Flesh-пам'ять DATA 32 GB	189,00	3,0	0,0	0,0	572,67
Всього					5962,43

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі

для забезпечення високошвидкісного передавання даних», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 2 \cdot 150,00 \cdot 1,01 = 303,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Атенюатори	2	150,00	303,00
Кабелі інтерфейсів	3	850,00	2575,50
Конектори	2	35,00	70,70
Мережева карта Mikrotik R11e-LoRa	1	3152,00	3183,52
Оптоволоконний кабель	5	25,00	126,25
Всього			6258,97

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 32671,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 32997,71 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Серверне обладнання на основі ЕОМ DELL A345-F71BC-78 підтримки високошвидкісної мережі	1	32671,00	32997,71
Волоконно-оптичний інтерферометр OFV-552	1	8450,00	8534,50
Всього			41532,21

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог}} \cdot C_{\text{прог},i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{прог}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог},i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7646,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8028,30 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладне програмне забезпечення розробки та моделювання	1	7646,00	8028,30

Моделювання з використанням програмного пакету Gain Master™	1	5799,00	6088,95
Всього			14117,25

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{\bar{o}}}{T_e} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\bar{o}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_e – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (42155,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3512,92 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс аналітичної системи	42155,00	2	2	3512,92
Персональний комп'ютер	16799,00	2	2	1399,92
Спеціалізоване робоче місце дослідника	7999,00	5	2	266,63
Пристрій виводу текстової інформації	6500,00	4	2	270,83
Оргтехніка	8650,00	5	2	288,33
Приміщення лабораторії досліджень	413500,00	20	2	3445,83
ОС Windows 11	6500,00	2	2	541,67

Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6540,00	2	2	545,00
Всього				10271,13

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,30 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 540,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс аналітичної системи	0,30	240,0	540,00
Персональний комп'ютер	0,22	240,0	396,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,08	200,0	120,00
Пристрій виводу текстової інформації	0,18	4,5	6,08
Оргтехніка	0,50	2,0	7,50
Серверне обладнання на основі EOM DELL A345-F71BC-78 підтримки високошвидкісної мережі	0,32	110,0	264,00
Волоконно-оптичний інтерферометр OFV-552	0,10	110,0	82,50
Всього			1416,08

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (61763,64 + 1400,18) \cdot 20 / 100\% = 12632,76 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (61763,64 + 1400,18) \cdot 30 / 100\% = 18949,14 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_g = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ig}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ig} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ig} = 50\%$.

$$I_g = (61763,64 + 1400,18) \cdot 50 / 100\% = 31581,91 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (61763,64 + 1400,18) \cdot 100 / 100\% = 63163,81 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{дод} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 61763,64 + 1400,18 + 6316,38 + 15285,64 + 5962,43 + 6258,97 + 41532,21 + 14117,25 + 10271,13 + 1416,08 + 12632,76 + 18949,14 + 31581,91 + 63163,81 = 290651,53 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 290651,53 / 0,9 = 322946,15 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 322946,15$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_c , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [14].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 322,9 \cdot 0,17 = 9,51.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» складають 322946,15 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-

дослідної роботи на тему «Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

У приміщенні, де відбувався аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передання даних присутні такі шкідливі та небезпечні фактори [15]:

- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- відсутність чи нестача природного світла;
- фізичні перевантаження (статичні);
- нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час виконання роботи.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Широке промислове та побутове використання ПК актуалізувало питання охорони праці його користувачів. Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з ПК, зокрема можливість зорових, нервово-емоційних переживань, серцево-судинних захворювань.

Виходячи з цього, роботодавець повинен забезпечити гігієнічні й ергономічні вимоги щодо організації робочих приміщень для експлуатації ПК, робочого середовища, робочих місць з ПК, режиму праці і відпочинку при роботі з ПК тощо, які викладені у Правилах.

Основні вимоги до виробничого приміщення для експлуатації ПК:

- приміщення не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;

– площа на одне робоче місце в такому приміщенні повинна становити не менше $6,0\text{ м}^2$, а об'єм не менше $20,0\text{ м}^3$;

– приміщення повинно мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [16];

– необхідно щоденно проводити вологе прибирання;

– поруч з приміщенням для роботи з ПК мають бути обладнані: побутова кімната для відпочинку під час роботи; кімната психологічного розвантаження.

Організація робочого місця користувача комп'ютера повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам. Виконуючи практичні завдання щодо використання робочої пози, потрібно:

– зменшувати величину статичних напружень;

– розподіляти статичні напруження;

– передбачати можливість змін пози під час роботи.

Для роботи операторів ПК у положенні сидячи рекомендовані такі параметри робочого простору: ширина - не менше 700 мм, глибина - не менше 400 мм, висота робочої поверхні над підлогою – 700 ...750 мм. Під робочою поверхнею необхідно передбачити простір для ніг: висота - менше 600 мм, ширина - не менше 500 мм, глибина - не менше 400 мм. За необхідності огляду робочого місця його висота не повинна перевищувати 1200 мм

Під час роботи сидячи нижня частина корпусу розслаблена, а основне статичне навантаження припадає на м'язи шиї, спини, таза, стегон. Неправильна сидяча поза може викликати застій крові в ногах, а якщо виконується великий обсяг роботи для пальців рук – запалення суглобів.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

– висота столу повинна бути обрана з урахуванням можливості сидіти вільно, у зручній позі, при необхідності спираючи на підлокітники;

– нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб оператор міг зручно сидіти, не був змушений підбирати ноги;

– поверхня столу повинна мати властивості, що виключають появу відблисків у поле зору оператора;

– конструкція столу повинна передбачати наявність висувних шухляд (не менш 3-х для збереження документації, канцелярського приладдя, особистих речей).

На робочому місці розробника існує небезпека поразки електричним струмом. Електричний струм, впливаючи на тіло людини, може заподіяти йому явні чи приховані пошкодження, в тому числі опіки всього тіла або окремих його ділянок; електричні удари характерні внутрішніми ушкодженнями тощо.

Приміщення, де виконується аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передання даних, згідно ПУЕ «Правила влаштування електроустановок» класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки [16].

Безпечна експлуатація електроустановок здійснюється у відповідності з вимогами ПУЕ [16] та «Правила безпечної експлуатації електроустановок» [17] і передбачає такі заходи та засоби:

– недоступність струмоведучих частин, прокладання електрокабелів під підлогою, в спеціальних каналах, скрите виконання освітлювальної проводки, ізоляцію струмо-провідних елементів ($R_{із} \geq 0.5 \text{ МОм}$);

– захисне заземлення всіх металевих струмопровідних частин електроустановок та ПК ($R_{з \text{ доп}} \leq 4 \text{ Ом}$);

– використання пониженої напруги 36 В (для аварійного освітлення щита) в операторському пункті та виробничому приміщенні;

– застосування попереджувальної сигналізації, написів, плакатів при проведенні планово-попереджувальних ремонтів і профілактичних випробувань електрообладнання;

– проведення організаційних заходів (спеціальне навчання, атестація та переатестація осіб електротехнічного персоналу, інструктажі тощо).

