

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

**Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем**  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження волоконно-оптичної системи  
передачі інформації та розробка  
фотографічного пристрою

Виконав: студент II курсу, групи \_\_\_\_\_  
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна  
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні  
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

А. А. Бартис

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент к.т.н. Небесний О. Ю  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

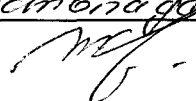
Рецензент доц. директора Запорізького Коледжа  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)  
Радіоелектроніки ЗНТУ Велюк О. І.

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»  
(код і назва)  
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи  
(код і назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри Критська Т.В.

“28” листопада 2020 року  


**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Бартиму Андрію Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Дослідження волоконно-оптичної системи передачі інформації та розробка фотоприймачного пристрою.

керівник роботи Небесний О.Ю. в.т.н. доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від “25” травня 2020 року № 601-С

2 Строк подання студентом роботи 28.11.2020

3 Вихідні дані до роботи Швидкість передачі інформації 0,8 Гбіт/с допустимий коеф. помил.  $10^{-5}$   $B \pm B = 10^{-9}$ , тип модування фотонний, тип підсл. фотоприймача транзієнтний

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Волоконно-оптичні системи передачі інформації. 2. Дослідження типів модування, аналіз шумів та розробка фотоприймачного пристрою.

3. Техніко-економічне обґрунтування

4. Оцінка праці та технологія сервісу

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
1. Висхідні оптичні волокна та прозорість оптичного волокна

2. Види дисперсії в оптичному волокні. 3. Спецтрайна чутливість каналів (WDM) та структура волоконно-оптичного зв'язку. 4. Кодування сигналу. 5. Залученість волоконного сигналу в довжину зв'язку та залученість структури від косяк лавинного множення. 6. Періодична модифікація фотодіодів та транзисторів. 7. Періодична модифікація виготовлення фотодіодів та транзисторів. 8. Рухливі моделювання фотолінійного пристрою. 9. Ефект фотодіода.

### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Небесний О.Ю доцент	03.02	25.03
II	Небесний О.Ю доцент	26.03	30.09
III	Небесний О.Ю доцент	06.10	20.10
IV	Небесний О.Ю доцент	21.10	30.10

7 Дата видачі завдання 03 лютого 2020 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи та складання звіту	03.02 - 03.03	
2	Написання I розділу	04.03 - 25.03	
3	Розробка пристрою, написання II розділу	01.04 - 30.09	
4	Т.Е.О та охорона праці	5.10 - 30.10	
5	Оформлення поясн. записки та виконання вресень	02.11 - 27.11	

Студент Гіт Бартин А.А.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) Гіт Небесний О.Ю  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер Гіт Верховін Л.Л.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем

(повна назва кафедри )

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти )

на тему Дослідження волоконно-оптичні системи передачі інформації та розробка фотоприймального пристрою

Виконав: студент II курсу, групи 8.1539-з

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна

техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні

системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

**Бартиш А.А.**

(ініціали та прізвище)

Керівник Небеснюк О.Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 87 сторінок, 22 рисунка, 25 таблиць, 40 формул, 2 додатки, 32 джерела літератури.

Об'єкт дослідження – волоконно-оптичні системи передачі інформації.

Ціль роботи – дослідження методів впливу різноманітних факторів на якість передачі сигналу та розробка фотоприймального пристрою.

Задачі роботи – аналіз існуючих типів кодування оптичного сигналу; дослідження впливу шумів на спотворення сигналу; розробка фотоприймального пристрою.

Методика досліджень – моделювання в програмному середовищі MicroCap.

Короткий виклад результатів дослідження – досліджені фактори, що впливають на якість передачі інформації; запропоновано фотоприймальний пристрій.

Результати впроваджень – результати роботи обговорювались на IV спеціалізованому міжнародному екологічному форумі «Еко Форум -2020» і XX науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів Інженерного навчально –наукового інституту ЗНУ.

Прогнозні пропозиції - запропонований прилад можна використовувати в мережах кабельного телебачення, телефонії, мережах інтернет, а також у галузі ядерної фізики і фізики високих енергій.

ОПТОВОЛОКНО, ІНФОРМАЦІЯ, МОДА, ДИСПЕРСІЯ, СИГНАЛ, СПЕКТРАЛЬНЕ УЩІЛЬНЕННЯ, ЗГАСАННЯ, МУЛЬТИПЛЕКСОР

Дипломну роботу виконано в Інженерному навчально –науковому інституті Запорізького Національного Університету на кафедрі мікроелектронних та електронних інформаційних систем з 03.02.2020 р. по 28.11.2020 р.

## Зміст

ВСТУП.....	6
1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ .....	8
1.1 Історія розвитку оптичного зв'язку .....	8
1.2 Оптичне волокно .....	9
1.3 Волоконно-оптичний зв'язок.....	15
1.4 Елементи ВОЛП .....	16
1.4.1 Активні компоненти.....	16
1.4.2 Пасивні компоненти.....	16
1.5 Захищеність ВОЛЗ від втрати інформації .....	17
1.6 Спектральне ущільнення каналів .....	19
1.7 Переваги і недоліки волоконно-оптичних ліній передачі.....	22
1.7.1 Переваги ВОЛП .....	22
1.7.2 Недоліки ВОЛП .....	23
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ КОДУВАННЯ, АНАЛІЗ ШУМІВ ТА РОЗРОБКА ФО- ТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ .....	24
2.1 Критерії вибору коду .....	24
2.2 Визначення необхідної ширини смуги частот фотоприймального пристрою і три- валість тактового інтервалу.....	28
2.3 Визначення мінімального співвідношення сигнал-шум на виході фотоприймаль- ного пристрою (SNR) .....	29

2.4 Вибір необхідного фотодіода.....	32
2.5 Вибір типу транзистора вхідного каскаду підсилювача ФПУ .....	39
2.6 Розрахунок мінімальної потужності оптичного випромінювання на вході фото- приймача.....	44
2.7 Шляхи і способи поліпшення чутливості розробленого фотоприймача.....	58
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	63
3.1 Огляд фотоприймальних пристроїв .....	63
3.2 Порівняльний аналіз фотоприймальних пристроїв за критеріями.....	66
3.3 Розрахунок витрат на елементи електричної схеми .....	71
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	73
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.	73
4.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	76
4.3 Виробнича санітарія.....	77
4.4-Електробезпека.....	79
4.5 Пожежна безпека та техногенна безпека .....	81
Висновки та рекомендації .....	85
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	86
ДОДАТОК А.....	90
ДОДАТОК Б.....	91

## ВСТУП

Оптичний зв'язок, що використовує світло як засіб передачі різної інформації, має ряд відмітних особливостей, не властивих традиційним засобам зв'язку. Тому в різних країнах світу наукові дослідження і розробки в цій області з року в рік стають усе більш інтенсивними. Волоконна оптика знаменує нову еру в розвитку сучасної фізики, електроніки, оптики, в розвитку тих дисциплін, які так чи інакше були пов'язані з передачею і обробкою великих об'ємів, або, як зараз прийнято говорити, масивів інформації. Вважається, що телефонні переговори і передача телепрограм, що здійснюються по кабелю, несуть великий об'єм інформації. Але з точки зору завдань найближчого майбутнього кількість інформації, яку здатні передавати сучасні комунікаційні системи, надзвичайно мала. У цій ситуації використання оптичних способів в системах зв'язку дуже перспективно. Оскільки частота світлових коливань на декілька порядків вища за частоту радіохвиль, відповідно в стільки ж раз збільшується і інформаційна пропускна спроможність волоконно-оптичного кабелю в порівнянні із звичайним високочастотним. Очікується, що по одному волокну завтовшки з людський волос можна буде передавати одночасно інформацію, ідентичну декільком тисячам телефонних або десяткам телевізійних каналів. Окрім того, що волоконний кабель краще пристосований до роботи в умовах потужних електромагнітних перешкод (сигнал, що йде по волокну, просто не реагує на ці перешкоди), він набагато легший, а головне - для його виготовлення не вимагається дефіцитна мідь. Переваги оптичного кабелю досить помітні при реконструкції комунікаційних систем у великих містах. Волоконний кабель, по-перше, тонше, по-друге, значно легше - вага його практично визначається вагою пластикової захисної оболонки. Тому його і простіше провести через комунікаційні тунелі, труби, важкодоступні вигини і т. д. Основні елементи волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСПІ) - це джерело випромінювання, волоконно-оптичні кабелі (оптичні хвилеводи або світлопроводи), приймачі випромінювання. [1]

Розвиток високошвидкісних ВОСПІ органічно пов'язаний з концепціями поступового впровадження цифрових мереж і заміною кабелів з металевими жилами на



волоконно-оптичні. При цьому широко реалізуються два основні способи ущільнення інформації - часовою і просторовою. При проектуванні ліній зв'язку великої протяжності розробники орієнтуються на величину швидкості передачі і число оптичних волокон в кабелі вище за тих, які забезпечують проектну пропускну спроможність лінії. Це дозволить значно підвищити надійність експлуатації ВОСП і забезпечить резерв для можливого збільшення пропускну спроможності системи з мінімальними капітальними витратами. [2]

У галузі ядерної фізики і фізики високих енергій ВОСП знаходять застосування на прискорювачах заряджених часток, де дані вимірів і команди управління технологічними системами іонного джерела, розташованого на високовольтному терміналі, необхідно передавати в умовах інтенсивних електромагнітних завад, супроводжуючих роботу форінжектора лінійного прискорювача, систем живлення іонного джерела і радіаційної дії. [3]

Як показала тривала експлуатація устаткування цих систем на основі ВОСП, апаратура забезпечила стійку і безвідмовну роботу іонних джерел. Нині ВОСП є перспективними, і, мабуть, єдиним напрямом в створенні швидкісних і високонадійних каналів зв'язку на прискорювачах заряджених часток. Оптиелектронні канали зумовили якісний стрибок в техніці передачі інформації на синхрофазотроні і що замінило його сучасному надпровідному прискорювачі світового класу - нуклотроні.

Сучасні волоконно-оптичні системи передачі - це концентратор практичного використання найглибінніших досягнень фундаментальних наук, яскрава демонстрація їх практичної необхідності і корисності, тому тематика роботи є достатньо актуальною та перспективною.

# 1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

## 1.1 Історія розвитку оптичного зв'язку

Історію систем передачі даних на великі відстані слід починати із старовини, коли люди використовували димові сигнали. З того часу ці системи кардинально покращали, з'явилися спочатку телеграф, потім - коаксіальний кабель. У своєму розвитку ці системи рано чи пізно упиралися у фундаментальні обмеження: для електричних систем це явище згасання сигналу на певній відстані, для НВЧ - частота, що несе сигнал. Тому тривали пошуки принципово нових систем, і в другій половині ХХ століття рішення було знайдене - виявилось, що передача сигналу за допомогою світла набагато ефективніше як електричного, так і СВЧ-сигналу.

У 1966 році Као і Хокам з STC Laboratory (STL) представили оптичні нитки із звичайного скла, які мали згасання в 1000 дБ/км (тоді як згасання в коаксіальному кабелі складало всього 5-10 дБ/км) через домішки, які в них містилися і які в принципі можна було видалити.

Існували дві глобальні проблеми при розробці оптичних систем передачі даних : джерело світла і носій сигналу. Перша розв'язалася з винаходом лазерів в 1960 році, друга - з появою високоякісних оптичних кабелів в 1970 році. Це була розробка Corning Incorporated. Згасання в таких кабелях складало близько 20 дБ/км, що було цілком прийнятним для передачі сигналу в телекомунікаційних системах. В той же час, були розроблені досить компактні напівпровідникові GaAs -лазери.

Після інтенсивних досліджень в період з 1975 по 1980 рік з'явилася перша комерційна волоконно-оптична система, що оперувала світлом з довжиною хвилі 0,8 мкм і що використала напівпровідниковий лазер на основі арсеніду галію (AsGa). Бітрейт систем першого покоління складав 45 Мбіт/с, відстань між повторювачами - 10 км.

22 квітня 1977 року в Лонг-Біч, штат Каліфорнія, компанія General Telephone and Electronics уперше використовувала оптичний канал для передачі телефонного трафіку на швидкості 6 Мбіт/с.

Друге покоління волоконно-оптичних систем було розроблене для комерційного використання на початку 1980-х. Вони оперували світлом з довжиною хвилі 1,3 мкм від InGaAsP -лазерів. Проте такі системи все ще були обмежені через розсіювання, що виникає в каналі. Проте вже в 1987 році ці системи працювали на швидкості до 1,7 Гбіт/з при відстані між повторювачами 50 км.

Перший трансатлантичний телефонний оптичний кабель (ТАТ - 8) був введений в експлуатацію в 1988 році. У його основі лежала оптимізована Е. Дезюрвиром (E.Desurvire) технологія лазерного посилення. ТАТ - 8 розроблявся як перший підводний волоконно-оптичний кабель між Сполученими Штатами і Європою. [4]

## 1.2 Оптичне волокно

Промисловість багатьох країн освоїла випуск широкої номенклатури виробів і компонентів ВОЛЗ. Слід зауважити, що виробництво компонентів ВОЛЗ, в першу чергу оптичного волокна, відрізняє висока міра концентрації. Більшість підприємств зосереджена в США. Маючи головні патенти, американські фірми (в першу чергу це відноситься до фірми "CORNING") чинять вплив на виробництво і ринок компонентів ВОЛЗ у всьому світі, завдяки укладанню ліцензійних угод з іншими фірмами і створенню спільних підприємств. [5]

Найважливіший з компонентів ВОЛЗ - оптичне волокно. Для передачі сигналів застосовуються два види волокна одномодове (рисунок 1.1) і багатомодове (рисунок 1.2).

Свою назву волокна дістали від способу поширення випромінювання в них. Волокно складається з серцевини і оболонки з різними показниками заломлення.

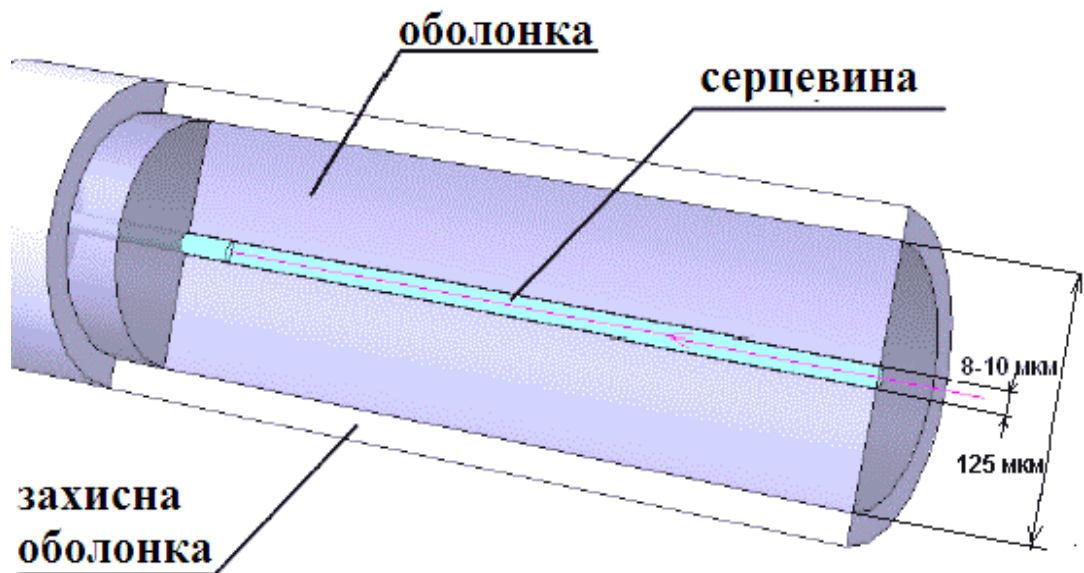


Рисунок 1.1 – Одномодове оптичне волокно

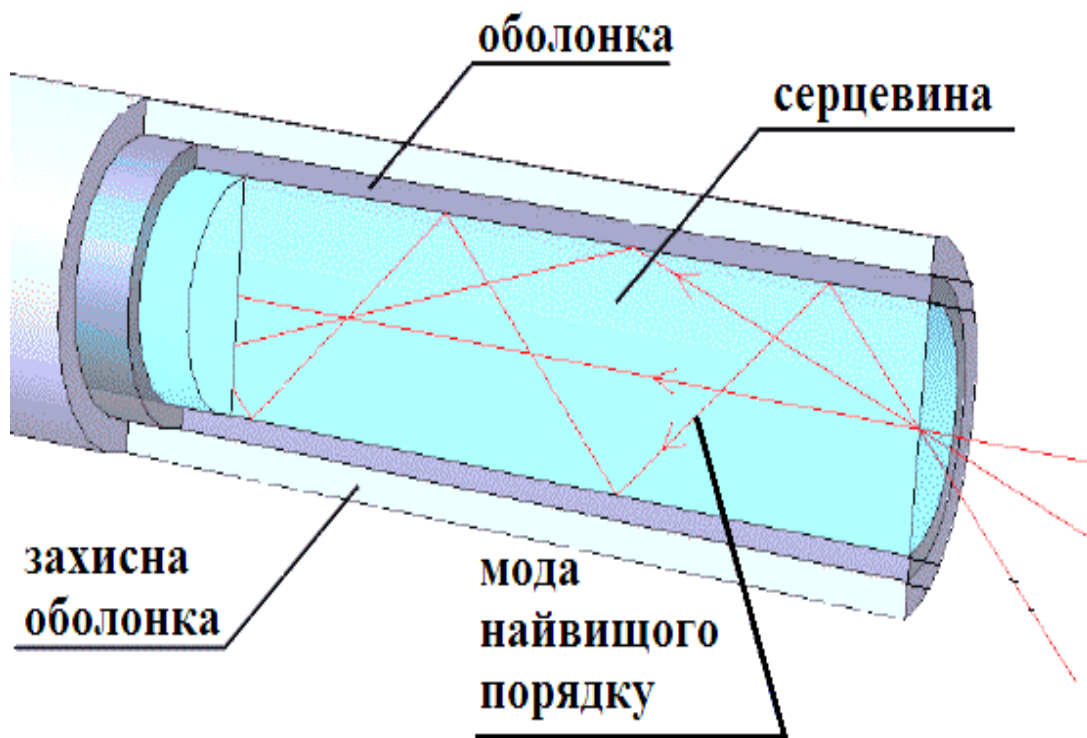


Рисунок 1.2 - Багатомодове оптичне волокно

У одномодовому волокні діаметр жили світлопровода близько 8-10 мкм, тобто порівнянний з довжиною світлової хвилі. При такій геометрії у волокні може поширюватися тільки один промінь (одна мода). [6]

Багатомодове волокно - волокно з великим діаметром серцевини по якій проходить світло. Така назва пояснюється специфікою проходження електромагнітної хвилі по сердечникові волокна. У стандартному багатомодовому волокні із ступін-

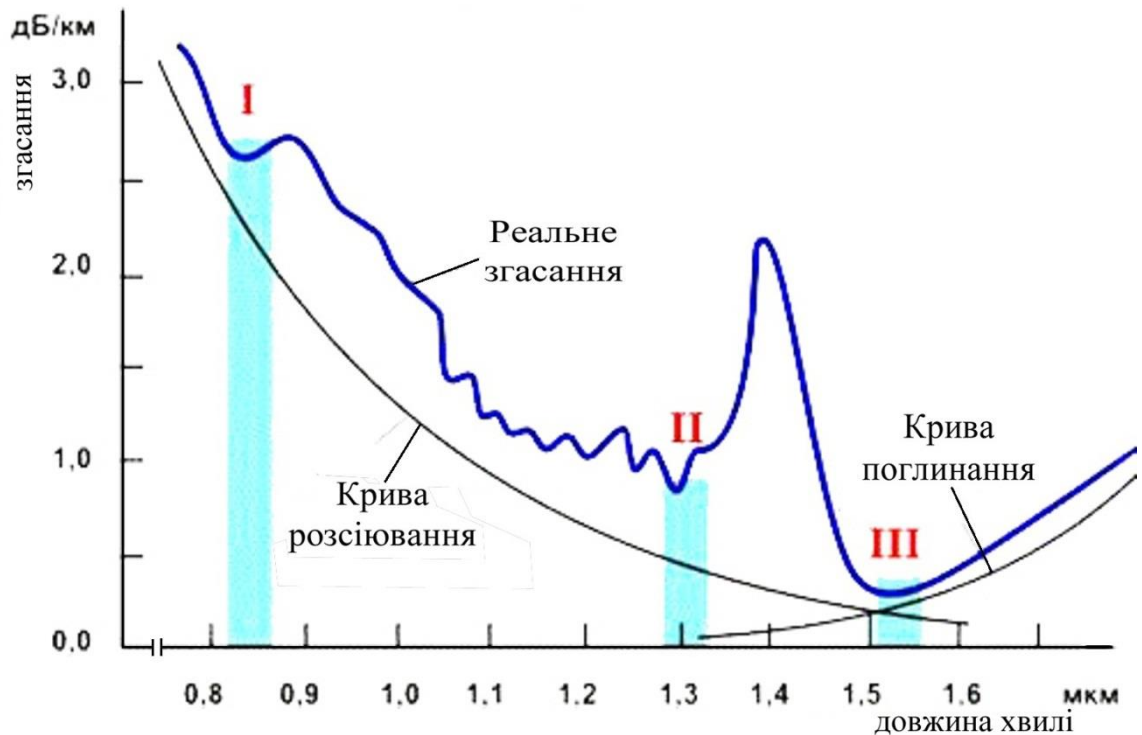
частим профілем заломлення, промені світла поширюються по серцевині волокна завдяки ефекту повного внутрішнього віддзеркалення. При цьому, промені світла зустрічають межу (торець оптичного волокна) під гострим кутом (вимірним відносно осової лінії), входячи у всередину волокна, повністю відбиваються, рухаючись в серцевині волокна. Критичний кут (максимальний кут для повного внутрішнього віддзеркалення) визначається середовищем заломлення між матеріалами оболонки і серцевини волокна. Промені, які стикаються з межею під кутом більшим, ніж критичний, заломлюються, проходячи з серцевини в оболонку, і не передають світло, тобто інформацію уздовж волокна. Критичний кут дорівнює максимальному куту випромінювання, що входить у волокно, і залежить від величини діаметру серцевини волокна. Висока числова апертура (діаметр серцевини) змушують світло що проходить під різними кутами, піддаватися ефекту дисперсії, при цьому відбувається істотне накладення променів світла в серцевині. Великий діаметр серцевини збільшує дисперсію, оскільки промені під різними кутами мають різні довжини траєкторій і тому витрачають різний час на проходження усієї довжини волокна.

