

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних»

КВРКІ. 160110.17.01.01 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-20-1



Душко Д.О.
Ініціали, прізвище

Керівник докт. техн. наук, професор
Науковий ступінь, вчене звання



Березький О.М.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС, д.т.н., проф.

Г. О. Говорушенко

04 05 2022 р.



Хмельницький, 2022

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Г.О.Говорущенко



“ 01 ” 09 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)

Душко Дмитро Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Керівник проекту (роботи) д.т.н., професор Березький О.М.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Загверджена наказом ректора університету від 06.01.2022р. № 1

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 03.05.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

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

Аналіз відомих методів синтезу оптичних мереж центрів обробки даних





Архітектура синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Засоби оптичних мереж центрів обробки даних

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|--|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Нормоконтроль | Лисенко С.М., професор кафедри КПС |  |  |
| Антиплагіат | Нічепорук А.О., доцент кафедри КПС |  |  |

7. Дата видачі завдання « 06 » 09 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №з/п | Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи) | Термін виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|------|---|--|----------|
| 1 | Вибір напряму дослідження та узгодження тематики КРМ з керівником | 01.09.2021 | виконано |
| 2 | Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження | 05.10.2021 | виконано |
| 3 | Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі | 05.11.2021 | виконано |
| 4 | Робота над розділом 2 – розробка архітектури для вирішення поставленої задачі | 05.12.2021 | виконано |
| 5 | Робота над науковою статтею та тезами | 05.01.2022 | виконано |
| 6 | Робота над розділом 3 – розробка методу для вирішення поставленої задачі | 15.02.2022 | виконано |
| 7 | Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина | 05.04.2022 | виконано |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки згідно вимог | 15.04.2022 | виконано |
| 9 | Попередній захист КРМ | 15.04.2022 | виконано |
| 10 | Захист КРМ на засіданні ЕК | До 10.05.2022 | |

Студент


Підпис

Дмитро ДУШКО
Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)


Підпис

Олег БЕРЕЗЬКИЙ
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи: Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Автор роботи: Душко Дмитро Олександрович

Керівник роботи: Савенко О.С.

Пояснювальна записка: 79 с., 21 рис., 2 табл., 81 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: центри обробки даних, мережі, архітектура, бездротові мережі, технології оптичного зв'язку.

Об'єктом дослідження є процес синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Предметом дослідження є методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Метою дипломної роботи є проектування архітектури та розробка методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи теорії комп'ютерних мереж, архітектури комп'ютерів, теорії множин.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних;
- удосконалено метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і оптичних мереж центрів обробки даних та синтезована.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробеній архітектурі та на її основі синтезовано оптичний мережу центрів обробки даних, результати з яких можуть поширені у великі центри обробки даних.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| Скорочення та умовні позначки | 4 |
| Вступ..... | 5 |
| 1 АНАЛІЗ БЕЗДРОТОВИХ ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ | 7 |
| 1.1 Аналіз предметної області..... | 7 |
| 1.2 Технологія оптичного бездротового зв'язку..... | 14 |
| 1.3 Критерії та елементи для класифікації ОВП | 18 |
| 1.4 Постановка задачі..... | 21 |
| 1.5 Висновки..... | 21 |
| 2 МОДЕЛЬ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДАНИХ..... | 22 |
| 2.1 Безпроводові технології для центрів обробки даних..... | 22 |
| 2.2 Архітектура мережі центрів обробки даних | 29 |
| 2.3 Висновки..... | 36 |
| 3 ОПТИЧНИЙ БЕЗДРОТОВИЙ СТІЛЬНИКОВИЙ ЦЕНТР ОБРОБКИ ДАНИХ . | 37 |
| 3.1 Архітектура ОБС ЦОД..... | 37 |
| 3.2 Протокол перемикання та маршрутизації..... | 44 |
| 3.3 Висновки..... | 52 |
| 4 БАГАТООАДРЕСНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕМИКАЧІ ВІЛЬНОГО ПРОСТОРУ..... | 53 |
| 4.1 Вибір типу архітектури..... | 53 |
| 4.2 Багатоадресний перемикач ОВП з використанням триступінчастих комутаційних елементів перемикання..... | 57 |
| 4.3 Перестановочно неблокуючий багатоадресний перемикач ОВП..... | 65 |
| 4.4 Висновки | 70 |
| ВИСНОВКИ..... | 72 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 73 |
| Додаток А(Презентація до захисту дипломної роботи)..... | 80 |
| Додаток Б (Копія наукової публікації)..... | 91 |

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БД - база даних

ОС - операційна система

ПЗ - програмне забезпечення

МЦОД - мережі центрів обробки даних

РЧ - радіочастотний зв'язок

ОБЗ - оптичний бездротовий зв'язок

ОВП - технології оптики вільного простору

ВСТУП

Мережі центрів обробки даних (МЦОД) наступного покоління повинні підтримувати постійне збільшення мережевого трафіку, задовольняючи мінімальні вимоги до продуктивності постійно і неперервно, тобто зберігаючи латентність, надійність, гнучкість та масштабованість. Тому, більша кількість кабелів, тобто волоконної оптики, може знадобитися в звичайних провідних МЦОД. У додатковому прагненні до обмеження можливої топології, велика кількість кабелів може призвести до проблем проектування та розробки, пов'язаних з дротяним каналом та обслуговуванням, розсіюванням тепла та споживанням електроенергії. Для вирішення складності кабелів у провідних МЦОД розглянемо оптичні мережні комунікації (ОМК), клас оптичних архітектур бездротових стільникових мереж центрів обробки даних, в яких фіксована пряма видимість оптичного бездротового зв'язку Омк використовуються для з'єднання стійок, розташованих у звичайних багатокутних топологіях. Представимо архітектуру Омк МЦОД, розробляючи її теоретичні основи та досліджуючи протоколи маршрутизації і розробку приймача-передавача Омк. Щоб реалізувати повністю бездротовий МЦОД, сервери в стійках, також, повинні бути підключені за допомогою посилення Омк. Існує, однак, складність підключення декількох сусідніх мережевих компонентів, таких як сервери в стійці, використовуючи посилення «точка-точка» фіксованої прямої видимості (ФПВ). Щоб подолати цю проблему пропонується перевіряти доцільність підключення сусідніх мережевих компонентів за допомогою ФПВ.

Актуальність роботи полягає в розробці архітектури та методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних, які вирішують проблеми в організації зв'язку у великих центрах обробки інформації.

Метою дипломної роботи є проектування архітектури та розробка методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:

- проаналізувати відомі методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних та виділити їх недоліки;
- удосконалити архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних та спроектувати її;
- удосконалити метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних;
- реалізувати центр обробки даних згідно розроблених рішень.

Об'єктом дослідження є процес синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Предметом дослідження є методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних;
- удосконалено метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленій архітектурі та на її основі синтезовано оптичний мережу центрів обробки даних, результати з яких можуть поширені у великі центри обробки даних.

Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення методи теорії комп'ютерних мереж, архітектури комп'ютерів, теорії множин.

За темою дипломної роботи опублікована одна публікація у Збірнику наукових праць за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021». Хмельницький – 2021. – С.81-82. [81].

1 АНАЛІЗ БЕЗДРОВОВИХ ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Аналіз предметної області

Пропускна здатність і обчислювально-інтенсивні програми Big Data в Інтернет речей (IoT) і аналізі даних в режимі реального часу досягли своїх можливостей, тобто вичерпують свої ресурси і не можуть продовжувати покращення характеристик і зокрема пришвидшення обробки. Мережі центрів обробки даних (МЦОД) наступного покоління повинні підтримувати постійне збільшення мережевого трафіку, задовольняючи мінімальні вимоги до продуктивності постійно і неперервно, тобто зберігаючи латентність, надійність, гнучкість та масштабованість. Тому, більша кількість кабелів, тобто волоконної оптики, може знадобитися в звичайних провідних МЦОД. У додатковому прагненні до обмеження можливої топології, велика кількість кабелів може призвести до проблем проектування та розробки, пов'язаних з дротяним каналом та обслуговуванням, розсіюванням тепла та споживанням електроенергії. Для вирішення складності кабелів у провідних МЦОД розглянемо оптичні мережні комунікації (ОМК), клас оптичних архітектур бездротових стільникових мереж центрів обробки даних, в яких фіксована пряма видимість оптичного бездротового зв'язку Омк використовуються для з'єднання стійок, розташованих у звичайних багатокутних топологіях. Представимо архітектуру Омк МЦОД, розробляючи її теоретичні основи та досліджуючи протоколи маршрутизації і розробку приймача-передавача Омк. Щоб реалізувати повністю бездротовий МЦОД, сервери в стійках також повинні бути підключені за допомогою посилянь Омк. Існує, однак, складність підключення декількох сусідніх мережевих компонентів, таких як сервери в стійці, використовуючи посилення «точка-точка» фіксованої прямої видимості (ФПВ). Щоб подолати цю проблему пропонується перевіряти доцільність підключення сусідніх мережевих компонентів за допомогою ФПВ.

Big Data – це термін, який використовується для опису великих обсягів, високої швидкості та / або високих наборів даних [17]. Додатки big data можна знайти в таких дисциплінах, як Інтернет речі (IoT) [18], біоінформатика [19], соціальні медіа [20] та нано-інформатика [21]. За даними Міжнародної корпорації даних (IDC), очікується, що ринок IoT зросте до 38,1 мільярда до 2025 року [23]. Оскільки портфель інтенсивних застосунків Big Data продовжує зростати, попит на ефективні ЦОД, які підтримують 100 000 серверів і за його межами [24].

Мережа постійного потоку МЦОД – це мережева інфраструктура, яка надає послуги внутрішньо- та між мережами. Таким чином, важливо розробити ефективну високошвидкісну / високошвидкісну пропускну здатність МЦОД для задоволення високих обчислювальних та комунікаційних вимог у постійному потоці. Проектування МЦОД, також, відповідає кільком вимогам, таким як масштабованість, низька затримка, доступність та економічна ефективність. Інші практичні складові, включаючи складність кабелів, енергоспоживання та охолодження, також повинні бути розглянуті в конструкції [9, 25].

Дизайн-простір МЦОД є свідком прискореної промисловості, де просувають нові технології для МЦОД, оскільки портфель пропускну здатності та обчислювально-інтенсивних застосунків Big Data продовжує розширюватися. Таким чином, де-знак і розвиток високоефективних високошвидкісних / високошвидкісних МЦОД має вирішальне значення для максимізації загальних агрегованих обчислювальних і комунікаційних можливостей майбутніх ДК. Зображення змін при проектуванні МЦОД представлено на рис. 1.1. Зв'язки між елементами вказують на проблеми, з якими стикається кожен проєкт МЦОД, а стрілка вказує на запропоноване рішення.

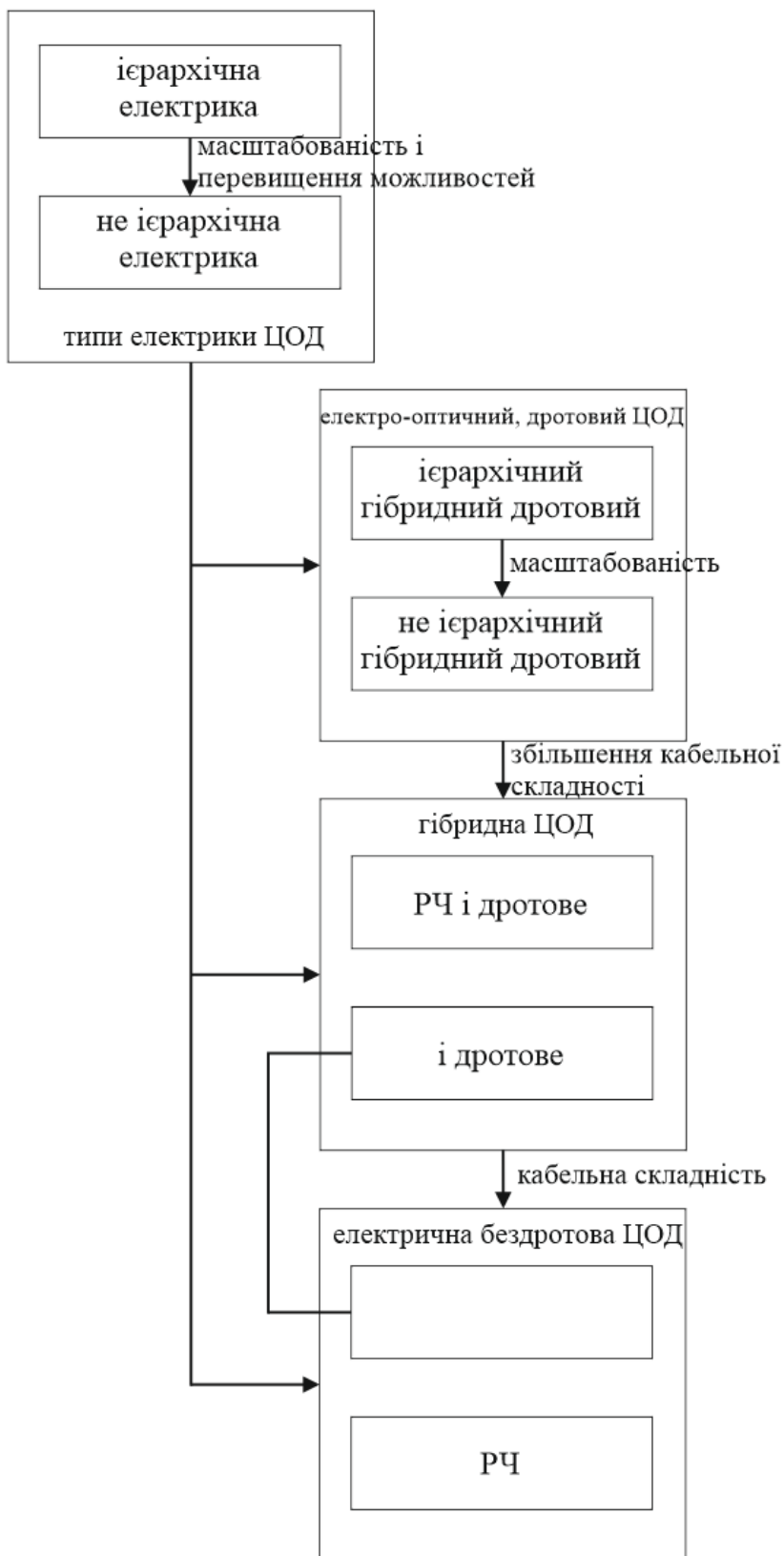
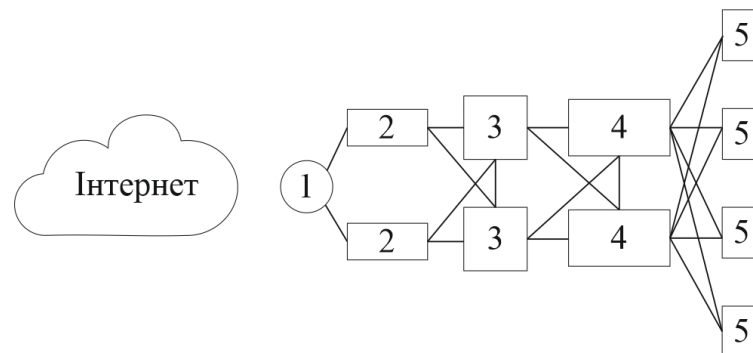


Рисунок 1.1 – Проекти МЦОД

У широко використовуваній традиційній ієрархічній архітектурі МЦОД на основі дерева сервери складаються в стійки, розташовані рядками. Перемикач використовується для виконання внутрішньо- і між стійкових комунікацій. Шлюзовий маршрутизатор використовується для з'єднання передньої частини вмісту та перемикачів балансування навантаження з Інтернетом. На задньому кінці перемикачі балансування вмісту та навантаження підключаються до серверів за допомогою двох або трьох шарів комутаторів. Електричні кабелі в основному використовуються для внутрішньо- і між стійкових зв'язків зв'язку. Коли рухатись вгору по дереву (рис. 1.2), то більш потужні посилення та перемикачі будуть використовуватися з надмірними факторами підписки 1:2 або більше на більш високих рівнях дерева. Високі коефіцієнти перенабірки, однак, негативно впливають на між стійкові комунікації [26].



- 1 – маршрутизатор
- 2 – перемикачі вмісту та балансування навантаження
- 3 – основні перемикачі
- 4 – агрегатні перемикачі
- 5 – результуючі складові

Рисунок 1.2 – Традиційна ієрархічна архітектура МЦОД на основі дерева

Аналіз реальної статистики постійного струму показує, що деякі програми мають непередбачувані схеми трафіку та не збалансований розподіл трафіку [27-32], що може призвести до тимчасових точок доступу. Ієрархічним архитектурам МЦОД важко адаптуватися до непередбачуваних

змін у схемах трафіку. При цьому продуктивність мережі може погіршитися через недостатню пропускну здатність мережі і перевантаження потоку [31, 32]. Сучасні тенденції в високошвидкісних програмах постійного потоку показують, що проблема точок доступу, ймовірно, погіршиться в майбутньому [6, 33, 34]. Крім того, високо архівська архітектура МЦОД може мати низьку масштабованість і продуктивність [35-39], а також може вимагати дорогих перемикачів для підтримки великої кількості серверів [29]. Проблему надмірного опису, з якою стикаються ієрархічні МЦОД, пошуковці поліпшили через існуючі ієрархічні топології і розробили нові неієрархічні, в основному рекурсивні, топології. У неієрархічних МЦОД (рис. 1.1), використовується велика кількість посилань і комутаторів з варіантами багатопрохідної маршрутизації таким чином, щоб ядро мережі не повторювало дії [27]. У будь-який момент мережі доступна повна пропускну здатність бісекцій для пересилання всього вхідного трафіку. Неієрархічні архітектури МЦОД демонструють кращу масштабованість і відмовостійкість порівняно зі звичайними ієрархічними архітектурами [27], однак поліпшення продуктивності досягається за рахунок більшої кількості проводів, що призводить до збільшення складності кабелів. Електричні з'єднання, що використовуються більшістю існуючих МЦОД (ієрархічні / неієрархічні), все частіше стають вузьким місцем цілісної системи, оскільки в кожному порту потрібно оптично-електрично-оптичне (О-Е-О) з'єднання. Крім того, останні реальні сліди руху постійного струму показують, що більше 95% даних передаються найбільшими потоками в топ-10%. Таким чином, з'єднання, які можуть підтримувати потоки з великою кількістю даних, можуть бути більш сприятливими, ніж гарантувати повну пропускну здатність бісекцій між великою кількістю пар серверів по всьому МЦОД. Це, в свою чергу, спонукало дослідників дослідити використання оптичних з'єднань в МЦОД [18, 19, 21-28], особливо для передачі таких потоків.

Інший підхід до вирішення проблеми гарячої точки полягає в реалізації «гнучкої» мережі для встановлення зв'язків на вимогу між вузлами, які

сприйнятливі до точки доступу. Посилання на вимогу можуть базуватися на дротовій (рис. 1.1) або бездротовій (рис. 1.1) технології. У випадку провідних технологій товарні комутатори розгортаються для підключення підмножини вузлів і забезпечення дротових зв'язків на вимогу, коли це необхідно. Перевагою провідного зв'язку є те, що гнучка провідна мережа, реалізована відповідно до оригінального МЦОД, особливо те, що більшість МЦОД, де використовується сьогодні, можуть бути класифіковані як провідні МЦОД, які використовують мідні кабелі та волоконну оптику для зв'язку. Для ефективної роботи провідної гнучкої мережі мережа повинна з'єднувати вузли, які схильні до проблеми гарячої точки. Однак прогнозування таких вузлів є складною проблемою. Таким чином, провідний зв'язок може не забезпечити необхідну гнучкість. Крім того, провідна гнучка мережа вимагає деплоїзування більшої кількості кабелів, що загострюють проблеми, пов'язані з складністю кабелів.

Потенційна можливість встановлення гнучких бездротових зв'язків на вимогу спонукала дослідників досліджувати бездротовий зв'язок як можливе рішення проблем гарячої точки та складності кабелів одночасно. Бездротова технологія може бути використана або для збільшення дротового МЦОД, що призводить до гібридного МЦОД (рис. 1.1) або до розробки чистого бездротового МЦОД (рис. 1.1). Існує дві бездротові технології: радіочастотний (РЧ) і оптичний бездротовий зв'язок (ОБЗ).

Рамачандран та ін. запропонували ідею використання технології 60 ГГц РЧ в дизайні МЦОД [4]. Їх роботи були присвячені дослідженню доцільності розгортання технології радіочастот 60 ГГц в МЦОД [6, 43-49]. Незважаючи на багатообіцяючу, технологія 60 ГГц знижує свої обмеження, оскільки вона має меншу практичну пропускну здатність і страждає від високої втрати загасання і розмноження [4,9,50]. Варіації моделі 60 ГГц накладають додаткові обмеження на активність бездротових модулів в безпосередній близькості через перешкоди. Це збільшує складність маршрутизації та управління мережею, а також зменшує пропускну здатність [6].

Останні досягнення в області технології оптики вільного простору (ОВП) та ОБЗ скоротили розрив між ОВП і РЧ технологіями до такої міри, що ОВП в даний час розглядається як технологія доповнення для РЧ в системах зв'язку наступного покоління, таких як бездротові мережі 5G. Технологія РЧ може запропонувати високу швидкість передачі даних при використанні високих частот носіїв, однак поширення РЧ стає більш залежним від ЛОС. Таким чином, ключовими особливостями радіочастотних технологій, такими як мобільність, охоплення та чутливість приймача, стають незрозумілими [51].

| | | | | | |
|-------------|-------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| дротовий | оптичний | оптичний звичайний дротовий дата-центр | | | |
| | електричний | гібридний дротовий дата-центр | електричний звичайний дротовий | | |
| бездротовий | РЧ | гібридний дата-центр | з РЧ зв'язком | РЧ звичайний бездротовий дата-центр | |
| | ОВП | гібридний дата-центр | з ОВП зв'язком | гібридний бездротовий дата-центр | ОВП звичайний бездротовий дата-центр |
| | | оптичний | електричний | РЧ | ОВП |
| | | дротовий | | бездротовий | |

Рисунок 1.3 – Проекти технологій МЦОД

Як технології 60 ГГц, так і ОВП можна порівняти, оскільки вони працюють в нерегульованій стандартизованій смугі спектру. Крім того, обидві технології мають короткий діапазон і потенційно низьку вартість, що робить їх сильними кандидатами для створення мереж в МЦОД. У випадку ЗСО дуже висока несуча частота і відносно велика площа детектора забезпечують просторове різноманіття, яке запобігає багатопрохідному згасанню. З іншого боку, радіочастотні зв'язки відчувають величину сигналу і коливання фаз. Тому, конструкція ФСО-посилань може бути простіше, ніж у РЧ [1]. Переваги технології ОВП та її успішне розгортання в широкому спектрі застосувань спонукали дослідників дослідити використання ОВП при проектуванні МЦОД [9, 11, 50, 52]. Приклади застосунків, в яких ОВП вже знайшов своє місце: мобільні мережі backhaul, космічний зв'язок і підводне

зондування. Помітне збільшення використання технології ОВП в різних додатках обумовлено перевагами, представленими технологією ОВП, такими як висока швидкість передачі даних, низькі перешкоди і висока швидкість світла, що приблизно в 1,5 рази швидше, ніж у волоконної оптики, що означає менші затримки.