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Температура, відносна вологість, швидкість руху повітря біля тіла людини, а також температура стін і навколишніх предметів утворюють мікроклімат на робочому місці. Температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря вимірюють на висоті 1,0 м від підлоги або робочої площадки при роботах, що виконуються сидячи, і на висоті 1,5 м – при роботах, що виконуються стоячи, і не ближче 1 м від нагрівальних приладів і зовнішніх стін.

Робота, яка виконується розробником згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [19]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ згідно ДСН 3.3.6.042-99 [19]. Джерелами запиленості повітря в приміщенні є одяг людей і пил, що проникає з вулиці. У приміщенні немає значного виділення шкідливих газів. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

Правильно спроектоване освітлення, яке відповідає вимогам санітарних норм здійснює позитивний психологічний вплив на працівника, знижує втому, створює оптимальні умови для роботи органів зору, і тим самим підвищує безпеку праці і знижує травматизм.

Освітлення створюється природним сонячним світлом (природне) і світлом від електричних ламп (штучне). Природне освітлення є найсприятливішим для людини, так як сонячне світло має оптимальний спектр, в ньому наявна достатня кількість ультрафіолетових променів. Штучне освітлення передбачається у приміщеннях, де недостатньо природного світла, і для освітлення у вечірні та нічні години.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.4 (за ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення [19, 20]):

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 – 0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду.
- 3) Використання жалюзі на вікнах для регулювання кількості природного світла у приміщенні.
- 4) Загальне штучне освітлення створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

6.2.4 Виробничий шум

Шум визначають як сукупність аперіодических звуків різної інтенсивності та частоти. Шум заважає роботі, знижує працездатність і продуктивність праці, при тривалій і інтенсивній дії викликає захворювання організму.

У закритих приміщеннях шум, багаторазово відбиваючись від стін та стелі, посилюється. Тому рекомендується проводити їх акустичну обробку за допомогою звукопоглинальних облицювань з пористих матеріалів, які мають великий коефіцієнт звукопоглинання.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [21, 22].

Таблиця 6.5 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для зменшення шуму здійснюють своєчасний ремонт та профілактику обладнання.

6.2.5 Виробничі випромінювання

На робочому місці розробника у зв'язку із експлуатацією електричної апаратури, існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного випромінювання.

Ступінь біологічного впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від частоти коливань, напруженості та інтенсивності поля, тривалості його впливу.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань шкодить здоров'ю людини. Від цього страждає передусім нервова і серцево-судинна системи, виникають головний біль і перевтома, знижується точність робочих рухів, порушується сон. Електромагнітне випромінювання викликає зміни тиску крові, гіпотонію або гіпертонію.

Рівні електромагнітних випромінювань моніторів, які вважаються безпечними для здоров'я користувачів, регламентуються нормами MPR II 1990:10 Шведського національного комітету з вимірювань та досліджень (табл.6.6) [23, 24].

Таблиця 6.6 - Допустимі рівні випромінювань моніторів ПК

Вид поля	ТСО	MPR II
Змінне електричне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц	10 В/м 1 В/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора	2,5 В/м 2,5 В/м на відстані 0,5 м навколо монітора
Змінне магнітне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц	250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора	250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на відстані 0,5 м навколо монітора

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань використовують обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні та встановлюють раціональні режими експлуатації ПК і роботи працюючого персоналу.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів НС

6.3.1 Дія сейсмічних коливань на виробничі приміщення

Сейсмічні коливання, в основному, спричинюються землетрусами.

Землетрус – це підземні поштовхи і коливання земної поверхні, викликані природними причинами. Землетрус є найбільш небезпечним стихійним лихом. Область виникнення підземного поштовху є осередком землетрусу, в межах якого здійснюється процес виділення накопиченої енергії величезної сили, що поширюється у вигляді повздовжніх і поперечних пружних сейсмічних хвиль. Землетрус може тривати від кількох секунд до кількох діб [25].

Будинки та споруди (головним чином їхні несучі конструкції) характеризуються сейсмостійкістю – здатністю протистояти сейсмічним впливам, зберігаючи свої експлуатаційні якості.

Критерієм стійкості виробничих приміщень в умовах дії сейсмічних коливань є його інтенсивність, яка вимірюється в балах за шкалою MSK, в залежності від якої можна визначити ступінь руйнування споруд.

6.3.2 Оцінка безпеки роботи виробничого приміщення в умовах сейсмічних коливань

Вихідні дані: $I = 6$ балів за шкалою MSK.

Оцінка безпеки роботи в умовах сейсмічних коливань проводиться за величиною інтенсивності I землетрусу, яка характеризує ступінь руйнувань. Інтенсивність землетрусу вимірюється в балах за шкалою MSK і може знаходитись в межах від 0 до 12 балів.

Якщо інтенсивність землетрусу менше 4 балів, то руйнувань будівель та споруд не виникає. При інтенсивності землетрусу в 4-5 балів відбуваються слабкі руйнування, а при 6 балів і вище – відбуваються середні та сильні руйнування будівель та споруд [26, 27].

Так як в нашому випадку згідно умови $I = 6$ балів за шкалою MSK, виробничого приміщення отримають середні або сильні руйнування, тому прийнято рішення про проведення евакуації людей з приміщень у відкриту місцевість протягом 25–30 с.

6.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення стійкості роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій

Прогнозування сейсмічних коливань (землетрусів) може бути довгостроковим і короткостроковим. Воно здійснюється мережею сейсмічних станцій. Предвісниками землетрусів є ріст малих поштовхів, підйом води в свердловинах, деформація поверхні землі, підвищення рівня радіації (за рахунок радону), незвичайна (неспокійна) поведінка тварин і птахів.

Попередні заходи захисту від землетрусу включають [28]:

- сейсмостійке будівництво;
- підготовку служб спасіння і ліквідації наслідків;
- нейтралізація джерел підвищеної небезпеки;
- навчання населення правилам поведінки під час землетрусу;
- наявність в кожному будинку (квартирі) аптечок першої медичної допомоги;
- закріплення в будинках столів, шаф тощо.

З початку землетрусу люди, люди що перебувають в будинку до 2-х поверхів, повинні негайно залишити приміщення і вийти на відкрите місце (за 25 – 30 с.). При неможливості залишити приміщення, стати в перерізі дверей, капітальних внутрішніх стін, вимкнути світло, газ. Після припинення підземних поштовхів покинути приміщення (ліфтом користуватись заборонено). Далі треба приступити до рятування людей.