У багатомодовому волокні розмір жили світлопровода близько 50-60 мкм, що робить можливим поширення великого числа променів (багато мод). [7]

Обидва типи волокна характеризуються двома найважливішими параметрами: згасанням і дисперсією. [8]

Згасання зазвичай вимірюється в дБ/км і визначається втратами на поглинання і на розсіяння випромінювання в оптичному волокні (рисунок 1.3).

Вікно прозорості - діапазон довжин хвиль оптичного випромінювання, в якому має місце менше, в порівнянні з іншими діапазонами, згасання випромінювання в середовищі, зокрема - в оптичному волокні.



I – Вікно прозорості на довжині хвилі 850 нм

II – Вікно прозорості на довжині хвилі 1310 нм

III – Вікно прозорості на довжині хвилі 1550 нм

Рисунок 1.3 - Залежність згасання сигналу від довжини хвилі випромінювання

Стандартне ступінчасте оптичне волокно (SMF) має три вікна прозорості : 850 нм, 1310 нм і 1550 нм. До теперішнього часу розроблені четверте (1580 нм) і п'яте (1400 нм) вікна прозорості, а також оптичні волокна, що мають відносно хорошу прозорість в усьому ближньому інфрачервоному діапазоні. [9]

Втрати на поглинання залежать від чистоти матеріалу (таблиця 1.1), втрати на розсіяння залежать від неоднорідностей показника заломлення матеріалу.

Таблиця 1.1 – Залежність втрат від домішки

Домішковий іон	Втрати , дБ/км	$\lambda$ піку поглинання, мкм
1	2	3
Fe <sup>2+</sup>	0,68	1,1
Fe <sup>2+</sup>	0,15	0,4
Cu <sup>2+</sup>	1,1	0,85

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
$\text{Cr}^{3+}$	1,6	0,625
$\text{V}^{4+}$	2,7	0,725
$\text{OH}^-$	1,0	0,95

Згасання залежить від довжини хвилі випромінювання, що вводиться у волокно. Нині передачу сигналів по волокну здійснюють в трьох діапазонах: 0,85 мкм, 1,3 мкм, 1,55 мкм, оскільки саме в цих діапазонах кварц має підвищену прозорість. [10]

Інший найважливіший параметр оптичного волокна - дисперсія. Дисперсія - це розсіяння в часі спектральних і модових складових оптичного сигналу. Існують три типи дисперсії : модова, матеріальна і хвилеводна:

- модова дисперсія властива багатомодовому волокну і обумовлена наявністю великого числа мод, час поширення яких по-різному (рисунок 1.4);

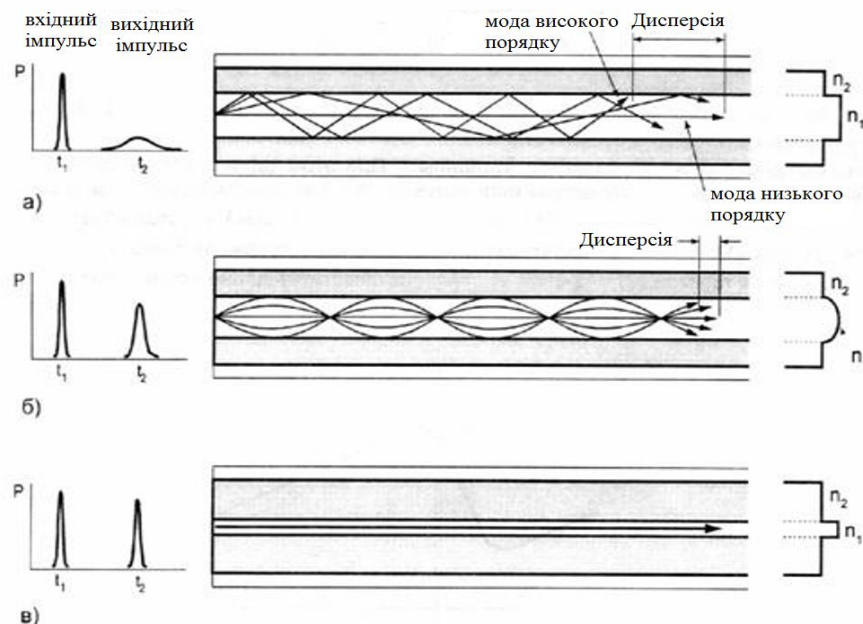


Рисунок 1.4 – Вплив модової дисперсії на сигнал в різних волокнах: а) багатомодове ступінчасте; б) багатомодове градієнтне; в) одномодове.

- матеріальна дисперсія обумовлена залежністю показника заломлення від довжини хвилі

- хвилеводна дисперсія обумовлена процесами всередині моди і характеризується залежністю швидкості поширення моди від довжини хвилі. [11]

Оскільки світлодіод або лазер випромінює деякий спектр довжин хвиль, дисперсія призводить до розширення імпульсів при поширенні по волокну і тим самим породжує спотворення сигналів. При оцінці користуються терміном "смуга пропускання" - це величина, зворотна до величини розширення імпульсу при проходженні ним по оптичному волокну відстані в 1 км. Вимірюється смуга пропускання в МГц/км. З визначення смуги пропускання видно, що дисперсія накладає обмеження на дальність передачі і на верхню частоту сигналів. [12]

Якщо при поширенні світла по багатомодовому волокну як правило переважає модова дисперсія, то одномодовому волокну властиві тільки два останні типи дисперсії. На довжині хвилі 1,3 мкм матеріальна і хвилеводна дисперсії в одномодовому волокну компенсують один одного, що забезпечує найвищу пропускну спроможність. [13]

Згасання і дисперсія у різних типів оптичних волокон різні. Одномодові волокна мають кращі характеристики по загасанню і по смузі пропускання, оскільки в них поширюється тільки один промінь. Проте, одномодові джерела випромінювання у декілька разів дорожче багатомодових. У одномодове волокно важче ввести випромінювання через малі розміри жили світлопровода, з цієї ж причини одномодові волокна складно порівнювати з малими втратами. Обробка кінців одномодових кабелів оптичними роз'ємами також обходиться дорожче.

Багатомодові волокна зручніші при монтажі, оскільки в них розмір жили світлопровода у декілька разів більше, ніж в одномодових волокнах. Багатомодовий кабель простіше оснастити оптичними роз'ємами з малими втратами (до 0,3 дБ) в стику. На багатомодове волокно розраховані випромінювачі на довжину хвилі 0,85 мкм - найдоступніші і дешевші випромінювачі, що випускаються в дуже широкому асортименті. Але згасання на цій довжині хвилі у багатомодових волокон знаходиться в межах 3-4 дБ/км і не може бути істотно поліпшене. Смуга пропускання у багатомодових волокон досягає 800 МГц/км, що прийнятно для локальних мереж зв'язку, але не досить для магістральних ліній. [14]



### 1.3 Волоконно-оптичний зв'язок

Спосіб передачі інформації, що використовує як носій інформаційного сигналу електромагнітне випромінювання оптичного (ближнього інфрачервоного) діапазону, а як направляючі системи - волоконно-оптичні кабелі, називається волоконно-оптичним зв'язком.

У основі волоконно-оптичного зв'язку лежить явище повного внутрішнього віддзеркалення електромагнітних хвиль на межі розділу діелектриків з різними показниками заломлення. Оптичне волокно складається з двох елементів - серцевини, що є безпосереднім світлопроводом, і оболонки. Показник заломлення серцевини дещо більше показника заломлення оболонки, завдяки чому промінь світла, випробовуючи багатократні відбиття на межі серцевина-оболонка, поширюється в серцевині, не покидаючи її. [15]

Волоконно-оптична лінія передачі (ВОЛП - офіційний термін, визначений в ГОСТ 26599-85), Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ - стала назва) - волоконно-оптична система, що складається з пасивних і активних елементів, призначена для передачі інформації в оптичному (як правило - ближньому інфрачервоному) діапазоні (рисунок 1.5). [16]



Рисунок 1.5 - Структурна схема волоконно-оптичної лінії зв'язку

## 1.4 Елементи ВОЛП

### 1.4.1 Активні компоненти

Мультиплексор/Демультиплексор - широкий клас пристроїв, призначених для об'єднання і розподілу інформаційних каналів. Мультиплексори і демультиплексори можуть працювати як в часовій, так і в частотній областях, можуть бути електричними і оптичними (для систем із спектральним ущільненням).

Регенератор - пристрій, що здійснює відновлення форми оптичного імпульсу, який, поширюючись по волокну, зазнає спотворення. Регенератори можуть бути як чисто оптичними, так і електричними, які перетворюють оптичний сигнал в електричний, відновлюють його, а потім знову перетворюють в оптичний.

Підсилювач - пристрій, що посилює потужність сигналу. Підсилювачі також можуть бути оптичними і електричними, здійснюючими оптико-електронне і електронно-оптичне перетворення сигналу.

Лазер - джерело монохромного когерентного оптичного випромінювання. У системах з прямою модуляцією, які є найбільш поширеними, лазер одночасно є і модулятором, що безпосередньо перетворює електричний сигнал в оптичний.

Модулятор - пристрій, що модулює оптичну хвилю, що несе інформацію за законом електричного сигналу. У більшості систем цю функцію виконує лазер, проте в системах з непрямою модуляцією для цього використовуються окремі пристрої.

Фотоприймач (Фотодіод) - пристрій, що здійснює оптоелектронне перетворення сигналу. [17]

## 1.4.2 Пасивні компоненти

Оптичний кабель, світлопередаючими елементами якого є оптичні волокна. Зовнішня оболонка кабелю може бути виготовлена з різних матеріалів: полівінілхлориду, поліетилену, поліпропілену, тефлону і інших матеріалів. Оптичний кабель може мати бронювання різного типу і специфічні захисні шари (наприклад, дрібні скляні голки для захисту від гризунів).

Оптична муфта - пристрій, використовуваний для з'єднання двох і більше оптичних кабелів.

Оптичний крос - пристрій, призначений для завершення оптичного кабелю і підключення до нього активного устаткування. [18]

## 1.5 Захищеність ВОЛЗ від втрати інформації

Волоконно-оптичний зв'язок, що отримав розвиток після винаходу в 1960 році лазера - висококогерентного джерела випромінювання оптичного діапазону, і демонстрації в 1970 році оптичних волокон з низькими втратами (20 дБ/км), що дозволили здійснювати передачу інформації на середні відстані, на сьогодні є основним видом високошвидкісної комунікації на довгі і наддовгі дистанції. Використання як носіїв інформації коротких лазерних імпульсів інфрачервоного діапазону (~200 ТГц) забезпечує швидкість передачі в декілька десятків Гбіт/с, що перевищує максимальні швидкості радіозв'язку і зв'язку за допомогою електричних кабелів. Результатом стало створення трансокеанських і трансконтинентальних ліній зв'язку протяжністю в десятки тисяч кілометрів. Слід чекати, що найближчими роками волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) замінять усі інші види магістральних ліній передачі інформації. У зв'язку з цим встає питання про захищеність ВОЛЗ. [19]

Оптичне волокно є діелектричним шаруватим циліндричним хвилеводом круглого перерізу, що як правило знаходиться усередині захисної оболонки. Показник залом-

лення серцевини волокна ( $n_1$ ) більше показника заломлення оболонки ( $n_2$ ). Хвилеведучі властивості волокна засновані на явищі повного внутрішнього віддзеркалення. Якщо кут падіння світла на межу розділу серцевина-оболонка ( $\phi_1$ ) задовольняє умові (1.1), то світло не може покинути серцевину хвилеводу.

$$n_1 \sin(\phi_1) > n_2, \quad (1.1)$$

Волоконно-оптичні лінії передачі відрізняються високою захищеністю з причини того, що :

- Електромагнітне поле хвилі, що направляється, локалізоване поблизу серцевини волокна на масштабах десятків мікрометрів, що ускладнює доступ до інформації в порівнянні з НВЧ хвилеводами і тим більше радіосигналами.
  - Ушкодження хвилеводу в більшості випадків приводить до обриву з'єднання і миттєвому виявленню несанкціонованого доступу.
  - Компанії, що займаються волоконно-оптичними лініями передачі, забезпечують високу фізичну захищеність кабелів. Так наприклад, трансокеанські лінії зв'язку на шельфі покриті товстою металевою оболонкою.
  - Оптичні канали зв'язку характеризуються високою швидкістю передачі інформації (сотні Гбіт/с), що досягається використанням коротких світлових імпульсів (десятки і сотні пікосекунд). У зв'язку з цим для перехоплення інформації вимагаються високочутливі і швидкі детектори, що робить несанкціонований доступ надзвичайно дорогим.
  - У кабелі лінії зв'язку зазвичай знаходиться значне число окремих волокон, що призводить до того, що доступ до кожного з хвилеводів окремо сильно ускладнений.
  - ВОЛП захищені від перешкод, що створюються джерелами електромагнітного випромінювання, стійкі до коливань температури і вологості. [20]
- Раніше вважалося, що ВОЛП мають підвищену скритність, проте завжди існує принципова можливість знімання інформації, що передається по оптичних каналах

зв'язку. Проте, існують методи, що потенційно дозволяють здійснити перехоплення інформації. ВОЛЗ складаються із стаціонарного устаткування, що розміщується на сертифікованих об'єктах, і лінійного тракту, що є волоконно-оптичними кабелями і підсилювачами оптичного сигналу, які встановлюються кожні 50-80 км. Захист першої складової забезпечується так само як і захист будь-якого аналогічного об'єкту і має мало особливостей, тоді як другу складову захистити на усьому її протязі неможливо, зважаючи на неможливість охопити десятки тисяч кілометрів. [21]

Нині відкрилися широкі горизонти практичного застосування оптичного кабелю (ОК) і волоконно-оптичних систем передачі в таких галузях народного господарства, як радіоелектроніка, інформатика, зв'язок, обчислювальна техніка, космос, медицина, голографія, машинобудування, атомна енергетика та ін.

Волоконна оптика розвивається по багатьох напрямках і без неї сучасне виробництво і життя не представляються можливими.

Застосування оптичних систем в кабельному телебаченні забезпечує висока якість зображення та істотно розширює можливості інформаційного обслуговування індивідуальних абонентів.

Дуже перспективне застосування ОК на високовольтних лініях електропередачі (ЛЕП) для організації технологічного зв'язку і телемеханіки. Оптичні волокна вбудовуються у фазу або трос. Реалізується висока захищеність каналів від електромагнітних впливів ЛЕП і грози.

Легкість, малогабаритність, незаймистість ОК зробили їх дуже корисними для монтажу і устаткування літальних апаратів, судів і інших мобільних пристроїв.

## 1.6 Спектральне ущільнення каналів

Технологія, що дозволяє одночасно передавати декілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних частотах, що несуть, носить назву спектральне ущільнення (рисунок 1.6).

Розробка систем хвильового мультиплексування дозволила у декілька разів збільшити швидкість передачі даних по одному волокну і до 2003 року при застосуванні технології спектрального ущільнення була досягнута швидкість передачі 10,92 Тбіт/с (273 оптичні канали по 40 Гбіт/с). У 2009 році лабораторії Белла за допомогою мультиплексування 155 каналів по 100 Гбіт/з вдалося передати дані із швидкістю 15,5 Тбіт/з на відстань 7000 км. У 2012 році ця цифра зросла до 20 Тбіт/с. [22]

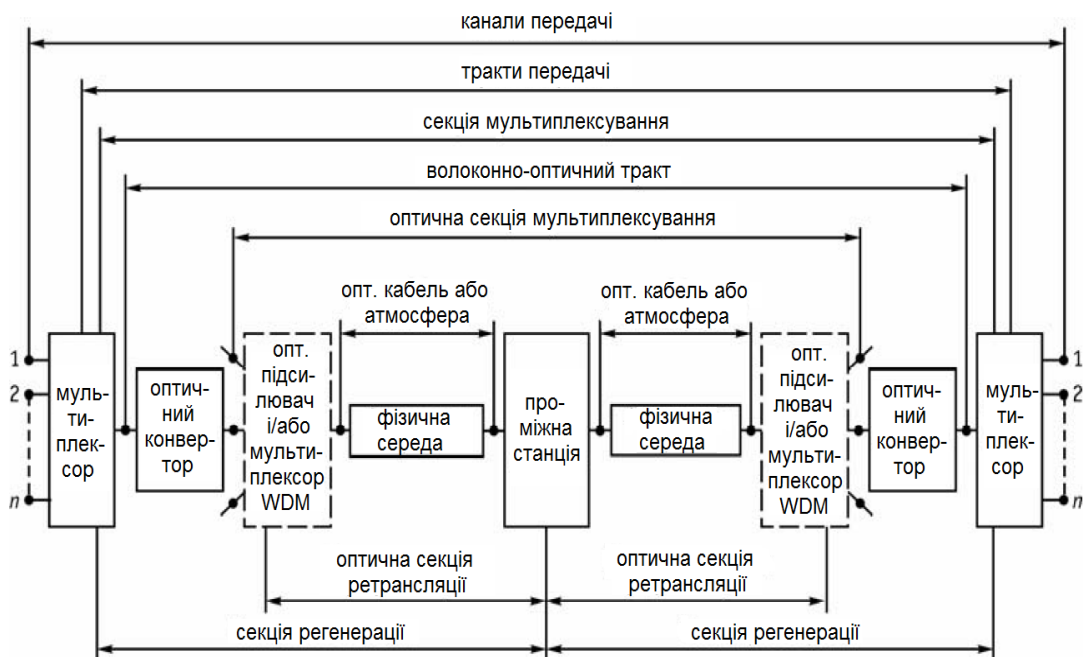


Рисунок 1.6 - Волоконно-оптична система передачі інформації із застосуванням технології спектрального ущільнення каналів

Технологія WDM дозволяє істотно збільшити пропускну спроможність каналу, причому вона дозволяє використовувати вже прокладені волоконно-оптичні лінії. Завдяки WDM вдається організувати двосторонню багатоканальну передачу трафіку по одному волокну.

