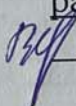


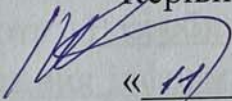
Бакалаврська дипломна робота на тему:

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ
МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

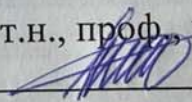
Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-22мс
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

 Война В.В.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІКСТ
Кичак В.М.

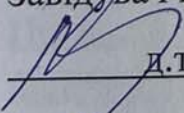
 « 14 » 06 2024 р.

Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС
Семенов А.О.

 « 14 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 14 » 06 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

 «16» 05 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Войни В'ячеславу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, доктор техн. наук, професор,

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

затверджені наказом ВНТУ від “11” березня 2024 року № 80

2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Розробити алгоритм і програму моделювання оптичної системи передавання інформації. Провести аналіз структурних схем оптичних передавачів і приймачів оптичних сигналів. Довжина ВОЛЗ – 170 км Потужність джерела оптичного випромінювання – 0,005 Вт. Довжина хвилі – 1550 нм. Чутливість приймача – 40 дБ. Коефіцієнт згасання – 0,34 дБ/км. Швидкість передавання інформації – 10 Гбіт/с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити: Провести аналіз особливостей розповсюдження сигналів в оптичній транспортній мережі та аналіз методів оцінювання згасання і вплив дисперсії на них.

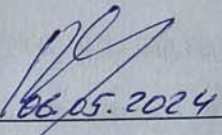
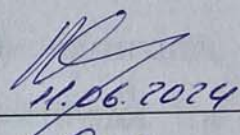
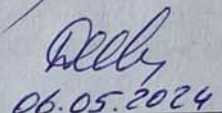
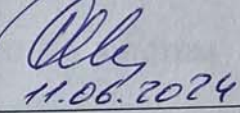
Провести аналіз структурних схем передавачів і приймачів оптичних сигналів. Оцінити вплив хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри оптичних транспортних систем та між символної інтерференції.

Провести аналіз показників якості каналу оптичної системи передавання, розробити алгоритм та програму моделювання оптичної транспортної системи та провести її моделювання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Концептуальна модель оптичної транспортної мережі, блокова модель оптичної

транспортної мережі, блок схема алгоритму моделювання оптичної транспортної мережі, око діаграми ВОСП, залежність BER від довжини хвилі, залежність BER від номера каналу, залежність Q фактора від потужності.

6. Консультанти розділів роботи

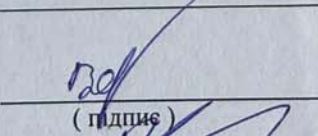
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кичак В.М., професор кафедри ІКСТ	 06.05.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембичук С.В. проф. каф. БЖД/ПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

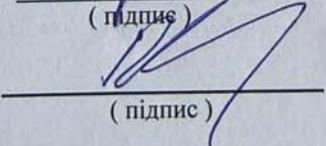
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	31.05.2024р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2024р.	
5	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
6	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
7	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
8	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


(підпис)

Война В.В.

Керівник роботи


(підпис)

Кичак В.М.

АНОТАЦІЯ

Розробка алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи. Бакалаврська дипломна робота / В.В. Война – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 95 с., 24 рис., 10 табл., 17 дж. – українською мовою.

Метою даної роботи є вивчення основ побутових волоконно-оптичних ліній зв'язку, розробка алгоритму оцінювання впливу хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри волоконно-оптичних систем передавання інформації.

Проведено аналіз структурних схем передавачів і приймачів оптичних сигналів. Оцінено вплив хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри оптичних транспортних систем та між символної інтерференції.

Проведено аналіз показників якості каналу оптичної системи передавання, розробити алгоритм та програму моделювання оптичної транспортної системи та провести її моделювання.

Виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Development of an algorithm and program for simulating optical transport system. Bachelor thesis / V.V. war - Vinnytsia: VNTU, 2024. - 95 p., 24 fig., 10 tabl., 17 s. - In ukrainian..

The purpose of this work is to study the basics of household fiber-optic communication lines, to develop an algorithm for evaluating the influence of chromatic and polarization-mode dispersion on the parameters of fiber-optic information transmission systems.

An analysis of structural schemes of transmitters and receivers of optical signals was carried out. The effect of chromatic and polarization-mode dispersion on the parameters of optical transport systems and inter-symbol interference was evaluated.

An analysis of the quality indicators of the channel of the optical transmission system was carried out, an algorithm and program for simulating the optical transport system were developed and its simulation was carried out.

The section on labor protection and life safety has been completed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ.....	9
1.1 Аналіз особливостей розповсюдження оптичних сигналів в оптичних волокнах.....	9
1.2 Аналіз методів оцінювання згасання сигналів в оптичних мережах.....	13
1.3 Вплив дисперсії на розповсюдження оптичних сигналів.....	17
1.4 Висновки до розділу.....	25
2 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	26
2.1 Побудова схем оптичних передавачів.....	26
2.2 Побудова схем оптичних приймачів.....	35
2.3 Висновки до розділу.....	43
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ.....	44
3.1 Концептуальна модель оптичних транспортних систем і вимоги до неї.....	44
3.2 Основні параметри та змінні моделі.....	45
3.3 Блокова модель оптично транспортної мережі.....	48
3.4 Оцінювання впливу хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри оптичних транспортних систем.....	50
3.5 Оцінювання впливу міжсимвольної інтерференції.....	54
3.6 Оцінювання показників якості каналу цифрової волоконно-оптичної системи передачі.....	56
3.7 Розробка алгоритму і програми моделювання оптичних транспортних систем	59
3.8 Моделювання оптичних транспортних систем	67
3.9 Висновки до розділу.....	73
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	74
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	74

4.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	77
4.2.1	Мікроклімат.....	77
4.2.2	Склад повітря робочої зони.....	78
4.2.3	Виробниче освітлення	78
4.2.4	Виробничий шум.....	79
4.2.5	Виробничі випромінювання.....	80
4.3	Пожежна безпека.....	82
4.3.1	Технічні рішення системи запобігання пожежі	82
4.3.2	Технічні рішення системи протипожежного захисту	83
4.4	Висновки до розділу.....	84
	ВИСНОВКИ.....	85
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	89
	Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CWDM – «грубе» мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі

DWDM – мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі WDM з високою щільністю

SBS – стимульоване Брілюєнівське розсіювання

SDH – синхронно цифрова ієрархія

SRS – Романівське розсіювання

WDM – мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі

АПТС – автоматичний генератор імпульсів струму

АРЧ – автоматичне регулювання підсилення

БОВ – багатомодове оптичне волокно

ВКР – вимушене комбіноване розсіювання

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку

ЕКД – елементарна кабельна ділянка

ОВ – оптичне волокно

ОМВ – одномодове оптичне волокно

ОПД – оптичний передавач

ОС – оптична секція

ІЛ – інжекційний лазер

ЛФД – лавинний фотодіод

ППЗ – профіль показника заломлення

ПРОМ – приймальний оптичний модуль

ПМД – поляризаційно-модова дисперсія

СЛТ – синхронний лінійний тракт

СПІ – система передачі інформації

ФСМ – фазова саомодуляція

ФКМ – фазова крос-модуляція

ЦЛС – цифровий лінійний сигнал

ЧХЗ – частотна характеристика згасання

ЧХЗМ – частотна характеристика змішування

ФМІТ – формування модулятор імпульсів струму

ЦГС – цифровий генератор імпульсів струму

ФОН – формування опорної напруги

ВСТУП

Актуальність теми.

Головною особливістю телекомунікаційних провідних систем є можливість створення певного середовища для поширення електромагнітних хвиль, що дає змогу оптимізувати це середовище з метою досягнення найбільшої пропускної здатності. Саме в процесі оптимізації відбувається розвиток провідного зв'язку від мідного проводу та коаксіального кабелю до волоконно-оптичних ліній зв'язку [1].

Аналіз пропускної здатності різних середовищ показує, що найбільш перспективне застосування для створення магістральних каналів мають ВОЛЗ, оскільки вони характеризуються широкою смугою пропускання, низьким рівнем згасання сигналу при розповсюдженні, відсутністю власних зовнішніх електромагнітних випромінювань та можливістю повного діелектричного виконання волоконно-оптичних кабелів.

Ці переваги дають змогу створювати лінії зв'язку без регенеративних пристроїв довжиною понад 500 км. Повне діелектричне використання забезпечує нечутливість до електромагнітних завад, тобто дає можливість усунути проблеми блокуючих струмів, корозії, грозозахисту, а отже прокладати такі лінії у смузі залізниць, а підвішувати кабелі на контактні опори лінії електропередачі. Відсутність власних електромагнітних випромінювань вирішує не лише проблему впливу на інші кабелі зв'язку, а й забезпечує захищеність від перехоплення переданих повідомлень без механічного впливу на ВОЛЗ [1, 2]

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час найбільше поширення набули одномодові волоконно-оптичні кабелі, які характеризуються малим згасанням, слабкою частотою залежності згасання в межах вікна прозорості, практично необмеженою смугою переданих частот. За теоретичними розрахунками пропускна здатність такого волокна становить 75 Тбіт/с [1-3].

Практичним вивчення та дослідження волоконно-оптичних ліній зв'язку

присвячені праці [4-6]. В цих працях проведені дослідження швидкості передавання інформації у ВОЛЗ, аналіз згасань та методів підвищення пропускної здатності. Особлива увага приділяється дослідженню та практичному застосуванню сучасних оптичних технологій передавання інформації, саме: технології оптичних лінійних пристроїв, технології оптичних підсилювачів, технології спектрального ущільнення, технології солітоневої передачі.

Мета та постановка задачі є вивчення основ побутових волоконно-оптичних ліній зв'язку, розробка алгоритму оцінювання впливу хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри волоконно-оптичних систем передавання інформації.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- вивчити особливості розповсюдження оптичних сигналів в оптичних волокнах;
- вивчити основи побудови приймально-передавальних пристроїв волоконно-оптичних систем передавання інформації;
- оцінити вплив хроматичної та поляризаційно-модової дисперсії на параметри волоконно-оптичних систем передавання інформації;
- розробити алгоритм і програму модової оптичної транспортної мережі та провести її дослідження.

Об'єкт дослідження є процес проходження оптичних сигналів у волоконно-оптичних мережах зв'язку.

Предмет дослідження є волоконно-оптична мережа зв'язку та дослідження впливу нелінійних ефектів та її параметри.

Методи дослідження базуються на основах теорії передавання інформації, основах теорії кіл і сигналів, основах математичного моделювання телекомунікаційних систем і мереж.

Новизна отриманих результатів:

- розроблено алгоритм моделювання волоконно-оптичної системи передавання інформації, який дає можливість визначити монохроматичну та

поляризаційно-модову дисперсії.

- досліджено вплив хроматичної та поляризаційно-модульної дисперсії на параметри оптичних телекомунікаційних мереж.

Практичне значення роботи полягає в тому, що її результати дають можливість оцінити вплив нелінійних ефектів та дисперсії на параметри волоконо-оптичних систем передавання інформації.

Апробація результатів бакалаврської кваліфікаційної роботи. Робота доповідалась на науковому семінарі кафедри інфокомунікаційних систем у 2024 році.

1 ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1 Аналіз особливостей розповсюдження оптичних сигналів в оптичних волокнах

Розглянемо процес проходження оптичних променів по оптичним волокнам більш детально на основі променевої теорії передачі сигналів по оптичним волокнам, скориставшись поясненнями, представленими на рис. 1.1. З малюнка випливає, що між довжиною хвилі λ , діаметром серцевини d та кутом падіння θ_{Π} справедливий вираз: $\cos\theta_{\Pi} = \lambda/d$. При цьому можливі три випадки [1]:

1. При малих довжинах хвиль ($\lambda \rightarrow 0, f = c/\lambda \rightarrow \infty$) кут падіння $\theta_{\Pi} \rightarrow 90^\circ$, кількість відображень при поширенні променя мале, промінь прагне до прямолінійного руху вздовж осі оптичного волокна, передача відбувається в оптимальному режимі (Рис. 1.1, а).

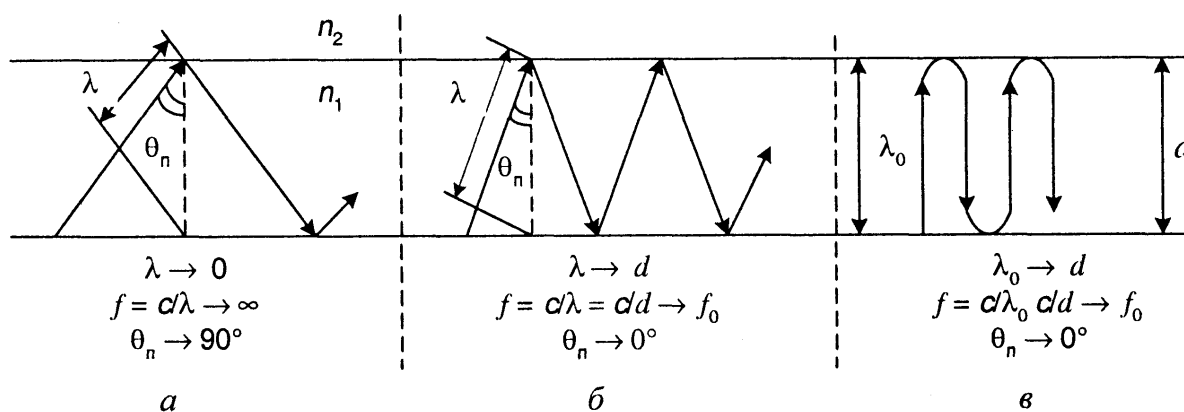


Рисунок 1.1 – Процес проходження оптичних променів по оптичним волокнам

2. При довжині хвилі $\lambda \rightarrow d$, частота $f = c/\lambda \rightarrow c/d$ кут падіння $\theta_{\Pi} \rightarrow 0$ і промінь робить велику кількість відображень, його поступальний рух дуже малий, передача оптичного сигналу не оптимальна (рис. 1.1, б).

3. При певній довжині хвилі $\lambda_0 = d$, частота $f_0 = c/\lambda_0 = c/d_0$, кут падіння $\theta_{\Pi} = 0$. Промінь потрапляє на межу «серцевина - оболонка» і відбивається від неї перпендикулярно. У серцевині оптичного волокна встановлюється режим

стоячої хвилі, оптична потужність опричного волокна не передається (рис. 1.1, в). Цей випадок відповідає критичній довжині хвилі λ_0 і критичній частоті f_0 електромагнітного коливання оптичного випромінювання.

Таким чином, в оптичному волокні можуть поширюватися тільки хвилі довжина яких менше діаметра його серцевини. Дійсно, практично $\lambda = 1,3$ або $1,55$ мкм набагато менше діаметра серцевини $d = 50$ або $62,5$ мкм багатомодових оптичних волокон (БОВ). Обумовлена умова $\lambda < d$ справедлива і для БОВ, які мають $d = 8 \dots 10$ мкм.

Повернемося до виразу $\cos \theta_{\Pi} = \lambda/d$. З формули $\sin^2 \theta_{\Pi} + \cos^2 \theta_{\Pi} = 1$ маємо $\cos \theta_{\Pi} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\Pi}}$. підставимо сюди умову повного внутрішнього відображення $\sin \theta_{\Pi} = n_2/n_1$, отримаємо $\cos \theta_{\Pi} = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$. Прирівнявши праві частини косінусів отримаємо вираз для критичної довжини хвилі:

$$\lambda_0 = \frac{d}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.1)$$

Критична частота оптичного коливання $f_0 = v_1/\lambda_0$, де v_1 – швидкість розповсюдження оптичного сигналу в середовищі ОВ: $v_1 = c/n_1$. Підставляючи вирази λ_0 і v_1 в формулу для критичної частоти отримаємо:

$$f_0 = \frac{c}{d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}. \quad (1.2)$$

Наведені співвідношення для λ_0 і f_0 дозволяють зробити такі висновки:

1. Чим більший діаметр серцевини ОВ ($d = 2a$) і чим більше зростають показники заломлення серцевини та оболонки n_1 і n_2 відповідно, тим більша критична довжина хвилі і нижче критична частота.

2. При порівнянні $n_1 = n_2$ отримаємо $\lambda_0 = 0$, $f_0 \rightarrow \infty$ і передача по такому ОВ неможлива. Цей висновок має своє логічне обґрунтування: за відсутності межі між серцевиною та оболонкою ОВ перестає діяти як направляюче середовище.

3. Оптичні волокна мають частоту відсічення – критичну частоту f_0 вище за яку ОВ ведуть себе як фільтри верхніх частот і за ними (по ОВ) можлива передача лише тих хвиль, довжина яких менша за λ_0 . При частоті оптичних сигналів $f > f_0$ їх енергія концентрується всередині середини ОВ і поширюється вздовж неї. Оптичні сигнали, що мають частоту $f < f_0$ розсіюються в навколишньому просторі і по ОВ не передаються.

Наведений короткий аналіз передачі оптичних сигналів на основі променевої теорії справедливий лише для ОВ, у яких $\lambda \ll d$, тому що оптичні промені в них поширюються відповідно до законів геометричної оптики.

Якщо ж розміри поперечного перерізу серцевини ОВ порівняні з довжиною хвилі оптичного випромінювання, то для аналізу поширення оптичного випромінювання таких ОВ необхідно використовувати хвильову теорію поширення сигналів по ОВ.

Хвильова теорія розглядає процес передачі сигналів по ОВ як передачу різновиду електромагнітних хвиль. Для аналізу цього процесу необхідно знайти рішення хвильового рівняння Максвелла в циліндричній системі координат. Тут це рішення не наводиться, його можна знайти у роботі [2]. Дане хвильове рівняння має кілька рішень. Кожному з них відповідає коливання з певною просторовою структурою електричного і магнітного полів і відповідної постійної поширення, тобто фазової швидкості. Кожне з цих коливань має певний тип хвилі, або моду. Будь-яке, оптичне випромінювання, що передається по ОВ, можна представити як суперпозицію мод, тобто як результат складання поширених ньому коливань.

В оптичному волокні можуть існувати два типи хвиль: симетричні E_{0m} , H_{0m} і несиметричні (дипольні) EH_{nm} , HE_{nm} , де n і m – число змін електромагнітного поля по діаметру і довжині ОВ відповідно. За хвильовою теорією в В передається обмежена кількість хвиль, яка може бути розрахована, якщо відомі довжина хвилі, діаметр серцевини ОВ і різницю показників заломлення серцевини та оболонки.

Основна мода утворюється променем, що спрямовується вздовж осі ОВ,

так як тільки параметри поширення осьового променя не залежать від умов відображення на межі «серцевина - оболонка». Підбираючи параметри ОВ, в ньому можна отримати режим поширення тільки однієї несиметричної моди типу HE_{nm} .

Оптичне волокно, у якому поширюється лише одна хвиля (мода) типу HE_{nm} називається одномодовим.

Зазвичай режим роботи ОВ характеризується узагальненим параметром v який поєднує діаметр, серцевини $d=2a$, коефіцієнти заломлення n_1 і n_2 і довжину хвилі оптичного випромінювання λ . Цей параметр називаються нормованою частотою і визначаються виразом:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$

Режим одномодової роботи реалізується, за умови: $0 < v < 2,405$. Для заданої довжини хвилі λ цю умову можна виконати, зменшуючи або різницю $(n_1 - n_2)$, або радіус серцевини ОВ.

Для типового випадку ($n_1 = 1,5$; n_1 і $n_2 = 1,49$). Отримаємо $v = 0,6 a / \lambda$, а максимальне значення діаметра серцевини ОВ при $\lambda = 1,6$ мкм складе 12,8 мкм.

Перевагою ООВ є дуже широка смуга частот (велика пропускна здатність), тому їх використовують в основному на магістральних мережах, забезпечуючи велику дальність зв'язку та високу швидкість передачі оптичних сигналів.

Дійсно, за Рекомендацією ITU-T G.958 в системах передачі SDH, де використовуються швидкості передачі до 40 Гбіт/с, як пряме середовище для побудови СЛТ використовують тільки ООВ.

Зі збільшенням діаметра серцевини ОВ. а значить і нормованої частоти число типів переданих мод різко зростає.

Оптичне волокно у якому поширюється дві і більше мод, називається многомодовим. Можна показати, що при однаковій нормованій частоті число

мод БОВ з параболічним ППЗ, тобто в градієнтному БОВ, у 2 рази менше, ніж у волокні зі ступінчастим ППЗ, що покращує параметри передачі першого з них.

1.2 Аналіз методів оцінювання згасання сигналів в оптичних мережах

Згасання сигналів в ОВ оптичного кабелю є одним з основних факторів, що обмежують довжину ділянки регенерації СЛТ. Коефіцієнт згасання α [дБ/км] обумовлений власними втратами потужності переданого оптичного сигналу в окремо взятому ОВ - α_c і додатковими втратами, що виникають у тому ж ОВ, при розміщенні його всерійно виготовленому кабелі - α_k , тобто $\alpha = \alpha_c + \alpha_k$.

Власні втрати в основному визначаються трьома факторами:

1) витрата енергії на діелектричну поляризацію матеріалу оптичного волокна - α_n ;

2) розсіювання енергії в навколишній простір - α_p ;

3) поглинання енергії сторонніми домішками у матеріалі ОВ - $\alpha_{пр}$ тобто $\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{пр}$.

Розглянемо коротко кожен із зазначених факторів.

Тангенс кута діелектричних втрат матеріалу ОВ $tg\delta$ з показником заломлення n , що має комплексний характер ($n = n_d + jn_m$), пов'язаний виразом:

$$tg\delta = \frac{2n_d n_m}{(n_d^2 - n_m^2)} \quad (1.4)$$

Коефіцієнт загасання α_n при цьому залежить від властивостей матеріалу ОВ і довжини хвилі оптичного сигналу, що передається. Він визначається за такою формулою:

$$\alpha n = \pi n tg\delta / \lambda \quad (1.5)$$

Підставляючи у вираз формулу для $tg\delta$ и учитывая, что $\lambda = c/f$ и $c/n = v$, остаточно отримаємо:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\omega n_{\text{д}} n_{\text{м}}}{v(n_{\text{д}}^2 - n_{\text{м}}^2)} \quad (1.6)$$

З отриманого виразу випливає, що частотна залежність $\alpha_{\text{п}}$ має лінійний характер. Якщо коефіцієнт заломлення має дійсне значення $n = n_{\text{д}}$, то $\text{tg}\delta = 0$. І втрати на діелектричну поляризацію матеріалу ОВ відсутні, тобто $\alpha_{\text{п}} = 0$.