Таким чином, розроблено багаторівневу класифікацію для застосування технологій ОВП в чотирьох різних комунікаційних середовищах. Ця класифікація може бути використана для класифікації існуючих і нових провідних і бездротових МЦОД. Запропонована класифікація допомагає визначити потенційні рішення для МЦОД наступного покоління.

1.2 Технологія оптичного бездротового зв'язку

Технологія зв'язку «оптичний вільний простір» (ОВП), також відома як оптичний бездротовий зв'язок (ОБЗ), відновила великий інтерес за останні кілька років. У деяких випадках ОВП розглядається як альтернатива існуючим технологіям. В інших випадках ОВП розглядається як сильний кандидат на доповнення та інтеграцію з технологіями наступного покоління, такими як бездротові мережі 5G. Відповідно, технологія ОВП широко використовується в різних приміщеннях (наприклад, дата-центрах), наземних (наприклад, мобільних мережах), просторі (наприклад, міжсупутникова і глибока космічна комунікація) і підводних системах (наприклад, підводне зондування). Оскільки портфель застосунків технології ОВП зростає, так само як і необхідність чіткої класифікації конфігурацій зв'язку ОВП. Більшість існуючих опитувань і класифікацій є однорівневими класифікаційними катіонами, і, отже, недостатньо інклюзивними для розміщення останніх, і нових змін, і розробок різних конфігурацій, і систем зв'язку ОВП. Тому, розглядатимемо багаторівневу класифікаційну систему для класифікації існуючих і майбутніх зв'язків і систем ОВП.

Нові програми та системи Big Data в таких предметних галузях, як соціальні медіа та Інтернет речей (IoT), характеризуються інтенсивністю пропускної здатності та чутливістю до продуктивності. Очікується, що ринок IoT зросте з 9,1 мільярда пристроїв і об'єктів, підключених до Інтернету в 2013 році, до 30 мільярда до 2023 року [23], що більше, ніж втричі більше світового населення очікується до 2023 року. Оскільки такі програми та системи швидко наближаються до кінцевих користувачів, системи бездротового зв'язку є улюбленими технологіями зв'язку, оскільки вони дозволяють мобільність користувачів. Крім того, бездротові технології уникають більшої частини властивої складності, від якої страждають провідні технології, такі як довгий час налаштування. Хоча більшість компонентів ОВП дешевше, легше і менше, ніж у зв'язків з РЧ, слід мати на увазі, що мережеві рішення ОВП не такі зрілі і комерційно доступні, як їх рф-аналог. Це є основним чинником того, що комерційні ОВП рішення можуть бути іноді дорогими і громіздкішими, особливо у випадку наземних зв'язків ОВП [72]. Оскільки технологія стає все більш популярною і з очікуваним зростанням ринкової конкуренції, очікується, що ціна на рішення ОВП знизиться. З іншої сторони, в міру дорослішання технології дизайнер рішень ОВП зможе розробити кращі практики проектування, які вплинуть на розмір модулів, що використовуються в системах ОВП. Технологія ОВП також розглядається як додаткова технологія для систем РЧ [2]. Ця опора дуже важлива для застосунків, в яких слід уникати перешкод з радіочастотними системами, наприклад, в лікарнях і в персональних розважальних системах на комерційних літаках, щоб пом'якшити перешкоди в радіочастотні навігаційні та авіонні системи [73]. Крім того, наступні покоління систем бездротового зв'язку (наприклад, 5G) включають в себе кілька додаткових технологій доступу разом з радіочастотною технікою, включаючи ОВП [74, 75]. Продовження досліджень академічними установами, промисловими та військовими організаціями дозволило ОВП зв'язку знайти своє місце в багатьох застосунках, таких як, мобільні мережі-роботи backhaul [80, 81], космічний зв'язок [82], підводне (UW) зондування [83, 84], бездротові мережі зондора (WSN) [63],

внутрішні локальні мережі [85, 86], мережі центрів обробки даних (МЦОД) [64] і багато інших застосунків. Переваги технології ОВП відомі вже давно. Однак використання цих переваг сприяло нещодавнім розробкам та досягненням у технологіях ОВП. В результаті, велика кількість наукових робіт з ОВП була опублікована останнім часом. Враховуючи, що більшість зусиль з класифікації технологій ОВП були зроблені в кінці 90-х років, тому існуючі класифікації технологій ОВП застаріли [1, 2, 87]. Більшість старих зусиль з класифікації просто переглядають і диференціюють системи ОВП без урахування розробки нових / майбутніх зв'язків ОВП. Тому, може бути важко, якщо не неможливо, вписати деякі з нових і майбутніх класів конфігурації в існуючі однорівневі схеми класифікації. Відповідно, багато оглядових робіт повинні ввести додаткові класи, що робить загальну класифікаційну схему непослідовною і несистемною в її розширенні. Наприклад, розглянемо багатопозиційну дифузну систему [88, 89], незважаючи на її схожість з дифузними системами [1, 73, 90, 91]. Крім того, велика кількість нових розробок в ОВП призводить до декількох невідповідностей, а іноді і суперечностей між різними класифікаціями і визначеннями, такими як їх конвенції про іменування.

В зв'язку з цим існує потреба в класифікації, яка може систематично виражати існуючі, нові та майбутні конфігурації та програми зв'язку ОВП. Тоді, завданнями дослідження є такі:

1. Розробити багаторівневу класифікацію, засновану на наборі нотацій, які можуть бути систематично використані для вираження різних існуючих і нових фігурацій зв'язку ОВП, щоб допомогти зменшити двозначність. Щоб показати ефективність запропонованої класифікації, використати її для класифікації різних конфігурацій посилань, перелічених у різноманітних існуючих класифікаціях, а також використати запропоновану класифікацію для класифікації конфігурацій зв'язку ОВП, які раніше не можна було класифікувати. Показати, як запропонована класифікація може розвиватися, щоб включити будь-які майбутні конфігурації зв'язку ОВП.

2. Дослідження застосування технології ОВП в різних комунікаційних середовищах, а саме: приміщенні, атмосферному, космічному, підводному та гетерогенному. Не існує класифікації / опитування, яка стосується різноманітності технологічних застосунків ОВП у всіх середовищах. Для кожного типу середовища підсумовуємо останні дослідницькі зусилля та надаємо список вибраних посилань для аплікацій у кожній конфігурації посилань.

3. Ввести запропоновану класифікацію в дію і використовувати її для опису різних систем ОВП. Розглядатимемо гетерогенні системи ОВП, в яких різні типи зв'язків ОВП об'єднуються для реалізації ефективної системи.

4. Уніфікована розроблена структура може бути використана для розробки модульних і послідовних моделей каналів ОВП для інструментів моделювання ОВП.

Оптичні бездротові та волоконно-оптичні системи зв'язку працюють в одній смузі спектра і мають аналогічні можливості пропускної здатності передачі, тому оптичний бездротовий зв'язок використовується як волоконна оптика.

Найбільш часто використовуваними джерелами світла в системах ОВП є лазерні діоди (ЛД) і світлодіоди. ЛД є кращими в застосунках з високими вимогами до швидкості передачі даних через їх високі оптичні потужності та більш широку модуляційність пропускної здатності. Існують, однак, стандарти та обмеження потужності, що контролюють використання ЛД для пом'якшення потенційної небезпеки для безпеки очей та шкіри [51]. Світлодіоди віддають перевагу в низькій / середній швидкості передачі даних в приміщенні аплікації. Це тому, що світлодіоди дешевше і надійніше. Крім того, світлодіоди є розширеними джерелами з великою площею випромінювачів. Тому, світлодіоди можуть бути безпечними навіть при відносно високих вимогах. Порівняно з ЛД світлодіоди підтримують більш низькі показники передачі даних [93, 114]. Однак швидкість передачі даних до 1 Gbps з використанням світлодіодів і швидкість-адаптивна дискретна багатотонна модуляція досягається [115]. Фотодетектори позитивного внутрішньо-негативного ПВН і

фотодетектори АПД є найбільш часто використовуваними типами фотодетекторів в системах ОВП [1, 51]. ПВН-код фотодетектори віддають перевагу в низькій вартості і низьких швидкостях передачі даних ОВП посилення. Це тому, що вони дешеві, можуть працювати при низькому ухилі і мати толерантність до широких температурних флюацій [1, 93]. АПД - це фотодетектори ПВН - коду, що працюють з дуже високим зворотним ухилом. Це призводить до високого внутрішнього електричного посилення, що збільшує сигнал на приймачі [1, 2]. У порівнянні з ПВН-фотодетекторами, АПД мають потрібну продуктивність, особливо в системних темах з обмеженим шумом навколишнього світла. Таким чином, АПД віддають перевагу високим показникам передачі даних і високопродуктивним системам ОВП. АПД коштують дорожче, а їх посилення залежить від температури.

Різні схеми модуляції мають різну надійність передачі, енергію та спектральну ефективність. Схема модуляції вибирається на основі типу програми. Наприклад, простота модуляції вимикання ключів робить його найбільш часто використовуваною схемою модуляції в системах ОВП. Тим не менш, цей показник може бути неефективним у більш складних системах, які вимагають високої швидкості передачі даних, таких як глибока космічна комунікація. Для таких застосунків зазвичай перевага надається модуляції імпульсного положення або однієї з її варіацій, наприклад, змінної [51, 84, 120].

1.3. Критерії та елементи для класифікації ОВП

Однією з основних проблем, які призвели до двозначності у відомих класифікаціях, є те, що конфігурації посилень ОВП класифіковані згідно характеру їх реалізації, а не їх функціональних можливостей. З цією метою розроблятимемо нову модель класифікації згідно функцій сценарно-орієнтованої класифікації для конфігурацій посилень ОВП. Класифікація абстрагуватиме деталі реалізації різних конфігурацій, такі, що конфігурації з різними деталями реалізації, але виконують одну і ту ж функцію, об'єднуюватимуться в один клас. Наприклад, використовуючи запропоновану

класифікацію, тепер можна комбінувати дифузні і квазі-точкові (багатоточкові) дифузні системи під тією ж конфігурацією зв'язку, оскільки вони схожі за функціями, але відрізняються за своєю реалізацією, як зазначено раніше. Використовуємо п'ять критеріїв, а саме: навколишнє середовище, тип покриття, доступність, мобільність та відстань посилення, щоб класифікувати будь-яке посилення ОВП.

1. Технологія ОВП може бути використана в чотирьох різних середовищах, а саме: внутрішній, наземний, космічний і підводний. Критий зв'язок ОВП встановлений в обмеженому просторі, такому як чіп, кімната або будівля. З іншої сторони, наземний ОВП зв'язок використовується для позначення посилення ОВП, реалізованих у зовнішньому середовищі, де атмосферні фактори впливають на якість зв'язку. На відміну від наземного зв'язку ОВП, космічний зв'язок відноситься до зовнішніх зв'язків, які не відчувають атмосферних ефектів, таких як міжсупутниковий зв'язок у космічному просторі. Нарешті, підводна ОВП є ланкою, яка реалізується під будь-якою водною поверхнею. Посилення ОВП може перетинати набір середовищ у деяких програмах. Тоді, це посиленням неоднорідним зв'язку.

2. Посилення ОВП може бути або точковим покриттям (ПК) або стільниковим покриттям (СП). У конфігурації ПК зв'язок ОВП встановлюється між одним передавачем і одним приймачем таким чином, що дані, які передають, не можуть бути отримані, за винятком призначеного приймача. Система ПК зазвичай розгортає вузький передавач (ВП), тоді як приймач є або вузьким приймачем (ВП), або широким приймачем (ШП). З іншої сторони, посилення СП використовує широкий передавач (ШП) або масив ВП. Це дозволяє кільком приймачам одночасно отримувати пучок передавача. ШП поширюють передане світло на велику площу покриття, зменшуючи щільність світла на одиницю площі. Використання одного ВП не є практичним, оскільки воно може не зібрати достатньо світла, і, таким чином, ШП або приймач різноманітності кутів, який використовує кілька елементів ВП, втрачає перевагу.

3. Посилання ОВП може бути досягнуто за допомогою конфігурації посилання ЛОС. У випадку ЛОС існує безперервна лінія між трансмітером і приймачем. ЛОС-системи не страждають від негативних наслідків. Також приймач в системі ЛОС не вимагає великого концентратора. Таким чином, ЛОС посилання використовуються для більш високих ставок даних. Посилання розподіленого ЛОС використовуються, коли прямого погляду на передавач і приймач не існує або блокується перешкодами. У посиланнях розподіленого ЛОС для підключення передавача і приймача використовується активний ретранслятор або пасивний рефлектор. Активний ретранслятор отримує сигнал від передавача і передає сигнал призначеному приймачу. Це схоже на реле, що використовуються в бездротовому зв'язку для розширення покриття або для підвищення продуктивності. З іншої сторони, пасивним відбивачем може бути дифузна поверхня (наприклад, стіни, цілі і т.д.) або дзеркальна поверхня (наприклад, дзеркала, тощо). Розглядатимемо зв'язки з пасивними відбивачами як посилання розподіленого ЛОС.

4. Посилання ОВП може бути фіксованим (Ф) або мобільним (М) посиланням. Для Ф-посилань, після встановлення, як передавач, так і приймач залишаються фіксованими та вирівняними. При необхідності мобільності використовується мобільний зв'язок, де передавач і приймач налаштовані таким чином, щоб зв'язок підтримувався за рахунок складності. Мобільність може бути реалізована за допомогою механічно керованої оптики або твердотільної багатоелементної передавача і приймача масивів. Під мобільністю розглядатимемо передбачуваний рух передавача/приймача. Зв'язки ОВП зазнають ненавмисних переміщень, які можуть вплинути на існування та якість зв'язку. Наприклад, на ОВП-посилання на верхній частині будівлі може впливати безперервний вплив будівель.

5. Для дистанційного критерію приймаємо класи, запропоновані Халігі та ін. [81]. Залежно від навколишнього середовища та програми, посилання ОВП можуть бути однією з п'яти різних відстаней посилань (діапазонів). Ультракотко (наприклад, зв'язок від чіпа до чіпа), короткий діапазон,

середній діапазон [наприклад, внутрішні бездротові локальні мережі], велика дальність і наддовгий діапазон.

Комбінації перших чотирьох критеріїв є більш згуртованими, ніж будь-яка комбінація, яка відповідає п'ятому критерію. Тому в класифікації ділимо п'ять критеріїв на дві групи. Перші чотири критерії утворюють перший дименсіон, а відстань зв'язку представляє собою другий вимір. Будь-яка комбінація критеріїв у першому вимірі дає конфігурацію зв'язку ОВП. Загалом може бути виражено 32 різних конфігурацій посилянь ОВП. Однак існують чіткі залежності і відносини між різними критеріями в першому класі. У наступному виділяємо ці залежності та обговорюємо різні конфігуративи посилянь та їх наслідки. Посилання СП відрізняється від посиляння на ПК тим, що це посиляння за своєю суттю підтримує мобільність.

Таким чином, кількість можливих комбінацій посилянь ОВП, виражених за першими чотирма критеріями, стає 24 різними конфігураціями.

1.4 Постановка задачі

Поставлена мета потребує розв'язання таких основних задач:

- проаналізувати відомі методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних та виділити їх недоліки;
- удосконалити архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних та спроектувати її;
- удосконалити метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних;
- реалізувати центр обробки даних згідно розроблених рішень.

1.5 Висновки

В результаті проведеного дослідження предметної області було встановлено недоліки відомих рішень і виділено їх з метою розробки рішень, які б покращили синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

2 МОДЕЛЬ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДАНИХ

2.1 Безпроводові технології для центрів обробки даних

Розглядатимемо оптичний вільний простір, зв'язок і радіочастоту 60 ГГц (РЧ), як дві ключові технології-кандидати для реалізації бездротових зв'язків в ЦОД. Ми представляємо загальну схему класифікації, яка може бути використана для класифікації поточних і майбутніх ЦОД на основі технології зв'язку, що використовується в мережі. Запропонована класифікація буде використовуватися для перегляду та оцінювання результатів з використання бездротових ЦОД.

Більшість існуючих ЦОД можна класифікувати як дротові ЦОД, в яких мідні та волоконні кабелі використовуються для роботи в мережі. Провідні ЦОД отримали все більшу увагу в дослідницькому співтоваристві ЦОД, що видно зі збільшення кількості статей та опитувань, які обговорюють, аналізують та мотивують нові розробки в провідних ЦОД [34, 354-356]. Необхідність розробки адаптивних ЦОД спонукала дослідницьке співтовариство дослідити можливість включення бездротових технологій в ЦОД.

Простір дизайну ЦОД змінюється, оскільки розгортаються нові технології для мереж, і існує нагальна потреба переосмислити філософію дизайну ЦОД. Таким чином, схема класифікації, яка може формально висловити зміни в просторі дизайну ЦОД, необхідна, щоб допомогти визначити нові конструкції ЦОД.

Розгортання технологій 60 ГГц і ОВП в ЦОД стикається з різними вимогами до дизайну і проблемами. Є багато подібностей між двома бездротовими технологіями. Тому вважатимемо, що розвиток ЦОД з використанням однієї з технологій може істотно отримати вигоду з іншої.

Бездротовий зв'язок є однією з активних областей досліджень в області зв'язку сьогодні. У бездротовому зв'язку інформація передається з трансмітера до приймача без необхідності обмеженого середовища (наприклад,

кабелю). Цифра зображує частину електромагнітного спектра. Довжина хвилі сигналу зменшується зі збільшенням частоти, а різні частоти по всьому спектру мають різні властивості поширення. Ефективна площа антени зменшується в квадраті частоти. Аудіо частоти простягаються від 3 кГц до 20 кГц в дуже низькій частотній смузі, тоді як радіочастота займає дуже широкий діапазон спектру (20 кГц - 3 ТГц). Залежно від характеру і вимог застосування підбирається відповідна радіочастота носія. Наприклад, радіохвилі мають обмежені можливості поширення в електричних провідниках, таких як солоня вода через поглинання, і, отже, дуже довгі довжини хвиль (тобто дуже низька частота) і дуже велика антена) обов'язкова. Бездротові локальні мережі IEEE 802.11b/g/n (WiFi) вимагають всесвітньої сумісності та помірної можливості проникнення у вікна, стіни. Таким чином, неліцензійні 2,4 ГГц UHF і 5 ГГц промислові, наукові та медичні радіодіапазони використовуються для реалізації малого і середнього діапазону посилення в будинках і офісах. Технологія ОВП може працювати в широкому діапазоні спектру, невидимого інфрачервоного спектру (використовується технологією оптичного волокна), видимого світла та ультрафіолету [59]. Це допомогло ОВП успішно використовуватися в широкому діапазоні застосунків.

Діапазон 60 ГГц - це неліцензійний діапазон спектра шириною 7 ГГц (57-64 ГГц). Незважаючи на неліцензійність, останні стандарти, такі як IEEE 802.11ad, розроблені для дуже високої швидкості передачі даних на частоті передачі даних на частоті 60 ГГц для забезпечення зв'язку в ЦОД [4, 27, 41]. Великий доступний спектр в діапазоні 60 ГГц дозволяє проводити велику кількість незалежно працюючих спрямованих зв'язків. Крім того, досягнення в методах модуляції та кодування допомагають підвищити спектральну ефективність, і, таким чином, ще більша кількість посилення може бути надана з використанням тієї ж пропускної здатності.

Велика кількість каналів, поряд з ретельною конструкцією, може забезпечити рівень масштабованості, необхідний для бездротового мега ЦОД. Висока частота 60 ГГц полегшує компактні антени з високим приростом.

Наприклад, антена на один квадратний дюйм може забезпечити приріст 25 дБіт при 60 ГГц. Коротка довжина хвилі 60 ГГц дозволяє проектувати складні інтерфейси і використовувати антени фазових масивів з великою кількістю елементів дуже малих форм-факторів [4]. Збільшення кількості елементів антени в фазованому масиві допомагає досягти високонаправлених пучків з невеликими слідами, тим самим збільшуючи кількість одночасних передач. Відсутність атмосферних порушень на додаток до інших привабливих атрибутів внутрішніх зв'язків ОВП робить ОВП сильним кандидатом бездротової технології, яка буде використовуватися в майбутніх бездротових ЦОД. Проста лінія ОВП складається з джерела світла на передавачі, і фотодетектора на приймачі для виявлення отриманого світла. Світлодіоди і лазерні діоди є найбільш часто використовуваними джерелами світла в лініях ОВП [51]. Компакт-диски є високо направленими джерелами, які мають високу оптичну потужність і більш широку пропускну здатність модуляції [14], і, отже, можуть підтримувати високу швидкість передачі даних. З іншої сторони, світлодіоди є випромінювачами великої площі і розглядаються як розширені джерела, які можуть безпечно експлуатуватися навіть при відносно високих потужностях. Радіочастотні технології можуть пропонувати високі швидкості передачі даних, коли використовуються високі частоти носіїв. На високих частотах [37] дифракція і відбиття ледве застосовуються. Радіаційні моделі радіочастотного зв'язку накладають додаткові обмеження на активність бездротових модулів в безпосередній близькості, щоб уникнути перешкод [52]. Хоча він менш значний в технології 60 ГГц, особливо якщо використовується форма променя, перешкоди можуть збільшити складність схем маршрутизації та управління мережею, і, таким чином, можуть зменшити загальну пропускну здатність мережі. Крім того, використання 60 ГГц в ЦОД, повному металевих конструкцій, може зробити проблему перешкод більш складною [4, 32]. Втручання не є серйозною проблемою у випадку технології ОВП, оскільки зв'язки ОВП від точки до точки використовуються для досягнення більш високих показників даних [37]. Це,

однак, означає, що зв'язок ОВП вимагає точного та стабільного вирівнювання для підтримки зв'язку.

Модуляція інтенсивності при безпосередньому виявленні, як правило, використовується у зв'язках ОВП. Висока частота носія і відносно велика область детектора забезпечують просторове різноманіття, яке запобігає багато прохідному згасанню. З іншого боку, радіочастотні зв'язки відчують величину сигналу і фазові коливання за рахунок.