Дієвим заходом протидії сейсмічним коливанням є антисейсмічне будівництво, що являє собою зведення будинків і споруд з урахуванням можливого впливу на них сейсмічних (інерційних) сил. Здійснюється в районах, підданих землетрусам силою 7-9 балів. Сейсмостійкість споруд забезпечується спеціальними конструктивними заходами, що підвищують міцність і монолітність несучих конструкцій (наприклад, використання для багатоповерхових будинків каркасних конструкцій зі сталі і залізобетону, з монолітними залізобетонними стінами), та інше. Велике значення в антисейсмічному будівництві має висока якість будівельних матеріалів і робіт.

6.4 Висновки до розділу

Досліджено стійкість роботи в умовах дії загрозливих чинників НС. З дослідження дії землетрусу на стійкість роботи виробничого приміщення можна зробити висновок, що виробниче приміщення отримає середні або сильні руйнування. Тому розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

Для виконання високих вимог щодо високошвидкісної доставки інформаційних даних ВОСП повинна забезпечувати високу пропускну спроможність. У роботі показано, що генеральним напрямом у підвищенні пропускну спроможності є створення елементної бази за допомогою нових матеріалів, що використовують модель надградки. Найбільш перспективним матеріалом для створення надграток є ізотопи вихідного хімічного елемента. Для отримання низькорозмірних ізотопічних надграток необхідно удосконалювати технології виготовлення, наприклад, використовуючи нейтронний пучок, що має найменші дисперсійні спотворення, в порівнянні з іншими джерелами опромінення. Подальше підвищення пропускну спроможності можливе лише у разі переходу на квантові принципи передачі та обробки інформації.

Виконано порівняння методів мультиплексування: хвильового WDM і часового TDM (WDM-технологія та TDM-технологія) за критерієм досяжної пропускну здатності ВОСП у лінійних трактах одномодових оптичних волокон. З'ясовано, що потенційні можливості ущільнення ОВ за пропускну здатністю однакові для технологій TDM та WDM. Показано, що технічна реалізація потенційних можливостей технологій TDM та WDM залежить від наявності відповідної елементної бази. При однакових швидкостях передачі сигналів та захищеності довжина підсилювальної ділянки для технології WDM менша, ніж для технології TDM. Зменшення відбувається не пропорційно числу хвильових каналів, а відповідно до логарифмічної залежності.

Аналіз показує, що найшвидший канал, що використовує TDM-технологію, може бути використаний як один з багатьох трактів в ОВ WDM-технології. Отже, WDM-технологія має незаперечну перевагу перед іншими технологіями за якими будуються телекомунікаційні транспортні системи. Технологія WDM дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність лінії зв'язку, дає можливість організувати двосторонню передачу даних по одному волокну,

причому нарощування пропускної здатності може відбуватись на вже існуючому волоконно-оптичному кабелі.

Проведено розрахунок параметрів оптичного лінійного тракту ВОСП зі спектральним ущільненням, розглянуті особливості структури ОЛП, здійснено вибір робочої довжини хвилі, а також проведена оцінка параметрів оптичного волокна.

Було обрано на основі порівняльного аналізу обладнання джерела випромінювання і фотоприймача. У фотодіодів InGaAs/InP APD, призначених для ВОСП, що працюють з великою довжиною хвилі, можна отримати кращу чутливість, принаймні на 7 дБ, у порівнянні з pin-діодами на швидкості 2,5 Гбіт/с і 5-6 дБ на швидкості 10 Гбіт/с. Це і визначило остаточний вибір фотодіода приймача на користь InGaAs pin діода.

Розрахована довжина регенераційної ділянки за умови досягнення максимальної пропускної здатності каналу. Виявилось, що обмеження довжини регенераційної ділянки, виходячи з втрат лінії, є суворішим, ніж обмеження по дисперсії, тому її максимальна довжина становить $L_p = 100$ км.

Наведено можливі методи підвищення швидкості передавання даних. Перспективними напрямками є технології модового мультиплексування, мультиплексування за поляризацією та багатосерцевинних оптичних волокон. Технологія багатосерцевинних волокон дає найбільше підвищення пропускної здатності (сім разів). Нарощування пропускної здатності дають складні модуляційні схеми, які значно підвищують спектральну ефективність системи.

При комп'ютерному моделюванні досліджувались функціональні можливості пристроїв та параметри згасання і коефіцієнта шуму. З'ясовано, що найбільше згасання вноситься оптичними розгалужувачами, а найбільший рівень шумів створює оптичний підсилювач. Спостерігається незначна залежність параметрів від довжини хвилі у заданому діапазоні досліджень.

У роботі виконано також економічні розрахунки та наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Б. Каток. Волоконно - оптичні системи зв'язку. – К., Велар, 1999. – 483 с.
2. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв'язку / Каток В.Б., Ковтун О.С., Руденко І.Е. – Зв'язок, № 4, 2005. – с. 17-22.
3. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: <http://ua-referat.com/>.
5. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки збільшення швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75...77.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.
7. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чижмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.
8. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: „Техніка”, 2001
9. Стеклов В.К., Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. Київ: «Техніка» 2004.
10. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.
11. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Мартинюк Т.Б., Лисенко Г.Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 106 с.
12. Лисенко Г.Л. Аналіз і моделювання роботи оптичних комутаторів для високопродуктивних волоконно-оптичних мереж / Г.Л. Лисенко, С.Є.

Тужанський, О.Ф. Абудаїя // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005 - №2. – С. 69-76.

13. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1. Навчальний посібник / Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 127 с.

14. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

15. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с

16. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

17. . НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>

18. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>

19. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>

20. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

21. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с

22. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

23. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni->

normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html

24. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

25. Охорона праці та промислова безпека: навч.посіб. [К.Н.Ткачук, В.В.Зацарний, Р.Н.Сабарно та ін.]; за ред. К.Н.Ткачука, В.В.Зацарного. – К.: Основа. – 2009. – 454 с.

26. Правила улаштування електроустановок. URL: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

27. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

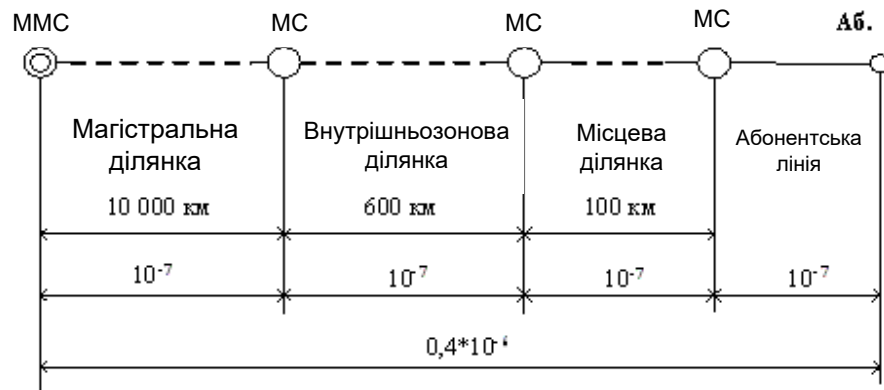
28. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.

