

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет  
Кафедра комп'ютерної інженерії



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему *Дослідження методів підвищення швидкодії*  
(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)  
*оптичних телекомунікаційних мереж*

Здобувача *Рибалова Б.О.*  
(прізвище, ініціали)

2 курсу 777 групи

Керівники: *доцент Сахарова С.В.*  
(посада, прізвище та ініціали)

*ст. викл. Журнова Т.М.*  
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: *проф. Басюркіна Н.Й.*  
(посада, прізвище та ініціали)

*доцент Шестопалов С.В.*  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 30.11 2023 р., протокол № 3

Завідувач кафедри комп. інженерії \_\_\_\_\_ Сергій АРТЕМЕНКО  
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса - 2023 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерної інженерії, програмування та кіберзахисту  
Кафедра комп'ютерної інженерії  
Ступінь вищої освіти магістр  
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри комп'ютерної інженерії  
Сергій АРТЕМЕНКО  
« 7 » грудня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

*Рибалова Бориса Олександровича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж

Затверджена наказом університету від « 30 » листопада 2022 р., наказ № 884-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 28 листопада 2023 р.

3. Вихідні дані роботи

1. Оптичні технології. 2. Характеристики повністю оптичних телекомунікаційних мереж.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз доцільності підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж.

2. Модель та методи підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж.

3. Моделювання оптичного комутаційного елемента для підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж. 4. Техніко-економічна частина. 5. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд 1. Мета, завдання роботи. Слайд 2. Структура дослідження. Слайд 3. Методи підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж (ОТМ). Слайд 4. Модель повністю оптичної системи комутації. Слайд 5. Класифікація оптичних комутаційних елементів (ОКЕ).

Слайд 6. Схема нелінійного оптичного петлевого дзеркала на базі інтерферометра Саньяка.

Слайд 7. Схема кільцевого кремнієвого модулятора. Слайд 8. Принцип дії інтерферометра Фабрі-Перо. Слайд 9. Показники прийнятості та критерії оцінки ОКЕ. Слайд 10. Шкалування показників прийнятості. Слайд 11. Діаграма показників якості вибраних варіантів ОКЕ.

Слайд 12. Рішення задачі вибору ОКЕ. Слайд 13. Результат рішення задачі вибору ОКЕ.

Слайд 14. Оптичний процесор РАСЕ. Слайд 15. Схема повністю оптичної системи комутації.

Слайд 16. Загальні висновки. Слайд 17. Експертна оцінка і розрахунок величини інтегрального показника НТЕ. Слайд 18. Апробація результатів роботи і публікації.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Розділ 2,3</i>	<i>Жирнова Т.М., ст. викладач</i>		
<i>Економіка</i>	<i>Басюркіна Н.Й., д.е.н., професор</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>Шестопалов С.В., к.т.н., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Нєнов О.Л., к.т.н., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 07.12.2022 р.

Керівники \_\_\_\_\_ Світлана САХАРОВА  
\_\_\_\_\_ Тетяна ЖИРНОВА  
Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Борис РИБАЛОВ

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз доцільності підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж</i>	<i>12.09.2023</i>	
2	<i>Модель та методи підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж</i>	<i>10.10.2023</i>	
3	<i>Моделювання оптичного комутаційного елемента для підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж</i>	<i>24.10.2023</i>	
4	<i>Підготовка загальних висновків по роботі</i>	<i>01.11.2023</i>	
5	<i>Техніко-економічні розрахунки</i>	<i>07.11.2023</i>	
6	<i>Підготовка розділу «Охорона праці»</i>	<i>14.11.2023</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>21.11.2023</i>	
8	<i>Підготовка графічного матеріалу</i>	<i>28.11.2023</i>	

Керівники роботи \_\_\_\_\_ Світлана САХАРОВА  
\_\_\_\_\_ Тетяна ЖИРНОВА

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач – дипломник \_\_\_\_\_ Борис РИБАЛОВ

## АНОТАЦІЯ

Дослідження методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж є актуальною та важливою галуззю наукових досліджень у сучасному світі зв'язку. Швидкість передачі даних у телекомунікаційних системах визначає їхню ефективність та можливість задоволення ростучих потреб користувачів у мережі.

Робота спрямована на дослідження та огляд методів та стратегій, спрямованих на підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж у сучасному та майбутньому контексті.

Робота визначає та аналізує ключові аспекти оптимізації оптичних мереж, а саме: використання високошвидкісних оптичних компонентів.

В першому розділі розглянуто обґрунтування доцільності підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж та проведено аналіз можливості використання оптичного керування процесом комутації оптичних сигналів.

В другому розділі описані модель та методи підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж та проведено дослідження фізичних принципів побудови оптичних комутаційних елементів.

У третьому розділі розв'язано задачу вибору конструкції оптичного комутаційного елемента, проведено розрахунки швидкодії оптичного комутаційного елемента з інтерферометром Фабрі-Перо.

У четвертому розділі проведено розрахунки економічних показників. У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці.

Результатом роботи є практичні рекомендації по використанню методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж та впровадження новітніх технологій для реалізації таких методів.

**Ключові слова:** оптичні технології, оптичні телекомунікаційні мережі, оптичні процесори, оптичні комутаційні елементи.

## **ABSTRACT**

*The study of methods for increasing the speed of optical telecommunication networks is a relevant and important branch of scientific research in the modern world of communication. The speed of data transmission in telecommunication systems determines their efficiency and the ability to meet the growing needs of users in the network.*

*The work is aimed at research and review of methods and strategies aimed at increasing the speed of optical telecommunication networks in the current and future context.*

*The work defines and analyzes the key aspects of optical network optimization, namely: the use of high-speed optical components.*

*In the first section, the feasibility of increasing the speed of optical telecommunication networks is considered, and the possibility of using optical control of the switching process of optical signals is analyzed.*

*In the second chapter, the model and methods of increasing the speed of optical telecommunication networks are described, and a study of the physical principles of the construction of optical switching elements is carried out.*

*In the third section, the problem of choosing the design of the optical switching element is solved, calculations of the speed of operation of the optical switching element with the Fabry-Perot interferometer are carried out.*

*In the fourth chapter, calculations of economic indicators were carried out. The fifth chapter deals with the issue of labor protection.*

*The result of the work is practical recommendations on the use of methods of increasing the speed of optical telecommunication networks and the introduction of the latest technologies for the implementation of such methods.*

**Keywords:** *optical technologies, optical telecommunication networks, optical processors, optical switching elements.*

## ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ .....	12
1.1 Тенденції розвитку оптичних телекомунікаційних мереж.....	12
1.2 Аналіз досліджень в галузі удосконалення функціонування оптичних телекомунікаційних мереж .....	15
1.3 Дослідження підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж при використанні оптичних процесорів.....	20
Висновки до першого розділу.....	28
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	30
2.1 Постановка задачі дослідження підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж .....	30
2.2 Аналіз характеристик оптичних телекомунікаційних мереж.....	33
2.3 Дослідження методів комутації оптичних сигналів .....	37
2.4 Дослідження фізичних принципів побудови оптичного комутаційного елемента.....	41
Висновки до другого розділу .....	56
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОГО КОМУТАЦІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	58
3.1 Розв’язання задачі вибору конструкції оптичного комутаційного елемента .....	58

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Рибалов Б.О.			<i>Дослідження методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Сахарова С.В.					6	113
Реценз.						<b>ОНТУ, група КІ-777</b>		
Н. Контр.		Нєнов О.Л.						
Затверд.		Артеменко С.						

3.2 Моделювання оптичного комутаційного елемента на базі інтерфе-	
рометра Фабрі-Перо.....	64
Висновки до третього розділу.....	72
<b>РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>74</b>
4.1 Порівняльний техніко-економічний аналіз, пропонуваного	
проекту і вибраного аналога .....	74
4.2 Організаційне обґрунтування проекту.....	78
4.3 Оцінка науково-технічної ефективності розробки нової технології,	
нового обладнання та інших інновацій.....	82
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>87</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>98</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>100</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Додаток А – Копії слайдів презентації доповіді.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВСТУП

**Актуальність теми** кваліфікаційної роботи обумовлена з таких причин:

1. Зростання обсягу даних: з кожним днем збільшується кількість генерованих та передаваних даних. Великі обсяги відео, стрімінговий контент, великі дані та інші вимоги до швидкості передачі даних стають критичними для задоволення потреб користувачів.

2. Розвиток інтернету речей: зростаюча кількість підключених пристроїв у мережу вимагає великої пропускну здатності та низької затримки для ефективної взаємодії та збору даних.

3. Високовитратні застосування: завдяки впровадженню високовитратних технологій, таких як віртуальна реальність, телемедицина та інші, виникає необхідність у забезпеченні надійної та швидкої передачі великих обсягів даних.

4. Глобальний зв'язок: зростання глобального зв'язку та необхідність у великій швидкості передачі даних між різними частинами світу ставить виклик перед оптичними телекомунікаційними мережами.

5. Конкуренція на ринку телекомунікацій: компанії у галузі телекомунікацій змагаються за привабливіше обслуговування клієнтів, що включає в себе високу швидкість та якість зв'язку. Дослідження нових методів є стратегічно важливим для вдосконалення послуг та збереження конкурентоспроможності.

Отже, дослідження методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж є важливою задачею для відповіді на виклики сучасного цифрового світу та забезпечення надійного та ефективного зв'язку для різних сфер життя.

Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій та запровадження нових інфокомунікаційних послуг (ІКП) призвели до необхідності передачі великих об'ємів інформації по телекомунікаційній мережі (ТМ). В теперішній час найбільш перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації є оптичне волокно. Завдяки фізичним особливостям оптичних світловодів та властивостям оптичного сигналу швидкість передачі в сучасних оптичних телекомунікаційних мережах (ОТМ) складає десятки Гбіт/с.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробка повністю оптичних систем комутації (*optical-optical-optical*) забезпечить підвищення пропускної спроможності ОТМ та дозволить уникнути дорогого оптоелектричного перетворення сигналу, що є важливим фактором для запровадження повністю оптичної мережі в Україні.

Науковим дослідженням в сфері створення ОТМ присвячені роботи вітчизняних та закордонних вчених, зокрема, А.Б. Гольдштейна, Б.С. Гольдштейна, Р. Фримана, В.І Маккавеева, О.К. Склярова, Е.Б. Ершової, Г.С. Гайворонської, В.Б. Катока, А.Х. Султанова, В.І. Канакова, Е.А. Кучерявого, Ю.В. Піменова, Н. Слепова, С.В. Кострова та багатьох інших. В даний час, переважна більшість опублікованих робіт присвячена дослідженням, спрямованим на розвиток лінійного сегменту оптичних мереж, що включає волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП). По цій тематиці опублікований ряд наукових статей, в яких здебільшого йде мова про лінійний тракт та системи хвильового ущільнення в оптичних мережах [1-29].

Проте необхідність організації потужних магістральних мереж потребує вирішення завдання комутації оптичних сигналів. Подібної концепції дотримуються і провідні телекомунікаційні компанії у всьому світі, які інвестують колосальні кошти в наукові дослідження, що спрямовані на розробку оптичних систем комутації.

Тому дослідження розвитку ОТМ, що передбачає підвищення швидкодії систем комутації оптичних сигналів, що приведе до підвищення пропускної спроможності повністю оптичних мереж, необхідне для успішного розвитку нашої держави та є безумовно актуальним.

**Мета роботи** передбачає підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж.

**Об'єкт дослідження** – процес комутації оптичних сигналів в повністю оптичних мережах.

**Предмет дослідження** – методи підвищення швидкодії в повністю оптичних мережах.

**Методи дослідження** використовують теорію: телекомунікаційних мереж, повністю оптичних мереж, передачі інформації.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язок наступних **задач**:

- аналіз принципів функціонування оптичних телекомунікаційних мереж;
- розробка моделі дослідження підвищення швидкодії ОТМ;
- аналіз методів комутації оптичних сигналів;
- аналіз фізичних принципів побудови оптичного комутаційного елемента;
- розробка методів реалізації повністю оптичної комутації, які не використовують електрооптичного і оптоелектричного перетворення інформаційного сигналу з метою їх використання в оптичних мережах для підвищення швидкодії останніх.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В результаті дослідження, розроблено модель та методи підвищення швидкодії ОТМ за рахунок використання новітніх технологій в галузі оптичних процесорів і оптичних комутаційних елементів.

**Апробація результатів роботи і публікації.** Нижче наведено інформацію про наукові та науково-практичні конференції, семінари, на яких було оприлюднено результати роботи над кваліфікаційною роботою, а також публікації основних результатів дослідження в статтях у наукових журналах, збірниках наукових праць, матеріалах і тезах конференцій, семінарів:

1. *Galina Gayvoronska, Borys Rybalov Possibility's Evaluation of Optical Processors Usage for Optical Signals Switching's Control // II Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и Технологии (PIC&T'2015)».* – Харьков, 2015. – С. 196-199.

2. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Особенности коммутации оптических сигналов при использовании различных режимов переноса информации /Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. // Холодильна техніка і технологія. – Одеса. – ОНАХТ, 2015. – № 6 (51) – С. 100-106.

3. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Применение скалярных критериев выбора для определения структуры многозвенной коммутационной схемы для коммутации оптических сигналов. – *International Journal "Information Models and Analyses" Volume 4, Number 4, Sofia, Bulgaria, 2015* – С. 376-388.

					<b>KPM.KI.1.884-03.3.9</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

4. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Задача выбора коммутационного элемента для оптической телекоммуникационной сети. – *International Journal "Information Models and Analyses" Volume 5, Number 1, Sofia, Bulgaria, 2016* – С. 78-99.

5. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Исследование возможности использования оптических процессоров для управления коммутацией оптических сигналов // *Збірник матеріалів X Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016* – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 77-79.

6. Рыбалов Б.О., Барабаш Т.М., Бобрікова І.С., Бондаренко В.Г. Підвищення швидкодії оптичних мереж при використанні оптичних процесорів // *International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» Wloclawek, Republic of Poland, December 21–22, 2018. Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018.* – Р. 57-58.

7. Рыбалов Б.О. Методи забезпечення безпеки при передачі інформації по волоконно-оптичних каналах зв'язку // *Міжнародна науково-практична конференція "Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи"*, секція 5, 10-11 вересня 2020 року, стор. 304-305.

8. Рыбалов Б.О., Рыбалов А.Б. Способ оценки характеристик оптических коммутационных элементов // *Материалы XXV Междунар. научн.-техн. конференции "Современные средства связи"*, 22-23 окт. 2020 г., Минск, Респ. Беларусь, стр. 148-149.

9. Сахарова С.В, Барабаш Т.М., Рыбалов Б.О. Особливості вибору обладнання для реалізації оптичної мережі доступу // *Інформаційні технології і автоматизація – 2021* // *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, ОНАХТ, 21-22 жовтня 2021 р., стор. 294-296.*

10. Рыбалов Б.О., Рыбалов А.Б. Порівняння методів оптичної комутації у повністю оптичних мережах // *XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів* // *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій, Одеса, ОНАХТ, 22-23 квітня 2021 р., с. 158-159.*

					<i>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОТМ

#### 1.1 Тенденції розвитку оптичних телекомунікаційних мереж

На даний момент сучасну обчислювальну техніку, засоби зв'язку, керування та обробки сигналів неможливо уявити без застосування оптичних технологій. Це, з одного боку, є наслідком стрімкого розвитку волоконних та інтегральних оптичних технологій, а з іншого боку – наслідком постійно зростаючих вимог по збільшенню інформаційної ємності каналів, швидкості обробки повідомлень і надійності телекомунікаційних мереж та систем. Тим не менш, широке коло мережних задач на сьогоднішній день як і раніше вирішуються за допомогою використання електронних компонентів, що не тільки обмежує швидкодію ТМ в цілому, але і потребує додаткового інженерного опрацювання питань, пов'язаних з узгодженням та забезпеченням коректної взаємодії оптичних та електронних компонентів.

Аналіз стану та напрямків розвитку ТМ ставить проблему розробки перспективних засобів волоконно-оптичного зв'язку на основі застосування нової компонентної бази із використанням інформаційних технологій, оптимізованих з урахуванням характеристик нових компонентів та вузлів. Зазначена проблема знаходиться в числі першочергових задач вдосконалення систем зв'язку, її рішення дозволить значно підвищити ефективність функціонування оптичних мереж.

Волоконно-оптичні технології стали невід'ємною частиною сучасної діяльності не тільки великих промислових підприємств, але і малих організацій які займаються наданням послуг у сфері телекомунікацій або ж просто використовують переваги даної технології у своїх інтересах.

Основними перевагами оптичних технологій є:

- висока швидкість передачі даних;
- висока захищеність від сторонніх електромагнітних джерел;
- висока секретність передачі даних;

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- на сьогоднішній день вже не дуже висока вартість розгортання мережі;
- широкий вибір необхідного обладнання.

Відповідно до думки фахівців американського агентства «*National Communications System*» [1], основною тенденцією розвитку телекомунікаційної мережі є перехід до «повністю оптичних мереж» (*All-Optical Networks, AON*). Зокрема, в анотації до доповіді агентства «*National Communications System*» №00-7 говориться: «Очікується, що повністю оптичні мережі у найближчий час залишать лабораторії, і їх популярність буде рости протягом найближчих декількох років. Ці мережі забезпечать високу пропускну спроможність та дозволять запровадити безліч високошвидкісних інформаційно-комунікаційних послуг (ІКП). Передбачається, що комунікаційна інфраструктура буде розвиватися для підтримки терабітних та пентабітних швидкостей...»

Побудова і функціонування *OTN* регламентується міжнародними стандартами і рекомендаціями, що визначають її основні аспекти й елементи:

- рекомендація *MSE-T G.709* визначає вимоги до оптичної транспортної ієрархії, структуру кадрів, заголовки, бітові швидкості в оптичних мережах;
- рекомендація *MSE-T G.798* «Характеристики оптичної транспортної мережі ієрархії обладнання функціональних блоків» охоплює функціональні вимоги до функціональності оптичних транспортних мереж.

В наш час волоконно-оптичні технології рухаються до вичерпання можливостей оптичних направляючих структур. Перестають відкриватися нові властивості середовищ і в основному всі виробники телекомунікаційного обладнання працюють в області вже відомих явищ і вдосконалюють обладнання лише зміною електронної бази або алгоритмів обробки сигналів. Нові технічні задачі, поставлені ринком перед виробниками телекомунікаційного обладнання по збільшенню швидкостей і обсягів передачі даних, ведуть до перегляду не тільки фундаментальних принципів проектування пристроїв і мереж, але і фізичних принципів функціонування їх компонентів.

Для передачі потоків інформації на великій швидкості (більше 2,5 Гбіт/с) за допомогою оптичного волокна на відстань у сотні кілометрів потрібно вирішити

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безліч задач. Головними перешкодами на шляху побудови протяжних оптичних сегментів без регенераторів є: дисперсія оптичного сигналу, що поширюється по волокну, вплив нелінійних ефектів у мультиплексній оптичній лінії, шуми та поміхи, що вносяться. Створення якісно нових типів одномодових волокон та більш досконалих оптичних підсилювачів в останні 5...8 років, а також покращення технічних характеристик компонентної бази в цілому дозволило збільшити відстань та пропускну спроможність волоконно-оптичних ліній зв'язку. Це послужило початком масштабного запровадження нових концепцій та технологій побудови волоконно-оптичних мереж на локальному, регіональному та глобальному рівнях.

На сьогоднішній час спостерігається стрімке зростання мережного трафіку, це обумовлено поєднанням ресурсоемних послуг (наприклад, з передачею відео) з безпрецедентним рівнем міжмережної взаємодії. Оптична телекомунікаційна мережа поєднує в собі гнучкість та прозорість цифрової комутації з масштабованістю [2].

Повністю оптичні мережі представляють клас мереж, у функціонуванні яких головну роль при комутації, мультиплексуванні та ретрансляції відіграють не електронні (оптоелектронні), а виключно оптичні технології [3,5]. По мірі збільшення об'єму інформації, що передається мережею, рано чи пізно виникає задача збільшення ємності мережі. Менш трудомістким рішенням є модернізація волоконно-оптичних мереж шляхом заміни систем комутації (СК) на більш потужні електронні пристрої, а також залучення раніше не використовуваних резервних волокон у прокладених волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ). Проте, в ситуації, коли резерв волокон виявляється вичерпаним, а електронна комутація не дає підвищення пропускну спроможності мережі, потрібне прокладення нових оптичних кабелів, що тягне за собою великі грошові та часові витрати. Альтернативним шляхом в умовах, що склалися, є застосування оптичних технологій та побудова магістралей на базі технологій повністю оптичних мереж AON, що робить можливим значне підвищення економічності, гнучкості та надійності мереж, і значно збільшити пропускну спроможність мережі за рахунок застосування оптичної обробки інформаційного сигналу.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Актуальність застосування ОТМ полягає у можливості ефективного використання безлічі різних ІКП для задоволення різноманітних потреб користувачів і робить ОТМ ідеальною мультисервісною мережною платформою, здатною в повній мірі забезпечити відповідність невизначеним вимогам завтрашнього дня. Ця платформа дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси оптичної мережі, що мультиплексує на одній довжині хвилі кілька різнорідних мереж з різними швидкостями передачі, протоколами та джерелами синхронізації.

На сьогоднішній день вже існують повністю оптичні фрагменти ТМ, в межах яких відсутні електрооптичні перетворювачі. Такий рівень розвитку мережі, без сумніву, є ефективним незалежно від технологій оптичної комутації. Однак, враховуючи зростання вимог до пропускної спроможності телекомунікаційних мереж, максимальна ефективність мережі буде досягнута у тому випадку, коли в мережі будуть використовувати виключно оптичні технології, як в системах передачі, так і в системах розподілу інформації [4,7].

## 1.2 Аналіз досліджень в галузі удосконалення функціонування ОТМ

Сучасні телекомунікаційні та інформаційні мережі вже неможливо уявити без застосування оптичних технологій. Це є наслідком стрімкого розвитку оптичних технологій та постійно зростаючих вимог по збільшенню інформаційної ємності каналів, швидкості обробки повідомлень і надійності телекомунікаційних та інформаційних мереж та систем. Підтвердженням цього є концепція повністю оптичних мереж *AON*, що ґрунтується на застосуванні оптичних технологій.

Дослідження концепції *AON* продемонструвало ефективність її застосування, в першу чергу, на транспортному рівні при створенні розгалужених мережних архітектур. Однак разом з тим створення багатоканальних розгалужених оптичних мереж потребує вирішення найважливішої задачі – реалізації комутації оптичних сигналів. Аналіз літератури у сфері створення оптичних мереж [1-30, 34-45] показав, що на даний момент питання, які відносяться до функціонування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) вивчені досить добре. У той же час питання реалізації оптичних систем комутації розглянуті поверхнево та потребують

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проведення подальших досліджень. На даний момент існують лише загальні концептуальні підходи до побудови оптичних систем комутації, які потребують розвитку та ретельного аналізу .

При вирішенні питання комутації оптичних сигналів з використанням оптичного управління, необхідна розробка методів підключення оптичного перемикача до сегменту волоконно-оптичної системи передачі включаючи також розробку методів розрахунку ефективної роботи оптичного перемикача.

Ці задачі розглядали в своїх роботах Ганьжа Д. (*Ganzha D*), Костров С.В. (*Kostrov S.V.*), Піменов Ю.В. (*Pimenov, Y.V.*), Вольман В.И (*Wollman V.I.*), Муравцов А.Д. (*Muravtsov A.D.*), Слепов Н. (*Sleпов N.*), Балестра Ч.Л. (*Balestra Ch.L.*), Шенлі Д.Ф. (*Shanley J.F.*), Віллінеу П.Р. (*Villeneuve P.R.*), Джоананполос Дж. Д. (*Joannopoulos J.D.*), Хаус Г.А. (*Haus H.A.*), Ешбі (*Ashby N.*).

Робота Кострова С.В. [13] полягала у аналізі та синтезі оптичного перемикача для волоконно-оптичних ліній зв'язку на основі багат шарового діелектричного селективного дзеркала. Також ним був розроблений частотно-селективний оптичний перемикач з включенням в багат шарову структуру сегнетоелектричного компонента, який змінює під дією зовнішнього електричного поля коефіцієнт заломлення, який дозволяє здійснити перемикання за рахунок зміщення смуги відображення за межі робочої області.

Такий автор як Слепов Н. [4,14] займався дослідженням пристроїв вводу-виводу енергії оптичного випромінювання. Також він досліджував різні типи лазерів. Розглядав методи реалізації волоконно-оптичних ліній зв'язку з використанням оптичного перемикача.