ОВП і оптичне волокно є двома оптичними технологіями, що забезпечують порівнянну пропускну здатність передачі. ЦОД має можливість розширення оптичних волокон на великі відстані незначно. Складнощі, які пов'язані з прокладкою волоконних кабелів у зовнішній мережі роботи, включаючи дозволи та копання, відсутні в ЦОД. Аналогічним чином, погіршення навколишнього середовища, яке вважається основною проблемою для зовнішніх зв'язків ОВП, стає незначним в екологічно контрольованих середовищах, таких як ЦОД. Технологія оптичного волокна використовує обмежене середовище (тобто волоконний кабель) і, таким чином, технологія оптичного волокна несприйнятлива до перешкод. Однак, згідно з оптикою та лазерною фізикою, світловий промінь, що поширюється в оптичному волокні, може страждати від хроматичної та поляризаційної дисперсії режиму, бірефрингенції, розсіювання та абсорбції. У лінії ОВП світло поширюється через невизначене середовище (тобто повітря). Відсутність обмеженого середовища передачі в ОВП робить його, на відміну від оптичного волокна, непомітним для хроматичних і поляризаційних дисперсій режимів. Світло в волоконних кабелях поширюється за допомогою середнього загального внутрішнього відбиття. Таким чином, світловий промінь в ОВП може бути приблизно в 1,5 рази швидше, ніж у оптичному волокні, що призводить до більш низької затримки поширення для ОВП [52]. Невизначені середовища призводять до розбіжності пучків і роблять зв'язки ОВП вразливими до перешкод. Волоконні кабелі можуть бути розширені в накладних або піднятій підлозі між будь-якими двома стійками в ЦОД незалежно від фізичного розташування стійок. Хоча це означає, що немає ніяких обмежень на фізичне

планування ЦОД розширення волоконних кабелів вимагає ретельного планування і часу, щоб гарантувати, що стандарти установки дотримані. Після проектування лінії ОВП не вимагають широкого планування налаштування або спеціалізованого персоналу для установки порівняно з волоконною оптикою, і, таким чином, лінії ОВП можуть бути встановлені за більш короткий час [57].

Архітектури ЦОД в широкому сенсі класифікуються на комутаційно-орієнтовані [40, 42] і серверно-орієнтовані [35, 37-39] архітектури. У комутаційно-орієнтованих ЦОД сервери працюють тільки як обчислювальні вузли і комутатори та використовуються для маршрутизації даних. У серверно-орієнтованих ЦОД сервери виконують як обчислення, так і маршрутизацію даних. Дротові ЦОД зазвичай класифікуються на основі схем перемикачів на три класи: електричні (комутація ланцюгів або пакетів), оптичні (пакет) і гібридні [34, 77].

Бездротовий зв'язок є перспективним гнучким підходом, який може допомогти вирішити недетермінований незбалансований розподіл трафіку застосунків ЦОД і допомогти полегшити перевантажені гарячі точки [9, 41]. Технології бездротового зв'язку можуть бути використані в ЦОД шляхом розширення вже існуючої дротової інфраструктури додатковими бездротовими зв'язками, або шляхом повної заміни дротової інфраструктури чистою бездротовою мережею. В останньому випадку бездротові зв'язки використовуються для виконання внутрішньо- і міжреберних комунікацій.

Збільшення дротових ЦОД бездротовими зв'язками може вирішити проблему точок доступу, однак проблема складності електропроводки залишається невирішеною.

Оскільки бездротовий зв'язок знаходить своє місце в ЦОД, то нова класифікація необхідна для того, щоб включити нові моделі ЦОД, що з'являються. Виділяємо чотири типи комунікаційних технологій, які можуть бути використані в ЦОД, дротових та бездротових. На рис. 2.1 зображена запропонована класифікація з усіма можливими схемами проектування ЦОД на основі чотирьох комунікаційних технологій.

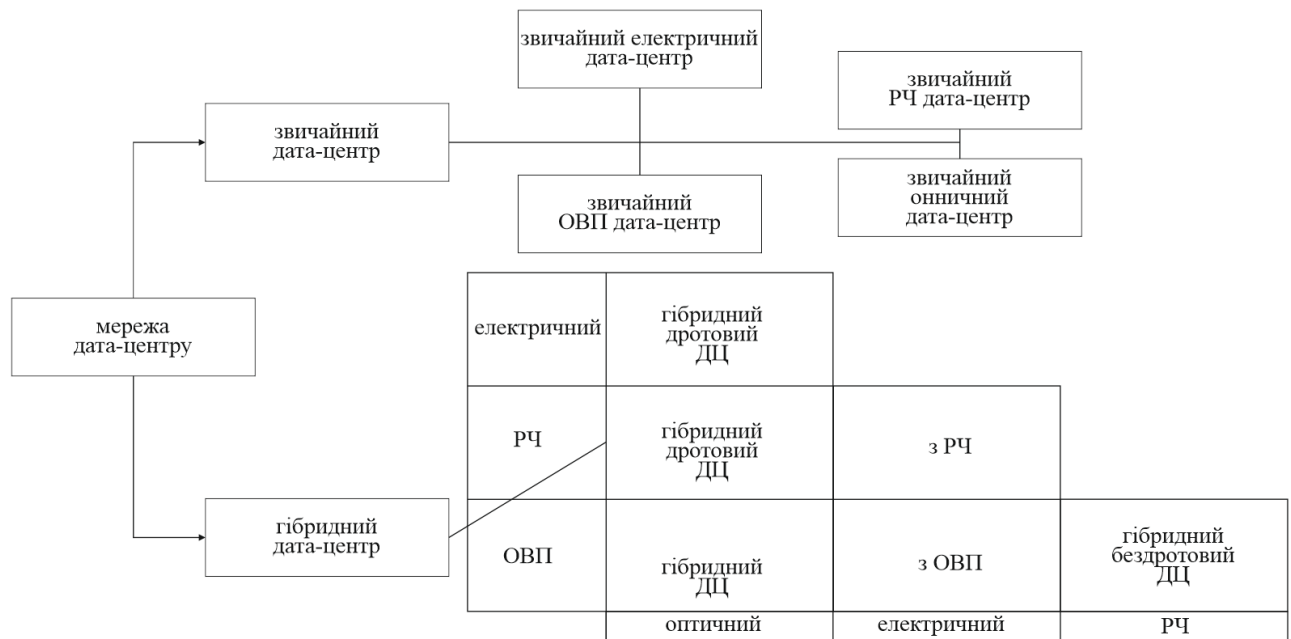


Рисунок 2.1 – Запропонована класифікація мережі ЦОД

Кілька конструкцій ЦОД можуть підпадати під широкий гібридний клас.

Pure Wired/Wireless ЦОД відноситься до ЦОД, в якому одна (дротова або бездротова) технологія зв'язку використовується для внутрішньо- та міжреберних комунікацій.

Гібридний ЦОД відноситься до ЦОД, який використовує дві або більше технологій.

Гібридний провідний ЦОД це ЦОД, який розгортає дві або більше провідних технологій. Це відноситься до ЦОД, в якому використовуються електричні кабелі та оптичні волокна.

Гібридний бездротовий ЦОД це ЦОД, який використовує дві або більше бездротових технологій. Гібридний бездротовий ЦОД відноситься до ЦОД, в якому РЧ і ОВП використовуються для зв'язку.

Гібридний (провідний + бездротовий) ЦОД відноситься до ЦОД, який розгортає принаймні одну провідну технологію і доповнений принаймні однією бездротовою технологією. Це може призвести до шести типів гібридних ЦОД:

1. Чиста електрична + РЧ.
2. Чистий оптичний + РЧ.

3. Гібридний дротовий + РЧ.
4. Чиста електрична + ОВП.
5. Чистий оптичний + ОВП.
6. Гібридний дротовий + ОВП.

Використовуючи запропоновану класифікацію, електричний / оптичний ЦОД в звичайній класифікації може бути класифікований як чистий електричний / оптичний ЦОД відповідно. З іншого боку, гібридний ЦОД в звичайній класифікації ЦОД підпадає під гібридний провідний клас ЦОД.

Чистий електричний ЦОД або просто звичайний ЦОД є найбільш часто розгорнутим типом ЦОД [34, 356, 376, 377]. Звичайний ЦОД був вперше відомий як *серверна кімната*, яка є невеликою кімнатою, що належить компанії. У серверній кімнаті колекція серверів спільно розташована і підключена через електричну мережу для задоволення обчислювальних і складських потреб компанії. Наявність великої кількості машин, розташованих в одному приміщенні, вимагає хорошого управління і експлуатації, щоб гарантувати їх функціональність. Наприклад, вона вимагає правильного контролю температури і вологості. Також потрібен спеціалізований персонал для того, щоб контролювати і обслуговувати серверну кімнату. Оскільки компанії збільшувалися в розмірах, потрібні були більші кімнати. Виконання вимог розширення серверної кімнати вимагає великих інвестицій для покриття заміни старих мережевих компонентів (серверів, комутаторів і т.д.). Кілька компаній змогли виконати ці зміни, в той час як для інших це було занадто великим, щоб впоратися з ними. Будівлі, обладнані великою мережею серверів у великих компаніях, стали відомі як «Дата центри». Невеликі компанії почали передавати свої обчислювальні та складські потреби, використовуючи дата-центри великих компаній. Це допомогло їм уникнути величезних витрат на обслуговування серверних кімнат.

У випадку бездротового зв'язку бездротова технологія може бути використана тільки для міжреберного зв'язку (збільшення посилянь) або для

заміни всієї мережі (чиста бездротова ЦОД), включаючи внутрішньо стійний зв'язок. Тому важливо розрізняти оптичний між стійний зв'язок і повністю оптичні ЦОД (чисті оптичні ЦОД). Згідно з цим визначенням, чистих оптичних ЦОД не існує, а ЦОД, які використовують оптичний між стійний зв'язок, можуть бути класифіковані як гібридні дротові ЦОД. В більшості існуючих ЦОД стійки розташовані в рядовій фізичній топології. Тому, дослідження в основному пов'язані зі зміною логічної топології (тобто підключення серверів і комутаторів). Таким чином, можна реалізувати різні логічні топології над стандартною фізичною топологією на основі рядка.

2.2 Архітектура мережі центрів обробки даних

Спроекуємо мережу центрів обробки даних з використанням технології бездротового зв'язку ОВП. Пропонована конструкція ОВП-«Дата-центр» базована на фіксованих, немеханічних, ОВП-зв'язках, що полегшують реалізацію стійок ОВП і рядів / колон стійок. Кожна стійка стає точкою з трьох повністю підключених підмереж. Дослідимо вимоги, переваги та виклики запропонованого дизайну.

Загальною перешкодою для всіх бездротових конструкцій ЦОД є складність підключення декількох суміжних мережевих компонентів, таких як стійки в ряду або сервери в стійці, використовуючи посилення від точки до точки. На рис. 2.2а показано постійний струм, в якому стійки розгортаються в рядовому розташуванні з рядами. Кожен рядок містить k стійки. Стійку можна визначити за допомогою її номерів рядків і стовпців (j, k) , де $(1 \leq j \leq J \text{ і } 1 \leq k \leq K)$. Для зручності демонстрації кожна стійка представлена прямокутником.

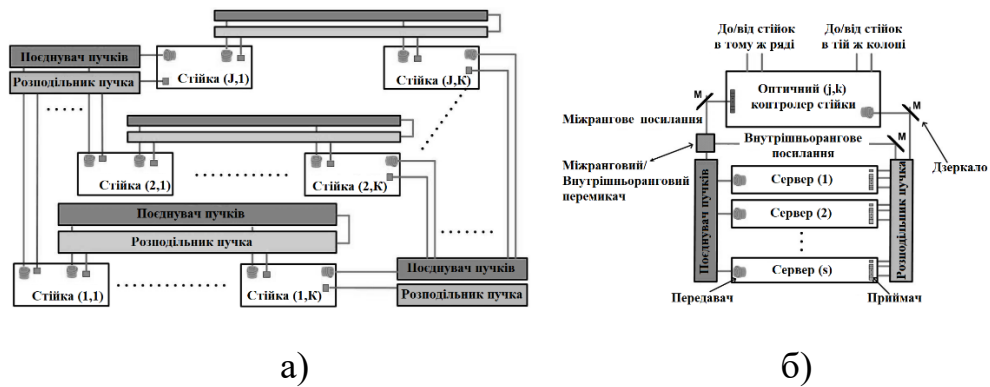


Рисунок 2.2 – Архітектура ОВП-«Дата-центр» (а); Стійка серверів ОВП без комутатора (б)

На рис. 2.2б зображено стійку ОВП без перемикачів, що складається з серверів S . Сервери нумеруються від 1 до S зверху вниз стійки. Таким чином, сервер може бути ідентифікований за координатами $Server(j, k, s)$, де $(1 \leq s \leq S)$ є номером сервера. Для того, щоб досягти високої швидкості передачі даних між серверами в межах однієї стійки, сервери повинні бути підключені за допомогою точкових посилань ОВП.

Тут кожен сервер оснащений оптичним передавачем з одного боку сервера і оптичним приймачем, що складається з фотодетектора (або масиву фотодетекторів) з протилежної сторони. Сервери монтуються на стійку ОВП таким чином, щоб всі передавачі (приймачі) серверів знаходилися на одній стороні стійки. Основна ідея полягає в тому, щоб направити передані пучки або для внутрішньо стійних, між стійних або обох комунікацій, використовуючи внутрішньо між стійний селектор. Для внутрішньо стійного зв'язку балки направляються на іншу сторону стійки, де розміщуються приймачі. Пучки розподільних променів розподілені за всіма серверами, що дозволяють безключовий внутрішньо стійний зв'язок. З іншого боку, для міжреберного зв'язку комбінований промінь направляється на оптичний контролер стійки.

Направити балки навколо стійки можна за допомогою набору дзеркал, встановлених на конструкцію стійки. Будь-який сервер може отримати копію пучків S за допомогою розгалужувачів променів, розміщених перед

сервером, щоб мати можливість перехоплювати пучки.

На рис. 2.2а зображено три рядки (тобто рядки 1, 2 і J), а також перший і останній стовпці (тобто стовпці 1 і K). У випадку внутрішньо стійного зв'язку, світлові промені від серверів S можуть передаватися і прийматися всіма серверами одночасно. Кожен передавач має оптичний шлях, що з'єднує його з усіма іншими серверами. Таким чином, немає доменів зіткнення, замість цього, кожен сервер має свій домен трансляції, який повинен управлятися ефективно, так що, дані доставляються тільки в призначене призначення. Можна використовувати багато схем мережевої роботи та адресації. Топологію мережі стійки можна змінити відповідно до обраної схеми. Розглянемо три з таких схем:

1. Множинний доступ часового поділу, де кадр будь-якого вихідного сервера ділиться на $S - 1$ часові проміжки. Сервер передає дані на сервер i . Внутрішньо стільна мережа може розглядатися як *підмережа* S , кожна підмережа представляє собою *мережу* з одним передавачем.

2. Використовуючи техніку, подібну до оптичного перемикавання сплесків, вихідний сервер надсилає короткий оптичний пакет перед передачею даних. Короткий пакет містить адреси місця призначення та будь-яку іншу необхідну інформацію. Сервери $S - 1$ отримують короткий пакет, призначені напрямки отримують вхідні дані, а інші сервери ігнорують їх.

3. Мультиплексування поділу довжин хвиль може допомогти підвищити пропускну здатність внутрішньо стійких посилок. Кожному приймачу присвоюється довжина хвилі, або кілька довжин хвиль. Використовуючи тюнінгові передавачі та приймачі, сигнали, що передаються на інші сервери, доставляються за допомогою одного і того ж променя на різних довжинах хвиль. При цьому топологія стійки представляє собою повністю з'єднану (повну сітку) мережу.

Для міжреберного зв'язку, ЦОД отримує дані з інших стійок, щоб доставити на сервери в своїй стійці, спілкуватися з іншими стійками в тому ж рядку/стовпці, і передати дані, отримані від будь-якого з ЦОД в тому ж рядку

/ стовпці в будь-який з ЦОД в тому ж стовпці /рядку. Стійки розташовуються рядами і стовпцями, і підключити ПЗУ можна тим же методом, що і для серверів в межах однієї стійки. Крім того, комунікації між ними можуть слідувати тим же схемам, які обговорюються в внутрішньо стійкій комунікації. Функції, що виконуються, дуже схожі на звичайний комутатор, однак можна відзначити, що на відміну від перемикачів, внутрішньо стійкий зв'язок не залежить від нього. Причому кожен сервер є перетином трьох повністю підключених мереж. Це може бути ефективно використано в маршрутизації та управлінні мережею постійного струму. Очікується, що ЦОД буде обробляти велику кількість трафіку порівняно з серверами, тому передбачаємо збільшення пропускної здатності міжребкових посилянь. Два випадки в між рецептурному зв'язку:

1. Вихідний ЦОД розташований на одному рядку/стовпці пункту призначення ЦОД, і для виконання зв'язку потрібна двопотужна лінія. Вихідний сервер надсилає дані на вихідний ЦОД, який пересилає дані до пункту призначення ЦОД, і, нарешті, на сервер призначення.

2. Вихідний і кінцевий ПЗУ не розташовані ні в одному рядку, ні в тому самому стовпці. В цьому випадку потрібна ланка з мінімум трьома хмелями. Вихідний сервер надсилає дані до джерела ЦОД, який, у свою чергу, пересилає дані до ПЗУ в одному рядку або стовпці. ЦОД, розташований на перетині рядка / стовпця джерела і призначення ЦОД буде пересилати дані в пункт призначення ЦОД потім на сервер призначення. Однак, завдяки повному підключенню, для маршрутизації можна використовувати інші шляхи. Рішення передачі даних в рядок або колонку ЦОД залежить від використовуваного алгоритму маршрутизації.

Для того, щоб реалізувати топологію стійки, еквівалентну підмережі *шин S* з використанням поточної технології, необхідні дроти S^2 (тобто 1600 проводів / стійок для $S = 40$). Аналогічно, повністю підключена стійка з використанням поточної технології вимагає загальної кількості сегментів $(S^2 - S)/2$ повнодуплексного дроту (тобто 780 проводів/стійок для $S = 40$), де кожен

сервер оснащений, принаймні, портами S. Цим практично неможливо керувати і в основному одна з головних причин, чому топологія зірки була прийнята в першу чергу.

Невеликий розмір компонентів ОВП, а також можливість розділити промінь між серверами S за допомогою набору пасивних оптичних елементів, допомагають реалізувати повністю підключену стійку, використовуючи тільки S-балки.

Розглянемо конструкцію, яка використовує лазерні діоди (ЛД), оскільки вони мають високу оптичну потужність і можуть підтримувати передачу при високих швидкостях передачі даних. Приймаємо фотодетектори, оскільки вони віддають перевагу в системах, які вимагають високої швидкості передачі даних, і де шум, викликаний навколишнім світлом, незначний, оскільки вони мають високу вартість і вимагають високої упередженості [51].

Зв'язки ОВП розгорнуті в широкому діапазоні середовищ (наприклад, у приміщенні та космічному просторі). Різні джерела шуму впливають на продуктивність зв'язку ОВП з різним ступенем тяжкості в залежності від навколишнього середовища. Розглянемо шум з різних джерел, що впливають на внутрішні лінії ОВП, які можуть бути пом'якшені в розроблюваній архітектурі. Відсутність шуму через фонове випромінювання (наприклад, сонце) робить навколишнє штучне світло домінуючим джерелом шуму в дата-центрі [51]. Точкові зв'язки використовують передавачі та приймачі з вузьким полем зору, тому ці зв'язки здатні відкидати більшість навколишнього штучного світла [51]. Крім того, використовуючи фільтри високого проходу, люмінесцентні лампи, що приводяться в дію звичайним баластом, можуть бути пом'якшені, тоді як люмінесцентні лампи, що приводяться в дію електронним баластом, важче пом'якшити [51]. Оскільки світлодіоди мають вузькі порівняно з іншими джерелами світла, більш ефективним рішенням для штучного навколишнього світла було б освітлення постійного струму за допомогою світлодіодних джерел, які знаходяться поза смугою компакт-дисків, що використовуються в дата-центрі. Таким чином, навколишнє

штучне світло можна легко пом'якшити. Але, є три неминучих джерела шуму, а саме: квантовий шум, темний шум і тепловий шум.

Використовуючи компакт-диски, можна отримати дуже вузький дромінь з концентрованою потужністю, однак будь-який промінь, що поширюється у вільному просторі, відчуває невелику розбіжність. Ця проблема може не вплинути на короткі зв'язки, оскільки можна використовувати з областями збору світла, які відповідають розміру плями світлового променя. Для довгих посилянь ОВП можуть бути розміщені в певних точках уздовж шляху, щоб знову згрупувати балки.

В розроблюваній архітектурі сервери з'єднуються за допомогою посилянь від точки до точки, утворених за допомогою дзеркальних відображень. Різниця між бюджетом зв'язку точки в точку і з дзеркальним відображенням полягає в тому, що вони поглинають світло, і, отже, можуть мати ефективність менше 100%. Більше того, вона використовується для розщеплення світлового променя на дві перпендикулярні балки: передавальний промінь (по шляху вихідного струменя) і відбитий промінь. Виходячи з конструкції, передані і відбиті балки можуть або не можуть мати однакову потужність. Тому, у випадку від точки до точки посилення необхідно розширити, щоб включити ефективність і скорочення потужності, викликані дзеркалами. Втрати і фактори залежать від кількості і розташування дзеркал в конструкції.

На рис. 2.3 зображений запропонований дизайн повністю підключеної стійки ОВП. Типова стійка ОВП складається з серверів S . Кожен сервер, s (для $1 \leq s \leq S$), оснащений оптичним передавачем, що працює на довжині хвилі λ_s .

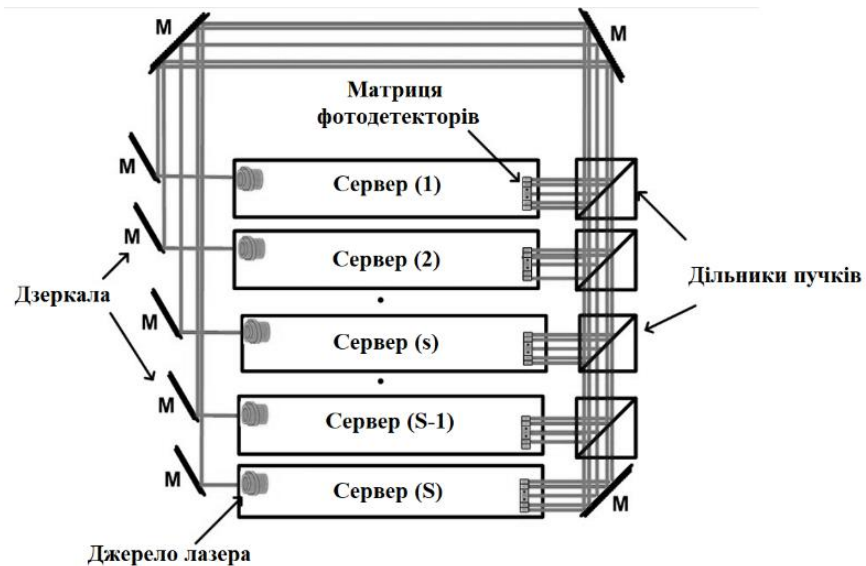


Рисунок 2.3 – Стійка серверів ОВП

Оптичний приймач розміщується на іншій стороні сервера з масивом для прийому сигналів, що передаються серверами S . Передбачається, що приймач здатний обробляти вхідні сигнали S , використовуючи кілька приймачів, площину управління або планувальник. Дзеркало M_s пов'язане з кожним сервером на стороні передавача. На іншій стороні сервера розміщується розгалужувач променів BS , за винятком номера сервера S , де замінюється дзеркалом. Кожне дзеркало має ефективність. Два дзеркала використовуються для направлення пучків з боку передачі в сторону приймача.