Додаток А
(обов'язковий)

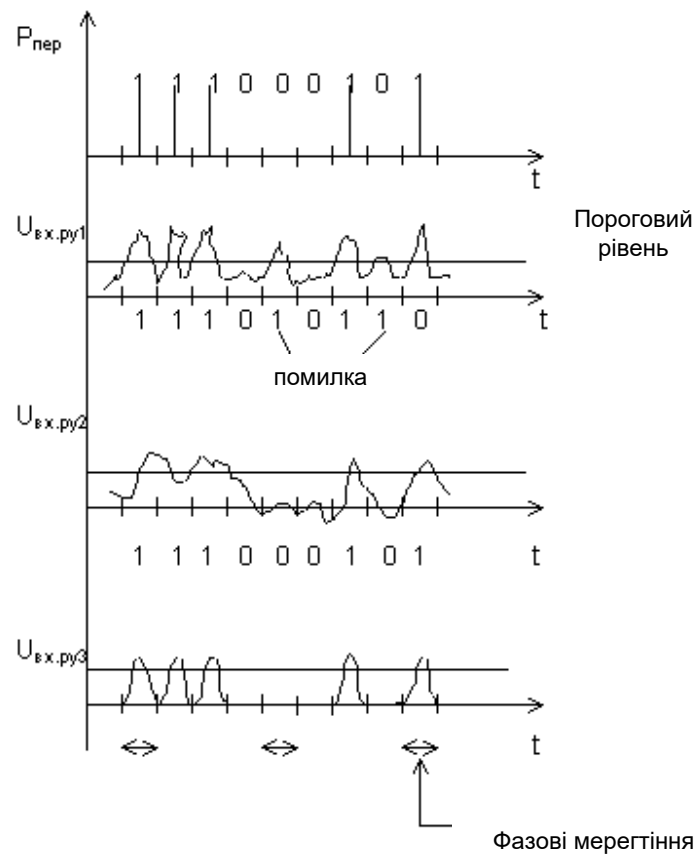
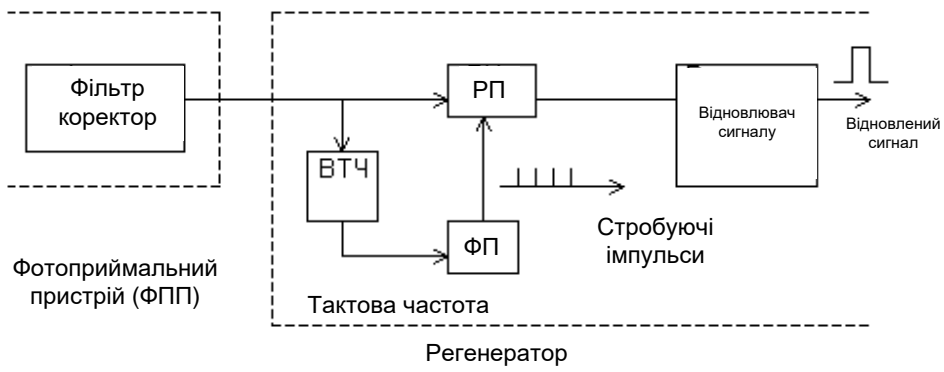
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО
ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ**

назва магістерської кваліфікаційної роботи



Нормування коефіцієнтів помилок в основному цифровому каналі при національному з'єднанні



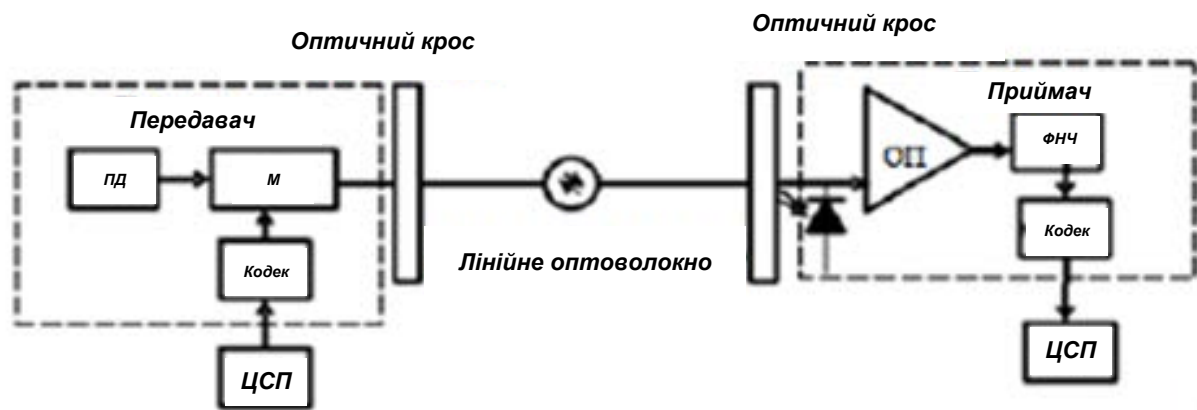
Структурна схема і часові діаграми роботи регенератора

Технічні характеристики технологій TDM та WDM

Параметри	TDM – часове мультиплексування	WDM – хвильове мультиплексування
Надійність	Висока	Висока
Пропускна здатність	Висока	Дуже висока
Комутаційні пристрої	Складні	Складні
Завантаженість ОВ	Середня	Висока
Обсяг апаратури	Великий	Середній

Економічні характеристики технологій TDM та WDM

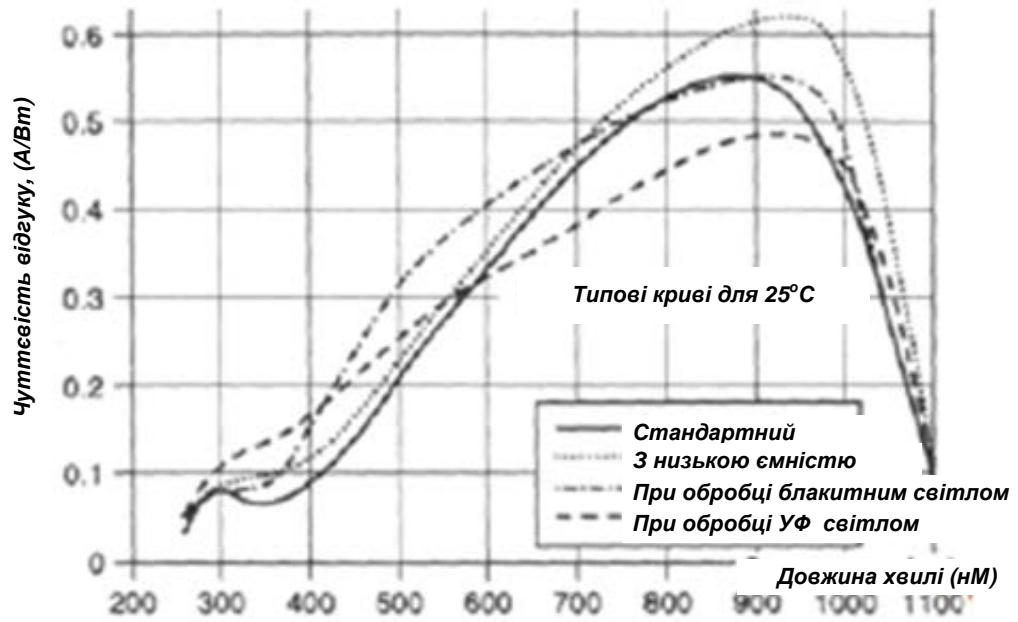
Параметри	TDM – часове мультиплексування	WDM – хвильове мультиплексування
Вартість кінцевих пунктів	Практично однакові	
Вартість лінійного тракту	Середня	Середня
Вартість тракту	Низька	Низька
Вартість передачі інформації	Низька	Низька