Такі зарубіжні автори, як Джоананполос Дж. Д. (*Joannopoulos J.D.*) та Хауса Г.А. (*Haus H.A.*) [15] досліджували можливість отримання прозорих об'ємних наокристалічних зразків, що володіють оптичними властивостями і можливість їх використання при проектуванні комутуючих пристроїв в системах телекомунікацій. Робота дослідника Ешбі (*Ashby N.*) [16] полягала у розробці методів підключення оптичного перемикача до сегменту волоконно-оптичної системи передачі, що забезпечують резервування повністю оптичним способом. Ними була ро-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

зроблена схема мережі з автоматичним режимом перемикання, що забезпечує необхідні умови (високі швидкості перемикання) для мінімізації втрат інформаційних бітів переданих повідомлень.

Також необхідно відзначити роботи Канакова В.І. (*Konakov V.I.*), [17] Джейсона П. (*Jason P.*) [18] з питань оптичної комутації .

Робота Джейсона П. (*Jason P.*) полягала у аналізі способів підключення нових волоконно-оптичних пристроїв комутації до лінії зв'язку, які дозволяють перейти до повністю оптичних телекомунікаційних систем, які на відміну від відомих, допускають спільну передачу інформаційного і керуючого сигналів по одномодовому світловоду. Даний спосіб відкриває перспективи створення адаптивних оптичних систем передачі.

Дослідження Канакова В.І. (*Konakov V.I.*) полягали у знаходженні нових підходів, що дозволяють створювати волоконно-оптичні пристрої комутації, які на відміну від відомих, засновані на управлінні нелінійними оптичними властивостями нанокристалічного прозорого кварцу, що забезпечує можливість підвищення пропускної спроможності телекомунікаційної системи.

Тривалий час у літературі країн СНД оптичній комутації було присвячено лише декілька оглядових журнальних статей. Крім того, заслуговують на увагу роботи таких авторів як Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С., [19] Фриман Р., [20] Маккавеев В.І, [21], Склярів О.К. [22].

Роботи таких авторів, як Гольдштейна А.Б., Гольдштейна Б.С., а також Склярова О.К. полягали у дослідженні волоконно-оптичних перемикачів. Дослідження принципів роботи волоконно-оптичного перемикача, розглядали принцип роботи та властивості термооптичного перемикача який виготовлений з трьох різних оптичних волокон з однаковими геометричними параметрами.

Такі автори, як Маккавеев В.І та Фриман Р. Займалися аналізом перспективних компонентів волоконно-оптичних мереж зв'язку – фотонних комутаторів. Досліджували принципи роботи фотонних комутаторів в мережах з комутацією каналів та комутацією пакетів, тобто повністю оптичним обміном міток. Форму-

					<i>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

лювали задачі, які потрібно розв'язати при побудові повністю оптичних мереж зв'язку з фотонними комутаторами.

Останнім часом відсутність наукової літератури зазначеної тематики в певній мірі ліквідовано такими фахівцями як Кучерявий Е.А., [23], Гайворонська Г.С., Рябцов А.В. [24-26, 36-40], заслугою яких є дослідження перспектив розвитку комутаційних технологій в повністю оптичних мережах зв'язку.

Роботи Гайворонської Г.С. та Рябцова А.В. полягали у дослідженні перспектив розвитку комутаційних технологій в повністю оптичних мережах зв'язку. В них запропоновано феноменологічну модель оптичного комутатора з оптичною адресацією, яка може знайти своє використання в подальшому удосконаленні оптичних комутаційних технологій. Проводили аналіз конструкцій п'єзоелектричних комутаторів оптичних сигналів. Розглянуто різні методи і засоби відхилення і модуляції оптичного випромінювання, на основі яких можливо побудувати повністю оптичні комутатори. Проведено аналіз технічних аспектів побудови оптичних комутаторів, аналіз сучасного стану проблеми створення повністю оптичних інформаційних мереж та вибору напрямків досліджень.

Робота Славинської В.В. [27] полягала в дослідженні питань побудови оптичного комутатора на основі одноканального дефлектора з використанням ізотропної АО-взаємодії (акустооптичної взаємодії). Було запропоновано метод розрахунку параметрів дефлектора з акустооптичним осередком із суцільним п'єзоперетворювачем на основі вимог до характеристик комутатора. Зроблено оцінку ефективності застосування АО-чарунок з п'єзоперетворювачем у вигляді решітки з протифазним збудженням для поліпшення характеристик АО-комутатора. Також була досліджена можливість побудови оптичного комутатора з динамічною селекцією довжин хвиль на основі одноканального АО-дефлектора.

Слід відзначити дослідження таких вчених як Султанова А.Х., та Виноградової І.Л [28]. Їх роботи полягали в дослідженні можливості створення комутаторів оптичних сигналів, керованих додатково оптичним випромінюванням. Вони припустили, що керуюче випромінювання змінює показник заломлення оптичного середовища пристрою, а з ним і довжину хвилі інформаційного випромінюван-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

ня. Для контролю останньої вони використовували багатопроменевий інтерферометр. Також вони провели оцінку технічних аспектів побудови пристрою і аналіз показав, що інтерференційний комутатор принципово технічно можна реалізувати, але існують такі невирішені проблеми, як наявність постійної інтерференційної складової, а також спотворення дією інтерференції нелінійних оптичних ефектів цифрового оптичного сигналу.

Можна також відзначити роботу вченого Котова В.М. [29]. В якій він розглядав і досліджував принципи акустооптичної комутації оптичних випромінювань, також досліджував варіанти перемикання. Проводив експерименти по комутації двоколірного випромінювання.

Поки що практично не вирішені задачі розробці «керованих» коефіцієнтів відбиття і заломлення, на базі яких можна було б отримати нові повністю оптичні компоненти управління: багатоканальні розгалужувачі, фільтри, перетворювачі фізичних величин, оптичні бістабільні нелінійні елементи і т.д. В останніх генерація нелінійного режиму функціонування є основою їх роботи – забезпечення бістабільного режиму проходження для інформаційного оптичного потоку [3,13] без прояву негативних факторів, пов'язаних з іншими нелінійними ефектами.

Виникаючі нові технічні задачі, спрямовані на збільшення швидкості обробки інформації потребують перегляду деяких фундаментальних підходів не тільки до проектування об'єктів телекомунікацій, але і фізичних принципів, на базі яких побудовані компоненти цих об'єктів. Яскравим підтвердженням цих слів є розглянута в першій главі концепція повністю оптичних мереж *AON*, що ґрунтується на застосуванні виключно оптичних технологій.

Беручи до уваги вище сказане, можна зробити висновок про те, що на сьогоднішній день є ще багато питань, які пов'язані з розробкою та впровадженням систем комутації оптичних сигналів з оптичним управлінням, що потребує додаткових досліджень. До числа таких питань можна віднести розробку нових методів комутації, конструкцій, моделей комутаційних елементів, методик їх розрахунку і технологій виготовлення, орієнтованих на сучасний рівень розвитку нанотехнологій, з метою подальшого збільшення швидкодії та зниження енергоспоживання.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

### 1.3 Дослідження підвищення швидкодії ОТМ при використанні оптичних процесорів

Оптичні процесори можуть використовуватися для обробки оптичних сигналів в телекомунікаційних мережах, що може призвести до підвищення їхньої швидкодії та ефективності. Ці процесори зазвичай використовуються для виконання операцій, таких як модуляція, демодуляція, мультиплексування та демультиплексування оптичних сигналів. Тому дослідження використання оптичних процесорів для підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж є доцільним.

Дослідження підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж за допомогою оптичних процесорів може включати в себе декілька ключових аспектів. Нижче наведено деякі можливі напрямки досліджень та питання, які можуть бути вивчені:

1. Оптимізація оптичних мереж:
  - розробка нових алгоритмів та методів оптимізації для використання оптичних процесорів у мережах;
  - вивчення впливу різних параметрів (таких як пропускна здатність, дальність передачі тощо) на швидкість мережі з оптичними процесорами.
2. Оптимізація оптичних процесорів:
  - розробка нових оптичних процесорів з використанням новітніх технологій;
  - дослідження методів підвищення продуктивності і ефективності роботи оптичних процесорів.
3. Методи обробки сигналів:
  - вивчення методів обробки оптичних сигналів з метою покращення швидкості передачі даних;
  - розробка алгоритмів для оптимізації обробки сигналів в оптичних мережах.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Застосування машинного навчання. Використання методів машинного навчання для покращення управління мережами та передачі даних в оптичних телекомунікаційних системах.

5. Стандартизація та сумісність:

- дослідження стандартів і протоколів, які забезпечують сумісність оптичних процесорів з існуючими телекомунікаційними мережами;
- розробка рекомендацій для впровадження оптичних процесорів у великомасштабних телекомунікаційних системах.

6. Енергоефективність. Вивчення методів підвищення енергоефективності оптичних телекомунікаційних систем з використанням оптичних процесорів.

Ці напрямки досліджень можуть включати як теоретичні аспекти, так і експериментальні випробування, зокрема використання моделювання та прототипування оптичних систем. Додатково, важливим елементом буде співпраця з виробниками обладнання, телекомунікаційними компаніями та іншими зацікавленими сторонами для забезпечення практичної реалізації отриманих результатів.

Проведемо аналіз сучасного стану розвитку оптичних процесорів.

Принцип дії оптичного процесора заснований на наступних особливостях, властивих оптичному сигналу як переносники інформації і оптичної обчислювальної техніки в цілому:

- паралельність обробки інформації (велика кількість світлових пучків можуть вільно проходити по одній і тій же області простору, перетинатися і через відсутність у фотонів електричного заряду не впливати один на одного);
- використання двовимірного (зображення) і тривимірного (голограми) характеру світлових полів дозволяє значно збільшити щільність і швидкість передачі інформації;
- можливість (і зручність) обробки аналогової інформації;
- оперування з інформацією в оптичній формі;
- передача інформації фотонами відбувається дійсно зі швидкістю світла;

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



Якщо на шляху пучка поставити другий транспарант  $Tr_2$ , пропускання якого є функція  $f_2 = \Phi_2(x,y)$ , то після нього розподіл поля в пучку  $E\Phi_1(x,y)\Phi_2(x,y)$ , буде відповідати твору функцій  $f_1$  і  $f_2$ .

Оптичний сигнал, який є твором функцій  $f_1$  і  $f_2$ , може бути перетворений в послідовність електричних сигналів за допомогою, наприклад, матриці фотоприймачів (МФП). Опитуючи по порядку фотоприймач одного рядка, потім інший, третій, і т.д., ми отримаємо послідовність електричних сигналів, кожен з яких пропорційний множенню функцій  $f_1$  і  $f_2$ , при визначених координатах  $x$  і  $y$ .

На сьогоднішній день існує декілька вироблених оптичних процесорів:

1. *Enlight 256.*
2. *Holey Optochip.*
3. *HPCorona.*
4. *PACE.*

### Оптичний процесор *EnLight256*

В 2003 році ізраїльською компанією *Lenslet Labs* був випущений оптичний процесор *EnLight256* з швидкодією  $8 \times 10^{12}$  операцій з восьмибітовими числами в секунду (рис. 1.2). Виріб було представлено як перший в світі комерційний оптичний процесор. Комп'ютер на базі *EnLight256* здатний обробляти 15 відеоканалів стандарту *HDTV* в режимі реального часу.



Рисунок 1.2 – Оптичний процесор *EnLight256*

Оптичний *Enlight256* – це *Digital signal processor (DSP)*, що виконує простий набір команд. Використання світла замість електроніки дозволяє процесору

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

виконувати до 8 трильйонів операцій в секунду, що, за заявою *Lenslet*, в тисячі разів швидше найсучасніших *DSP*-процесорів.

*Enlight* виконує математичні операції за допомогою 256 лазерів малих розмірів, промені від яких проходячи через «модуль програмованої оптики», створюють інтерференційну картину, яка зчитується 256 світлочутливими елементами. Процесор виконує операції дуже швидко завдяки можливості виконувати велику кількість операцій паралельно.

### Оптичний процесор *Holey Optochip*

Дослідницький підрозділ корпорації *IBM* створив оптичний процесор, здатний передавати Терабіт даних щосекунди, використовуючи незвичайний дизайн із 48 невеликими отворами у стандартному *CMOS*-чипі, через які проводиться світло (рис.1.3). В *IBM* говорять, що створений прототип процесора істотно більш швидкий та економічний, ніж сучасні процесори у комп'ютерах і серверах. Новий чип набагато швидше і використовує менше енергії ніж сучасна оптика, що використовується для передачі всієї інформації всередині комп'ютера і мереж. *Holey Optochip* вже сьогодні може використовуватися (і використовується) всередині суперкомп'ютерних кластерів.

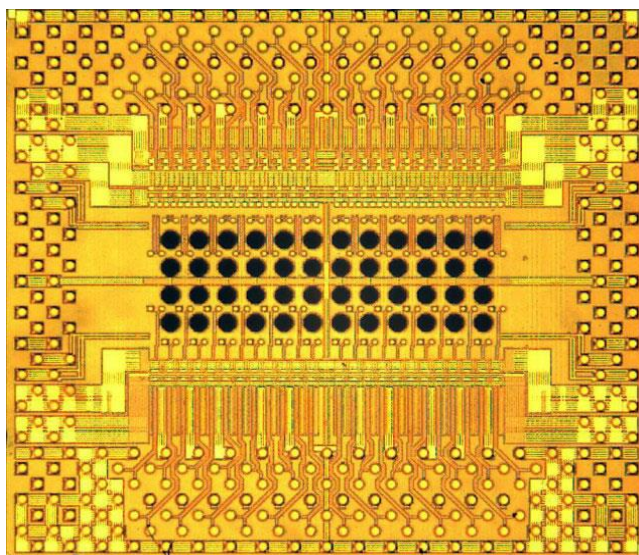


Рисунок 1.3 – Оптичний процесор *Holey Optochip*

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Створений *Holey Optochip* споживає всього 4,7 Вт (приблизно як процесор у смартфоні чи планшеті), але при цьому здатний обробити близько 1 трильйона біт за секунду, тобто передати приблизно 500 *HD*-фільмів. Розміри чипу всього 5,2×5,8 мм.

Зі слів представників *IBM*, рекордна швидкість в основному забезпечується за рахунок, що того в ньому зроблено 48, крихітних отворів які використовуються як канали для 24 передавачів та 24 приймачів.

За його словами, у чипі також є елементи для модуляції світла у ланцюзі, що конвертують «фото послідовності» у електричний сигнал. Світлові отвори у процесорі виробляються за допомогою 850-нанометрових лазерів, що використовуються вже зараз. У створених отворах розміщуються масиви фотодіодів, об'єднаних зі спеціальними ресиверами для декодування сигналів.

На даний момент створена версія оптичного чипу має 48 каналів (зв'язків між випромінювачами і ресиверами), кожний з яких забезпечує продуктивність у 20 Гігабіт за секунду, що дає у сумі 960 Гігабіт за секунду.

### **Оптичний процесор *Corona***

Дослідницький підрозділ *Hewlett Packard, HPLabs*, опублікувало опис проєкту під назвою *Corona*, в рамках якого інженери створили 256-ядерний процесор з фотонними міжз'єднаннями.

На кристалі *Corona* будуть розміщуватися такі елементи:

- хвилеводи, які направляють і обмежують світло;
- джерела світла;
- модулятори, керуючі джерелом світла;
- перемикачі з'єднань між хвилеводами, керуючі світловим потоком;
- приймачі світла.

Модулятори, хвилеводи і перемикачі мають кільцеподібну форму, зі зміною резонансних характеристик кільця світло може перемикатися між хвилеводами і поглинатися приймачем, при цьому світло з "невідповідною" довжиною хвилі залишається недоторканим. За оцінками експертів *HPLabs*, для передачі даних зі

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

швидкістю 10 Тбіт/с потрібно 160 Вт електроенергії, але розробляється технологія дозволить зменшити це значення до 6,4 Вт. Більш того, успішна реалізація проекту *Corona* дозволить зробити комп'ютери в 100 разів швидше, вважають дослідники.

Оптичні міжз'єднання будуть використовуватися для зв'язку обчислювальних кластерів, що включають по 4 ядра, які будуть скомпоновані в "куб" розмірами 4 x 4 x 4 кластери (або всього 256 ядер) з використанням технології "*through-silicon via*". До 2024 року *HP* збирається налагодити випуск таких процесорів по 8 нм технології.

### Оптичний процесор *PACE*

*PACE* (*Photonic Arithmetic Computing Engine*) – це перша повністю інтегрована оптична обчислювальна система фірми *Lightelligence* [46]. Аносований у 2021 році *PACE* використовує внутрішні властивості світла для створення оптимальних рішень для кількох повних проблем *NP* у 800 разів швидше, ніж поточні графічні процесори високого класу, зберігаючи високу пропускну здатність, низьку затримку та енергоефективність. *PACE* досягає цієї низької затримки за допомогою жорсткого циклу, що складається з повторюваної оптичної матриці.



Рисунок 1.4 – Оптичний процесор *PACE*

*PACE* досягає цієї низької затримки за допомогою жорсткого циклу, що складається з багаторазового множення оптичної матриці та розумного використання контрольованого шуму для вирішення проблем *Ising*, *Max-Cut* і *Min-Cut*.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Ці *NP*-повні проблеми спантеличили математиків протягом останніх 50 років. Алгоритми для *NP*-повних проблем важливі, тому що їх можна зіставляти один з одним, і вони мають сотні практичних застосувань у таких сферах, як криптографія, оптимізація грид-систем та розширений аналіз зображень.

Ядром *PACE* є оптичний матричний помножувач 64x64 у вбудованому кремнієвому фотонному чіпі та мікроелектронному чіпі *CMOS*, фліп-чіп, упаковані разом. На додаток до своїх досягнень у 3D-пакуванні, фотонний чіп *PACE* містить понад 12000 дискретних фотонних пристроїв і має системну тактову частоту 1 ГГц.

Основні характеристики процесора *PACE* представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Основні характеристики процесора *PACE*

Обчислювальні ядра	Оптична матриця 64x64 4096 ядер
Теоретична продуктивність	8 ТФлопс
Технологія виготовлення	10 нм
Швидкість обміну даними між ядрами	25 ТБ/с
Споживна потужність	2 Вт

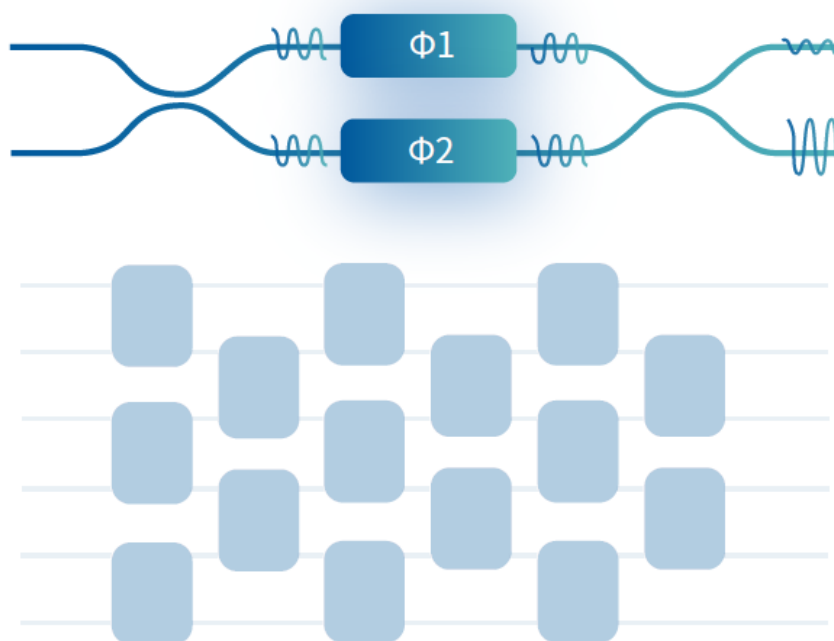


Рисунок 1.5 – Функціонування оптичного процесора *PACE*

Для кожного оптичного матричного множення значення вхідного вектора спочатку витягуються з *SRAM* на кристалі до того, як цифрово-аналоговий перетворювач перетворить їх на аналогові значення. Далі значення прикладається до відповідних оптичних модуляторів через мікроперетинки між електронними та фотонними чіпами для формування вхідного оптичного вектора.

Потім вхідний оптичний вектор поширюється через оптичну матрицю для генерації виходу оптичний вектор. Він потрапляє на масив фотодетекторів, які перетворюють оптичну інтенсивність на електричний струм. Потім електричні сигнали повертаються до електронного чіпа через мікросхему і проходять через трансїмпедансний підсилювач і аналого-цифровий перетворювач перед поверненням у цифрову область.

### **Висновки до першого розділу**

1. Аналіз стану та напрямків розвитку телекомунікаційних мереж ставить проблему розробки перспективних засобів волоконно-оптичного зв'язку на основі застосування нової компонентної бази із використанням інформаційних технологій, оптимізованих з урахуванням характеристик нових компонентів та вузлів. Рішення цієї проблеми дозволить значно підвищити ефективність функціонування оптичних мереж.

2. Актуальність застосування ОТМ полягає у можливості ефективного використання безлічі різних інформаційно-комунікаційних послуг для задоволення різноманітних потреб користувачів і робить ОТМ ідеальною мультисервісною мережною платформою, здатною в повній мірі забезпечити відповідність невідзначеним вимогам завтрашнього дня.

3. В результаті аналізу тенденцій розвитку оптичних телекомунікаційних мереж показано, що електронно-оптичні системи комутації стали стримуючим фактором при нарощуванні пропускної спроможності. Тому актуальною є розробка моделі системи комутації оптичних сигналів, не тільки комутує сигнали в оптичній формі, але і забезпечує управління процесом комутації за допомогою оптичного випромінювання.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

4. В результаті аналізу принципів функціонування оптичних телекомунікаційних мереж виявлено що розробка та впровадження повністю оптичних систем комутації забезпечить підвищення пропускної спроможності ОТМ та дозволить уникнути дорогого оптико-електричного перетворення сигналу, що є важливим фактором для впровадження повністю оптичної мережі в Україні. Таким чином, завдання дослідження особливостей комутації оптичних сигналів є важливим та актуальним.

5. Дослідження концепції *AON* продемонструвало ефективність її застосування, в першу чергу, на транспортному рівні при створенні розгалужених мережевих архітектур. Однак разом з тим створення багатоканальних розгалужених оптичних мереж вимагає вирішення найважливішого завдання - реалізації комутації оптичних сигналів з оптичним управлінням. Завдання оптичного управління оптичною комутацією на сьогоднішній день ще не вирішено. Існують деякі підходи до її вирішення, однак вони не пророблені до такого ступеня, щоб можна було їх використовувати при побудові повністю оптичних мереж.

6. Дослідження підвищення швидкодії ОТМ при використанні оптичних процесорів показало, що сучасні оптичні процесори можуть бути використані для керування оптичною системою комутації з кращими характеристиками продуктивності та споживаної потужності ніж звичайні електронні процесори. Крім того, при використанні оптичних процесорів не буде потрібним витрати часу та додаткові дії на перетворювання оптичного сигналу в електричний.

7. На основі проведеного аналізу предметної області, публікацій та досліджень можна сформулювати технічне завдання, а саме:

- вхідні параметри: характеристики оптичних телекомунікаційних мереж,
- керуючі параметри: оптичні процесори та їх характеристики,
- обмежуючі параметри – оптичні комутаційні елементи, використання яких насамперед призведе до значного збільшення швидкодії ОТМ,
- вихідні параметри: методи підвищення швидкодії ОТМ, які ефективніше будуть впливати на пропускну здатність ОТМ.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОТМ

#### 2.1 Постановка задачі дослідження підвищення швидкодії ОТМ

Об'єкт дослідження розглядається на фізичному та математичному рівні абстракції. На фізичному рівні розглядаються способи впливу на потужність світлового променя, тобто як залежить потужність сигналу від зміни матеріалу змішувача або зміни його фізичних розмірів. На математичному рівні – описуються функціональні залежності між вхідними та вихідними параметрами за допомогою математичних формул. Тобто за допомогою математичних формул розраховується час який затрачується на комутацію, проводиться розрахунок необхідної потужності керуючого сигналу.

Як показано у розділі 1 основною тенденцією розвитку ТМ перехід к «повністю оптичним мережам» – *AON*. Основним фактором, що стримує цей перехід, є складність реалізації систем комутації для цих мереж. На сьогоднішній день обробка трафіку в існуючих волоконно-оптичних мережах здійснюється як на оптичному, так і електричному рівнях. Сучасні ОСК використовують механізми оптоелектричного перетворення сигналів (*optical-electrical-optical*), що комутуються, та керуються з використанням електронних компонентів, що накладає серйозні обмеження на підвищення пропускної спроможності мереж, в яких вони використовуються.

Значне підвищення пропускної спроможності ТМ можливо шляхом використання повністю оптичних технологій обробки інформаційного сигналу. На даний момент еволюційний розвиток волоконно-оптичних систем передачі дозволяє досягати великих швидкостей передачі (декілька терабіт в секунду). Однак необхідність перетворення оптичного сигналу в електричну форму в комутаційному обладнанні є серйозною перешкодою на шляху переходу до терабітних мереж. Розробка повністю оптичних комутуючих пристроїв, зокрема повністю оптичного перемикача, є необхідною і актуальною задачею в області волоконно-оптичних

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологій. Повністю оптичні комутуючі пристрої стануть наступним етапом розвитку та сприяють вирішенню широкого ряду телекомунікаційних задач.