Розглянемо випадок, коли використовується одна довжина хвилі, тобто $\lambda_s = \lambda$, $1 \leq s \leq S$. Для того, щоб розрізнити передавач і приймаючі сервери, використовуємо позначення s для передавального сервера і для приймаючого сервера, $1 \leq s, sj \leq S$.

У стійці з 40 серверів максимальна відстань між передавачем і приймачем не перевищує 5 метрів. Тому можна використовувати зі світлою зоною збору, рівною площі балки. Це передбачається для всіх комбінацій передавачів-приймачів. Це припущення, оскільки діаметр балки у приймача становить 2,5 мм, припускаючи кут ширини балки 0,5 мрад. Передбачається, що всі передавачі і приймачі ідентичні з однаковою потужністю, що

передається і оптичною ефективністю. Також передбачається, що всі дзеркала мають однакову ефективність. На рис. 2.3 зображено зв'язок між двома серверами, який відбивається від трьох дзеркал, за винятком сервера S , кількість дзеркал дорівнює чотирьом.

Для того, щоб оцінити продуктивність лінії ОВП в стійці, було використано програмне забезпечення OptiSystem. Реалізовано посилення ОВП з каналом ОВП довжиною п'ять метрів. Створений зв'язок з тими ж характеристиками, однак він розгортає волоконно-оптичну замість ОВП. Обидва передавачі використовують схему модуляції для простоти, однак для більш високих швидкостей передачі даних віддають перевагу інші схеми модуляції, такі як модуляція імпульсного положення [51]. Якщо рухатися до серверів у нижній частині стійки, коли потужність передачі низька, Q-фактор, висота очей та поріг все зменшується. З іншої сторони, збільшення переданої потужності покращує продуктивність ланки, що дозволяє безпомилковий зв'язок.

Представлено архітектуру ОВП-«Дата-центр» та пов'язаний з ним аналіз для повністю підключеної стійки серверів. Моделювання показує, що запропонована архітектура реалізує високі швидкості передачі даних всередині стійки. Аналіз витрат показує, що вартість запропонованої конструкції ОВП-«Дата-центр» порівняна зі звичайною дротовою «Дата-центр». Вартість запропонованої архітектури знизиться в міру комерціалізації технології ОВП. Запропонована архітектура підходить для масштабування та модернізації дата-центрів.

2.3 Висновки

Таким чином, спроектовано архітектуру ОВП-«Дата-центр» для повністю підключеної стійки серверів. Моделювання показує, що удосконалена архітектура реалізує високі швидкості передачі даних всередині стійки.

3 ОПТИЧНИЙ БЕЗДРОТОВИЙ СТІЛЬНИКОВИЙ ЦЕНТР ОБРОБКИ ДАНИХ

3.1 Архітектура ОБС ЦОД

Для удосконалення запропонованої архітектури розробимо клас оптичних бездротових стільникових (ОБС) центрів обробки даних мережевих архітектур, в яких фіксована лінія зору (ЛОС) оптичні бездротові комунікацій (ОВП) посилення використовуються для підключення стійок серверів, розташованих в регулярних багатокутних топологіях. Спроекуємо архітектуру ОБС ЦОД, розробимо її теоретичні основи та досліджуватимемо протокол маршрутизації та архітектуру приймача-передавача ОВП.

Звичайні рядки на основі розташування стійки в ЦОД істотно перешкоджають встановленню між стійних бездротових зв'язків ЛОС. Тому недавні дослідження РЧ ЦОД поширюють використання багатокутної архітектури діапазону стійок замість рядів [5, 6]. Аналогічно, в [11] автори представляють дуже високий рівень опису внутрішньо- і міжреберних комунікацій за допомогою ОВП.

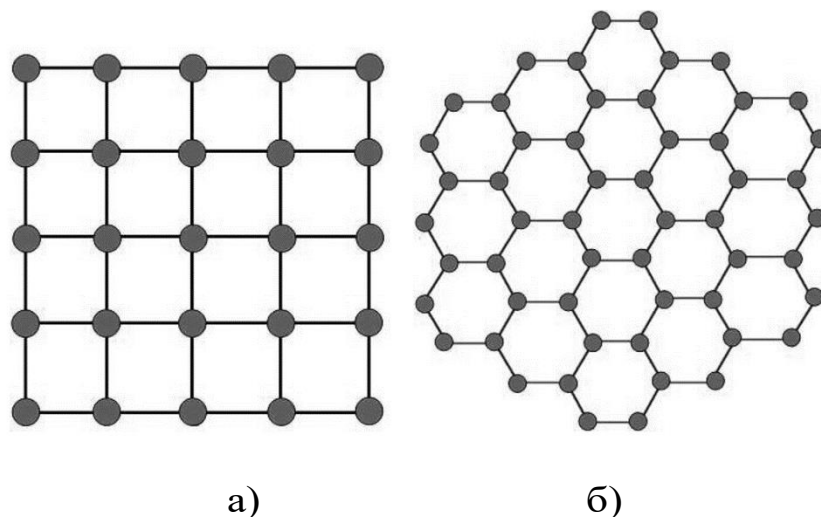


Рисунок 3.1 – Приклади багатопроцесорних та мережевих топологій з використанням багатокутників: Квадрат; Шестикутник

У великих багатопроцесорних мережах на системах чіпів кілька досліджень

облаштовують процесори в сітку з багатокутних клітин [42]. На рис. 3.1 зображено загальноживані квадратні та шестикутні багатопроцесорні та мережеві топології, де вузли представляють процесори, а краї представляють зв'язки з'єднання. Оскільки міжпроцесорні зв'язки встановлюються за допомогою проводів, важко підключити процесори через багатокутні комірки, і, таким чином, з'єднання процесора обмежуються сусідніми процесорами.

Для досягнення високої швидкості передачі даних за допомогою посилок ОВП необхідні посилення на лінію видимості. Звичайне розташування стійок на основі ряду в ЦОД не є ефективним вибором, оскільки це робить створення міжреберних ОВП ЛОС складним завданням. Щоб подолати цей виклик, стійки можна розмістити в звичайних багатокутних розташуваннях, які називатимемо осередком стійок. Розробимо архітектуру ОБС ЦОД, побудовану з використанням взаємопов'язаних стійок, які можуть спілкуватися за допомогою ЛОС ОВП посилення.

У проєктованій архітектурі використовуємо комірку стійок як будівельний блок для ОБС. Щоб полегшити зв'язок, стійки розташовуються в звичайній багатокутній топології, розміщуючи стійки на вершинах. На рис. 5.2а зображено три можливих конструкції з використанням трьох основних багатокутників: квадрату, шестикутника і восьмикутника. Стійки повністю з'єднані, і, таким чином, кожна оснащена приймачем-передавачем ОВП, що дозволяє стійці одночасно спілкуватися з усіма іншими стійками за допомогою посилок ЛОС ОВП, як показано на рис.5.2а для однієї зі стійок. Таким чином, може бути представлений повним графіком, де вузли представляють та краї представляють внутрішньо міжстійкові ОВП посилення. На рис. 5.2б показані відповідні графи, запропоновані на рис. 5.2а.

(a)

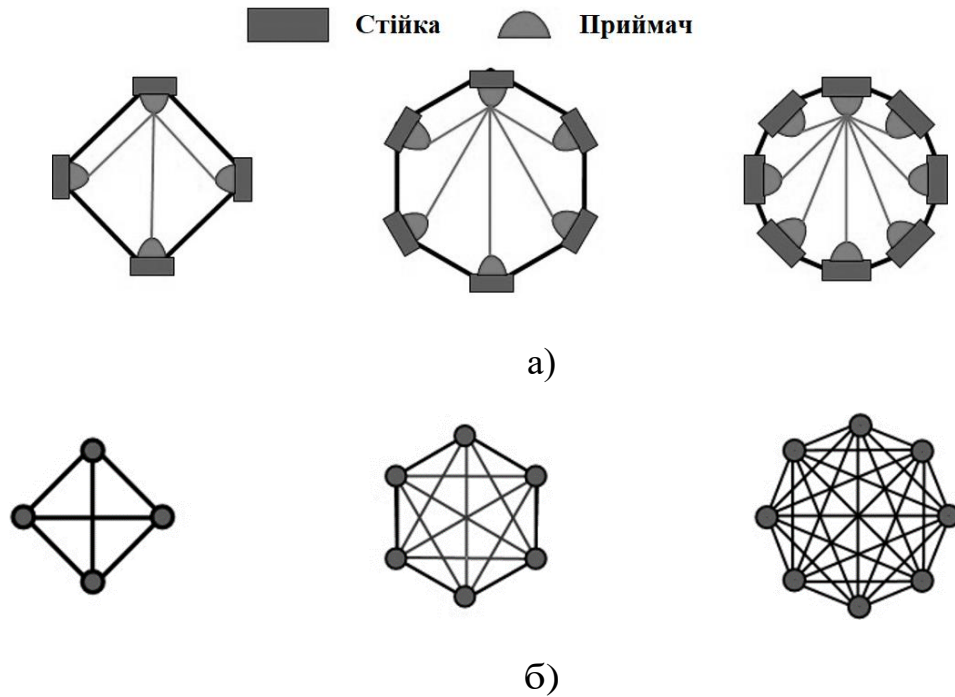


Рисунок 3.2 – Приклади запропонованої багатокутної топології ОБС ЦОД (а); (б) $C(4, 1, S)$, $C(6, 1, S)$ і $C(8, 1, S)$

Використаємо позначення $C(4d, t, S)$ для позначення спеціального класу графів з кількістю вузлів, $n = 4d$ для $d \in \mathbb{Z}^+$. Будуємо квадратні системи для всіх графів цього класу. Другий порядок (тобто $t = 2$) $C(4d, 2, S)$ виходить шляхом організації чотирьох в 2×2 квадратних сіток таким чином, щоб суміжні центри мали спільний вузол. В цілому сітка центрів порядку t $C(4d, t, S)$ виходить шляхом організації t^2 центрів в $t \times t$ квадратної сітки з суміжними центрами, що поділяють один вузол. З іншої сторони, у випадку шестикутних центрів будуємо шестикутні сітки замість квадратних сіток [42]. $C(6, 2, S)$ виходить шляхом додавання шести центрів навколо $C(6, 1, S)$, де кожен з доданих центрів поділяє вузол з $C(6, 1, S)$, як зображено на рис. 3.3(б). Індуктивно, $C(6, t, S)$ виходить від $C(6, t-1, S)$ шляхом додавання шару центру навколо межі $C(6, t-1, S)$. Таблиця 3.1 підсумовує загальну кількість центрів, серверів, між стійних посилянь, ширини бісекції, діаметра, а також мінімальних і максимальних ступенів для $C(4d, t, S)$ і $C(6, t, S)$.

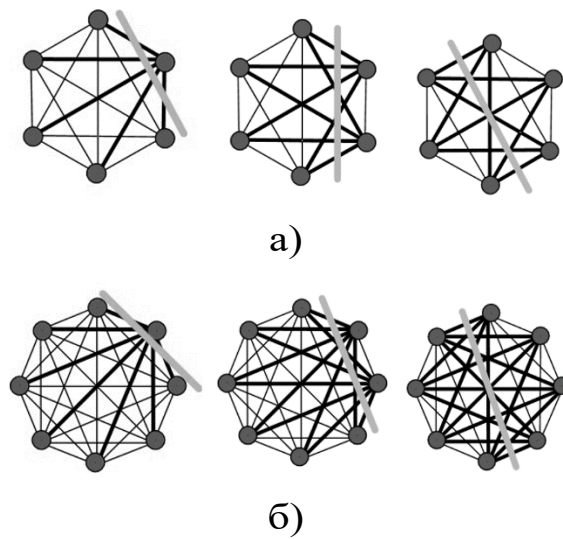


Рисунок 3.3 – Приклади запропонованої ОБС ЦОД топології, $(n, 2, S)$:

$n = 4$ (а); $n = 6$ (б)

Таблиця 3.1 – Властивості повних сіток графа, $C(n, t, S)$.

| Власність | $n = 4d, \forall d \in \mathbb{Z}^+$ | $n = 6$ |
|-----------------------------------|--|--------------------------|
| Кількість центрів | t^2 | $3m^2 - 3t + 1$ |
| Кількість всіх елементів (N) | $(n - 2) m^2 + 2t$ | $9m^2 - 3t$ |
| Кількість серверів | $((n - 2)^{t^2} + 2t) \times S$ | $(9m^2 - 3m) \times S$ |
| Кількість посилянь | $\frac{n(n-1)}{2} t^2$ | $45m^2 - 45t + 15$ |
| Ширина бісекції | t парний: $(n - 1)t$ n 2 m непарні: $(n - 1)(t - 1) + (2)$ | $16m - 13 \forall m > 1$ |
| Діаметр | $2t - 1$ | |
| Максимальний ступінь (Δ) | $2(n - 1)$ | |
| Мінімальний ступінь (δ) | $(n - 1)$ | |

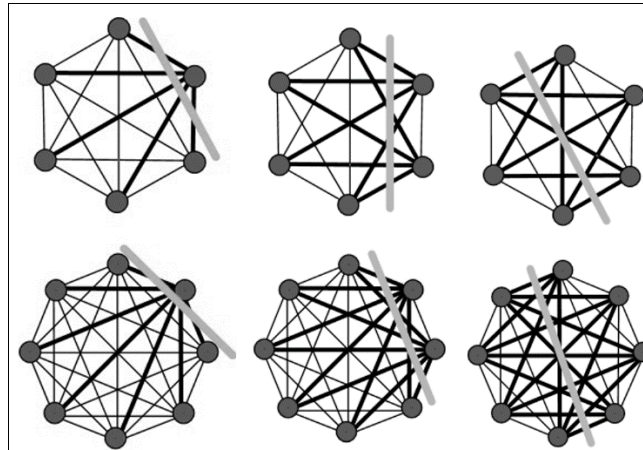


Рисунок 3.4 – Різні розрізи в центрах ЦОД

Таким чином встановлено, що клас сітчастих мереж з кількістю вузлів, $n = 4d$ для $d \in \mathbb{Z}^+$ допускають теоретичний аналіз. Ширина бісекції - це мінімальна пропускна здатність, доступна між двома частинами мережі з однаковою кількістю вузлів у кожному розділі. Якщо всі зв'язки мають однакову ємність, знаходження ширини бісекції зменшується до знаходження мінімального вирізаного набору таким чином, щоб мережа розділилася на дві половини. Щоб знайти розріз, що веде до ширини бісекції в запропонованому ОБС ЦОД, потрібно вирізати деякі блоки, $C(n, 1, S)$ ЦОД. Розглядатимемо два можливих розрізи $C(n, 1, S)$, в яких відокремлюємо один вузол (одновузловий розріз) і $\text{bisect } C(n, 1, S)$. Загалом, для $C(n, 1, S)$ поділ одновузлового розрізу призводить до вирізання множини $n-1$ країв, тоді як перетин $C(n, 1, S)$ призводить до вирізання множини $(n/2)^2$ краю. Рисунки 3.6-(а) та (б) зображують два вирізи, відповідно, для $C(8, 1, S)$, де жирні краї утворюють відповідний виріз-набір.

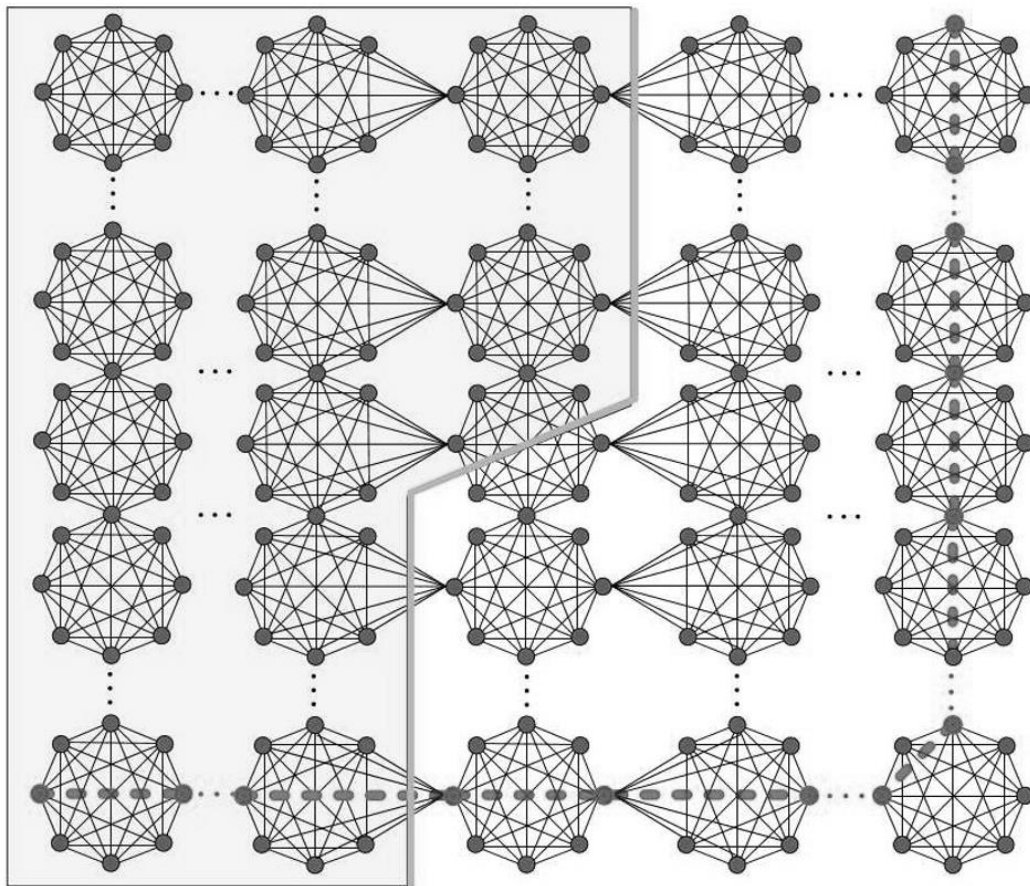


Рисунок 3.5 – Бісекція

Ширина бісекції ОБС ЦОД, $C(6, t, S)$ становить $16t - 13 \forall t > 1$.

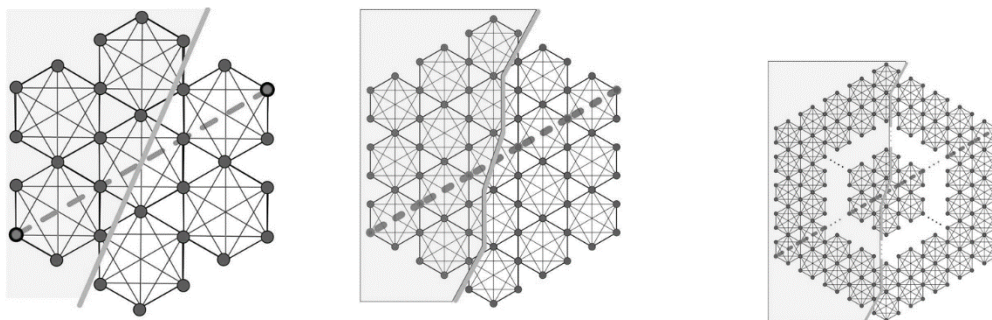


Рисунок 3.6 – Результат визначення бісекції

Діаметр мережі $C(4d, t, S)$ і $C(6, t, S)$ дорівнює $(2t - 1)$. Відстань між двома стійками максимальна, коли стійки знаходяться на крайніх кінцях діагоналі мережі. Пунктирні лінії на рисунках 3.5, 3.6 показують діаметр $C(8, t, S)$ і $C(6, t, S)$ відповідно. Перехід від одного центру до сусіднього займає рівно один стрибок, а переміщення всередині - це не більше одного стрибка. У випадку

$C(4d, t, S)$ кожна сторона може бути пройдена в $t - 1$ кроків плюс один крок в нижньому правому центрі, отже, діаметр становить $2(t - 1) + 1 = 2t - 1$. Між вибраними торами є кілька шляхів. Однак всі такі шляхи слідуєть геометрії, що веде до тієї ж довжини шляху $2t - 1$. Цей же аргумент відноситься і до $C(6, t, S)$.

Більшість існуючих комерційних приймачів-передавачів ОВП призначені для зовнішніх посилянь від точки до точки. Для роботи в різних або важких погодних умовах використовуються потужні лазери і відносно дорогі компоненти. З іншої сторони, прості вимоги до проектування в приміщенні систем ОВП, такі як лінії короткого діапазону, крім того, до відсутності зовнішніх порушень навколишнього середовища, дає можливість проектувати дешеві приймачі-передавачі ОВП шляхом з'єднання оптичного волокна, що закінчується безпосередньо з коліматорами для реалізації зв'язків ОВП. У [86] продемонстровано передачу радіочастотних сигналів кабельного телебачення 10 Гбіт / с через майже без втрат 15 м точки до точки ОВП зв'язку в середовищі подібному до ЦОД. Щоб уникнути механічно керованих приймачів-передавачів, необхідно використовувати ряд фіксованих приймачів-передавачів, що дорівнюють кількості стійок в ЦОД (тобто n). Оскільки простір тору обмежений, багато точкова система ОВП з щільною упаковкою елементів приймача-передавача може допомогти використовувати простір тору. У [42] запропоновано багатоточкову систему ОВП, яка призначена для дальніх мобільних терміналів польоту, таких як супутники або безпілотні літальні апарати, що літають в межах кластера. У зв'язку з вимогами до великої дальності та мобільності застосування використовується складна конструкція приймача-передавача, що включає перемикачі мікроелектромеханічної системи, контролер та механічно встановлені передавачі. Однак посилення ОВП в ОБС ЦОД коротші та фіксовані, і таким чином, можна використовувати спрощену багатоточкову систему ОВП, яка базується на цьому [42].

Передавачі і приймач розділені (рис. 3.7). Кульковий об'єктив використовується для захоплення вхідних пучків з усіх n стійок в торі.

Захоплені пучки з'єднані в оптичні волокна, розміщені в центральній точці об'єктива кулі. Пучки згодом будуть виведені у вільний простір і виявлені відповідним оптичним детектором зв'язку [43]. Очікується, що розбіжність променя в ОБС ЦОД буде обмежена в порівнянні з зовнішніми зв'язками через короткий діапазон посилянь ОВП в ЦОД. Тому використання великого кульового об'єктива на приймачі не потрібно, що призводить до меншого форм-фактора та кращого використання обмеженого простору тору. Кількість передавачів повинна дорівнювати кількості n стійок в торі і не може бути зменшена. Кожен передавач, однак, є просто одномодовим волокном, підключеним до коліматора пучка для передачі модульованого оптичного променя від джерела лазера.