Перевагою WDM -систем є можливість передачі високошвидкісного сигналу на наддалекі відстані без використання проміжних пунктів (без регенерації сигналу і проміжних підсилювачів). Ці переваги вкрай затребувані для передачі даних через малонаселені землі. [23]

У простому випадку кожен лазерний передавач генерує сигнал на певній частоті з частотного плану. Усі ці сигнали перед тим, як вводяться в оптичне волокно, об'єднуються мультиплексором (MUX). На приймальному кінці сигнали аналогічно розділяються демультимплексором (DEMUX). Тут, так само як і в SDH мережах, мультиплексор є ключовим елементом. Сигнали приходять на довжинах хвиль устаткування клієнта, а передача відбувається на довжинах відповідних частотному плану ITU WDM.

Одним з основних параметрів визначення якості WDM -сигналу в лінії являється кількість помилок на лінії - відношенню сигналу до шуму (OSNR). Цей параметр, відповідно до МСЭ-Т О. 201, входить до числа первинних атрибутів оптичних каналів. OSNR - є первинною оцінкою якості лінії передачі.

Історично першими виникли двоххвильові WDM -системи, що працюють на центральних довжинах хвиль з другого і третього вікон прозорості кварцового волокна (1310 і 1550 нм). Головною перевагою таких систем є те, що через велике спектральне рознесення повністю відсутній вплив каналів один на одного. Цей спосіб дозволяє або подвоїти швидкість передачі по одному оптичному волокну, або організувати дуплексний зв'язок.

Сучасні WDM -системи на основі стандартного частотного плану (ITU - Т Rec. G.692) можна підрозділити на три групи:

- грубі WDM (Coarse WDM - CWDM) - системи з частотним рознесенням каналів більш 2500ГГц, що дозволяють мультиплексувати не більше 18 каналів. Використовувані нині CWDM працюють в смузі від 1270нм до 1610нм, проміжок між каналами 20нм (2500 ГГц), можна мультиплексувати 16 спектральних каналів.

- щільні WDM (Dense WDM - DWDM) - системи з рознесенням каналів близько 100 ГГц, що дозволяють мультиплексувати до 40 каналів.

– високощільні WDM (High Dense WDM - HDWDM) - системи з рознесенням каналів 50 ГГц і менш, що дозволяють мультиплексувати більше 64 каналів. [24]  
Частотний план для CWDM -систем визначається стандартом ITU G.694.2. Сфера застосування технології CWDM - міські мережі з відстанню до 50 км. Перевагою цього виду WDM систем є низька (в порівнянні з іншими типами) вартість устаткування внаслідок менших вимог до компонент.

Частотний план для DWDM -систем визначається стандартом ITU G.694.1. Сфера застосування - магістральні мережі. Цей вид WDM -систем пред'являє вищі вимоги до компонент, ніж CWDM (ширина спектру джерела випромінювання, температурна стабілізація джерела і т. д.). Поштовх до бурхливого розвитку DWDM мереж дала поява недорогих і ефективних волоконних ербієвих підсилювачів (EDFA), що працюють в проміжку від 1525 до 1565 нм (третє вікно прозорості кварцового волокна). [25]

## 1.7 Переваги і недоліки волоконно-оптичних ліній передачі

### 1.7.1 Переваги ВОЛП

Волоконно-оптичні лінії мають ряд переваг перед дротяними (мідними) і радіорелейними системами зв'язку :

– Мале згасання сигналу (0,15 дБ/км в третьому вікні прозорості) дозволяє передавати інформацію на значно більшу відстань без використання підсилювачів. Підсилювачі у ВОЛП можуть ставитися через 40, 80 і 120 кілометрів, залежно від класу крайового устаткування.

– Висока пропускна спроможність оптичного волокна дозволяє передавати інформацію на високій швидкості, недосяжній для інших систем зв'язку.



- Висока надійність оптичного середовища: оптичні волокна не окислюються, не намокають, не схильні до слабкої електромагнітної дії.
- Інформаційна безпека - інформація по оптичному волокну передається "з точки в точку" і підслухувати або змінити її можна тільки шляхом фізичного втручання в лінію передачі.
- Висока захищеність від міжволоконних впливів - рівень екранування випромінювання більше 100 дБ. Випромінювання в одному волокні абсолютно не впливає на сигнал в сусідньому волокні.
- Пожеже- і вибухобезпечність при зміні фізичних і хімічних параметрів.
- Малі габарити і маса.

### 1.7.2 Недоліки ВОЛП

Нажаль, волоконно-оптичні лінії також мають ряд недоліків:

- Відносна крихкість оптичного волокна. При сильному вигинанні кабелю можлива поломка волокон або їх замутнення через виникнення мікротріщин, тому при прокладенні кабелю необхідно використовувати рекомендації виробника оптичного кабелю (де, зокрема, нормується мінімально допустимий радіус вигину).
    - Складність з'єднання у разі розриву.
    - Складна технологія виготовлення, як самого волокна, так і компонентів ВОЛП.
  - Відносна дорожнеча оптичного крайового устаткування. Проте, устаткування є дорогим в абсолютних цифрах. Співвідношення ціни і пропускнуої спроможності для ВОЛП краще, ніж для інших систем.
    - замутнення волокна внаслідок радіаційного опромінення (проте, існують леговані волокна з високою радіаційною стійкістю).
    - Складність перетворення сигналу у інтерфейсному устаткуванні. [26]
- Тому мета кваліфікаційної роботи - дослідження впливу різноманітних факторів на якість передачі сигналу.

Задачі:

- Провести аналіз існуючих типів кодування оптичного сигналу.
- Дослідити вплив шумів на спотворення сигналу.
- Розробити фотоприймальний пристрій для передачі сигналу на швидкості 0,8Гбіт/с.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ КОДУВАННЯ, АНАЛІЗ ШУМІВ ТА РОЗРОБКА ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

### 2.1 Вихідні дані для проведення роботи

1. Швидкість передачі інформації -  $V=0,8$  [Гбит/с].
2. Допустимий коефіцієнт помилок -  $BER=10^{-9}$ .
3. Тип кодування сигналу - фотонний.
4. Тип підсилювача фотоприймача - трансїмпедансний.

### 2.1 Критерії вибору коду

Основні чинники, якими визначається вибір коду передачі у ВОЛЗ:

1. Спектр сигналу в смузі пропускання. Спектр сигналу має бути вузьким і не повинен мати постійної складової, тобто має бути обмежений згори і знизу.
2. Відновлення частоти повторення імпульсів синхронізації. Для ухвалення рішення і відновлення імпульсів і їх фази вимагаються імпульси синхронізації, які необхідно витягнути з прийнятого повідомлення.
3. Узгодження з дискретним повідомленням. Код передачі повинен відображувати будь-яку двійкову послідовність.
4. Контроль над коефіцієнтом помилок в крайовому устаткуванні. Необхідно контролювати якість зв'язку, не перериваючи її, тому вимагається код передачі, що

має надмірність або характеристичні послідовності. Тоді досить фіксувати порушення правил формування коду, щоб контролювати якість зв'язку.

5. Простота експлуатації. Пристрої кодування, декодування і контролю помилок мають бути досить простими.

6. Сумісність з передачею по оптичних волокнах. Форма імпульсів повинна відповідати найкращим характеристикам оптичного волокна.

Оскільки імпульси випромінюваної оптичної потужності, можуть бути тільки позитивними або нульовими, ми не можемо безпосередньо використовувати біполярні коди, які застосовуються для передачі інформації по дротяних лініях.

Кодування інформації, що передається по мережі, має безпосереднє відношення до співвідношення максимально допустимої швидкості передачі і пропускної спроможності використовуваного середовища передачі. Наприклад, при різних кодах гранична швидкість передачі по одному і тому ж кабелю може відрізнятись. Від вибраного коду прямо залежать також складність мережевої апаратури і надійність передачі інформації.

При низькій швидкості передачі інформації відношення сигналу до шуму зазвичай досить велике, і тому можна використовувати кодування з широким спектром частот. І навпаки, при високій швидкості передачі важливо не розширювати спектр частот, щоб, з одного боку, ефективно відфільтрувати шум в приймачі, а з іншої - спростити структуру підсилювальних схем і схем відновлення частоти синхроімпульсів.

Код NRZ (Non Return to Zero - без повернення до нуля) - це простий код, що є звичайним цифровим сигналом. Логічному нулю відповідає високий рівень напруги в кабелі, логічній одиниці - низький рівень напруги (чи навпаки, що не принципово). Рівні можуть бути різної полярності (позитивною і негативною) або ж однієї полярності (позитивною або негативною). Протягом бітового інтервалу (bit time, BT), тобто часу передачі одного біта ніяких змін рівня сигналу в кабелі не відбувається.

До безперечних переваг коду NRZ відносяться його досить проста реалізація (початковий сигнал не потрібно ні спеціально кодувати на передавальному кінці, ні декодувати на приймальному кінці), а також мінімальна серед інших кодів пропу-

скна спроможність лінії зв'язку. Адже найбільш часта зміна сигналу в мережі буде при безперервному чергуванні одиниць і нулів, тобто при послідовності 10101010..., тому при швидкості передачі, рівної 10 Мбіт/з (тривалість одного біта дорівнює 100 нс) частота зміни сигналу і відповідно необхідна пропускна спроможність лінії складе  $1/200\text{нс} = 5 \text{ МГц}$  (рисунок 2.1).

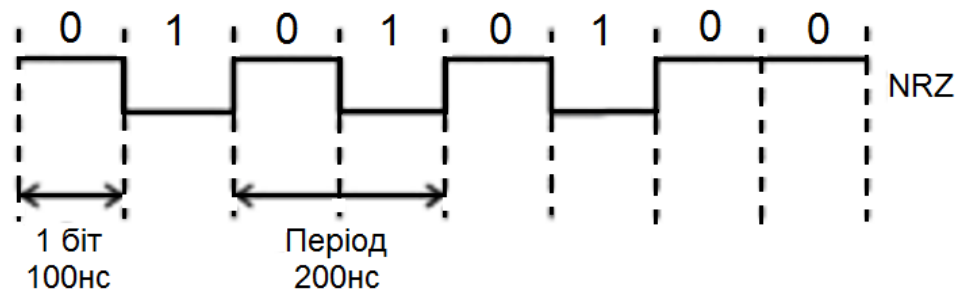


Рисунок 2.1 - Швидкість передачі і необхідна пропускна спроможність при кодї NRZ

Схематичне зображення коду NRZ з використанням синхросигналу зображена на рисунку 2.2

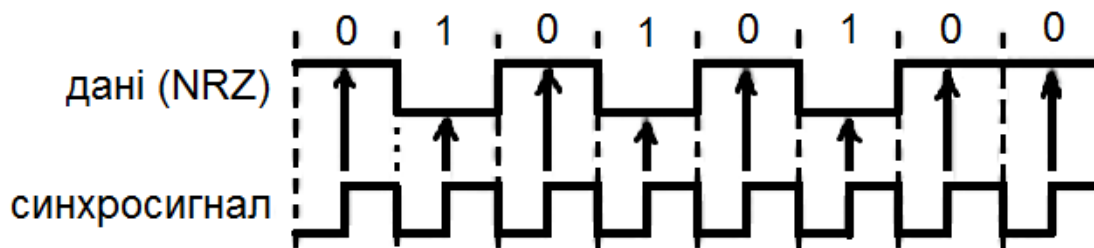


Рисунок 2.2 - Передача в кодї NRZ з синхросигналом

Найбільший недолїк коду NRZ - це можливість втрати синхронїзації приймачем під час прийому занадто довгих блоків (пакетів) інформації. Приймач може прив'язувати момент початку прийому тїльки до першого (стартовому) біта пакету, а протягом прийому пакету він вимушений користуватися тїльки внутрішнім тактовим генератором (внутрішнім годинником). Наприклад, якщо передається послїдовність нулів або послїдовність одиниць, то приймач може визначити, де проходять межї бітових

інтервалів, тільки по внутрішньому годиннику. І якщо годинник приймача розходиться з годинником передавача, то часове зрушення до кінця прийому пакету може перевищити тривалість одного або навіть декількох біт. В результаті станеться втрата переданих даних. Так, при довжині пакету в 10000 біт допустима розбіжність годинника складе не більше 0,01% навіть при ідеальній передачі форми сигналу по кабелю.

Код RZ (Return to Zero - з поверненням до нуля) - цей трирівневий код дістав таку назву тому, що використовується три наступні рівні: відсутність світла, "середнє" світло, "сильне" світло (рисунок 2.3). Це дуже зручно: навіть коли немає передачі інформації, світло все одно присутнє, що дозволяє легко визначити цілісність оптоволоконної лінії зв'язку без додаткових заходів.

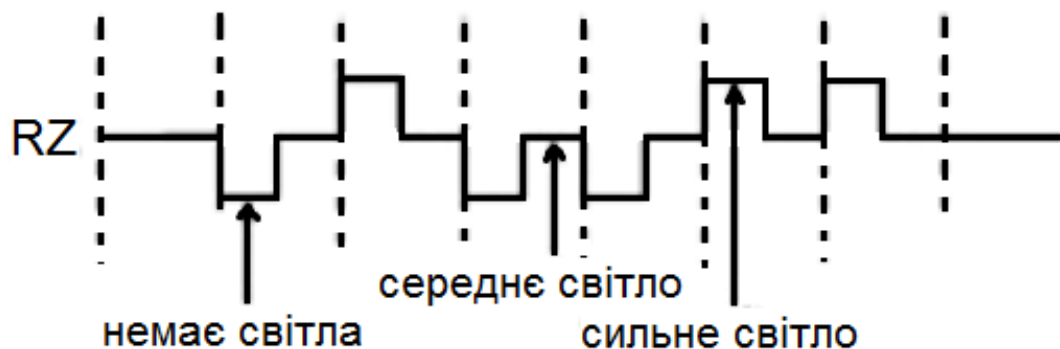


Рисунок 2.3 - Використання коду RZ

У центрі бітового інтервалу завжди є перехід сигналу (позитивний або негативний), отже, з цього коду приймач легко може виділити синхроімпульс (строб). Можлива тимчасова прив'язка не лише на початок пакету, як у разі коду NRZ, але і до кожного окремого біта, тому втрати синхронізації не станеться при будь-якій довжині пакету.

Ще одна важлива перевага коду RZ - проста тимчасова прив'язка прийому, як на початок послідовності, так і до її кінця. Приймач просто повинен аналізувати, є зміна рівня сигналу протягом бітового інтервалу або ні. Перший бітовий інтервал без зміни рівня сигналу відповідає закінченню послідовності біт, що приймається. Тому в кодї RZ можна використовувати передачу послідовностями змінної довжини.

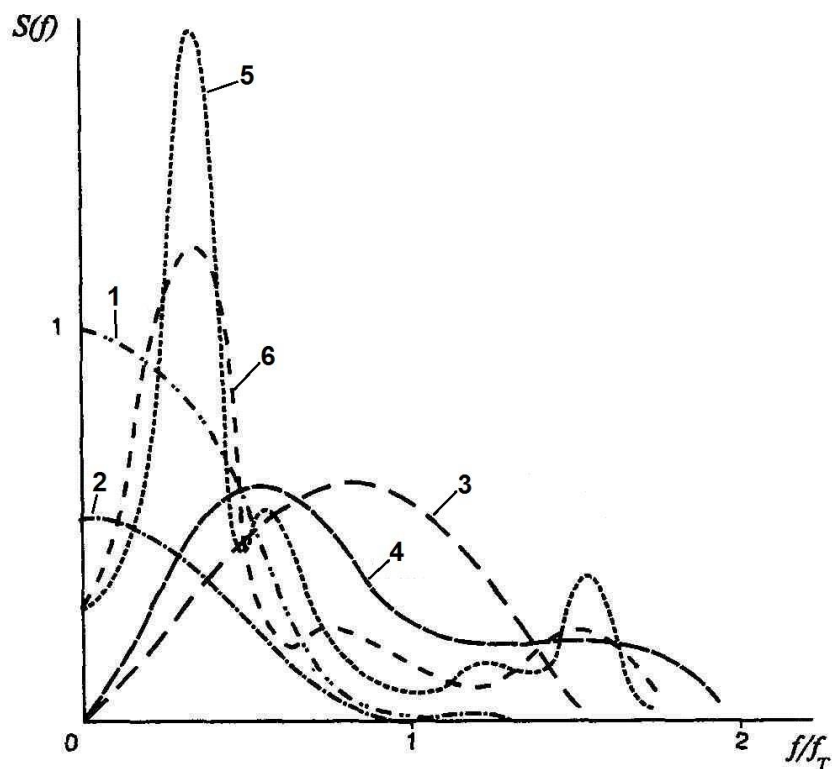
Недолік коду RZ полягає в тому, що для нього вимагається удвічі більша смуга пропускання каналу при тій же швидкості передачі в порівнянні з NRZ.

Згідно із завданням, нам треба використовувати фотонний код, правила кодування приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Правила кодування сигналу

Код	Визначення	Імпульси		Ширина смуги (при 90% енергії)
		1	0	
Фотонний	"1": поперемінно рівень 1 і 0 на усьому інтервалі  "0": перехід в середині інтервалу			1.52/T

Спектральна щільність кодів передачі сигналу зображена на рисунку 2.4 [27]



1 – NRZ, 2 – RZ, 3 – двофазний код, 4 – код з оберненням, 5 – електронно-фотонний код-1, 6 – електронно-фотонний код-2.

Рисунок 2.4 – Спектральна щільність кодів передачі сигналу

2.2 Визначення необхідної ширини смуги частот фотоприймального пристрою і тривалість тактового інтервалу

Знаючи швидкість передачі інформації  $V$ , знайдемо тривалість тактового інтервалу :

$$T = \frac{1}{F_{\text{такт}}} \quad (2.1)$$

$$V = 0,8 \left( \frac{\text{Гбіт}}{\text{с}} \right)$$

$$F_{\text{такт}} = V = 0,8 \text{ (ГГц)}$$

$$T = \frac{1}{0,8} = 1,25 * 10^{-9} = 1,25 \text{ (нс)}$$

При заданому типі кодування сигналу (фотонний код), ширина смуги частот фотоприймального пристрою повинна дорівнювати:

$$\Delta f \geq \frac{1,52}{T} \quad (2.2)$$

$$\Delta f \geq \frac{1,52}{1,25} * 10^9 = 1,216 * 10^9 = 1,216 \text{ (ГГц)}$$

Таким чином, ширина смуги частот фотоприймального пристрою повинна перевищувати 1,216 ГГц.



## 2.3 Визначення мінімального співвідношення сигнал-шум на виході фотоприймального пристрою (SNR)

Виходячи із заданого допустимого коефіцієнта помилок (BER), визначимо мінімально необхідне співвідношення сигнал-шум на виході фотоприймального пристрою (SNR).

Операція ухвалення рішення (стробування), в принципі дуже проста, ускладнюється через спотворення сигналу на виході. Це відбувається з двох причин:

1) Через обмежену смугу пропускання приймача і лінії зв'язку. Форма імпульсу, що приймається, відрізняється від прямокутної форми імпульсу. Спостерігаються хвости імпульсу поза робочим проміжком часу і накладення на сусідні імпульси - так звана міжсимвольна перешкода.

2) На корисний сигнал накладається паразитна напруга випадкового шуму, миттєва амплітуда якого може бути порівнянна з порогом.

На практиці зазвичай не можна зменшити вплив обох ефектів одночасно. Але насправді вплив останнього чинника достатньо малий в порівнянні з впливом шуму, і в розрахунках їм можна нехтувати.

Спотворення сигналу, особливо шумом, призводить до ухвалення помилкових рішень і вступу до приймача деякого числа помилкових сигналів в двійковій формі. Якість відновленого повідомлення характеризується коефіцієнтом помилок, під яким розуміють відношення числа помилкових бітів на виході приймача до повного числа отриманих бітів.