Існуючі методи комутації оптичних сигналів [21, 26] передбачають необхідність попереднього перетворення інформаційного оптичного випромінювання в електричну форму (*optical-electrical, O/E*), комутацію електричного сигналу та зворотне електрооптичне перетворення (*electrical-optical, E/O*) з подальшим підсиленням потужності оптичного випромінювання. Такий підхід до комутації оптичних сигналів накладає обмеження на пропускну спроможність системи комутації та її ємність. Здійснення дворазового перетворення інформаційного сигналу суттєво обмежує пропускну здатність системи комутації оптичних сигналів (СКОС) до 2,5 Гб/с і характеризується надмірним енергоспоживанням, що підвищує вартість експлуатації пристрою. Більше того, підвищене енергоспоживання та наявність перехресних перешкод призводить до обмеження ємності СКОС, яка в цьому випадку не перевищує 32x32. Електронно-оптичне перетворення є стримуючим фактором нарощування пропускну спроможності і перехід до повністю оптичних СКОС є невідкладним завданням, рішення якої необхідне для реалізації повністю оптичних мереж у масштабах всієї країни.

Визнано, що засобами мікроелектроніки вирішити задачу принципово неможливо [28,31]. На думку експертів *Pioneer Consulting* (одного з найавторитетніших у світі аналітичних центрів), саме відсутність ефективних засобів оптичної комутації великого числа ширококутових каналів сьогодні є головною перешкодою для масового впровадження нових мережних рішень, служб і сегментів інформаційних послуг, а їх розробка в найкоротші терміни віднесена до числа найважливіших напрямків. Повністю оптичні комутуючі пристрої стануть наступним етапом розвитку та сприяють вирішенню широкого ряду задач розвитку оптичних телекомунікаційних мереж [36,37,41].

Отже, ключовою проблемою, вирішення якої дозволить досягти стрімкого збільшення пропускну спроможності мережі, є впровадження технологій комутації оптичних сигналів, які не вимагають попереднього оптоелектронного перетворення інформаційного сигналу, а значить – мінімізують не тільки затримку інфо-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

рмаційного сигналу на вузлі комутації (ВК), але і значно зменшують вартість експлуатації ВК за рахунок зниження витрат на електроживлення, яке необхідне для функціонування оптоелектронних перетворювачів. Враховуючи масштабність сучасних досліджень, спрямованих на створення надійних і ефективних систем оптичної комутації і високі вимоги до їх швидкодії, дослідження можливостей підвищення швидкодії оптичних мереж за рахунок використання комутації оптичних сигналів з оптичним управлінням важливо для розвитку нашої держави. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити повністю оптичну систему комутації, яка буде не тільки комутувати сигнали в оптичній формі, але і забезпечить керування процесом комутації за допомогою оптичного випромінювання.

Незважаючи на привабливість такого підходу до побудови комутаційних пристроїв, його застосування в даний момент викликає ряд труднощів. В першу чергу, це стосується реалізації тому, що потрібні оптичні процесори для управління повністю оптичним комутаційним елементом (ПОКЕ). Також потрібен оптичний буфер з довільним доступом (*Optical RAM*). Існуючі лінії оптичної затримки *Fiber Delay Line (FDL)* здатні накопичувати оптичний сигнал лише обмежений проміжок часу, що зумовлюється надмірно швидким загасанням оптичного випромінювання в петлях затримки [5,14].

Для вирішення поставленої задачі необхідно, по-перше, проаналізувати можливість реалізації та ефективність застосування технологій позиційного та міточного мультиплексування на базі оптичних компонентів. По-друге, розробити алгоритм реалізації комутації оптичних сигналів, що не потребує попереднього *O/E* перетворення та буферизації сигналу. По-третє, провести аналіз придатності існуючих фізичних принципів для побудови оптичного комутаційного елементу (ОКЕ), сформулювавши рекомендації щодо застосування цих принципів при створенні оптичних комутаційних пристроїв. По-четверте, розглянути принципи створення багатокаскадних ОСК, а також оцінити можливість та порівняти ефективність застосування існуючих комутаційних схем для побудови ОСК великої ємності. Вирішення цих підзадач дозволить створити модель мережі з оптичною комутацією, у якій оптичний інформаційний сигнал не буде піддаватися *E/O* і *O/E*

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

перетворенням, що дозволить досягнути підвищення швидкодії та продуктивності оптичних телекомунікаційних мереж.

На підставі вищевикладеного, задача дослідження може бути сформульована наступним чином: розробка методів реалізації повністю оптичної комутації, які не використовують електрооптичного і оптоелектричного перетворення інформаційного сигналу з метою їх використання в оптичних мережах для підвищення швидкодії останніх.

## 2.2. Аналіз характеристик оптичних телекомунікаційних мереж

Вимірювання параметрів оптичних компонентів мережі є важливою складовою у забезпеченні якості передачі сигналів у оптичній мережі. Для вимірювання параметрів оптичних компонентів використовуються спеціальні прилади, які забезпечують точність та надійність вимірювань [47].

Параметри, які необхідно вимірювати при оцінці якості компонентів ВОЛЗ включають:

- вимірювання рівнів оптичної потужності та згасання;
- вимір поворотних втрат;
- визначення місця та характеру пошкодження оптоволоконного кабелю;
- стресове випробування апаратури ВОЛЗ.

Для цих вимірювань використовуються такі типи експлуатаційних приладів.

*OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)* – оптический рефлектометр, предназначенный для определения расстояния до неоднородностей показателя преломления оптического волокна: сварных соединений, макро изгибов, коннекторов, обрывов. *OPM (Optical Power Meter)* – вимірник оптичної потужності. Це найпоширеніший прилад, який використовується для проведення щорічного планового контролю ліній та обладнання та локалізації ушкоджень. *ORL (Optical Return Loss)* – вимірювач втрати потужності за рахунок відбиття від зварних з'єднань. *OLTS (Optical Loss Set)* – оптичний тестер, що дозволяє вимірювати величину згасання, який може також працювати в режимах джерела оптичного випромінювання та вимірювача оптичної потужності. Даний прилад поєднує у собі *OPM*

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

та *SLS (Optical Loss Test Set)* – аналізатор згасання. *OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)* – оптичний рефлектометр, призначений для визначення відстані до неоднорідностей показника заломлення оптичного волокна: зварних з'єднань, макро згинів, коннекторів, обривів.

Усі повністю оптичні мережі можна розділити на три основні категорії (табл. 2.1) [8]:

- мережі, що використовують багатохвильові (мультиплексні) лінії зв'язку;
- мережі з позиційним мультиплексуванням;
- мережі з міточним мультиплексуванням.

Таблиця 2.1

Класифікація повністю оптичних мереж

Категорія мережі	Підкатегорія	Характеристики
Багатохвильова мультиплексна лінія зв'язку		Повністю прозора по відношенню до кінцевих вузлів
Повністю оптична з позиційним мультиплексуванням	Широкомовна (пасивна) мережа	Повністю прозора
	Мережа з пасивною хвильовою маршрутизацією	Повністю прозора
	Мережа з активною хвильовою маршрутизацією	Повністю прозора
Повністю оптична з міточним мультиплексуванням	Мережа з послідовною бітовою комутацією пакетів	Прозора при використанні встановленого протоколу
	Мережа з паралельною бітовою комутацією пакетів	Прозора при використанні встановленого протоколу

Багатохвильова мультиплексна лінія зв'язку представляє найпростіший спосіб організації архітектури *AON*. Така лінія зв'язку дозволяє організувати велику кількість з'єднань «точка-точка» між однотипними вузлами, що взаємодіють на визначених, призначених виключно для них, довжинах хвиль.

Перевагами багатохвильової мультиплексної лінії є:

- велика смуга пропускання, що відводиться на кожну пару взаємодіючих між собою користувачів;
- висока надійність зв'язку внаслідок гарантованої смуги пропускання (під кожний канал відводиться окрема довжина хвилі);
- прозорість кожного каналу мережі по відношенню до вибору мережного додатку між кінцевими вузлами.

Недоліком є наявність жорстко зафіксованих з'єднань по каналам. В мережах кабельного телебачення отримали велике розповсюдження симплексні багатохвильові канали зв'язку, в яких передача ведеться тільки в одному напрямку.

Три основні риси магістральної багатохвильової лінії зв'язку – висока частота модуляції сигналів в каналах (висока бітова швидкість), висока щільність мультиплексних каналів та великі відстані сегментів – примушують більш суворо підходити до вимог по передачі інформації. Розглянемо найбільш важливі фактори, що обмежують можливості оптичної лінії [9].

**Співвідношення сигнал/шум.** Оптичні підсилювачі *EDFA* вносять шум, і при великій кількості послідовних з'єднань можуть приводити до значної деградації сигналу. Щоб підтримувати необхідне співвідношення сигнал/шум, число послідовних вузлів *EDFA*, у світловому шляху, повинно бути обмежено. Моделювання без врахування впливу дисперсії сигналу у волокні демонструє, що між регенераторами може бути встановлено максимум 18 каскадів *EDFA* за швидкості передачі 622 Мбіт/с з прийнятним для стандарту *STM-4* співвідношенням сигнал/шум та всього 11 вузлів за швидкості 2,5 Гбіт/с з задовільним співвідношенням сигнал/шум. Реальна кількість каскадів *EDFA* через дисперсійну деградацію сигналу зменшується у два рази.

**Смуга пропускання підсилювачів *EDFA*.** Оскільки передаточна характеристика *EDFA* у робочій області не плоска навіть для фтороцирконатних *EDFA*, то розмах у 2 дБ залишається при коефіцієнті підсилення 30 дБ. Після 50 каскадів підсилення початкова зона в 30 нм скорочується до 10 нм. С цієї точки зору бажано для передачі використовувати щільно розташовані хвильові канали *DWDM* в області найбільшого підсилення.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Поперечні поміхи.** Поперечні поміхи можуть бути як міжсмуговими, так і внутрішньосмуговими. Міжсмугові поміхи виникають між двома різними довжинами хвиль та як правило не носять кумулятивний характер, оскільки в мережі існує багато фільтрів. Для їх усунення достатньо встановити відповідний вузькосмуговий фільтр перед оптичним приймачем. Внутрішньосмугові поміхи значно складніше контролювати. Вони можуть накопичуватись, і простим способом їх усунути неможливо. Аналіз показує, що чутливість фільтру повинна бути більш, ніж на 20 дБ нижче для сусідньої довжини хвилі, щоб мінімізувати ефект внутрішньосмугових поміх.

**Лінійна дисперсія волокна.** Основним фактором є систематичне накопичування хроматичної дисперсії у одномодовому волокні, яка для волокна типу *NZDSF* може досягати 5-6 пс/нм в розрахунку на один кілометр. Повна допустима величина дисперсії в оптичному сегменті між регенераторами залежить від стандарту, що використовується.

**Нелінійна дисперсія *EDFA*.** Використання оптичних підсилювачів дозволяє компенсувати втрати потужності у волокні, але це створює додаткові нелінійності. Хвости у спектральному представленні сигналу (хвильового пакету), що несе меншу потужність, відчуває більше підсилення у порівнянні з центральною частиною пакету, приводячи до появи нелінійної дисперсії. Збільшення відстані між каскадами *EDFA*, і, відповідно, зменшення числа підсилювальних каскадів, знижує нелінійну дисперсію, але підсилення більш слабого сигналу призводить до зменшення співвідношення сигнал/шум.

**Поляризаційна модова дисперсія (*PMD*).** Ця дисперсія виникає у волокні через неідеальну циркулярність реального волокна. Практично *PMD* починає вносити обмеження на довжину регенераційної ділянки тільки за дуже великої швидкості передачі на канал (більше 10 Гбіт/с). При цьому максимальне значення *PMD* в лінії не повинно бути більше 1/10 від бітового інтервалу. *PMD* нелінійно залежить від довжини  $L$  (як  $L^{-1/2}$ ), тому зростає повільніше зі збільшенням відстані.

**Чотирьоххвильове змішування (*Four-Wave Mixing, FWM*).** Природа нелінійного ефекту *FWM* пов'язана з наявністю слабкої залежності показника залом-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

лення волокна від інтенсивності поширюваного по ньому світла, в результаті чого із двох хвиль з несучими частотами  $\nu_i$  і  $\nu_j$  з'являються дві нові хвилі з несучими частотами  $\nu_k$  і  $\nu_l$ , причому згідно закону збереження енергії  $\nu_i + \nu_j = \nu_k + \nu_l$ . При потраплянні нових хвиль у спектральні області існуючих каналів з'являються поперечні поміхи між двома каналами. Вплив поперечних поміх через *FWM* збільшується з наближенням хроматичної дисперсії до нуля та максимальний в районі точки нульової дисперсії.

Таким чином, технічні параметри мультиплексних хвильових систем (протяжність сегменту, кількість мультиплексних каналів в одному волокні, інтервали між каналами, бітова швидкість) взаємопов'язані між собою та залежать від проаналізованих параметрів.

### 2.3 Дослідження методів комутації оптичних сигналів

На даний момент сучасну обчислювальну техніку, засоби зв'язку, керування та обробки сигналів неможливо уявити без застосування оптичних технологій. Це, з одного боку, є наслідком стрімкого розвитку волоконних та інтегральних оптичних технологій, а з іншого боку – наслідком постійно зростаючих вимог по збільшенню інформаційної ємності каналів, швидкості обробки повідомлень і надійності телекомунікаційних мереж та систем. Тим не менш, широке коло мережних задач на сьогоднішній день як і раніше вирішуються за допомогою використання електронних компонентів, що не тільки обмежує швидкодію ТМ в цілому, але і потребує додаткового інженерного опрацювання питань, пов'язаних з узгодженням та забезпеченням коректної взаємодії оптичних та електронних компонентів.

Виникаючі нові технічні задачі, спрямовані на збільшення швидкості обробки інформації потребують перегляду деяких фундаментальних підходів не тільки до проектування об'єктів телекомунікацій, але і фізичних принципів, на базі яких побудовані компоненти цих об'єктів. Яскравим підтвердженням цих слів є розглянута концепція повністю оптичних мереж *AON*, що ґрунтується на застосуванні виключно оптичних технологій.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження концепції *AON* продемонструвало ефективність її застосування, в першу чергу, на транспортному рівні при створенні розгалужених мережних архітектур. Однак разом з тим створення багатоканальних розгалужених оптичних мереж потребує вирішення найважливішої задачі – реалізації комутації оптичних сигналів. Аналіз літератури у сфері створення оптичних мереж [4,7-9,10] показав, що на даний момент питання, які відносяться до функціонування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) вивчені досить добре. У той же час питання реалізації оптичних систем комутації розглянуті поверхнево та потребують проведення подальших досліджень. На даний момент існують лише загальні концептуальні підходи до побудови оптичних систем комутації, які потребують розвитку та ретельного аналізу.

Модель повністю оптичної системи комутації, яка буде не тільки комутувати сигнали в оптичній формі, але і забезпечить керування процесом комутації за допомогою оптичного випромінювання.

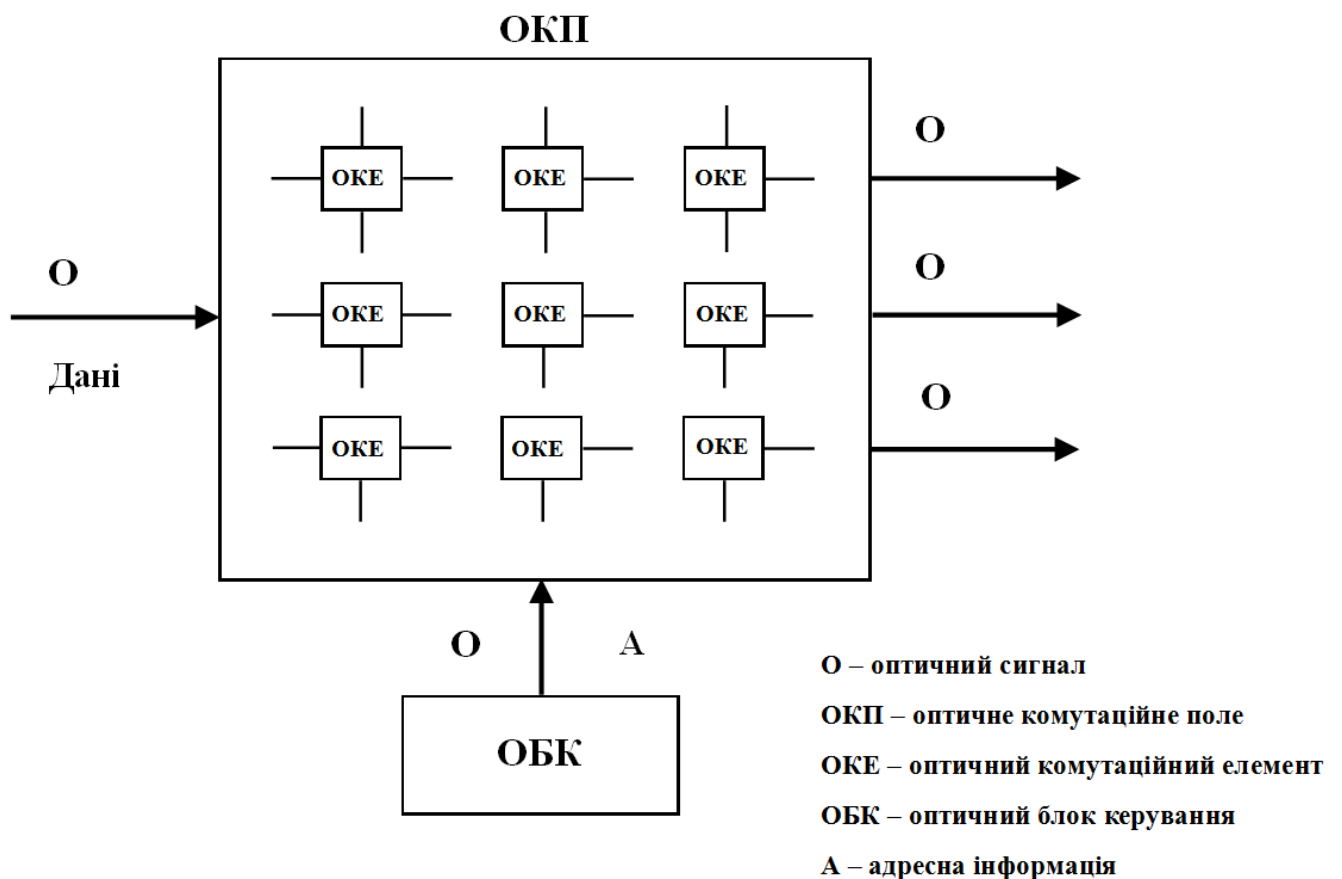


Рисунок 2.1 – Структурна схема повністю оптичної системи комутації

В такій моделі (рис. 2.1) інформаційний оптичний сигнал, що переносить деякий блок інформації, одночасно запам'ятовується в оптичному буфері та надходить на вхід оптичного блоку керування (ОБК), який виконує аналіз інформаційного блоку, виділяє адресну інформацію та після її обробки генерує оптичний сигнал керування оптичним комутаційним полем (ОКП). Потім оптичний сигнал слідує по комутаційному шляху і надходить на вихід системи комутації. Після підсилення потужності сигнал передається по оптичному світловоду.

На рисунку 2.2 показана реалізація ОКП розміром 2x2, тобто з двома ОКЕ на вході і двома ОКЕ на виході. Всього для реалізації такої схеми знадобиться чотири ОКЕ.

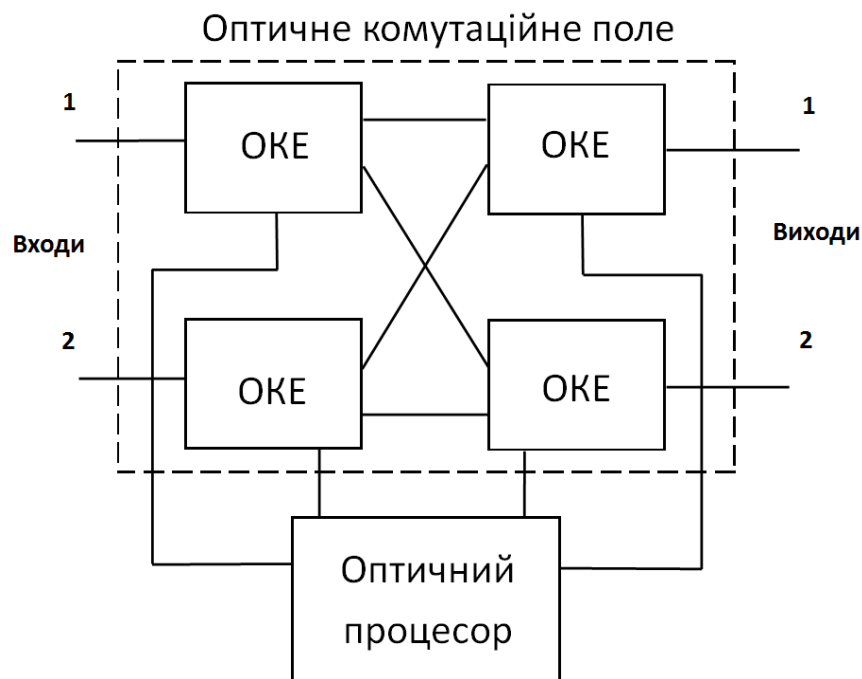


Рисунок 2.2 – Структурна схема повністю оптичної системи комутації 2x2

На підставі вищевикладеного, задача дослідження може бути сформульована наступним чином: розробка моделі та методів реалізації повністю оптичної комутації, які не використовують електрооптичного і оптоелектричного перетворення інформаційного сигналу.

В таблиці 2.2 наведено порівняння методів оптичної комутації за п'ятьма критеріями: ефективність використання смуги пропускання, затримка встановлення з'єднання, вимоги до швидкості комутації, накладні витрати на синхронізацію, адаптивність до різних видів трафіка.

## Порівняння методів оптичної комутації

Метод комутації	Ефективність використання смуги пропускання	Затримка встановлення з'єднання	Вимоги до швидкості комутації	Накладні витрати на синхронізацію	Адаптивність до різних видів трафіка
Комутація каналів	Низька	Висока	Низькі	Низькі	Низька
Комутація пакетів/ кадрів/ комірок	Висока	Низька	Високі	Високі	Висока
Комутація блоків	Висока	Низька	Середні	Низькі	Висока

Порівняльний аналіз демонструє перевагу комутації блоків над альтернативними методами комутації, що свідчить про ефективність використання цього підходу при розробці моделі повністю оптичної мережі [24].

Таким чином, можна відзначити такі відмінності методу комутації блоків від відомих аналогів:

1. Блок займає проміжне місце між фундаментальними об'єктами технологій позиційного та міточного мультиплексування (викликом та пакетом/кадром/чарункою).

2. Блок на відміну від технології позиційного мультиплексування може бути відправлений без встановлення з'єднання, що робить процес надання потрібної смуги пропускання більш оперативним.

3. При комутації блоків їх проходження через транзитні вузли комутації здійснюється без буферизації, в той час як при міточному мультиплексуванні блок інформації спочатку запам'ятовується у пам'яті, а лише потім спрямовується до вихідного порту системи комутації.

Наведені відмінності дозволяють зробити висновок, що хоча комутація блоків, за суттю, є комутацією каналів, вона все ж займає проміжне становище та представляє собою деякий симбіоз, що включає в себе переваги як технологій позиційного, так і міточного мультиплексування.

## 2.4 Дослідження фізичних принципів побудови ОКЕ

В даний момент у світі розроблена та використовується велика кількість різноманітних принципів для побудови ОСК, однак ні один з них не є лідируючим в даній області, що зумовлюється наявними схемними обмеженнями або конструктивними особливостями комутаційних елементів, побудованих на базі цих принципів.

На підставі аналізу джерел [24-29] усі фізичні принципи, які використовуються при побудові оптичних комутаційних елементів можна розділити на два класи: з оптичним та з електронним керуванням (рис. 2.3).