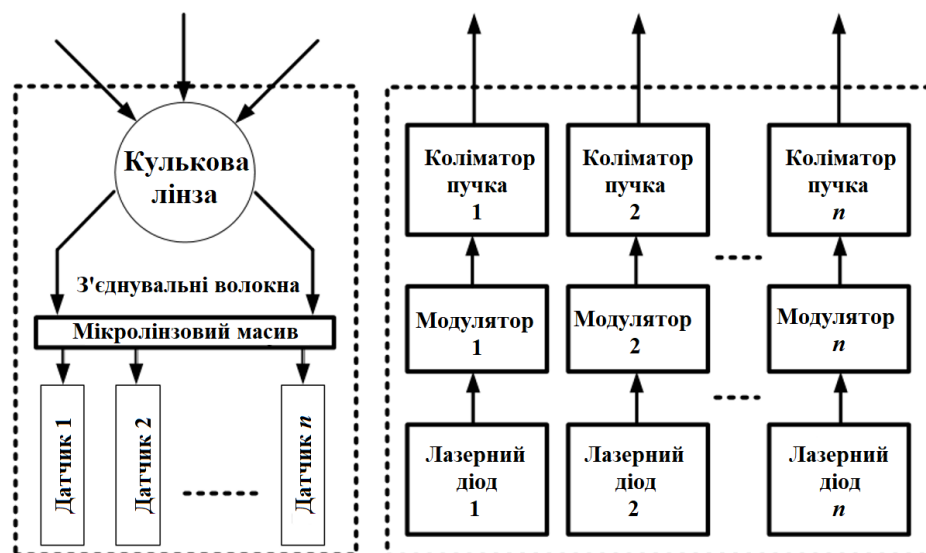


Рисунок 3.7 – Архітектура приймача-передавача тору ОВП

Тому передавачі будуть меншими і дешевшими порівняно зі звичайним приймачем-передавачем ОВП. Таким чином, один приймач ОВП і кілька менших передавачів замінюють кілька великих дорогих приймачів-передавачів.

3.2 Протокол перемикування та маршрутизації

Трафік в центрі обробки даних складається з великих і малих потоків. Хоча невеликі потоки більші за кількістю (близько 80%), але великі потоки несуть

близько 95% даних [84]. Тип оптичної техніки комутації, що використовується в мережі, має значний вплив на продуктивність мережі. В оптичному зв'язку існує три техніки перемикання, а саме: перемикання оптичних ланцюгів, оптичне комутаційне перемикання пакетів (ОКПП) і оптичне перемикання сплесків (ОПС). Через незрілість перемикання оптичних ланцюгів розглядаємо тільки ОКПП і ОПС комутаційні технології. Однак тривалий час налаштування ОКПП може призвести до високої затримки, особливо для малих потоків, оскільки тривалість потоку коротка щодо часу налаштування. З іншої сторони, ОПС підходить для малих потоків, але не для великих потоків. Гібридне перемикання, в яке інтегровані технології перемикання ОКПП і ОПС, може забезпечити високу швидкість, на вимогу і високу пропускну здатність зв'язку як для тривалих, так і для бурхливих потоків в дата-центрі. Припускаємо, що кожен тор в ОБС ЦОД використовує гібридне перемикання. Єдина структура ОБС ЦОД полегшує використання протоколів географічної маршрутизації з низькими обчислювальними витратами на зберігання. Розглянемо ОБС з квадратними центрами ($n = 4$). У мережі $C(4, t, S)$ (рис. 3.8) є $2t^2 + 2t$ стійки, розташовані в $2t + 1$ ряд і $2t + 1$ стовпців, нумеровані внизу ($y = 0$) до верхній ($y = t + 1$) і ліворуч ($x = 0$) праворуч ($x = t + 1$) відповідно. Сервер, на якому $1 \leq s \leq S$ географічно ідентифікується за допомогою кортежу (x, y, z) , де x і y координати від стійки і z відповідає порядковому числу для серверу всередині стійки. У запропонованому ОБС є два типи вузлів (рис. 3.9). Вузли з парними стовпцями/непарними рядками (вузли типу 1) та вузли з непарними стовпцями/парними рядками (вузли типу 2). Для визначення вихідного порту на кожному вузлі порівнюються координати поточних і кінцевих стійок і обчислюється різниця. Отримані світлові промені спрямовані на стадію 1×2 розгалужувачі. Розгалужувачі відповідають за направлення отриманих балок в залежності від місця призначення трафіку. Є три можливих сценарії.

1. Відповідною стійкою є стійка призначення. У цьому випадку розгалужувачі повинні направляти балки на $(S + n) \times (S + n)$ електронну комутаційну тканину.

2. Струменева стійка - це релейний вузол на шляху руху. Етап розщеплення повинен направляти балки на передавачі через $n \times n$ перемикач ОВП.

3. Поточна стійка є одним з багатоадресних напрямків отриманого трафіку. У цьому випадку спліттери повинні направити копію отриманого сигналу на електронну комутаційну тканину $(S+n) \times (S+n)$ та іншу копію на перемикач $n \times n$ ОВП.

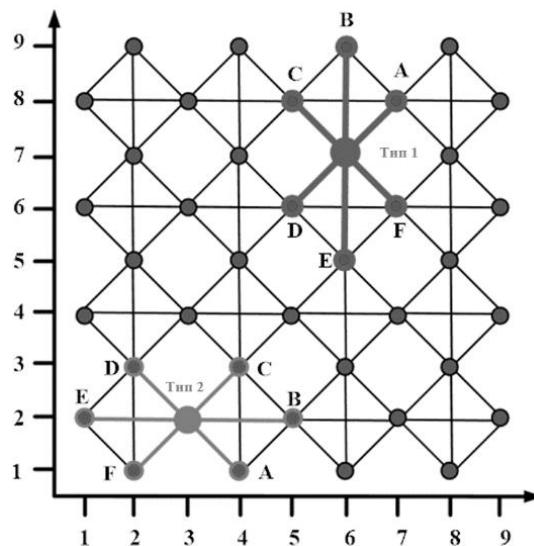


Рисунок 3.8 – Типи вузлів

Для реалізації етапу розщеплення можуть бути використані різні технології. Наприклад, виправлено 1×2 розгалужувачі. В цьому випадку етап розщеплення завжди буде розколювати балки. Хоча це просто, це неефективно генерувати небажані копії отриманих сигналів у випадках 1 і 2. Для подолання цієї проблеми можна отримати налаштовану стадію розщеплення за допомогою таких технологій, як мікро електромеханічні системи. У цьому випадку розгалужувачі можуть бути використані таким чином, що, коли елемент MEMS знаходиться в положенні кладки, промінь буде спрямований на $n \times n$ перемикач ОВП. Коли елемент мікро електромеханічної системи опиниться

в положенні вгору, промінь буде розділений на дві копії. Це вирішує проблему небажаного розколу у випадку 1. Однак розщеплення все ще неминуче у випадку 2. Насправді, така архітектура для стадії розщеплення 1×2 в торі є проблемою, з якою стикаються існуючі перемикачі ОВП.

Локальна копія, що генерується на етапі розщеплення, потім направляється на електронну тканину комутатора після перетворення з оптичного в електричний домен за допомогою перетворювачів. Тканина електронного комутатора отримує трафік від серверів S і n ОВП приймачів. Він виконує необхідне перемикання, направляючи трафік на один (або багато) серверів S і n передавачів, підключених до його вихідних портів. N передавачів отримують трафік або від електронної комутаційної тканини (трафік з серверів, призначених для міжстійного зв'язку), або від перемикача ОВП (між стійний трафік з використанням відповідного трафіку в якості проміжного вузла). У першому випадку трафік спочатку перетворюється з електричного в оптичний домен за допомогою перетворювачів. В останньому трафік вже знаходиться в оптичному домені і немає необхідності в перетвореннях. Мультиплексори використовуються для вибору одного з двох транспортних зв'язків, які будуть підключені до передавачів. Сплітери і мультиплексори управляються за допомогою керуючих сигналів від контролерів тору. Сигнали контролера і управління тепер показані для простоти. Крім того, якщо використовується ОПС, то трафік, спрямований від електронної тканини комутатора до передавачів, повинен пройти етап складання та черги ОПС, перш ніж бути спрямованим до передавачів.

Для підтвердження запропонованої архітектури розробляємо симулятор рівня потоку для вивчення продуктивності запропонованої архітектури ОБС для різних розмірів мережі (тобто загальної кількості серверів). Потоки розміром більше 25 МБ вважаються великими потоками, тоді як передбачається, що малі потоки становлять менше 8 МБ. Вихідний і кінцевий сервери вибираються випадковим чином, які зіставляються з відповідними торами. Розглядатимемо лише між стійний трафік, оскільки внутрішньо-стійкий трафік не

перетинає зв'язки в топології, а між центровий трафік є найбільш ймовірними кандидатами на надмірне навантаження. Припускаємо, що зв'язки з рівномірною пропускну здатністю передачі 1 Гбіт / с. Час налаштування з'єднання ОКПП передбачається 1 мс, тоді як час обробки на кожному вузлі для налаштування шляху ОПС вважається 20 мкс. Використовуємо ОПС, що спрацьовує буфером. Якщо сплеск блокується через суперечки, то всі пакети в чергах опускаються.

ОБС має параметричний простір в архітектурі. Для фіксованої загальної кількості серверів відібраних t і S може змусити ОБС розширюватися вертикально або горизонтально. Збільшення кількості серверів на стійці S призводить до вертикального розширення і скорочення порядку t , архітектури ОБС, оскільки потрібна менша кількість стійок. З іншої сторони, зменшення кількості серверів на стійку означає, що для досягнення бажаного розміру ЦОД потрібна більша кількість стійок (горизонтальне розширення). Досліджуватимемо вплив вертикального та горизонтального розширення ОБС.

Змінюємо кількість серверів на стійці для фіксованого розміру ОБС ЦОД від 10 до 40 з кроком 5. При фіксованому розмірі ЦОД, наприклад, 16К, оскільки кількість серверів на стійці збільшується, кількість посилок зменшується з 1066 ($S = 15$) до 400 ($S = 40$), і відмічаємо погіршення продуктивності ОБС. Це узгоджується з чотирма різними розмірами ЦОД ОБС. Загальний трафік ЦОД збільшується, оскільки розмір ЦОД збільшується, як і прийнятий і відхилений трафік.

Є вплив збільшення розміру ЦОД при збереженні того ж мережевого порядку t . Цього можна досягти, збільшивши кількість серверів на стійці. Комбінований варіант показує пропускну здатність введеного в мережу. Незважаючи на те, що загальна кількість байтів, які поставляються мережею, збільшується, бо відсоток прийнятого трафіку все ще зменшується. Це пов'язано з тим, що мережа повинна обробляти збільшення трафіку при підтримці того ж мережевого порядку t , і, отже, кількість між стійних посилок ОВП.

Використовувана техніка комутації впливає на продуктивність мережі. В середньому гібридне перемикання перевершує ОКПП.

Таким чином, продуктивність гібридного перемикання відображає тільки довгі потоки, які спрямовуються за допомогою ОКПП.

Продуктивність гібридної комутації покращується і перевершує ОКПП. Це пов'язано з тим, що буфери ОПС починають наповнюватися, а об'єднані потоки генеруються, що призводить до кращого використання пропускну здатності зв'язку порівняно з ОКПП, який все ще резервує пропускну здатність для всіх потоків, включаючи малі потоки.

У міру збільшення кількості потоків в мережі накопичення і скидання потоків в буферах ОПС є постійним, а мережа насичується. Як і очікувалося, для змішаного трафіку з великою кількістю малих потоків гібридне перемикання покращує використання послань і представляє кращу продуктивність порівняно з ОКПП.

Порівнюємо ОБС і з [84] ЦОД різних розмірів (16k, 64k і 128k серверів), які, як доведено, перевершують звичайні ЦОД. Велика різниця в кількості зв'язків між ЦОД з [84] і ОБС є основною причиною того, що ЦОД з [84] перевершує ОБС. ЦОД з [84] має менший діаметр порівняно з ОБС. Крім того, велика кількість послань полегшує нижчу середню кількість стрибків. Однак істотне скорочення кількості ланок (тобто 95-98%), а значить і вартості, показує, що запропонований ОБС може допомогти подолати проблему електропроводки звичайних дротів ЦОД при збереженні порівнянної продуктивності.

Включення бездротових технологій в ЦОД все ще знаходиться в зародковому стані, і, таким чином, необхідні подальші дослідження і розробки, щоб зробити бездротові ЦОД ефективною і практичною реальністю. Розглянемо напрямки досліджень, пов'язані із запропонованою архітектурою ОБС ЦОД. Можливі варіанти:

1. Гібридна архітектура і «чиста» ЦОД. Бездротові зв'язки можуть бути використані для збільшення існуючих дротових ЦОД або для

реалізації чистого бездротового ЦОД. Не досліджено, який тип ЦОД може забезпечити більш ефективне рішення. Чисті бездротові ЦОД передбачаються для вирішення складності кабелю та проблем гарячих точок. Однак цілком можливо, що певний ступінь дротового підключення для внутрішньо-міжреберного зв'язку може принести користь продуктивності [6]. Для того, щоб відповісти на це питання, всі можливі рішення архітектури ЦОД, включаючи чисті дротові ЦОД, гібридні ЦОД і чисті бездротові ЦОД повинні бути розглянуті. Велика кількість можливих реалізацій ЦОД потрапляє до класу гібридних ЦОД. Таким чином, важливо знайти оптимальне поєднання дротових і бездротових мереж для реалізації ефективного ЦОД.

2. Метрики доброти. Метрики пропускної здатності та діаметру бісекції використовуються для моделювання статичної перспективи топології, яка підходить для провідних ЦОД [9, 50]. Щоб охарактеризувати гнучку і динамічну топологію мережі, яку може забезпечити гнучкий бездротовий ЦОД, необхідне поняття динамічної пропускної здатності бісекції або, принаймні, нижніх (верхніх) меж [9, 50].

3. Мережева архітектура. Замінювати дротові зв'язки бездротовими зв'язками з використанням того ж розташування ЦОД потребує доведення ефективності. Гнучкість, що надається бездротовими зв'язками, не може бути повністю використана, якщо не використовуються нові топології та ранжування ЦОД. Мережева архітектура повинна відповідати вимогам майбутніх ЦОД, включаючи масштабованість, високу ємність і відмовостійкість. Характеристики 60 ГГц і ОВП технології, такі як, короткий діапазон передачі, необхідність ЛОС, і перешкоди серед бездротових зв'язків 60 ГГц повинні бути прийняті до уваги [40, 44].

4. Компроміси з витратами. У чистому бездротовому ЦОД комутаційні та комунікаційні функції переходять від декількох потужних і дорогих вузлів (комутаторів і маршрутизаторів) до великої кількості малопотужних і недорогих кінцевих точок (тобто серверів). Врахування структури витрат окремих вузлів є

важливим, щоб вирішити, чи призведе один або комбінація цих можливостей проектування до ефективного економічно ефективний ЦОД [6].

5. Зв'язок видимого світла є ще однією швидко розвивається технологією, в якій світлодіоди (світлодіоди) використовуються для забезпечення зв'язків даних, а також освітлення. Не тільки світлодіоди можуть бути використані для освітлення в ЦОД, але також вони можуть бути використані для зв'язку та мережі.

На відміну від більшості існуючих досліджень на ОВП ЦОД, вважатимемо, що ряд на основі ранжування стелажів є обмежуючим фактором у розвитку ОВП ЦОД. Тому нові архітектури ЦОД необхідні для адаптації до вимог ЛОС за посиленнями ОВП і для повного використання його переваг. Пропонована архітектура ОБС ЦОД, яка розроблена з використанням центрів. Однак архітектура ОБС, представлена і проаналізована, використовує квадратні комірки ($n = 4$). Потрібне використання комірок вищого порядку, тобто шестикутників ($n = 6$) або восьмикутників ($n = 8$), які покращить продуктивність запропонованого ОБС ЦОД, оскільки це призведе до більшої кількості зв'язків ОВП, і, отже, більше шляхів між будь-якими двома серверами в ЦОД.

Єдина структура архітектур ОБС ЦОД полегшує використання протоколу географічної маршрутизації низьких обчислювальних витрат на зберігання. Представляємо простий детермінований протокол маршрутизації, який залежить від географічних координат вихідних (поточних) і кінцевих стійок. Однак можна точно налаштувати протокол маршрутизації для більш гнучкої маршрутизації та підвищення відмовостійкості ОБС.

Таблиця 3.2 – Кількість посилань між стійками та середня кількість стрибків у ОБС

| ЦОД Розмір | ОБС | | Масштаби | |
|---------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| | Посилання | Середня кількість стрибків | Посилання | Середня кількість стрибків |
| 16 тис | 1536 | 12.5483 | 10240 | 6.16 |
| 64 тис | 12696 | 32.691 | 802816 | 8.09 |
| 128 тис | 10584 | 29.8768 | 802816 | 8.12 |

Таким чином, вертикальне розширення (тобто більша кількість серверів на стійці і менша кількість стійок) може призвести до погіршення продуктивності ОБС. Тому краще горизонтальне розширення. Однак це може створити проблему для архітектури ОБС, оскільки горизонтальне розширення призводить до більшого діаметра мережі, і, отже, більш високої середньої кількості розбіжності, що, в свою чергу, може призвести до більш тривалої затримки. Щоб подолати цю проблему, досліджуватимемо архітектуру ОБС ЦОД зі спільною мережею ОВП. Співіснуюча мережа може забезпечити коротші шляхи і менше затримок для далеких з'єднань, і, таким чином, протидіяти впливу горизонтального розширення.

3.3 Висновки

Розроблено ОБС, стільникові оптичні бездротові архітектури ЦОД з квадратними клітинами і проаналізовано її властивості. Проведено моделювання рівня потоку проводиться для перевірки та порівняння продуктивності ОБС. Досліджено вплив параметрів архітектури ОБС на її продуктивність. Продуктивність ОБС порівнювалась за допомогою схем перемикування ОКПП і гібридних (ОКПП + ОПС). Удосконалено метод синтезу мережі центру обробки інформації.

4 БАГАТОАДРЕСНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕМИКАЧІ ВІЛЬНОГО ПРОСТОРУ

4.1 Вибір типу архітектури

Увімкнення багатоадресної передачі в оптичних мережах вимагає використання багатоадресних оптичних перемикачів. Розробимо новий клас багатоадресних перемикачів ОВП, здатних до блокування. Ця конструкція використовуватиме нерухомі триступінчасті комутаційні елементи, які підтримують розщеплення та перемикання сигналів одночасно та плавно, і, таким чином, окремі етапи розщеплення, що використовуються у звичайних багатоадресних перемикачах, тоді не потрібні.

Програми, розміщені на дата-центрах, генерують великі вимоги до пропускної здатності з різними моделями зв'язку, що включають комбінацію одноадресних, багатоадресних, литих та всіх трафіків [24, 54]. Оптичні технології вже давно розглядаються як життєздатне рішення не тільки для забезпечення високої пропускної здатності [14, 25, 26], але і для більш ефективного впровадження багатоадресної передачі порівняно з більш високими реалізаціями шарів (наприклад, прикладного шару). Реалізація в оптичному шарі вимагає розробки ефективних багатоадресних оптичних перемикачів (БОП).

Як зазначалося раніше, сліди трафіку в реальному світі показують, що більше 95% даних передаються великими потоками (тобто потоками з великою кількістю даних) [29]. В даний час дослідники вивчають оптичні з'єднання постійного струму з використанням гібридних оптичних комутаційних схем, в яких одночасно використовуються швидкі і повільні оптичні перемикачі [27-30]. Швидкі оптичні перемикачі використовуються для пакетів і невеликих сплесків даних, тоді як повільні оптичні перемикачі використовуються для тривалого (ланцюга і тривалого сплеску) руху. Тому, існує поточна практична потреба в повільних, але ефективних і дешевих багатоадресних оптичних перемикачах.

Більшість існуючих конструкцій ОВП призначені для одноадресних [26], і,

отже, включення багатоадресних в ці комутатори вимагає додаткового обладнання (наприклад, сплітерів). Це призводить до більш високої складності і, таким чином, збільшує вартість. Крім того, існування стадії розщеплення додається до загальної базової структури перемикачів, і, таким чином, потенційно може додати до загальної втрати, що використовується сигналом через розбіжність. Відповідно, конструкція багатоадресних перемикачів ОВП зі зниженою складністю і довжиною шляху є складною проблемою. З цією метою пропонується новий багатоадресний перемикач ОВП $N \times N$ строго неблокувального з використанням не рухомих триполюсних перемикачів. Порівняно з існуючими багатоадресними оптичними перемикачами, нові перемикачі демонструють значне зниження складності обладнання, довжини шляху та зниження витрат.

Перемикач $N \times M$ має N вхідних портів; $I = \{I_0, \dots, I_{N-1}\}$ і M ; $\Omega = \{O_0, \dots, O_{M-1}\}$. Запит на з'єднання між вхідним портом I_p , $1 \leq p \leq N$ та впорядкованим набором вихідних портів Ω_p , $\Omega_p \subseteq \Omega$, позначається $R_p = \langle I_p, \Omega_p \rangle$. Запит R_p вважається багатоадресним, якщо $1 < |\Omega_p| < N$, одноадресний, якщо $|\Omega_p| = 1$, або трансляція, якщо $|\Omega_p| = M$ (тобто $\Omega_p = \Omega$). Набір всіх запитів в комутаторі $N \times M$, $RN^{\times M}$, може бути будь-якою комбінацією одноадресних запитів Γ , $1 \leq |\Gamma| \leq \text{хв}(N, M)$, і багатоадресні запити Ψ , $1 \leq |\Psi| \leq \text{хв}(N, \lfloor M/2 \rfloor)$.

Розглянемо технічні особливості систем з перемикачами. Симетрія вхідного/вихідного порту. Загалом оптичний комутатор складається з бінарної кількості вхідних і вихідних портів. Якщо кількість вхідних і вихідних портів однакова, перемикач називається однорідним, інакше він називається неоднорідним. Розглядатимемо лише однорідні оптичні перемикачі (тобто $M = N$). Однак аналіз і результати можуть бути легко поширені на MN .

Характеристики блокування. Комутатор неблокується, якщо він може реалізувати будь-яку можливу схему взаємозв'язку між входами та виходами, інакше він називається блокованим. Неблокуюча комутаційна мережа може бути неблокуючою (НБ), широкоформатною неблокованою (ШНБ) або суворим

неблокуванням (НБС). Мережа НБ, якщо встановлення нового з'єднання може переналаштувати деякі існуючі з'єднання, які потрібно переналаштувати, тоді як у ШНБ та НБС немає переналаштування а це необхідно. Комутаційна мережа - це НБС, якщо існує стратегія маршрутизації для встановлення всіх з'єднань, по одному, без переналаштування будь-якого існуючого з'єднання. Мережі ШНБ, з іншої сторони, не вимагають переналаштування відповідно до будь-якої стратегії маршрутизації. Розглядатимемо як ШНБ, так і НБ класи перемикачів.