Припустимо, що напруга сигналу - це випадкова величина із законом розподілу Гауса і стандартним відхиленням  $\sigma_u$ . Вона центрована на  $u$ , коли випромінюється символ "1", і на нулі при передачі "0". Тому умовна вірогідність прийому символу "0" при передачі символу "1" дорівнюватиме вірогідності того, що напруга на виході приймача буде нижча за поріг  $u_s$ .

Отже, вираження для цієї вірогідності має вигляд:

$$P(0/1) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_u^2}} \int_{-\infty}^{u_s} \exp\left(-\left(\frac{x-u}{\sqrt{2 \cdot \sigma_u^2}}\right)^2\right) dx \quad (2.3)$$

Аналогічно умовна вірогідність прийому символу "1", коли передається символ "0", дорівнює:

$$P(0/1) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_u^2}} \int_{u_s}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{x}{\sqrt{2 \cdot \sigma_u^2}}\right)^2\right) dx \quad (2.4)$$

За допомогою заміни змінної:

$$P(0/1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u-u_s}{\sqrt{2 \cdot \sigma_u^2}}\right) \quad (2.5)$$

$$P(0/1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_s}{\sqrt{2 \cdot \sigma_u^2}}\right), \quad (2.6)$$

де  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-x^2) dx$  - додаткова функція помилок

Символи "1" і "0" вважаються рівноімовірними, отже повна вірогідність помилки, дорівнює:

$$P_e = \text{BER} = \frac{1}{2} P(1/0) + \frac{1}{2} P(0/1) \quad (2.7)$$

Враховуючи, що вірогідність помилки однакова для кожного символу:

$$P_e = \text{BER} = P(1/0) = P(0/1) \quad (2.8)$$

З урахуванням (2.5) і (2.6), цей вираз дає наступне значення порогу :

$$u_s = \frac{u}{2} \quad (2.9)$$

Вираження для вірогідності помилки прийме вид:

$$P_z = \text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (2.10)$$

де  $Q = \frac{u}{2\sigma_u}$

Коефіцієнт помилок залежить від відношення сигнал-шум на виході приймального пристрою. Зв'язок між ними визначається через додаткову функцію помилок, значення якої табульовані, а також представлені на графіці (рисунок 2.5):

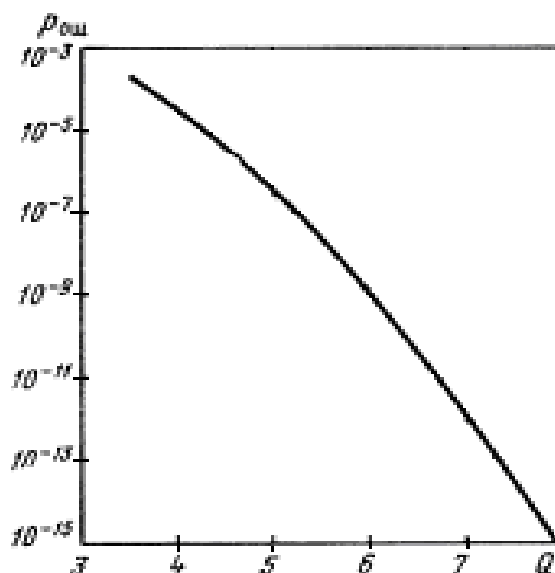


Рисунок 2.5 - Функція помилок на виході фотоприймального пристрою

Виходячи з необхідного коефіцієнта помилок  $BER=10^{-9}$  по графіку визначаємо, що для досягнення такої якості прийняття сигналу потрібно, щоб  $Q=6$ .  $Q$  пропорційна відношенню сигналу до шуму ( $S/B$ ), що визначається зазвичай для цифрових систем зв'язку як відношення максимального відношення напруги до діючого значення напруги шуму :

$$Q = \frac{1}{2} \text{SNR} \quad (2.11)$$

Отже, відношення сигнал-шум має дорівнювати 12.

## 2.4 Вибір необхідного фотодіода

У фотоприймальних пристроях (ФПП) ВОСПІ відбувається перетворення оптичних сигналів в електричні і первинна обробка електричних сигналів. До характеристик ФПП пред'являють наступні основні вимоги:

- висока ефективність перетворення оптичних сигналів в електричні (висока чутливість на робочій довжині хвилі);
- висока швидкодія;
- низький рівень шумів;
- стабільність характеристик при зміні параметрів довкілля (температури, вологості, тиску та ін.);
- висока надійність, великий термін служби;
- низька вартість.

Важливою характеристикою фотодіодів є спектральна характеристика, тобто залежність ефективності роботи фотодіода від довжини хвилі сигналу, що передається де ефективність роботи фотодіода визначається відношенням струму на виході до потужності сигналу, що приймається. Ця характеристика визначає діапазон викорис-

тання різних фотодіодів в приладах. На рисунку 2.6 представлені характеристики для трьох основних типів фотодіодів : кремнієвого (Si), германієвого (Ge) і на основі сплаву арсеніду галію (InGaAs).

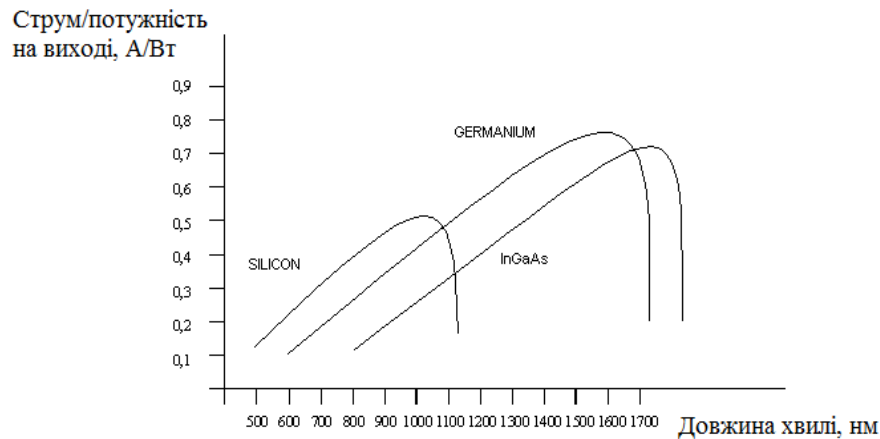


Рисунок 2.6 - Характеристики залежності вихідного сигналу фотодіода від довжини хвилі сигналу, що приймається

З рисунка видно, що кремнієвий фотодіод може з успіхом використовуватися при вимірах оптичного сигналу від 800 до 900 нм. На практиці, оптичні вимірювачі потужності, що використовують цей тип детектора, калібруються на ширший діапазон - від 400-450 до 1000 нм. Для вимірів в одномодових волоконних кабелях 1310 і 1550 нм, що набули найбільшого поширення в сучасних системах зв'язку, зазвичай використовуються германієві детектори або фотодіоди на основі сплаву InGaAs. Вони працюють в усіх трьох вікнах прозорості, але детектори на основі InGaAs мають ширший спектр виміру, велику температурну стабільність і вартість. Крім того, InGaAs-фотодіоди за відсутності світлового сигналу мають низький рівень залишкового струму, який, до того ж, практично не залежить від зміни температури. Це дозволяє понизити рівень шуму і збільшити динамічний діапазон вимірів. [28]

PIN-діод є напівпровідниковою структурою, яка включає область позитивних зарядів (positive), область негативних зарядів (negative) і нейтральну область (intrinsic), що розділяє їх, збіднену носіями зарядів (рисунок 2.7). Збіднена область створюється зворотним зміщенням переходу, при якому через прилад тече дуже слабкий зворотний струм. При зворотному зміщенні електрони прагнуть вийти з n -області в зо-

внiшнiй ланцюг i утворити дiрки в p-областi, збiдняючи носiями заряду область переходу.

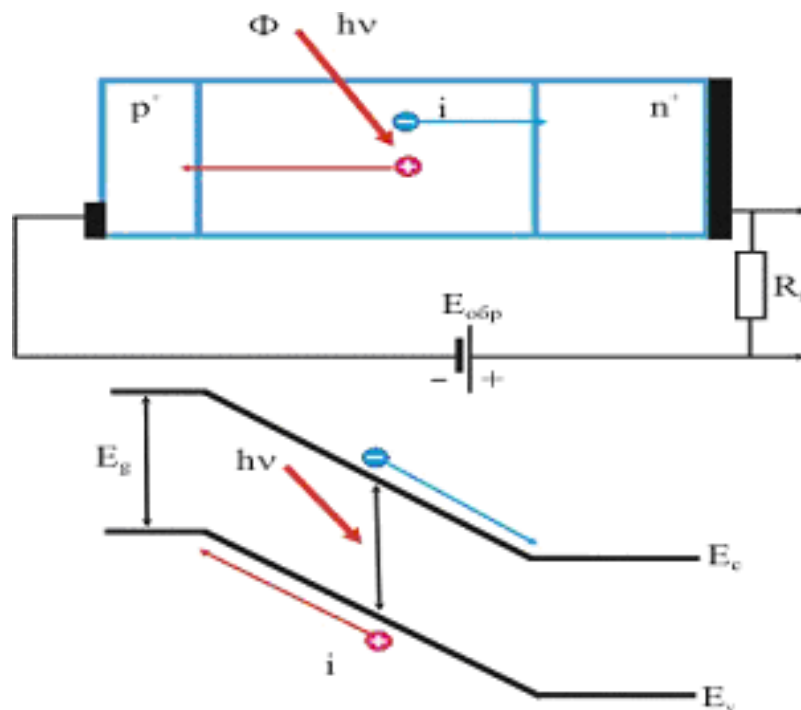


Рисунок 2.7 - Структура PIN-дiода

У iдеальному PIN-дiодi кожен фотон створює одну електронно-дiркову пару. Якщо на дiод падає слабкий свiтловий потiк, то електричний струм, що виробляється, може бути недостатнiм, щоб детектувати його на фонi внутрiшнього шуму самого pin -дiода i зовнiшнього ланцюга. [29]

PIN-дiод має наступнi характеристики:

- вiдносно проста структура в порiвняннi з лавинними дiодами;
- вiдносно слабка чутливiсть до змiни температури приладу;
- квантова ефективнiсть зазвичай менш або рiвна 1;
- обмежений динамiчний дiапазон;
- висока мiцнiсть i тривалий час експлуатацiї;
- невелика вартiсть;

- в порівнянні з лавинними діодами низька чутливість при цьому відношенні сигнал/шум.

Коли світло падає на поверхню діода, фотони, що поглинаються, створюють електронно-діркові пари в збідненій області. Потім електрони і дірки розділяються під дією зворотного зміщення переходу і течуть у напрямі своїх областей. Кожна електронно-діркова пара виробляє струм в один електрон в зовнішньому ланцюзі.

Лавинний фотодіод або APD (Avalanche Photo Diode) є альтернативою фотодетектору на основі PIN-діода. В порівнянні з останнім він має ряд переваг. Якщо на поверхню PIN-діода падає слабкий світловий потік, то вихідний сигнал детектора також слабкий, тому хотілося б підвищити його рівень перед подальшою його обробкою і посиленням в електронній частині фотоприймача. Це і забезпечує структура, названа APD, яка показана на рисунку 2.8.

Усередині частини збідненої області лавинного діода створюється сильне електричне поле. Основні носії зарядів, породжені фотонами (як і в pin-діодах), що падають на діод, при попаданні в це сильне поле здатні посилювати вихідну енергію на декілька електрон-вольт. Стикаючись з кристалічною решіткою, основний носій віддає достатньо енергії для просування електрона з валентної зони в зону провідності. Цей процес називається ударною іонізацією.



Рисунок 2.8 - Структура APD

Внаслідок цього неосновні носії можуть створювати ще більше носіїв заряду. В результаті відбувається явище, відоме як лавинний пробій, яким і пояснюється внутрішнє посилення в діоді.

Кількість електронів, що утворюють струм в зовнішньому ланцюзі діода, дорівнює добутку числа фотонів, що падають, і коефіцієнта лавинного множення.

Тому APD мають квантову ефективність близько 4 (тобто більше 100 %), хоча це може приводити також і до посилення шуму на виході приладу.

Лавинні діоди чутливі до зміни температури, тому зазвичай в структуру фотодетектора на основі APD включена схема АРП (автоматичного контролю посилення), яка підтримує стабільну напругу зміщення. Лавинні діоди мають наступні характеристики:

- складніша структура в порівнянні з PIN-діодами;
- чутливість приладу залежить від його температури;
- квантова ефективність складає від 3 до 4;
- ширший динамічний діапазон;
- висока міцність і тривалий час експлуатації;
- вища вартість в порівнянні з PIN-діодами;
- чутливість зазвичай на 5 - 6 дБ вище, ніж у PIN-діодів.

Для вибору необхідного типу фотоприймача зробимо порівняння декількох PIN-фотодіодів (таблиця 2.2) і декількох APD (таблиця 2.3), що випускаються промисловістю



Таблиця 2.2 - PIN-фотодіоди

Модель	Фв, ГГц	Id, нА	S, А/Вт	C, пФ	дакт, мкм
Mitsubishi Electric Semiconductor PD708C8	2	0,05	0,9	1.2	80
Kyosemi Corporation KPDE10GC-V2	14	0,01	0,95	0.17	28
Microsemi Corporation LX3055	6,5	0,6	1.0	0,35	60
Hamamatsu Corporation G8198-1	3	0,06	0,95	0,6	40
Kodenshi Korea corp. KPPB1-LM622	1,4	0,2	0,95	1,3	70

Виберемо по одному фотодіоду з кожної таблиці.

Серед PIN-фотодіодів, завдяки низьким показникам  $I_d=0,01$  нА і  $C=0,17$  пФ і високою чутливістю  $S=0,95$  А/Вт, можна виділити модель KPDE10GC-V2, виготовлену Kyosemi Corporation.

Серед APD-фотодіодів, виділяється діод моделі NR8300FP-CC від виробника NEC Compound Semiconductor Devices, який відрізняється від діодів інших виробників низьким темновим струмом  $I_d=5$  нА, низькою місткістю  $C=0,35$  пФ і порівняною з іншими діодами чутливістю  $S=0,96$  А/Вт.

Таблиця 2.3 - APD-фотодіоди

Модель	F <sub>в</sub> , ГГц	I <sub>d</sub> , нА	S, А/Вт	C, пФ	M	F	дакт, мкм
Mitsubishi Electric Semiconductor PD893E6	8,5	30	0,85	0,22	н/д	н/д	20
Eudyna Devices Inc FPD5W1KX	3	15	0,92	0,55	10	4	30
NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC	2,5	5	0,96	0,35	30	5 при M=10	30
Hamamatsu G8931 - 04	4	40	0,9	0,35	н/д	н/д	40
Optoway Technology Inc APD-1155	2,5	80	0,9	0,6	н/д	н/д	н/д

Чинник шуму для вибраного APD-фотодіода [30]:

$$F = M^x, \quad (2.12)$$

де  $x$  - чинник множення, залежний від матеріалу фотодіода і типу носіїв, що викликають лавину. (Для InGaAs  $x=0.7$ )

$$F = 30^{0,7} = 10,8$$

Повний опис характеристик вибраних фотодіодів приведений в додатку А.

Сигнал на виході фотодіода дуже слабкий, тому необхідно додати підсилювальний каскад на транзисторі.

## 2.5 Вибір типу транзистора вхідного каскаду підсилювача ФПП

Основні оптичні приймачі складаються з фотодіода підключеного до попереднього підсилювача. Згідно з нашим варіантом, нам заданий трансімпедансний підсилювач (рисунок 2.9).

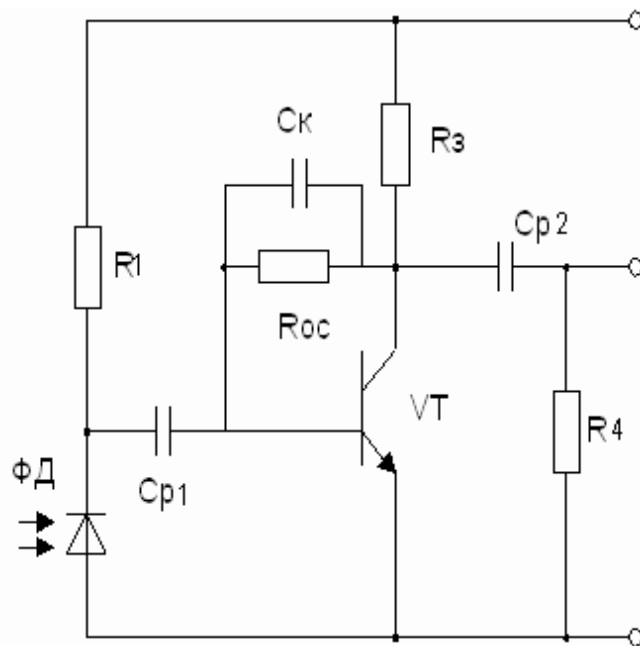


Рисунок 2.9 - Схема оптичного приймача випромінювання з трансімпедансним підсилювачем

Як вхідні підсилювачі найчастіше застосовують три типи підсилювальних схем :

1. підсилювачі з низьким вхідним опором;
2. підсилювачі з високим вхідним опором;
3. трансімпедансні підсилювачі.

Кожна з цих схем має свої особливості посилення корисного сигналу і шумових складових.

Підсилювач з низьким вхідним опором вимагає узгодження опору навантаження фотодетектора з малими значеннями вхідного опору підсилювача. На високих швидко-

стях величина цього опору вибирається близько декількох десятків Ом, що значною мірою обмежує чутливість приймача.

Такі схеми підсилювачів широко застосовувалися в 80-і рр. минулого століття спільно з германієвими фотодіодами (діапазон 1,3 мкм), лавинними фотодіодами, а також з іншими типами фотодетекторів. Перевагою цих схем є простота їх реалізації на "розсіпних" елементах, на платах друкованого монтажу, методом монтажу на поверхню (на швидкостях до 150 Мбіт/с) та ін.

Підсилювач з високим входним опором забезпечує найбільш низький рівень шуму, а отже, максимальну чутливість. Проте внаслідок високого імпедансу навантаження на входному каскаді частотна характеристика обмежується постійною часу RC входного ланцюга [31]:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C'} \quad (2.13)$$

де  $R$  - опір з паралельно включених опорів ланцюга зміщення і входного опору підсилювача;

$C$  - ємність з паралельно включених ємностей фотодіода і входної ємності підсилювача.

Через значну постійну часу RC приймач з високим опором інтегрує реєстрований сигнал. Таким чином, після приймача необхідно включити в ланцюг пристрій, що корегує. Основним недоліком такої схеми є обмежений динамічний діапазон. Як правило, 15-25 дБ по оптичному сигналу.

Трансімпедансний підсилювач (ТрП) має по відношенню до підсилювача з високим входним опором декілька більший рівень власних шумів, але забезпечує істотне розширення динамічного діапазону, що робить цей тип підсилювальних схем найчастіше вживаним нині в приймальних модулях систем зв'язку спільно з InGaAs/InP фотодіодами. Трансімпедансний підсилювач з GaAs польовим СВЧ-транзистором на

вході є найбільш типовою підсилювальною схемою, вживаною в діапазоні швидкостей 2-500 Мбіт/з, дозволяючою набути цілком прийнятних для сучасних умов значень порогу чутливості. Це досягається завдяки низьким значенням вхідної місткості і можливістю роботи з високими значеннями опору навантаження фотодетектора.

Трансімпедансний підсилювач - це підсилювач з глибоким негативним зворотним зв'язком, що дозволяє варіювати в широких межах вхідний опір за рахунок зміни опору в ланцюзі зворотного зв'язку. Вхідний ланцюг приймача будується таким чином, що вхідний опір підсилювача є опором навантаження фотодетектора. Величина цього опору вибирається відповідно до вимог до максимальної ширини смуги пропускання вхідного ланцюга, визначуваною швидкістю передачі і типом вживаного лінійного коду. Термін "Трансімпедансний" означає "трансформуючий імпеданс", тобто що перетворює високий вхідний опір (сотні кілоом) з низькою складовою (від доль пікофарада до одиниць пікофарад) місткості до низького (50-200 Ом) вихідного опору. Напруга на виході приладу:

$$U_{out} = -I_d \cdot R_f, \quad (2.14)$$

де  $R_f$  - опір зворотного зв'язку

$I_d$  - струм фотодіода.