Основні втрати внаслідок розсіювання викликаються головним чином неоднорідностями показника заломлення матеріалу ОВ та його тепловою флуктуацією. Зазначені неоднорідності неминуче виникають у матеріалі ОВ у процесі варіння скла і залишаються «замороженими» у його масі. Ці втрати залежать від довжини хвилі за законом $1/\lambda^4$ і називаються релеєвським розсіюванням.

Коефіцієнт згасання $\alpha_{\text{р}}$, при цьому визначають за формулою:

$$\alpha_{\text{р}} = K_{\text{р}}/\lambda \quad (1.7)$$

де $K_{\text{р}}$ – коефіцієнт розсіювання, для кварцу він має значення 1.,1,5. Втрати на релеєвське розсіювання визначають нижню межу втрат, якої можна досягти у матеріалах для ОВ в ідеальних умовах. Ця межа різна для хвиль різної довжини і зі збільшенням λ зменшується.

Втрати оптичного сигналу значно зростають за наявності в матеріалі ОВ сторонніх домішок (іонів металів перехідної групи Fe^{2+} , Cu^{2+} , іонів гідроксильних груп ОН та ін.). Наявність цих домішок викликає збільшення втрат в ОВ і призводить до появи резонансних сплесків згасання на довжинах хвиль 0,95; 1,24; 1,39 мкм. Вміст домішок має бути вкрай низьким. Наприклад, концентрація (бт-носійна вага) іонів типу ОН порядку 10^{-6} на довжині хвилі 1,39 мкм викликає максимум коефіцієнта поглинання близько 40 дБ/км.

Коефіцієнт згасання $\alpha_{\text{пр}}$ при цьому визначається за формулою:

$$\alpha_{\text{пр}} = K_{\text{пр}} e^{-k/\pi}, \quad (1.8)$$

де коефіцієнти K_{np} і k мають значення: $K_{np} \approx 1,1...1,3$; $k \approx (0,5... 0,8) \times 10^{-6}$. Експериментальна залежність коефіцієнта загасання власних втрат α_c від довжини хвилі переданого оптичного сигналу λ в ООВ з германосилікатного скла (крива 1) наведена на рис. 1.2. На цьому ж рисунку показані теоретичні залежності, обумовлені релеєвським розсіюванням (крива 2) та інфрачервоним поглинанням (крива 3). Як видно з рисунка, у довгохвильовій області є два «вікна прозорості» - на довжинах волі 1,3 та 1,55 мкм, у яких коефіцієнти загасання мають значення 0,35.. 0,4 та 0,18.. 0,22 дБ/км відповідно [3, 4].

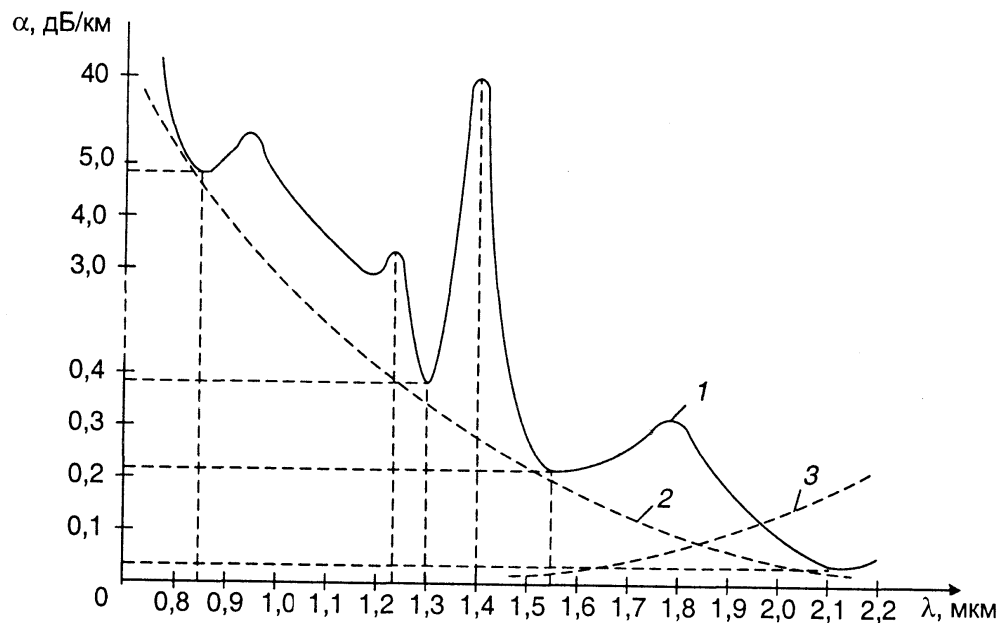


Рисунок 1.2 – Експериментальна залежність коефіцієнта загасання власних втрат α_c від довжини хвилі переданого оптичного сигналу λ в ООВ з германосилікатного скла

Можна констатувати, що при будівництві СЛТ використовуються оптичні кабелі лише з ООВ, у яких коефіцієнти загасання на довжинах хвиль 1,3 і 1,55 мкм мають зазначені вище значення. Це дозволяє отримати ОС завдовжки 50...60 і 80...120 км відповідно [3].

Додаткові втрати потужності оптичних сигналів виникають в ОВ в результаті накладання на нього полімерного захисного покриття і деформації при складанні кабелю. Захисне покриття призначене для підвищення механічної міцності ОВ та зменшення перехідних перешкод між ОВ при їх

щільному укладанні в кабелі. Чим більша товщина оболонки ОВ, тим менше електромагнітне поле спрямованих мод на її зовнішній межі із захисним покриттям і, отже, менші додаткові втрати в захисному покритті. Однак надмірне збільшення товщини оболонки небажано з низки причин: погіршення гнучкості ВВ, збільшення його маси, вартості та ін. Тому типові БОВ мають розміри 62,5/125 або 50/125 мкм, тобто відношення $b/a = 2$ або $b/a = 2,5$. При цьому коефіцієнт загасання у захисному покритті не перевищує 0,1 дБ/км.

Що ж до ООВ, то у них співвідношення між зазначеними геометричними розмірами інше. Пояснюється це тим, що електромагнітне поле основної моди HE_1 проникає в оболонку на значну глибину і товщина оболонки ООВ має бути суттєво збільшена в порівнянні з радіусом серцевини, щоб запобігти зростанню втрат у захисному покритті. Для забезпечення зневажливо малої величини цих додаткових втрат товщина оболонки повинна в 10 разів перевищувати радіус серцевини. Оскільки для забезпечення режиму поширення в ООВ тільки однієї моди діаметр його серцевини обраний в межах 8 ... 10 мкм, то з метою уніфікації діаметр оболонки ООВ дорівнює 125 мкм, тобто такий же, як і в БОВ.

Дефекти захисного покриття ОВ і його деформація при виготовленні кабелю призводять до утворення мікрозгинів, а значить до додаткових втрат. Вибором кабельних матеріалів, конструкції та технології виготовлення кабелів коефіцієнт загасання за рахунок мікрівигинів у волокні доводиться до значення 0,1 дБ/км і менше.

1.3 Вплив дисперсії на розповсюдження оптичних сигналів

При проходженні імпульсів, що передаються по ОВ зменшується не тільки їх амплітуда, але змінюється і форма – імпульси розширюються, тобто збільшуються за тривалістю, як показано на рис. 1.3, це явище називається дисперсією. Для прямокутних імпульсів збільшення тривалості τ визначається як квадратична різниця їх тривалості на виході та вході $\tau = \sqrt{\tau_{вих}^2 - \tau_{вх}^2}$, де $\tau_{вих}$ и $\tau_{вх}$

– тривалості вихідного і вхідного оптичних імпульсів відповідно на рівні половини їх амплітуди (рис. 1.3). Причому, чим довше ОВ, тим більше проявляється дисперсія, тому вводиться поняття коефіцієнта дисперсії який позначається D , нс/км.

Збільшення тривалості оптичних імпульсів на прийомі при заданій довжині ОС визначає граничну швидкість передачі ЦЛС. При малому значенні згасання ОВ даній ОС для заданої швидкості передачі ЦЛС дисперсія обмежує максимальну відстань між регенераторами, тобто довжину ОС.

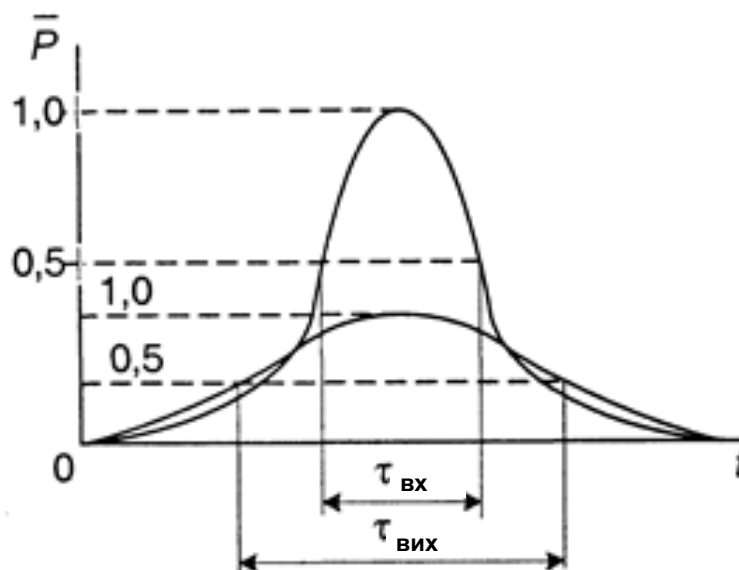


Рисунок 1.3 – Збільшення тривалості імпульсів та зменшення амплітуди при проходженні імпульсів по ОВ

Таким чином, дисперсія та згасання є основними параметрами передачі ОВ. Розглянемо коротко основні причини виникнення дисперсії. Дисперсію в загальному випадку визначають три фактори:

- 1) відмінність фазових швидкостей передачі направляються мод, які поширюються серцевиною ОВ;
- 2) напрямні властивості структури ОВ;
- 3) властивості матеріалів, у тому числі виготовляються ОВ.

Відповідно розрізняють міжмодову дисперсію τ_{mm} , внутримодову (хвильоводну) дисперсію τ_{xm} і матеріальну дисперсію τ_{mat} , або дисперсію

матеріалу ОВ.

Відмінність швидкостей поширення направляються мод на фіксованій довжині хвилі випромінювання призводить до того, що час проходження цими модами ОВ заданої протяжності від його входу до виходу неоднаково. В результаті тривалість імпульсу, що передається, збільшується. Це збільшення дорівнює різниці часу поширення найповільнішої та найшвидшої хвиль (мод). Зазначене явище називають між модовою дисперсією $\tau_{\text{мм}}$.

Нехай ОВ зі східчастим ППЗ має довжину L . Відстань, пройдена оптичним променем при його поширенні по серцевині ОВ зигзагоподібно, становитиме $L / \cos\theta_1$. Час проходження променем вказаного шляху, якщо він рухається зі швидкістю $v_1 = c/n_1$ залежить від кута θ_1 і визначається виразом:

$$t(\theta_1) = Ln_1/c \cdot \cos \theta_1. \quad (1.9)$$

З отриманої формули випливає, що час поширення променів ОВ зростає зі збільшенням кута θ_1 , чим і викликається міжмодова дисперсія. Так як при введенні оптичного випромінювання в волокно кут θ_1 змінюється від 0 до $\theta_{1\text{max}}$ час розповсюдження по самому найкоротшому шляху згідно з формулою (1.9) складе відповідно:

$$t_{\text{max}} = Ln_1/c \cdot \cos \theta_{1\text{max}} = Ln_1^2/c \cdot n_2; \quad t_{\text{min}} = Ln_1/c. \quad (1.10)$$

Нехай на вхід ОВ подається дуже короткий оптичний імпульс ($\tau_i \rightarrow 0$). Початок вихідного імпульсу, що пройшов ОВ заданої довжини L , збігається з часом приходу першого оптичного променя, що пройшов при поширенні найкоротший шлях, а кінець вихідного імпульсу – з часом приходу останнього променя, що пройшов при поширенні найдовший шлях. Звідси відповідно до виразів (1.10) збільшення тривалості вихідного імпульсу за рахунок міжмодової дисперсії складе:

$$\tau_{\text{мм}} = t_{\text{max}} - t_{\text{min}} = Ln_1(n_1 - n_2)/cn_2. \quad (1.11)$$

Так як $(n_1 - n_2)/n_1 = \Delta$ – і врахувавши, що зазвичай $n_1/n_2 \sim 1$, для ступінчастого ОВ отримаємо:

$$\tau_{\text{мм}} = (n_1 \Delta / c) L. \quad (1.12)$$

З формули (1.12) для міжмодової дисперсії можна зробити такі висновки:

1. Збільшення тривалості переданих по ОВ імпульсів, викликане міжмодовою дисперсією, тим менше, ніж менше різниця показників заломлення серцевини і ободочки – це одна з причин, чому у реальних ступінчастих ОВ різницю $(n_1 - n_2)$ прагнуть максимально зменшити.

2. Збільшення тривалості імпульсів на виході ОВ пропорційно його довжині L .

Однак другий висновок справедливий лише для ідеального ОВ, в якому відсутня взаємодія між модами. У реальних волокнах наявність неоднорідностей призводить до взаємодії хвиль, що поширюються. Воно починає проявлятися з певної довжини ОВ, яка називається довжиною зв'язку, що встановилася між модами (L_y). Довжина L_y залежить від багатьох випадкових факторів і практично розрахувати її затруднительно. За даними вимірювань $L_y = 2 \dots 3$ км, тоді вираз для міжмодової дисперсії можна переписати у вигляді:

$$\tau_{\text{мм}} = (n_1 \Delta / c) \sqrt{LL_y}, \text{ де } L \geq L_y. \quad (1.13)$$

Внутрішньомодова (хвильоводна) дисперсія $\tau_{\text{вм}}$ обумовлена нелінійною залежністю коефіцієнта фази β будь-якої спрямованої моди від довжини хвилі оптичного випромінювання λ . Фазові швидкості спрямованих мод $v_\phi = \omega / \beta$ в процесі їх поширення по ОВ змінюються, але знаходяться в межах $c/n_1 \leq v_\phi \leq c/n_2$. Ці зміни призводять до різної тимчасової затримки складових оптичного сигналу, тобто збільшення тривалості вихідного оптичного імпульсу, утвореного прийнятими модами. Збільшення тривалості прийнятого імпульсу за рахунок внутрішньомодової дисперсії пропорційно ширині спектра

оптичного випромінювання $\Delta\lambda$ і виражається формулою:

$$\tau_{\text{вм}} = \Delta\lambda LB(\lambda), \quad (1.14)$$

де $B(\lambda)$ – коефіцієнт питомої внутрішньомодової дисперсії, який прийнято виражати в пікосекундах, поділених на 1 км довжини ОВ і нанометри ширини спектра оптичного випромінювання. пс/Лкмнм).

Поданий короткий аналіз внутрішньомодової дисперсії проведено у припущенні, що показники заломлення серцевини та оболонки n_1 і оболонки n_2 ОВ не залежать від довжини хвилі оптичного випромінювання, що передається. У реальних умовах це не так. Залежність показників заломлення серцевини та оболонки від довжини хвилі оптичного випромінювання також призводить до зміни фазових швидкостей напрямних мод $v_\phi = c/p$ в межах спектра випромінювання оптичного джерела. Різна тимчасова затримка складових прийнятого оптичного сигналу, що виникає при цьому – результат дисперсії матеріалу. Збільшення тривалості оптичного імпульсу, обумовлене матеріальною дисперсією, визначається формулою, аналогічною попередньою:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda LM(\lambda), \quad (1.15)$$

де $M(\lambda)$ – коефіцієнт питомої дисперсії матеріалу.

Внутримодову та матеріальну дисперсії називають хроматичною (частотною) дисперсією. Результуюче збільшення тривалості оптичного імпульсу за рахунок міжмодової, внутрішньомодової та матеріальної дисперсій на ОС довжиною L визначається за формулою:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мм}}^2 + (\tau_{\text{вм}} + \tau_{\text{мат}})^2}. \quad (1.16)$$

У різних типах ОВ дисперсії проявляються по-різному.

У ступінчастих ОВ при багатомодовому режимі їх роботи переважає

міжмодова дисперсія* при цьому коефіцієнт дисперсії досягає великих значень ($D_{mm} = 20 \dots 50$ нс/км).

У градієнтних БОВ промені, що знаходяться поблизу осі волокна, проходять менший шлях, але в середовищі з більшим показником заломлення, тобто з меншою швидкістю. Периферійні промені, що знаходяться поблизу оболонки, мають більший шлях, але проходять у середовищі з меншим показником заломлення, тобто з більшою швидкістю. В результаті час проходження різних променів по серцевині ОВ зрівнюється і визначальним є дисперсія матеріалу. Зі збільшенням довжини хвилі коефіцієнт дисперсії матеріалу зменшується, в діапазоні довжин хвиль 1.1... 1,6 мкм він знаходиться в межах 2...3 нс/км по абсолютній величині.

У ступінчастих ОВ при одномодовому режимі їх роботи міжмодова дисперсія відсутня, в них виявляє внутрішньомодова і матеріальна дисперсії. Залежність коефіцієнтів цих дисперсій від довжини хвилі оптичного випромінювання наведено на рис. 1.4,

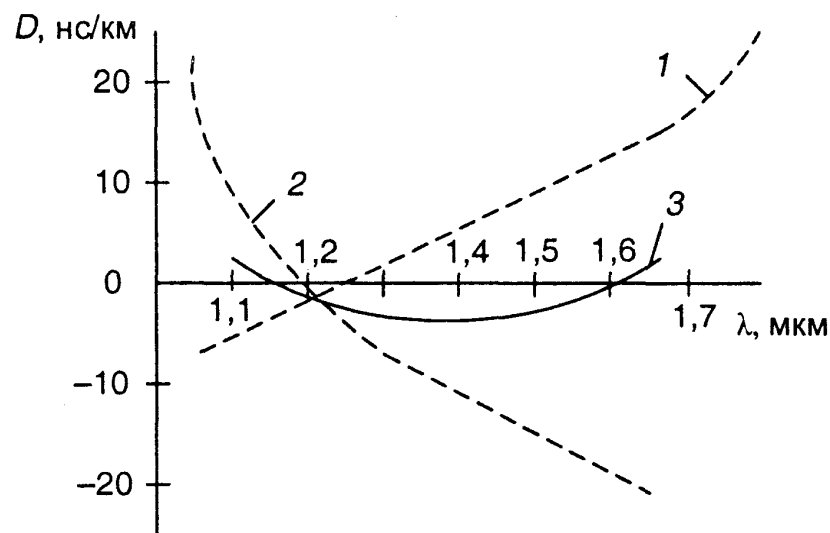


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнтів дисперсій від довжини хвилі оптичного випромінювання

де крива 1 показує коефіцієнт внутрішньомодової дисперсії, а крива 2 – коефіцієнт матеріальної дисперсії.

Зазначені коефіцієнти майже рівні за абсолютною величиною і протилежні фазі в широкому діапазоні довжин хвиль. Тому відбувається їх

взаємна компенсація та коефіцієнт результуючої дисперсії (крива 3) при $\lambda = 1,1 \dots 1,7$ мкм не перевищує $1 \dots 2$ нс/км [5] при $\lambda = 1,3$ мкм та $\lambda = 1,55$ мкм, у яких ООВ має мінімальні значення коефіцієнта згасання (див. рис. 1.2).

Порівнюючи дисперсійні параметри різних типів і різних режимів роботи ОВ, можна зробити висновок, що найкращі дані мають ООВ (рис. 1.5, а). Хороші параметри дисперсії також мають градієнтні ОВ (рис. 1.5, б). Найбільш різко дисперсія проявляється у ступінчастих БОВ (рис. 1.5, в) [3].

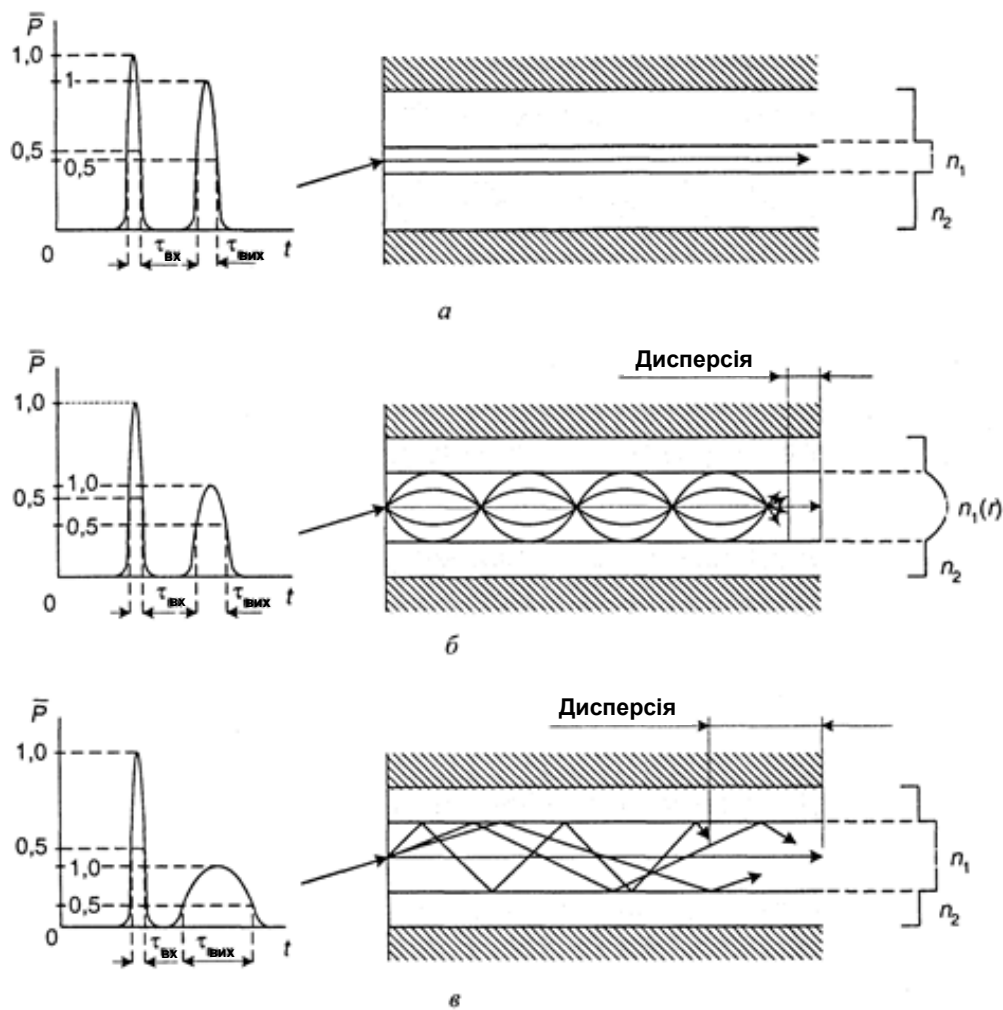


Рисунок 1.5 – Порівняння дисперсійних параметрів різних типів і різних режимів роботи ОВ

Дисперсійні властивості волоконно-оптичних ЦЛТ також залежать від джерела випромінювання ОПД. При лазерних діодах, завдяки вузькій смузі випромінюваних частот, дисперсія ОВ позначається несуттєво. У

світловипромінюючих діодах смуга випромінювання значно ширша і дисперсійні властивості ОВ проявляються дуже сильно.