Оптичний сплітер і поділювач (СіП) є відомим багатоадресним перемикачем ШНБ [13]. На рис. 4.1 зображено $N \times N$ СіП-перемикач, де кожен вхідний промінь спочатку розділений на N ідентичні гілки, використовуючи розгалужувач $N \times N$. Відповідні гілки з усіх N сплітерів з'єднуються з одним вихідним портом. Таким чином, будь-який вхід може бути підключений до будь-якої кількості вихідних портів. Перемикач СіП не розрізняє одноадресні і багатоадресні запити, що призводить до непотрібного розщеплення і втрат сигналу. Для подолання непотрібного розщеплення можуть використовуватися налаштовувані сплітери, що додає складності конструкції та управління перемикачем [31]. Багатоадресний перемикач ОВП може бути реалізований за допомогою архітектури на основі СІП [13], замінивши перемикачі 1×2 дзеркалами, і називатимемо цей перемикач СІП. На рисунку 4.2а пропонується можлива реалізація сплітера ОВП 1×4 . Загальна кількість компонентів, що використовуються в роздільнику $1 \times N$, становить $\Phi = 2^{\lceil \log_2(N) \rceil} + 1 - 2$. СіП-I можна ще більше вдосконалити, використовуючи налаштовувані сплітери (СіП-II) [31]. Рисунок 6.2б показує можливу реалізацію налаштовуваного 1×4 сплітера.

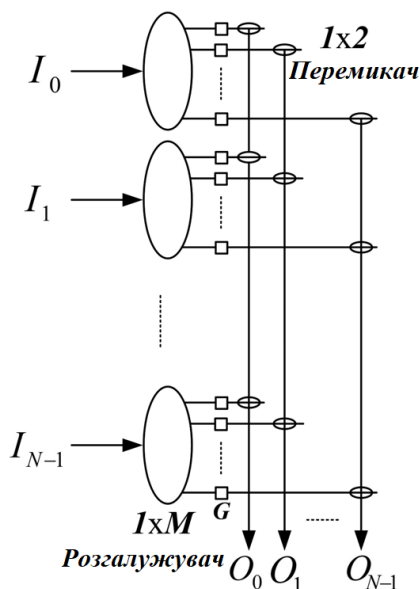


Рисунок 4.1 – $N \times N$ СіП-перемикач [13]

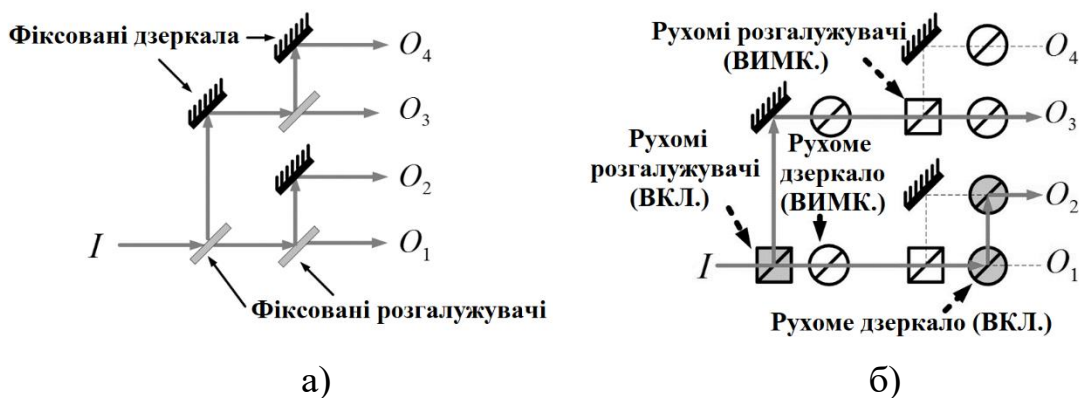


Рисунок 4.2 – А-сплітер (а); Б-комбінована реалізація (б)

Загальна кількість компонентів, що використовуються в налаштовуваному роздільнику $1 \times N$, становить 2Φ . У перемикачах СіП-ІІ кожен вхідний промінь ділиться на ряд пучків, що дорівнюють кардинальності вихідного набору ($|\Omega_p|$), усуваючи непотрібне розщеплення [31]. Видно, що СіП-ІІ поводить себе як 2D СіП-І у випадку одно адресної і трансляції відповідно.

Перемикач, який окремо розглядає одно адресні та багатоадресні запити, пропонується в [14, 45]. Архітектура поєднує в собі $d \times N$ СіП-комутатор і перемикач $N \times (N + d)$ з трьома площинами для реалізації перемикача ШНБ (СіП). Запити перемикаються перемикачем з трьох площин і СіП доставляє

лише багатоадресні запити. Таким чином, втрата розщеплення для одноадресних і багатоадресних аналогічна втраті СіП-II і СіП-I відповідно.

Об'єднання можна розглядати як особливий випадок багатоадресного, коли вхідний сигнал передається рівно на два виходи.



Рисунок 4.3 – $N \times N$ MEMS перемикач з можливістю об'єднання одного порту

4.2 Багатоадресний перемикач ОВП з використанням триступінчастих комутаційних елементів перемикання

Розглянемо створення нового класу багатоадресних перемикачів ОВП з використанням триступінчастих комутаційних елементів перемикання (ТКЕП). ТКЕП розміщується на кожному вузлі, тобто перетині рядка-стовпця. $SE(p, q)$ позначає ТКЕП на перетині вхідного порту p і вихідного порту q , ($1 \leq p \leq N$ і $1 \leq q \leq M$). ТКЕП можна налаштувати (рис. 4.4) в одному з трьох станів; рефлексорний (R), трансмісивний (T) або розщеплюючий стан (S), напіввідбиваючий / наполовину трансмісивний. $SE(p, q)$ позначає ТКЕП на перетині вхідного порту p і вихідного порту q . Конфігурація $SE(p, q)$ позначається $\tau(p, q, \chi)$, де $\chi \in \{R, T, S\}$, представляє стан ТКЕП. На рис. 4.5 показані чотири можливі конфігурації основного запропонованого перемикача 2×2 , де S-стан використовується для виконання необхідного багатоадресного

МОВЛЕННЯ.

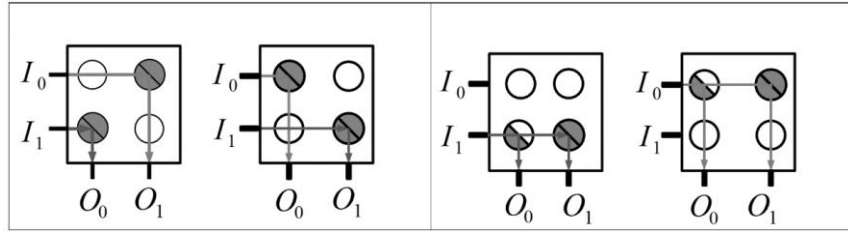


Рисунок 4.4 – Перемикання режимів у запропонованому перемикачі 2×2

Перемикач поперечини $N \times N$ з використанням ТКЕП є строго неблокуючим багатоадресним перемикачем. На рис. 4.5 зображено можливі варіанти для підтвердження.

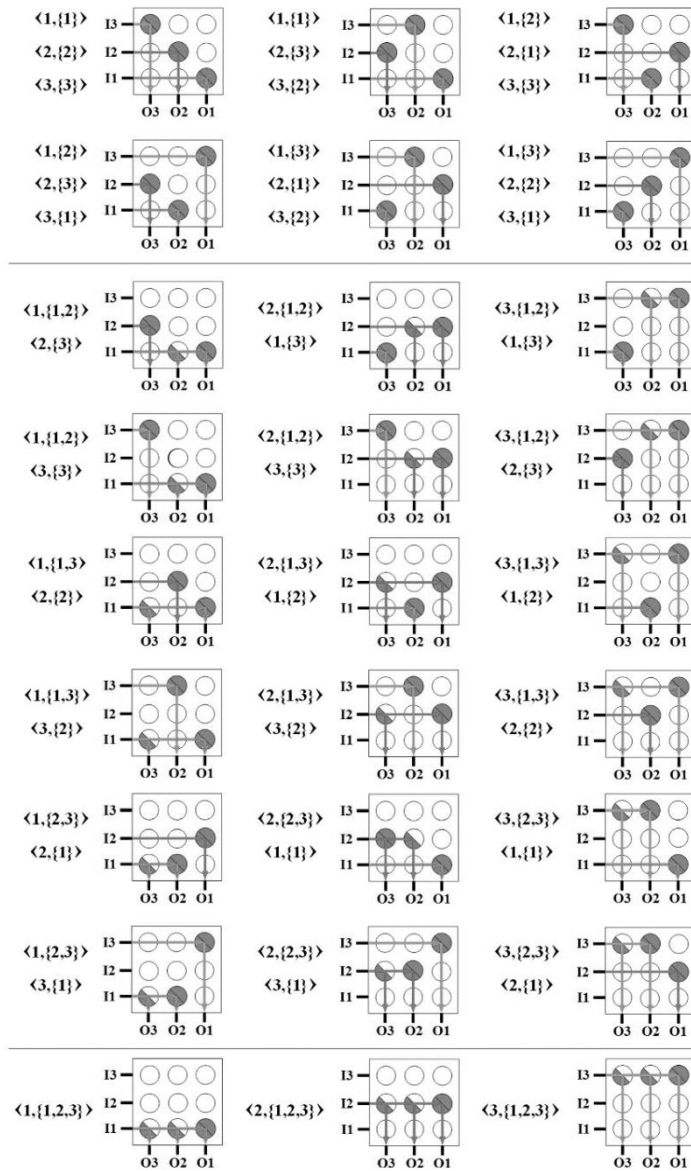


Рисунок 4.5 – Можливі перестановки з використанням запропонованого перемикача 3×3

Використовуватимемо індукції для підтвердження. Зрозуміло, що всі перестановки, багатоадресні завдання та трансляційні з'єднання можуть бути реалізовані для перемикача 3×3 (тобто $N = 3$), як показано на рис. 4.6. Для простоти змінюємо індексацію портів. Ця зміна жодним чином не впливає на функціональність або продуктивність перемикача.

Припустимо, що перемикач $(N - 1) \times (N - 1)$ строго неблокується. Отже, завжди можна підключити будь-який непрацюючий вхідний термінал до довільного набору непрацюючих вихідних терміналів незалежно від його поточного стану. Перемикач $N \times N$ також строго не блокується. Для індукційного кроку перемикач $N \times N$ можна отримати, додавши рядок і до перемикача $(N - 1) \times (N - 1)$. Набір запитів, $R^{N \times N}$, для $N \times N$ перемикача може бути визначений як $R^{N \times N} = R^{(N-1) \times (N-1)} \cup R^N$, де $R^N = \langle IN, \Omega_N \rangle$. Додані $2N - 1$ ТКЕП налаштовані в Т-стані. Таким чином, жоден з входів $N - 1$ не впливає, а отже, функціональність і стан $(N - 1) \times (N - 1)$ підмикальник не впливає. Для того, щоб перемикач $N \times N$ був строго неблокованим, достатньо показати, що:

1. Вхідний IN може запитувати будь-який довільний набір, Ω_N , непрацюючих вихідних терміналів нового вихідного порту $N \ ON$, без зміни станів будь-якого з ТКЕП $(N - 1) \times (N - 1)$ підмикальника $(N - 1)$.

2. Вихідний ON може бути запитаний будь-яким з вхідних портів, включаючи новий N -й вхідний порт, IN , без зміни станів будь-якого з ТКЕП $(N - 1) \times (N - 1)$ суб-перемикача.

Загалом, для запиту $\langle I_p, \Omega_p \rangle$ перемикач налаштовується на основі порядку спадання портів у Ω_p .

У запропонованому комутаторі розщеплення і перемикання сигналів виконуються одночасно і безперебійно. Тому запропонована конструкція підтримує багатоадресний стан без окремого етапу розщеплення, і, таким чином, має меншу складність. Складність обладнання прямо пропорційна загальній кількості необхідних ТКЕП. $N \times N$ запропонований ШНБ перемикач

вимагає в цілому N^2 ТКЕП. Пропонований багатоадресний перемикач ОВП ШНБ є оптимальною складністю апаратного забезпечення порівняно з усіма існуючими багатоадресними перемикачами ШНБ. Продуктивність запропонованого перемикача залежить від кількості ТКЕП, пройдених світловим променем, і кількості операцій розщеплення. Для комутатора $N \times N$ кількість ТКЕП в найкоротших і найдовших сигнальних шляхах дорівнює 1 і $(2N - 1)$ відповідно. Мінімальна і максимальна кількість ТКЕП, налаштованих в S-стані, становить 1 і $N - 1$ відповідно. Це безпосередньо впливає з мінімальних і максимальних кардинальностей багатолитових з'єднань, які становлять 2 і N , включаючи випадок трансляції відповідно. Для всіх запитів у певний час загальна кількість ТКЕП, налаштованих у S-стан дається $N\Psi - |\Psi|$, де $2 \leq N\Psi \leq N$ - кількість вихідних портів. Для кожного багатоадресного запиту $\langle I_p, \Omega_p \rangle$ всі ТКЕП в рядку, що відповідає вхідному порту, і стовпці, що відповідають вихідним портам в Ω_p , налаштовані в стані S за винятком останнього вихідного порту в Ω_p , який налаштований в R-стані. Таким чином, загальна кількість ТКЕП в R-стані дорівнює загальній кількості багатоадресних запитів $|\Psi|$.

Оптичний сигнал зазнає втрат, коли він поширюється від вхідних до вихідних портів у комутаторі ОВП. Існує два типи втрат: вставка /муфта і розщеплення втрат. В основному це пов'язано з гаусовим пучком драйвера, який відчувається будь-яким променем, що поширюється у вільному просторі [32]. Був проведений великий аналіз і дослідження, щоб охарактеризувати продуктивність 2D по відношенню до втрат вставки і муфти. Втрати вставки та з'єднання в нашому знаку слідує аналізу, який використовується для перемикачів [42], але з наступними двома відмінностями:

1. У багатоадресних перемикачах оптичний промінь повинен поширюватися через стадію розщеплення, перш ніж перемикатися поперечиною. Однак в запропонованому перемикачі оптичний промінь поширюється тільки через поперечину, в якій розщеплення і перемикання виконуються одночасно і плавно. Це може зменшити втрату вставки через

розбіжність.

2. У механічному русі дзеркал призводиться до незграбного зміщення, що призводить до неефективного зчеплення. Запропонована конструкція, однак, використовує тільки не рухомі деталі і вільна від таких втрат.

Втрати розщеплення - це втрати, з якими стикається світловий промінь через розщеплення, необхідне для багатоадресного розщеплення. У комутаторах на основі СіП вхідний промінь ділиться за допомогою розгалужувача $1 \times N$ на N і $|\Omega_p|$ рівні сигнали у випадку звичайних і налаштовуваних сплітерів відповідно. Після етапу розщеплення промінь рухається у вільному просторі від входу до вихідних портів, що відбивається від одного дзеркала. У запропонованій конструкції промінь може понести збитки через каскадне розщеплення поперечини, оскільки він поширюється через ланцюжок не рухомих ТКЕП уздовж його шляху до виходу. Нехай β і η є ефективність відображення і передачі ТКЕП в станах R - і T -відповідно. Тоді, відсоток потужності, відбитої ТКЕП в S -стані, як α , а передана потужність променя дорівнює ζ (рисунок 4.5). В запропонованому перемикачі втрати розщеплення залежать від кардинальності набору виводу $|\Omega_p|$. Таким чином, маємо два випадки. Одноадресний ($|\Omega_p| = 1$). Потужністю втрати є належне відображення, Втрати від q ТКЕП після відображення.

Затримка перемикання ТКЕП залежить від властивостей його матеріалу. У випадку з матеріалом затримка перемикання коливається від 10 мс до 100 мс при 20°C [43]. У [50] затримка перемикання 12-дюймового $\times 15$ " комутаційного дзеркала налаштована на РЧ-спектр становить близько 250 мс. Для 1×1 " SM затримка перемикання складе близько 20 мс, оскільки затримка перемикання пропорційна площі поверхні SM [50]. Розміри ТКЕП в запропонованому комутаторі набагато менше, ніж 1×1 ", таким чином, затримка перемикання може бути зменшена.

2D поперечини ОВП, як правило, мають низьку масштабованість через втрату гаусового променя, який стає домінуючим джерелом втрат при високій кількості портів [34]. Тому представляємо порівняльний аналіз

запропонованого перемикача щодо складності обладнання, розщеплення потужності та вартості для $N = 8$ (тобто 8×8 перемикачів).

Розкладаємо всі перемикачі на п'ять основних елементів, а саме: фіксовані/рухомі дзеркала, фіксовані/рухомі розщеплювальні дзеркала та ТКЕП.

У СіП-I всі запити проходять $1 \times N$ розщеплення. Таким чином, не потрібно додаткове обладнання для розділення одноадресних з'єднань, що призводить до зниження складності обладнання для СіП-I. СіП-II схожий на СіП-I, за винятком того, що налаштовувані спліттери використовуються для розділення одноадресних і багатоадресних з'єднань. Навіть для багатоадресних з'єднань СіП-II здатний розділити вхідний промінь до точного розміру вихідного набору. Однак це відбувається за рахунок додаткового апаратного та контрольного комплексу. СіП розділяє одноадресні та багатоадресні з'єднання та має нижче обладнання складності в порівнянні з СіП-II. Апаратна складність SUM-СіП є у СіП-I, однак, вона використовує більше рухомих компонентів. З іншої сторони, запропонований перемикач поперечини з використанням ТКЕП здатний відокремлювачем одноадресних та багатоадресних з'єднань, використовуючи меншу кількість апаратних компонентів (тобто N^2) порівняно з перемикачами на основі СіП.

Щоб оцінити продуктивність запропонованого перемикача, розраховуємо енергетичні штрафи чотирьох архітектур розміром 8×8 . Розраховуємо втрати на восьми вихідних портах для всіх 255 можливих комбінацій різних вихідних встановлених розмірів. Оскільки втрати розщеплення в запропонованому комутаторі залежать від вхідного порту, розраховуємо втрату сигналу для 1^{20} і 8^{20} вхідних портів, щоб представляти нижню і верхню межі втрати розщеплення відповідно.

У випадку з СіП-I втрата потужності не залежить від встановленого розміру вихідної потужності. У випадку СіП-II і СіП, то вони мають однакову продуктивність, яка краще, ніж інші архітектури. Це пов'язано з тим, що одноадресні з'єднання перемикаються окремо, не несучи жодних додаткових

втрат. З іншої сторони, СіП-I має найбільшу втрату за потужність ($\approx 9,3$ дБ) через те, що одноадресні з'єднання піддаються непотрібному примусовому розщепленню потужності. Хоча запропонована архітектура не забезпечує розщеплення для одноадресних з'єднань, існують додаткові втрати 4,53 дБ і 7 дБ для вхідних портів 1 і 8 відповідно. Це пов'язано з поширенням променя через не проміжні ТКЕП, налаштовані в Т-стані за його шляхом. Незважаючи на те, що це не розколює пучок, однак це додає додаткових втрат через недосконалість матеріалу. У випадку багатоадресності (тобто, починаючи з вихідного встановленого розміру двох), можна помітити, що зі збільшенням розміру вихідного набору збільшується і середній максимальний штраф за потужність у всіх архітектурах, за винятком СіП-I і СіП, Вони мають фіксовану втрату потужності ($\approx 9,3$ дБ). Це пов'язано з тим, що СіП-I і СіП виконують фіксоване повне розщеплення для всіх вхідних сигналів незалежно від розміру вихідного набору. Середня мінімальна втрата потужності у випадку СіП-II також збільшується зі збільшенням розміру вихідного набору, тоді як середній мінімальний збиток фіксується для СіП-I та СіП завдяки повному розщепленню. Середні мінімальні втрати в запропонованому комутаторі монотонно зменшуються, починаючи з вихідного розміру двох. Однак збільшення середніх мінімальних втрат від розміру випуску від одного до розміру випуску в два. Середні мінімальні (максимальні) втрати залежать від кількості комбінацій при різних розмірах вихідних множин. Це число збільшується, починаючи від вихідного встановленого розміру одного (тобто восьми можливих комбінацій одноадресних) до чотирьох (тобто 70 можливих комбінаторів), а потім зменшується. Незалежно від зменшення кількості комбінацій, починаючи з вихідного встановленого розміру чотирьох, середня максимальна втрата відчуває монотонне збільшення, оскільки агрегована максимальна втрата стає домінуючою, тоді як середня мінімальна втрата зменшується зі збільшенням розміру вихідного набору. Пропонований перемикач перевершує як СіП-I, так і СіП до розміру випуску в два, тоді як його продуктивність порівняна з іншими архітектурами аж до вихідного встановленого

розміру в чотири, після чого втрата потужності збільшується. Розглядаємо лише втрати розщеплення в аналізі пропонуванних архітектур. Незважаючи на те, що комутатори показують відносно нижчі втрати потужності, вимикачі несуть додаткові втрати через втрати гаусового променя через поширення пучка в окремій стадії розщеплення, а також кутового зміщення мікро-дзеркал [15, 42]. Втрати через незграбне зміщення можуть стати більш значними, якщо світловий промінь зазнає множинних відображень, таких як в $1 \times$ розщеплювачі променя N [43, 47].

Високі втрати потужності можуть призвести до того, що потужність сигналу впаде нижче чутливості оптичного приймача, і, таким чином, може знадобитися посилення в вхідних портах. Пропонований перемикач відчуває варіацію в розщепленні втрат потужності у вихідних портах. Наприклад, у випадку вихідного встановленого розміру вісім, різниця між мінімальним і максимальним втратою розщеплення становить 25 дБ. Для того, щоб полегшити вплив різної втрати потужності на виходах, змінні повинні використовуватися у вихідних портах для вирівнювання впливу втрати вставки таким чином, щоб потужність отриманого сигналу потрапляла в динамічний діапазон оптичного приймач [43]. Незважаючи на те, що комутатори не демонструють відмінностей між мінімальними і максимальними втратами потужності розщеплення у вихідних портах порівняно із запропонованим перемикачем, комутатори все ще потребують попередніх підсилювачів, наприклад, СіП та змінних оптичних через втрати, з якими стикається сигнал у стадія розщеплення.

Використовуємо відносну модель витрат для кількісної оцінки та порівняння вартості запропонованого перемикача.

Нехай ρ буде відношенням вартості рухомого проти фіксованих компонентів, тобто $\rho = C_m/C_f$. Аналогічно, нехай μ бути відношенням вартості ТКЕП проти фіксованого компонента, тобто $\mu = C_{tse}/C_f$. Щоб оцінити економічну ефективність запропонованого перемикача як комутатора СіП-І, використовуємо загальну кількість фіксованих і рухомих компонентів.

Запропонований перемикач має меншу загальну вартість порівняно з СіП-I за переважної кількості можливих випадків. З огляду на вартість різних апаратних компонентів, можна використовувати для порівняння економічної ефективності запропонованої конструкції щодо перемикачів на основі СіП різні розміри портів ($N = 4, 8, 16$ та 32). Для $N = 4$, навіть якщо вартість ТКЕП в десять разів перевищує вартість фіксованих компонентів (тобто $c_{tse} = 10 \times C_f$), запропонований перемикач буде більш економічно ефективним порівняно з СіП-I, СіП-II і СіП, коли c_{tse} не більше 1,18, 3,5 і 2,16 рази C_m , відповідно.