Зазвичай вважають за краще використовувати підсилювач із зворотним зв'язком. Його основна перевага - відсутність необхідності здійснювати яку-небудь корекцію. Шуми такого підсилювача можуть бути багато менше, ніж у звичайного підсилювача напруги без корекції.

Перевагами ФПУ з ТрП є:

- великий динамічний діапазон вхідних сигналів;
- простота регулювання смуги частот посилення без додаткових коректорів;
- простота налаштування схеми.

Недоліками слід вважати:

-можливу нестійкість роботи підсилювача при різній глибині зворотного зв'язку в широкій смузі частот;

-зменшене співвідношення сигнал/шум на виході підсилювача через додатково шумлячий опір  $R_{зз}$ .

Для підсилювачів розглядається можливість використання трьох типів транзисторів :

- 1) кремнієвий польовий площинний;
- 2) кремнієвий біполярний площинний;
- 3) польовий канальний на арсеніді галію.

На частотах більше 1 ГГц доцільно використовувати у вхідному каскаді польовий канальний транзистор з арсеніду галію, з мінімальним чинником шуму NF (NoiseFactor).

Критерії вибору транзисторів :

Для польових транзисторів:

1) Крутизна вхідної характеристики транзистора  $g_m$  має бути як можна вище, що забезпечить найбільше зростання значення струму стоку при збільшенні напруги затвор-витік.

2) Значення сили струму затвора  $I_z$ , як і будь-якого струму витоку, має бути якомога менше.

Для біполярних транзисторів:

1) Значення сили струму колектору повинно бути якомога більше, а струму бази - менше, що забезпечить найбільший коефіцієнт передачі по струму.

Приведемо ряд польових (таблиця 2.4) і біполярних (таблиця 2.5) транзисторів:

Спираючись на вище перелічені критерії, зробимо вибір транзисторів :

Серед польових транзисторів зробити вибір досить складно. Наприклад, транзистор Nexawave inc. HWL34YRF має дуже велику крутизну вхідної характеристики, що безумовно є плюсом, але тим самим струм затвора досить великий, що є його недоліком. Аналогічна ситуація з транзистором Alpha Industries AFM06P3 - 212.

Таблиця 2.4. Польові транзистори

Модель	F, ГГц	gm, мСм	Ic, мА	Iз, мА	NF, дБ
Hexawave inc. HWL34YRF	2,4	700	1200	6	н/д
RFMD inc. SPF-2000	12	212	85	0,3	0,5
Alpha Industries AFM06P3-212	18	120	200	1	н/д

Таблиця 2.5. Біполярні транзистори

Модель	F, ГГц	Iк, А	Iб, А	h21	NF, дБ
KEC (Korea Electronics) KTC2026	4,5	0,03	-	25	1,9
Philips Semiconductors BFS17A	2,8	0,025	-	90	2,5
Infineon Technologies BFS17P	1,4	0,025	-	70	3,5
Infineon Technologies BFT92	5	0,025	-	50	-

Спочатку при виборі біполярного транзистора, розрахуємо струм бази для кожного по формулі:

$$h_{21} = \frac{I_k}{I_b} \Rightarrow I_b = \frac{I_k}{h_{21}}, \quad (2.15)$$

$$I_b(\text{KTC2026}) = \frac{0,03}{25} = 0,00027 \text{ (A)}$$

$$I_b(\text{BFS17A}) = \frac{0,025}{90} = 0,00027 \text{ (A)}$$

$$I_{\text{б}}(\text{BFS17P}) = \frac{0,025}{70} = 0,00035 \text{ (A)}$$

$$I_{\text{б}}(\text{BFT92}) = \frac{0,025}{50} = 0,0005 \text{ (A)}$$

Оскільки у транзисторів струми колектора практично однакові, вибір виходить від значення коефіцієнта передачі по струму. Найбільше значення параметра  $h_{21}$  має транзистор від компанії Philips Semiconductors моделі BFS17A, так само перевагою цього транзистора є досить низький чинник шуму  $NF = 2,5$  дБ, що на 1 дБ нижче, ніж у "конкурента" Infineon Technologies BFS17P.

Вибираємо транзистор від компанії Philips Semiconductors моделі BFS17A.

Вибір транзистора і фотодіода буде проведено в пункті 2.6, в ньому будуть розглянуті різні комбінації цих пристроїв, вибір буде зроблений виходячи з найкращого показника шумових параметрів кожної зв'язки.

## 2.6 Розрахунок мінімальної потужності оптичного випромінювання на вході фотоприймача

При розгляді шумів слід дуже уважно відноситися до того, що розуміється під цим терміном. Шум обумовлений тими випадковими флуктуаціями струму, які виникають у будь-якій електронній схемі або її елементі через саму природу електрики і над якими розробник схеми не має ніякого контролю. Ці флуктуації накладаються на будь-які сигнали, що проходять через ланцюг, і маскують їх. Так само слід розрізняти шуми і перешкоди, під якими розуміють ті небажані сигнали, які потрапляють в схему від зовнішніх джерел.



Електричний сигнал містить в собі дробовий шум, оскільки він є потоком дискретних часток (електронів), породжених в результаті випадкового квантового процесу детектування оптичного сигналу у фотодіоді.

Спектральна щільність дробового шуму PIN-фотодіода:

$$(I_{\text{д.ш.}}^*)^2 = \frac{\bar{i}}{\Delta f} = 2e\bar{i} \quad (2.16)$$

А при використанні ЛФД через лавинне множення:

$$(I_{\text{д.ш.}}^*)^2 = \frac{\bar{i}}{\Delta f} = 2eM^2F\bar{i}, \quad (2.17)$$

де  $\Delta f$  - смуга частот, в межах якої спостерігаються флуктуації, а  $\bar{i}$  - середнє значення струму, відносно якого відбуваються флуктуації.

Якщо спектральна щільність не залежить від частоти, то шум називають білим.

Всякий розсіюючий елемент системи вносить шум. Таким чином, будь-який опір в електронному ланцюзі призводить до появи теплового шуму (шуму Джонсона), обумовленого випадковим тепловим рухом носіїв заряду. Цей рух можна спостерігати у вигляді флуктуації струму в резисторі або відповідних йому флуктуацій напруги на його виводах. Середній квадрат спектральної щільності флуктуацій струму і напруги на опорі R:

$$(V_{\text{т.ш.}}^*)^2 = 4kTR \quad (2.18)$$

$$(I_{\text{т.ш.}}^*)^2 = \frac{4kTR}{R}, \quad (2.19)$$

де  $k$  - постійна Больцмана,

$T$  - температура на резисторі.

Очевидно, що тепловий шум - це білий шум.

Остаточне вираження відношення сигнал-шум на виході підсилювача:

$$\text{SNR} = \frac{I_D}{\left\{ \frac{(U_y^*)^2}{M^2} \left[ \frac{1}{R^2} + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 \right] + 2eF(I_D + I_d) + \frac{4kT}{M^2 R} + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right\}^{1/2}}, \quad (2.20)$$

де  $U^*$  - спектральна щільність шуму вхідної напруги підсилювача

$I^*$  - спектральна щільність шуму вхідного струму підсилювача

$M$  - коефіцієнт лавинного множення ЛФД

$R$  - вхідний опір підсилювача

$\Delta f$  - полоса частот інформаційного сигналу

$C$  - еквівалентна ємність (сума вхідної ємності діода і підсилювача)

$e$  - заряд електрона

$I_D$  - струм діода

$I_d$  - темновий струм діода

$F$  - шумовий чинник

Для зручності наступного аналізу кожна з п'яти складових шуму в знаменнику позначається буквами а, б, в, г, д.

Згідно з поставленим завданням, нам пропонується використовувати трансімпедансний підсилювач. Якщо погодитися з необхідністю використовувати корекцію і зробити величину  $R$  досить великою, то шуми визначатимуться доданками б, в, д. Який з цих додатків буде найбільшим, залежить від смуги частот, що перекриваються, і типу використовуваного в підсилювачі вхідного приладу. В цьому випадку відношення сигнал-шум набирає вигляду:

$$SNR = \frac{I_D}{\left\{ \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2eF(I_D + I_d) + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right\}^{1/2} (\Delta f)^{1/2}} \quad (2.21)$$

З отриманого співвідношення виразимо струм фотодіода  $I_D$ :

$$I_D = SNR \cdot \sqrt{\left( \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2eF(I_D + I_d) + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right) \cdot \Delta f} \quad (2.22)$$

Піднесемо обидві частини рівності до другого ступеня, розкриємо дужку:

$$I_D^2 = \frac{SNR^2 \Delta f (U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + SNR^2 \Delta f 2eF(I_D + I_d) + SNR^2 \Delta f \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \quad (2.23)$$

Приведемо вираження до виду:

$$I_D^2 - 2 \cdot SNR^2 \Delta f e F I_D - SNR^2 \Delta f \left( \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2eF I_d + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right) = 0 \quad (2.24)$$

Зробимо наступну заміну:

$$p = e\Delta f F SNR^2; q = SNR^2 \Delta f \left( \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2e F I_d + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right) \quad (2.25)$$

Отримаємо квадратне рівняння:

$$I_D^2 - 2 \cdot p \cdot I_D - q = 0 \quad (2.26)$$

Рішення цього рівняння має вигляд:

$$I_D^2 = p \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{q}{p^2}} \right) \quad (2.27)$$

Зробивши зворотну заміну, отримаємо:

$$I_D^2 = e \Delta f F SNR^2 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{(U_y^*)^2 \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 + 2e F I_d M^2 + (I_y^*)^2}{e^2 \Delta f F^2 SNR^2 M^2}} \right) \quad (2.28)$$

Використовуючи це співвідношення, розрахуємо струм  $I_D$ , отримані результати запишемо у вигляді таблиці.

$$I_{D1.1} = 3,918 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{D1.2} = 7,515 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{D1.3} = 4,13 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{D2.1} = 6,371 \cdot 10^{-7}$$

$$I_{D2.2} = 6,994 \cdot 10^{-7}$$

$$I_{D2.3} = 6,4 \cdot 10^{-7}$$

Повна таблиця результатів виглядатиме таким чином (таблиця 2.6) :

Знайдемо сумарний рівень шуму фотоприймального пристрою для усіх можливий комбінацій фотодіод-транзистор, таких комбінацій у нас буде 6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку

$I_D, A$	Біполярний Philips Semiconductors BFS17A (1)	Польовий Alpha Industries AFM06P3–212 (2)	Польовий RFMD inc SPF–2000 (3)
PIN Kyosemi Corporation KPDE10GC-V2 (1)	$3,918 \cdot 10^{-6}$	$7,515 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$
ЛФД NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP–CC (2)	$6,371 \cdot 10^{-7}$	$6,994 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$

1. Оцінка шумів ФПП (PIN-фотодіод Kyosemi Corp. KPDE10GC-V2 і біполярний транзистор Philips Semiconductors BFS17A):

Параметри, які потрібні в розрахунках:

Заряд електрона:  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл

Смуга частот:  $\Delta f = 1.216 \cdot 10^9$  Гц

Постійна Больцмана:  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{^{\circ}К}$

Температура:  $T = 298$  °К = 25 °С

Основний вклад до шумів біполярних площинних транзисторів вносить дробовий шум, пов'язаний із струмами зміщення бази  $I_b$  і колектору  $I_k$  відповідно. Вираження для спектральної щільності шумових струму і напруга виглядає таким чином:

$$I_y^* = \sqrt{2eI_b} \quad (2.29)$$

$$U_y^* = \sqrt{\frac{2(kT)^2}{eI_k}} \quad (2.30)$$

Підставляємо чисельні значення:

$$I_y^* = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0027} = 9,295 \cdot 10^{-12} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$U_y^* = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298)^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,025}} = 9,195 \cdot 10^{-11} \text{ (B}^2/\text{Гц)}$$

Розрахуємо кожний з додатків знаменника вираження:

$$\text{SNR} = \frac{I_D}{\left\{ \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2eF(I_D + I_d) + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right\}^{1/2} (\Delta f)^{1/2}} =$$

$$= \frac{I_D}{\left\{ \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 + 2eFI_D + 2eFI_d + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right\}^{1/2} (\Delta f)^{1/2}} \quad (2.31)$$

Для PIN-фотодіода величини  $M$  і  $F$  беруться рівними 1:

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(9,19 \cdot 10^{-11})^2 4\pi^2}{1^2 3} (1,216 \cdot 10^9)^2 (0,17 \cdot 10^{-22})^2 = 4,755 \cdot 10^{-27} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 3,98 \cdot 10^{-6} = 1,253 \cdot 10^{-24} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(B) = 2eFI_d = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-11} = 3,2 \cdot 10^{-30} \left( A^2 / \Gamma_{\text{ц}} \right)$$

$$(Г) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(9,29 \cdot 10^{-12})^2}{1^2} = 8,639 \cdot 10^{-23} \left( A^2 / \Gamma_{\text{ц}} \right)$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\Sigma = 4,755 \cdot 10^{-27} + 1,253 \cdot 10^{-24} + 3,2 \cdot 10^{-30} + 8,639 \cdot 10^{-23} = 8,766 \cdot 10^{-23} \left( A^2 / \Gamma_{\text{ц}} \right)$$

2. Оцінка шумів ФПП (PIN-фотодіод Kyosemi Corp. KPDE10GC-V2 і польовий Alpha Industries AFM06P3-212):

У польовому транзисторі головним є тепловий шум, обумовлений опором каналу, тоді оцінки спектральної щільності шумового струму і напруги вхідного каскаду підсилювача можна знайти з наступних співвідношень:

$$I_y^* = \sqrt{2eI_s} \quad (2.32)$$

$$U_y^* = \sqrt{1,1 \frac{4kT}{g_m}} \quad (2.33)$$

Підставляємо чисельні значення:

$$I_y^* = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3}} = 1,788 \cdot 10^{-11} \left( A^2 / \Gamma_{\text{ц}} \right)$$

$$U_y^* = \sqrt{1,1 \cdot \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298}{120 \cdot 10^{-3}}} = 3,883 \cdot 10^{-10} \left( B^2 / \Gamma_{\text{ц}} \right)$$



Аналогічно попередньому пункту, розрахуємо кожний з додатків :

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(3.883 \cdot 10^{-10})^2 4\pi^2}{1^2} (1.216 \cdot 10^9)^2 (0.17 \cdot 10^{-12})^2 = 8.479 \cdot 10^{-26} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 7.515 \cdot 10^{-6} = 2.404 \cdot 10^{-24} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(в) = 2eFI_d = 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-11} = 3.2 \cdot 10^{-30} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(г) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(1.788 \cdot 10^{-11})^2}{1^2} = 3.2 \cdot 10^{-22} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\sum = 8.479 \cdot 10^{-26} + 2.404 \cdot 10^{-24} + 3.2 \cdot 10^{-30} + 3.2 \cdot 10^{-22} = 3.224 \cdot 10^{-22} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

3. Оцінка шумів ФПП (PIN-фотодіод Kyosemi Corp. KPDE10GC-V2 і польовий транзистор RFMD inc SPF-2000):

Спектральна щільність шумового струму і напруги:

$$I_y^* = \sqrt{2eI_s} = \sqrt{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}} = 9.798 \cdot 10^{-12} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$U_y^* = \sqrt{1.1 \frac{4kT}{g_m}} = \sqrt{1.1 \cdot \frac{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 298}{112 \cdot 10^{-3}}} = 4.019 \cdot 10^{-10} \text{ (B}^2/\text{Гц)}$$

Кожен з додатків дорівнює:

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(4,019 \cdot 10^{-10})^2 4\pi^2}{1^2 3} (1,216 \cdot 10^9)^2 (0,17 \cdot 10^{-12})^2 = 9,085 \cdot 10^{-26} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 4,13 \cdot 10^{-6} = 1,321 \cdot 10^{-24} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(в) = 2eFI_d = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-11} = 3,2 \cdot 10^{-30} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(г) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(9,797 \cdot 10^{-12})^2}{1^2} = 9,6 \cdot 10^{-23} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\sum = 9,085 \cdot 10^{-26} + 1,321 \cdot 10^{-24} + 3,2 \cdot 10^{-30} + 9,6 \cdot 10^{-23} = 3,224 \cdot 10^{-22} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

4. Оцінка шумів ФПУ (APD-фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC і біполярний транзистор Philips Semiconductors BFS17A) :

Кожен з додатків дорівнює:

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(9,195 \cdot 10^{-11})^2 4\pi^2}{30^2 3} (1,216 \cdot 10^9)^2 (0,35 \cdot 10^{-12})^2 = 2,239 \cdot 10^{-29} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 6,371 \cdot 10^{-7} = 2,204 \cdot 10^{-24} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(в) = 2eFI_d = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 5 \cdot 10^{-9} = 1,73 \cdot 10^{-26} \text{ (A}^2/\text{Гц)}$$

$$(\Gamma) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(9,295 \cdot 10^{-12})^2}{30^2} = 9,6 \cdot 10^{-26} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\sum = 2,239 \cdot 10^{-29} + 2,204 \cdot 10^{-24} + 1,73 \cdot 10^{-26} + 9,6 \cdot 10^{-26} = 2,318 \cdot 10^{-24} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

5. Оцінка шумів ФПП (APD-фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC і польовий транзистор Alpha Industries AFM06P3-212):

Кожен з додатків дорівнює:

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(3,883 \cdot 10^{-10})^2 4\pi^2}{30^2 3} (1,216 \cdot 10^9)^2 (0,35 \cdot 10^{-12})^2 = 3,993 \cdot 10^{-28} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 6,994 \cdot 10^{-7} = 2,420 \cdot 10^{-24} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

$$(в) = 2eFI_d = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 5 \cdot 10^{-9} = 1,73 \cdot 10^{-26} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

$$(\Gamma) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(1,788 \cdot 10^{-11})^2}{30^2} = 3,55 \cdot 10^{-25} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\sum = 3,993 \cdot 10^{-28} + 2,420 \cdot 10^{-24} + 1,73 \cdot 10^{-26} + 3,55 \cdot 10^{-25} = 2,318 \cdot 10^{-24} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{\text{ц}}} \right)$$

6. Оцінка шумів ФПП (APD-фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC і польовий транзистор RFMD inc SPF-2000):

Кожен з додатків дорівнює:

$$(a) = \frac{(U_y^*)^2 4\pi^2}{M^2 3} (\Delta f)^2 C^2 = \frac{(4,019 \cdot 10^{-10})^2 4\pi^2}{30^2} (1,216 \cdot 10^9)^2 (0,35 \cdot 10^{-12})^2 = 4,278 \cdot 10^{-28} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{Ц}} \right)$$

$$(б) = 2eFI_D = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 6,4 \cdot 10^{-7} = 2,214 \cdot 10^{-24} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{Ц}} \right)$$

$$(в) = 2eFI_d = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10,814 \cdot 5 \cdot 10^{-9} = 1,73 \cdot 10^{-26} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{Ц}} \right)$$

$$(г) = \frac{(I_y^*)^2}{M^2} = \frac{(9,798 \cdot 10^{-12})^2}{30^2} = 1,067 \cdot 10^{-25} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{Ц}} \right)$$

Сума усіх додатків дорівнює:

$$\sum = 4,278 \cdot 10^{-28} + 2,214 \cdot 10^{-24} + 1,73 \cdot 10^{-26} + 1,067 \cdot 10^{-25} = 2,318 \cdot 10^{-24} \left( \frac{A^2}{\Gamma_{Ц}} \right)$$

Для зручності аналізу, занесемо усі отримані результати в таблицю (таблиця 2.7 і таблиця 2.8):

Таблиця 2.7 - Результати комбінації PIN -фотодіода Kyosemi Corp. KPDE10GC-V2 і  
вибраних транзисторів

	Біполярний Philips Semiconductors BFS17A	Польовий Alpha Industries AFM06P3-212	Польовий RFMD inc SPF-2000
(а), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$4.755 \cdot 10^{-27}$	$8.479 \cdot 10^{-26}$	$9.085 \cdot 10^{-26}$
(б), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$1.253 \cdot 10^{-24}$	$2.404 \cdot 10^{-24}$	$1.321 \cdot 10^{-24}$
(в), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$3.2 \cdot 10^{-30}$	$3.2 \cdot 10^{-30}$	$3.2 \cdot 10^{-30}$
(г), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$8.639 \cdot 10^{-23}$	$3.2 \cdot 10^{-22}$	$9.6 \cdot 10^{-23}$
$\Sigma$ , $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	<b><math>8.766 \cdot 10^{-23}</math></b>	<b><math>3.224 \cdot 10^{-22}</math></b>	<b><math>9.741 \cdot 10^{-23}</math></b>

Таблиця 2.8 - Результати комбінації APD -фотодіода NEC Compound Semiconductor  
Devices NR8300FP-CC і вибраних транзисторів

	Біполярний Philips Semiconductors BFS17A	Польовий Alpha Industries AFM06P3-212	Польовий RFMD inc SPF-2000
(а), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$2.239 \cdot 10^{-29}$	$3.993 \cdot 10^{-28}$	$4.278 \cdot 10^{-28}$
(б), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$2.204 \cdot 10^{-24}$	$2.420 \cdot 10^{-24}$	$2.214 \cdot 10^{-24}$
(в), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$1.73 \cdot 10^{-26}$	$1.73 \cdot 10^{-26}$	$1.73 \cdot 10^{-26}$
(г), $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	$9.6 \cdot 10^{-26}$	$3.55 \cdot 10^{-25}$	$1.067 \cdot 10^{-25}$
$\Sigma$ , $(A^2/\Gamma_{\text{ц}})$	<b><math>2.318 \cdot 10^{-24}</math></b>	<b><math>2.793 \cdot 10^{-24}</math></b>	<b><math>2.34 \cdot 10^{-24}</math></b>

Судячи з отриманих результатів видно, що найменший рівень шумів у фотоприймального пристрою, виготовленого з комбінації APD -фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC і біполярного транзистора Philips Semiconductors BFS17A.