З дисперсією τ і коефіцієнтом дисперсії D однозначно пов'язані такі параметри різних типів ОВ, як смуга пропускання і коефіцієнт широкосмуговості відповідно.

Смуга пропускання Δf визначається як інтервал частот, у межах якого значення АЧХ оптичного волокна більше або дорівнює половині її максимального значення. Це відповідає зниженню рівня оптичної потужності сигналу на межах (крайніх частотах) смуги пропускання ОВ на 3 дБ.

Смуга пропускання розраховується за такою формулою [4, 5]: $\Delta f = 0,44/\tau$. Наприклад, якщо $\tau = 2$ нс, то $\Delta f = 220$ МГц.

Оптичні волокна всіх типів поводяться як ФПЧ, частота зрізу якого обернено пропорційна довжині волокна.

Співвідношення між смугою пропускання ОВ і довжиною ОС L км при $L \leq L_y$ виражається пропорцією $\Delta f/\Delta f_x = L_y/L$, де значення параметрів Δf і L з індексом x – шукані, а без нього – задані. Відповідно:

$$\Delta f_x = \Delta f L / L_y \text{ і } L_y = L \Delta f / \Delta f_x. \quad (1.17)$$

У довгих ОС (приблизно понад 3 км), у яких зв'язок між модами вже встановився, діє квадратичний закон співвідношень між Δf і L , тобто

$$\Delta f/\Delta f_x = \sqrt{L_x/L} \text{ і тоді } \Delta f_x = \Delta f/\sqrt{L_y/L} \quad (1.18)$$

Наприклад, якщо компанія постачає споживачеві оптичний кабель будівельними довжинами $L = 2$ км зі смугою пропускання $\Delta f = 5000$ МГц, то на ОС довжиною 98 км смуга пропускання значно зменшується і складе лише $\Delta f \gg 5000/\sqrt{49} = 715$ МГц.

Таким чином, збільшення довжини ОВ призводить до зниження смуги частот оптичного сигналу, що передається і, отже, зменшує пропускну

здатність (інформаційну ємність) СЛТ. У свою чергу, розширення смуги частот оптичних сигналів, що передаються, різко обмежують довжину СЛТ.

Слід також пам'ятати, що пропускна здатність і довжина СЛТ обмежуються не тільки дисперсією, а й загасанням ОВ.

Коефіцієнт широкосмугового K_F визначається як смуга пропускання ОВ довжиною 1 км (МГц·км). Порівнюючи параметри різних типів ОВ. Слід зазначити, що найбільший коефіцієнт широкосмугості мають ООВ. Особливо помітні їх переваги на довгих хвилях 1,3 та 1,55 мкм, де міжмодова дисперсія відсутня, а коефіцієнти хроматичної дисперсії та згасання надзвичайно малі та мають тенденцію до зниження у міру вдосконалення технології виробництва ООВ. На зазначених довжинах хвиль K_F , як правило, перевищує значення 50 ГГц·км. Це дозволяє використовувати ООВ у високошвидкісних СЛТ великої протяжності.

Градiєнтні ОВ з параболічним і особливо з оптимальним ППЗ забезпечують можливість передачі широкої смуги частот навіть при збільшенні діаметра, серцевини до 50 мкм, тобто до розміру типового ступінчастого ОВ. Найкращі ОВ з оптимальним ППІ мають коефіцієнт широкосмугості 3...5 ГГц·км. Однак найменше відхилення профілю від оптимального викликає різке зменшення K_F коефіцієнт широкосмуговості розраховується за формулою: $K_F = 0,44/D$. Наприклад, якщо $D = 1$ нс/км, то $K_F = 440$ МГц·км.

1.4 Висновки до розділу

Вивчено особливості розповсюдження оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах зв'язку. Показано, що в оптичному волокні можуть поширюватись лише хвилі, довжина яких менша діаметра серцевини.

Показано, що чим більший діаметр серцевини тим більша критична довжина хвилі та нижча критична частота.

Оптичні волокна характеризуються частотою відсікання, вище якої вони ведуть себе як фільтри верхніх частот.

Встановлено, що властивості втрати при розповсюдженні оптичних сигналів обумовлені трьома основними факторами це: розсіювання енергії в навколишній простір, заміною матеріалу волокна, поглинання енергії сторонніми домішками.

Розглянуто причини виникнення дисперсії в оптичних волокнах. Встановлено, що збільшення довжини оптичного волокна приводить до зниження смуги пропускання, а отже і до зменшення пропускної здатності.

2 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Побудова схем оптичних передавачів

При побудові схеми оптичного передавача необхідно вирішувати такі основні завдання:

Перше завдання полягає в тому, щоб вибрати метод модуляції оптичного випромінювання лазера або СІД (далі вважаємо, що в ОПД як джерело випромінювання використовується тільки ІЛ). Переданим сигналом випромінювання лазера можна модулювати шляхом зовнішнього на який-небудь його параметрів після того, як воно вийде з джерела. Можна модулюючим (переданим) сигналом безпосередньо впливати на джерело випромінювання [6].

Типовий спосіб модуляції оптичного випромінювання полягає у безпосередньому впливі імпульсів модулюючого струму на лазер одним із трьох методів.

Перший метод полягає у використанні безпосередньої модуляції випромінювання лазера за інтенсивністю. Модуляція по інтенсивності полягає в тому, що при передачі «1» (імпульсу) лазер випромінює оптичний імпульс, а при передачі «0» (пробілу) – не випромінює. Насправді це зовсім так. Послідовність входних модулюючих відеоімпульсів ЦГС в коді NRZ впливає на джерело оптичного сигналу і керує його випромінюванням, як показано на рис. 2.1. а.

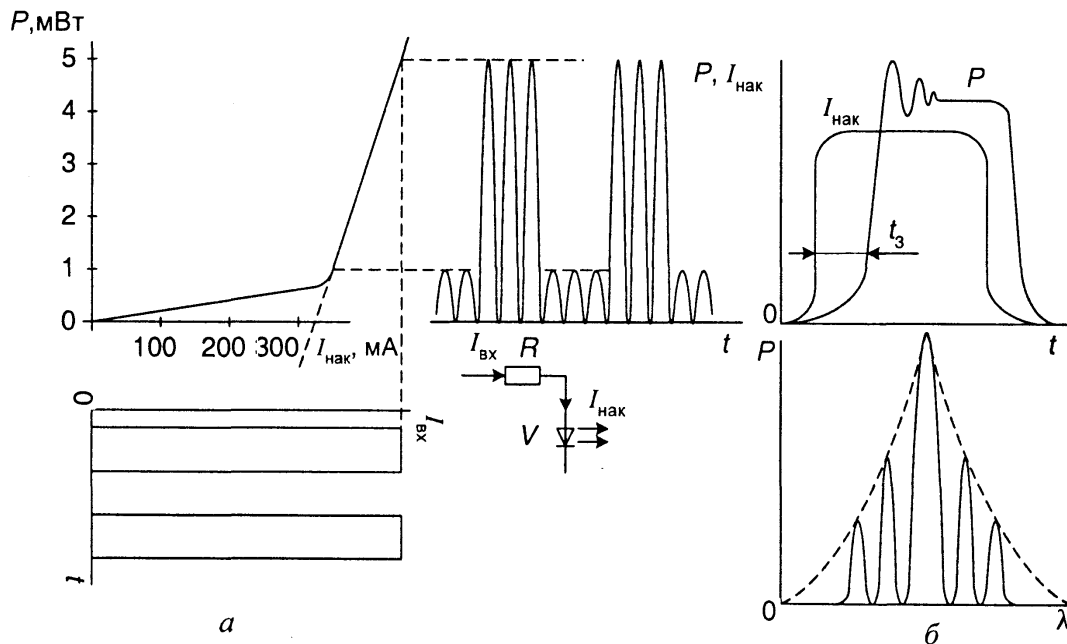


Рисунок 2.1 – Вплив послідовності входних модулюючих відеоімпульсів ЦГС в коді NRZ на джерело оптичного сигналу

Безпосереднє збудження лазера імпульсами вхідного струму $I_{\text{вх}} = I_{\text{нак}}$ має недоліки (рис. 2.1 б) [3, 6]:

а) час наростання імпульсу вхідного струму до значення порогового струму $I_{\text{пор}}$ призводить до значної затримки t_3 між початком імпульсу вхідного струму та початком генерації лазером імпульсу оптичного випромінювання;

б) внаслідок наявності релаксаційних процесів виникають великі викиди в оптичних імпульсах, випромінюваних лазером;

в) розширюється спектральний склад випромінювання лазера.

Однак слід зазначити, що при такому методі потужність, що розсіюється лазером, мінімальна, а термін його служби збільшується.

Другий метод передбачає попереднє введення лазера в режим передпорогового зміщення та подальший переведення його в надпороговий режим роботи при надходженні імпульсів струму модулюючого (вхідного) сигналу. Найпростіший спосіб реалізації цього методу полягає в тому, що лазер інjektується постійний струм зміщення $I_{\text{см}}$, близький до порогового струму $I_{\text{пор}}$, і здійснюється модуляція випромінювання лазера по інтенсивності вхідними

імпульсами за порогом генерації. В цьому випадку усуваються зазначені вище недоліки першого методу, проте до вихідного сигналу лазера додається постійний пороговий рівень шуму. Другий метод показано на рис. 2.2 а, а деякі результати його застосування наведені на рис. 2.2, б.

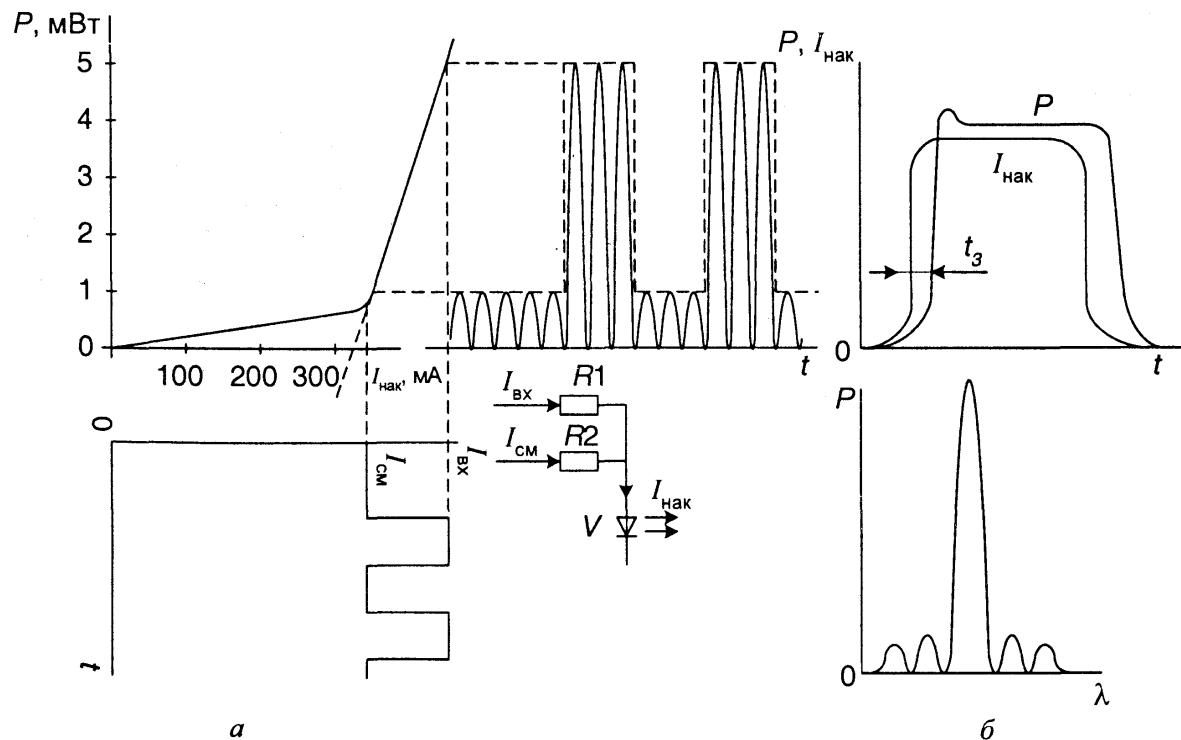


Рисунок 2.2 – Вплив імпульсів модулюючого струму на лазер в режим передпорогового зміщення та подальший переведення його в надпороговий режим роботи

Третій метод передбачає наявність надпорогового зміщення у лазері. При цьому також усуваються недоліки першого методу і пороговий шум, однак на виході лазера з'являється безперервний шум фону, який додається до фотоприймача шумів протилежного пункту. Оскільки в цьому випадку необхідно використовувати лазер у більш напруженому режимі, зменшується очікуваний термін його служби.

Практично в ОПД систем передачі SDH застосовується другий метод модуляції випромінювання одномодового лазера.

Друге завдання полягає у стабілізації вихідної потужності випромінювання лазера. Для підтримки постійної потужності оптичного

випромінювання на виході лазера використовують параметричний спосіб її стабілізації, спосіб використання НЧ-підмодуляції і імпульсний спосіб. Докладніше деякі з цих способів розглянуті нижче.

Третє завдання побудови схеми оптичного передавача передбачає наявність у ньому пристроїв управління випромінюванням лазера, стабілізації режиму його роботи та захисту від різних нестандартних впливів, наприклад, відмова джерела електроживлення, перевищення встановленої потужності випромінювання («Аварія випромінювача»), занадто високий рівень або зникнення вхідного модуля сигналу («Аварія вхідного сигналу») тощо.

Пристрої управління випромінюванням лазера містять ланцюги зворотного зв'язку, що забезпечують, наприклад, припинення випромінювання у разі зникнення вхідного сигналу.

Встановлений режим роботи лазера та задана потужність на його виході підтримуються струмом у ланцюзі зворотного зв'язку за середнім значенням потужності оптичного випромінювання. У схемі ОПД повинна бути передбачена можливість корекції потужності випромінювання у разі відхилення її від заданого значення.

Схеми захисту запобігають лазеру від різних впливів (наприклад, несправності в колах живлення ОПД).

Повернемося до способів підтримки постійної потужності оптичного випромінювання на виході лазера.

Параметричний спосіб заснований на тому, що враховується інформаційно-статистична структура сигналу, що передається. Вхідний сигнал ОПД нормується, інтегрується і віднімається з інтегрованого сигналу з фотодіода зворотного зв'язку. Різний сигнал підтримується постійним автоматичним регулюванням струму зміщення лазера. Функціональна схема ОПД, в якій використаний параметричний спосіб стабілізації вихідної потужності лазера та другий з описаних вище методів модуляції його випромінювання, наведено на рис. 2.3 [2].

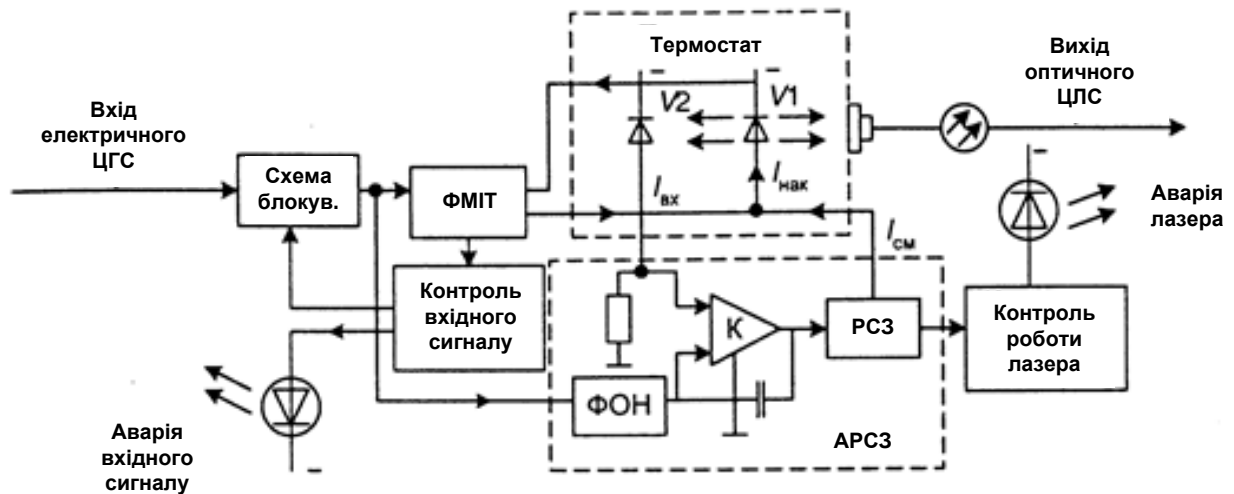


Рисунок 2.3 – Функціональна схема ОПД, в якій використаний параметричний спосіб стабілізації вихідної потужності лазера

Схема складається з оптичних та електронних пристроїв. Оптичними елементами схеми є інжекційний лазер $V1$ та фотодіод зворотного зв'язку $V2$. До електронних пристроїв належать:

- модулятор, або формувач модулюючих імпульсів струму ФМІТ;
- автоматичний регулятор струму зміщення АРСЗ, або стабілізатор середньої потужності оптичного випромінювання лазера;
- пристрої керування, захисту (блокування), контролю та індикації.

Подана схема ОПД працює в такий спосіб. Послідовність імпульсів ЦГС через схему блокування надходить на ФМІТ, де перетворюється на імпульси із заданою амплітудою та іншими параметрами для управління потужністю випромінювання лазера $V1$. Відповідно до ват-амперної характеристики лазерного діода $V1$ у формувачі ФМІТ забезпечується отримання такої величини вхідного струму $I_{вх}$, яка в сумі зі струмом прямого зміщення $I_{см}$ створює заданий режим роботи лазера. Для створення в лазері умов вимушеного одномодового випромінювання із заданою вихідною потужністю амплітуда результуючого вхідного струмового імпульсу $I_{нак} = I_{вх} + I_{см}$, що проходить через лазерний діод $V1$, повинна бути дещо вищою за пороговий струм $I_{пор}$ (див. рис. 2.1, а). У той же час вона повинна бути меншою за

амплітуду, при якій збуджуються моди вищих порядків. Щоб одномодове випромінювання лазера з вузькою спектральною лінією мало постійну вихідну потужність, струм I_{cm} стабілізований за допомогою ланцюга автоматично регульованого зворотного зв'язку.

Проте залишається проблема залежності $I_{nop} = \varphi(t^{\circ}C)$ – зі збільшенням температури на 40...50 °С струм I_{nop} зростає вдвічі. Це призводить до різкого збільшення потужності випромінювання лазера та розширення спектрального складу його випромінювання. Тому у всіх ОПД лазер і фотодіод зворотного зв'язку поміщаються в термостат, а струм I_{cm} за допомогою зворотного зв'язку автоматично підтримується постійним. У сукупності термостатування та система автоматичного регулювання струму зміщення забезпечують стабілізацію параметрів лазера, зокрема середньої потужності випромінювання, і мінімізують постійну складову оптичного сигналу, що випромінюється. З виходу термостата імпульси, що випромінюються через оптичний з'єднувач вводяться в ООВ станційного оптичного кабелю, який через пристрій з'єднання станційного і лінійного кабелів з'єднується з лінійним оптичним кабелем.

У разі зникнення сигналу, що передається на вході ФМІТ, останній через пристрій контролю вхідного сигналу блокується за допомогою схеми блокування, аварійний сигнал у вигляді логічної «1» подається на пристрій сигналізації, загоряється світлодіод «Аварія вхідного сигналу».

Працездатність та заданий режим роботи лазера $V1$ безперервно контролюються. Якщо струм I_{cm} перевищить паспортне значення, що відповідає граничному режиму роботи лазера, сигнал аварійної сигналізації через пристрій контролю роботи випромінювача у вигляді логічної «1» подається на пристрій аварійної сигналізації, світиться світлодіод «Аварія лазера», лазер автоматично вимикається.

Пристрій АРТС складається з фотодіода зворотного зв'язку $V2$, формувача опорної напруги ФОН, компаратора і регулятора струму зміщення РТС. Послідовність імпульсів ЦГС, крім ФМІТ, подається на вхід ФОН. З виходу ФОН сигнал, пропорційний коефіцієнту заповнення ЦГС, тобто

співвідношенню в ньому нулів і одиниць подається на вхід компаратора К. На його другий вхід через фотодіод V2 надходить сигнал, пропорційний потужності оптичного випромінювання лазера V1. З виходу До різницевий сигнал управляє роботою РТС. Останній за необхідності змінює струм $I_{см}$, що дозволяє підтримувати постійну вихідну потужність імпульсів оптичного випромінювання.

Розглянута схема ОПД має деякі недоліки:

- у процесі виробництва ОПД струм накачування (модуляції), що дорівнює сумі $I_{вх} + I_{см}$, встановлюється при налаштуванні передавача і надалі не змінюється;
- вказаний струм має температурну залежність, яка різна для кожного лазера;
- у схемі не враховується зниження ефективності лазера в процесі його старіння і, отже, потужність, що випромінюється, буде зменшуватися.

Незважаючи на зазначені недоліки, схема має практичне застосування.

Спосіб стабілізації вихідної потужності лазера з використанням НЧ-підмодуляції заснований на тому, що вхідні відеоімпульси модулюються НЧ-допоміжним сигналом. Принципова схема ОПД, у якій для стабілізації вихідної потужності оптичного випромінювання використовується НЧ-підмодуляція, наведено на рис. 2.3. У цій схемі НЧ-складової у складі сигналу оптичного випромінювання автоматично регулюються струм зміщення і вхідний струм модуляції лазера. Тому схема містить два контури стабілізації вихідної потужності оптичного випромінювання.