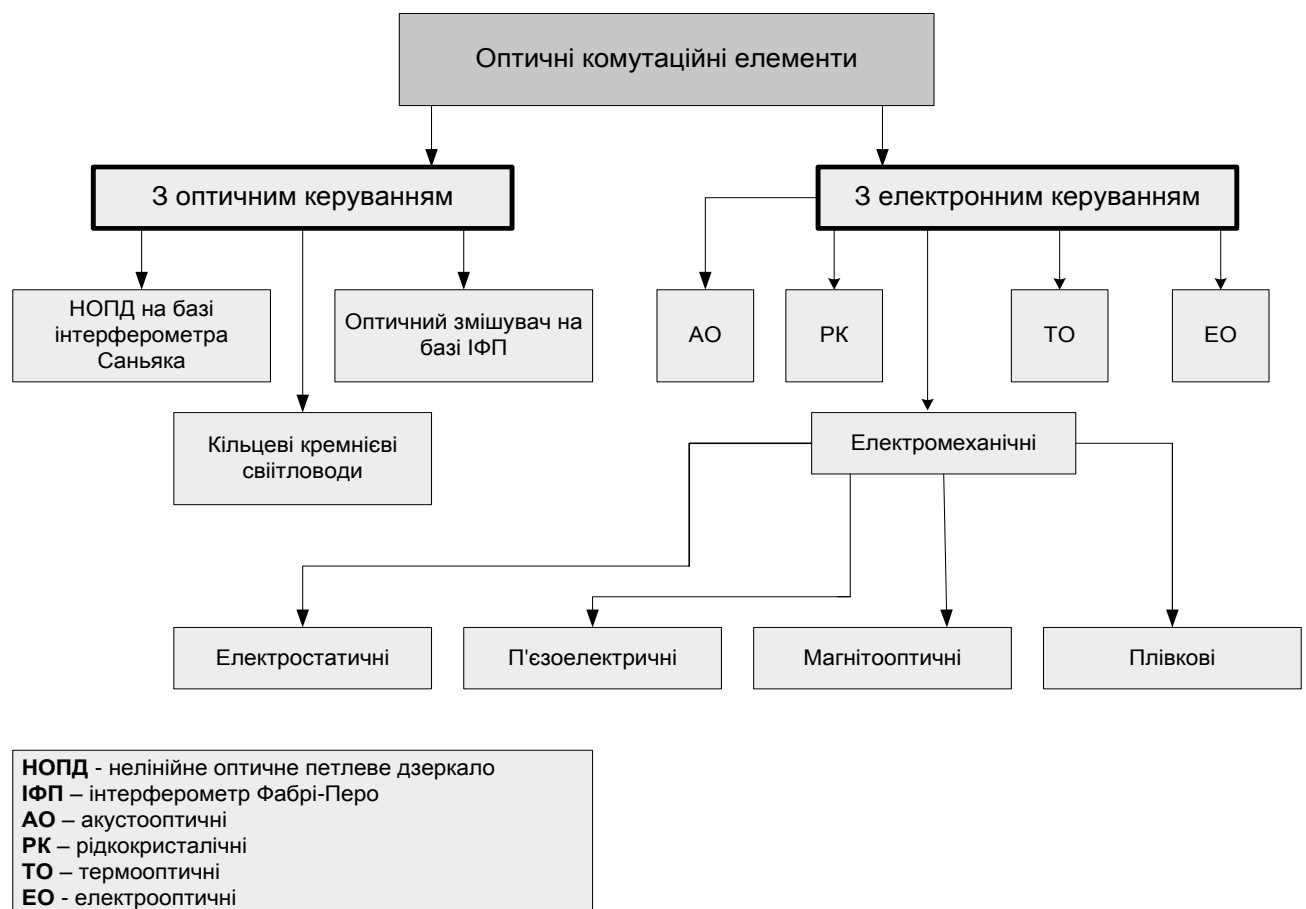


Рисунок 2.3 – Класифікація оптичних комутаційних елементів



сом, що змінює нелінійний показник заломлення в петлі інтерферометру Саньяка (ефект Керра). Інтерферометр Саньяка складається з направлено відгалужувача (НВ), два виходи якого з'єднані з волоконно-оптичною петлею затримки. Оптичний сигнал надходить на вхід  $A$  та розділяється на два сигнали, що поширюються у зустрічних напрямках.

При слабкому входному сигналі та відсутності керуючого імпульсу (КІ) два зустрічно поширюваних сигнали повертаються до відгалужувача з однаковими затримками і, отже, результуючий фазовий зсув дорівнює нулю. В цьому випадку вхідний сигнал повністю відбивається від НОПД назад, тобто інтерферометр Саньяка діє як дзеркало з 100%-им відбиттям.

Якщо коефіцієнт зв'язку НВ для КІ  $k_c = 0$  та вхідний сигнал точно синхронізований з КІ, то потужний керуючий імпульс, що збуджує плече  $B$ , не розщеплюється в НВ, а поширюється в одному напрямку з сигналом  $S_{co}$  та одночасно перетинає сигнал  $S_{cnt}$ . В результаті цього сигнал  $S_{co}$  піддається фазовій крос-модуляції (ФКМ) на всій петлі під впливом КІ, та баланс між зустрічно поширюваними сигналами  $S_{co}$  і  $S_{cnt}$  порушується. Це призводить до відносної різниці фаз  $\Delta\varphi$ . Якщо інтенсивність КІ відрегулювати так, що  $\Delta\varphi = \pi$ , то весь вхідний сигнал проходить через інтерферометр Саньяка в плече  $B$ . Це означає, що вхідний сигнал може перемикатися керуючим імпульсом між плечами  $A$  і  $B$ . Внаслідок того, що фазовий зсув попутно поширюваного сигналу зростає пропорційно довжині петлі, зменшення керуючої потужності може бути досягнуто за рахунок збільшення довжини петлі.

Таким чином, використання нелінійного оптичного петлевого дзеркала дозволяє досягнути високостабільного перемикання пристрою навіть при використанні малопотужного керуючого сигналу, що дозволяє говорити про перспективність подібних пристроїв з позицій використання у повністю оптичних мережах.

Ще один підхід до побудови ОКЕ, що керуються оптичним випромінюванням, полягає в тому, що дія керуючого оптичного сигналу призводить до зміни оптичних властивостей прозорої середовища змішувача, які впливають на умови поширення там оптичного інформаційного випромінювання. Для цього пропонується використовувати фізичний ефект нелінійної залежності показника заломлення ізотроп-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ного прозорого середовища  $n$  від інтенсивності вхідного оптичного випромінювання. Зміна значення  $n$  в зоні змішувача дією керуючого випромінювання призводить до зміни довжини хвилі інформаційного випромінювання. Якщо ж змішувач розміщений в інтерферометрі, то присутність або відсутність керуючого сигналу буде впливати на результуючу інтерференційну картину або вихідний сигнал інтерферометра.

У відношенні вибору типу інтерферометра привабливим є використання багатопроменевого інтерферометра Фабрі-Перо (ІФП), який володіє високою чутливістю та гарною завадостійкістю. Такий інтерференційний ключ пропускає інформаційний сигнал ( $a$ ) у відсутності керуючого сигналу (в зоні вихідного дзеркала ІФП має місце максимум стоячої хвилі), та відбиває його ( $b$ ) у випадку присутності ке-

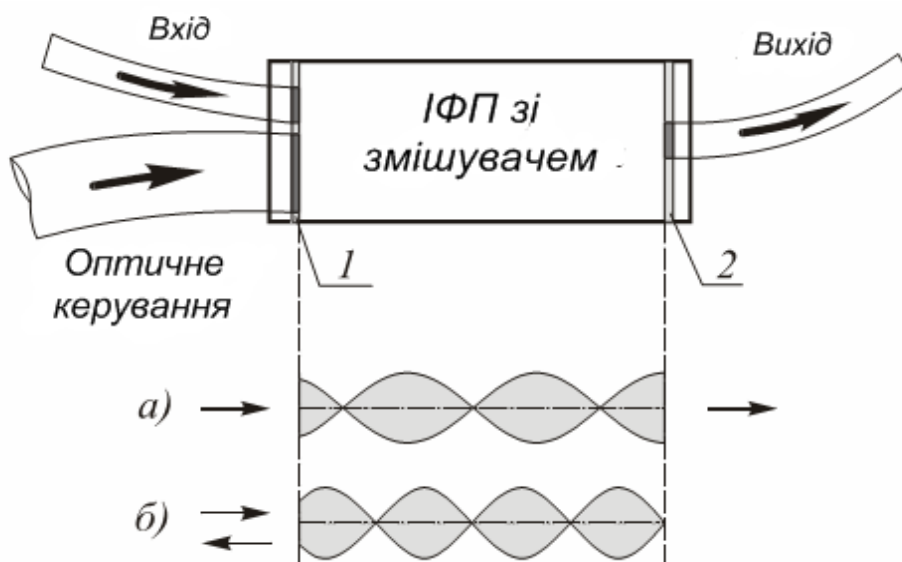


Рисунок 2.5 – Ілюстрація принципу дії інтерференційного ключа

руючого випромінювання (рис. 2.5).

Використовуючи принцип, який ґрунтується на тому, що за допомогою зміни значення  $n$  можна поблизу однієї і тієї ж просторової координати чергувати положення максимумів та мінімумів стоячої світлової хвилі, можна будувати оптичні комутаційні прибори на декілька виходів. При цьому повинні бути виконані наступні умови: максимум стоячої хвилі знаходиться в зоні одного з вихідних оптичних каналів; мінімум стоячої хвилі знаходиться в зоні іншого вихідного оптичного ка-

налу. Із заміною положень максимумів та мінімумів стоячої хвилі (дією керуючого оптичного випромінювання) відбудеться перемикання оптичних каналів (рис. 2.6).

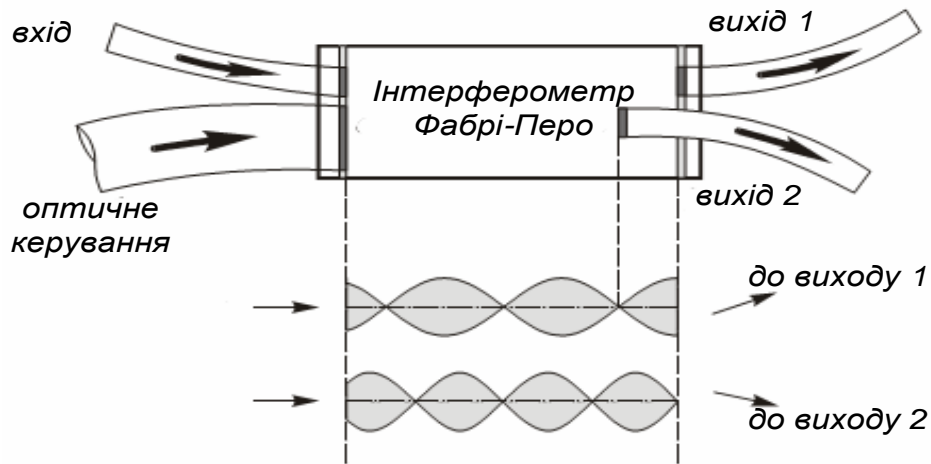


Рисунок 2.6 – Ілюстрація принципу дії інтерференційного перемикача

Подібні комутаційні пристрої мають свої переваги та недоліки. До переваг можна віднести високу швидкість перемикання, незалежність працездатності від стану поляризації випромінювання, малогабаритність конструкції. Серед недоліків слід виділити наявність постійної складової в інтерференційній картині, високу трудомісткість виготовлення пристрою, спотворення нелінійними ефектами цифрового інформаційного сигналу.

Третім напрямом розробки повністю оптичного комутаційного елементу є підхід, що базується на використанні мікрмініатюрних модуляторів світлового потоку на базі кільцевих кремнієвих світловодних структур (рис. 2.7), які винайшли вчені Корнельського університету (США).

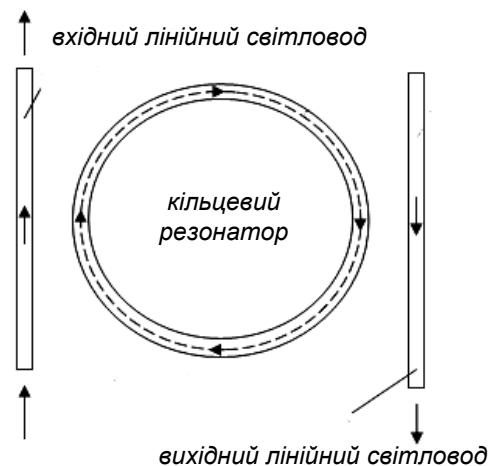


Рисунок 2.7 – Кільцевий кремнієвий модулятор

					<i>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Вхідний оптичний сигнал, у вигляді лінійно поляризованого когерентного випромінювання з заданою довжиною хвилі, спрямовується по лінійному світловоду, виконаному на підкладці з кристалічного кремнію. Основна деталь модулятора – кільцевий резонатор. В цьому пристрої світловоди виконані методом плазмового напылення *PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)* та ізольовані стінками з двоокису кремнію. В ньому може поширюватись тільки пучок світла з фіксованою довжиною хвилі, яка визначається виходячи з геометричних розмірів кільця.

Особливістю модулятора є те, що світло потрапляє з лінійного світловоду в кільце завдяки ефекту «ефемерного зв'язку» ("*evanescent coupling*"), оснований на ефекті «близького поля» ("*near-field*"). На практиці доведено, що якщо розташувати два хвилеводи достатньо близько один до одного, то енергія може передаватися між ними так, немов розділяючого їх простору (матеріалу, бар'єру) не існує. При цьому існує можливість підлаштовувати частоту резонансу та смугу пропускання кремнієвого світловоду за допомогою іншого пучка світла, який називається «пучком накачки». Оскільки кільце резонатора розташовується у безпосередній близькості від лінійного хвилеводу, то світло проникає через простір, що їх розділяє. При цьому випромінювання з резонансною довжиною хвилі буде «поглинатися». З'єднуючи за допомогою резонатора два паралельних хвилеводи, вхідний та вихідний, існує можливість отримати «оптичний вентиль», що пропускає між ними світло тільки на частотах, які кратні резонансній.

Конфігурація з декількох хвилеводів та кілець, налаштованих на різні частоти резонансу, у сукупності може представляти собою оптичну багатоканальну систему комутації. Однак істотним недоліком такого пристрою є висока залежність напівпровідникових матеріалів від температури (як відомо, коефіцієнт заломлення кремнію нелінійно зменшується із зростанням температури), а також швидкодія, яка обмежена часом релаксації вільних носіїв у кремнії, що дорівнює 450 пс.

Таким чином, усі три підходи до побудови повністю ОКЕ в однаковій мірі є перспективними з точки зору їх використання при створенні СК для повністю оптичних мереж. Однак, якщо використання НОПД та інтерферометра Фабрі-Перо дозволяє створювати високошвидкісні ОСК потоків даних, то кільцевий кремнієвий

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

модулятор може бути застосований для реалізації комутаційних пристроїв, що здійснюють захисне перемикання резервних маршрутів в оптичних мережах.

Для побудови ОКЕ з електронним керуванням можна виділити такі фізичні принципи:

- акустооптичні;
- рідкокристалічні;
- термооптичні;
- електрооптичні;
- електромеханічні.

Суть акустооптичного підходу до створення комутаційного елемента полягає у використанні акустичних хвиль для створення у твердому тілі областей з підвищеною та пониженою щільністю. Утворені неоднорідності щільності можуть відхиляти світлові пучки під різними кутами. Таким чином, змінюючи акустичні «візерунки», можна переміщувати оптичні сигнали між портами ОКЕ. Беззаперечною перевагою цього фізичного принципу є швидкодія, що дозволяє здійснювати перемикання комутаційного пристрою протягом сотень наносекунд. А той факт, що акустооптичні комутаційні елементи не містять рухомих деталей, дозволяє говорити про їх достатньо високу надійність, що підвищує шанси запровадження акустооптичного принципу при побудові ОСК. Втім, відчутним недоліком акустооптичного КЕ є його вразливість по відношенню до акустичного шуму, який може негативно позначитися на роботі пристрою.

Ще одним підходом до побудови ОКЕ, що керується електронікою, є використання технології рідких кристалів. Рідкі кристали характеризуються наявністю чіткого молекулярного порядку, який зумовлюється тим, що молекули рідких кристалів вибудовуються вздовж одного напрямку (оптичної вісі). Прикладаючи до рідкого кристалу електричну напругу, можна заставити молекули змінювати свою орієнтацію, в результаті чого деякі властивості рідкого кристалу, зокрема показник заломлення, змінюються. Здатність рідкого кристалу змінювати показник світлозаломлення може бути використаний для реалізації комутації оптичних сигналів.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

На рисунку 2.8 показаний поляризаційно-залежний рідкокристалічний комутаційний елемент. Для переадресації світлового пучка з одного порту в інший використовується багатостадійний процес. На першій стадії вхідний світловий потік потрапляє в лінзу, що розділяє поляризований сигнал на два пучки, які володіють протилежною поляризацією. Обидва пучки вдаряються з рідкокристалічними компонентами та відбиваються в іншу лінзу, де відбувається їх рекомбінація. До рідкокристалічного елемента приєднані електроди, які дозволяють, змінюючи величину напруги, керувати полярністю сигналів, що дає можливість спрямовувати оптичне випромінювання в необхідний вихідний порт [39].

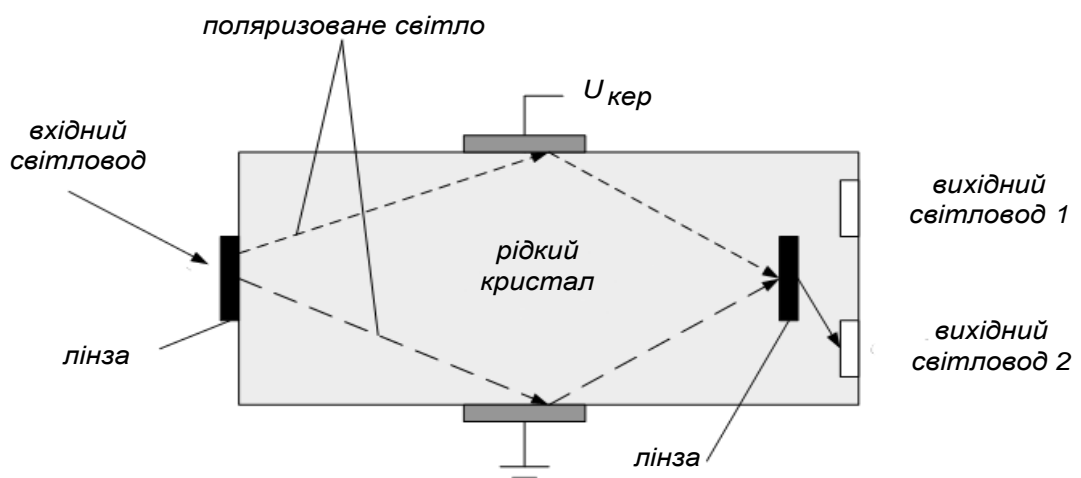


Рисунок 2.8 – Оптичний комутаційний елемент на базі рідкого кристалу

Рідкокристалічна технологія володіє декількома перевагами. Оскільки відсутні рухомі частини, комутаційні елементи цього типу відрізняються високою надійністю. Споживання енергії дуже мале, але часом необхідність нагрівання кристалів для експлуатаційних характеристик ОКЕ може підвищити вимоги до живлення. Недоліком застосування рідкокристалічної технології є обмежена швидкодія (декілька мілісекунд), що не дозволяє на даний момент застосовувати рідкокристалічні ОКЕ для високошвидкісної комутації потоків інформації.

Використання термооптичного принципу побудови ОКЕ (рис. 2.9) базується на застосуванні інтерферометра Маха-Цендера (ІМЦ) [39]. Суть методу полягає у зміні коефіцієнта заломлення речовини під дією температури. Матеріал хвилеводів ІМЦ під дією температури змінює ефективний коефіцієнт заломлення  $n_{\text{эф}}$ , а, отже, і  $\beta$  – постійну поширення моди, оскільки  $\beta = 2\pi n_{\text{эф}} / \lambda$ .

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

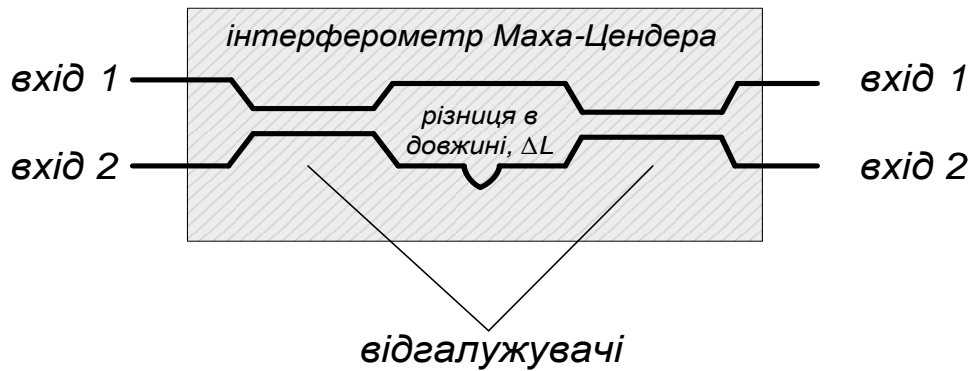


Рисунок 2.9 – Термооптичний комутаційний елемент

Це, в свою чергу, призводить до зміни різниці фаз між двома плечами інтерферометра, що викликає ефект комутації вхідного сигналу з одного виходу на інший.

Інтерферометр Маха-Цендера складається з двох послідовно включених направлених відгалужувачів, пов'язаних між собою двома оптичними хвилеводами різної довжини з метою створення різниці фаз  $\Delta L$ . Враховуючи, що кожний направлений відгалужувач створює на виходах різницю фаз  $\pi/2$ , різниця фаз на виходах інтерферометра складає  $\pi + \beta\Delta L$  (для виходу 1) і  $\beta\Delta L$  (для виходу 2). Обираючи  $\Delta L$  таким чином, щоб  $\beta\Delta L = k\pi$ , отримуємо різницю фаз між виходами, що дорівнює  $\pi$ . Отже, сигнал з входу 1 потрапляє на вихід 1 в тому випадку, якщо для нього рівність  $\beta\Delta L = k\pi$  відповідає непарному  $k$ . Відповідно, сигнал потрапляє на вихід 2, якщо рівність відповідає парному  $k$ . Локальне дозоване імпульсне нагрівання елемента, яке змінює ліву частину рівності  $\beta\Delta L = k\pi$ , еквівалентне зміні парності  $k$ , що призводить до комутації оптичного сигналу. Термічна природа розглянутого ОКЕ робить їх інерційними, що значно обмежує швидкодію перемикання елемента. Більш того, термооптичні КЕ володіють великими втратами та малим перехідним загасанням, що негативно позначається на можливості їх застосування в СК оптичних ТМ.

Електрооптичний комутаційний елемент (рис. 2.10) оснований на електрооптичному ефекті Поккельса, який полягає у зміні показника заломлення матеріалу пропорційно прикладеній електричній напрузі.

										Арк.
										49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРМ.КІ.1.884-03.3.9					

Ефект Поккельса может спостерігатися тільки в кристалах, що не мають центру симетрії.

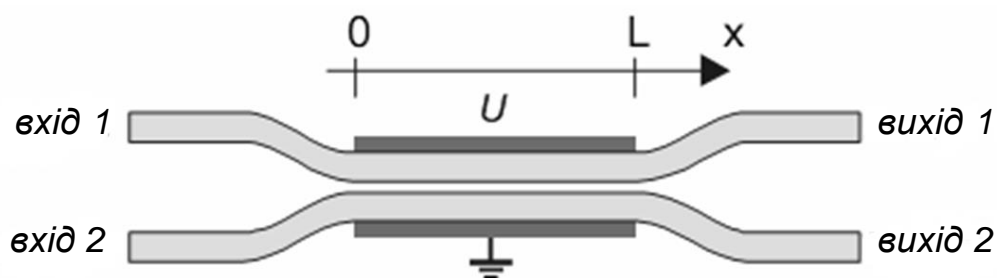


Рисунок 2.10 – Електрооптичний комутаційний елемент

Випромінювання, введене в один світловод, проникає в інший за рахунок реактивних полів двох хвилеводів. Погонний коефіцієнт зв'язку  $K$  залежить від параметрів хвилеводу, довжини хвилі  $\lambda$  та ширини зазору  $g$  між хвилеводами. Відгалужувач характеризується різницею постійних поширення двох хвилеводів (2.1).

$$\Delta\beta = \frac{2\pi(N_1 - N_2)}{\lambda}, \quad (2.1)$$

де  $N_1, N_2$  – ефективні показники заломлення,

$\lambda$  – довжина хвилі.

Прикладаючи електричну напругу до електродів, розташованих по бокам або зверху та знизу хвилеводів, що утворюють комірку Поккельса, можна регулювати фазовий зсув сигналу за рахунок лінійного електрооптичного ефекту.

У випадку повністю симетричної конструкції на базі двох однакових хвилеводів у відсутності напруги ( $U = \Delta\beta/2 = 0$ ) повна передача потужності відбувається при виконанні рівності 2.2.

$$KL = \frac{(2n + 1)\pi}{2}, \quad (2.2)$$

де  $K$  – погонний коефіцієнт зв'язку,

$n$  – ціле число,

$L$  – довжина електродів.

Слід зауважити, що при керуючій напрузі, що відрізняється від нуля, повна передача потужності неможлива за будь-яких значень  $KL$ . Паралельне проходження

світлових сигналів можна забезпечити за рахунок подачі електричного потенціалу, що вводить фазовий зсув (2.3).

$$\Delta\beta = \sqrt{3}\pi / L \quad (2.3)$$

У відсутності напруги ефективність зв'язку між хвилеводами складає 100%, що означає повне кросування оптичних сигналів, які, надходячи в один хвилевод, виходять з іншого.