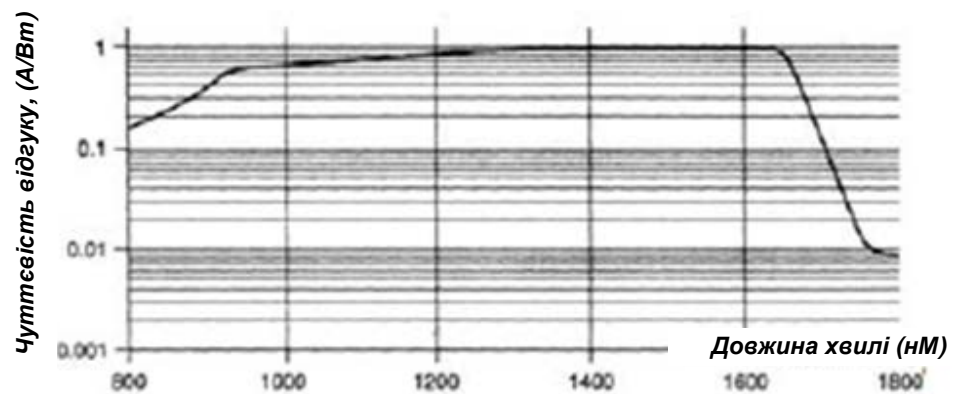
Узагальнена структурна схема ВОСП

Порівняння лазерних модулів

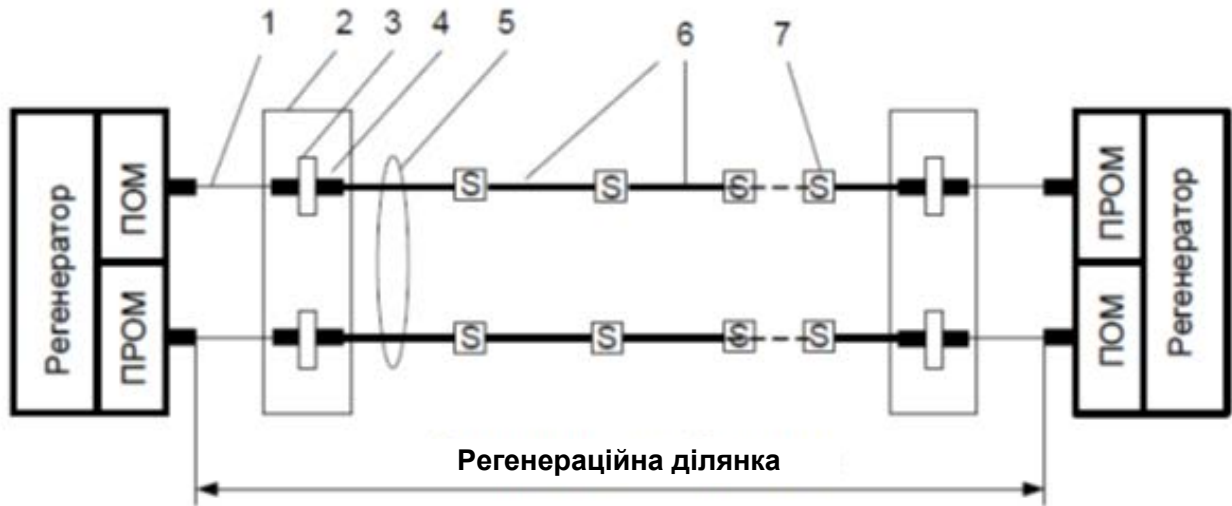
Характеристики	Тип лазерного модуля					
	ПОМ-03545	ЛПН-602м	JDSU 54ТМ-3XYZ	CyOptics D2500	CyOptics E3500	DFB (Nel NLK3C8C A KB)
Діапазон робочих довжин хвиль, нм	1500-1550	1500-1550	1500-1580	1530-1570	1530-1563	1530-1565
Потужність випромінювання, дБм	0	0	-1,5...2	1	0	-1...2
Граничний струм накачки, мА	25	30	20...50	12...50	5...35	15...30
Опір терморезист., кОм	19	10	15	10	10	10
Макс. струм мікроохолодження, А	0,5	1	1	1	1,3	1,2
Рівень придушення бічних мод, Дб	-	-	30	30	30	35
Час зрост/спаду (за рівн 20/80%), пс	-	-	150	130	125	125
Макс. швидкість передачі, Гбіт / с	0,155	0,622	2,5	2,5	2,5	10