Перший контур стабілізує середню потужність оптичного випромінювання, регулюючи постійний струм усунення лазера V1. До складу контуру входять такі пристрої: фотодіод зворотного зв'язку V2, підсилювач A1, компаратор A2, інтегратор Інт, джерело струму зміщення, що регулюється, на транзисторі ТЗ. Контур працює в такий спосіб. Фотострум, пропорційний випромінюваній оптичній потужності, з фотодіода зворотного зв'язку V2 надходить на вхід підсилювача A1, де перетворюється на відповідну напругу.

Коефіцієнт перетворення встановлюється резистором R_{oc} . Напруга з виходу підсилювача $A1$ компараторі $A2$ порівнюється з опорною напругою U_0 . Різнісний сигнал з виходу компаратора через інтегратор Інт задає напругу, що управляє, на транзисторі $T3$. Цією напругою регулюється постійний струм зміщення лазера $V1$ і, отже, середня його потужність оптичного випромінювання.

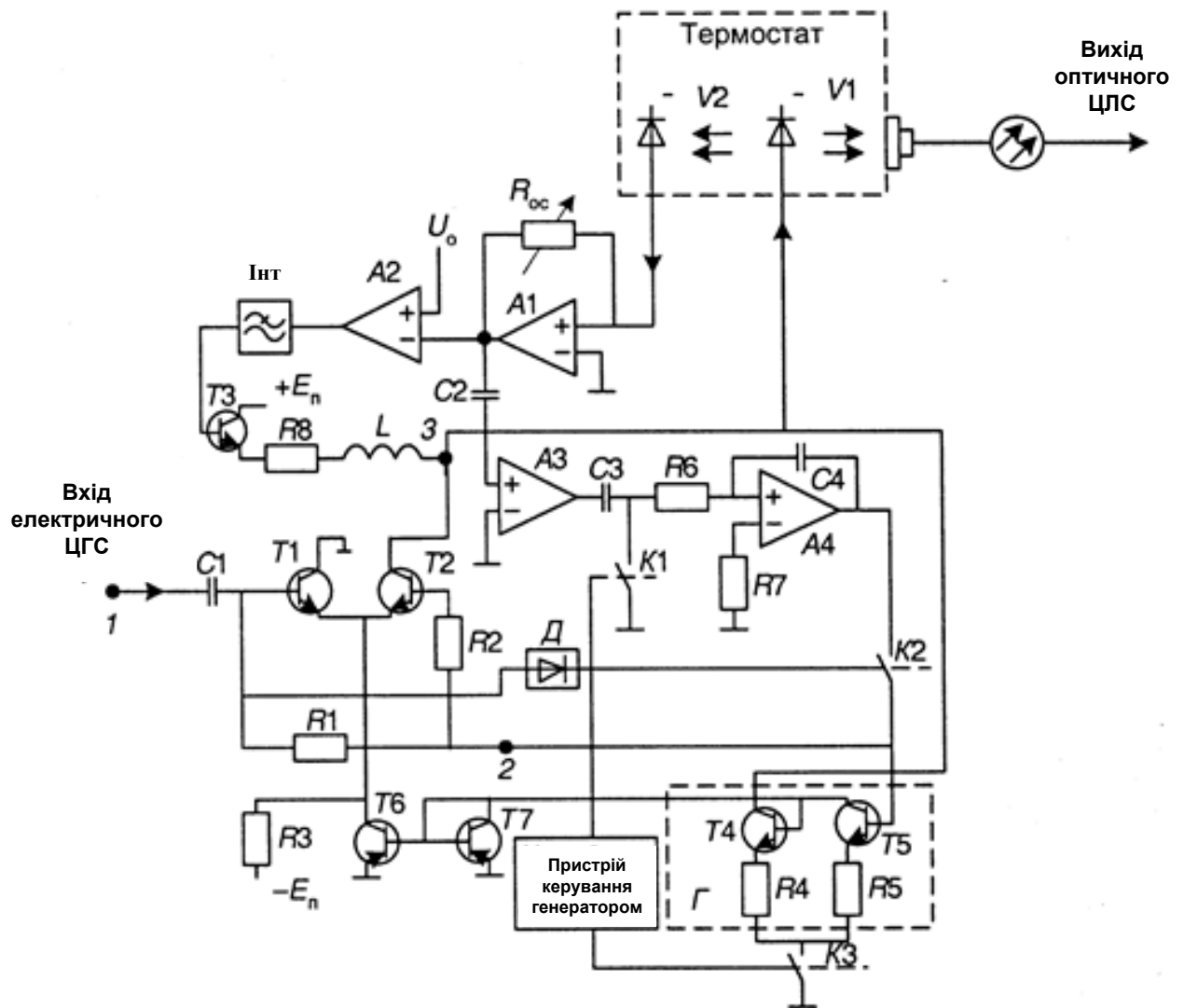


Рисунок 2.4 – Принципова схема ОПДз використанням НЧ-підмодуляції для стабілізації вихідний потужності оптичного випромінювання

Другий контур регулює вхідний струм модуляції переданого сигналу таким чином, щоб результуючий сигнал НЧ-складових у складі лазерного випромінювання дорівнював нулю. До складу другого контуру входять: фотодіод зворотного з'язку $V2$, підсилювачі $A1$ та $A3$, інтегратор-компаратор

$R6$, $C4$, $A4$ та регулятор вхідного струму на транзисторах $T1$, $T2$.

Допоміжними пристроями схеми ОПД, що розглядається, є генератор струму НЧ-підмодуляції G зі схемою управління і детектор вхідного сигналу D . Генератор зібраний на транзисторах $T4$ і $T3$, він генерує прямокутні імпульси з частотою їх проходження 10 кГц і керує ключем $K3$. Амплітуда імпульсів струму НЧ-підмодуляції на виході генератора пропорційна напрузі на базах транзисторів $T4$, $T5$, поділеного на опір резисторів $R4$ і $R5$. Співвідношення струмів модуляції I_m та зміщення $I_{см}$ задається ставленням опорів резисторів $R4$ та $R5$. При цьому глибина модуляції сигналу, що передається сигналом НЧ-підмодуляції визначається ставленням опорів $R4/R3$.

Другий контур працює в такий спосіб. Результуючий сигнал НЧ складових у складі лазерного випромінювання з фотодіода зворотного зв'язку $V2$ надходить на вхід підсилювача $A1$. З виходу підсилювача цей сигнал через конденсатор $C2$ підсилювач $A3$ і конденсатор $C3$ подається на ключ $K1$, який управляє генератором G . Ключ $K1$ і генератор G утворюють синхронний детектор.

Якщо різницевий струм $I_m - I_{см}$, що надійшов на ключ $K1$, має позитивне значення, сигнал на виході цього ключа негативний і інтегратор-компаратор $R6$, $C4$, $A4$ збільшує струм НЧ-підмодуляції, що надходить через ключ $K2$ на бази транзисторів $T1$, $T2$. Якщо різницевий сигнал $I_m - I_{см}$ негативний, інтегратор-компаратор зменшує струм НЧ-підмодуляції, що надходить на бази транзисторів $T1$, $T2$. Таким шляхом здійснюється зміна (підмодуляція) вхідного сигналу, що модулює випромінювання лазера $V1$.

Переданий ЦГС надходить на вхід схеми 1 і через конденсатор $C1$ впливає на бази транзисторів $T1$, $T2$, на яких зібрана схема регулятора вхідного струму. Одночасно диференціальний підсилювач на транзисторах $T1$, $T2$ є формувач модулюючих імпульсів струму, які керують випромінюванням лазера $V1$.

Таким чином, змінюючи напруги на входах 2 (регулювання струму підмодуляції) та 3 (регулювання струму зміщення), можна керувати струмами

модуляції та зміщення лазера відповідно.

Розглянутий спосіб стабілізації вихідної потужності випромінювання лазера є кращим порівняно з наведеним вище параметричним способом, оскільки тут здійснюється автоматичне регулювання струму зміщення і струму модуляції, які залежать від температури і старіння лазера [5].

У схемі передбачений детектор вхідного сигналу D , який за відсутності переданих імпульсів на вході схеми 1 за допомогою ключа $K2$ відключає регулювання струму підмодуляції, тобто розриває ланцюг з виходу інтегратора-компаратора $R6$, $C4$, $A4$ на бази транзисторів $T1$, $T2$. Так знімається невизначеність у роботі другого контуру. В іншому випадку регулювання струму модуляції могло б початися з його максимального значення.

Імпульсний спосіб стабілізації вихідної потужності випромінювання лазера заснований на порівнянні параметрів імпульсів на виході фотодіода зворотного зв'язку з еталонними імпульсами. Для реалізації способу необхідні швидкодіючий фотодіод зворотного зв'язку, а також тракт вимірювання та посилення вихідних імпульсів. Це значно ускладнює завдання побудова такої схеми ОПД.

2.2 Побудова схем оптичних приймачів

Відповідно до схем побудови ОПД, що використовують модуляцію по інтенсивності, в ОПМ використовується пряме детектування оптичних сигналів, що приймаються. При цьому в схемах ОПМ як детектор може застосовуватися PIN-ФД або ЛФД. Структурну схему ОПМ з використанням PIN-ФД наведено на рис. 2.5. Вона складається з вхідного оптичного з'єднувача, приймального оптичного модуля, підсилювача-коректора з автоматичним регулюванням рівня АРУ та джерела напруги зворотного зміщення [6].

каскадами, трохи збільшать відношення сигнал/шум на виході МШУ.

Отже, під час проектування МШУ параметри першого каскаду є визначальними. На жаль, не всі параметри може керувати розробник. Тому, проектуючи підсилювач, визначення можливостей зменшення шуму необхідно розглянути окремо варіанти типів транзисторів для першого каскаду МШУ: кремнієвий польовий площинний, кремнієвий біполярний площинний або польовий канальний на арсеніді галію. У кожному варіанті потрібно визначити становище робочої точки таким чином, щоб забезпечити необхідне посилення сигналу з мінімально можливим шумом додаванням.

Підсилювач-коректор з АРУ призначений для часткового усунення спотворень форми прийнятих відеоімпульсів та підтримки сталості їхньої амплітуди на виході ОПМ.

Структурна схема ОПМ з лавинним фотодіодом відрізняється від попередньої схеми тим, що дозволяє автоматично змінювати високу напругу зворотного зміщення, що подається на ЛФД, і таким шляхом регулювати коефіцієнт лавинного множення M . Це розширює динамічний діапазон прийнятих оптичних сигналів, але вимагає ускладнення системи автоматичного регулювання, яка одночасно керує коефіцієнтами посилення ЛФД та підсилювача-коректора. Зазначена особливість використання ЛФД ускладнює схему побудови ОПМ та знижує надійність його функціонування.

Функціональна схема ОПМ із лавинним фотодіодом наведена на рис. 2.5.

Основними пристроями ОПМ є:

- лавинний фотодіод із джерелом напруги зворотного зміщення;
- малошумливий підсилювач з глибоким негативним зворотним зв'язком;
- підсилювач-коректор;
- фільтр низьких частот;
- вихідний підсилювач;
- пристрої системи АРУ з регуляторами рівня сигналу, що приймається, і напруги зміщення;

ЛФД генеруються носії зарядів (електрони та дірки). Вони створюють напругу на ємності діодного $p-n$ -переходу, що розряджається через ланцюг навантаження. Протікає через резистор R_n фотострум має мале значення, тому наступне за ЛФД пристрій є підсилювач з малим коефіцієнтом шуму – МШУ. Його перший каскад посилює отриманий струмовий сигнал, який у наступних каскадах перетворюється на напругу. Так як шум підсилювача струму домінує над іншими шумами на низьких частотах, то у вхідному каскаді МШУ використовується, як правило, польовий площинний кремнієвий транзистор. У наступних каскадах підсилювача напруги, де шум зростає зі збільшенням частоти і стає переважним на високих частотах, використовують біполярні кремнієві площинні транзистори.

Основна проблема реалізації МШУ полягає у забезпеченні їхньої стійкості. Використання загального ланцюга негативного зворотного зв'язку, що охоплює підсилювач з великим коефіцієнтом підсилення та високим вхідним імпедансом, робить схему МШУ схильною до самозбудження, особливо на високих частотах, через виникнення позитивного зворотного зв'язку через паразитну ємність. Щоб уникнути самозбудження, необхідне ретельне, продумане компонування МШУ та ефективне екранування відповідних пристроїв та елементів схеми.

На виході МШУ включений один з виконавчих елементів системи автоматичного регулювання - регулятор рівня (РР) сигналу, що приймається, який являє собою регульований дільник напруги. Він забезпечує постійний рівень сигналу на виході ОПМ за зміни оптичної потужності вхідного сигналу в заданому динамічному діапазоні.

Підсилювач-коректор $Ус$. До виконує завдання збільшення амплітуди та корекції форми імпульсів на виході МШУ. Оскільки частотна залежність загального опору навантаження ланцюга, що шунтує вхідний сигнал МШУ, має спад зі зростанням частоти, коефіцієнт посилення МШУ не є постійним у смузі частот, що посилюється. Включення на вході першого каскаду МШУ малого опору, що шунтує, R_n призводить до збільшення теплових шумів. Тому

простіше створити підйом частотної характеристики посилення в наступному підсилювачі-коректорі, що й реалізовано у схемі ОПМ.

Крім того, обмеження смуги пропускання в джерелі випромінювання ОПД, дисперсія сигналів ОБ та інші фактори викликають спотворення форми імпульсів, що надходять в ОПМ. Підйом частотної характеристики посилення і компенсація зазначених спотворень форми сигналів, що приймаються виконується в $U_c. K$. Смуга пропускання та параметри $U_c..$ До вибираються та реалізуються з умови отримання максимального відношення сигнал/шум на виході ОПМ. При цьому імпульси на виході $U_c..$ можуть взаємно перекриватися, що викликає взаємні перешкоди між сусідніми символами, тобто міжсимвольні перешкоди. Взаємне перекриття імпульсів можна зменшити за допомогою коригувального фільтра нижніх частот ФНЧ, або другого коректора, який включений після $U_c. K$.

Передаточна функція ОПМ, що зв'язує напругу на його виході зі струмом на вході МШУ, повинна бути рівномірною в смузі частот від нуля до, принаймні, значення, чисельно рівного швидкості передачі ЦЛС в даній ВО ЦСП, тобто $\Delta f [\text{кГц}] \geq B [\text{кбіт/с}]$.

Існує загальний клас фільтрів, що мають таку властивість, що їх відгук на імпульс, прийнятий на момент часу t_0 , дорівнює нулю у всі моменти $t_0 \pm nT$, де n - ціле число. Відомо, що цією властивістю має ідеальний ФНЧ. Його передатна функція визначається виразом:

$$T(f) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < f < B/2, \\ 0, & \text{при } f > B/2. \end{cases} \quad (2.1)$$

Вона наведена на рис. 2.7. Відповідна їй імпульсна характеристика визначається виразом: $h(t) = \sin(\pi t B) / \pi t B$, вона зображена на рис. 2.8, з якого випливає, що характеристика $h(t)$ перетворюється на нуль у моменти часу $\pm nT$, де $T = 1/B$. Виявляється, що цією властивістю мають усі фільтри, передатна функція яких асиметрична щодо точки $T(B/2) = 0,5$.

Рисунок 2.7 – Передаточна функція ФНЧ

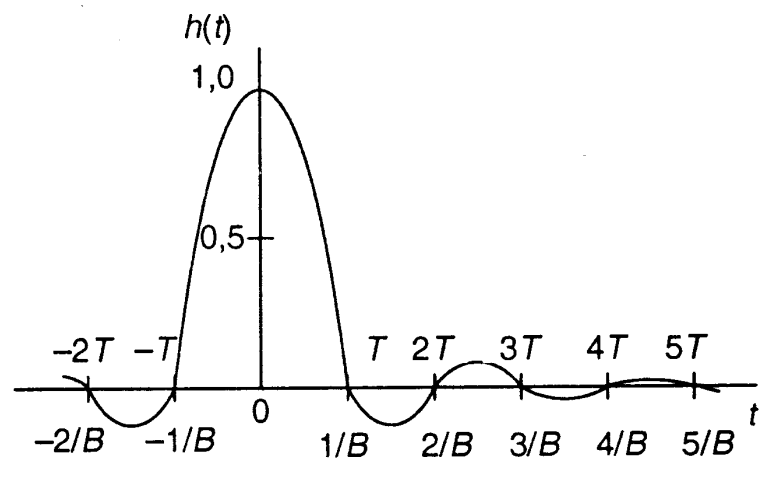


Рисунок 2.8 – Імпульсна характеристика передавальної функції ФНЧ

Конкретним прикладом може бути фільтр з косинусоїдальною передавальною функцією, яка описується виразом:

$$T(f) = \begin{cases} 1/2(1 + \cos(\pi f / B)), & \text{при } 0 < f < B, \\ 0, & \text{при } f > B. \end{cases} \quad (2.2)$$

Вона показана на рис. 2.9, а. Вираз для його імпульсної характеристики має вигляд:

$$h(t) = \frac{\sin(2\pi B t)}{2\pi B} \frac{1}{1 - (2tB)^2} \quad (2.3)$$

Імпульсна характеристика косинусоїдального ФНЧ представлена на рис. 2.9, б.

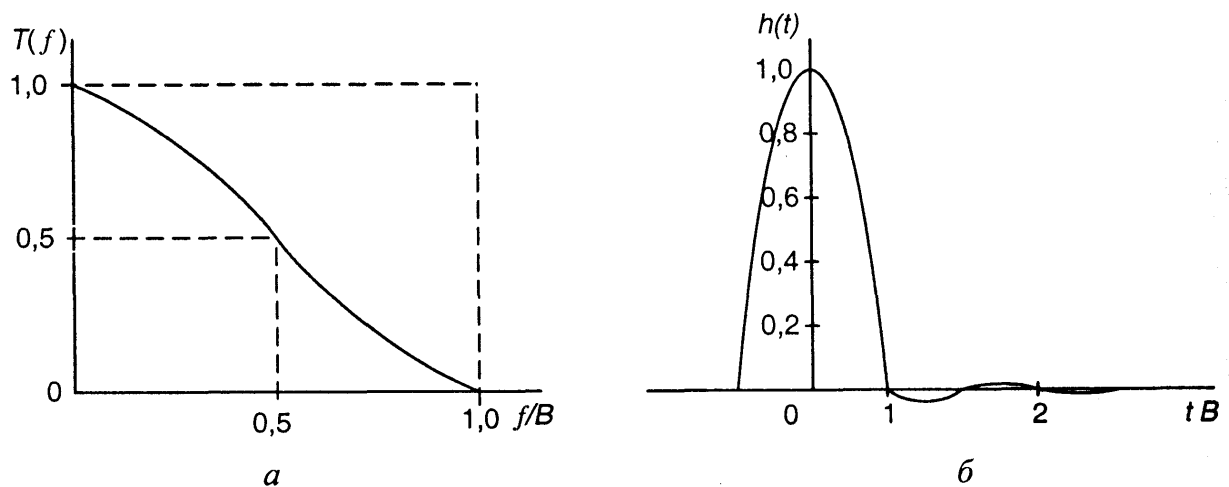


Рисунок 2.9 – Імпульсна характеристика косинусоїдального ФНЧ

Попри те що, що ідеальний ФНЧ мало реалізуємо, теоретично він забезпечує найкраще ставлення сигнал/шум. Однак із рис. 2.8 слід, що цей фільтр створював порівняно велику напругу в сусідніх тактових інтервалах. Це означає, що незначні ефекти збільшення тривалості імпульсу або його фазові тремтіння викликали появу великих взаємних перешкод між символами. Фільтр з косинусоїдальною передавальною функцією вносить більше шумів, але забезпечує значно більший допуск на тремтіння та збільшення тривалості імпульсу.

Практично ФНЧ у тракті ОПМ реалізується із частотою зрізу f_0 , чисельно рівною $(1,2 \dots 1,5)B$, тобто. якщо на вхід даного ОПМ надходить ЦЛС зі швидкістю передачі $B = 622,08$ Мбіт/с, то f_0 може мати значення не більше 750...930 МГц.

У разі зникнення сигналу на вході МШУ спрацьовує пристрій для контролю вхідного сигналу. При цьому аварійний сигнал у вигляді логічної «1» подається на сигналізаційний пристрій, запалюється світлодіод «Аварія вхідного сигналу». Аналогічно здійснюється контроль роботи всього ОПМ.

2.3 Висновки до розділу

Проведено аналіз методів модуляції оптичних сигналів. Показано, що оптимальним є метод, суть якого полягає у виведенні лазера в режим передпорогового зміщення та подальше переведення його в надпороговий режим роботи при надходженні імпульсів модулюючих сигналів. Проведено аналіз методів стабілізації вихідної потужності та методів керування лазерним випромінюванням. Розглянуто недоліки та переваги параметричного способу стабілізації вихідної потужності оптичного передавача.

Розглянуто методи побудови оптичних приймачів. Розглянуті переваги та недоліки структурних схем приймачів на базі р-і-р лавинних фотодіодів.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

3.1 Концептуальна модель оптичних транспортних систем і вимоги до неї

На першому етапі машинного моделювання – побудови концептуальної моделі M_x системи S і її формалізації – формулюють модель і будують її формальну схему, тобто основним призначенням цього етапу є перехід від змістовного опису об'єкта до його математичної моделі, інакше кажучи, формалізацію. Моделювання систем на ЕОМ сьогодні – найуніверсальніший і найефективніший метод оцінювання характеристик великих систем. Найбільш відповідальними і найменше формалізованими моментами в цій роботі є проведення межі між системою S і зовнішнім середовищем E , спрощення опису системи і побудова спочатку концептуальної, а потім формальної моделі системи. Модель повинна бути адекватною, інакше неможливо одержати позитивні результати моделювання, тобто дослідження функціонування системи на неадекватній моделі взагалі втрачає сенс. Під адекватною моделлю розумітимемо модель, яка з певним ступенем наближення на рівні розуміння модельованої системи S розробником моделі відображає її функціонування в зовнішньому середовищі E .

Сукупність елементів модельованої оптичної системи (її концептуальна модель) показано на рис. 3.1. Кожен з прямокутників є описом деяких підпроцесів досліджуваного процесу функціонування системи S , впливів зовнішнього середовища E і т. д [7].