До недоліків електрооптичного КЕ відносяться високі поляризаційні втрати та втрати, що вносяться. Тим не менш, електрооптичні комутаційні елементи, незважаючи на електронне керування, володіють виключно високою швидкістю перемикання (близько 10...100 пс), що дозволяє застосовувати їх для створення комутаційних пристроїв повністю оптичних мереж.

До електромеханічних відносять ОКЕ, які реалізують технології мікроелектромеханічних систем (*MEMS*), які представляють собою набір рухомих дзеркал дуже малого розміру, з діаметром менше міліметра, які утворюють оптичне комутаційне поле. Згідно фізичному принципу, який застосовується для керування мініатюрними дзеркалами, виділяють наступні підкласи електромеханічних КЕ [39]:

- плівкові;
- електростатичні;
- п'єзоелектричні;
- магнітооптичні.

На рисунку 2.11 показаний принцип роботи плівкового ОКЕ, дія якого ґрунтується на ефекті оптичної дифракції.

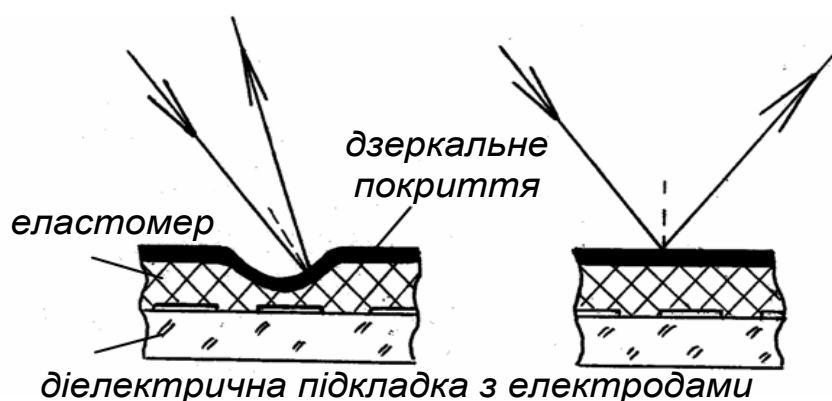


Рисунок 2.11 – Принцип роботи плівкового комутаційного елементу

										Арк.
										51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРМ.КІ.1.884-03.3.9					

Еластомер (полімерна речовина, що здатна до оборотної деформації під дією електричного поля), наноситься на діелектричну пластину з сіткою електродів, та вкривається зверху гнучкою відбиваючою плівкою. При подачі керуючої напруги на електроди відбувається локальна деформація полімеру, що викликає дифракцію падаючого світла. Промінь світла, що потрапляє на цю точку плівки, дифрагує та, проходячи через спеціальну оптичну систему, формує вихідний оптичний сигнал у вигляді точки, що світиться.

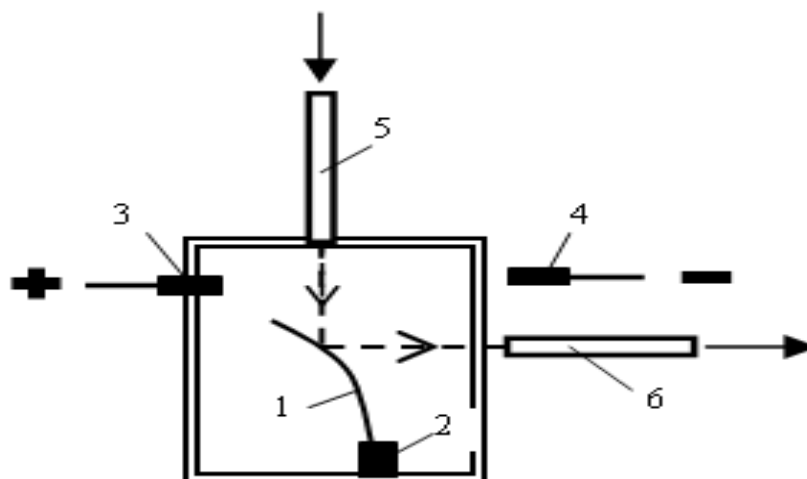


Рисунок 2.12 – Електростатичний комутаційний елемент

Електростатичний оптичний КЕ (рис. 2.12) базується на дії кулонівських сил, які здійснюють його переміщення у просторі. Гнучкий язичок 1, виготовлений з полімерної плівки, закріплюється одним кінцем в ізоляційному утримувачі 2. Його інший кінець розташовується у безпосередній близькості від пари електродів 3 і 4, до яких підведені різнополярні електростатичні потенціали від джерела керуючої напруги. Наелектризований полімерний язичок прагне притягнутися до того з контактів, що має заряд протилежного знаку, та відповідно вигинається, але його довжина підібрана так, що він не торкається при цьому контакту. Дзеркальна поверхня язичка утворює нахилений відбивач, та промінь, що виходить з вхідного світловоду 5, потрапляє через збираючу лінзу в торець вихідного світловоду 6, здійснюючи процес комутації оптичного сигналу.

П'єзоелектричні КЕ базуються на п'єзоелектричних актуаторах. Під актуатором розуміють електромеханічний привод, дія якого заснована на різноманітних фі-



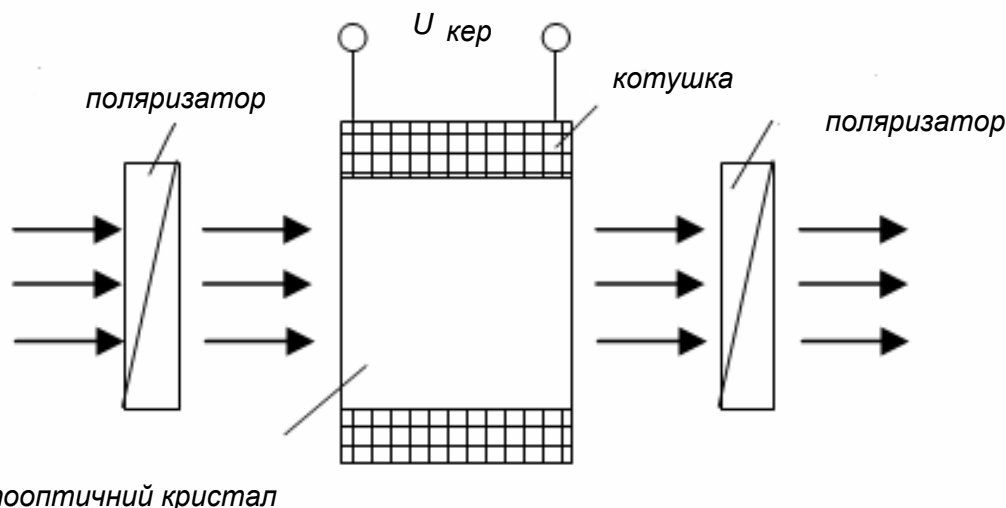


Рисунок 2.14 – Магнітооптичний комутаційний елемент

Два поляризаційних фільтри, встановлених на входе та виході модулятора, дозволяють перетворити обертання площини поляризації в амплітудну модуляцію світлового потоку. Підбираючи розміри кристалу та величину прикладеної напруги, можна досягнути глибини модуляції близькій до одиниці, що відповідає повній комутації оптичного сигналу. Магнітооптичні модулятори характеризуються великою споживаною потужністю та низькою швидкістю (не більше  $10^{-5}$  с). Крім того, вони піддаються сильному розігріву через сильне поглинання випромінювання та в цілому не є технологічними, тому вони практично не використовуються в сучасній техніці.

Таким чином, з усіх фізичних принципів, що можна використати для реалізації електромеханічних комутаційних елементів, найбільшими перевагами володіють п'єзоелектричні актуатори [30]. До числа їх переваг можна віднести малу споживану потужність, достатньо високу механічну міцність, надійність та технологічність, а також малі габарити та низьку вартість. Ці обставини дозволяють розвивати п'єзоелектричний підхід з метою зменшення часу перемикання комутаційного елемента, який на даний момент складає кілька мікросекунд.

На сьогоднішній день запропонований підхід, дозволяє підвищити швидкість ОМЕ на базі технології *MEMS* [32]. Зокрема, мова йде про використання так званого ефекту «розширення», який дозволяє значно збільшити швидкість пристроїв

*MEMS* за рахунок різкого збільшення лінійної швидкості переміщення променя при обмеженій кутовій швидкості обертання дзеркала (рис. 2.15).

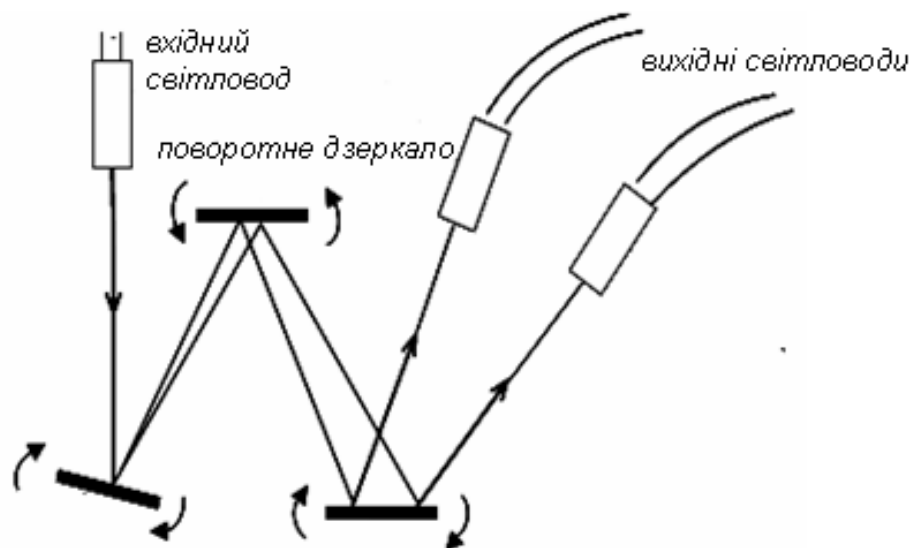


Рисунок 2.15 – Мультидзеркальний комутатор *MEMS*

Застосування електромеханічних ОКЕ дозволить будувати ОСК великої ємності, які можуть застосовуватися після демультиплексора, коли вихідний сигнал вже розділений на складові хвилі. За рахунок повороту мініатюрного дзеркала на певний кут вихідний промінь певної хвилі спрямовується у відповідне волокно (рис. 2.16).

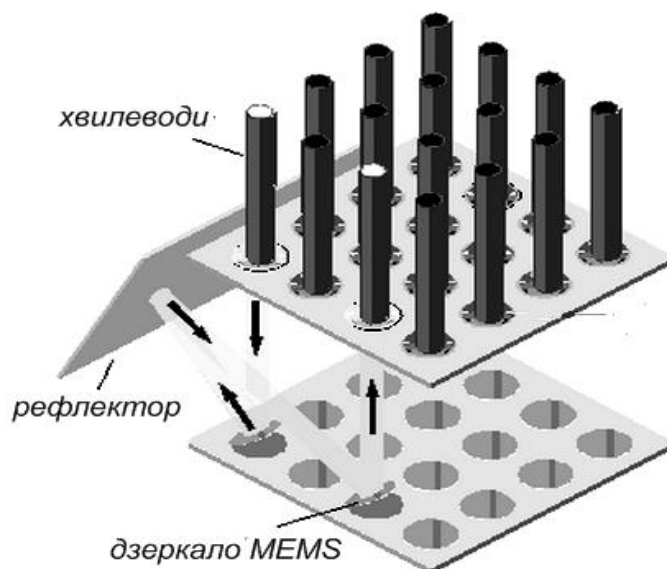


Рисунок 2.16 – ОКЕ на базі технології *MEMS*

На підставі аналізу фізичних принципів побудови ОКЕ можна зробити висновок, що на сьогоднішній день, в період, коли пристрої керування реалізуються на

базі електронних компонентів, найбільш перспективним є застосування електрооптичних та електромеханічних комутаційних елементів. Ці підходи до реалізації оптичних комутаційних пристроїв, хоча і поступаються у швидкодії комутаційним елементам з оптичним керуванням, але можуть бути ефективно використані при побудові оптичних мереж перехідного періоду, в яких керування комутацією здійснюється за допомогою електронних компонентів. Електрооптичні та електромеханічні КЕ характеризуються відносно невисокою вартістю, що дозволяє використовувати ці комутаційні елементи для побудови просторових ОСК великої ємності.

### Висновки до другого розділу

Розроблена модель мережі з оптичною комутацією блоків інформації надає можливість здійснювати комутацію інформаційного оптичного сигналу без О/Е/О перетворення та буферизації сигналу в систем комутації, що дозволяє обробляти терабітні потоки даних. Швидкодія мережі з оптичною комутацією блоків інформації визначається швидкістю перемикання оптичного комутаційного поля, що ставить завдання розробки високошвидкісних оптичних комутаційних пристроїв великої ємності. Впровадження концепції *AON*, що використовує оптичні методи обробки інформаційного сигналу, дозволить досягти підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж за рахунок застосування оптичних компонентів, що мають більш високу швидкодію порівняно з електронними аналогами.

Для підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж можуть застосовуватися різні методи (рис.2.17):

1. Використання більш високочастотних сигналів: цей метод полягає у збільшенні швидкості передачі даних шляхом використання сигналів з більш високою частотою. Це може бути досягнуто за допомогою оптичних пристроїв, таких як лазери з вищою частотою генерації.

Використання більш ефективних методів модуляції: модуляція сигналів в оптичних мережах забезпечує передачу інформації на світловому сигналі. Для підвищення пропускної здатності можуть бути використані більш ефективні методи модуляції, такі як квадратурна амплітудна модуляція (QAM).

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## РОЗДІЛ 3

# МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОГО КОМУТАЦІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОТМ

### 3.1 Розв’язання задачі вибору конструкції ОКЕ

Як показано у попередньому розділі на сьогодні існує достатньо велика кількість пристроїв, які використовуються для модуляції світлового потоку в оптичних системах: магнітооптичні, п’єзоелектричні, *MEMS (microelectromechanical systems* – мікроелектромеханічні), бульбашкові, на рідких кристалах, електрооптичні, термооптичні, на основі кільцевих кремнієвих світлопровідних структур та акустооптичні перетворювачі.

За весь період розвитку оптичних мереж була створена велика кількість різноманітних конструкцій комутаторів (або комутаційних елементів) оптичних сигналів для забезпечення великої швидкодії оптичних мереж, зменшення споживчої потужності, що призведе в майбутньому до зменшення вартості мереж. Для того, щоб досягти поставленої мети по збільшенню швидкодії та пропускної спроможності мережі, потрібно розв’язати задачу вибору конструкції оптичного комутаційного елемента. Тобто вибрати серед існуючих альтернатив ту, яка найбільше буде задовольняти поставленим умовам.

Вибираючи конструкцію ОКЕ, потрібно визначити наступні умови. Швидкодія оптичного ОКЕ  $Q \approx 1 \cdot 10^{12}$  оп/с і вище, ціна продукту  $N = 400000$  грн. або менша. Також показник прийнятності споживчої потужності повинен бути не більше 150 Вт, тобто  $L \leq 150$ , кількість комутаційних ланок не менше 2, тобто  $K \geq 2$ . Основними обмеженнями при виборі конструкції, являються: надійність, яка повинна становити не менше 300000 год. без відмов, тобто  $G \geq 300000$  год. Щоб збільшити пропускну спроможність повністю оптичної телекомунікаційної мережі, необхідно перш за все правильно обрати ОКЕ – з існуючих альтернатив знайти ту, яка найбільше задовольнятиме умову збільшення швидкодії систем комутації оптичних сигналів.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення завдання використано критерій Парето, що дозволить дійти базису конструкцій ОКЕ, відкинувши варіанти, які поступаються за сформованими показниками. Завдання можна вважати вирішеним за використання наступних показників прийнятності:

$Q$  – швидкодія, тобто здатність виконувати з необхідною швидкістю роботу, для якої вони призначені (чим менша швидкодія, тим менша оцінка);

$N$  – вартість (що нижча ціна, то вище оцінка);

$L$  – споживана потужність (чим менше споживана потужність, то вище оцінка);

$G$  – надійність, тобто здатність комутаційного елемента зберігати у встановлених межах часу значення всіх параметрів (чим менша надійність, то менша оцінка);

$C$  – тип керування комутацією (оптичне керування – оцінка максимальна);

$T$  – чутливість до температурних шумів, тобто чутливість до шуму, який виникає за випадкового відхилення електронів у провідниках, які мають деяку кінцеву температуру.

Таким чином, показники прийнятності для вирішуваного завдання вибору набудуть наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(x) \rightarrow \max \\ N(x) \rightarrow \min \\ L(x) \rightarrow \min \\ G(x) \rightarrow \max \\ C(x) \rightarrow \max \\ T(x) \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (3.1)$$

До кожного показника проведемо шкалювання за шкалою від «1...5», результати якого наведено у табл. 3.1.

Для вирішення задачі вибору послідовно використані векторний та скалярний критерії. Векторний дозволить відкинути завчасно гірші варіанти, а скалярний критерій дозволить отримати єдине рішення.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Шкалювання показників прийнятності при виборі ОКЕ

Оптичний комутаційний елемент	<i>Q</i>	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>G</i>	<i>C</i>	<i>T</i>
Акустооптичний	3	4	4	2	1	5
Жидкокристаличний	3	3	2	5	1	2
Термооптичний	5	4	4	5	1	3
Електрооптичний	4	3	2	5	1	2
Плівковий	4	5	4	3	1	3
Електростатичний	3	3	4	3	1	3
П'єзоелектричний	1	4	5	2	1	5
Магнітооптичний	2	4	4	3	1	4
На основі НОПД	4	3	5	4	5	4
На базі ІФП	5	4	3	5	5	4
На основі кільцевих кремнієвих світло-проводних структур	4	5	4	3	5	5

Побудуємо діаграму Хассе, яка є візуалізацією альтернатив та значень їх показників, рис. 3.1.

Зменшимо кількість альтернатив, скориставшись векторним критерієм. Для цього проведемо порівняння ОКЕ, побудованих на п'єзоелектричних оптичних комутаційних елементах з *MEMS*. За першим показником прийнятності, швидкодія *MEMS* переважає у порівнянні з п'єзоелектричним ОКЕ, але за другим вони мають однакові показники, тому за критерієм Парето ці дві конструкції заносимо в базис. Аналогічним чином проведено попарне порівняння інших альтернатив. В результаті кількість варіантів зменшено до 6-ти: ОКЕ на рідких кристалах, електро-оптичний КЕ, термооптичний КЕ, ОКЕ на основі НОПД, ОКЕ на основі кільцевих кремнієвих світлопроводних структур та ОКЕ на основі ІФП, що дозволило спростити діаграму Хассе до вигляду, показаного на рис. 3.2.

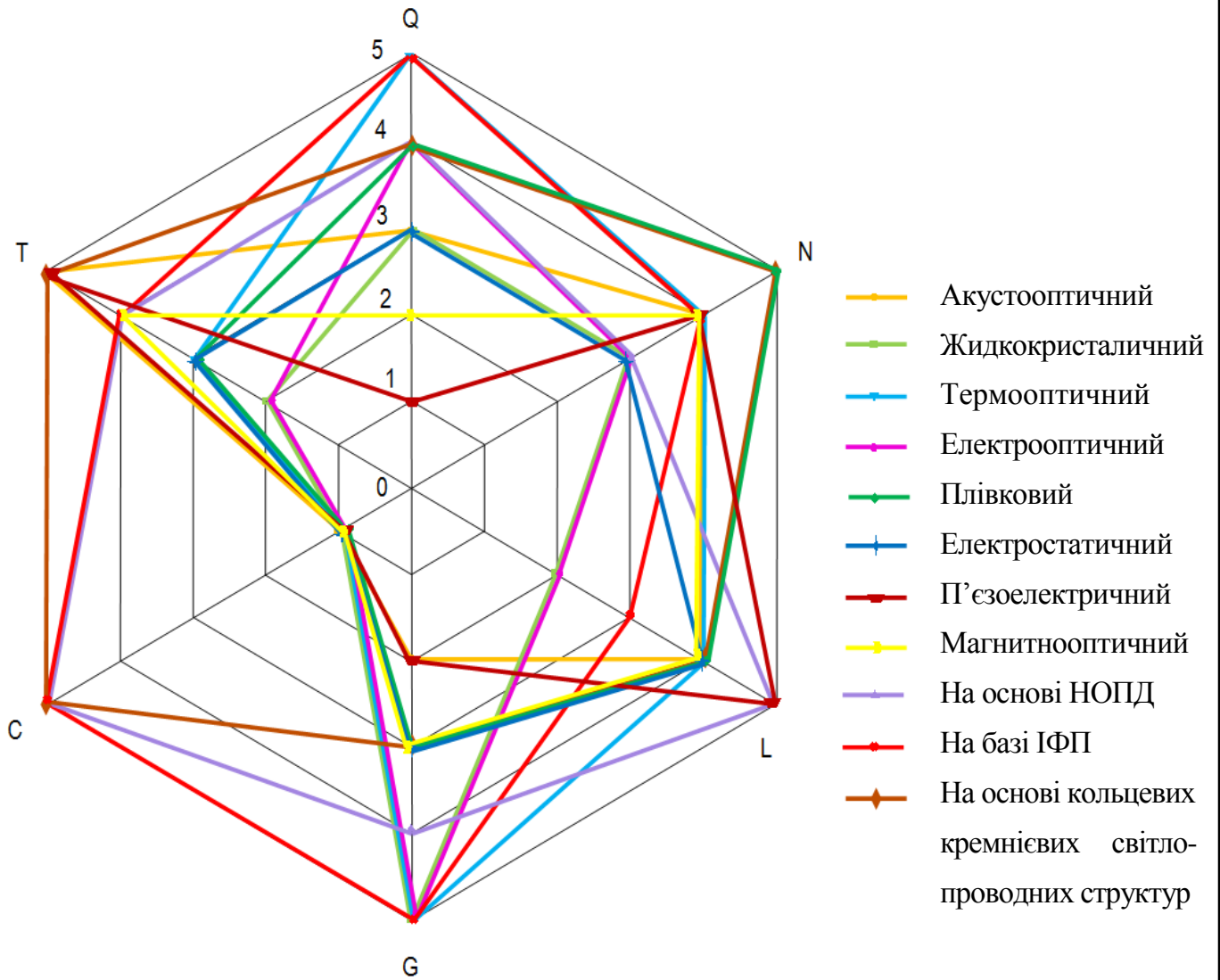


Рисунок 3.1 – Діаграма показників якості обраних варіантів ОКЕ

Так як векторний критерій не дозволяє досягти єдиного результату, використовуємо скалярний критерій, що дозволяє отримати єдине рішення, тобто вибрати оптимальну конструкцію ОКЕ. Провівши аналіз завдання вибору, можна дійти висновку, що вона є детермінованою за умов визначеності, оскільки між альтернативою і наслідком існує лише одна функціональна залежність, тому вирішення завдання вибору використано критерій Байеса – Лапласа, який виражається функцією:

$$W' = \sum_{l=1}^M a_l k_l; \quad \sum_{l=1}^M a_l = 1, \quad a_l \geq 0, \quad \overline{l=1, M} \quad (3.2)$$

де  $a_l$  - вагові коефіцієнти відповідних показників прийнятності;

$k_l$  - нормоване значення.



Коефіцієнти значущості експерт розставляє на власний розсуд. Також для того, щоб вирішити задачу вибору критерієм Байєса-Лапласа, потрібно привести всі мінімальні та максимальні критерії до одного вигляду. У даному випадку всі критерії якості приведемо до максимального значення, внаслідок чого отримаємо:

$$\begin{pmatrix} 0,3 & 0,05 & 0,15 & 0,15 & 0,3 & 0,05 \\ 3 & 3 & 2 & 5 & 1 & 2 \\ 5 & 4 & 4 & 5 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 5 & 1 & 2 \\ 4 & 3 & 5 & 4 & 5 & 4 \\ 5 & 4 & 3 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 3 & 5 & 5 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 0,3 & 0,05 & 0,15 & 0,15 & 0,3 & 0,05 \\ 3 & 2 & 3 & 5 & 1 & 3 \\ 5 & 1 & 1 & 5 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 3 & 5 & 1 & 3 \\ 4 & 2 & 0 & 4 & 5 & 1 \\ 5 & 1 & 2 & 5 & 5 & 1 \\ 4 & 0 & 1 & 3 & 5 & 0 \end{pmatrix}$$

Після того, як привели всі коефіцієнти до максимального значення, знайдемо кінцеве значення для кожної альтернативи:

$$\begin{pmatrix} 3 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,05 \\ 5 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,05 \\ 4 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,05 \\ 4 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,05 + 0 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,05 \\ 5 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,05 \\ 4 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,05 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2,65 \\ 2,85 \\ 2,95 \\ 3,45 \\ 4,15 \\ 3,30 \end{pmatrix}$$

Для того щоб дійти єдиного результату, з отриманої матриці знаходимо максимальне значення.

$$\begin{pmatrix} 2,65 \\ 2,85 \\ 2,95 \\ 3,45 \\ 4,15 \\ 3,30 \end{pmatrix}$$

Отримане значення, 4,15 відповідає конструкції на основі ІФП. Тому можна зробити висновок, що під час розв'язання задачі вибору критерієм Байєса-Лапласа, оптимальною конструкцією для ОКЕ буде конструкція на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

В результаті розв'язання багатокритеріальної задачі вибору конструкції ОКЕ було розглянуто одинадцять альтернатив. При розв'язанні задачі вибору конструкції ОКЕ векторним критерієм, зменшено кількість варіантів конструкцій ОКЕ до 6-ти: жидкокристаличний, термооптичний, електрооптичний, на основі НОПД, на базі ІФП, на основі кільцевих кремнієвих світло-проводних структур. Далі за допомогою критерія Байєса-Лапласа, визначено оптимальну конструкцію для ОКЕ. В даному випадку це конструкція на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

### 3.2 Моделювання ОКЕ на базі інтерферометра Фабрі-Перо

В даний час проводяться дослідження в області створення повністю оптичних компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), які використовують в якості управління оптичний сигнал. Дія керуючого сигналу зводиться до зміни оптичних властивостей прозорого середовища пристрою (змішувача) [39], які впливають на умови розповсюдження в змішувачі оптичного випромінювання, яке переносить інформаційний сигнал і зазвичай має іншу довжину. Велику увагу приділено розробці оптичних ключів і ОКЕ, які засновані на ефекті нелінійного двопротенезаломлення [28].