Залежність чутливості від довжини хвилі для кремнієвих фотодіодів



Залежність чутливості від довжини хвилі для фотодіодів типу InGaAs

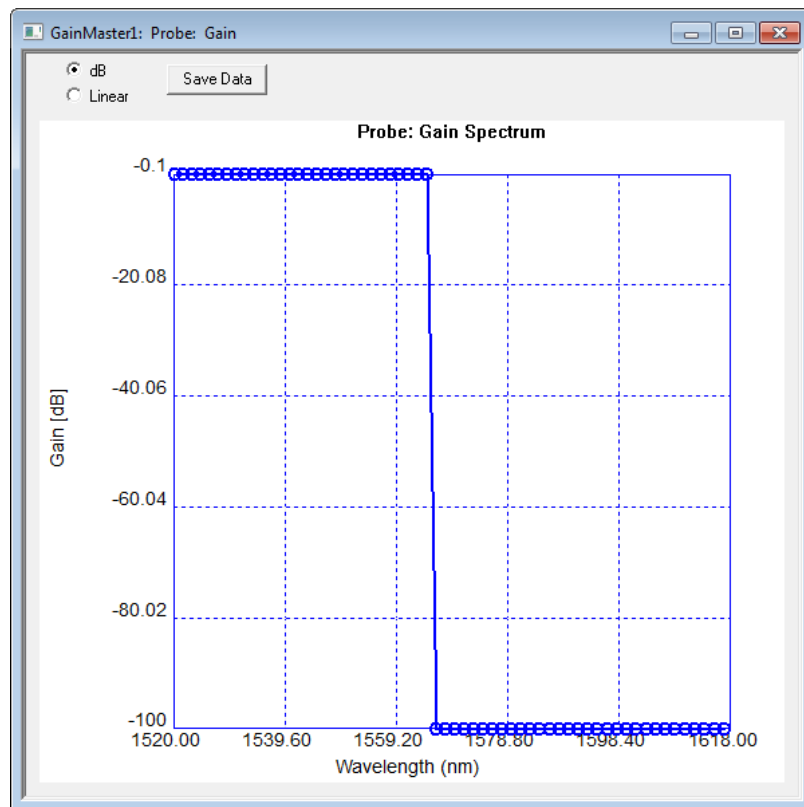


Структурна схема регенераційної ділянки

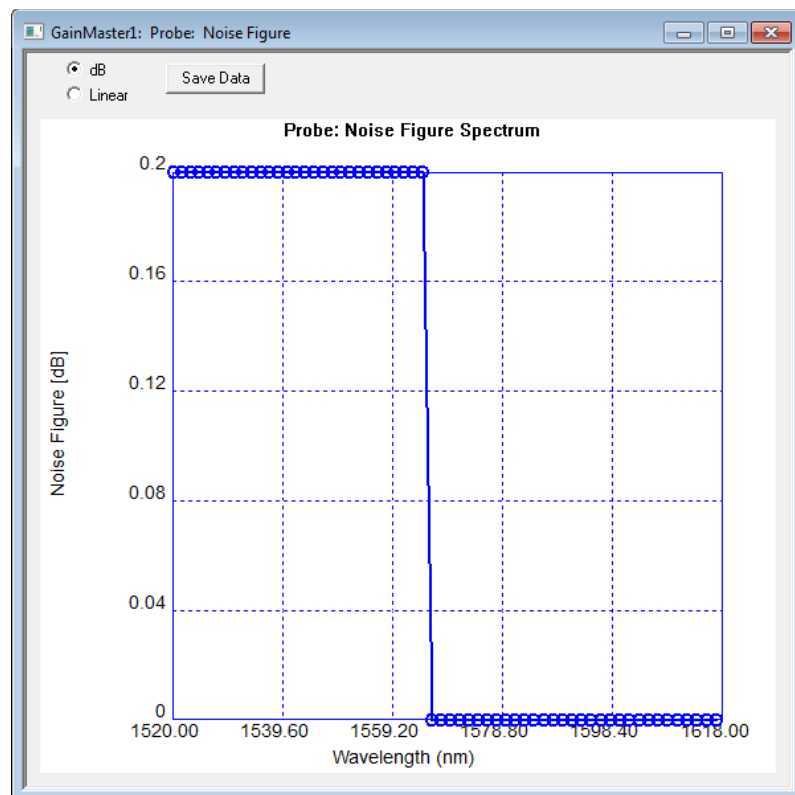
- 1- станційний одноволоконний оптичний кабель; 2-оптичний крос;
 3- сполучна розетка оптичного роз'єму; 4-конектор оптичного роз'єму;
 5 - будівельна довжина оптичного кабелю; 6 – оптичне волокно; 7- оптична з'єднувальна муфта; ПОМ - передавальний оптоелектронний модуль;
 ПРОМ – приймальний оптоелектронний модуль

Результати розрахунку довжини елементарної кабельної ділянки

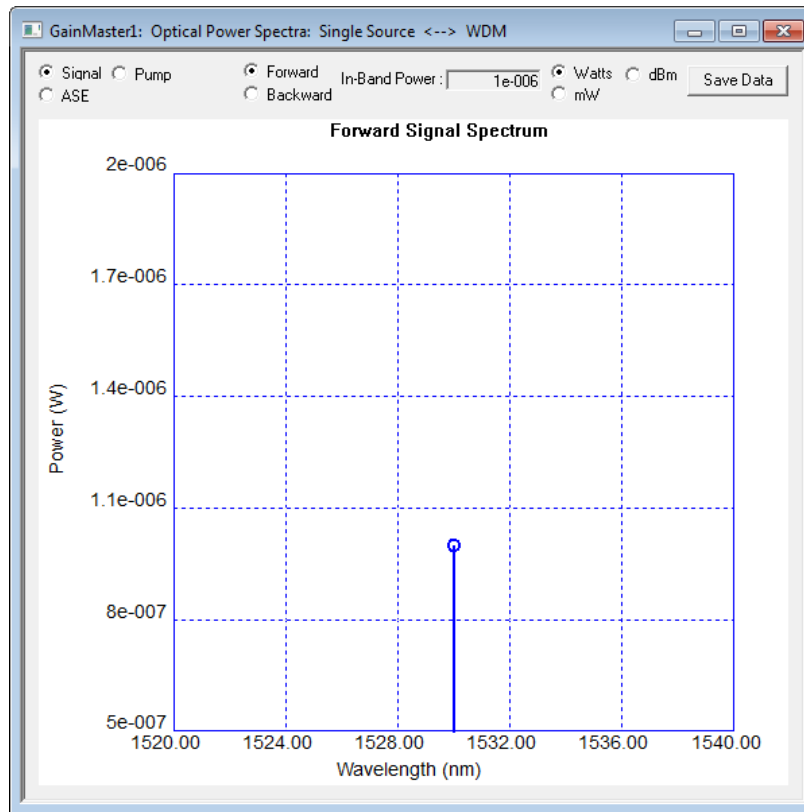
Розрахункова величина	Довжини ЕКД для оптичних інтерфейсів ADM 16/1		
	SI-L 16.1/1C $\lambda = 1,3$ мкм	SI-L 16.2/1C $\lambda = 1,55$ мкм	SI-L 16.3/1C $\lambda = 1,55$ мкм
W , дБ	27	27	31
$L_{НОМ}$, км	43,2	71,8	88,1
$L_{МИН}$, км	23,5	37,9	47,3
$L_{МАКС}$, км	48,3	77,0	95,2
L_D , км ОВ G.652	53	90	90