Проведемо аналіз отриманого :

1. У зв'язці з PIN-фотодіодом спектральна щільність темного струму (додаток (в)) вийшла на 4 порядки нижче, ніж в зв'язці з APD-фотодіодом, оскільки ця складова шуму в першому випадку залежить тільки від темного струму  $I_a$ , а у випадку з APD фотодіодом також залежить і від коефіцієнта F -фактор шуму, не рівного 1.

До усього цього можна додати, що хоч і у APD-фотодіода чутливість вища, але характеристика темного струму гірша, ніж у PIN-фотодіода. Неважко помітити, що саме ця характеристика входить у визначення додатку (в).

2. Шум дробу - основна складова внутрішніх шумів більшості радіоелектронних пристроїв, які призводять до спотворення слабких корисних сигналів і обмежують чутливість підсилювачів. Виходячи з отриманих результатів, можна сказати, що в усіх розглянутих варіантах значення спектральної щільності шуму дробу фотоструму виявилися приблизно рівними (додаток (б)), одного порядку. Пояснюється це тим, що дробовий шум - це безладна флуктуація напруги і струмів відносно їх середнього значення в ланцюгах, обумовлена дискретністю електричного заряду - електрона.

Так само відносний рівень додатку (б) залежить від значення M і F. У зв'язку з цим для PIN-фотодіода дробовий шум незначний. При використанні ж APD-фотодіода спостерігається зменшення додатків (а) і (г), внаслідок чого дробовий шум є домінуючим.

З цих двох пунктів, зробимо висновок, що ФПП на основі зв'язки з PIN-фотодіодом, виграють, хоч і трохи, по шумових складових діода, у ФПП на основі зв'язки з APD-фотодіодом.

3. Додатки (а) і (г), що відповідають за шуми транзисторів, у ФПП на основі APD-фотодіода вийшли на 1-2 порядки нижче, ніж у ФПП на основі PIN-фотодіода.

Це пов'язано з присутністю у APD-фотодіода лавинного ефекту. Незавжди помітити це і з аналітичного представлення цих додатків. При розрахунку додатків (а) і (г) у випадку з APD-фотодіодом відбувається ділення на коефіцієнт лавинного множення.

З вищесказаного зробимо висновок, що APD-фотодіод значно знижує вимоги до транзистора.

4. З отриманих результатів так само видно, що з біполярним транзистором досягаються кращі показники по шумах.

Другим критерієм вибору основи для фотоприймального пристрою може служити критерій "чутливості". ФПП з комбінації APD-фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC і біполярний транзистор Philips Semiconductors BFS17A матиме найбільшу чутливість внаслідок того, що розрахований раніше струм  $I_d$ , для цієї комбінації має найменше значення.

Визначимо мінімальну оптичну потужність цього фотоприймального пристрою :

$$P = \frac{I_D}{S} \quad (2.34)$$

$$P = \frac{6,371 \cdot 10^{-7}}{0,96} = 6,636 \cdot 10^{-7} \text{ (Вт)}$$

$$p = 10 \cdot \lg \left( \frac{P}{10^{-3}} \right) \quad (2.35)$$

$$p = 10 \cdot \lg \left( \frac{6,636 \cdot 10^{-7}}{10^{-3}} \right) = -31,781 \text{ (дБм)}$$

Виходячи з цих двох критеріїв вибору, як фотодіод фотоприймального пристрою вибираємо APD-фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices NR8300FP-CC, а

як транзистор вхідного каскаду підсилювача біполярний транзистор Philips Semiconductors BFS17A.

Розрахуємо довжину регенераційної ділянки :

$$L_{\text{рег}} = \frac{P_{\text{нзл}} - P_{\text{пр}}}{\alpha} \quad (2.36)$$

$$L_{\text{рег}} = \frac{0 - (-31,781)}{0,3} = 105,93 \text{ (км)}$$

Порівняємо запропонований ФПП з ФП пристроями інших виробників (таблиця 2.9):

Таблиця 2.9 – Порівняльна таблиця

Назва	BER	В, Гбит/с	Чутливість, дБм	Тип коду	Схема підсилювача
Спроектване ФПУ	$10^{-9}$	0,8	-31,781	фотонний	Трансімпедансний
Eudyna Devices Inc FRM5W232FY	$10^{-10}$	2,49	-34	NRZ	Трансімпедансний
Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4	$10^{-10}$	0,62	-32	NRZ	Трансімпедансний



Видно, що ФПП Eudyna Devices Inc перевершує запропоноване ФПУ по усіх параметрах. Це ФПП має велику швидкість передачі інформації і при більшій чутливості має кращий показник по BER.

Можна перерахувати чутливість для запропонованого ФПП при швидкості передачі інформації, вказаної для ФПП Eudyna Devices Inc (2,49Гбит/с, так само змінити тип коду з фотонного на NRZ і значення BER) :

$$p = -28,867 \text{ (дБм)}$$

Отримали ще більш гірший показник по чутливості (приблизно на 5,1 дБм). ФПУ від Mitsubishi Electric Semiconductor поступається розробленому ФПП за швидкістю і небагато перевершує по чутливості. Цікаво розрахувати яку чутливість покаже запропонований ФПП при  $V=0,62$  Гбит/с і  $BER = 10^{-10}$  і коді NRZ, що характерно ФПП від Mitsubishi Electric Semiconductor.

$$p = -34,597 \text{ (дБм)}$$

Показник по чутливості спроектованого ФПП виявився трохи краще, ніж у ФПП від Mitsubishi Electric Semiconductor.

## 2.7 Шляхи і способи поліпшення чутливості розробленого фотоприймача

Розглянемо три шляхи поліпшення чутливості фотоприймача. Серед них використання оптимального коефіцієнта лавинного множення, використання іншого типу коду та застосування іншого типу підсилювача.

### 1. Використання оптимального коефіцієнта лавинного множення.

Розглянемо вираження для визначення струму діода :

$$I_D^2 = e \Delta f F SNR^2 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{(U_y^*)^2 \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 + 2e F I_d M^2 + (I_y^*)^2}{e^2 \Delta f F^2 SNR^2 M^2}} \right) \quad (2.37)$$

Видно, що струм є функцією  $I_D = I_D(M, F(M))$

Знайдемо таке  $M$ , при якому  $I_D$  буде мінімальним і отже чутливість максимальною (рисунок 2.10).

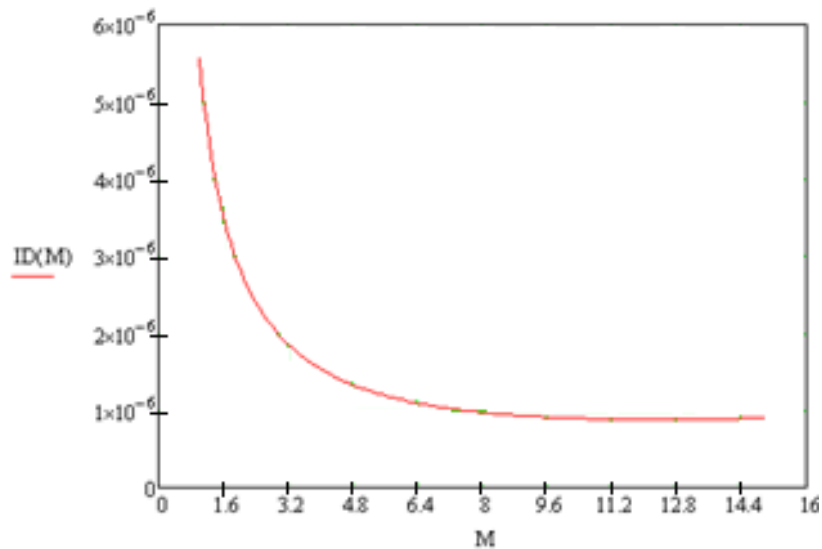


Рисунок 2.10 – Залежність струму від коефіцієнта лавинного множення

З графіка видно, що найбільш оптимальним є  $M \sim 12,8$ . Розрахуємо чутливість для цього  $M$ :

$$p = -32,696 \text{ (дБм)}$$

Отримали чутливість вище за чутливість при  $M=30$ .

## 2. Використання іншого коду передачі.

Для збільшення чутливості розробленого фотоприймального пристрою також можна використовувати менш широкосмуговий код. Наприклад, замість фотонного коду можна використовувати код NRZ, оскільки цей код має найменшу смугу частот:

$$\Delta f \geq \frac{0,86}{T}$$

При використанні цього коду, значення  $\Delta f$  складе:

$$\Delta f = \frac{0,86}{0,8 \cdot 10^9} = 688 \text{ (МГц)}$$

У результаті, величина чутливості :

$$p = -34,106 \text{ (дБм)}$$

## 3. Застосування іншого типу підсилювача.

Не дивлячись на те, що підсилювач з високим вхідним опором забезпечує найбільш низький рівень шуму, а отже, максимальну чутливість. Але внаслідок високого імпедансу навантаження на вхідному каскаді частотна характеристика обмежується постійною часу RC вхідного ланцюга:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (2.38)$$

Через значну постійну часу RC приймач з високим опором інтегрує реєстрований сигнал. Таким чином, після приймача необхідно включити в ланцюг пристрій, що коригує. Основним недоліком такої схеми є обмежений динамічний діапазон. Як правило, 15-25 дБ по оптичному сигналу.

Спираючись на вищесказане, можна застосувати трансімпедансний підсилювач для усунення обмеження динамічного діапазону підсилювача з високоомним входом (забезпечується динамічний діапазон аж до 40 дБ). Крім того, в нім використовується негативний зворотний зв'язок для розширення смуги пропускання підсилювача.

Якщо врахувати усе вищесказане, отримаємо наступне значення чутливості (візьмемо  $M_{\text{opt}} = 12,8$ , виберемо код NRZ):

$$p = -34,462 \text{ (дБм)}$$

Також оцінимо довжину регенераційної ділянки при заданій чутливості:

$$L_{\text{рег}} = \frac{P_{\text{нзл}} - P_{\text{пр}}}{\alpha} = \frac{0 - (-34,462)}{0,3} = 114,87 \text{ (км)}$$

Електрична принципова схема запропонованого фотоприймального пристрою була змодельована в середовищі MicroCap. Так, як фотодіод працює в режимі генератора, то його можна замінити джерелом напруги. Змодельована схема зображена на рисунку 2.11, а її амплітудно-частотні характеристики на рисунку 2.12.

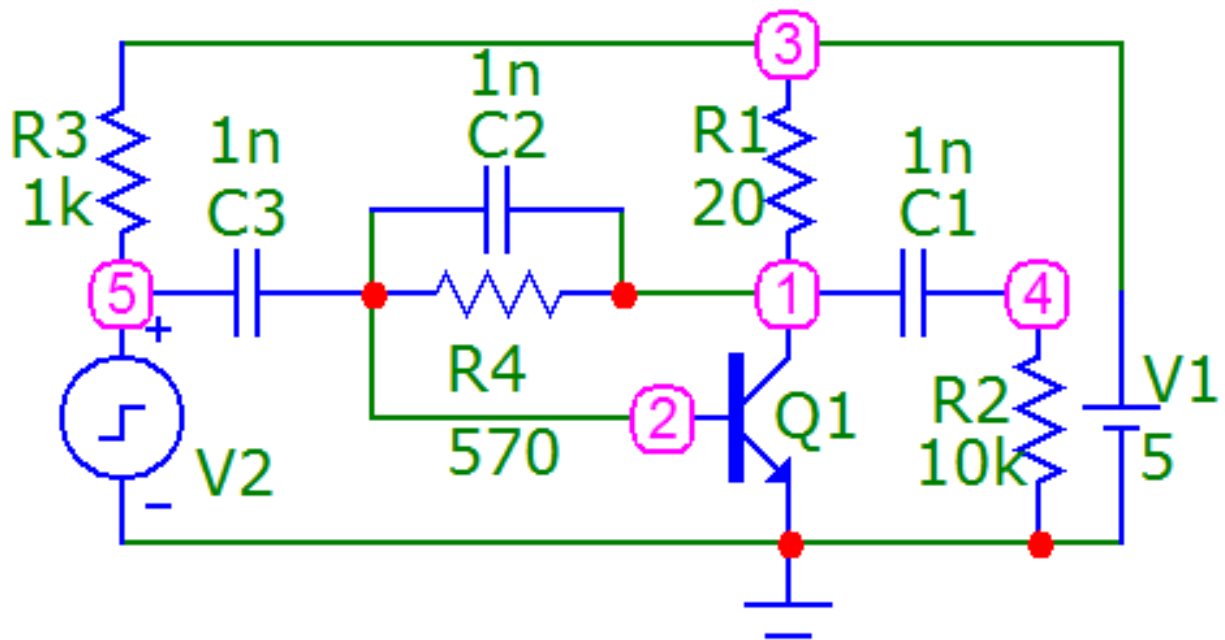


Рисунок 2.11 – Змодельована схема фотоприймального пристрою

Також було розроблено у середовищі Sprint Layout друковану односторонню плату з розмірами 30мм x 20мм. (Рисунок 2.13)

Таким чином було проаналізовано існуючі типи кодування оптичного сигналу. Досліджено вплив шумів на спотворення електричного сигналу. Спотворення сигналу, особливо шумом, призводить до ухвалення помилкових рішень і вступу до приймача деякого числа помилкових сигналів в двійковій формі. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано фотоприймальний пристрій.

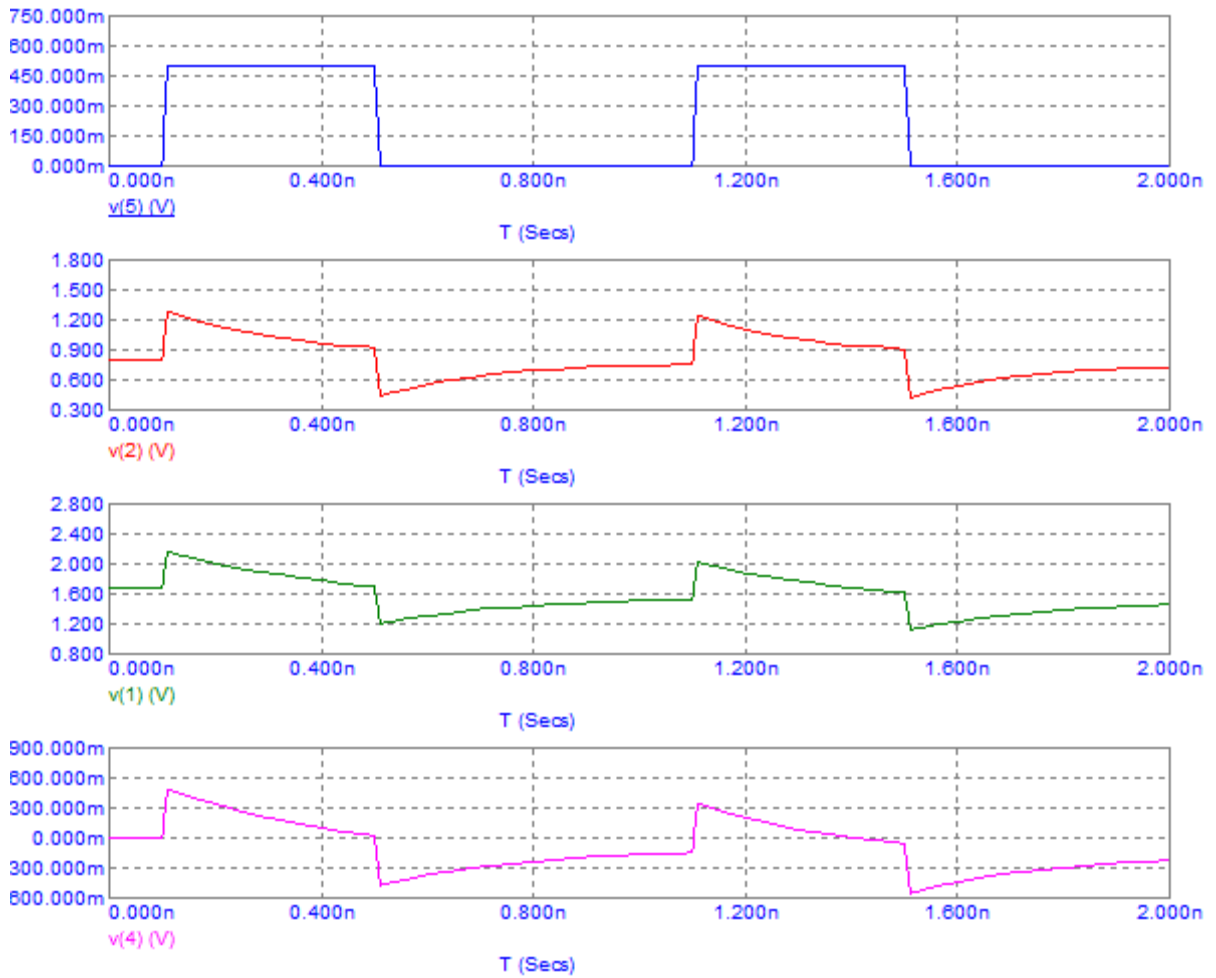


Рисунок 2.12 – Амплітудно-частотні характеристики фотоприймального пристрою

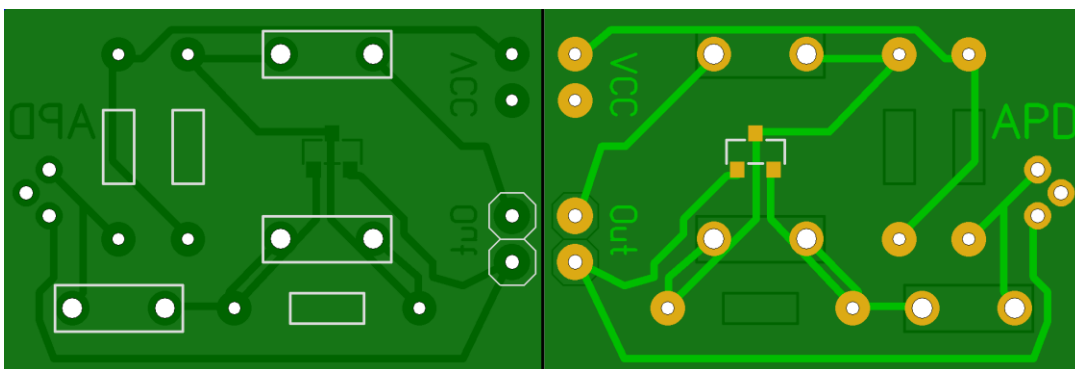


Рисунок 2.13 – Топологія друкованої плати запропонованого фотоприймального пристрою

Запропонований прилад можна використовувати в мережах кабельного телебачення, телефонії, мережах інтернет, а також у галузі ядерної фізики і фізики високих енергій.