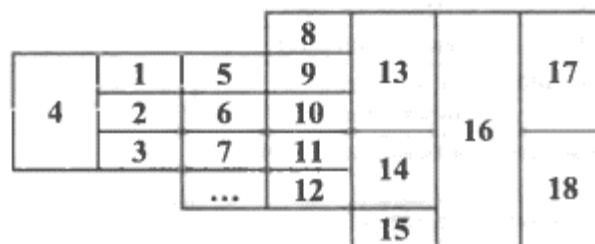


Рисунок 3.1 – Концептуальна (змістовна) модель оптичної транспортної системи

Зміст кожного з елементів концептуальної моделі є таким:

- 1 – параметри оптичного передавача;
- 2 – параметри приймача оптичного випромінювання;
- 3 – параметри оптичного волокна;
- 4 – параметри і характеристики системи DWDM;
- 5 – нелінійний ефект чотирехвильового змішування;
- 6 – нелінійний ефект стимульованого розсіювання Бріллюена;
- 7 – інші нелінійні ефекти (фазова самомодуляція, перехресна фазова модуляція, стимульоване розсіювання Рамана);
- 8 – втрати потужності в оптичному волокні за рахунок загасання;
- 9 – втрати в роз'ємних і нероз'ємних з'єднаннях;
- 10 – втрати за рахунок нелінійних ефектів;
- 11 – хроматична дисперсія (у кожному спектральному каналі);
- 12 – поляризаційна модова дисперсія (у кожному спектральному каналі);
- 13 – сумарні втрати системи;
- 14 – втрати за рахунок міжсимвольної інтерференції;
- 15 – джиттер передавання даних і синхронізації;
- 16 – побудова ОКО-діаграми;
- 17 – енергетичні параметри якості сервісу (QoS);
- 18 – часові параметри якості сервісу (QoS).

3.2 Основні параметри та змінні моделі

Сформулюємо основні вимоги, що висунуто до моделі M_m процесу функціонування системи S [7]:

1. Повнота моделі повинна надавати користувачеві можливість одержання необхідного набору оцінок характеристик системи з необхідною точністю і достовірністю.

2. Гнучкість моделі повинна давати можливість відтворення різних ситуацій під час варіювання структури, алгоритмів і параметрів системи.

3. Тривалість розроблення і реалізації моделі складної системи повинна бути за можливості мінімальною, враховуючи обмеження на наявні обчислювальні ресурси.

4. Структура моделі повинна бути блоковою, тобто допускати можливість заміни, додавання і видалення деяких частин без перероблення всієї моделі.

5. Інформаційне забезпечення повинне надавати можливість ефективної роботи моделі з базою даних систем певного класу.

6. Програмні і технічні засоби повинні забезпечувати ефективну (за швидкістю і пам'яттю) машинну реалізацію моделі і зручне спілкування з нею користувача.

7. Повинне бути реалізоване проведення цілеспрямованих (планованих) машинних експериментів з моделлю системи з використанням аналітико-імітаційного підходу за наявності обмежених обчислювальних ресурсів.

Основними етапами моделювання ОТС, як і будь-якої іншої складної системи, є:

- побудова концептуальної моделі системи і її формалізація;
- алгоритмізація моделі системи і її машинна реалізація;
- одержання та інтерпретація результатів моделювання системи.

Під час машинного моделювання системи 5 характеристики процесу її функціонування визначають на основі моделі побудованої, враховуючи наявну початкову інформацію про об'єкт моделювання. Одержуючи нову інформацію про об'єкт, його модель переглядають і уточнюють з урахуванням нової інформації, тобто моделювання, зокрема розроблення і машинна реалізація моделі, є ітераційним. Цей ітераційний процес продовжується доти, поки не буде отримана модель M_m , яку можна вважати адекватною в межах виконання поставленого завдання дослідження і проектування системи S .

Перш ніж описувати математичну модель, необхідно визначити параметри системи $h_k, k = \overline{1, n_H}$, вхідні і вихідні змінні $x_i, i = \overline{1, n_X}$, $y_j, j = \overline{1, n_Y}$, дії зовнішнього середовища $v_l, l = \overline{1, n_V}$. Остаточною метою цього пункту є підготовка до побудови математичної моделі системи S , що функціонує в

зовнішньому середовищі E , для чого необхідний розгляд всіх параметрів і змінних моделі і оцінка ступеня їх впливу на функціонування системи загалом.

Описувати кожен параметр і змінну потрібно в такій формі:

- а) визначення і коротка характеристика;
- б) символ позначення і одиниця вимірювання;
- в) діапазон зміни;
- г) місце застосування в моделі.

Змінні і параметри моделі ОТС записано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Змінні та параметри моделі ОТС

№ з/п	Визначення і коротка характеристика	Символ позначення і	Діапазон зміни
Список факторів			
1	Довжина волоконно-оптичної лінії зв'язку	L , км	0-1500
2	Потужність джерела оптичного випромінювання	P_o , Вт	$1 \div 10 \times 10$
3	Довжина хвилі випромінювання джерела	λ , мкм	0,85-1,7
4	Ширина смуги випромінювання джерела	$\Delta\lambda$, нм	0-100
5	Чутливість оптичного приймача	P_R , дБ	(-45)-(-30)
6	Коефіцієнт загасання оптичного волокна	α , дБ/км	0,01-0,5
7	Втрати в нероз'ємному з'єднанні	α_N дБ	0,05-0,2
8	Кількість нероз'ємних з'єднань	N_n , шт.	
9	Будівельна довжина волоконно- оптичного кабеля	$L_{\text{БД}}$ км	2-6
10	Втрати в роз'ємному з'єднанні	α_r , дБ	0,5
11	Кількість роз'ємних з'єднань	N_p , шт.	4
12	Швидкість передавання інформації	B , Мбіт/с	155-40 000
13	Швидкість оптичного сигналу	B_L , Мбіт/с	
14	Смуга пропускання фотоприймача	BW_R , Гц	
15	Коефіцієнт хроматичної дисперсії	D , $\frac{\text{нс}}{\text{нм} \times \text{км}}$	0-0,1
16	Коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії	$\frac{DP_{\text{PMD}}}{\text{нс}}$ $\text{нм}^2 \times \text{км}$	0,01-0,1
17	Номінальне значення Q-фактора	$Q_{\text{ном}}$	
18	Кількість довжин хвиль DWDM- системи	n , шт.	1-80
19	Інтервал між спектральними каналами	$\Delta\lambda$, нм	0.1-0.8

Продовження таблиці 3.1

№ з/п	Визначення і коротка характеристика	Символ позначення і	Діапазон зміни
Список реакцій (досліджуваних змінних)			
20	Зміна ширини смуги каналу, зумовлена нелінійними ефектами	$\Delta\lambda_k$, нм	
21	Втрати каналу, зумовлені нелінійними ефектами	$\Delta\alpha$, дБ	
22	Міжсимвольна інтерференція	a_{ISI} , дБ	
23	Потужність шумів каналу	P_{noise} , дБ	
24	Оптичне співвідношення сигнал/шум у каналі	$OSNR_k$	
25	Коефіцієнт бітової помилки в каналі	BER	

3.3 Блокова модель оптично транспортної мережі

Блоки 1 - 4 концептуальної моделі об'єднують у вхідний вектор, що містить всі вхідні дані і характеристики волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним ущільненням каналів. Блоки 5 - 7 моделюють нелінійні ефекти і мають багато спільного, тому вони також об'єднані в один блок (FWM, SBS,...). Хроматичну і поляризаційно – модову дисперсію моделюють окремо в двох блоках, оскільки природа цих видів дисперсії принципово різна. Сумарні втрати визначаються як сума втрат в оптичному волокні, роз'ємних і нероз'ємних з'єднаннях, а також розсіювання і втрати внаслідок впливу модельованих нелінійних ефектів – їх об'єднано в блок «Втрати». Також цей блок враховує оптичне співвідношення сигнал/шум і його зміну за допомогою використання оптичних підсилювачів. Міжсимвольна інтерференція (МІ) виникає внаслідок розмиття фронтів імпульсів і залежить також від характеристик оптичного приймача, обчислюється в блоці a_{ISI} . По суті МІ – це внесення додаткових шумів за рахунок накладання сусідніх імпульсів, і, як наслідок, погіршення якості оптичного сигналу. Джиттер передавання даних і синхронізації має випадковий характер впливу і моделюється окремим однойменним блоком. Одержані часові і енергетичні параметри використовують для побудови око-діаграми, багатократно накладаючи передавані імпульси і моделюючи у відповідному блоці.

Результатом аналізу око-діаграми є вихідний вектор, що містить всі параметри і характеристики якості обслуговування (QoS), одержані за допомогою аналітично-статистичного моделювання. Блокова модель волоконно-оптичної системи передавання показана на рис. 3.2.

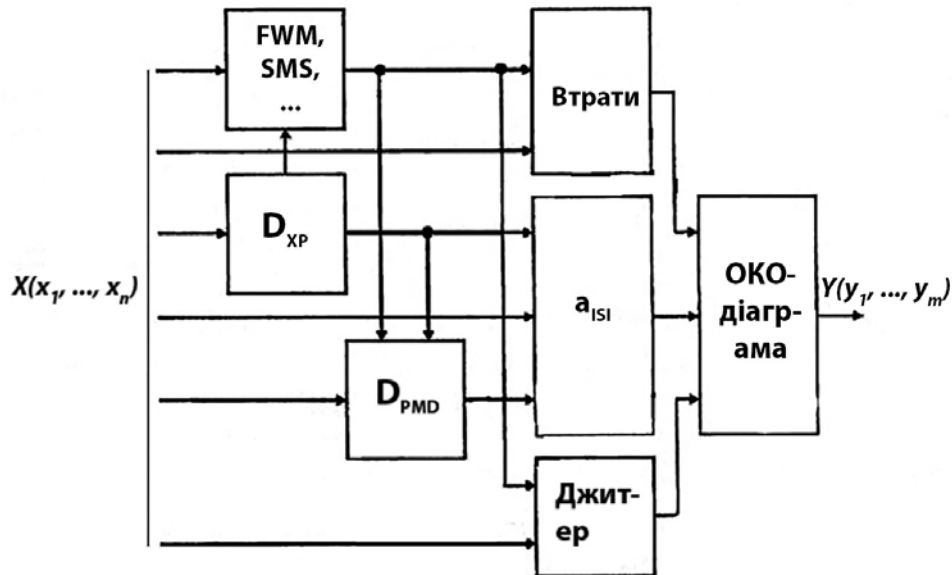


Рисунок 3.2 – Блокова модель оптичної системи передавання

Отже, функціональні блоки, що показані на рис. 3.2:

FWM, SBS, ... – блок розрахунку впливу нелінійних ефектів;

D_{xp} – обчислення хроматичної дисперсії;

D_{PMD} – моделювання поляризаційної модової дисперсії;

Втрати – обчислення втрат потужності спектральних каналів системи DWDM;

a_{ISI} – блок обчислення втрат міжсимвольної інтерференції;

Джиттер – моделювання джиттера передавання даних і синхронізації;

ОКО – блок побудови око-діаграми;

$X(x_1, \dots, x_n)$ – вектор вхідних даних;

$Y(y_1, \dots, y_m)$ – вектор вихідних даних (параметрів якості обслуговування), що є результатом моделювання.

Особливістю функціонування оптичних транспортних систем на основі технології спектрального ущільнення є інколи навіть істотна відмінність між параметрами і характеристиками в різних спектральних каналах, тому одне з

основних завдань моделювання – зберегти адекватну відмінність у параметрах між різними каналами. Для цього необхідно виділити, насамперед, залежні від довжини хвилі параметри і характеристики.

3.4 Оцінювання впливу хроматичної та полеризаційно-модової дисперсії на параметри оптичних транспортних систем

Моделювання хроматичної дисперсії використовує аналітичні методи обчислення, враховує дисперсійні характеристики оптичного волокна, залежні від довжини хвилі оптичної несучої (для більшості типів оптичних волокон), ширину смуги випромінювання лазера і довжину оптичної лінії зв'язку.

Прогнозоване значення хроматичної дисперсії D_{ch} на кабельній ділянці заданої протяжності L визначаємо за такою формулою:

$$D_{ch} = D \Delta\lambda \cdot L, \text{ с}, \quad (3.1)$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання джерела в заданому спектральному каналі;

D – коефіцієнт хроматичної дисперсії на заданій робочій довжині хвилі λ [5-7]:

$$D = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \frac{nc}{\text{нм} \cdot \text{км}} \quad (3.2)$$

де S_0 – параметр нахилу спектральної характеристики дисперсії ОВ в точці нульової дисперсії, $\frac{nc}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$;

λ_0 – довжина хвилі нульової дисперсії, нм.

Змінюючи довжину хвилі оптичної несучої, отримуємо відповідну залежність хроматичної дисперсії D_{ch} для кожного спектрального каналу системи DWDM.

Хроматична дисперсія впливає на тривалість оптичного імпульсу на вході приймача, для різних спектральних каналів ця тривалість може відрізнятися, залежно від оптичного волокна.

Хроматична дисперсія може істотно впливати на рівень нелінійних ефектів, тому обчислене значення D_{ch} і застосовують під час їх моделювання.

Оскільки ПМД і хроматична дисперсія залежать від ширини смуги випромінювання лазера, то розглянемо ті з нелінійних ефектів, які ширину цієї смуги змінюють. Другий аспект розгляду нелінійних ефектів – втрати потужності і зміна OSNR (оптичного співвідношення сигнал/шум) в кожному спектральному каналі системи DWDM.

Чотирихвильове змішування (FWM)

FWM призводить до появи нових гармонік, частина з них потрапляє в канали системи DWDM, створюючи завади, що спотворюють основний сигнал. Частоту появи паразитної гармоніки визначають так:

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k, \quad (3.3)$$

де $i \neq k, j \neq k$.

За наявності m несучих у системі діють дві схеми формування нових гармонік: вироджена ($i = j$) і невироджена ($i \neq j$). Загальну кількість згенерованих таким способом гармонік N можна оцінити за формулою

$$N = m(m-1)^2 \quad (3.4)$$

Потужність однієї гармоніки на частоті f_{ijk} обчислюють за формулою

$$P_{ijk} = n_{ijk} \left(\frac{2\pi n f_{ijk} k_n n d_{ijk} L}{3c S_e} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (3.5)$$

Тут n_{ijk} – коефіцієнт ефективності FWM, враховує вплив дисперсійних характеристик волокна і величину частотного інтервалу;

α – коефіцієнт загасання волокна;

d_{ijk} – коефіцієнт виродження FWM;

k_n – коефіцієнт нелінійності показника заломлення.

Отже, для кожного спектрального каналу системи DWDM визначається сумарна потужність паразитних гармонік, що потрапляють у його смугу. Також для кожного спектрального каналу визначається втрата потужності на генерацію паразитних гармонік.

Стимульоване розсіювання Бріллюена (SBS)

Вимушене розсіювання Бріллюена встановлює верхню межу на рівень оптичної потужності, який можна передати оптичним волокном. Вираз для граничної потужності SBS записуємо у вигляді

$$P_{SBS} \approx \frac{2lbA_{\text{еф}}}{g_B L_{\text{еф}}} \left(1 + \frac{\Delta V_{LS}}{\Delta V_{BW}} \right), \quad (3.6)$$

де b - числове значення між 1 і 2, що залежить від стану поляризації хвилі;

ΔV_{LS} – лінійна (спектральна) ширина смуги лазерного джерела;

$\Delta V_B \approx 20$ МГц (на 1550 нм) - SBS смуга взаємодії;

$g \approx 4,6 \times 10^{-11}$ м/Вт – SBS підсилювальний коефіцієнт (залежить від типу ОВ);

$L_{\text{еф}}$ – ефективна довжина ОВ, обчислюється як

$$L_{\text{еф}} \approx \frac{4,343}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{e^{0,23\alpha L}} \right) \quad (3.7)$$

Отже, якщо сумарна потужність, що вводиться в оптичне волокно, не перевищує порогової (P_{SBS}), то впливом SBS можна знехтувати.

Оскільки модель ОТС має блокову структуру, то можна вводити додаткові фактори і нелінійні ефекти в моделювання, вплив яких може зводитися до послаблення потужності в певному спектральному каналі, розширення смуги і спотворення сигналів інших каналів системи передавання.

Прогнозоване значення ПМД на елементарній кабельній ділянці заданої протяжності L [7, 8]:

$$D_{\text{PMD}} = \text{PMD} \cdot \sqrt{L}, \text{ с},, \quad (3.8)$$

де PMD – параметр ПМД волокна $\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$ (коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії).

Розв’язавши задачу моделювання ПМД, зможемо вирішити таке:

- отримати залежність ПМД від довжини хвилі оптичної несучої;
- отримати залежність ПМД від ширини смуги випромінювання лазера, зокрема, і спектральної ширини каналу загалом;
- модель повинна відображати стохастичний характер зміни ДГЗ.

Отже, моделювання ПМД є статистичним. ПМД впливає на міжсимвольну інтерференцію і залежить від коефіцієнта ПМД, довжини оптичного волокна, довжини хвилі й ширини смуги лазера. Хроматична дисперсія і нелінійні ефекти також впливають на спектральну ширину каналу, тому цей вплив також враховуватимемо в моделі.

Вплив ПМД моделюватимемо, визначаючи диференціальну групову затримку (ДГЗ), для чого використаємо модель підсистеми (поляризаційної модової дисперсії оптичного волокна), описану в попередньому розділі.

Статистичні експерименти з моделлю ПМД оптичного волокна показали, що $N=50$ сегментів є достатнім для одержання стійкого статистичного результату, з іншого боку, використання такої кількості сегментів істотно економить затрати машинного часу на моделювання.

Необхідне значення ПМД для оптичного волокна заданої довжини одержуємо нормуванням розподілу ДГЗ, одержаного статистичним моделюванням з подальшим його перемноженням на коефіцієнт, що дорівнює $\text{PMD} \cdot \sqrt{L}$.

Сумарні втрати ОВ на елементарній кабельній ділянці ЕКД $A_{\text{ЕКД}}$ складаються з власних втрат ОВ, втрат у нероз’ємних з’єднаннях (з’єднання ОВ

будівельних довжин оптичного кабелю в оптичних муфтах), втрат у роз'ємних з'єднаннях (оптичні роз'єми на кінцевих пристроях - оптичні кроси, а також оптичні приймально/передавальні модулі), а також втрат, що виникають внаслідок впливу нелінійних ефектів

$$A_{EKD} = \alpha \cdot L_{EKD} + a_n \cdot N_H + a_p \cdot N_p + A_{NE}, \text{ дБ}, \quad (3.9)$$

де α – коефіцієнт загасання ОВ на робочій довжині хвилі λ ;

L_{EKD} – задана протяжність ЕКД;

a_n – максимальне значення втрат у нероз'ємному з'єднанні на заданій робочій довжині хвилі λ [6, 8];

N_H – кількість нероз'ємних з'єднань, визначається як

$$N_H = \frac{L_{EKD}}{L_{BD}} - 1, \quad (3.10)$$

де L_{BD} – будівельна довжина оптичного кабелю, як правило, становить 2..6 км;

a_p – втрати в роз'ємних з'єднаннях;

N_p – кількість роз'ємних з'єднань на ЕКД, як правило, $N_p = 4$ (по 2 роз'єми на прийман- ні/передаванні – 1 на оптичному кросі і 1 на приймально-передавальному модулі оптичної системи передавання);

A_{NE} – сукупні втрати за рахунок розсіювання, перекачування енергії тощо, що виникають через негативний вплив нелінійних ефектів.

3.5 Оцінювання впливу міжсимвольної інтерференції

Цей фактор спотворення під час розрахунку оптичних транспортних систем враховують за допомогою розрахунку додаткових втрат (приросту рівня завад) через шуми міжсимвольної інтерференції (ISI - Inter-symbol Interference), які об'єднують перехресні завади і шуми синхронізації. Втрати через ISI визначають з такого виразу [8]:

$$a_{ISI} = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp \left[-1,28 \cdot \left(\frac{T_0}{T_L} \right) \right]} \right\}, \text{ Дб}, \quad (3.11)$$

де T_0 – час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела оптичного випромінювання від 10 % до 90 % його максимального значення, безпосередньо пов'язане із швидкістю передавання оптичного сигналу в лінії

$$T_0 = \frac{0,48}{B_L}, \text{ с}, \quad (3.12)$$

де B_L – швидкість передавання оптичного сигналу в лінії.

У роботі розглянуто застосування блокового лінійного коду оптичного сигналу MBNB, де M – кількість символів кодової послідовності, а N – кількість імпульсів, необхідна для передавання

$$B_L = \frac{N}{M} B, \text{ Мбіт/с}, \quad (3.13)$$

B – швидкість передавання інформації, що відповідає заданому рівню цифрової ієрархії. Для рівнів синхронної цифрової ієрархії (SDH) STM-1 ($B=155$ Мбіт/с) і вище приймемо 10B11В.

T_L — час наростання фронту оптичного імпульсу на виході фотоприймача оптичної системи передавання від 10 % до 90 % його максимального значення [5]:

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{BW_R} \right)^2 + \sigma_{EKD}^2}, \text{ с}, \quad (3.14)$$

BW_R — смуга пропускання фотоприймача, Гц, вибирається з умови $BW_R > B_L$;

σ_{EKD} – прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії на ЕКД:

$$\sigma_{EKD} = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2}, \text{ с}, \quad (3.15)$$

де D_{ch} і D_{PMD} – значення хроматичної і поляризаційної модової дисперсії на ЕКД відповідно, обчислені в однойменних блоках моделі.

3.6 Оцінювання показників якості каналу цифрової волоконно-оптичної системи передачі

Фундаментальним показником якості цифрових систем передавання є коефіцієнт помилок BER. Роботу цифрових систем передавання вважають нормальною тільки в тому разі, якщо BER не перевищує певне допустиме значення, який відповідає мережевому стандарту, що використовується.

Доволі поширена методика оцінювання коефіцієнта помилок BER на основі визначення Q-фактора. Q-фактор – це параметр, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передавання. Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок BER. Q-фактор визначається статистичним обробленням результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричному рівні, а саме: безпосередньо по око-діаграмі. Будують функцію розподілу станів “1” і “0”, для цих розподілів, у припущенні їх гауссової форми, оцінюють математичні очікування станів $E1$ і $E0$ і їх середньоквадратичні відхилення (σ_1 і σ_0) (рис. 3.3).