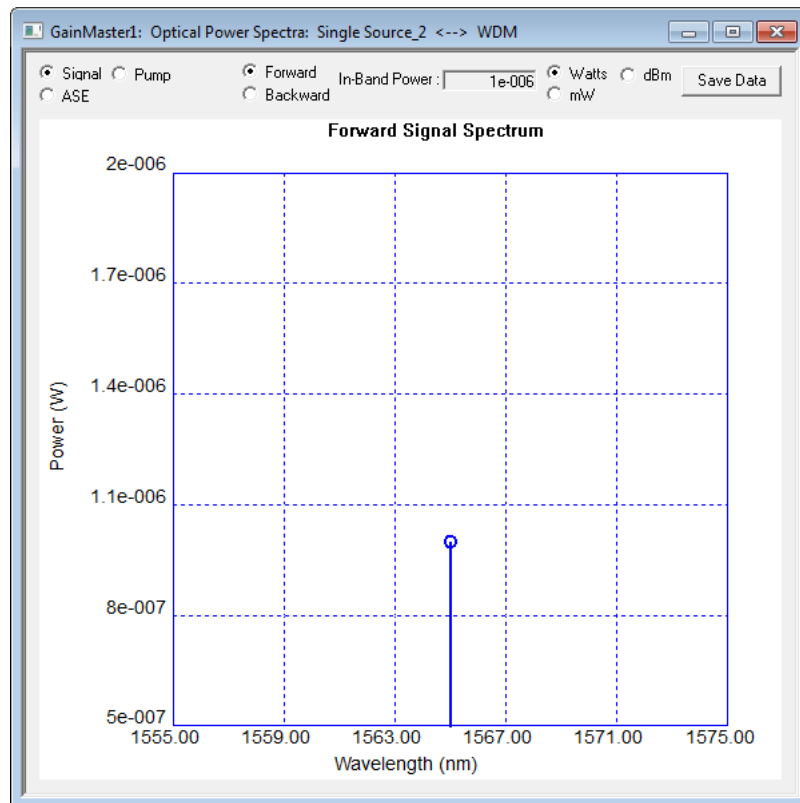
Згасання, що вноситься оптичним з'єднувачем



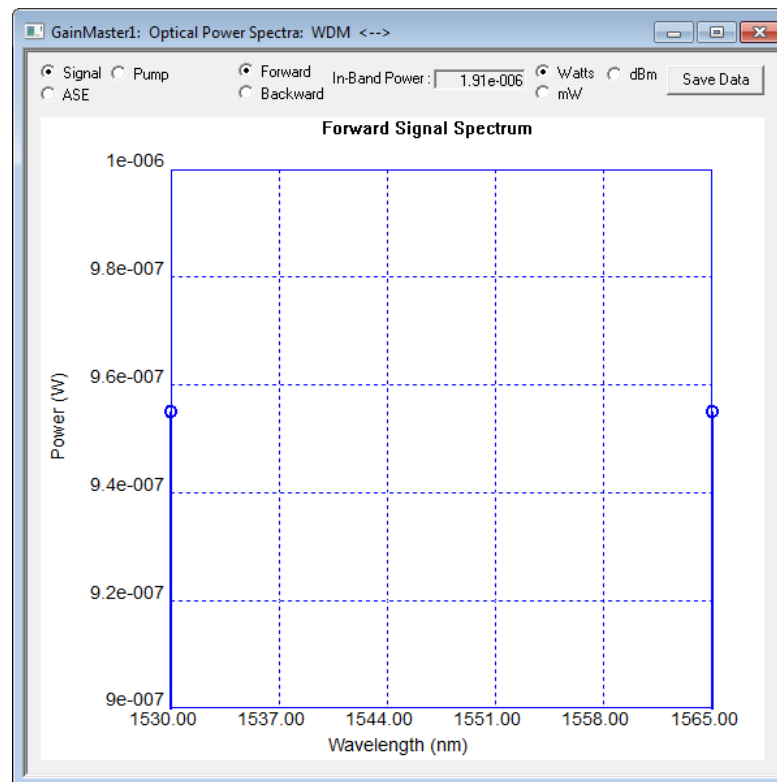
Коефіцієнт шуму на оптичному з'єднувачі



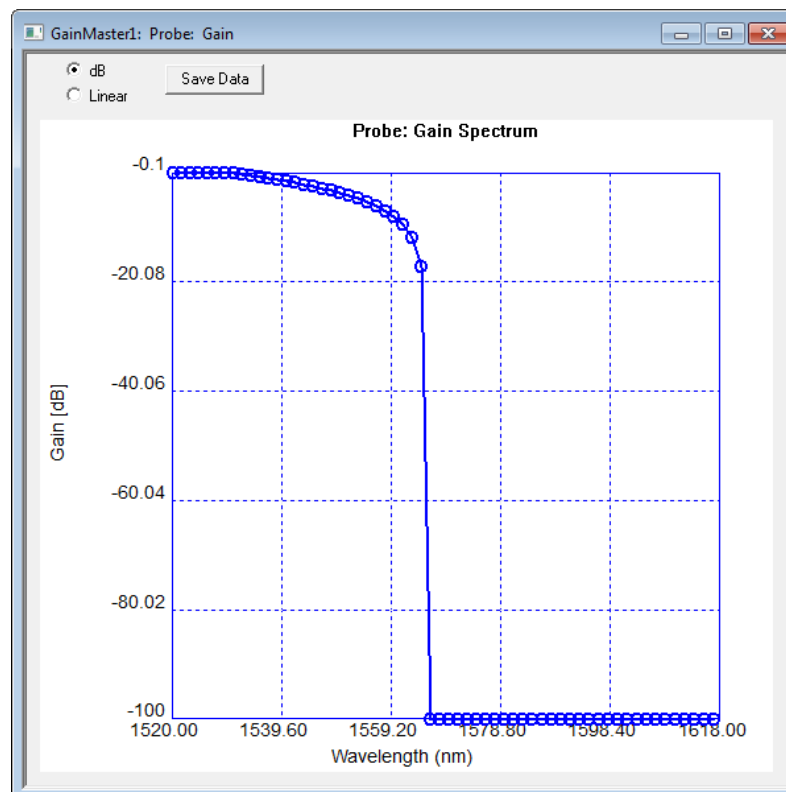
Спектр сигналу на першому вході мультиплексора



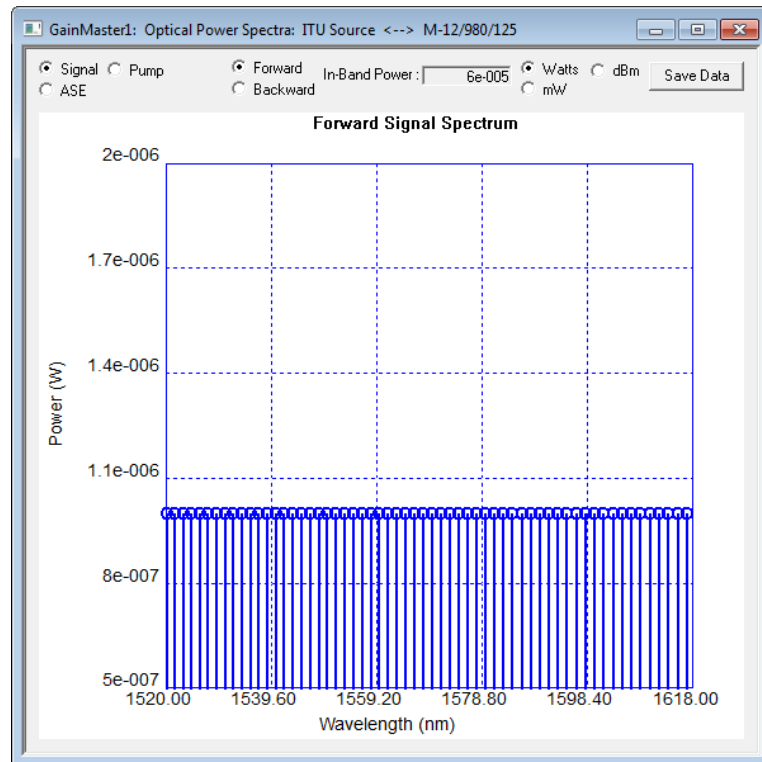
Спектр сигналу на другому вході мультиплексора