Таким чином, запропонований новий клас багатоадресних перемикачів ШНБ ОВП з використанням триступневих комутаційних елементів ТКЕП. У запропонованому перемикачі одночасно підтримують розщеплення і перемикання сигналів без необхідності окремих етапів розщеплення, що використовуються в звичайних багатоадресних перемикачах. Таким чином, промінь, що поширюється в запропонованому перемикачі, уникає втрати збудження реквізиту, з якою може зіткнутися оптичний промінь, що проходить через стадію розщеплення, а потім поперечину, як у перемикачах на основі СіП. Це призводить до зниження втрати вставки, що пов'язано з розбіжністю. Багатоадресний перемикач $N \times M$ ШНБ вимагає лише NM не рухомих ТКЕП. Порівняння з існуючими оптичними багатоадресними перемикачами показує, що запропонований перемикач забезпечує багатоадресну здатність з меншою складністю обладнання і порівнянною продуктивністю. Аналіз витрат для запропонованого комутатора показує, що його вартість нижче, ніж у перемикачів на основі СіП, навіть якщо вартість ТКЕП в 1,2-3,5 рази вище, ніж у дзеркала.

4.3 Перестановочно неблокуючий багатоадресний перемикач ОВП

Розроблено багатоадресний перемикач ОВП $N \times N$ НБ. Ця конструкція використовує не рухомі три комутаційні елементи ТКЕП. Пропонований комутатор демонструє оптимальну складність апаратного забезпечення,

оскільки вимагає лише $N(N + 1)/2$ ТКЕП. Крім того, представляємо простий алгоритм маршрутизації, який систематично встановлює з'єднання над новим комутатором.

Ще одним важливим аспектом конструкції вимикача є його блокуючі характеристики. Строго неблокуючий ШНБ перемикач дозволяє направити вхідний сигнал на будь-який доступний вихід або набір виходів (якщо багатоадресний), незалежно від поточного стану перемикача. Перестановка неблокуючої НБ дозволяє вхідному сигналу буде спрямовано на один або кілька доступних виходів, однак може знадобитися перебудова вже існуючих підключень. Перемикачі ШНБ мають кращі атрибути блокування порівняно з перемикачами НБ за рахунок підвищеної складності апаратного забезпечення. Однак архітектура НБ є достатньою, якщо запити відомі апріорі [36]. Наприклад, у мультиплексуванні поділу довжин хвиль або щільних магістральних мережах налаштування з'єднань базується на вимогах декількох зв'язків, і, таким чином, з'єднання можуть переносити відносно тривалий час налаштування, включаючи перестановку існуючих з'єднань для розміщення нових [34]. Тому проектування перемикачів НБ представляє практичну дослідницьку задачу.

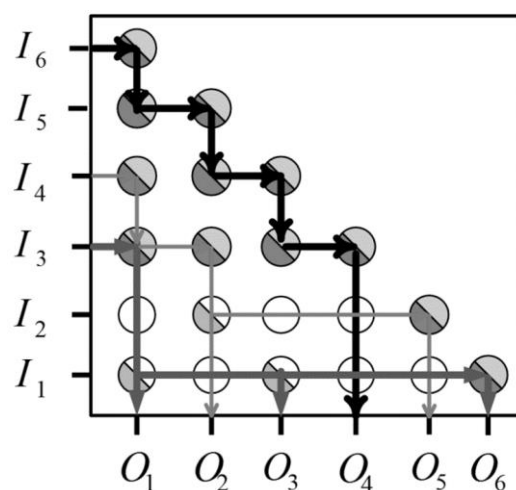


Рисунок 4.6 – Проектований перемикач

Проектуємо новий багатоадресний комутатор НБ і представляємо

маршрутизацію алгоритмом для систематичного встановлення з'єднань над запропонованим перемикачем. В архітектурі використовуватимемо мінімальну кількість ТКЕП для виконання багатоадресного перемикання НБ, не впливаючи на продуктивність перемикача. Тому в запропонованому комутаторі ТКЕП розміщується на перетині вхідного порту p і вихідного порту q тільки в тому випадку, якщо $p \leq q$. Це призводить до трикутного перемикача, в якому рядок, відповідний вхідному порту p , містить $N + 1 - p$ ТКЕП,

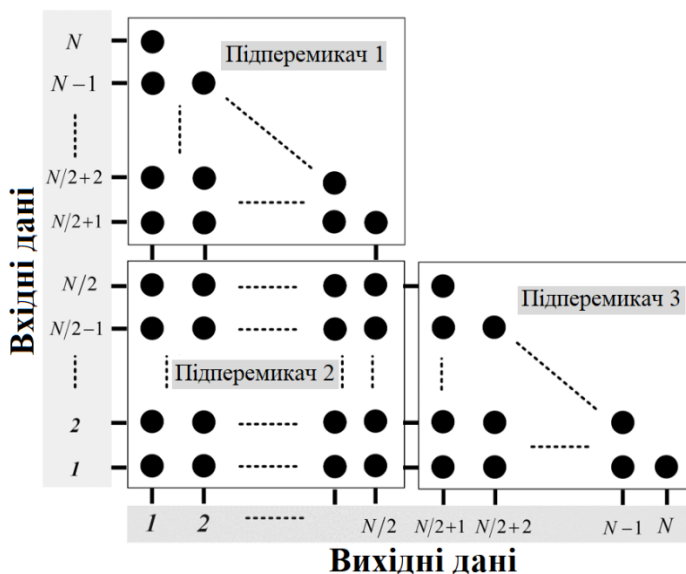


Рисунок 4.7 – Загальна структура трикутного перемикача $N \times N$

Отже, світловий промінь з порту північного входу нового запиту може бути спрямований через його відповідну колонку, поки він не потрапить до рядка скасованого запиту, де розщеплення виконується. Пропонований трикутний перемикач з використанням ТКЕП є перегрупованим багатоадресним перемикачем без блокування. Після обробки $|\Gamma|$ одноадресні запити, отримуємо трикутний перемикач для обробки багатоадресних запитів. Трикутний перемикач $N \times N$ зображено на рис. 4.7. Трикутний перемикач $N \times N$, який використовується для обробки $|\Psi|$ багатоадресні запити, де $1 \leq |\Psi| \leq N/2$, є НБ. Використовуватимемо індукції. Припускаємо, що $N = 2k$, де $k \in \mathbb{N}^+$.

Для базового випадку всі перестановки, багатоадресні завдання та запити на трансляцію можуть бути реалізовані для перемикача 2×2 (тобто $k = 1$). Припустимо шляхом індукції, що $N \times N$ трикутний перемикач, де $N = 2k^{-1}$ є НБ. Для індукційного кроку трикутний перемикач $N \times N$ можна розділити на три субперемикачі: прямокутний під перемикач $N/2 \times N/2$ та два трикутних під перемикачі $N/2 \times N/2$. Суб-перемикачі нумеруються від 1 до 3 в порядку проти годинникової стрілки. Обидва трикутні під перемикачі $N/2 \times N/2$ є трикутними перемикачами розмірності $2k^{-1}$, і, таким чином, є НБ за індукційною гіпотезою. Тому для того, щоб трикутний перемикач $N \times N$, зображений на рис. 4.8, був НБ, потрібно лише довести, що прямокутний під перемикач $N/2 \times N/2$ є ШНБ для обробки запитів з вхідних портів і входи з під-перемикача 1 (тобто виходи з під-перемикача 1).

Пропонований багатоадресний перемикач ОВП НБ є оптимальною складністю апаратного забезпечення порівняно з усіма існуючими багатоадресними комутаторами. Кількість елементарних перемикачів 2×2 в плоскому оптичному одноадресному перемикачі $N \times N$ є принаймні $N(N-1)/2$. Крім того, з [36] нижньою межею для 2D одноадресного перемикача НБ є $N(N+1)/2$. Запропонований багатоадресний перемикач ОВП НБ потребує лише $N(N-1)/2$ ТКЕП (елементарні 2×2 перемикачі) та N фіксованих дзеркал. Оскільки апаратна складність запропонованого комутатора дорівнює нижній межі одноадресного перемикача, він повинен бути оптимальним.

Між фіксованою парою вводу-виводу (I_p, O_q) можливі кілька шляхів сигналу (I_p, O_q) , $1 \leq p, q \leq N$, кількість яких можна обчислити за допомогою перерахувальної комбінаторики. Однак можна відзначити, що всі шляхи слідуєть геометрії.

Довжина, $\Delta(p, q)$, будь-якого з можливих шляхів між фіксованою парою портів вводу-виводу виражається з точки зору кількості ТКЕП, пройдених пучком, і задається, $\Delta(p, q) = p + q - 1$. Довжина шляху є постійною для фіксованої пари вводу-виводу (I_p, O_q) і відома апіорі, однак кількість ТКЕП в R-станах залежить від співіснуючих з'єднань.

Можливе встановлення нижніх і верхніх меж для числа ТКЕП в R-стані від I_p до O_q , $ER(p, q)$, виходячи з відношення між p і q . Якщо $q \leq N + 1 - p$, це означає, що на перетині рядка p і стовпця q запропонованого перемикача є ТКЕП. У цьому випадку вхідний сигнал може бути спрямований на вихідний порт за допомогою відбиття цього ТКЕП, налаштованого в R-стані. З іншої сторони, якщо $q > N + 1 - p$, то на перетині рядка p і стовпця q немає ТКЕП, то немає ТКЕП. Отже, принаймні три відображення необхідні для направлення вхідного сигналу до вихідного порту.

Продуктивність запропонованого перемикача залежить від кількості операцій розщеплення.

У багатоадресному вигляді мінімальна і максимальна кількість ТКЕП, налаштованих в S-стані, аналогічна кількості перемикача ШНБ і дорівнює $\lfloor N/2 \rfloor$ і $N - 1$ відповідно. Це безпосередньо впливає з мінімальних (з 2) і максимальних ($3N$) кардинальних можливостей виходів.

Для всіх запитів у певний час загальна кількість ТКЕП, налаштованих у S-стан дається $N\Psi - |\Psi|$, де $2 \leq N\Psi \leq N$ - кількість вихідних портів. Для кожного багатоадресного запиту $\langle I_p, \Omega_p \rangle$ всі ТКЕП в першому рядку і стовпці, що відповідають вихідним портам в Ω_p , налаштовані в S-стані, за винятком останнього вихідного порту в Ω_p який налаштований у R-стані. Таким чином, загальна кількість ТКЕП в R-стані дорівнює загальній кількості багатоадресних запитів. Оптичний сигнал у багатоадресному комутаторі зазнає втрат вставки/з'єднання та розщеплення, коли він поширюється від вхідних до вихідних портів. Втрата вставки/зчеплення в основному пов'язана з розбіжністю, яку відчуває будь-який світловий промінь, що поширюється у вільному просторі [32], і, таким чином, залежить від архітектури перемикача. Був проведений аналіз і дослідження, щоб охарактеризувати втрату вставки в поперечині 2D. Втрата вставки в запропонованій конструкції слідує аналізу, який використовується для комутаторів, але з наступними двома відмінностями:

1. У багатоадресних перемикачах промінь повинен поширюватися через

стадію розщеплення, перш ніж перемикатися поперечиною. З іншої сторони, оптичний промінь поширюється тільки через одну стадію в запропонованому трикутному перемикачі, що може призвести до меншої загальної відстані поширення, і, таким чином, зниження втрати вставки.

2. Механічний рух дзеркал в перемикачах призводить до неправильного вирівнювання, що призводить до неефективного зв'язку. У запропонованій архітектурі використовуються тільки не рухомі деталі, а отже, вільні від таких втрат.

Втрати розщеплення - це втрати, з якими стикається світловий промінь через розщеплення, необхідне для багатоадресного мовлення. Нехай β і η бути ефективність відображення і передачі ТКЕП в станах R – і T –відповідно. Позначаємо відсоток потужності, відбитої ТКЕП в S -стані, як α , а передана потужність променя ζ . У запропонованому перемикачі втрати розщеплення залежать від кардинальності вихідного набору $|\Omega_p|$. І, таким чином, отримуємо два різних випадки. Втрата потужності пов'язана з відображенням і трансмісії ТКЕП налаштовані; відповідно, в R - і T -станах по шляху, і, таким чином, залежить від кількості ТКЕП, налаштованих в R -стані. Оскільки β і η є ефективність відображення і передачі ТКЕП в станах R і T –, відповідно. Втрата потужності на вихідному порту Oq , який є частиною багатоадресного вихідного набору, Ω_p , пов'язана з відображенням і втратами передачі ТКЕП на шляху, налаштованому в R , T і S -станах.

4.4 Висновки

В результаті розроблено новий багатоадресний перестановочний неблокувальний НБ перемикач з використанням триступневих комутаційних елементів перемикання ТКЕП. У конструкції розщеплення і перемикання сигналів одночасно виконуються в межах одного етапу, і, таким чином, окремі етапи розщеплення, що використовуються в звичайних багатоадресних перемикачах, не потрібні. Перевагами є такі: по-перше, значне

зниження складності апаратного забезпечення, оскільки перемикач $N \times N$ з повною багатоадресною здатністю вимагає лише $N(N+1)/2$ не рухомих; втрата поширення, з якою може зіткнутися оптичний промінь, що проходить через стадію розщеплення, а потім поперечину, як у перемикачах на основі СіП. Це призводить до зниження втрати вставки, яка пов'язана з розбіжністю. Порівняння з існуючими оптичними багатоадресними перемикачами показує, що запропонований перемикач забезпечує багатоадресну здатність з меншою складністю обладнання і порівнянною продуктивністю. Аналіз витрат показує, що для $N = 4$ загальна вартість нової конструкції нижче, ніж у існуючих комутаторів ШНБ.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень удосконалено архітектуру та метод синтезу мереж центрів обробки даних.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень зі створення бездротових «Дата-центрів», виділено недоліки та зроблено постановку задачі дослідження для вирішення проблем при синтезі мереж центрів обробки даних.

У другому розділі удосконалено архітектуру мереж центрів обробки даних.

У третьому розділі удосконалено метод синтезу мереж центрів обробки даних.

У четвертому розділі розроблено новий багатоадресний перестановочний неблокувальний НБ перемикач з використанням триступневих комутаційних елементів перемикання ТКЕП. У конструкції розщеплення і перемикання сигналів одночасно виконуються в межах одного етапу, і, таким чином, окремі етапи розщеплення, що використовуються в звичайних багатоадресних перемикачах, не потрібні.

Впровадження результатів роботи дозволили створити «Дата-центр» згідно запропонованих рішень з бездротовим зв'язком.

За темою дипломної роботи опублікована одна публікація у Збірнику наукових праць за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021». Хмельницький – 2021. – С.81-82. [81].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kaushal H. and Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques, *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2017. vol. 19, no. 1, pp. 57–96.
2. Ramachandran K., Kokku R., Mahindra R., Rangarajan S. Data center netw.: wireless => worry less?, *NEC Laboratories America*, Tech. Rep. 2008.
3. Vardhan H., Thomas N., Ryu S.-R, Banerjee B., Prakash R., Wireless data center with millimeter wave network. 2010. *IEEE GLOBECOM*, pp. 1–6.
4. Shin J., Sirer E., Weatherspoon H., Kirovski D. On the feasibility of completely wireless datacenters. *Proc. Archit. for Netw. and Commun. Sys.* 2012. pp. 3–14.
5. Suto K., Nishiyama H., Kato N., Nakachi T., Sakano T., and Takahara A. A failure-tolerant and spectrum-efficient wireless data center network design for improving performance of Big Data mining. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2015. pp. 1–5.
6. Riza N. and Marraccini P., Power smart indoor optical wireless link applications. *Wireless Commun. and Mobile Comput.* 2012. pp. 327–332.
7. Hamedazimi N., Gupta H., Sekar V., and Das S. Patch panels in the sky: A case for free-space optics in data centers. *ACM Hotnets*. 2013. pp. 1–23.
8. Bao J., Dong D., Zhao B., Luo Z., Wu C., and Gong Z. Flycast: Free-space optics accelerating multicast communications in physical layer. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 2015. vol. 45, no. 5, pp. 97–98.
9. Arnon S. Next-generation optical wireless communications for data centers, *Proc. SPIE*. 2015. vol. 9387, pp. 703–938.
10. Joseph J., Lear K, and Abell D. High speed free-space optical communications. *WO Patent App.* PCT/US2012/052,397, Mar. 7. 2013.
11. Hu W. and Zeng Q. Multicasting optical cross connects employing splitterand-delivery switch. *Proceedings of IEEE Photon. Technol. Lett.* 1998. vol. 10, no. 7, pp. 970–972.

12. Zhang C. and Hu W. Design and analysis of a multicast-capable optical crossconnect. *Proc. SPIE*. 2008. vol. 7136.
13. Lin L. Y., Goldstein E. L., and Tkach R. W. Free-space micromachined optical switches for optical networking. 1999. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 4–9.
14. Hamza A. S., Deogun J., and Alexander D. Free space optical multicast crossbar switch with non-movable switching elements. *Advanced Photonics for Communications*, 2014.
15. Laney D. 3D data management: Controlling data volume, velocity and variety. *META Group (now Gartner)*, Tech. Rep. 949, February 2001.
16. Atzori L., Iera A. and Morabito G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*. 2010. vol. 54, no. 15, pp. 2787 – 2805.
17. Martin D. P., Murrell B., Golden M., Khoosal A., and Muhire B. Rdp4: Detection and analysis of recombination patterns in virus genomes. *Virus Evolution*. 2015. vol. 1, no. 1.
18. Gandomi A. and Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*. 2015. vol. 35, no. 2, pp. 137 – 144.
19. Hendren C. O., Lowry G. V., Unrine J. M., and Wiesner M. R. Science of The Total Environment. 2015.
20. Large Synoptic Survey Telescope - Data Management, 2015. URL: <http://www.lsst.org/about/dm>
21. Cao Z., Proietti R., and Yoo S. J. B. Hi-lion: Hierarchical large-scale interconnection optical network with awgrs. *J. Opt. Commun. Netw.* 2015. vol. 7, no. 1, pp. 97–105.
22. Mudigonda J., Yalagandula P., and Mogul J. C. Taming the flying cable monster: A topology design and optimization framework for data-center networks. *USENIX Annual Technical Conf.* 2011. pp. 1–8.
23. Singla A. Fat-free topologies, *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. 2016. pp. 64–70.

24. Kandula S., Padhye J., and Bahl P. Flyways to de-congest data center networks. 2009.
25. Kandula S., Sengupta S., Greenberg A., Patel P., and Chaiken R, The nature of data center traffic: Measurements & analysis, *ACM SIGCOMM*. 2009 pp. 202–208.
26. Benson T., Akella A., and Maltz D. A. Network traffic characteristics of data centers in the wild, *ACM SIGCOMM*, 2010. pp. 267–280.
27. Benson T., Anand A., Akella A, and Zhang M. Understanding data center traffic characteristics, *ACM SIGCOMM*. 2010. vol. 40, no. 1, pp. 92–99.
28. Calabretta N., Centelles R., Lucente S. Di, and Dorren H., On the performance of a large-scale optical packet switch under realistic data center traffic, *IEEE/OSA J. of Opt. Commun. and Netw.* 2013. vol. 5, no. 6, pp. 565–573.
29. Vardhan H. and Prakash R., Towards 60ghz wireless switching interconnect. 2013 pp. 594–598.
30. Armbrust M., Fox A., Griffith R., Joseph A. D., Katz R., Konwinski A., Lee G., et al, A view of cloud computing, *Commun. ACM*. 2010. vol. 53, no. 4, pp. 50–58.
31. Bilal K., Malik S. U. R., Khalid O., Hameed A., et al, A taxonomy and survey on green data center networks,” *Future Generation Comput. Syst*, 2014. vol. 36, no. 0, pp. 189 – 208.
32. Guo C. Bcube: a high performance, server-centric network architecture for modular data centers, *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, 2009. vol 263, pp. 63–74.
33. Guo C., Wu H., Tan K., Shi L., et al, Dcell: a scalable and fault-tolerant network structure for data centers, *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, 2008. pp. 75–86.
34. Liao Y., Yin D, and Gao L., Dpillar: Scalable dual-port server interconnection for data center networks, *Proceedings of IEEE ICCCN*, 2010. pp. 1–6.
35. Guo D., Chen T., Li D., et al., BCN: Expansible network structures for data centers using hierarchical compound graphs, *Proceedings of IEEE INFOCOM*, April 2011. pp. 61–65.
36. Li D., Guo C., Wu H., et al., Scalable and cost-effective interconnection of data-center servers using dual server ports, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Feb 2011. vol. 19, no. 1, pp. 102–114.

37. Al-Fares M, Loukissas A., and Vahdat A., A scalable, commodity data center network architecture, *ACM SIGCOMM*. 2008, pp. 63–74.
38. Cui Y., Wang H., Cheng X., and Chen B., Wireless data center networking, *Wireless Communications*, 2011. vol. 18, no. 6, pp. 46–53.
39. Niranjana Mysore R. and et al., Portland: a scalable fault-tolerant layer 2 data center network fabric, *Proceedings of the ACM SIGCOMM*. 2009. pp. 39–50.
40. Zhang W., Zhou X., Yang L., Zhang Z., Zhao B. Y., and Zheng H., 3d beamforming for wireless data centers, *ACM HotNets-X*. 2011. pp. 1–6.
41. Halperin D., Kandula S., Padhye J., Bahl P., and Wetherall D., Augmenting data center networks with multi-gigabit wireless links, *ACM SIGCOMM*. 2011. vol. 41, no. 4, pp. 38–49.
42. Tie X., Ramachandran K., and Mahindra R., On 60 ghz wireless link performance in indoor environments, in *Passive and Active Measurement*, ser. *Lecture Notes in Computer Science*. 2012. vol. 7192, pp. 147–157.
43. Yamane T. and Katayama Y. An effective initialization of interference cancellation algorithms for distributed mimo systems in wireless datacenters, 2012. pp. 4249–4254.
44. Zhou X., Zhang Z., Zhu Y., Li Y., Kumar S., et al. Mirror mirror on the ceiling: Flexible wireless links for data centers, *ACM SIGCOMM*. 2012. pp. 443–454.
45. Vardhan H., Ryu S.-R., Banerjee B., and Prakash R., 60ghz wireless links in data center networks,” *Computer Networks*, vol. 58, no. 0, pp. 192 – 205, 2014. 264
46. Vardhan H. and Prakash R., Concurrency in polygonally arranged wireless data centers with all line-of-sight links, *Intl. Conf. on Comput., Netw. and Commun.*, Feb 2014, pp. 716–720.
47. Hamedazimi N. et al, Firefly: A reconfigurable wireless data center fabric using freespace optics, *ACM Conf. on SIGCOMM*. 2014. pp. 319–330.
48. Ghassemlooy Z., Popoola W., and Rajbhandari S., *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, 1st ed. Taylor & Francis, 2012.
49. Hamza A. S., Deogun J. S., and Alexander D. R., Free space optical data

center architecture design with fully connected racks, *IEEE GLOBECOM*. 2014. pp. 2192–2197.