### 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Сьогодні оптичні мережі вважаються найбільш перспективною сферою нинішніх телекомунікаційних систем. Лінії зв'язку, які базуються на мідному кабелі, поступово стають добре забутим минулим. Цьому є безліч причин: мала пропускна спроможність порівняно з оптикою, ненадійність, порівняно невеликі дистанції, які здатні долати мережі з міді.

Швидкості в новітніх оптичних мережах набагато перевершують своїх мідних "предків", а дистанції, які підвладні оптоволоконним мережам, зіставленню ніякому не підлягають.

Вдосконалення технології і її здешевлення дозволяє розглядати її застосування для побудови "споживчих" мереж, вимоги до пропускної спроможності яких постійно ростуть. Так, дуже ефективним є використання ВОЛС при побудові мереж мікрорайонів в містах, дачних селищ або навіть окремих будинків, жителі яких все частіше віддають перевагу потоковому відео і вимогливим до ресурсів мережі Інтернет додаткам.

Волоконно-оптичні системи зв'язку ідеально підходять для передачі даних в цифрових обчислювальних системах, цифровій телефонії і відеомовних системах, які вимагають використання нових фізичних явищ і принципів для розвитку і поліпшення характеристик систем передачі.

І хоча розцінки на оптоволоконні компоненти ще дуже великі, вони малопомалу знижуються, роблячи оптоволоконні технології все більш і більш доступними. І справді, якщо розглянути вартісне питання трохи уважніше, то уявна зовнішня висока вартість - це тільки ілюзія.

### 3.1 Огляд фотоприймальних пристроїв

Фотоприймальний пристрій Eudyna Devices Inc FRM5W232FY (Японія) (рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 - Фотоприймальний пристрій Eudyna Devices Inc FRM5W232FY

Характеристики фотоприймального пристрою Eudyna Devices Inc FRM5W232FY представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики фотоприймального пристрою Eudyna Devices Inc FRM5W232FY

Технічні характеристики:		Мін.	Тип.	Макс.
1		2	3	4
Діапазон спектральної чутливості, нм		1310	1550	1610
Динамічний діапазон, ГГц		2,2	2,5	-
Темновий струм, мкА		10		
Чутливість, А/Вт	$\lambda=1310\text{nm}$ , M=1	0,75	0,80	-
	$\lambda=1550\text{nm}$ , M=1	0,80	0,85	-
	$\lambda=1610\text{nm}$ , M=1	-	0,70	-



Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Напруга живлення, В	+3,15	+3,30	+3,45
Споживаний струм, мА	-	45	70
Максимальна зворотна напруга, В	40	50	65
Максимальний зворотний струм, мА	-	-	0,5
Оптичні втрати, дБ	27	-	-
Діапазон робочих температур, °С	-40	-	+85
Температура зберігання, °С	-40	-	+85
Вартість, грн	8629,5		

Фотоприймальний пристрій Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4 (Японія) (рисунок 3.2)

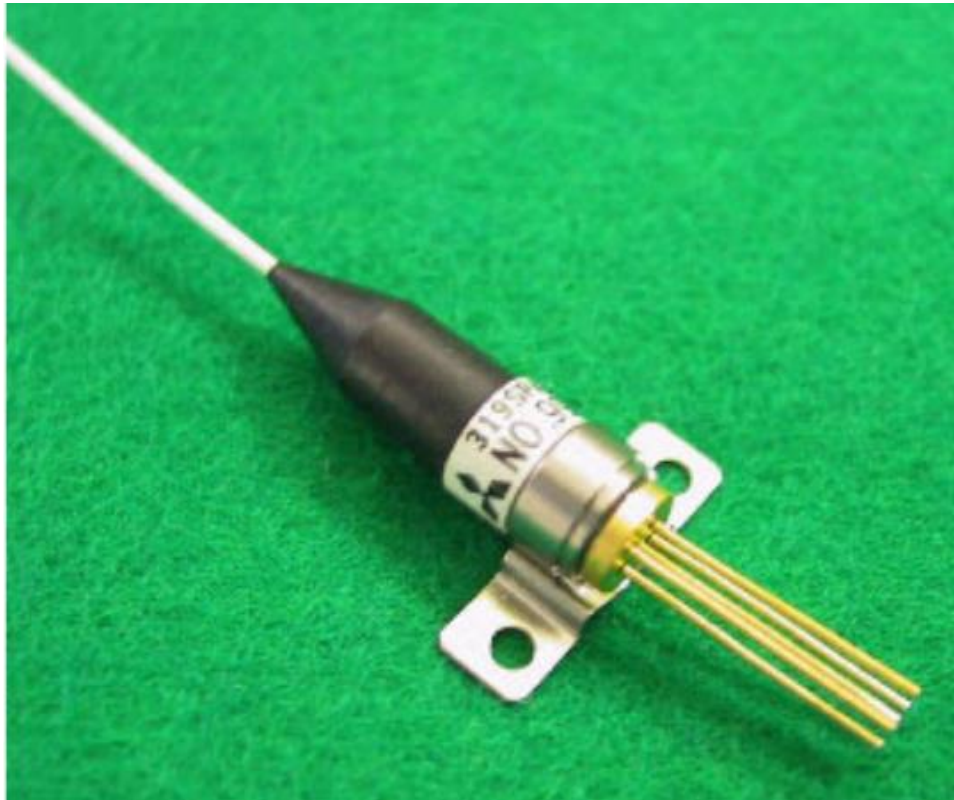


Рисунок 3.2 - Фотоприймальний пристрій Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4

Характеристики фотоприймального пристрою FU-311SPP-CV4 представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики фотоприймального пристрою Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4

Технічні характеристики:		Мін.	Тип.	Макс.
Діапазон спектральної чутливості, нм		1000	-	1600
Динамічний діапазон, ГГц		0,42	-	-
Темновий струм, мкА		15		
Чутливість, А/Вт	$\lambda=1310\text{nm}$ , M=1	0,75	0,80	-

	$\lambda=1550\text{nm}$ , M=1	0,80	0,85	-
	$\lambda=1610\text{nm}$ , M=1	0,85	0,90	-
Напруга живлення, В		+3,135	+3,30	+3,465
Споживаний струм, мА		-	15	20
Максимальна зворотна напруга, В		-	15	-
Максимальний зворотний струм, мА		-	-	0,7
Оптичні втрати, дБ		25	-	-
Діапазон робочих температур, °С		-20	-	+85
Температура зберігання, °С		-40	-	+85
Вартість, грн		8250		

Запропонований фотоприймальний пристрій зображено на рисунку 3.3.

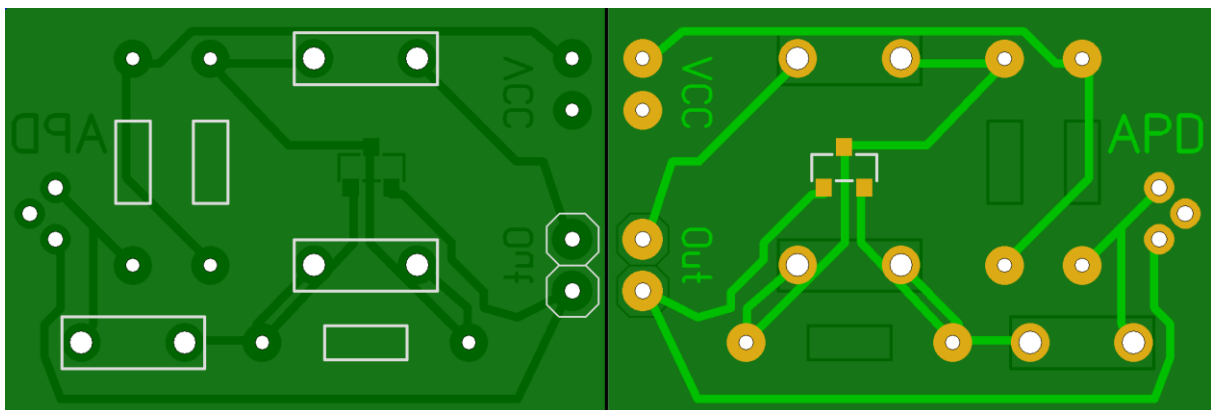


Рисунок 3.3 - Розроблений фотоприймальний пристрій

Характеристики запропонованого фотоприймального пристрою представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Характеристики запропонованого фотоприймального пристрою

Технічні характеристики:		Мін.	Тип.	Макс.
Діапазон спектральної чутливості, нм		1310	1550	-
Динамічний діапазон, ГГц		2,5	-	-
Темновий струм, мкА		0,025		
Чутливість, А/Вт	$\lambda=1310\text{nm}$ , M=1	0,80	0,94	-
	$\lambda=1550\text{nm}$ , M=1	0,81	0,96	-
	$\lambda=1610\text{nm}$ , M=1	-	-	-
Напруга живлення, В		+4,5	+5	+5,4
Споживаний струм, мА		-	15	20
Максимальна зворотна напруга, В		50	70	100
Максимальний зворотний струм, мА		-	-	0,5
Оптичні втрати, дБ		30	-	-
Діапазон робочих температур, °С		-40	-	+85
Температура зберігання, °С		-40	-	+85
Вартість, грн		1289,94		

### 3.2 Порівняльний аналіз фотоприймальних пристроїв за критеріями

Фотоприймальні пристрої різних виробників і кожен має свої позитивні та негативні якості.

Тому для вибору кращого фотоприймального пристрою проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів враховуючи шкалу відносної важливості (табл.3.4) [32]

Таблиця 3.4 – Варіанти видів фотоприймальних пристроїв

Технологія	Короткий опис (ФПП)
A	Eudyna Devices Inc FRM5W232FY (Японія)
B	Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4 (Японія)
C	Запропонований фотоприймальний пристрій

Таблиця 3.5 – Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3, встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв.

Таблиця 3.6 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	$\sqrt[5]{\prod_{i=1}^5 \omega_i}$	$X_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Динамічний діапазон	1	5	7	5	1/3	2,25	0,33
2. Чутливість	1/5	1	5	7	1/5	0,67	0,1

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8
3. Максимальна зворотна напруга	1/7	1/5	1	1/3	1/7	0,27	0,04
4. Діапазон робочих температур	1/5	1/7	3	1	1/3	0,49	0,07
5. Вартість	3	5	7	3	1	3,15	0,46
$\Sigma$						6,83	1

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію . Оскільки тепер порівнюються 3 технології по одному критерію , то  $i = 1, 2, 3$ ;

$$X_i = \frac{\sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \omega_i}}{\sum_{i=1}^3 \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \omega_i}}, \quad (3.1)$$

де  $\sum$  - сума по стовпці  $\sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \omega_i}$ .

Таблиця 3.7 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «динамічний діапазон»

Технологія	A	B	C	$\sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1/3	1,18	0,29
B	1/5	1	1/5	0,34	0,09
C	3	5	1	2,46	0,62
$\Sigma$				3,98	1

Таблиця 3.8 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «чутливість»

Технологія	A	B	C	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	1/3	1/3	0,47	0,14
B	3	1	1/3	1	0,28
C	3	3	1	2,08	0,58
$\Sigma$				3,55	1

Таблиця 3.9 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «максимальна зворотна напруга»

Технологія	A	B	C	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	3	1/3	1	0,26
B	1/3	1	1/5	0,4	0,11
C	3	5	1	2,46	0,63
Σ				3,86	1

Таблиця 3.10 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «діапазон робочих температур»

Технологія	A	B	C	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	3	1	1,44	0,43
B	1/3	1	1/3	0,48	0,14
C	1	3	1	1,44	0,43
Σ				3,36	1



Таблиця 3.11 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	1/2	1/3	1,22	0,26
B	2	1	1/3	1,5	0,32
C	3	3	1	1,91	0,41
Σ				4,63	1

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт.

Таблиця 3.12 – Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	Глобальний
Вага	0,33	0,1	0,04	0,07	0,46	
Eudyna Devices Inc FRM5W232FY (Японія)	0,29	0,4	0,26	0,43	0,26	0,2958
Mitsubishi Electric Semiconductor FU-311SPP-CV4 (Японія)	0,09	0,28	0,11	0,14	0,32	0,2191
Запропонований фото- приймальний пристрій	0,62	0,58	0,63	0,43	0,41	0,5065

З порівняння глобальних пріоритетів різних видів фотоприймальних пристроїв (табл.3.12) видно, що найбільшим є пріоритет у розробленого ФПП.

Висновки: За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох фотоприймальних пристроїв різних виробників за наступними критеріями: 1) динамічний діапазон; 2) чутливість; 3) максимальна зворотна напруга; 4) діапазон робочих температур; 5) вартість;

Найбільший локальний пріоритет у критерію «вартість» (табл. 3.6). За даними таблиць глобальний пріоритет за багатьма критеріями є найвищим для запропонованого фотоприймального пристрою. Тому перевага віддається йому, саме він і буде використовуватися у ВОСПІ.

### 3.3 Розрахунок витрат на елементи електричної схеми

Таблиця 3.13 – Розрахунок вартості покупних виробів

Найменування елемента	Тип	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Фотодіод NEC Compound Semiconductor Devices	NR8300FP-CC	1	1236,00	1236,00
Конденсатор	МКР Х2	3	0,92	2,76
Резистор	МЛТ-0,125	3	0,06	0,18
Друкована плата	Одношарова 30x20 мм	1	28,00	28,00
Корпус	Пластик	1	23,00	23,00
Разом				1289,94

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Даний об'єкт: приміщення лабораторії інформаційних технологій.

Розміри приміщення складають: довжина 6,05 м, ширина 6,2 м, висота 3м. Загальна площа дорівнює 37,51 м<sup>2</sup>. У приміщенні працюють 8 співробітників, тобто на кожного доводиться по 4,7 м<sup>2</sup>. Забарвлення стін світло-коричневе, стеля - біла, підлога - паркетна, світло-коричнева. У приміщенні лабораторії є два вікна, які виходять на сонячну сторону будівлі. Скло на вікнах закривають жалюзі білого кольору. Джерело світла в приміщенні - люмінесцентні лампи, висота підвіски світильників 2,9 м, відстань між світильниками 1 м.

Особливістю негативного впливу комп'ютерних технологій на працездатність і здоров'я людини є комплексна одночасна дія декількох шкідливих факторів, при значній інтенсивності яких відбувається накопичення і акумулювання їх впливу, що викликає суттєві зміни в організмі людини, розлад функцій окремих органів і систем.

До основних негативних факторів належать: випромінювання різних діапазонів електромагнітного спектру (оптичне випромінювання, високочастотні та низькочастотні ЕМП, ЕМП з надто низькими частотами, електростатичні поля), шум у джерелі ВДТ, психосоціальні фактори виробничого середовища, нервово-емоційна напруга та інші. [33]

Робота ЕВМ і ВДТ призводить до зміни фонові концентрації іонів повітря. Так приблизно через 5 хвилин роботи монітору концентрація легких негативних іо-

нів знижується в 5-10 разів (фонове значення цього показника становить 350-620 іонів/см<sup>3</sup>), а через 3 години роботи їх концентрація наближається до нуля. Знижується, також, концентрація середніх і тяжких негативних іонів, натомість концентрація позитивного заряджених іонів різко зростає, що дуже негативно відбивається на газообміні в легенях, загальному почутті людини. Значна кількість позитивних іонів, особливо тяжких, призводить до підвищення артеріального тиску, тахікардії, прояву болю в області серця, затруднення дихання, прискоренню швидкості осідання еритроцитів, розладу функцій центральної нервової системи (дратівливість, головний біль, порушення сну, тону м'язів і ін., порушення травлення).

Оптимальним рівнем аероіонізації на робочому місці вважається вміст легких іонів від 150 до 5000 в 1 см<sup>3</sup> повітря.

Доза рентгенівського випромінювання перед екраном монітора на відстані 50 см від його поверхні є безпечною, вона не досягає межі допустимого рівня (50 мкР/год), але не вивчена дія цих променів у поєднанні з іншими, які генеруються ЕОМ на людину, що не дозволяє говорити відносно безпечної їх дії.

Згідно даних ВООЗ, електромагнітні випромінювання викликають розвиток катаракти. Потенційно сприяють розвитку катаракти іонізуюче, ультрафіолетове - А, інфрачервоне і мікрохвильове випромінювання.

На працездатність та самопочуття людини негативно впливає шум від роботи електронно-обчислювальних машин. При цьому тривала дія шуму призводить до зниження розумової працездатності на 10-15%, швидкої зорової втоми, послаблення уваги, порушення психофізіологічних процесів. Вплив шуму ВДТ є однією із причин розвитку стресу, погіршення настрою, сенсорного перевантаження, змін кровопостачання тканин і органів у зв'язку зі спазмами капілярів.

Професійна діяльність працівника на ВДТ є причиною функціональних змін нервово-м'язового апарата і кровопостачання ока, які призводять до розвитку астеноптичних скарг. Встановлено, що жінки частіше, ніж чоловіки, скаржаться на зоровий дискомфорт. При цьому відмічено, що в більшості випадків частота астенопії зростає зі збільшенням тривалості роботи за ВДТ.

Астноптичні скарги пов'язані також з освітленням робочого місця, відблиском екрану, тремтінням та мерехтінням зображення, сухістю повітря тощо. Встановлено, що у 72% користувачів ВДТ мають місце скарги на біль в очах. Результатом напруженої тривалої зорової роботи на ЕОМ може бути не лише специфічній зоровий дискомфорт, але і виникнення головного болю.

Стресові стани, які розвиваються при довготривалій напруженій роботі за ЕОМ, є однією із причин виникнення соматичних, фізіологічних, психологічних змін в організмі.

Фізіологічні порушення супроводжуються розладами функцій шлунково-кишкового тракту, серцево-судинної системи, скелетних м'язів, залоз внутрішньої секреції, шкіри, статевої системи. Встановлено, що ці розлади частіше мають місце у працівників з високою та середньою тривалістю роботи за ЕОМ.

До психологічних і поведінкових розладів відносяться: агресивність, фрустрація, нервозність, дратівливість, порушення сну, швидкий розвиток втоми тощо.

Зміни на соматичному, фізіологічному, психологічному і поведінковому рівнях працівників на електронно-обчислювальних машинах та відеодисплейних терміналах пов'язані з високим навантаженням при виконанні завдань, високою емоційно-психологічною напруженістю та дією негативних виробничих факторів.

Для визначення заходів поліпшення умов праці в даній лабораторії складена таблиця основних характеристик приміщення (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Узагальнена таблиця характеристик лабораторії інформаційних технологій

№	Назва характеристик	Нормативне значення	Фактичне значення	Відхилення
1.	Загальна площа	-	37,51 м <sup>2</sup>	-
2.	Кількість робочих місць	-	8	-
3.	Площа 1-го робочого місця	6 м <sup>2</sup>	4,7 м <sup>2</sup>	-1,3 м <sup>2</sup>
4.	Джерело світла в приміщенні комбіноване	>750лк	800лк	+50лк (норма)

#### 4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Організація робочого місця користувача відеотерміналу повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам, характеру та особливостям трудової діяльності. Площа одного робочого місця повинна бути не менше 6 м<sup>2</sup>, а обсяг – не менше 20 м<sup>3</sup>. Але дана вимога не відповідає дійсності в лабораторії інформаційних технологій, так як площа на одне робоче місце складає лише 4,7 м<sup>2</sup>. Для дотримання ергономічних вимог необхідно перенести два робочих місця в інше приміщення, тим самим вирішиться питання зменшення випромінювання від ЕОМ сусідніх робочих місць.

Робочі місця для працюючих з дисплеями необхідно розташовувати таким чином, щоб до поля зору працюючого не потрапляли вікна та освітлювальні прилади. Відеотермінали повинні встановлюватися під кутом 90 - 105 градусів до вікон та на відстані, не меншій 2,5-3м від стіни з вікнами.