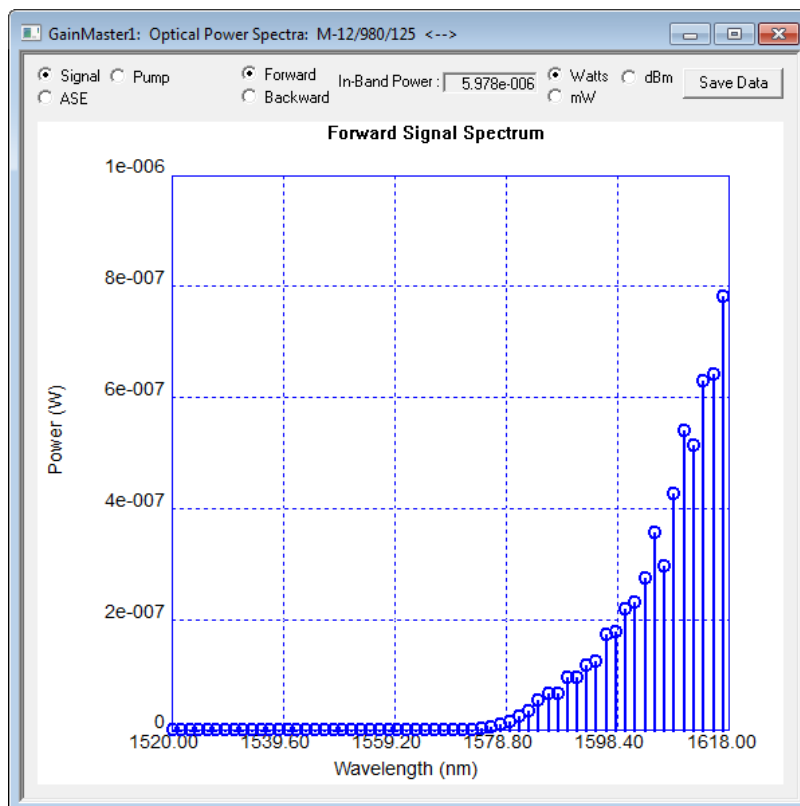
Спектр вихідного сигналу мультиплексора



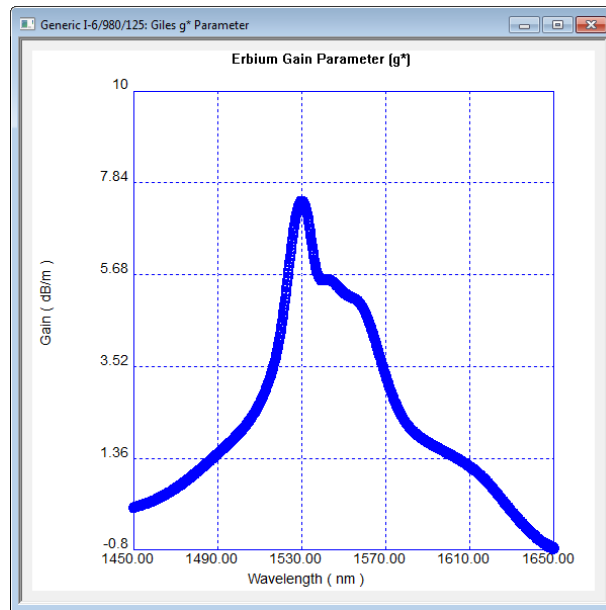
Згасання у мультиплексорі залежно від довжини хвилі



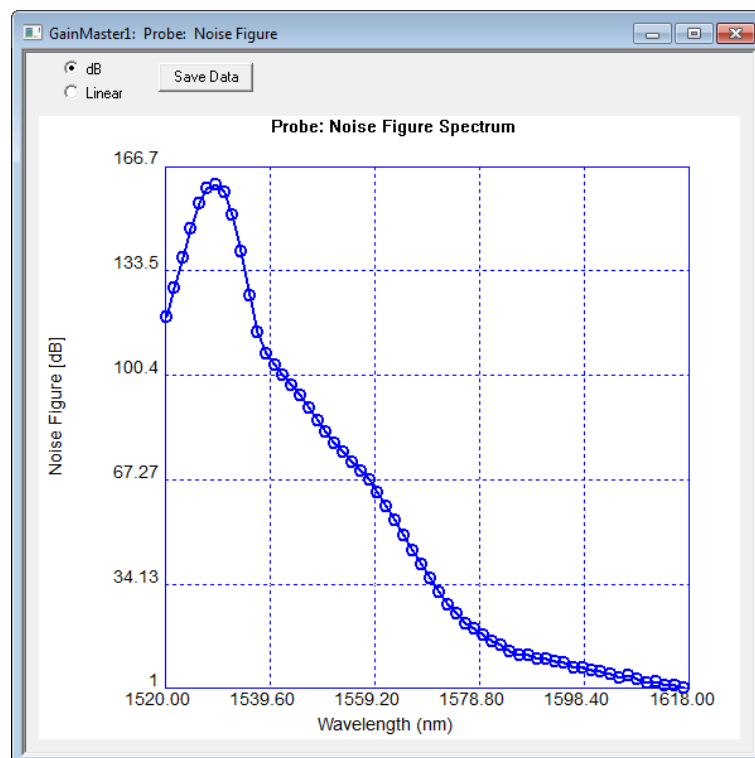
Спектр сигналу на вході підсилювача



Спектр сигналу на виході підсилювача



Залежність коефіцієнта підсилення від довжини хвилі



Залежність шумів підсилювача від довжини хвилі

Додаток Б

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Аналіз та оптимізація параметрів волоконно-оптичних систем передачі для забезпечення високошвидкісного передавання даних

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 84 % Схожість 16 %

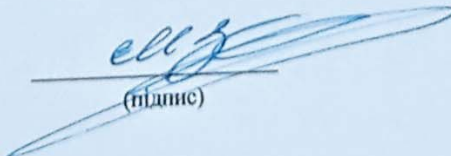
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку

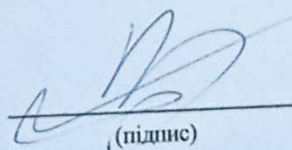

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

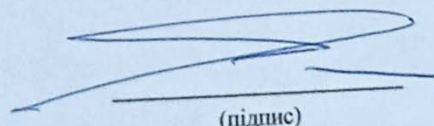
Автор роботи


(підпис)

Вітюк О.С.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

(прізвище, ініціали)