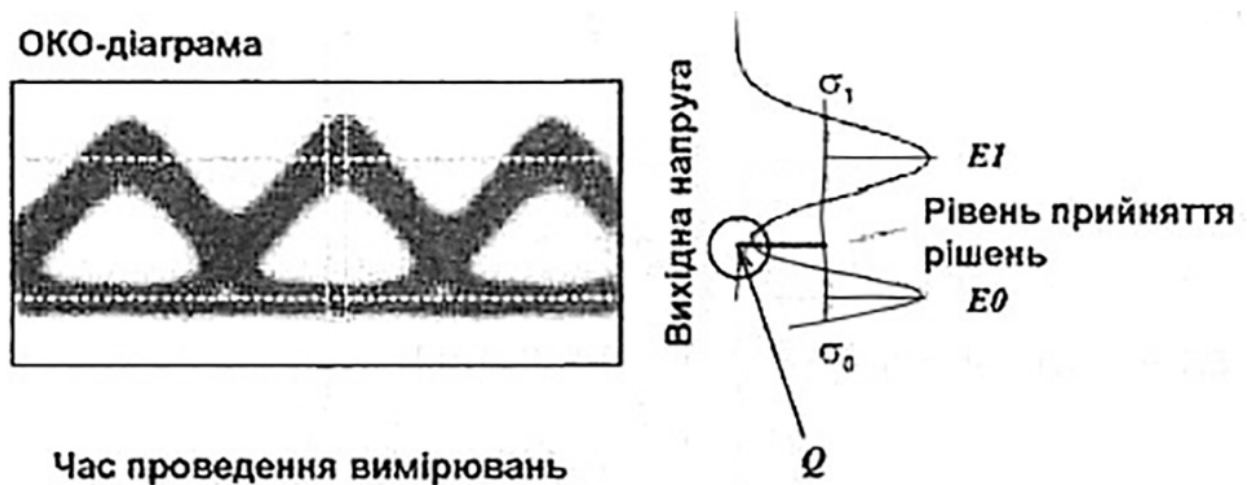


Рисунок 3.3 – До оцінювання Q-фактора

Попередньо для оцінювання параметрів розподілів станів “1” і “0” визначають точку максимального розкриву око-діаграми:

$$\tau_{open} = -\ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_L^2}\right)}} \right] \cdot \frac{s_L^2}{T}, \text{ c/} \quad (3.16)$$

Мінус у цьому виразі очевидний з міркувань гауссової форми імпульсу, симетричного щодо нуля.

Далі розраховуємо межі розкриву око-діаграми (зони прийняття рішення), відповідні мінімальній зареєстрованій потужності під час передавання логічної “1” $P_{1\min}$ і максимальної зареєстрованої потужності у разі передавання логічного “0” $P_{0\max}$:

$$P_{1\min} = P_{out}^{“1”}(\tau_{open}), \text{ мВт}; \quad (3.17)$$

$$P_{0\max} = P_{out}^{“0”}(\tau_{open}), \text{ мВт}.$$

Враховуючи припущення гауссового розподілу станів логічної “1” і логічного “0”, визначимо характеристики розподілів станів - математичне очікування $E1$ і $E0$:

$$E1 = \begin{cases} P_L, P_L > P_R \\ P_R, P_L < P_R \end{cases}, \text{ мВт} \quad (3.18)$$

$$E0 = P_{noise}, \text{ мВт}$$

і середньоквадратичне відхилення σ_1 і σ_0 , скориставшись правилом “три сигма”:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P_{1\min}}{3}, \text{ мВт} \quad (3.19)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P_{0\max}}{3}, E0 > P_{0\max} \\ \frac{E0 - P_{0\max}}{3}, E0 < P_{0\max} \end{cases}, \text{ мВт}$$

Q – фактор розраховують за такою формулою [8]:

$$Q = \frac{|E1-E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.20)$$

А коефіцієнт помилок BER визначають за такою формулою [8]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right), \quad (3.21)$$

де erfc – допоміжна функція інтегралу помилок.

Необхідно відзначити, що наближена формула розрахунку BER справедлива за значень аргументу $\operatorname{erfc}()$ більше ніж 3 [4-6].

3.7 Розробка алгоритму і програми моделювання оптичних транспортних систем

Наступним етапом моделювання оптичної транспортної системи є розроблення блок-схеми алгоритму моделювання і його програмна реалізація.

Назви змінних, що використовуються в блок-схемі алгоритму, відповідають позначенням параметрів і характеристик системи, перерахованих у табл. 3.1.

Для моделювання і дослідження оптичних транспортних систем застосуємо принцип множинності моделей, оскільки система є доволі складною з великою кількістю досліджуваних змінних, тому для дослідження кожної з цих змінних модифікуватимемо модель під певне конкретне завдання.

Загальна блок-схема алгоритму моделювання ОТС на основі технології спектрального ущільнення каналів показана на рис. 3.4. У цій моделі використовують процедури, зокрема:

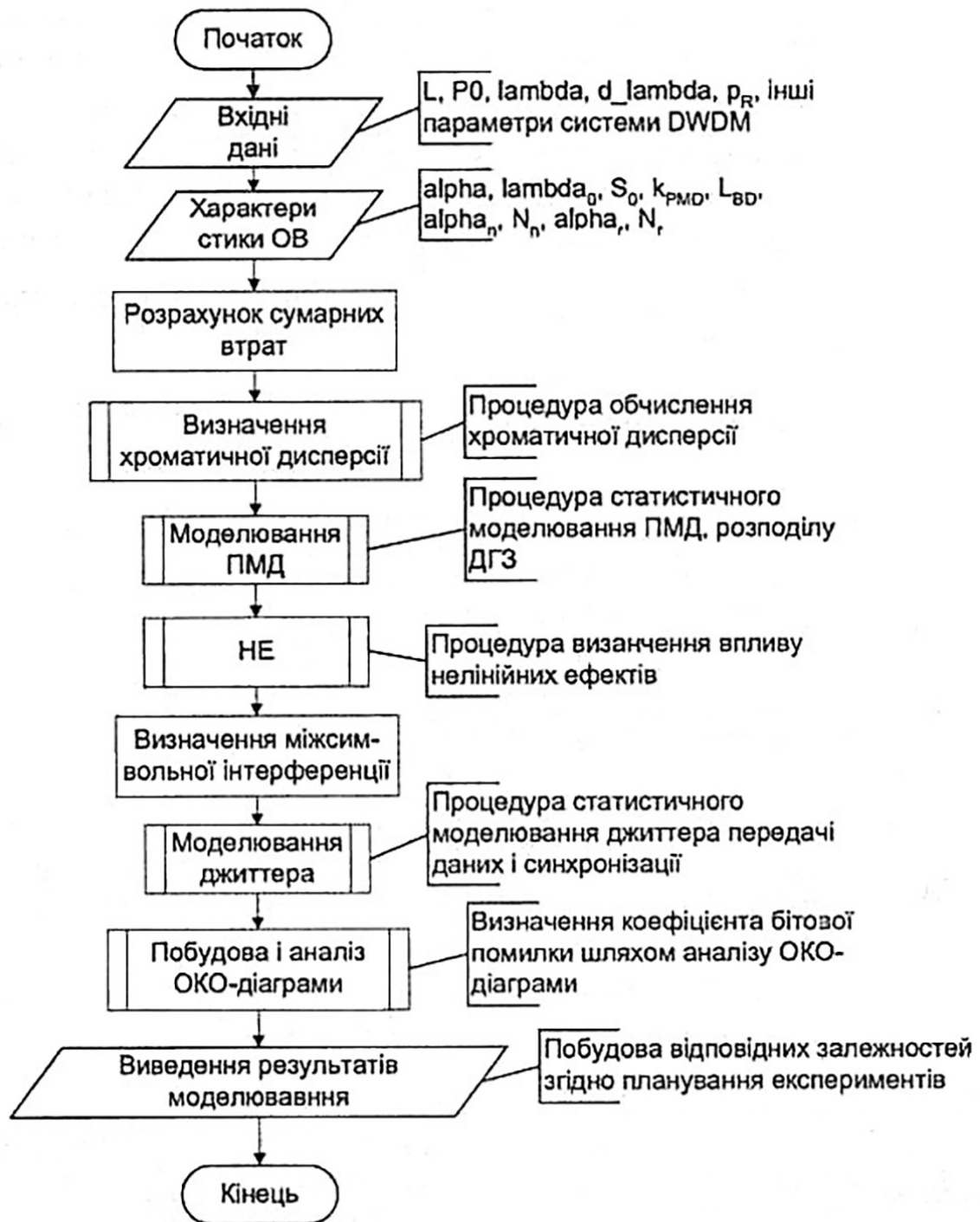


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму моделювання ОТС

- визначення хроматичної дисперсії;
- визначення поляризаційної модової дисперсії;
- визначення нелінійних ефектів;
- моделювання джиттера;
- побудова і аналіз око-діаграми.

Програмна реалізація моделі оптичної транспортної системи наведена у додатку, лістинг *DWDM_model.m*. Також у додатку наведено (лістинг програми *DWDM_one_channel.m* – для побудови і аналізу око-діаграми одного спектрального каналу. Крім вищеперерахованих файлів модель містить допоміжні функції: *zatrimka.m* (наведена у лістингу програми до попереднього розділу) – моделювання ДГЗ, *dgd_w.m* – моделювання залежності ДГЗ від довжини хвилі оптичної несучої, *FWM_calc.m* — обчислення потужності ефекту чотирехвильового змішування, *jitter_imp.m*, *jt_generator.m* – моделювання джиттера синхронізації і передавання даних, а також додаткові функції, призначення яких – оптимізація обчислень і графічна інтерпретація результатів моделювання.

Перед дослідженням характеристик ОТС за допомогою відповідної моделі її потрібно відкалібрувати.

Лістинг *DWDM_model.m*

```
% Модель системи DWDM
clear;
tic;

%% 1. Вихідні дані
%% Фактори

% Загальні характеристики
L_eku=183; % Довжина лінії зв'язку, км
%L_eku=182.7905; % Довжина лінії зв'язку, км, для випадку налагодження
моделі при номінальному значенні Q-фактора, рівному 7.07

% Характеристики системи DWDM
NA=40; %Кількість каналів системи
d=.2; % смуга між сусідніми каналами, нм

11=1550.4; % Перший канал
i=0:(NA-1);

% Характеристики кожного спектрального каналу
1=11-i*d; % довжина хвилі кожного спектрального каналу
P_c=-20; % Потужність спектрального каналу, дБ
P_c= (5e-3) *ones (NA, 1) ; % Потужність джерела в кожному каналі, Вт
%P_c (1)=10e-3;
d lambda=0.01*ones(NA, 1); %м %Ширина спектра випромінювання лазера в
```

кожному каналі, нм

p_R=-39*ones(NA, 1); %дБ %Рівень чутливості приймача в кожному каналі, ДБ
B=10e9*ones(NA, 1); %Біт/с %Швидкість передавання інформації в кожному каналі

%% Константи (незалежні)

% Загальні характеристики

c=3e8; % Швидкість світла у вакуумі, м/с

lambda=1550; % Довжина хвилі у вакуумі, нм

% Характеристики оптичного волокна

alpha=0.2; % Загасання волокна, дБ/км

a=alpha/(10*log10(2.71828182845905)); % Загасання, 1/км (в Неперах) - для нелінійних ефектів

к_PMD=0.1; % Коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії пс*нм/км

lambda_0=1550; % Довжина хвилі нульової дисперсії

S_O=.09; % Нахил дисперсійної характеристики

nn=3.2e-20; % Нелінійний індекс рефракції

A_eff=50e-12; % мкм² (10⁻¹²), Діаметр модового поля, задано виробником
 OB

% Будівельні характеристики оптичного волокна

L_sd=4; %км %Будівельна довжина ВОК

alpha_n=0.1; %дБ %Затухання в нероз'ємному з'єднанні

N_n=ceil(L_eku/L_sd-1); %шт. %Кількість нероз'ємних з'єднань

alpha_r=0.5; %дБ %втрати в роз'ємних з'єднаннях

N_r=4; %шт. %кількість роз'ємних з'єднань

% Характеристики нелінійності

gamma=2.6e-3; %2* π *nn/(lambda*Aeff); % Нелінійний коефіцієнт поширення

gB=5e-11; % typical SBS gain, m/W

gR=1e-13; % the SRS gain gR=1e-13 m/W at 1550nm

Ksrs=1; % залежить від поляризації хвилі і лежить в межах від 1 до 2

L_eff=(1-exp(-a*L_eku))/a; % Ефективна довжина оптичного волокна

% Характеристики кожного спектрального каналу

N=11; %Лінійний код **MBNB - 10B11B**

M=10;

B_L=N/M*B; %Біт/с %Швидкість в ОЛТ

BW_r=1.1*B_L; %Гц %Смуга пропускання приймача

%% Обчислення нелінійних ефектів - FWM, SBS, SRS, CPM, XPM

% Чотирихвильове змішування

P_fwm=FWM_calc (NA, 1, P_c, L_eku, a, S_0, gamma, lambda_0) ; % мВт,
Сумарна потужність ЧХЗ

p_fwm=10*log10((P_fwm/NA) /1e-3) ; % дБп

% Поріг SBS (спрошена формула)

Pth_SBS=21*A_eff/(gB*L_eff);

% Поріг SRS

Pth_SRS=16*A_eff*Ksr«/(gR*L_eff);

% фазова самомодуляція SPM

Pin=P_c(1);%(індекс масиву 1) Потужність одного каналу, що вводиться в
волокно

F_spm=gamma*Pin*L_eff; % Зсув фази

% Перехресна фазова модуляція XPM

F_xpm=gamma*L_eff*(2*sum (P_c)-P_c (1,1)); % Зсув фази

%% 4. Розрахунок сумарного загасання ОБ на ЕКД

A_eku=alpha*L_eku+alpha_n*N_n+alpha_r*N_r; %дБ, Однакове для всіх
спектральних каналів

%% 5. Розрахунок дисперсії ОБ на ЕКД

%Матриця хроматичної дисперсії для спектральних каналів

D__ch=[] ;

for ne= 1:NA

D=S_0/4*(1(ne)-(lambda_0^4/l(ne) ^3)) ; %пс/(нм*км) %коефіцієнт
хроматичної дисперсії

D_ch=[D_ch; D*d_lambda(ne)*L_eku]; %с %Хроматична дисперсія, с
end

D_ch=D_ch*1e-12; % Хроматична дисперсія в секундах

%Матриця ПМД для спектральних каналів

dgd=dgd_w(NA, 1(NA), 1(1), d); % Виклик функції генерації ДГЗ для всіх
спектральних каналів

D_pmd=(k_PMD*L_eku^0.5)*dgd; % Поляризаційно-модова дисперсія, с;
приведена до довжини ОБ (нормована)

%Матриця повної дисперсії для кожного каналу

sigma_eku=[];

for ne=1:NA

```

    sigma_eku= [sigma_eku; (D__ch (ne) ^2+D_pmd (ne) ^2) ^0.5]; %с
%Прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії
end

%Матриця значень міжсимвольної інтерференції кожного каналу
a_isi=[ ];
for ne=1:NA
    T_0=0.48/B_L(ne); %с%Швидкість наростання фронту імпульсу на виході
лазера
    T_L(ne)=(T_0^2+(0.35/BW_r(ne)) ^2+sigma_eku(ne) ^2) ^0.5; %с %
Швидкість наростання фронту імпульсу на вході приймача

    a_isi=[a_isi; 10*log10(1/(1-1.425*exp(-1.28*(T_0/T_L(ne))))); %дБ
%Втрати міжсимвольної інтерференції

    end

%% 6. Розрахунок ОКО-діаграми
Q=[ ]; % Накопичення значень Q-фактора
BER=[ ]; % Накопичення значень BER по спектральних каналах

for nk=1:NA %Цикл по спектральних каналах

    p_0=10*log10(P_c(nk)/1e-3); %дБ %Рівень потужності на виході
передавача

    P_L=p_O-A_eku-a__isi (nk) ; %дБ %на виході фотоприймача, без впливу ЧХЗ
    P_L=10^ (0.1*p__L) -P__fwm/NA; %мВт %Потужність в мВт, враховуючи
втрату енергії на ЧХЗ

    p_noise=-44.25905; % Для заданого приймача вибираємо сталий коеф. шуму,
(підбираємо при настроюванні моделі)
% хоча в кінцевому результаті цей шум повинен визначатися, виходячи з
характеристик системи
% тут не враховуємо шуми, спричинені ЧХЗ

    P_R=10^ (0.1*p_R(nk)); %мВт %Чутливість фотоприймача

%Крім шумів фотоприймача в системі існують ще й інші види шумів, які ми
%будемо враховувати при обчисленні сумарної потужності шуму, що
виводиться
%на ОКО-діаграмі
    P_noise=10^ (0.1*p_noise); %мВт %Потужність шуму оптичного приймача
    P_noise=P_noise+P_fwm/NA; %Потужність шуму внаслідок ЧХЗ (поки
однакова для кожного спектрального каналу)

```

%Потужність шуму підсилювачів **EDFA**

%Сумарна потужність шуму

Tau_05=1/B_L(nk); %с %Тривалість імпульса на рівні **0.5**

N_symb=1; %символів %кількість символів бітової послідовності

T=N_symb*tau_05; %с %Інтервал передачі бітової послідовності

S_L=T_L(ne)/2.563; %с %середньоквадратична тривалість гаузового імпульса на виході фотоприймача

t_step=T/100; %Змінна часу - формування масиву

t=-2*T:t_step:T*2;

P0_out=P_L*(1-1/2*erf((t+T)/(s_L*2^0.5))+1/2*erf(t/(s_L*2^0.5)));

%Ізольований логічний нуль - "101"

P1_out=P_L*(1/2*erf((t+T)/(s_L*2^0.5))-1/2*erf(t/(s_L*2^0.5))); %Ізольована логічна одиниця - "010"

% % 7. Розрахунок показників якості каналу ВОСПІ **tau_open=-**

I*log((exp(T^2/s_L^2))^0.5)*(s_L^2/T); %Точка максимального розкриття ОКО-діаграми (для правильного визначення потрібно домножити на "-1")

t=tau_open;

P1_min=P_L*(1/2*erf((t+T)/(s_L*2^0.5))-1/2*erf(t/(s_L*2^0.5))); %мВт
%Мінімальна зареєстрована потужність "1"

P0_max=P_L*(1-1/2*erf((t+T)/(s_L*2^0.5))+1/2*erf(t/(s_L*2^0.5)));
%мВт %Максимальна зареєстрована потужність "0"

%Математичне очікування $E1$ і $E0$, мВт

if (P_L>=P_R) E1=P_L;

else E1=P_R;

end

E0=P_noise;

%і середньоквадратичне відхилення, мВт

sigma_1= (E1-P1_min) /3;

if(E0<=P0_max) sigma_0=(E0+P0_max)/3;

else sigma_0=(E0-P0_max)/3;

end

%Визначення Q-фактора

Q(nk)=abs(E1-E0)/(sigma_1+sigma_0); %формула 7.7

tmp=P_L/P_noise; %тестовий варіант обчислення Q-фактора

Q1= (2*tmp* (1.3*B_L (nk)) ^-0.5) / (1+ (1+4*tmp) ^-0.5) ;


```

%Формула справедлива тільки при виконанні даної умови
if (Q(nk)/(2^.5) > 3)
BER(nk)=1/2*erfc(Q(nk)/2^0.5);
BER1(nk)=1/(Q(nk)*(2*pi) ^0.5)*exp(-Q(nk) ^2/2);
else
BER(nk)=1; BER1(nk)=1;
end

%% Візуалізація ОКО-діаграми для заданого спектрального каналу
%Має бути багатократне накладання бітових послідовностей
%з впливом (псевдо-) випадкового фактора

% Побудуємо ОКО-діаграму для заданого каналу

if (nk == 1) % 1 - це номер спектрального каналу, для якого виводимо око-
діаграму
% (можемо задати будь-який канал), 0 - не виводимо графік

t_step=T/100; %Змінна часу - формування масиву
t=-2*T:t_step:T*2;

sss=size(t);
PS_visual=P_R*ones(1,sss(1,2)); %Графік рівня сигналу
PN_visual=P_noise*ones(1,sss(1,2)); %і рівня шуму

ff=figure;
hold on;

plot(t, P0_out, 'b'); %101
plot(t, Pl_out, 'b'); %010

plot(t, PS_visual, 'g');

plot(t, PN_visual, 'r');

xlabel (' t _v_i_d_n_o_s_n_e, ps ');
ylabel('P _o_u_t (t) , mVt');
title([' L _E_K_D = ', num2str(L_eku), ' a _I_S_I = ', num2str(a_isi(nk)) ,. . .
' Q = ', num2str(Q(nk)), ' BER = ', num2str(BER(nk))]);
legendl = legend({'P _o_u_t ^1^0^1','P _o_u_t ^0^1^0','P _R','P _n_o_i_s_e
'Location', 'East','EdgeColor',[1 1 1]});
end

end %Кінець циклу по каналах (nk)

```

```

br=figure;
plot(BER);
hold on;
plot(BER, '*b');
%plot(BER1, ' r') ;

xlabel('Номер каналу');
ylabel('Коеф. бітової помилки - BER');
title([' L _E_K_D, km = ', num2str(L_eku) , ' \Delta \lambda , nm = ', num2str
(d_lambda (nk)) ] ) ;

%close(br);

%% Виведення значень основних характеристик

%% Очистка проміжних робочих змінних
% Залишаємо тільки реакції системи, які нас цікавлять

clear t D_ijk c d i j k 11 l_0 lambda; % Витерти зайві змінні, для кращого
читання результатів моделювання
clear legendl p_0 s sss strl . . .
E0 E1 Ksrs hist ...
L_sd M N N_n N_r N_symb temp . . .
P0_max P0__out P1__min tv ...
P1__out PN_visual PS_visual xar . . .
P_L P_R P_dB Pin . . .
T T_0 T_L a alpha_n alpha_r . . .
d_b etha f ff gB gR gamma . . .
sigma_0 sigma_l s_L t_step tau_05 . . .
tau_open B BW_r BER1 D lambda_var alpha k_PMD tmp;

%% Закінчення моделювання
toe;

```

3.8 Моделювання оптичних транспортних систем

Проведемо розрахунок параметрів оптичної транспортної системи за допомогою розробленої аналітико-статистичної моделі. Результати розрахунків записано в табл. 3.2 – 3.4 та показано на рисунку.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані

№ з/п	Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1	Довжина	L	км	170,394
2	Потужність джерела оптичного випромінювання	P_0	Вт	0,005
3	Довжина хвилі випромінювання джерела	λ	нм	1550,4
4	Ширина смуги випромінювання джерела	$\Delta\lambda$	нм	0,01
5	Рівень чутливості оптичного приймача	P_R	ДБ	-39
6	Тип оптичного волокна	Corning SMF-28		

Таблиця 3.3 – Параметри оптичного волокна

№ з/п	Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
1	Загасання на 1310 нм	дБ/км	0,34
2	Загасання на 1550 нм	дБ/км	0,2
3	Довжина хвилі нульової дисперсії	нм	1302-1321
4	Параметр нахилу спектральної характеристики дисперсії ОВ у точці нульової дисперсії	$ps/(nm^2 \cdot km)$	0,09
5	Коефіцієнт ПМД	$ps \cdot km$	од

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку параметрів і характеристик системи

№ з/п	Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1	Швидкість передавання інформації	B	Гбіт/с	10
2	Швидкість оптичного сигналу	B_L	Гбіт/с	1,1
3	Тривалість імпульсу на рівні 0.5	τ_{05}	с	9,0909e-011
4	Хроматична дисперсія	D_{ch}	с	6,1318e-014
5	Поляризаційно-модова дисперсія	D_{PMD}	с	1,3054e-012
6	Прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії	σ_{EKD}	с	1,3093e-012
7	Міжсимвольна інтерференція	a_{ISI}	дБ	5,1012

Приклад побудови ОКО-діаграми показано на рис. 3.5.