До поля зору працюючого з дисплеєм не повинні потрапляти поверхні, які мають властивість віддзеркалювання. Покриття столів повинне бути матовим з коефіцієнтом 0,25 - 0,4.

Відстань між робочими місцями з ПК повинна бути не меншою 1,5 м у ряду та не меншою 1 м між рядами. ПК повинні розміщуватися не ближче 1 м від джерела тепла.

Відстань від очей користувача до екрану повинна становити 500 - 700 мм, кут зору - 10 - 20 градусів, але не більше 40 градусів, кут між верхнім краєм відео терміналу та рівнем очей користувача повинен бути меншим 10 градусів. Найбільш вигідне є розташування екрану перпендикулярно до лінії зору користувача.

Для захисту від шуму у виробничому приміщенні та на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби. Під матричні принтери треба підкладати вібраційні килимки для гасіння вібрації та шуму.

Нормалізувати іонний склад повітря виробничої зони можна різними способами: механічна вентиляція, застосування іонізаторів, заземлених захисних екранів тощо.

#### 4.3 Виробнича санітарія

Роботи виконувані операторами ЕОМ відносяться до категорії Іа - легкі роботи (до 120 ккал./год.) узгоджено ГОСТ 12.1.005-88, оскільки вони не пов'язані з перенесенням важких предметів.

Значення мікрокліматичних параметрів, що забезпечують комфортні умови працівникам цієї категорії, згідно з Гігієнічною кваліфікацією праці за показниками шкідливості приведені в таблиці 4.2.

В даному приміщенні лабораторії температура в холодний період року становить 18-20 °С, а в теплий – 25 -27 °С.

Таблиця 4.2 – Оптимальні значення параметрів мікроклімату

Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	22-24	40-60	0,1
Теплий	23-25	40-60	0,1

Для забезпечення встановлених норм мікрокліматичних параметрів і чистоти повітря використовується кондиціонер. У приміщенні забезпечується приплив свіжого повітря, кількість якого складає 50-60 м<sup>3</sup> на одну людину.

Для забезпечення цих умов передбачено піддавати повітря, що подається в лабораторію, двоступінчастому очищенню в системі кондиціонування. Для попереднього очищення використовуються фільтри другого і третього класів (типу ФСВУ, ФППУ), а для остаточного очищення - фільтри тонкого очищення першого і другого класів (типу ФПП, ФЯП).

Для підтримки настановних параметрів мікроклімату в досліджуваному приміщенні цілком досить 1-го кондиціонера.

У виробничих приміщеннях обладнаних електронно-обчислювальними машинами, необхідно створити належне освітлення. Природне і штучне освітлення повинно відповідати СНиП 11-4-79 «Естественное и искусственное освещение». Природне світло повинно бути бічним, зорієнтованим, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5%. Але у приміщенні лабораторії робочі столи розташовані так, що світло потрапляє на оператора ЕОМ, тим самим заважає нормальній роботі з ЕОМ. Тому необхідним заходом є переставлення робочого столу перпендикулярно до вікна



Вікна приміщень повинні мати регульовальні пристрої для відчинення, а також жалюзі, штори тощо, в даному випадку жалюзі білого кольору.

Штучне освітлення приміщення з робочими місцями, обладнаними відеотерміналами ЕОМ загального та персонального користування, має бути всеосяжним і рівномірним. Світильники розміщуються збоку від робочих місць (переважно ліворуч), або локально над робочим місцем (при розташуванні відеотерміналів ЕОМ за периметром приміщення).

Як джерело світла при штучному освітленні застосовуються, як правило, люмінесцентні лампи, у світильниках місцевого освітлення допускається застосування ламп розжарювання.

Рівень освітленості на робочому місці становить 400 лк. При використанні комбінованого освітлення не допускається відблисків на поверхні екрана та збільшення освітлення екрана вище 300 лк.

Важливою умовою безпеки людини, що перебуває перед екраном, є правильний вибір візуальних параметрів дисплея та світлотехнічних умов робочого місця.

Колірне оформлення виконане з урахуванням рекомендацій СН-181-70: колір стін, стелі, підлоги гармоніюють між собою. Забарвлення стін світло-коричневе, стеля - біла, підлога - паркетна, світло-коричнева. З точки зору кольоротерапії, жовтий і світло-коричневий кольори покращують настрій, позитивно впливають на нервову систему і внутрішні органи.

Згідно ДНАОП 0.00-1.31-99 необхідно забезпечити рівень шуму (звукового тиску) в межах 50-55 дБ.

У лабораторії використовуються наступні заходи захисту від шуму:

- застосовуються пружні прокладення між основою машини і поверхнею опори;
- застосовується звукопоглинальні облицювання, глушники.

Для захисту працівників від дії електромагнітного випромінювання на комп'ютерах старого зразка встановлений захисний екран з провідним прозорим шаром і пито-

ним опором менше 0,01-0,001 Ом×м, що дозволяє понизити рівень напруженості до 5 В/м відповідно до ГОСТ 12.1.045-84. На дисплеях сучасного типу (рідкокристалічні) такі екрани встановлювати не обов'язково, тому що вони менш шкідливі і не мають такого значного випромінювання.

#### 4.4 Електробезпека

Приміщення лабораторії інформаційних технологій, згідно правил улаштування електроустановок, відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки, в яких відсутні умови, що створюють підвищену або особливу небезпеку. До таких умов належать:

- 1) вологість або струмопровідний пил;
- 2) струмопровідна підлога (металева, земляна, залізобетонна, цегляна, тощо);
- 3) висока температура.

Дія електричного струму на людину матиме місце лише в тому випадку, коли людина стала елементом замкнутого електричного кола, тобто доторкнулась одночасно до двох точок електричної мережі, між якими існує різниця потенціалів. У такому випадку небезпека ураження людини залежить від напруги мережі, режиму її нейтралі, якості ізоляції струмопровідних частин від землі і т.і.

Для зниження небезпеки враження людини електричним струмом проведено наступні заходи технічного характеру :

- оскільки в лабораторії використовується мережа із заземленою нейтраллю до 1000В, то згідно ГОСТ 12.1.030-81 усі металеві конструкції і частини устаткування, доступні для дотику людини і не маючі іншого виду захисту, які забезпечують електробезпеку, повинні підлягати зануленню (захисне заземлення не ефективне);

- нульовий захисний провідник забезпечується надійністю з'єднань; забезпечується безперервність кола від кожного корпусу електроустановки до нейтралі джерела;
- додатково застосовується повторне заземлення нульового дроту з метою зниження потенціалу занулених корпусів і напруги дотику. Шина занулення доступна для огляду. Величина опору робочого заземлення складає 4 Ом, кожного повторного заземлення нульового дроту 30 Ом згідно ПЭУ- 85;
- проводити періодичний контроль ізоляції не рідше за раз в рік виміром її активного опору при випробуванні підвищеною напругою протягом 1 хвилини.

Організаційні заходи згідно ДНАОП 0.00-4.12-99:

- використовувати плакати наочної агітації;
- забезпечити нормальний режим праці і відпочинку робітникам: час безперервної роботи не більш 4-х годин; 10-ти хвилинні перерви через кожен годину роботи;
- допуск до роботи на електроустановках осіб не молодше 18 років, які мають відповідне посвідчення, пройшли інструктаж і медичний огляд;
- призначення осіб, які відповідають за організацію та проведення робіт на електроустановках, електромережах;
- встановлення знаків безпеки та захисних огорож біля струмовідних частин;

Конструкція електроустановки має відповідати вимогам технічних умов і стандартів. Стан ізоляції струмопровідних частин повинен відповідати правилам використання електроустановок.

При роботі в приміщеннях без підвищеної небезпеки напруга електроприладів повинна бути не більше 220 В.

## 4.5 Пожежна та техногенна безпека

Міра вогнестійкості будівель приймається залежно від їх призначення, категорії по вибухо- і пожежній небезпеці, поверховості, площі поверху в межах пожежного відсіку.

Будівля, в якій знаходиться лабораторія по пожежній небезпеці будівельних конструкцій відноситься до категорії К1 (малопожежо-небезпечне), оскільки тут присутні горючі (книги, документи, меблі, оргтехніка і так далі) і важкоспалимі речовини (сейфи, різне устаткування і так далі), які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху.

За конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель з тримальними захисними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону, де для перекрить допускається використання дерев'яних конструкцій, захищених штукатуркою або складно горючими листовими, а також плитковими матеріалами.

Отже, міру вогнестійкості будівлі можна визначити як третю (III).

Пожежа в лабораторії, може привести до дуже несприятливих наслідків (втрата цінної інформації, псування майна, загибель людей і так далі), тому необхідно: виявити і усунути усі причини виникнення пожежі; розробити план заходів по ліквідації пожежі в будівлі; план евакуації людей з будівлі.

Причинами виникнення пожежі можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів які можуть привести до короткого замикання або пробією ізоляції;
- використання пошкоджених (несправних) електроприладів;
- використання в приміщенні електронагрівальних приладів з відкритими нагрівальними елементами;
- виникнення пожежі внаслідок попадання блискавки в будівлю;

- займання будівлі внаслідок зовнішніх дій;
- неакуратне поводження з вогнем і недотримання заходів пожежної безпеки.

Пожежна профілактика є комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобіганні пожежі, обмеження її поширення, а також створення умов для успішного гасіння пожежі. Для профілактики пожежі надзвичайно важлива правильна оцінка пожежонебезпечної будівлі, визначення небезпечних чинників і обґрунтування способів і засобів пожежопередження і захисту.

Одна з умов забезпечення пожежної безпеки - ліквідація можливих джерел займання. У лабораторії джерелами займання можуть бути:

- несправне електроустаткування, несправності в електропроводці, електричних розетках і вимикачах. Для виключення виникнення пожежі з цих причин необхідно вчасно виявляти і усувати несправності, проводити плановий огляд і своєчасно усувати усі несправності;
- несправні електроприлади. Необхідні заходи для виключення пожежі включають своєчасний ремонт електроприладів, якісне виправлення поломок, не використання несправних електроприладів;
- обігрів приміщення електричними приладами з відкритими нагрівальними елементами. Відкриті нагрівальні поверхні можуть привести до пожежі, оскільки в приміщенні знаходяться паперові документи і довідкова література у вигляді книг, посібників, а папір - легкозаймистий предмет. В цілях профілактики пожежі пропоную не використовувати відкриті нагрівальні прилади в приміщенні лабораторії;
- коротке замикання в електропроводці. В цілях зменшення вірогідності виникнення пожежі внаслідок короткого замикання необхідно, щоб електропроводка була прихованою.
- попадання в будівлю блискавки. У літній період під час грози можливе попадання блискавки внаслідок чого можлива пожежа. Щоб уникнути цього я рекомендую встановити на даху будівлі громовідвід;

- недотримання заходів пожежної безпеки і куріння в приміщенні також може привести до пожежі. Для усунення займання в результаті куріння в приміщенні лабораторії пропоную категорично заборонити куріння, а дозволити тільки в строго відведеному для цього місці.

Пожежна безпека в лабораторії забезпечується відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 системою запобігання пожежі, протипожежного захисту і організаційно-технічними заходами.

На прикладі приміщення лабораторії інформаційних технологій розрахуємо необхідну кількість вогнегасників та димових оповіщувачів.

Вихідні дані для розрахунку :

- площа приміщення  $S = 37,51 \text{ м}^2$  ;

Розрахунок:

1) Кількість ДИП-1

Згідно ГОСТ 12.4.009-83 на кожні  $20 \text{ м}^2$  встановлюється 2 димових оповіщувачі ДИП-1, звідси :

$$37,51 \text{ м}^2 \approx 40 \text{ м}^2$$

$$40 \text{ м}^2 / 20 \text{ м}^2 = 2 \text{ шт.}$$

2) Кількість вогнегасників

$$37,51 \text{ м}^2 \approx 40 \text{ м}^2$$

Згідно ГОСТ 12.4.009-83 на  $40 \text{ м}^2$  встановлюється 1 вуглекислотний вогнегасник ОУ- 5 (ручний).

Система протипожежного захисту згідно ГОСТ 12.4.009-83:

- встановлена автоматична пожежна сигналізація на димових оповіщувачах ДИП-1, з розрахунку 2 шт. на кожні 20 м<sup>2</sup> площі приміщення, враховуючи високу вартість устаткування, наявність прихованих комунікацій і специфіку загоряння ЕОМ.
- розміщений 1 вуглекислотний вогнегасник ОУ- 5 (ручні) з розрахунку 1 вогнегасник на 40 м<sup>2</sup>.

#### Організаційні заходи:

- проводиться інструктаж персоналу по ТБ;
- розроблені заходи щодо дій адміністрації на випадок виникнення пожежі;
- схема евакуації при пожежі поміщена на видному місці;
- ширина дверного отвору на випадок евакуації 1,5 м, висота 2 м

У разі виникнення пожежі необхідно відключити електроживлення, викликати по телефону пожежну команду, евакуювати людей з приміщення згідно з планом евакуації і приступити до ліквідації пожежі вогнегасниками. За наявності невеликого вогнища полум'я можна скористатися підручними засобами з метою припинення доступу повітря до об'єкту займання.

Досліджено умови праці лабораторії інформаційних технологій. Організація робочого місця користувача ЕОМ забезпечує відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам, характеру та особливостям трудової діяльності.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- Дослідження волоконно-оптичних систем передачі інформації показало, що сучасні ВОСПІ - це концентратор практичного використання основних досягнень фундаментальних наук, яскрава демонстрація їх практичної необхідності і корисності. Волоконна оптика розвивається по багатьох напрямках і без неї сучасне виробництво і життя не представляються можливими.
- Досліджено існуючі коди передачі оптичного сигналу та проаналізовано вплив шумів на спотворення електричного сигналу у інтерфейсному обладнанні. Запропоновано фотоприймальний пристрій з використанням фотодіоду компанії NEC Compound Semiconductor Devices, NR8300FP-SS. Обрано транзистор компанії Philips Semiconductors, BFS17A, для використання в підсилювальному каскаді ФПП.
- Запропонований прилад можна використовувати в мережах кабельного телебачення, телефонії, мережах інтернет, а також у галузі ядерної фізики і фізики високих енергій.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Введення в техніку волоконно-оптичних мереж: [Електронний ресурс]/ О.О.Спірін – 2020.<http://citforum.ru/nets/optic/optic3.shtml>
2. Гроднев И.И. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник/ Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. – М.: Радио и связь, 1993. – 265с.
3. П. К. Чео Волоконная оптика. Приборы и системы/ П. К. Чео. – М.: "Энергоатомиздат". 1988. - 280 стр.
4. Листвин А.В. Оптические волокна для линий связи/ Листвин А.В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. - М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288с.
5. Оптичне волокно: [Електронний ресурс]/ Вільна бібліотека – 2020.  
[http://cyclowiki.org/wiki/Оптическое\\_волокно](http://cyclowiki.org/wiki/Оптическое_волокно)
6. Дмитриев А.Л. Оптические системы передачи информации: Учебное пособие/ Дмитриев А.Л. – СПб.: СПбГУИТМО, 2007. - 96 с.
7. Багатомодове волокно: [Електронний ресурс]/ А.Кісельов. – 2020. <http://izmerls.ru/ot2.html>
8. Заславский К. Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением (ВОСП-WDM): Учебное пособие/Заславский К. Е. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2002. — 67 с.
9. Вікно прозорості оптичного волокна: [Електронний ресурс]/ Вільна бібліотека - 2020.  
[http://ru.wikipedia.org/wiki/Окно\\_прозрачности\\_оптического\\_волокна](http://ru.wikipedia.org/wiki/Окно_прозрачности_оптического_волокна)
10. Дисперсія сигналів в оптичному волокні: [Електронний ресурс]/ Р.Р.Убайдуллаев. – 2002.

<http://www.teralink.ru/?do=printt&id=67>

11. Гроднев И. И. Оптические кабели/ Гроднев И.И., Ларин Ю. Т., Теумен И. И. - М.: Энергоиздат, - 1991.

12. Вимірювання на волоконно-оптичних лініях зв'язку: [Електронний ресурс]/ «Связь-комплект». – 2010.

<http://www.skomplekt.com/solution/ismer.htm>

13. Мурадян А. Г. Оптические кабели многоканальных линий связи/ А.Г. Мурадян, И.С. Гольдфарб, В.Н. Иноземцев. - М.: Радио и связь, - 1987. – 200с.

14. Рынок оптического кабеля: [Електронний ресурс]/ КАБЕЛЬ–news– 2018. - №8.

15. Фокин. В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: Учебное пособие/ Фокин. В.Г. — М.: Эко-Трендз, 2008. — 272 с.

16. Волоконно-оптический кабель: [Електронний ресурс]/ О.О.Спірін – 2020.

<http://citforum.ru/nets/optic/optic2.shtml>

17. Волоконно-оптична лінія передачі: [Електронний ресурс]/ Вільна бібліотека - 2020.

[http://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая\\_линия\\_передачи](http://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая_линия_передачи)

18. Гнучкі рішення на твердій основі: [Електронний ресурс]/ журнал inAVate – 2012. <http://www.inavate.ru/site/content/view/1378/1>

19. Корольков А.В. Проблемы защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа/ Корольков А. В., Кращенко И. А., Матюхин В. Г., Синев С. Г. - М.: Информационное общество, - 1997. – 214с.

20. Боос А.В., О. Н. Шухардин, Анализ проблем обеспечения безопасности информации, передаваемой по оптическим каналам связи, и пути их решения/ Боос А.В., Шухардин О.Н. - М.: Информационное общество, - 2007. – 162с.

21. Втрати у волоконно-оптичному кабелі: [Електронний ресурс]/\_Алгоритм безпеки, - 2016. - № 1. – Режим доступу до журналу:

<http://www.algoritm.org/arch/arch.php?id=18>

22. Спектральне ущільнення каналів: [Електронний ресурс]/ Вільна бібліотека - 2020.

[http://ru.wikipedia.org/wiki/Спектральное\\_уплотнение\\_каналов](http://ru.wikipedia.org/wiki/Спектральное_уплотнение_каналов)

23. Системи зі спектральним ущільненням каналів у ВОСП: [Електронний ресурс]/ Теле-Спутник, - 2004. - №1(99). – Режим доступу до журналу:

[Теле-Спутник - 1\(99\) Январь 2004 г.](#)

24. Листвин В.Н. DWDM системы: научное издание/ Листвин В.Н., Трещиков В.Н. — М.: Издательский Дом "Наука", - 2013 - 300с.

25. Мікрооптика або повний цикл виготовлення CWDM: [Електронний ресурс]/ П. Нагібін, Д. Самоделко – 2011.

<http://nag.ru/articles/reviews/20750/mikrooptika-ili-polnyiy-tsikl-proizvodstva-cwdm.html>

26. Переваги та недоліки ВОЛЗ: [Електронний ресурс]/ Р.Р.Убайдуллаєв. – 2000.

<http://www.teralink.ru/?do=printt&id=16>

27. Козанне А. Оптика і зв'язок/ Козанне А., Флере Ж., Метр Г., Руссо М. - М.:Світ, - 1984. – 504с.

28. Шевцов Э.А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи/ Э.А.Шевцов, М.Е. Белкин. – М.: Радио и связь, 2002. – 230 с.

29. Тришенков М.А. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с р–п-переходами/ Тришенков М. А., Фример А. И. - М.: Энергоатомиздат, - 1976. – 544с.

30. Кауфман М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справочник. В 2-х т./ Кауфман М., Сидман А. – М.: Энергоатомиздат, - 1993г. – 368с.

31. Головка О.П. Техніко-економічне обґрунтування проектно-конструкторських робіт. Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання дипломних і контрольних робіт для студентів спеціальності 7.0908.04 «Фізична і біомедична електроніка»/ Швець Є.Я., Головка О.П. - Запоріжжя: ЗДІА, - 2010. – 17с.

32. Жидецкий В.Ц. Основы охраны труда. Учебник/ Жидецкий В.Ц., Джигерей В.С., Мельников А.В. – Львов: Афиша. - 2001. – 352с.