Принцип їх роботи можна сформулювати наступним чином. Інформаційне випромінювання подається в змішувач, який виконаний з анізотропного матеріалу, двопротенезаломлюючі властивості якого залежать від щільності оптичного випромінювання – присутності або відсутності більш інтенсивного керуючого випромінювання. Якщо в області вихідного торця (торців) змішувача розмістити вихідні оптичні світловоди, координати місць кріплень яких відповідають точкам проходження інформаційного випромінювання при наявності і відсутності керуючого сигналу, то такий оптичний пристрій буде виконувати функцію оптичного перемикача каналів [25]. Подібні ОКЕ володіють хорошими технічними показниками (надійністю, завадостійкістю, швидкодією, терміном служби і т.д.) і можуть знайти широке застосування в АОН-мережах. Але дані компоненти володіють і недоліками. По-перше, очевидно, що такі пристрої є досить чутливими до стану поляризації як інформаційного, так і керуючого випромінювань [26-29]. Це на-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кладає обмеження на використання волокна або призводить до додаткового використання оптичного поляризатора на вході пристрою, що знижує динамічний діапазон сигналу. По-друге, для того, щоб розділити в просторі змішувача світлові інформаційні пучки перш, ніж вони потраплять у вихідні світловоди, потрібна чимала (відносно діаметра світловода) відстань – близько декількох десятків і навіть сотень мікрометрів [40, 45]. Це не тільки збільшує поперечні розміри змішувача, але і знижує завадостійкість пристрою до впливу вібрації. З метою вивчення можливості створення повністю ОКЕ, які будуть вирішувати аналогічні технічні задачі, пропонується використовувати фізичний ефект нелінійної залежності показника заломлення ізотропного прозорого середовища від інтенсивності вхідного оптичного випромінювання. Зміна значення показника заломлення ізотропного прозорого середовища в області змішувача під дією керуючого випромінювання призведе до зміни довжини хвилі інформаційного випромінювання [25]. Якщо змішувач поміщений в інтерферометр, то присутність чи відсутність керуючого випромінювання буде здійснювати вплив на результуючу інтерференційну картину або вихідний сигнал інтерферометра.

У інтерферометрі світло яке надходить від джерела, розділяється на два пучки, які потім поєднуються для утворення в області їх накладення інтерференційної картини. Залежно від способу розділення початкового пучка світла, інтерферометри класифікують на пристрої з розподілом вихідної хвилі по хвильовому фронту і амплітудним розподілом [25]. У приладах першого типу інтерференційні пучки формуються з різних ділянок вихідного хвильового фронту (інтерференційна схема Юнга, інтерферометр Релея, дзеркала Френеля, Ллойда і т.д.). У приладах другого типу пучок ділиться на дві частини з допомогою однієї або декількох напівпрозорих роздільних пластин в результаті відбиття і заломлення світла (інтерферометри Майкельсона, Маха-Цендера, Жамена та ін.) За кількістю інтерференційних пучків інтерферометри діляться на двопроменеві і багатопроменеві. До перших відносяться всі перераховані вище інтерферометри, а до останніх відноситься, наприклад, інтерферометр Фабрі-Перо. У відношенні вибору типу інтерферометра для повністю ОКЕ кращим залишається використання багатопроме-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

невого інтерферометра Фабрі-Перо (ІФП) [39] у порівнянні з двопроменевими інтерференційними пристроями: Маха-Цендера, Майкельсона і т.д. Поясненням цього вибору є більш висока чутливість ІФП (насамперед через велику кількість інтерферуючих променів), так і завадостійкість, що пов'язано з впливом діючих чинників відразу на всі промені, а не на один із каналів.

### **Розрахунок потужності керуючого випромінювання**

В повністю оптичних інтерференційних комутаційних елементах, стан прозодатності не залежить від стану поляризації вхідного випромінювання. За малими габаритами пристрою, криється чимало складнощів реалізації. До методологічних складностей слід віднести наявність постійної складової в інтерференційній картині ІФП, що призведе до адитивного шуму в суміжному каналі і зниження динамічного діапазону цифрового сигналу, що подається в підключений канал. Не менш значущими є технологічні проблеми, що стоять на шляху до створення інтерференційних комутаційних елементів. До них слід віднести спосіб виготовлення змішувача, що забезпечує різне розташування торців вихідних світловодів щодо вхідного торця, з урахуванням вимоги про мінімізацію його розмірів. Останнє пов'язано з бажанням використати прийнятні потужності керуючого випромінювання з метою зниження негативного впливу нелінійних оптичних ефектів в підвідному світловоді, так і в змішувачі з одночасним ефективним зміщенням показника заломлення змішувача, тобто отриманням у змішувачі високих оптичних інтенсивностей. У цьому зв'язку буде актуальним питання мінімізації паразитних нелінійних ефектів безпосередньо в області змішувача, де необхідно реалізувати високу щільність оптичного випромінювання для ефективною зміни коефіцієнта заломлення.

Для того щоб мінімізувати паразитні нелінійні ефекти безпосередньо в області змішувача потрібно зменшити потужність керуючого випромінювання, що в свою чергу дозволяє виконати змішувач ще менших розмірів. Але зменшення змішувача призводить до виникнення ряду проблем. Малі розміри змішувача ускладнюють монтаж багатомодового або декількох одномодових світловодів стандартного діаметра в області його вхідних і вихідних торців. Для забезпечення

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зручності технічної реалізації пристрою, а також для зниження потужності керуючого випромінювання пропонується змішувач виконувати у формі тіла обертання із звуженою середньою частиною, рис. 1:

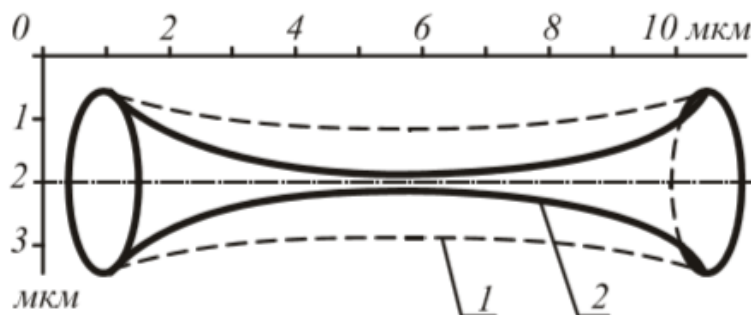


Рисунок 3.4 – Змішувач, який представляє собою область резонатора Фабрі-Перо: 1 – направляюча багатомодова структура, 2 – направляюча одномодова структура

Завданням даного розділу є визначення залежності необхідної потужності керуючого випромінювання, при якій паразитні нелінійні ефекти були мінімальними, та розмірів змішувача, які б дозволяли зручно виконувати монтаж багатомодового або декількох одномодових світловодів стандартного діаметра в області його вхідних і вихідних торців. Нехай у відсутності керуючого випромінювання ІФП налаштований на максимум пропускання інформаційного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  (для наглядності оцінки розглядається інтерференційний ключ). Подача керуючого випромінювання змінює показник заломлення, і робоча точка ІФП зміщується по його передавальній характеристиці.

Позначимо для першого випадку різницю ходу променів  $\delta_1$ , для другого –  $\delta_2$ . Тоді з урахуванням виразу для передавальної функції ІФП для інтенсивності інформаційного сигналу на виході  $I_{\text{инф}}^{\text{вих}}$  відносно її вхідного значення  $I_{\text{инф}}^{\text{вх}}$  справедливо наступне:

$$I_{\text{инф},1}^{\text{вих}} = I_{\text{инф}}^{\text{вих}}(\delta_1) = 1 \cdot I_{\text{инф}}^{\text{вх}} = I_{\text{инф}}^{\text{вх}}$$

та

$$I_{\text{инф},2}^{\text{вих}} = I_{\text{инф}}^{\text{вих}}(\delta_2) = \frac{I_{\text{инф}}^{\text{вх}}}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)}$$

(3.3)

									Арк.
									67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРМ.КІ.1.884-03.3.9				

З урахуванням того, що передавальна функція ІФП має постійну складову, згідно [5] рівну:

$$I_{inf,\min}^{ex} = I_{inf}^{ex} \cdot \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \quad (3.4)$$

і, крім того, що реалізоване технічно найменше значення може перевершувати  $I_{inf,\min}^{ex}$  в  $\alpha$  раз, то для  $I_{inf,2}^{ex}$  можна записати:

$$\frac{I_{inf}^{ex}(\delta_2)}{I_{inf}^{ex}} = \frac{1}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)} = \alpha \cdot \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \quad (3.5)$$

Із (3) отримуємо відношення для  $\delta_2 / 2$ :

$$\frac{\delta_2}{2} = \arcsin \sqrt{S},$$

$$S = \left( \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{1+\rho}{1-\rho} \right)^2 - 1 \right) \cdot \frac{(1-\rho)^2}{4\rho} \quad (3.6)$$

Використовуючи формулу визначення результуючого набігу фаз променів в інтерферометрі Фабрі-Перо  $\frac{2\pi h}{\lambda} \cdot \Delta n$ , та формулу (3.6) запишемо формулу (3.7):

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n = \arcsin \sqrt{S} = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \bar{n} \cdot \bar{Z} \cdot \frac{P}{\pi \cdot r^2} \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) являє собою відношення між конструктивними параметрами пристрою: довжиною, радіусом змішувача та потужністю керуючого випромінювання. Використовуючи формули (3.6) і (3.7), виведемо формулу для визначення потужності випромінювання  $P$  (3.8):

$$P = \frac{\lambda \cdot r^2 \cdot \arcsin \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1+\rho}{1-\rho} \right)^2 - 1 \right) \cdot \frac{(1-\rho)^2}{4\rho}}}{4 \cdot h \cdot \bar{n} \cdot \bar{Z}}, \quad (3.8)$$

де  $\lambda = (0,85; 1,3; 1,55 \text{ мкм})$  – довжина хвилі;

$r = (1 \dots 10 \text{ мкм})$  – радіус змішувача;

$\rho = (0 \dots 1)$  – коефіцієнт відбиття дзеркал;

									Арк.
									68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРМ.КІ.1.884-03.3.9				



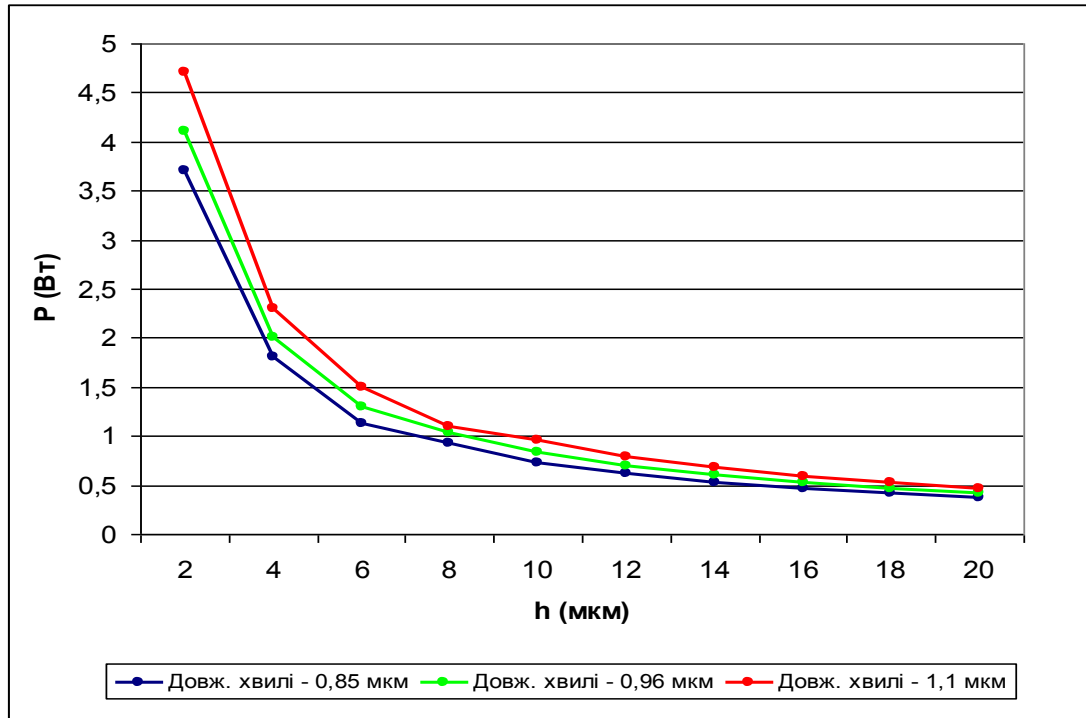


Рисунок 3.5 – Графік залежності потужності від довжини змішувача

Це зменшить потужність керуючого випромінювання, що в свою чергу призведе до зменшення паразитних нелінійних ефектів.

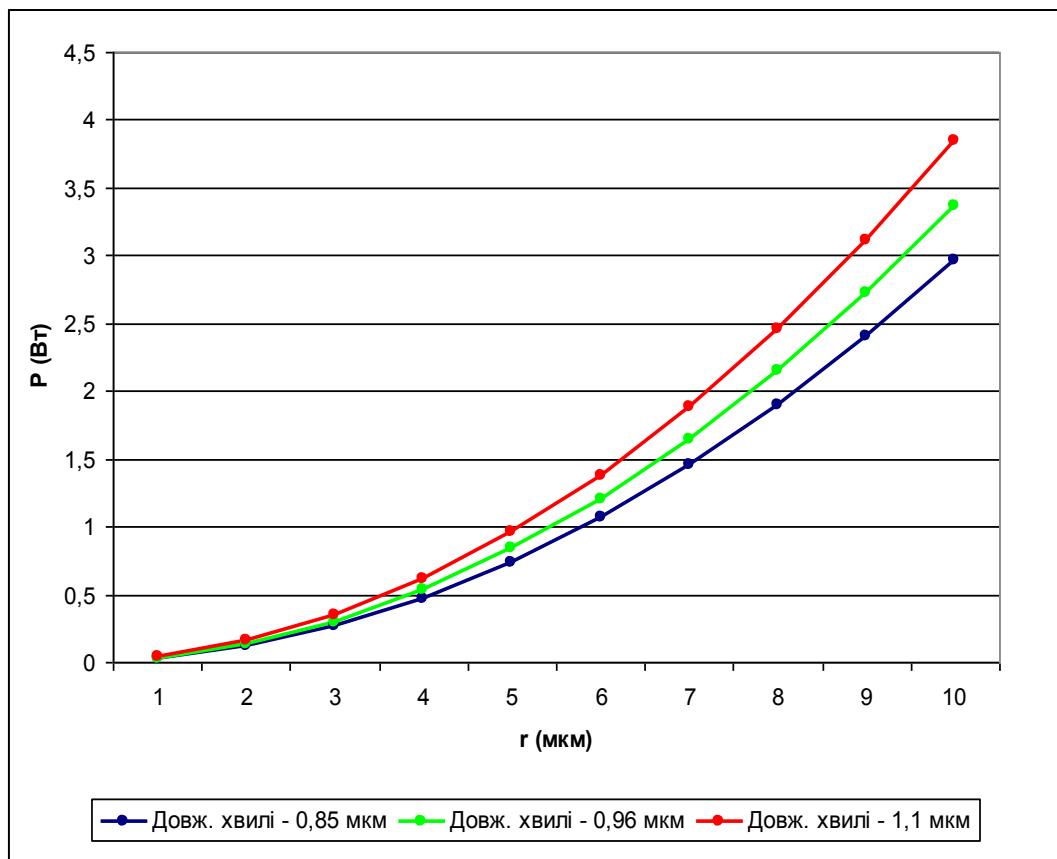


Рисунок 3.6 – Графік залежності потужності від радіуса змішувача



$$\tau_n = X \cdot \frac{n}{c} = 34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,09}{3 \cdot 10^8} \approx 1,1 \cdot 10^{-14} \text{ (с)}$$

Отже, час перебудови оптичного середовища буде становити  $\tau_n \approx 1 \cdot 10^{-14}$  с. Цей час набагато менший такту в цифрових системах передачі, тривалість якого становить близько  $1 \cdot 10^{-10}$  с. Час  $\tau_n$  можна порівняти з часом «знаходження» випромінювання в інтерферометрі  $\tau_{zn}$ , який може бути оцінений через ефективну довжину оптичного шляху в ІФП з урахуванням ефективної кількості перевідбиттів і швидкості світла в оптичному середовищі:

$$\tau_{zn} = \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \cdot h \cdot \frac{n}{c} = \frac{\sqrt{0,86}}{1-0,86} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,09}{3 \cdot 10^8} \approx 1 \cdot 10^{-14} \text{ (с)}, \quad (3.9)$$

де  $h = 5 \cdot 10^{-6}$  м – довжина інтерферометра;

$\rho = 0,86$  – коефіцієнт відбиття дзеркал.

Підставляючи значення розглянутого ІФП, отримуємо, що час знаходження випромінювання буде становити  $\tau_{zn} \approx 1 \cdot 10^{-14}$  с.

Стосовно до розглянутої задачі слід зазначити, що вивчення процесу, що відбувається в момент подачі керуючого випромінювання в ІФП, є предметом подальших технічних досліджень.

Загальний час який затрачується на комутацію в ОКЕ на базі ІФП буде визначатись як:

$$T_{заг} = \tau_n + \tau_{zn} = 1,1 \cdot 10^{-14} + 1 \cdot 10^{-14} \approx 2,1 \cdot 10^{-14} \text{ (с)}$$

Виходячи з отриманого загального часу,  $T_{заг} \approx 2,1 \cdot 10^{-14}$  с, можна сказати, що даний системи комутації на основі ІФП може забезпечити  $2,1 \cdot 10^{14}$  операцій (перемикань) за секунду, що цілком достатньо на сьогоднішній день для оптичних мереж.

### Висновки до третього розділу

Таким чином, в результаті дослідження можливості побудови ОКЕ, керованих оптичним випромінюванням, виявлено наступне. Представляється технічно

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізованим побудова таких пристроїв з використанням ефекту нелінійної залежності показника заломлення оптичного середовища від інтенсивності керуючого випромінювання. Причому для контролю результуючої довжини хвилі випромінювання в середовищі пропонується використовувати багатопроменевий інтерферометр – зважаючи на його високу чутливості до трансформаційних змін фазового набігу променів. Подібний пристрій, так само як і аналогічні, володіє відповідними перевагами та недоліками. До переваг слід віднести високу швидкість перемикавання, працездатності не залежить від стану поляризації випромінювання, малогабаритність конструкції, в якій відповідним підбором технічних параметрів можливо виключити яке-небудь перетворення мод випромінювання. Серед недоліків слід відзначити наявність постійної складової в інтерференційній картині, висока трудомісткість виготовлення пристрою і спотворення під дією нелінійних оптичних ефектів і інтерференції переданого цифрового сигналу. Тим не менш, попередня оцінка показала наявність можливості часткової компенсації недоліків пристрою шляхом застосування ряду інженерно-технічних заходів.

В результаті розв'язання багатокритеріальної задачі вибору конструкції оптичного комутаційного елементу було розглянуто одинадцять альтернатив. Для того, щоб дійти до єдиного результату була розглянута задача вибору за допомогою векторного і скалярного критерію. При розв'язання задачі вибору конструкції ОКЕ векторним критерієм, була зменшена кількість варіантів конструкцій ОКЕ до 6-ти: жидкокристаличний, термооптичний, електрооптичний, на основі НОПД, на базі ІФП, на основі кільцевих кремнієвих світло-проводних структур. За допомогою критерій. Байєса-Лапласа, дійшли до єдиного результату. Оптимальною конструкцією для ОКЕ буде конструкція на базі ІФП.

Розроблено феноменологічну модель багатоканального інтегрального ОКЕ, яка дозволить будувати ОКЕ практично необмеженої розмірності, так як легко дозволяє нарощувати розрядність інтегральної схеми та кількість світловодів на підкладці, а також саму кількість шарів підкладки. Розраховано швидкодію керуючого випромінювання для ОКЕ з інтерферометром Фабрі-Перо.

					<i>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Порівняльний техніко-економічний аналіз, пропонованого проекту і вибраного аналога

Оцінка ефективності методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж є складним завданням і включає в себе ряд аспектів та критеріїв. Нижче наведено деякі ключові аспекти, які можна врахувати при оцінці ефективності таких методів:

1. Пропускна здатність. Одним з основних критеріїв ефективності є здатність мережі передавати дані. Методи, спрямовані на збільшення пропускну здатності, можуть включати в себе оптимізацію пристроїв передачі, розширення діапазону хвиль, або використання вищих рівнів модуляції.

2. Затримка. Зниження затримки важливо для додатків, які вимагають маленької відповіді, таких як голосова та відеоконференції. Методи, спрямовані на зменшення затримки, можуть включати в себе оптимізацію шляхів мережі та використання швидших обладнань.

3. Надійність. Оптичні мережі повинні бути стійкими до різних видів перешкод та відмов. Методи для підвищення надійності можуть включати в себе створення резервних маршрутів, виявлення та виправлення помилок, а також використання заходів захисту.

4. Витрати енергії. З огляду на рост обсягів даних і розширення мереж, важливо враховувати ефективність витрат енергії. Методи зменшення енергоспоживання можуть включати в себе використання більш енергоефективних пристроїв та оптимізацію мережевих протоколів.

5. Спектральна ефективність. Збільшення спектральної ефективності означає більше ефективне використання доступного спектру. Техніки, такі як використання широкосмугових вимірювачів і когерентних оптичних комунікацій, можуть сприяти покращенню спектральної ефективності.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Масштабованість. Методи повинні бути масштабованими для врахування зростаючого обсягу даних та підвищення кількості підключених пристроїв.

7. Вартість. Ефективність також пов'язана з вартістю впровадження та утримання нових технологій. Потрібно враховувати не лише вартість обладнання, але й витрати на управління та підтримку.

Для оцінки ефективності конкретних методів, важливо проводити експерименти та аналізувати результати на різних рівнях мережі, враховуючи потреби конкретного використання.

Оптичні телекомунікаційні мережі важливі для забезпечення швидкого та надійного передачі даних, і є багато компаній, що займаються розробкою, будівництвом, обслуговуванням та розвитком оптичних мереж. Ось декілька відомих компаній у цій галузі:

1. *Cisco Systems* є однією з провідних компаній у галузі мережевих технологій і займається розробкою та постачанням різноманітних продуктів і рішень для оптичних телекомунікаційних мереж.

2. *Huawei* – китайська компанія, що спеціалізується на розробці та виробництві обладнання для телекомунікаційних мереж, включаючи оптичні технології.

3. *Nokia* – фінська компанія, яка надає рішення для оптичних мереж, включаючи обладнання та послуги для операторів зв'язку.

4. *Corning Incorporated* – американська компанія, відома своєю розробкою та виробництвом оптичних волокон та скла для телекомунікаційних мереж.

5. *Infinera* – американська компанія, яка спеціалізується на розробці оптичних транспортних систем та рішень для мереж.

6. *Ciena* – компанія, що надає рішення для оптичних телекомунікаційних мереж, включаючи обладнання для передачі і обробки сигналів.

7. *ADVA Optical Networking* – німецька компанія, яка спеціалізується на розробці обладнання та рішень для оптичних мереж.

8. *ZTE Corporation* – ще одна китайська компанія, що займається розробкою і постачанням обладнання для телекомунікаційних мереж, включаючи опти-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

чні технології.