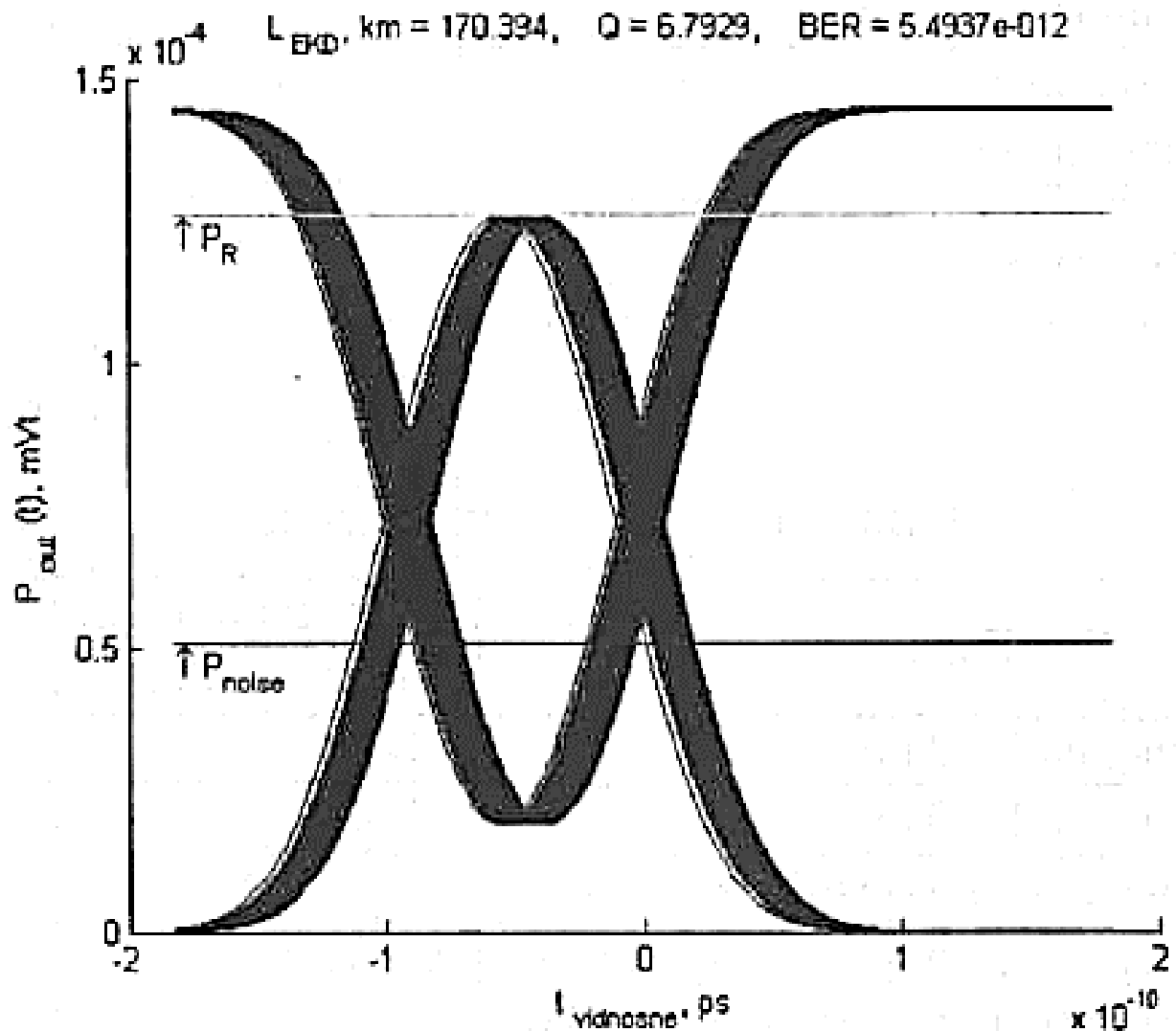


Рисунок 3.5 – Око-діаграма волоконно-оптичної системи передавання

За допомогою побудови і аналізу ОКО-діаграми для кожного спектрального каналу ОТС одержуємо залежність BER від номера каналу (довжини хвилі оптичної несучої) за постійного (номінального) значення ПМД. Як видно з рисунка, залежність BER має зростаючий експоненційний характер до більшого номера каналу (з меншою довжиною хвилі, рис. 3.6)

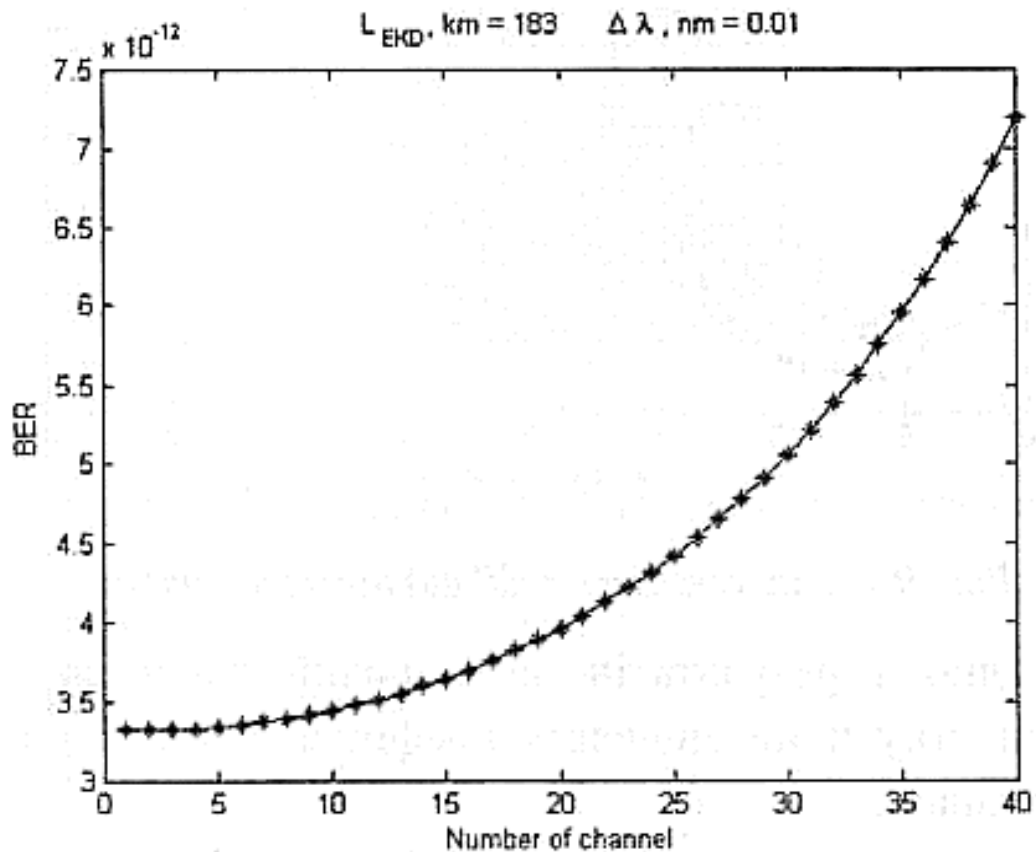


Рисунок 3.6 – Залежність BER від довжини хвилі

Це пояснюється залежністю хроматичної дисперсії від довжини хвилі для заданого оптичного волокна.

Дослідження моделі ОТС з випадковою зміною ПМД

Значення ПМД для спектральних каналів змінюється випадково, підпорядковуючись закону розподілу Максвелла.

Вводячи в дослідження випадкову зміну ПМД, одержуємо вже зовсім інший характер залежності коефіцієнта бітової помилки від номера каналу, що показано на рис. 3.7.

Отже, на значення коефіцієнта бітової помилки впливають втрати міжсимвольної інтерференції, які, своєю чергою, залежать від усіх видів дисперсії. Оскільки хроматична дисперсія має детермінований вплив, залежно від довжини хвилі, то стохастичну складову вносить поляризаційно-модова дисперсія з її випадковим характером впливу. Втрати міжсимвольної інтерференції впливають на рівень сигналу на вході приймача, що своєю

чергою змінює значення Q-фактора. BER прямопропорційно залежить від значення Q-фактора.

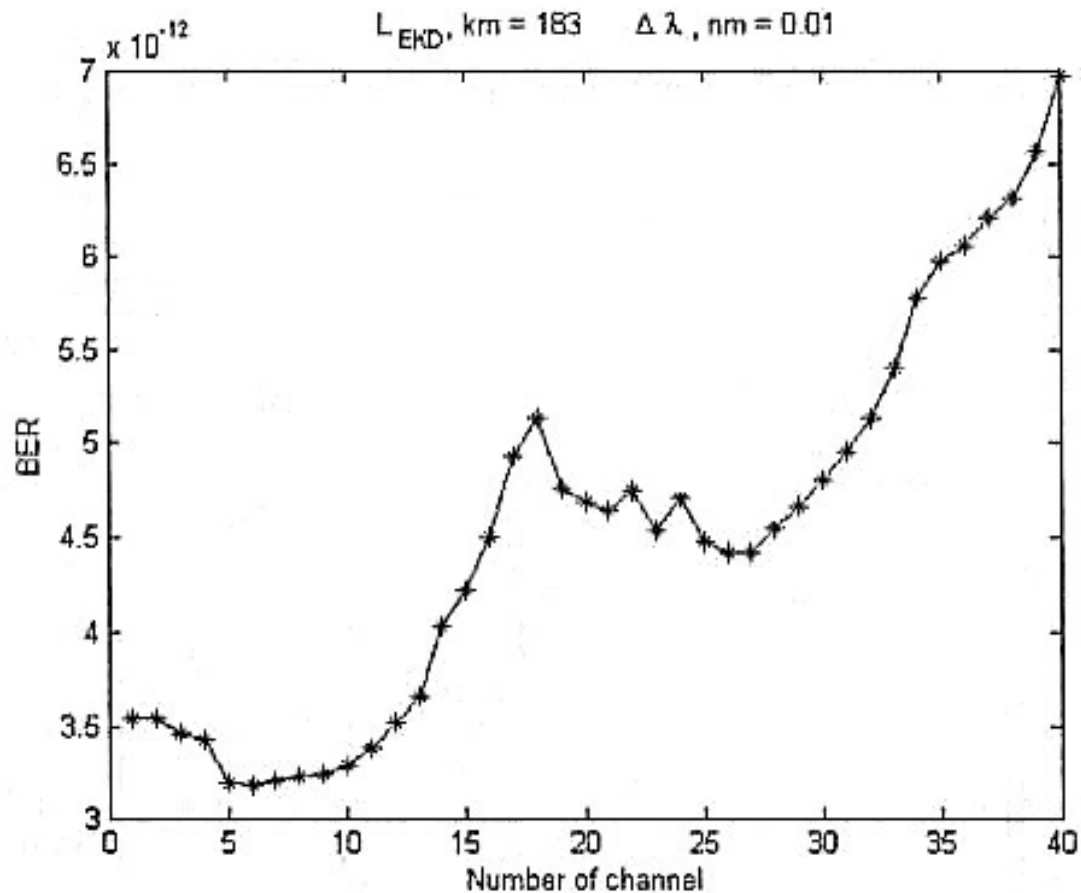


Рисунок 3.7 – Залежність BER від номера каналу

Як очевидно з результатів, випадковий характер зміни ПМД може істотно вплинути на значення коефіцієнта помилки в певному спектральному каналі.

Дослідження залежності коефіцієнта бітової помилки від джиттера

Ґрунтуючись на експериментальних дослідженнях випадкового джиттера, в розробленій моделі розподіл джиттера описується законом Гаусса. Параметри цього розподілу є такими: математичне очікування джиттера дорівнює 0, тобто джиттер симетричний щодо нуля. Оскільки джиттер складається з детермінованої і випадкової складових, кожна з яких має нормальний розподіл, то результуючий розподіл є їх поєднанням. Гістограма розподілу джиттера має вигляд, показаний на рис. 3.8.

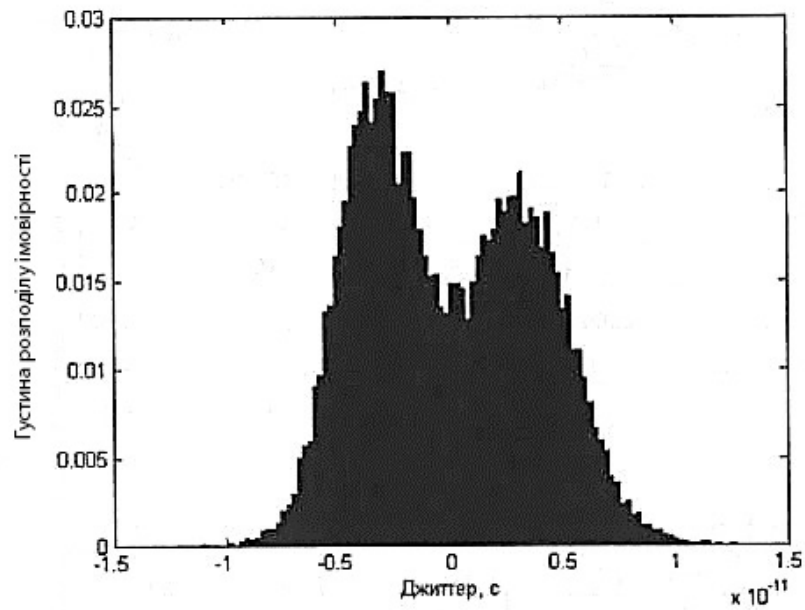


Рисунок 3.8 – Густина розподілу імовірності джиттера

У цьому пункті дослідимо залежність коефіцієнта бітової помилки від джиттера передавання даних і синхронізації, розподіл якого показано на рис. 3.7. Тривалість бітового інтервалу становить $9 \cdot 10^{-11}$ с, а максимальна величина джиттера змінюється в діапазоні $[0; 0,8]$ тривалості бітового інтервалу.

Залежність Q-фактора від величини джиттера показано на рис. 3.9.

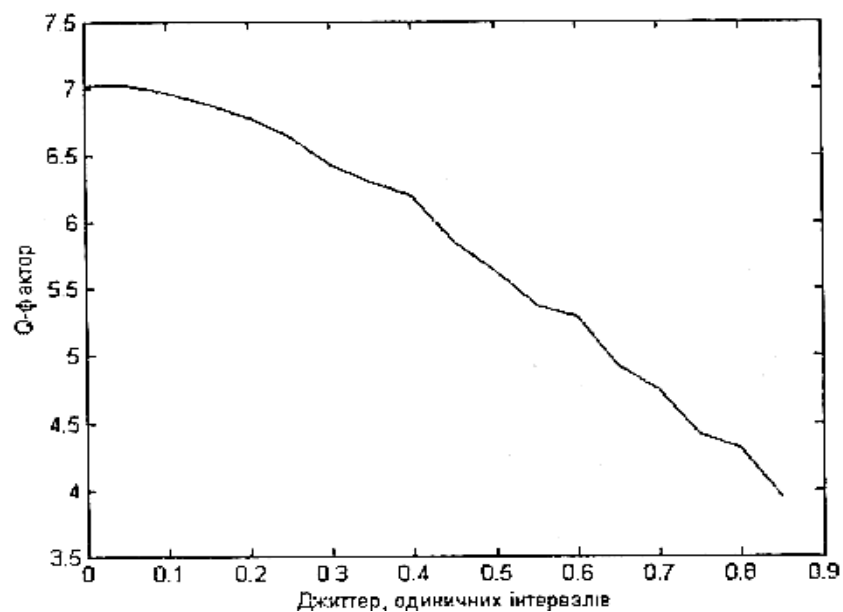


Рисунок 3.9 – Залежність Q-фактора від джиттера

Як очевидно з результатів моделювання, із збільшенням джиттера Q-фактор також плавно спадає, що призводить до підвищення коефіцієнта бітової помилки. Зменшити вплив джиттера можна введенням додаткового запасу з потужності. Залежність Q-фактора від вхідної потужності для заданого значення джиттера показано на рис. 3.10.

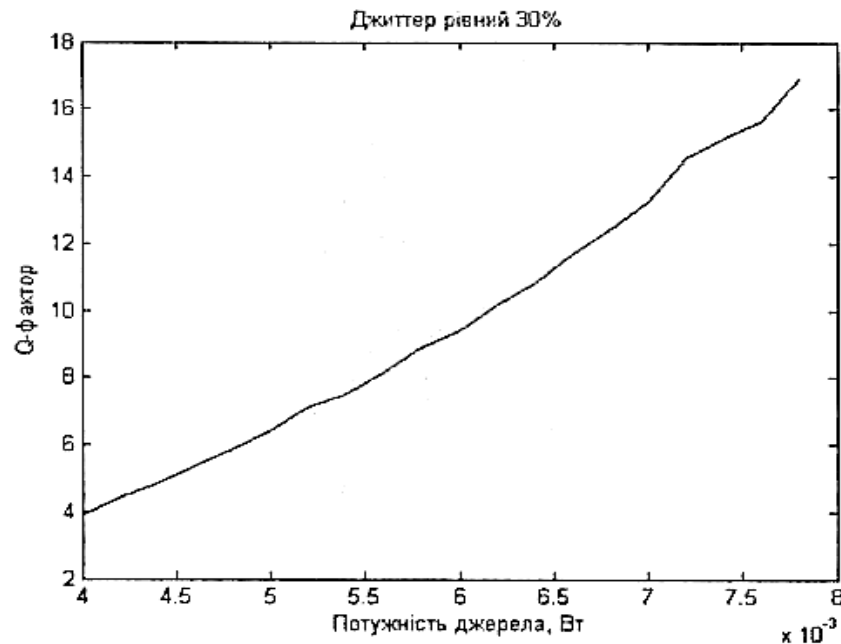


Рисунок 3.10 – Залежність Q-фактора від вхідної потужності за постійного значення джиттера

Як бачимо з рисунка, Q-фактор є прямо пропорційним потужності джерела випромінювання. Отже, зменшити вплив джиттера можна введенням додаткового запасу з потужності.

Перевірка адекватності моделі – один з найважливіших етапів моделювання систем. Дослідження на неадекватній моделі взагалі втрачають сенс. З іншого боку, модель не може бути на всі 100 відсотків адекватною реальній системі, тому можна говорити про адекватність певних характеристик, що цікавлять дослідника.

Модель оптичної транспортної системи є доволі складною, тому оцінювати адекватність потрібно за такою схемою:

- характеристики системи, що описуються відомими аналітичними виразами, не потребують перевірки;

- характеристики і параметри, що є випадковими величинами, перевіряють порівнянням з результатами експериментальних досліджень та з відомими аналітичними функціями розподілу;
- проведення комплексного моделювання параметрів якості обслуговування системи і порівняння цих результатів з результатами вимірювань на реальній оптичній транспортній системі зі спектральним ущільненням каналів.

Оскільки до складу моделі входять випадкові величини, то результати моделювання і вимірювання можуть належати одному закону розподілу тільки з певною мірою довірчої імовірності на певному рівні значущості. Подальше порівняння двох розподілів випадкових величин здійснюється за відомими критеріями узгодженості (Пірсона, Колмогорова, Смірнова, Фішера тощо).

3.9 Висновки до розділу

Розроблено алгоритм і програму моделювання оптичної транспортної мережі, яка дає можливість хроматичну та полеризаційно-модову дисперсії. Проведено розрахунки швидкості наростання фронту імпульсу на вході джерела світла. Побудовано око-діаграми для заданого каналу.

Показано, що згасання сигналу на довжині хвилі 1310 нм становить 0,34 дБ/км, а збільшення довжини хвилі приводить до зменшення згасань (до 0,2 дБ/км).

Результати моделювання показали, що прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії становить $1,309 \cdot 10^{-12}$.

Показано, що на значення бітової помилки впливають втрати міжсимвольної інтерференції, які в свою чергу залежать від всіх видів дисперсії. Досліджено залежність Q-фактора від джитера, із збільшенням якого фактор зменшується.

Показано, що зменшити вплив джитера можна шляхом введення додаткового запасу потужності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

На працівника під час розробки алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [9]:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискість;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Велике значення має характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектувальника за ПК були дотримані наступні основні умови [10]:

- оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;

- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Площа приміщення на одне робоче місце користувача повинна становити 6 м^2 , а об'єм не менше ніж 20 м^3 .

Головними елементами робочого місця проектувальника за ПК є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидючи. Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташовано в зоні легкої досяжності робочого простору.

Максимальна зона досяжності рук – це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх у плечовому суглобі.