Ці компанії працюють в різних сегментах оптичних телекомунікаційних мереж і надають різноманітні продукти та рішення для операторів зв'язку, підприємств та інших клієнтів. Який варіант вибрати, зазвичай залежить від потреб та специфікацій конкретного проекту чи бізнесу.

Так, вибір компанії в галузі оптичних телекомунікаційних мереж зазвичай залежить від конкретних потреб і специфікацій проекту чи бізнесу. Кожна з вищеназваних компаній може мати свої сильні сторони і спеціалізацію, що робить їх підходящими для різних видів завдань. Наприклад:

– якщо потрібно розширити оптичну телекомунікаційну мережу оператора зв'язку, компанії, які надають інфраструктуру та обладнання для операторів, такі як *Huawei*, *Nokia* та *ZTE*, можуть бути підходящими варіантами;

– якщо проект стосується передачі великої кількості даних на великі відстані, компанії, які спеціалізуються на високошвидкісних оптичних транспортних системах, такі як *Infinera* або *Ciena*, можуть бути важливими партнерами;

– якщо потрібні волоконно-оптичні кабелі та скло для побудови або модернізації мережі, компанії, які спеціалізуються на виробництві оптичних матеріалів, такі як *Corning Incorporated*, можуть бути важливими постачальниками.

Ключовою є ретельна аналіз специфікацій проекту, бюджету та потреб, щоб обрати найкращого постачальника чи партнера в галузі оптичних телекомунікаційних мереж. Також важливо розглянути питання підтримки, надійності, масштабованості та інших факторів, які можуть вплинути на успішну реалізацію проекту.

Техніко-економічне обґрунтування передбачає дослідження і оцінку фінансової ефективності проекту з метою підвищення пропускної здатності оптичних телекомунікаційних мереж.

1. Визначення мети проекту. Мета проекту – підвищення швидкості передачі даних та покращення якості обслуговування в оптичних телекомунікаційних мережах для відповіді на ростучий обсяг даних та підвищення вимог щодо якості зв'язку.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. Оцінка технічних параметрів:

- перепроєктування і модернізація існуючої оптичної мережі;
- встановлення нового обладнання для підвищення пропускної здатності;
- впровадження технологій, які дозволять оптимізувати маршрутизацію та керування трафіком;
- забезпечення надійності і резервування для уникнення відмов та відключень.

## 3. Розрахунок витрат:

- витрати на придбання обладнання, інженерінг та розгортання нових ресурсів;
- витрати на навчання персоналу і підтримку під час впровадження;
- оперативні витрати на утримання та обслуговування оптичної мережі.

## 4. Прогноз доходів:

- оцінка збільшення кількості підключених клієнтів та збільшення обсягу трафіку;
- врахування потенційних нових послуг, які можна надавати завдяки підвищенню швидкодії;
- розрахунок цінової політики та прибутку від нових підключень.

## 5. Розрахунок показників ефективності:

- розрахунок показників, щоб оцінити фінансову привабливість проекту;
- порівняння показників зі ставкою дисконту та іншими проектами.

## 6. Ризики та чутливість:

- ідентифікація можливих ризиків, таких як затримки в розгортанні, зміни в технологіях, конкуренція та інші;
- проведення аналізу чутливості для визначення впливу зміни ключових параметрів на фінансові показники проекту.

7. Підготовка звіту. Розроблення детального техніко-економічного звіту з усіма розрахунками, аналізами та рекомендаціями.

Це техніко-економічне обґрунтування допоможе визначити, чи є підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж фінансово вигідним та ефекти-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вним проектом і чи варто вкладати ресурси у його реалізацію.

## 4.2 Організаційне обґрунтування проекту

Класифікаційна оцінка проекту:

- клас - монопроект;
- тип - змішаний;
- тривалість - учбово-освітній;
- тривалість - короткостроковий (5 місяців);
- складність - складний;
- рівень - галузевий;
- розмір - середній.

Мета проекту – підвищення швидкості передачі даних та покращення якості обслуговування в оптичних телекомунікаційних мережах для відповіді на рости-чий обсяг даних та підвищення вимог щодо якості зв'язку. Результат – компонент технічної документації, інструкція з експлуатації.

Етапи виконання розділів кваліфікаційної роботи магістра:

1. Технічне завдання на створення вузла керування оптичної телекомунікаційної мережі. Термін виконання 12-14 днів.
2. Розробка ескізного проекту. Термін виконання 23-26 днів.
3. Розробка технічного проекту. Термін виконання 38-40 днів.
4. Розробка робочого проекту. Термін виконання 30-33 днів.
5. Упровадження проекту. Термін виконання 14-20 днів.

Побудова структури, визначеної на життєвий цикл проекту:

1. Технічне завдання на створення:
  - 1.1. Зазначення вимог і стандартних компонентів МД з редагованим інтерфейсом.
  - 1.2. Огляд літератури і сучасного стану питання.
  - 1.3. Постановка задачі.
  - 1.4. Характеристика комплексу задачі.
  - 1.5. Формалізована постановка задачі.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Надалі проведемо розрахунок параметрів мережевого графіку.

Для цього визначимо:

- тривалість робіт,  $T_{ij}$ ;
- ранній строк здійснення роботи ( $T_i$ );
- ранній початок робіт,  $T_{pn}$ ;
- раннє закінчення робіт,  $T_{po}$ ;
- пізній початок робіт,  $T_{nn}$ ;
- пізнє закінчення робіт,  $T_{no}$ ;
- вільний резерв часу роботи,  $R_c$
- повний резерв часу роботи,  $R_j$

Таблиця 4.2

Розрахунок параметрів мережевого графіка

Попередня робота	Фактична робота	$T_{ij}$	$T_{pn}$	$T_{po}$	$T_{nn}$	$T_{no}$	$R_n$	$R_j$	$R_c$
1	2	15	0	15	0	15	0	0	0
2	3	14	15	29	15	29	0	0	0
2	4	3	15	18	39	42	24	24	24
3	5	21	29	50	29	50	0	0	0
4	5	8	18	26	4	50	24	24	24
5	6	7	50	57	67	74	17	17	17
5	7	12	50	62	50	62	0	0	0
6	8	8	57	65	74	82	17	17	17
7	8	20	62	82	62	82	0	0	0
8	9	26	82	108	82	108	0	0	0
9	10	3	108	111	112	123	12	12	12
9	11	18	108	126	108	126	0	0	0
10	12	7	111	118	123	130	12	12	12
11	12	4	126	130	126	130	0	0	0
12	11	3	130	133	130	133	0	0	0

Тривалість критичного шляху 138 днів, не перевищує часу на проектування (138 днів), тому оптимізувати мережеву модель немає необхідності.

Під зовнішнім середовищем організації розуміються всі умови і чинники, виникаюче в зовнішньому середовищі, незалежно від діяльності конкретної фірми але надаючи дію на її функціонування і тому вимагаючи ухвалення управлінських рішень.

Під зовнішніми чинниками мається на увазі. Закони і державні органи: організації повинні дотримуватись законів і вимог державного регулювання. Ці органи забезпечують примусове виконання законів у відповідних сферах своєї компетенції, а так само вводять власні вимоги, часто також мають силу закону. Кожний вид діяльності регулюється певними органами. Стан економіки: стан економіки впливає на вартість всіх ресурсів, що вводяться, і здатність споживачів купувати певні товари і послуги.

Внутрішнє середовище проекту – та частина загального середовища проектованої організації, яка знаходиться в її межах. Вона надає постійну і найбезпосереднішу дію на функціонування організації. Внутрішнє середовище має декілька зрізів, стан яких в сукупності визначає той потенціал і ті можливості, які має свій в розпорядженні організація. Аналіз внутрішнього середовища організації звичайно проводиться для порівняння положення компанії з положенням найближчих конкурентів (для оцінки конкурентної стратегічної позиції організації). До чинників внутрішнього середовища проекту можна віднести:

1. Керівництво проекту.
2. Склад управлінського проекту.

В умовах даного проекту склад учасників буде наступним:

- ініціатор (автор ідеї проекту Рибалов Б.О.);
- замовник-інвестор (майбутній власник);
- керівник проекту (Сахарова С.В.);
- споживач (тому що проект створюється в тісному співробітництві з побажаннями споживача).

Структура організації управління. Діяльність компанії здійснюється розрізненими функціональними підрозділами, тобто робота виконується спочатку у

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вузькоспеціалізованому підрозділі, потім перекидається в наступний функціональний підрозділ. В даному випадку структура організації управління - лінійно-централізована. Дана структура вибрана у зв'язку учасників розробки проекту і простої організації проекту.



Рисунок 4.2 – Організаційна структура проекту

#### **4.3 Оцінка науково-технічної ефективності розробки нової технології, нового обладнання та інших інновацій**

В умовах відкритої ринкової економіки розширюється діапазон оцінки ефективності науково-технічних розробок, а отже, збільшується кількість основних видів ефективності НДДКР, які необхідно визначити з метою цієї оцінки. До них належать [48]:

– науково-технічний ефект, який проявляється у підвищенні науково-технічного рівня, поліпшенні параметрів техніки і технологій, що впливає з відкриття нових законів та закономірностей у природі, а отже, і нових технологічних засобів виробництва речовин, матеріалів та видів продукції;

– економічний ефект полягає в отриманні економічних результатів від науково-технічних розробок як в цілому для народного господарства, так і для кожного виробничого суб'єкта. Економічна ефективність науково-технічних розробок за відповідною системою показників має відображати вплив їхньої результативності на розвиток економіки країни в цілому, а також регіонів, галузей, організацій і підприємств, що беруть участь у реалізації технологічних нововведень;

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– соціальний ефект, що відображає зміни умов діяльності людини в суспільстві. Його прояв спостерігається в змінах характеру та умов праці, підвищенні життєвого рівня населення, поліпшенні побутових його умов, розширенні можливостей духовного розвитку особистості, у змінах стану довкілля;

– маркетинговий ефект, що відображає потреби ринку в наукових дослідженнях і розробках та можливість їх реалізації.

Науково-технічну ефективність (НТЕ) результатів прикладних робіт визначають на основі показників науково-технічного рівня. Оцінка науково-технічної ефективності НДДКР відбувається на основі показника ( $O_{НТЕ}$ ), який представляє собою ступінь досягнення максимально можливого рівня, значення якого дорівнює 1 (одиниці):

$$O_{НТЕ} = K^{\Phi}_{НТЕ} / K^{\Pi}_{НТЕ}, \quad (4.1)$$

де  $K^{\Phi}_{НТЕ}$  – показник (коефіцієнт) фактичного рівня науково-технічної ефективності;

$K^{\Pi}_{НТЕ}$  – показник (коефіцієнт) потенційно можливого рівня науково-технічної ефективності (дорівнює одиниці).

Значення показника  $K^{\Phi}_{НТЕ}$  визначають на основі шкали експертних оцінок (табл. 4.3).

Проведення оцінки

Визначають  $K^{\Phi}_{НТЕ}$  на основі експертної оцінки науково-технічного рівня розробки.

З цією метою:

– розроблюють перелік специфічних показників, необхідних для виміру науково-технічного рівня розробки;

– формують групу аналогів, які реалізовані на світовому і вітчизняному ринках;

– здійснюють відповідні розрахунки для співставлення показників і визначення балів по табл. 4.3.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Шкала експертних оцінок для виміру рівня  
науково-технічної ефективності проектів**

№	Групи показників	Характеристика показників	Інтервал рейтингового числа	Коефіцієнт значущості показників
1	Науково-технічний рівень	Перевищує кращі світові аналоги	10	0,3
		Відповідає світовому рівню	7 – 9	
		Нижче кращих світових аналогів	5 – 6	
		Перевищує кращі вітчизняні аналоги	3 – 4	
		Відповідає вітчизняному рівню	1 – 2	
		Нижче вітчизняного рівня	0	
2	Перспективність	Першочергова значущість	8 – 10	0,4
		Значущий	5 – 7	
		Корисний	1 – 4	
3	Потенційний масштаб практичного використання	Світовий ринок	10	0,1
		Галузі національної економіки	7 – 9	
		Галузь (регіон)	3 – 6	
		Окремі підприємства (об'єднання)	1 – 2	
4	Ступінь вірогідності досягнення позитивних результатів	Великий	10	0,2
		Середній	5 – 9	
		Малий	1 – 4	

Примітка: об'єкт оцінки і аналог(и), які порівнюють за однаковими показниками, наведеними у співставленому вигляді відхилення в значеннях кожного з показників, мають бути однаковими для варіантів, що порівнюються.

До числа специфічних показників відносять:

– для нової техніки: продуктивність, споживання інженерних ресурсів на виробітку одиниці продукції, потреба в робочих, які обслуговують обладнання, експлуатаційні витрати на одиницю продукції;

– для нових матеріалів і речовин: вміст корисних речовин для виробітки готової продукції, питома вага відходів у загальному обсязі переробленої сировини, вартість одиниці нового матеріалу;

– для нових технологій: якість виробленої продукції, енергоємність і трудомісткість продукції, собівартість одиниці продукції.

З метою спрощення визначення  $K^{\Phi}_{НТЕ}$  у таблиці не введено показника витрат на одиницю продукції.

На основі співставлення даних таблиці встановлюють бали по характеристиках чотирьох груп і на цій основі розраховують значення інтегрального показника НТЕ:

$$НТЕ = \sum B_i \times K_i^3, \quad (4.2)$$

де  $i = 1 \div 4$ ,

$B_i$  – бали (рейтингове число),

$K$  – коефіцієнт значущості показників.

Таблиця 4.4

Порівняльні показники для виконання оцінки НТЕ

ПОКАЗНИКИ	Варіанти технології	
	розробленої	співвідносної (аналога)
Рівень новізни	світовий	-
Швидкість обробки даних	тисячі трильйонів операцій на секунду	деятки трильйонів операцій на секунду
Енергоефективність	Висока	Звичайна
Потенціал в масштабованості	Великий	Великий
Вартість	Звичайна	Мала
Надійність	Велика	Звичайна

Рівень науково-технічної ефективності НДДКР розраховано на основі наведених даних прикладу (табл. 4.5).

$$НТЕ = 8,66 \cdot 0,3 + 9 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,1 + 1,67 \cdot 0,2 = 2,6 + 3,6 + 0,8 + 1,67 = 8,67$$

## Експертна оцінка і розрахунок величини інтегрального показника НТЕ

№	Групи показників	Рейтинг експертів			Середня за експертними оцінками	НТЕ
		1	2	3		
1	Науково-технічний рівень	9	8	9	8,66	2,6 (8,66 x 0,3)
2	Перспективність	9	9	9	9	3,6 (9 x 0,4)
3	Потенційний масштаб практичного використання	7	8	9	8	0,8 (8 x 0,1)
4	Ступінь вірогідності досягнення позитивних результатів	8	8	9	8,33	1,67 (8,33 x 0,2)
В С Ь О Г О						8,67

Отриманий результат слід порівняти з максимально можливим значенням, яке дорівнює 10 балам ( $10 \cdot 0,3 + 10 \cdot 0,4 + 10 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,2$ ).

Отже, оцінка рівня НТЕ може бути зроблена за допомогою інтегрального коефіцієнта оцінки НТЕ ( $K_{НТЕ}$ ):

$$K_{НТЕ} = \frac{НТЕ}{10} \cdot 100 \%$$

На основі даних табл. 4.5 можна дійти до висновку, що  $K_{НТЕ}$  відповідає 86,7 %.

В тому випадку, коли значення  $K_{НТЕ}$  перевищує середнє значення, яке дорівнює 5,0, має бути зроблено висновок про достатній рівень НТЕ:

- цілком достатній 5,0 – 6,0;
- достатній 6,1 – 8,0;
- достатньо високий 8,1 – 9,0;
- високий 9,1 – 10.

Таким чином, рівень НТЕ технології можна визнати високим.

## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ охорони праці повинен містити вимоги до робочого місця користувача, розрахунки безпеки роботи з комп'ютером.

Класифікація виробництва по ступеню вибухової, вибухо-пожежної та пожежної небезпеки. По ступеню пожежної небезпеки дане приміщення відноситься до категорії Д – це приміщення, в яких негорючі речовини знаходяться практично в холодному стані.

Маємо приміщення довжиною 12,5 м, шириною 10,5 м і висотою 2,75 м.

Площа приміщень, в яких розташовують персональні комп'ютери (ПК), визначають згідно з діючими нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце: площа - не менше 6,0 м<sup>2</sup>, об'єм – не менше 20,0 м<sup>3</sup>, з урахуванням максимальної кількості осіб, що одночасно працюють в зміні. У нашому випадку площа – 131,8 м<sup>2</sup>, а об'єм – 356,3 м<sup>3</sup>. З цього виходить, що максимальна кількість робочих місць рівна 17.

Електробезпека обладнання. Залежно від умов, що підвищують або знижують небезпеку поразки людини електричним струмом, приміщення діляться на приміщення з підвищеною небезпекою, особливо небезпечні і без підвищеної небезпеки.

До приміщень з підвищеною небезпекою відносяться приміщення з підвищеною вологістю (більше 75%) або високою температурою (вище 350С) або наявності струмопровідних пилу і полови. Приміщення з високою відносною вологістю (близькою до 100%), хімічно активним середовищем називають особливо небезпечними. У нашому випадку приміщення без підвищеної небезпеки.

Класифікація обладнання по ПУЕ.

Для всіх приміщень, в яких експлуатуються відео-термінали і ЕОМ, повинна бути визначена категорія по вибухо-пожежній та пожежній безпеці (ОНТП 24-86, "Визначення категорій приміщень і будівель по вибухо-пожежній

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та пожежній небезпеці") і класу зони (ПВЕ). Відповідні позначення повинні бути нанесені на входні двері приміщення.

Розрахунок системи заземлення обладнання.

За умовами безпеки заземлення повинне володіти реляційно малим опором. Тому на практиці застосовують, як правило, заземлювач, що складається з декількох паралельно включених одиночних заземлювачів. Опір системи заземлення в мережах до 1000 В повинно бути не більше 4 Ом ( $R_{mp} \leq 4$ ).

$d$  – діаметр одного заземлювача,  $d = 0,05$  м;

$\psi$  - кліматичний коефіцієнт, враховуючий сезонні коливання опору ґрунту,  $\psi = 1,4$ ;

$\rho_{gp} = 500$  Ом\*м – питомий опір ґрунту (пісок);

$L$  – довжина одного заземлювача,  $L = 2,3$  м;

$L'$  – відстань між заземлювачами,  $L'/L = 2$ ;  $L' = 4,6$  м;

$t_0$  – відстань від поверхні ґрунту до заземлювача,  $t_0 = 0,5$  м;

$t$  – відстань від поверхні до середини заземлювача, м.

$$t = \frac{L}{2} + t_0 (м) \quad (5.1)$$

$$t = \frac{2,3}{2} + 0,5 = 1,65$$

Визначаємо розрахункове значення питомого опору ґрунту:

$$\rho_{розрах} = \rho_{gp} \cdot \psi \quad (Ом \cdot м) \quad (5.2)$$

$$\rho_{розрах} = 500 \cdot 1,4 = 700 \quad Ом \cdot м$$

Визначаємо опір одного вертикального заземлювача:

$$R_0 = \frac{\rho_p}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot L}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot t + 1}{4 \cdot t - 1} \right) \right] \quad (Ом)$$

$$R_0 = \frac{700}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot 2,3}{0,05} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,65 + 1}{4 \cdot 1,65 - 1} \right] = 90,5 \quad Ом$$

Визначаємо кількість вертикальних заземлювачів:

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

$$n = \frac{R_0}{R_{трєб}} \quad (\text{шт}) \quad (5.3)$$

де  $R_{трєб}$  - необхідний опір системи заземлення для електричних мереж змінного струму напругою до 1000В,  $R_{трєб} \leq 4$  Ом.

$$n = \frac{90,5}{3} \approx 30,17 \quad \text{шт}$$

Округляємо отриману кількість заземлювачів до найближчого стандартного значення (2,3,4,10,20,40,60,100):  $n' = 40$  шт.

Визначаємо опір системи вертикальних заземлювачів:

$$R_g = \frac{R_0}{n' \cdot \eta_v}, \quad (\text{Ом}) \quad (5.4)$$

де  $\eta_v$  - коефіцієнт використання вертикального заземлювача,  $\eta_v = 0,74$  при  $n' = 40$  шт та  $L'/L = 2$  (заземлювачі розміщені в ряд).

$$R_g = \frac{90,5}{40 \cdot 0,74} = 3,05 \quad \text{Ом}$$

Визначаємо довжину горизонтального електроду (опір з'єднувальної смуги). При розміщенні в ряд довжина смуги дорівнює:

$$L_z = (n' - 1) \cdot L' \quad (\text{м}) \quad (5.5)$$

$$L_z = (40 - 1) \cdot 4,6 = 179,4 \quad \text{м}$$

$d$  – діаметр труби, м. Для сталевих смуги шириною  $b$ ,  $d = 0,5 \cdot b$  (м).

$b = 0,04$  м,  $d = 0,02$  м

Визначаємо опір з'єднувальної смуги:

$$R_z = \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot L_z \cdot \eta_z} \cdot \ln \left( \frac{L_z^2}{t_0 \cdot d} \right) \quad (5.6)$$

де  $\eta_z$  – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача,  $\eta_z = 0$  при  $n' = 40$  шт та  $L'/L = 2$

$$R_z = \frac{700}{2 \cdot 3,14 \cdot 179,4} \cdot \ln \left( \frac{179,4^2}{0,5 \cdot 0,02} \right) = 9,29 \quad \text{Ом}$$

										Арк.
										89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

KPM.KI.1.884-03.3.9

Визначаємо опір системи заземлення:

$$R_c = \frac{R_g \cdot R_z}{R_g + R_z} \text{ (Ом)} \quad (5.7)$$

$$R_c = \frac{3,05 \cdot 9,29}{3,05 + 9,29} = 2,3 \text{ Ом}$$

Висновок:  $1,84 < 10$ ,  $R_c < R_{mp}$  тобто ми отримали заземлення, яке задовольняє умовам.

Вимоги електробезпеки при експлуатації ВДТ ЕОМ.

ЕОМ, периферійні пристрої та інше обладнання (апарати управління світльники і тому подібне), електропроводи і кабелі по виконанню і ступеню захисту повинні відповідати класу зони по ПВЕ.

Лінія електромережі для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ і устаткування для обслуговування, ремонту і наладки ЕОМ виконується як окрема групова трьохдротова мережа.

Пожежна профілактика

Організаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин, правильний зміст будівель, територій, протипожежний інструктаж робочих і так далі. До технічних заходів відносяться: дотримання протипожежних правил при проектуванні будівель, при пристрої електропроводів і тому подібне. Заходи режимного характеру - це заборона куріння в не встановлених місцях, виробництва зварювальних і інших вогняних робіт і так далі. Експлуатаційними заходами є своєчасні профілактичні огляди, ремонти, випробування технологічного устаткування.

Причини пожежі в електроустановках:

- коротке замикання;
- перевантаження мереж;
- великі перехідні опори;
- від електронагрівальних приладів.

Перевантаження мереж відбувається в результаті проходження по ним напруги, що перевищує номінальну. Таке може відбутися у разі підключення великої кількості споживачів. Це приводить до руйнування, плавлення ізоляції, що

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спричиняє за собою коротке замикання. Коротке замикання відбувається у тому випадку, коли точки різних фаз мережі з'єднуються через малий опір. Унаслідок чого миттєво збільшується струм, відбувається виділення великої кількості тепла.

Основні причини короткого замикання:

- пошкодження ізоляції проводів;
- попадання на них струмопровідних предметів;
- пил.

Заходи захисту:

- дотримання нормативних режимів експлуатації;
- своєчасне проведення регламентних робіт;
- застосування плавки запобіжників і автоматів.

Великий перехідний опір виникає в місці поганого контакту токоведучих частин обладнання.

Заходи попередження:

- зачистка контактів;
- збільшення площі контакту;
- заборонено застосування непролютованих скручувань;
- використання гвинтових, болтових і пресованих з'єднань.

Пожежна автоматична сигналізація.

Застосування автоматичних засобів виявлення пожеж є одним з основних умов забезпечення пожежної безпеки в машинобудуванні, оскільки дозволяє оповістити черговий персонал про пожежу і місце його виникнення.

Як засоби пожежогасіння на даному об'єкті застосовуються вуглекислотні вогнегасники, призначені для гасіння спалахів установок напругою до 1000 В. У вуглекислотних вогнегасниках застосовують зріджений двоокис вуглецю. Вогнегасна дія його полягає в розбавленні повітря і зниженні у ньому змісту кисню до концентрації, при якій припиняється горіння. Вогнегасний ефект обумовлюється втратами теплоти на нагрівання двоокису вуглецю і зниженням теплового ефекту реакції.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

Первинні засоби пожежогасіння включають: два вуглекислотних вогнегасника, щільне полотно, лопату, багор, ящик з піском, відро для піску, сокиру.

Визначення кількості балонів для пожежогасіння.

Розрахувати кількість робочих балонів  $N_{\text{б}}$ , необхідну для пожежогасіння у приміщенні довжиною 12,5 м, шириною 10,5 м та висотою 2,75 м. Як засіб пожежогасіння приймається вуглекислота у вогнегасниках.

Вогнегасна концентрація газової суміші для вуглекислоти  $G_{\text{г}}=0,7$  кг/м<sup>3</sup>, щільність вуглекислоти  $\rho=0,625$  кг/л.

Об'єм приміщення  $V=356,4$  м<sup>3</sup>. Об'єм балону  $V_{\text{б}}=25$  л.

Визначаємо кількість вогнегасної газової суміші  $G_{\text{г}}$ :

$$G_{\text{г}} = 1,25 \cdot (G_{\text{г}} \cdot V_{\text{прим}} \cdot K_{\text{у}}) \quad (\text{кг}) \quad (5.8)$$

де  $K_{\text{у}}$  – коефіцієнт, що враховує особливості процесу газообміну, витік вуглекислоти крізь нещільності приміщення,  $K_{\text{у}}=1,25$ .

$$G_{\text{г}} = 1,25 \cdot (0,7 \cdot 356,4 \cdot 1,25) = 389,8 \quad \text{кг}$$

Визначаємо необхідну кількість робочих балонів за формулою:

$$N_{\text{б}} = \frac{G_{\text{г}}}{V_{\text{б}} \cdot \rho \cdot A_{\text{н}}} \quad (\text{шт}) \quad (5.9)$$

де  $A_{\text{н}}$  – коефіцієнт наповнення,  $A_{\text{н}}=1$ ;

$\rho$  – щільність,  $\rho=0,625$  кг/л;

$V_{\text{б}}$  – 25 л – об'єм балону (при 25 л у балоні міститься 15,6 кг вуглекислоти).

$$N_{\text{б}} = \frac{389,8}{25 \cdot 0,625 \cdot 1} = 23,44 \approx 24 \quad \text{шт}$$

Приймаємо кількість балонів – 24 шт.

$$N_{\text{заг}} = N_{\text{розр}} + N_{\text{резерв}} \quad (\text{шт}) \quad (5.10)$$

Кількість резервних балонів слід приймати рівним числу робочих балонів.

$$N_{\text{заг}} = 24 + 24 = 48 \text{ шт.}$$

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

Розрахунок вентиляції.

На проектуваному підприємстві використовується загально обмінна прито-чно – витяжна вентиляція.

Розрахунок продуктивності повітря

Площа приміщення  $S=132 \text{ м}^2$ . Об'єм приміщення  $V=356,4 \text{ м}^3$ . Кількість комп'ютерів у приміщенні – 17, кількість чоловік – 17.

Тепловиділення від однієї людини приймаємо  $q_l=170 \text{ Вт}$ . Кількість тепла, що виділяє один комп'ютер, дорівнює  $q_{нк}=400 \text{ Вт}$ .

$$\sum Q = Q_{o.c} + Q_{нк} + Q_l + Q_{осв} \quad (5.11)$$

де  $\sum Q$  – загальна кількість тепла, що надходить у приміщення, Вт;

$Q_{o.c}$  – тепло, яке виділяється від навколишнього середовища, Вт;

$Q_{осв}$  – тепло від освітлюваних приладів, Вт;

$Q_{нк}$  – тепло від устаткування, Вт;

$Q_l$  – тепло від людей, Вт;

$g_{o.c} = 20 \text{ Вт}$  – кількість тепла, що приходить на  $1 \text{ м}^3$  об'єму приміщення від навколишнього середовища;

$g_{осв} = 10 \text{ Вт}$  – кількість тепла, що приходить на  $1 \text{ м}^2$  площини приміщення від штучного освітлення.

$$Q_{o.c} = V * g_{o.c}, \quad Q_{o.c} = 356,4 * 20 = 7128 \text{ Вт};$$

$$Q_l = N * q_l, \quad Q_l = 17 * 170 = 2890 \text{ Вт};$$

$$Q_{нк} = n * q_{нк}, \quad Q_{нк} = 17 * 400 = 6800 \text{ Вт};$$

$$Q_{осв} = S * g_{осв}, \quad Q_{осв} = 11 * 12 * 10 = 2880 \text{ Вт};$$

$$\sum Q = 7128 + 2890 + 6800 + 2880 = 19698 \text{ Вт}.$$

Витрата повітря при надходженні надмірного тепла визначається за формулою:

$$L = \frac{Q_c}{(C \cdot \rho \cdot (t_{yd} - t_{np}))} \text{ м}^3/\text{год} \quad (5.12)$$

де  $C=1,006 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{С}}$  - питома теплоємність повітря при постійному тиску;

$L$  – продуктивність системи вентиляції ( $\text{м}^3/\text{год}$ );

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\rho$  – щільність повітря ( $\rho=1,2$  кг/ м<sup>3</sup>);

$t_{y\delta}$  – температура повітря, що видаляється,  $t_{y\delta} = 24^\circ\text{C}$ ;

$t_{np}$  – температура припливного повітря,  $t_{np} = t_{y\delta} - \Delta t_{pab}$  ( $^\circ\text{C}$ );

$\Delta t_{pab} = 8^\circ\text{C}$  – робоча різниця температур;

$t_{np} = 24^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C} = 16^\circ\text{C}$ .

$$L = \frac{19698}{1,0 \cdot 1000 \cdot 1,2 \cdot (24 - 16)} \cdot 3600 \approx 7386,75 \text{ м}^3/\text{год}$$

Визначаємо потужність електропроводу вентилятора за формулою:

$$N = \frac{k \cdot L \cdot H \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot \eta_{вен} \cdot \eta_{прив}} \text{ (кВт)} \quad (5.13)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу,  $k=1,3$

$H$  – аеродинамічний опір вентилятора,  $H=300$  Па;

$\eta_{вен}$  - ККД вентилятора,  $\eta_{вен} = 0,6$ ;

$\eta_{прив}$  - ККД приводу,  $\eta_{прив} = 0,9$ .

$$N = \frac{1,3 \cdot 7386,75 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 0,6 \cdot 0,9} = 1,481 \text{ кВт}$$

Розрахунок системи освітлення.

При роботі за дисплеєм освітленість визначається мінімальним об'єктом розрізнення шириною лінії рукописного або друкарського тексту, який читає користувач з листа. Для того, щоб забезпечити освітлення 300 Лк, здійснюється розрахунок освітлення для приміщення, що розглядається.

Здійснюється розрахунок світового потоку.

$$\Phi_p = \frac{E_n \cdot S \cdot \kappa \cdot z \cdot 100}{N' \cdot \eta}, \text{ (лм)} \quad (5.14)$$

де  $S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$\kappa = 1,7$  – коефіцієнт запасу;

$E_n = 375$  лк – нормована освітленість;

$z = 1,1$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення (тип світильника ЛОУ);

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$N'$  – округлена кількість світильників, шт.;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку.

Для того, щоб вирахувати світового потік, необхідно обчислити висоту від світильника до робочої поверхні –  $H_p$ , відстань між центрами світильників –  $L$ , кількість світильників –  $N$ , індекс приміщення –  $i$ , та коефіцієнт використання світового потоку –  $\eta$ .

$$H_p = H - h_{роб.н} \text{ (м)} \quad (5.15)$$

де  $H = 2,7$  м – висота приміщення;

$h_{роб.н} = 0,8$  м – висота робочої поверхні.

$$H_p = 2,7 - 0,8 = 1,9 \text{ м}$$

$$\frac{L}{H_p} = 1,4 \text{ м}$$

$$L = H_p \cdot 1,4 = 1,9 \cdot 1,4 = 2,66 \text{ м}$$

$$N = \frac{S}{L^2} \text{ (шт)} \quad (5.16)$$

$$N = \frac{132}{7,08} = 18,4 \text{ шт}$$

Отримане значення округлюється до найближчого більшого цілого. Результат – 18 світильників.

$$i = \frac{S}{H_p \cdot (A + B)} \quad (5.17)$$

де  $A = 12$  м и  $B = 11$  м – довжина та ширина приміщення;

$$i = \frac{132}{1,9 \cdot (11 + 12)} = 3,02.$$

Визначаємо коефіцієнт використання світового потоку при віддзеркаленні від стелі  $\rho_n = 50\%$  і коефіцієнта віддзеркалення від стін  $\rho_c = 30\%$ , відповідно до типу світильника і розрахованого індексу приміщення отримуємо коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta$  рівним 62,06.

					<b>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</b>	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Phi = \frac{375 \cdot 132 \cdot 1,7 \cdot 1,1 \cdot 100}{18 \cdot 62,06} = 8286 \text{ лм.}$$

Далі розраховується потужність усієї освітлювальної системи.

$$P = n \cdot N' \cdot P_l (\text{Вт}) \quad (5.18)$$

де  $n$  – кількість ламп у одному світильнику, 2шт.;

$P_l$  – потужність однієї лампи, Вт.

Визначено, що необхідно лампи ЛД80.

$$P = 2 \cdot 18 \cdot 80 = 2880 \text{ Вт}$$

Для перевірки правильності вибору марки лампи визначаємо відхилення дійсного світлового потоку від розрахункового:

$$\Delta = \frac{\Phi_o - \Phi_p}{\Phi_o} \cdot 100(\%); \quad (5.19)$$

де  $\Phi_o$  – дійсний світловий потік одного світильника, лм;

$\Phi_p$  – розрахунковий світловий потік одного світильника, лм.

$$\Phi_o = 2 \cdot 4070 = 8140 \text{ лм.}$$

$$\Delta = \frac{8140 - 8286}{8140} \cdot 100\% = -1,79 \%$$

При виборі освітлювальних приладів використовуються світильники ЛОУ, оснащені 2 лампами ЛД80. Світильників 20 штук.

Загальні положення гігієнічних вимог до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) ЕОМ.

Умови праці осіб, які працюють з ЕОМ, повинні відповідати I або II класу згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості і небезпеки чинників виробничого середовища, тяжкості і напруженості трудового процесу № 4137-86.

Вимоги до виробничих приміщень для експлуатації ВДТ ЕОМ.

Неприпустимим є розміщення приміщень для роботи з відео-терміналами і ЕОМ в підвалах і цокольних поверхах.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приміщення з ВДТ повинні мати природне і штучне освітлення. Приміщення з ВДТ повинні бути обладнані системами опалювання, вентиляція і кондиціонування повітря. Віконні отвори повинні бути обладнані регульованими пристосуваннями (жалюзі, завіски, зовнішні козирки).

Для обробки приміщень забороняється використовувати матеріали, що виділяють в повітря шкідливі речовини (ДСП, шпалери, що миються, паперовий пластик).

У приміщенні з ВДТ необхідно щодня проводити вологе прибирання. При робочих приміщеннях з ВДТ повинні бути обладнані кімнати відпочинку.

Оптимальні для приміщень: температура  $t_p=22-24^{\circ}\text{C}$ , реляційна вологість повітря  $\varphi =40-60\%$ , швидкість повітря в робочій зоні  $v=0.1$  м/с. Граничний рівень звукового тиску для людини  $L=120\div 130$  Дб відповідає порогу больового відчуття.

Робоче місце розташовується на висоті 80 см від підлоги. Відстань між бічними поверхнями комп'ютерів повинна бути не менше 1,2 м, відстань від тильної поверхні одного комп'ютера до екрану іншого - не менше 2,5 м; клавіатура повинна мати матове покриття з коефіцієнтом віддзеркалення 0,4. Встановлюються 15 - хвилинні перерви через кожних 1-2 години роботи.

Вимоги до режимів роботи і відпочинку при роботі з ВДТ ЕОМ.

Встановлюються наступні внутрішньо змінні перерви при 8-ми годинній денній роботі:

- для 1 – ої групи - перерва 15 хвилин через кожну годину роботи;
- для 2 – ої групи - перерва 15 хвилин через кожні 2 години роботи;
- для 3 – ої групи - перерва 10 хвилин після кожної години роботи.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виникаючі нові технічні задачі, спрямовані на збільшення швидкості обробки інформації потребують перегляду деяких фундаментальних підходів не тільки до проектування об'єктів телекомунікацій, але і фізичних принципів, на базі яких побудовані компоненти цих об'єктів. Яскравим підтвердженням цих слів є розглянута в першому розділі концепція повністю оптичних мереж *AON*, що ґрунтується на застосуванні виключно оптичних технологій.

В першому розділі роботи розглянуто обґрунтування доцільності підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж та проведено аналіз можливості використання оптичного керування процесом комутації оптичних сигналів.

В результаті аналізу принципів функціонування оптичних телекомунікаційних мереж виявлено що розробка та впровадження повністю оптичних систем комутації забезпечить підвищення пропускної спроможності ОТМ та дозволить уникнути дорогого оптико-електричного перетворення сигналу, що є важливим фактором для впровадження повністю оптичної мережі. Україною. Таким чином, завдання дослідження особливостей комутації оптичних сигналів є важливим та актуальним.

Дослідження підвищення швидкодії ОТМ при використанні оптичних процесорів показало, що сучасні оптичні процесори можуть бути використані для керування оптичною системою комутації з кращими характеристиками продуктивності та споживаної потужності ніж звичайні електронні процесори. Крім того, при використанні оптичних процесорів не буде потрібним витрати часу та додаткові дії на перетворювання оптичного сигналу в електричний.

В другому розділі описані модель та методи підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж та проведено дослідження фізичних принципів побудови оптичних комутаційних елементів.

Розробка повністю оптичних комутуючих пристроїв, зокрема повністю оптичного перемикача, є необхідною і актуальною задачею в області волоконно-

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптичних технологій. Створення повністю оптичного перемикача, стане наступним етапом розвитку оптичних мереж та сприятиме підвищенню ефективності оптичних мереж за рахунок використання оптичного управління при комутації сигналів.

У третьому розділі розв'язано задачу вибору конструкції оптичного комутаційного елемента, проведено розрахунки швидкодії оптичного комутаційного елемента з інтерферометром Фабрі-Перо.

В результаті розв'язання багатокритеріальної задачі вибору конструкції оптичного комутаційного елемента було розглянуто одинадцять альтернатив. Для того, щоб дійти до єдиного результату була розглянута задача вибору за допомогою векторного і скалярного критерію. При розв'язання задачі вибору конструкції ОКЕ векторним критерієм, була зменшена кількість варіантів конструкцій ОКЕ до 6-ти: жидкокристаличний, термооптичний, електрооптичний, на основі НОПД, на базі ІФП, на основі кільцевих кремнієвих світло-проводних структур. За допомогою критерій. Байєса-Лапласа, дійшли до єдиного результату. Оптимальною конструкцією для ОКЕ буде конструкція на базі ІФП.

Під час виконання кваліфікаційної роботи було обгрунтовано актуальність області дослідження. Проведений аналіз стану питання показав, що на сьогоднішній день ще багато питань, які пов'язані з розробкою та впровадженням методів підвищення швидкодії оптичних телекомунікаційних мереж. А саме: створення оптичних процесорів для управління оптичними комутаційними елементами, розробка оптичного буфера, який буде містити довільний доступ, створення нових матеріалів, які будуть мати великий коефіцієнт передачі світлового потоку, а також розробка ліній оптичної затримки, які будуть здатні накопичувати оптичний сигнал на необмежений проміжок часу і тим самим призведуть до зменшення загасання оптичного випромінювання в петлях затримки.

У четвертому розділі роботи проведено розрахунки економічних показників. У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці.

					<i>КРМ.КІ.1.884-03.3.9</i>	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Technical information bulletin «All -Optical Networks (AON)»*.- Arlington, Virginia (USA). – 2000. – №00-7.
2. Каток В. Б. Анализ характеристик передачи одномодовых волокон для сетей зв'язку / В.Б. Каток, О.Б. Омещинская, М.В. Шаповалові // Тези доповідей МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». – Запоріжжя. – 2006. – С.18-19.
3. Алишев Я.В. Фотонные системы и сети телекоммуникаций / Я.В. Алишев, В.Н. Урядов, Н.М. Чередниченко // Доклады БГУИР. – 2003. – №1. – С.59-63.
4. Слепов Н.Н. Особенности современной технологии WDM / Н.Н. Слепов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2004. – №6. – С.68-76.
5. Гайворонская Г.С. Коммутаторы оптических сигналов / Г.С. Гайворонская, А.В. Рябцов//Холодильна техніка і технологія. – Одеса.– 2009. – №2 (118). – С. 55-59.
6. Шмидт, Э. Интегрированная OTN-коммутация виртуализирует оптические сети [Текст] / Шмидт, Э.// *Infonetics research*. – 2012. – 16 с.
7. Ершова Э.Б. К вопросу построения оптических сетей / Э.Б. Ершова, Э.М. Вакс // Спецвыпуск «Технологии информационного общества». – 2009. – С. 14 – 18.
8. Соколов Н.А. Телекоммуникационные сети. Монография в 4-х главах. Часть 2 (гл. 2) – М.: Альварес Пабблишинг, 2003. – 128 с.
9. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения: Сайрус системс, 1999. – 664 с.
10. Гайворонская Г.С. Сети и системы телекоммуникаций [Текст]/ Г.С. Гайворонская, М.В. Захарченко, А.И. Ещенко и др. // К.: Техника. – 2000. – 304 с.
11. Гайворонская Г.С. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях [Текст]/ Г.С. Гайворонская, А.В. Рябцов // *Applicable Information Models*. – Sofia: ITHEA, 2011. – № 22. – P.169-181.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		100

12. Гайворонская Г.С. Проблема обеспечения полностью оптической коммутации в конвергентных сетях [Текст]/ Г.С. Гайворонская // Збірник тез V МНТК «Проблеми телекомунікацій». – Київ. – НТУУ «КПІ». – 2011. – С.39.

13. Костров С.В. Оптический переключатель для волоконно-оптических линий связи на основе многослойного диэлектрического селективного зеркала. [Текст]: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 02.12.11/ С.В. Костров, 2011. - 19 с.

14. Слепов Н. Оптические кросс-коммутаторы. Принципы реализации и архитектура [Текст]/ Н. Слепов. // Электроника: НТБ. – 1999. – № 6.

15. *Channel Drop Filters in Photonic Crystals* [Текст]: довідник /Fan Sh., Villeneuve P.R., Joannopoulos J.D., Haus H.A. - *Optics Express*, 6 July 1998 – 125 p.

16. *Ashby N., Miller Stanley C. Jr. Shift of light beams due to total internal reflection* [Текст]: довідник / N. Ashby, Jr. C. Miller Stanley; *Physical Review*, 1973. - V.7.P.2383.

17. Канаков В.И. Разработка методик построения волоконно-оптических телекоммуникационных систем на основе компонентов с применением наноструктурных материалов [Текст]: автореф. дис....д-ра тех. наук: 04.10.2004/ В.И. Канаков, 2004. - 159 с.

18. *Jason P. Jue Optical Burst Switched Networks / Jue P. Jason, Vinod M. Vokkarane // Boston. – 2005. – 147 p.*

19. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы *MPLS* [Текст]: довідник / А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн, 2005.– 304 с.

20. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] / Р. Фриман // Под ред. Н. Н. Слепова: Техносфера, 2003 г., 590 с.

21. Маккавеев В.И., Светиков Ю.В. Оптические методы обработки сигналов – основа волоконно-оптических систем будущего [Текст] / В.И. Маккавеев, Ю.В. Светиков // Электросвязь. – 1992. – №5.

22. Скляр О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи [Текст] / О.К. Скляр - 2001. – 237 с.

23. Кучерявый Е.А. NS-2 как универсальное средство имитационного моделирования сетей связи [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2007/fvti/erygina/library/lib4.htm> – 10.01.12 г. – Загол. з екрану.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

24. Гайворонська Г.С., Рябцов О.В. Феноменологічна модель повністю оптичного комутатора з оптичною адресацією [Текст] / Г.С. Гайворонська, О.В. Рябцов // Вісник ДУІКТ. – 2012. – Т.10, №1. – С. 54.

25. Гайворонская Г. С. Коммутаторы оптических сигналов [Текст] / Г. С. Гайворонская, А. В.Рябцов // Холодильна техніка і технологія.– 2009. – № 2 (118). – С. 55-59.

26. Гайворонская Г. С. Методы и средства коммутации оптических сигналов в информационных сетях [Текст] / Г. С. Гайворонская, А. В. Рябцов // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – № 2 (124). – С. 74-82.

27. Славинская В.В. Пространственная коммутация оптического излучения в волоконно-оптических сетях передачи информации на основе акустооптического взаимодействия [Текст]: автореф. дис...д-ра тех. наук: 14.06.2004 / В.В Славинская, 2004. - 165 с.

28. Султанов А.Х., Виноградова И.Л. Подход к построению коммутаторов оптических сигналов, управляемых оптическим излучением [Текст] / А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова – 2008. – 9 с.

29. Котов В.М. Акустооптический коммутатор 2x2 оптических излучений с разными длинами волн на основе монокристалла тизия оксида [Текст] / В.М. Котов, 1997. - 6 с.

30. Шарварко В.Г. Волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие. –Изд-во ТРТУ, 2006. – 170 с.

31. *Betty L.Anderson, Richard L. Anderson. Fundamentals of Semiconductor Devices/ B.L. Anderson, R.L. Anderson* [Електронний ресурс] / *1st Edition, ISBN 0072369779, 200518.* – Режим доступу: <http://www.pioneerconsulting.com/products.php3>.

32. *D.F. Gray. GLOBAL CROSSING TO USE LUCENT OPTICAL SWITCH* [Текст] / *D.F. Gray.*// *Info World, v.26, N19, pi 98, 2005*

33. *Awduche D. and Rekhter Y. Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Cross-connects* [Текст] / *D. Awduche and Y. Rekhter* // *IEEE Commun. Mag., Mar. 2001*

34. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. – Київ.: Lucent Technologies, 1999. – 483 с.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102

35. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.

36. Galina Gayvoronska, Borys Rybalov *Possibility's Evaluation of Optical Processors Usage for Optical Signals Switching's Control* // II Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и Технологии (PIC&T'2015)». – Харьков, 2015. – С. 196-199.

37. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Особенности коммутации оптических сигналов при использовании различных режимов переноса информации /Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. // Холодильна техніка і технологія. – Одеса. – ОНАХТ, 2015. – № 6 (51) – С. 100-106.

38. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Применение скалярных критериев выбора для определения структуры многозвенной коммутационной схемы для коммутации оптических сигналов. – *International Journal "Information Models and Analyses" Volume 4, Number 4, Sofia, Bulgaria, 2015* – С. 376-388.

39. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Задача выбора коммутационного элемента для оптической телекоммуникационной сети. – *International Journal "Information Models and Analyses" Volume 5, Number 1, Sofia, Bulgaria, 2016* – С. 78-99.

40. Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А. Исследование возможности использования оптических процессоров для управления коммутацией оптических сигналов // Збірник матеріалів X Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016 – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 77-79.

41. Рыбалов Б.О., Барабаш Т.М., Бобрікова І.С., Бондаренко В.Г. Підвищення швидкодії оптичних мереж при використанні оптичних процесорів // *International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» Wloclawek, Republic of Poland, December 21–22, 2018. Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018.* – P. 57-58.

42. Рыбалов Б.О. Методи забезпечення безпеки при передачі інформації по волоконно-оптичних каналах зв'язку // Міжнародна науково-практична конференція "Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи", секція 5, 10-11 вересня 2020 року, стор. 304-305.

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

43. Рыбалов Б.О., Рыбалов А.Б. Способ оценки характеристик оптических коммутационных элементов // Материалы XXV Междунар. научн.-техн. конференции "Современные средства связи", 22-23 окт. 2020 г., Минск, Респ. Беларусь, стр. 148-149.

44. Сахарова С.В., Рыбалов Б.О., Барабаш Т.М. Особливості вибора обладнання для реалізації оптичної мережі доступу // Інформаційні технології і автоматизація – 2021 // Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, ОНАХТ, 21-22 жовтня 2021 р., стор. 294-296.

45. Рыбалов Б.О., Рыбалов А.Б. Порівняння методів оптичної комутації у повністю оптичних мережах // XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів // Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій. Одеса, ОНАХТ, 22-23 квітня 2021 р., с. 158-159.

46. *Photonic Arithmetic Computing Engine* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.lightelligence.ai/index.php>

47. Сахарова С.В., Рыбалов Б.О. Вимірювання параметрів оптичних компонентів мереж // XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів // Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій. Одеса, ОНТУ, 20-21 квітня 2023 р., с. 311-312.

48. Басюркіна Н.Й., Свистун Т.В. Методичні вказівки до оцінки науково-технічної ефективності розробки нової технології, нового обладнання та інших інновацій. Для студентів всіх спеціальностей СВО «бакалавр» і «магістр» денної і заочної форм навчання. Одеса: ОНТУ, 2023 р., 18 с.

### **Перелік основних умовних скорочень**

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;

МСЕ – міжнародний союз електрозв'язку;

ОКЕ – оптичний комутаційний елемент;

ОТМ – оптична телекомунікаційна мережа;

*AON – All-Optical Networks;*

*DWDM – Dense Wavelength-Division Multiplexing;*

*EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.*

					<i>KPM.KI.1.884-03.3.9</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104