Оптимальна зона – частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччя при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При роботі в положенні сидючи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;
- ширина не менше 500 мм;

- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90^0 (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося розробка алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки [11].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В , передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.
- Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізольованих струмопровідних частин.
- Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Основним нормативним документом, що регламентує параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [12]. Цей документ встановлює оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, допустиму температуру внутрішніх поверхонь приміщення (стіни, стеля, підлога) і зовнішніх поверхонь технологічного обладнання, а також допустиму інтенсивність теплового випромінювання нагрітих поверхонь у приміщенні та відкритих джерел тепла (нагрітий метал, скло, відкритий вогонь тощо) для робочої зони — визначеного простору, в якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників

Робота з розробки алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи за енерговитратами відноситься до категорії І а (енерговитрати до 139Дж/с) [13]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється розробка алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

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

4.2.3 Виробниче освітлення

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Багато невгасних випадків на виробництві стається через погане освітлення. Втрати від цього становлять досить значні суми, а, головне, людина може загинути або стати інвалідом. Раціональне освітлення повинно відповідати таким умовам: бути достатнім (відповідним нормі); рівномірним; не утворювати тіней на робочій поверхні; не

засліплювати працюючого; напрямок світлового потоку повинен відповідати зручному виконанню роботи. Це сприяє підтримці високого рівня працездатності, зберігає здоров'я людини та зменшує травматизм.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [6]) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.3:

Таблиця 4.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	B0,15 - до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

4.2.4 Виробничий шум

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину. Фізична сутність звуку – це механічні коливання пружного середовища (повітря, рідини). Під час звукових коливань утворюються області зниженого і підвищеного тиску, що діють на слуховий аналізатор (мембрану вуха).

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [7]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

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

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки на підприємстві покладається на його керівника (власника). В свою чергу, наказом по підприємству він визначає обов'язки інженерно-технічного персоналу та працівників щодо забезпечення пожежної безпеки на ділянках підприємства. Керівник також призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень та експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту. Якщо на підприємстві не призначено спеціально уповноваженої особи відповідальної за загальну пожежну безпеку підприємства, то організаційну роботу з підготовки зазначених документів здійснює, як правило, спеціаліст з охорони праці.

Обов'язки щодо забезпечення пожежної безпеки, утримання та експлуатації засобів протипожежного захисту мають бути відображені у відповідних посадових документах (функціональних обов'язках, інструкціях, положеннях тощо).

В приміщенні, де здійснювалася робота використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень [8].

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії [8]. Робоча зона розробника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де відбувається проектування резонансної хвилевідно-щільної антени з синфазним збудженням щілин такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників,

пересихання електроізоляційних матеріалів);

- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкнутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежегасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

Інструкції та інші внутрішні документи підприємства з пожежної безпеки слід розробляються на основі діючих правил та інших державних нормативних актів з пожежної безпеки, виходячи зі специфіки пожежної небезпеки будівель, споруд, технологічних процесів, технологічного та виробничого обладнання.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

Досліджено особливості передачі оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах зв'язку. Виявлено, що у оптичних волокнах можуть поширюватись лише хвилі, довжина яких менша за діаметр серцевини. Встановлено, що зі збільшенням діаметра серцевини зростає критична довжина хвилі та зменшується критична частота.

Оптичні волокна характеризуються частотою відсічення, вище якої вони ведуть себе як фільтри для верхніх частот.

Встановлено, що властивості втрат при передачі оптичних сигналів зумовлені трьома основними факторами: розсіювання енергії в навколишній простір, заміною матеріалу волокна та поглинанням енергії сторонніми домішками.

Також розглянуто причини виникнення дисперсії в оптичних волокнах і встановлено, що збільшення довжини оптичного волокна призводить до зниження ширини пропускання та, відповідно, до зменшення пропускну здатності.

Було проведено аналіз методів модуляції оптичних сигналів, підтверджено, що оптимальним є метод, який передбачає виведення лазера у режим передпорогового зміщення, а потім переведення його в надпороговий режим роботи за умови надходження імпульсів модулюючих сигналів. Також був проведений аналіз методів стабілізації вихідної потужності та керування лазерним випромінюванням, де розглядалися переваги та недоліки параметричного способу стабілізації вихідної потужності оптичного передавача. Також були розглянуті методи побудови оптичних приймачів, зокрема переваги та недоліки структурних схем приймачів на основі р-і-р лавинних фотодіодів.

Розроблений алгоритм та програма для моделювання оптичної транспортної мережі дозволяють враховувати хроматичну та поліризаційно-модову дисперсії. Проведені розрахунки швидкості наростання фронту

імпульсу на вході джерела світла та побудовані око-діаграми для заданого каналу.

Досліджено, що при довжині хвилі 1310 нм згасання сигналу складає 0,34 дБ/км, а збільшення довжини хвилі призводить до зменшення цього показника до 0,2 дБ/км. Результати моделювання показали, що прогнозоване середньоквадратичне значення дисперсії становить $1,309 \text{ e}^{-12}$.

Також виявлено, що втрати міжсимвольної інтерференції, що залежать від різних видів дисперсії, впливають на значення бітової помилки. Була досліджена залежність Q-фактора від джитера, внаслідок чого збільшення джитера призводить до зменшення цього фактора.

Для зменшення впливу джитера можна ввести додатковий запас потужності.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко М. Ю. Телекомунікаційні системи: монографія / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук ; НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, Науково-дослід. ін-т телекомунікацій. – Київ : Наукова думка, 2017. – 735 с.
2. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О., Яковенко Л.В. Мережі передавання даних: напрямні системи оптичного зв'язку. - Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 128 с.
3. Чернихівський Є.М., Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 272 с.
4. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. Г.М. Розорінов, Д.О. Соловійов - К.: Кафедра, 2019. – 410 ст.
5. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.
6. О.В. Онищук і К. О. Коваль, «Аналіз загасання у волоконно-оптичній лінії зв'язку», Опт-ел. інф-енерг. техн., вип. 28, 2014. - 129–133 с.
7. Климаш М.М., Лаврів О.А., Бак Р.І., Оптичні та радіоканали телекомунікацій. Навчальний посібник. Освіта України, 2010. – 288с.
8. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, ТЗІ О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. – Хмельницький : Видавництво НАДГІСУ, 2016. – 424 с.
9. Каток В. Б., Руденко І. Е., Однорог П. М. Волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посібник для інж.-техн. прац. і студ. - Київ, 2016. 445 с.
10. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИИУЦ», 2016. 21 с
11. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npraop_0_00-7_15-18_01_ua.php.

12. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

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

14. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

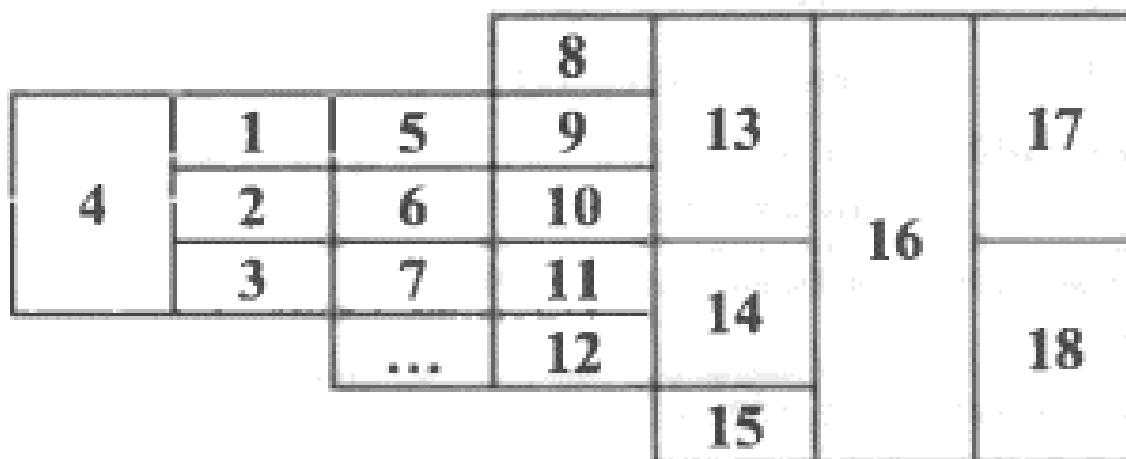
15. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

16. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

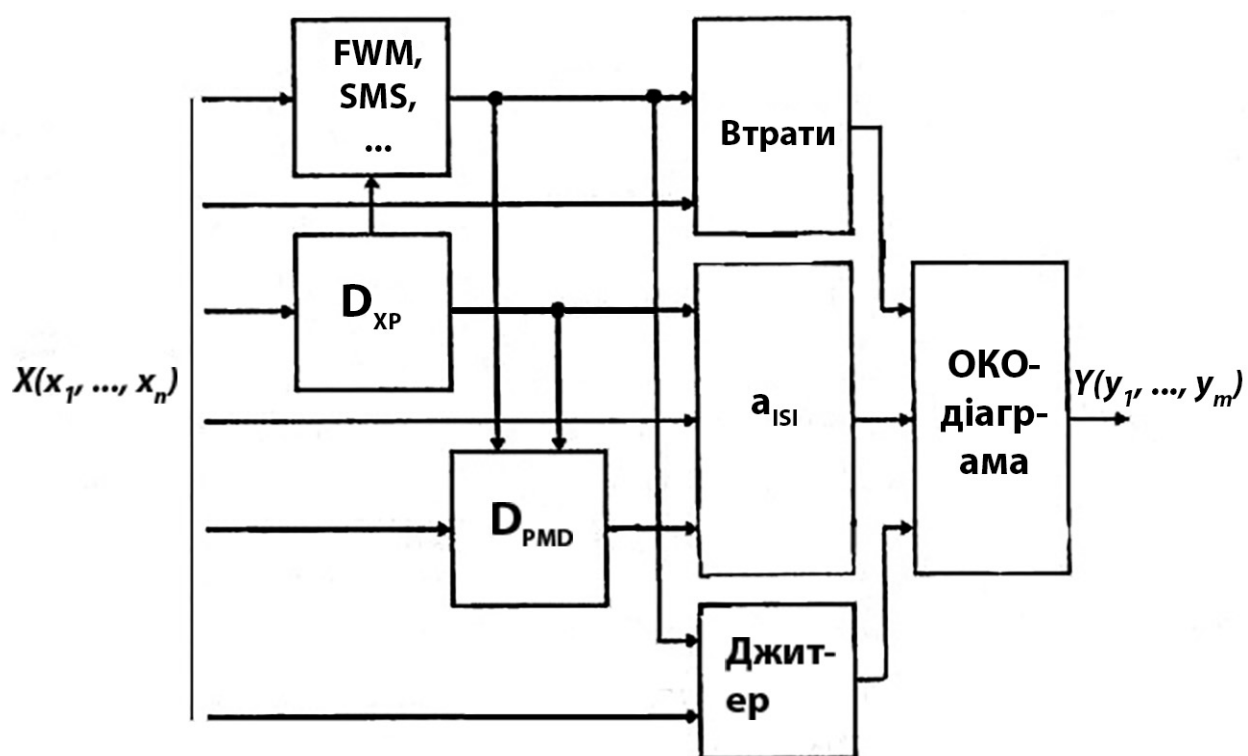
17. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

Додаток А
(обов'язковий)

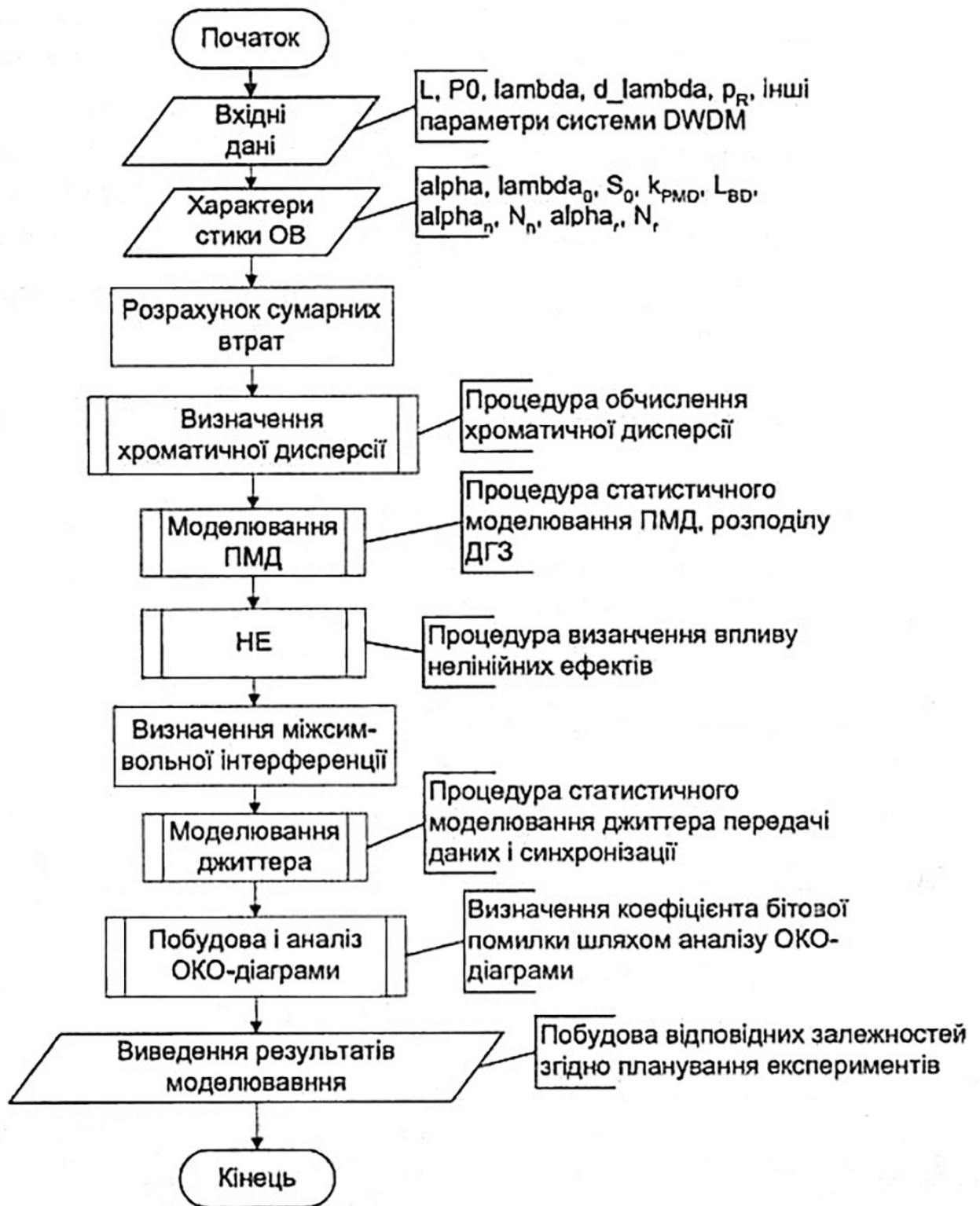
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ
ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ
назва бакалаврської дипломної роботи



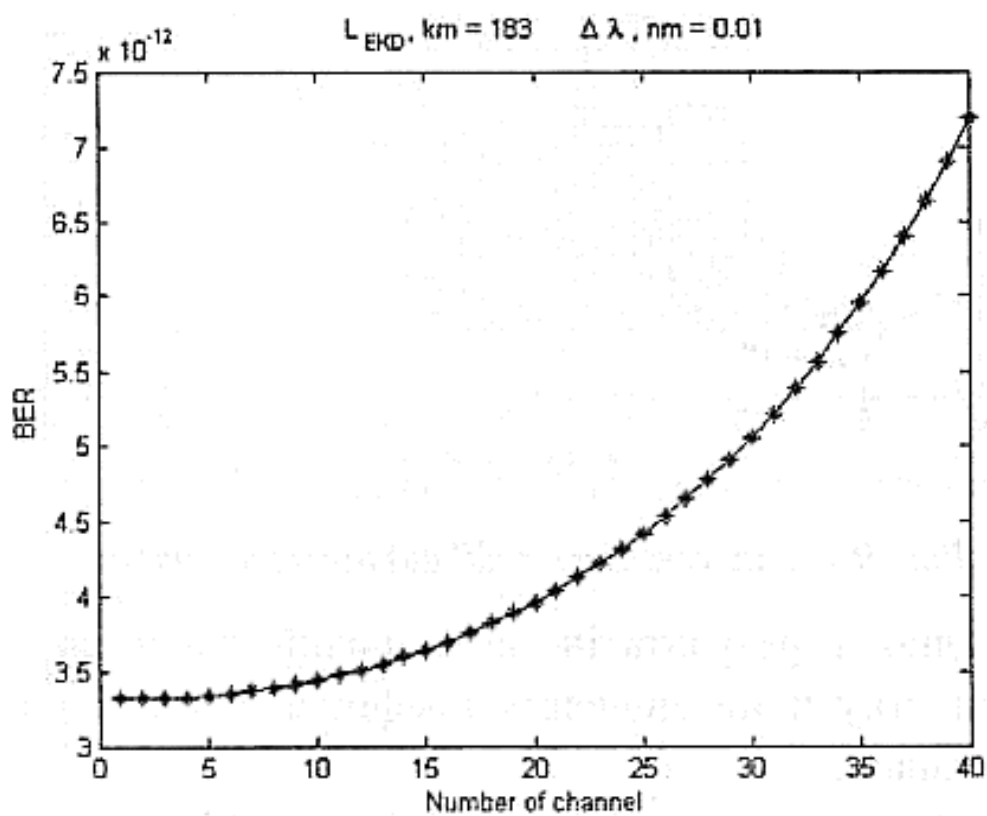
Концептуальна (змістовна) модель оптичної транспортної системи



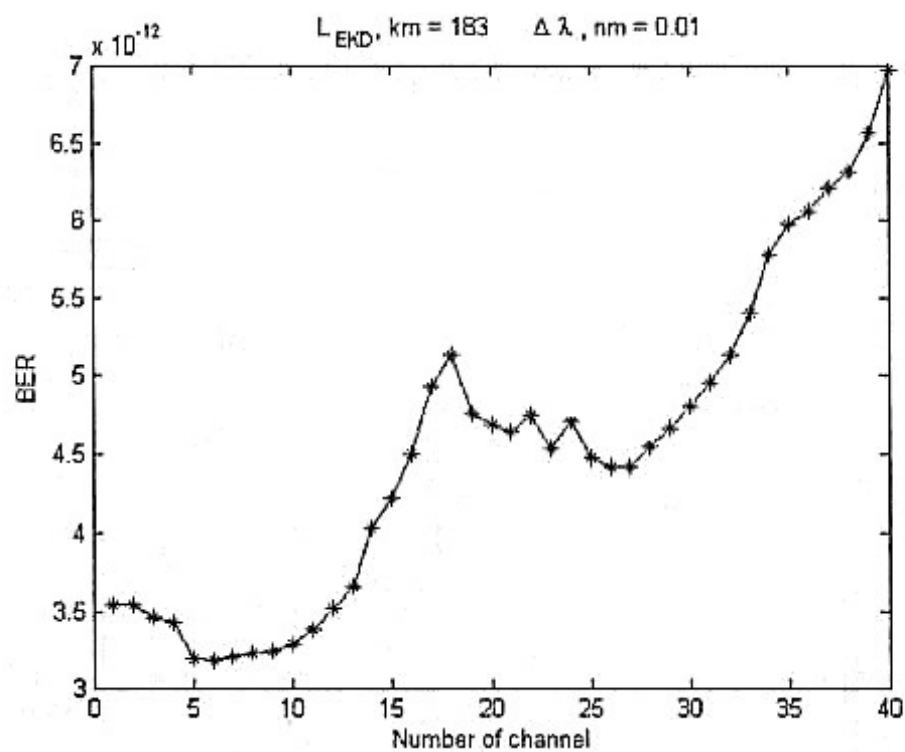
Блокова модель оптичної системи передавання



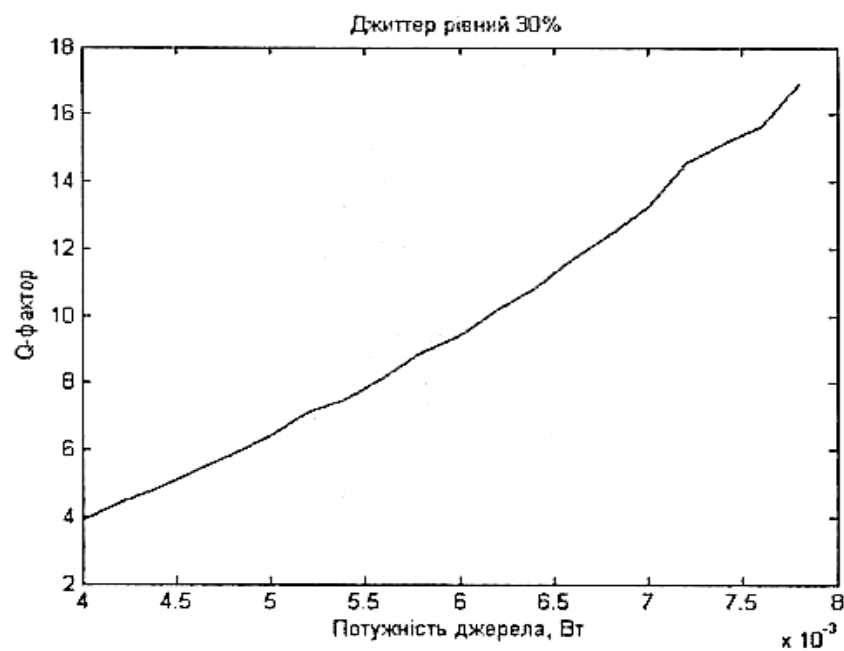
Блок-схема алгоритму моделювання ОТС



Залежність BER від довжини хвилі



Залежність BER від номера каналу



Залежність Q-фактора від вхідної потужності за постійного значення джиттера

Додаток Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Розробка алгоритму та програми моделювання оптичної транспортної системи

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

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

Показники звіту подібності Unichesk

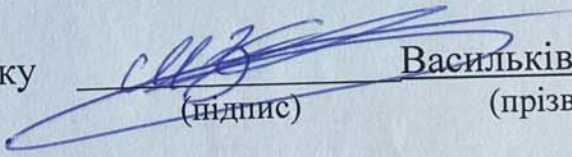
Оригінальність 82,2 % Схожість 17,8 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

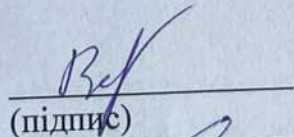
☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

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

Особа відповідальна за перевірку  Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

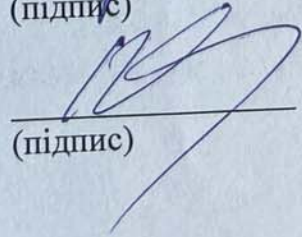
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Война В.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Кичак В.М.
(прізвище, ініціали)