50. Free space optical multicast crossbar, *J. Opt. Commun, Netw.* 2016. vol. 8, no 1, pp. 1–10.

51. Zhu Z., Zhong S., Chen L., and Chen K., Fully programmable and scalable optical switching fabric for petabyte data center, *Opt. Express*. 2015. vol. 23, no. 3, pp. 3563–3580.

52. Dean J. and Ghemawat S., Mapreduce: Simplified data processing on large clusters, *Commun. ACM*. 2008. vol. 51, no. 1, pp. 107–113.

53. Shvachko K., Kuang H., Radia S., and Chansler R., The hadoop distributed file system, *Symp. on Mass Storage Syst. and Technologies (MSST)*.2010. p. 1–10.

54. Willebrand H. and Ghuman B., *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*, ser. Sams Other Series. Sams, 2002.

55. The zettabyte eratrends and analysis, Cisco, White Paper 1465272001812119, June 2016. URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/serviceprovider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>

56. Hennes Henniger O. W., An introduction to free-space optical communications.” *Radioengineering*. 2010. vol. 19, no. 2.

57. Abdelsalam H. M., Hamza H. S., Al-Shaa A. M., and Hamza A. S., On the use of particle swarm optimization techniques for channel assignments in cognitive radio networks, *Multidisciplinary computational intelligence techniques: Applications in business, Engineering, and Medicine*, Hershey, IGI Global. 2013. p. 202 – 265.

58. Shahpari A., Alimi I., Sousa A., Ferreira R., Monteiro P., and Teixeira A., Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies, *Optical Communication Technology*, 2017, ch. 2.

59. Takai I., Harada T., Andoh M., Yasutomi K., Kagawa K., and Kawahito S., Optical vehicle-to-vehicle communication system using LED transmitter and camera receiver,” *IEEE Photonics Journal*. 2014. vol. 6, no. 5, pp. 1–14.

60. Han D., Fan X., Zhang K., and Zhu R., Research on multiple-scattering channel with monte carlo model in uv atmosphere communication, *Appl. Opt.*, 2013.

vol. 52, No 22, pp. 5516–5522.

61. Hamza A. S., Deogun J. S., and Alexander D. R., Wireless communication in data centers: A survey, *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2016. vol. 18, no. 3, pp. 1572–1595.

62. Pathak P. H., Feng X., Hu P., and Mohapatra P., Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2015. vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077.

63. Lee I. E., Guo Y., Ng T. K., et al., Nearinfrared wireless optical communication with particulates in-suspension over the underwater channel, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2017.

64. Zeng Z., Fu S., Zhang H., Dong Y., and Cheng J., A survey of underwater optical wireless communications, *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2017. vol. 19, № 1, pp. 204–238.

65. Majumdar A. K. and Ricklin J. C., Free-Space Laser Communications, ser. Optical and Fiber Communications Reports. *Springer*. New York. 2008. vol. 2, no. 1.

66. Ghassemlooy Z. and Popoola W. O., Mobile and Wireless Communications. Intech Open, January 2010, no. 17.

67. Ghassemlooy Z., Arnon S., Uysal M., Xu Z., and Cheng J., Emerging optical wireless communications-advances and challenges, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2015. vol. 33, no. 9, pp. 1738–1749.

68. Kaymak Y., Rojas-Cessa R., Feng J., Ansari N., Zhou M., and Zhang T., A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. vol. 20, no. 2, pp. 1104–1123.

69. Lightpointe wireless, UR: <http://lightpointe.com/freespaceoptics.html>

70. Borah D., Boucouvalas A., Davis C., Hranilovic S., and Yiannopoulos K., A review of communication-oriented optical wireless systems, *EURASIP J. on Wireless Commun. and Netw.* 2012. no. 1, pp. 1–28.

71. Demers F., Yanikomeroğlu H., and St-Hilaire M., A survey of opportunities for free space optics in next generation cellular networks, in *Communication Networks*

and Services Research Conference (CNSR). May 2011. pp. 210–216.

72. Wu S., Wang H., and Youn C.-H., Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications, *Network*. 2014. IEEE, vol. 28, no. 6, pp. 41–45.

73. Leitgeb E., Awan M., et al. Current optical technologies for wireless access, *Telecommunications (ConTEL)*. 2009. pp. 7–17.

74. Khalighi M. and Uysal M., Survey on free space optical communication: A communication theory perspective, *Communications Surveys Tutorials*, 2014. IEEE, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258.

75. Technology demonstration missions: Laser communications relay demonstration (LCRD), URL: http://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/lcrd/index.html

76. Tang S., Dong Y., and Zhang X., Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links, *IEEE Trans. Commun.* 2014. vol. 62, no. 1, pp. 226–234.

77. Khalighi M., Gabriel C., Hamza T., et al. Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges, *Intl. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2014, pp. 1–4.

78. Sakib Chowdhury M. I., Kavehrad M., and Zhang W., Cable television transmission over a 1550-nm infrared indoor optical wireless link, *Optical Engineering*. 2013. vol. 52, no. 10, pp. 100 – 120.

79. Chowdhury M. I. S., Kavehrad M., Zhang W., and Deng P., Combined catv and very-high-speed data transmission over a 1550-nm wavelength indoor optical wireless link. *Proceedings of SPIE*. 2014. vol. 9010.

80. Street A., Stavrinou P., O'brien D., and Edwards D., Indoor optical wireless systemsa review, *Opt. and Quantum Electron.* 1997. vol. 29, no. 3, pp. 349–378.

81. Душко Д. О., Табенський С. М., Стецюк М. В., Савенко Б. О. Метод організації розподілених обчислень в локальних комп'ютерних мережах в умовах відбування аномальних проявів / *Збірник наукових праць за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021»*. Хмельницький, 2021, С.81-82.

Додаток А

Презентація до захисту дипломної роботи

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Виконав: студент 2 курсу,
група КІ2м-20-1 Душко Д.О.

Керівник докт. техн. наук,
професор Савенко О.С.

2

Актуальність роботи

Мережі центрів обробки даних (МЦОД) наступного покоління повинні підтримувати постійне збільшення мережевого трафіку, задовольняючи мінімальні вимоги до продуктивності постійно і неперервно, тобто зберігаючи латентність, надійність, гнучкість та масштабованість. Тому, більша кількість кабелів, тобто волоконної оптики, може знадобитися в звичайних провідних МЦОД. У додатковому прагненні до обмеження можливої топології, велика кількість кабелів може призвести до проблем проектування та розробки, пов'язаних з дротяним каналом та обслуговуванням, розсіюванням тепла та споживанням електроенергії.

3

Актуальність роботи

Для вирішення складності кабелів у провідних МЦОД розглянемо оптичні мережні комунікації (ОМК), клас оптичних архітектур бездротових стільникових мереж центрів обробки даних, в яких фіксована пряма видимість оптичного бездротового зв'язку. ОМК використовуються для з'єднання стійок, розташованих у звичайних багатокутних топологіях. Представимо архітектуру ОМК МЦОД, розробляючи її теоретичні основи та досліджуючи протоколи маршрутизації і розробку приймача-передавача ОМК. Щоб реалізувати повністю бездротовий МЦОД, сервери в стійках, також, повинні бути підключені за допомогою посилань ОМК. Існує, однак, складність підключення декількох сусідніх мережевих компонентів, таких як сервери в стійці, використовуючи посилання «точка-точка» фіксованої прямої видимості (ФПВ). Щоб подолати цю проблему пропонується перевіряти доцільність підключення сусідніх мережевих компонентів за допомогою ФПВ. Актуальність роботи полягає в розробці архітектури та методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних, які вирішують проблеми в організації зв'язку у великих центрах обробки інформації.

4

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Актуальність роботи полягає в розробці архітектури та методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних, які вирішують проблеми в організації зв'язку у великих центрах обробки інформації.

Дослідження, представлені у кваліфікаційній роботі, проводились в рамках студентської наукової роботи кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету.

5

Мета роботи і завдання дослідження

- ▶ Метою дипломної роботи є проекткування архітектури та розробка методу синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.
- ▶ Для досягнення поставленої мети слід розв'язати наступні задачі:

1

проаналізувати відомі методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних та виділити їх недоліки;

2

удосконалити архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних та спроєктувати її;

6

Мета роботи



3

удосконалити метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних;

4

реалізувати центр обробки даних згідно розроблених рішень.

7

Об'єкт та предмет дослідження, методи досліджень

Об'єктом дослідження є процес синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Предметом дослідження є методи синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених задач використано основні положення:

- 1) теорії розподілених систем;
- 2) теорій множин, графів;
- 3) теорії комп'ютерних мереж організації функціонування розподіленої системи.

8

Наукова новизна

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) удосконалено архітектуру оптичних мереж центрів обробки даних;
- 2) удосконалено метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

9

Практичне значення отриманих результатів

У результаті виконаного дослідження розроблено архітектуру та на її основі синтезовано оптичний мережу центрів обробки даних, результати з яких можуть поширені у великі центри обробки даних.

10

Постановка задачі

Пропускна здатність і обчислювально-інтенсивні програми Big Data в Інтернет речей (IoT) і аналізі даних в режимі реального часу досягли своїх можливостей, тобто вичерпують свої ресурси і не можуть продовжувати покращення характеристик і зокрема пришвидшення обробки. Мережі центрів обробки даних (МЦОД) наступного покоління повинні підтримувати постійне збільшення мережевого трафіку, задовольняючи мінімальні вимоги до продуктивності постійно і неперервно, тобто зберігаючи латентність, надійність, гнучкість та масштабованість. Тому, більша кількість кабелів, тобто волоконної оптики, може знадобитися в звичайних провідних МЦОД. У додатковому прагненні до обмеження можливої топології, велика кількість кабелів може призвести до проблем проектування та розробки, пов'язаних з дротяним каналом та обслуговуванням, розсіюванням тепла та споживанням електроенергії.

11

Розробка методу та архітектури МЦОД

Мережа постійного потоку МЦОД – це мережева інфраструктура, яка надає послуги внутрішньо- та між мережами. Таким чином, важливо розробити ефективну високошвидкісну / високошвидкісну пропускну здатність МЦОД для задоволення високих обчислювальних та комунікаційних вимог у постійному потоці. Проектування МЦОД, також, відповідає кільком вимогам, таким як масштабованість, низька затримка, доступність та економічна ефективність. Інші практичні складові, включаючи складність кабелів, енергоспоживання та охолодження, також повинні бути розглянуті в конструкції.

12

Розробка методу та архітектури МЦОД

| | | | | | |
|-------------|-------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| дротовий | оптичний | оптичний звичайний дротовий дата-центр | | | |
| | електричний | гібридний дротовий дата-центр | електричний звичайний дротовий | | |
| бездротовий | рч | гібридний дата-центр | з рч зв'язком | рч звичайний бездротовий дата-центр | |
| | ОВП | гібридний дата-центр | з ОВП зв'язком | гібридний бездротовий дата-центр | ОВП звичайний бездротовий дата-центр |
| | | оптичний | електричний | рч | ОВП |
| | | дротовий | | бездротовий | |

Рисунок 1.3 – Проекти технологій МЦОД

Розробка методу та архітектури МЦОД



Розробка методу та архітектури МЦОД

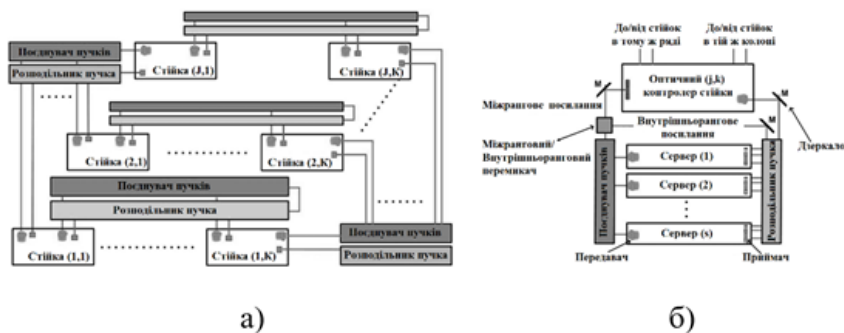


Рисунок 2.2 – Архітектура ОВП-«Дата-центр» (а); Стойка серверів ОВП без комутатора (б)

15

Розробка методу та архітектури МЦОД

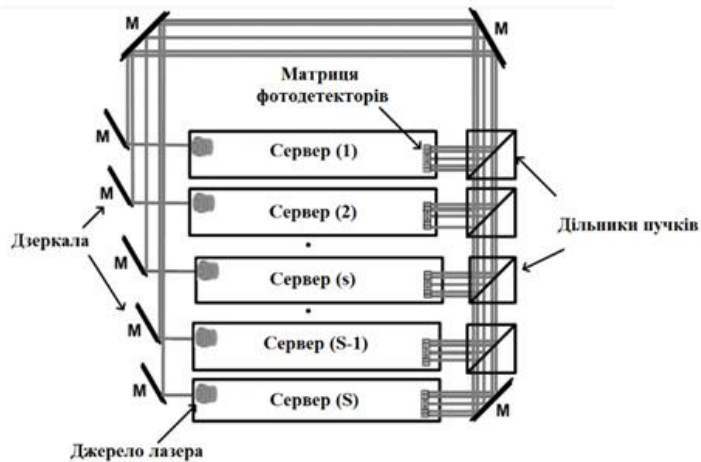


Рисунок 2.3 – Сійка серверів ОВП.

16

Розробка методу та архітектури МЦОД

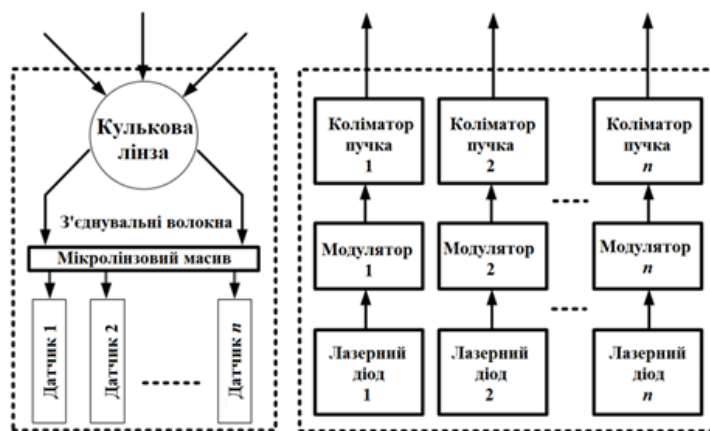


Рисунок 3.7 – Архітектура приймача-передавача тору ОВП.

17

Розробка методу та архітектури МЦОД

Таблиця 3.2 – Кількість посилань між стійками та середня кількість стрибків у ОБС

| ЦОД Розмір | ОБС | | Масштаби | |
|---------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| | Посилання | Середня кількість стрибків | Посилання | Середня кількість стрибків |
| 16 тис | 1536 | 12.5483 | 10240 | 6.16 |
| 64 тис | 12696 | 32.691 | 802816 | 8.09 |
| 128 тис | 10584 | 29.8768 | 802816 | 8.12 |

18

Розробка методу та архітектури МЦОД

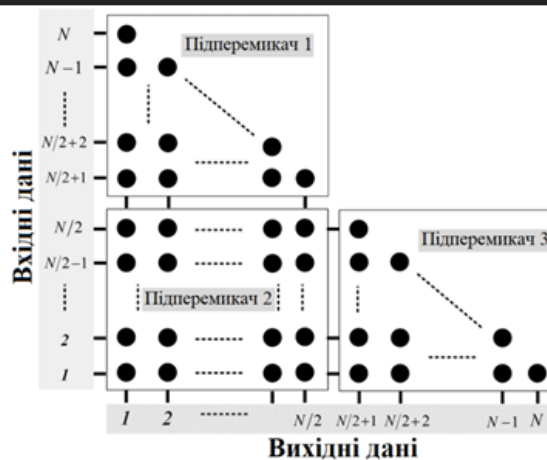


Рисунок 4.7 – Загальна структура трикутного перемикача $N \times N$

Висновки

- ▶ У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень удосконалено архітектуру та метод синтезу мереж центрів обробки даних.
- ▶ У першому розділі проведено аналіз відомих рішень зі створення бездротових «Дата-центрів», виділено недоліки та зроблено постановку задачі дослідження для вирішення проблем при синтезі мереж центрів обробки даних.
- ▶ У другому розділі удосконалено архітектуру мереж центрів обробки даних.
- ▶ У третьому розділі удосконалено метод синтезу мереж центрів обробки даних.
- ▶ У четвертому розділі розроблено новий багатоадресний перестановочний неблокувальний N перемикач з використанням триступневих комутаційних елементів перемикання ТКЕП. У конструкції розщеплення і перемикання сигналів одночасно виконуються в межах одного етапу, і, таким чином, окремі етапи розщеплення, що використовуються в звичайних багатоадресних перемикачах, не потрібні.
- ▶ Впровадження результатів роботи дозволили створити «Дата-центр» згідно запропонованих рішень з бездротовим зв'язком.

Перелік публікацій

За темою дипломної роботи опублікована одна публікація у Збірнику наукових праць за матеріалами XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2021». Хмельницький – 2021. – С.81-82. [81].

Дякую за увагу!

Додаток Б
Копії наукових публікацій

УДК 004.49

Душко Д. О., Табенський С. М., Стецюк М. В., Савенко Б. О.

Хмельницький національний університет

**МЕТОД ОРГАНІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ЛОКАЛЬНИХ
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ В УМОВАХ ВІДБУВАННЯ АНОМАЛЬНИХ
ПРОЯВІВ**

Розглянуто та пропонується до розробки метод організації розподілених обчислень в локальних комп'ютерних мережах в умовах відбування аномальних проявів. Побудована згідно нього розподілена система виявлення аномалій в комп'ютерних системах базується на двох складових: розробка розподіленої системи; використання та удосконалення методів виявлення аномалій.

The method of organization of distributed computing in local computer networks in the conditions of anomalous manifestations is considered and offered for development. The distributed system of anomaly detection in computer systems built according to it is based on two components: development of the distributed system; use and improvement of anomaly detection methods.

Підвищення рівня інформатизації суспільства створює широкі можливості для зловмисників щодо використання як обчислювальних ресурсів користувачів так і інформації, яку вони зберігають. На сьогодні актуальним напрямом досліджень з метою протидії зловмисникам є пошук аномальних проявів, а також залучення до цього пошуку розподілених систем. При організації роботи з розподіленими системами виникає проблема організації ефективних розподілених обчислень. Від цієї ефективності залежать результати пошуку.

Метою роботи є розробка методу організації розподілених обчислень в локальних комп'ютерних мережах за умов відбування аномальних проявів.

Ефективна інтеграція при імплементації методу виявлення аномалій в розподілену систему може покращити загальну ефективність з виявлення аномалій та реагування на неї. Розглянемо відомі методи щодо проектування розподілених систем.

Для розподілених систем вартість зв'язку є найбільш часто використовуваною метрикою з метою оцінки ефективності операцій у розподілених алгоритмах для середовищ передачі повідомлень [1]. При цьому постійне припущення полягає в тому, що вартість обчислень в компонентах незначна порівняно з вартістю зв'язку. Однак у багатьох випадках реалізації операцій покладаються на складні обчислення, які не слід ігнорувати. Тому, більш точна оцінка ефективності роботи повинна враховувати як обчислювальні витрати, так і витрати на зв'язок. В роботі [2] проаналізована ефективність слабо узгоджених, але швидко реагуючих розподілених схем даних. Актуальність цього напрямку

обґрунтована проблемами, які пов'язані з узгодженістю між розробкою складних застосунків та отриманням лише слабких гарантій узгодженості в сховищах даних. Компромiс узгодженості спрямований на досягнення як сильної узгодженості, так і низької затримки у загальному випадку. В роботі [3] представлена розподілена система для управління дуже великими обсягами структурованих даних, розподілених на багатьох товарних серверах, забезпечуючи при цьому високодоступні послуги без жодної точки відмови. Ця система може працювати на інфраструктурі з сотнями вузлів розповсюджено за різними центрами обробки даних. Вона не підтримує повну реляційну модель даних, а надає клієнтам модель простих даних, яка підтримує динамічний контроль над розміщенням даних та форматуванням. В роботі [4] представлено створені оптимальні комунікаційні протоколи у трьох сценаріях, що є важливим для підтримки цілісності розподіленої системи. Проблема складності при організації комунікації пошуку наближеного максимального узгодження в багатосторонній моделі передачі повідомлень є актуальною [5]. Задача максимального узгодження є однією з найбільш фундаментальних комбінаторних задач графа, що має різноманітні програми, і вирішенню оцінки її складності присвячена робота авторів в [5].

Основними кроками методу організації розподілених обчислень в локальних комп'ютерних мережах є врахування дублювання обчислень, врахування часових характеристик, архітектурних особливостей обчислювальних ресурсів, архітектури системи та методу виявлення аномальних проявів. Інтеграція цих характеристик надасть змогу досягти ефективніших за часом та точністю результатів з виявлення аномалій.

Таким чином, розробка розподіленої системи виявлення аномалій в комп'ютерних системах базується на двох складових: розробка розподіленої системи, використання та удосконалення методів виявлення аномалій. Аналіз наукових результатів з цих напрямків є основою для розробки методу організації розподілених обчислень в локальних комп'ютерних системах за умов аномальних проявів.

Перелік посилань

1. Anta A., Hadjistazi T., Nicolaou N. et al. Tractable low-delay atomic memory. *Distrib. Comput.* 34, 33–58 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00446-020-00379-y>
2. Ouyang L., Huang Y., Wei H., Lu J. Achieving Probabilistic Atomicity With Well-Bounded Staleness and Low Read Latency in Distributed Datastores. in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 32, № 4, pp. 815-829, 1 April 2021, doi: 10.1109/TPDS.2020.3034328.
3. Lakshman A. and Malik P. Cassandra: A decentralized structured storage system, *SIGOPS Operating Syst. Rev.*, vol. 44, no. 2, pp. 35-40, Apr. 2010.
4. Ganesh, C., Patra, A. Optimal extension protocols for byzantine broadcast and agreement. *Distrib. Comput.* 34, 59–77 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00446-020-00384-1>
5. Huang, Z., Radunovic, B., Vojnovic, M. et al. Communication complexity of approximate maximum matching in the message-passing model. *Distrib. Comput.* 33, 515 – 531 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00446-020-00371-6>

Ім'я користувача:
Кафедра КІ

ID перевірки:
1010976552

Дата перевірки:
28.04.2022 09:24:37 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
28.04.2022 09:35:35 EEST

ID користувача:
100005591

Назва документа: Душко_duplom_2022_123_D_template

Кількість сторінок: 72 Кількість слів: 15381 Кількість символів: 116853 Розмір файлу: 3.42 MB ID файлу: 1010883069

0.9% Схожість

Найбільша схожість: 0.5% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1010865618)

0.29% Джерела з Інтернету

12

Сторінка 74

0.85% Джерела з Бібліотеки

114

Сторінка 74

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

11

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Ошибок в документах: 8%**

| | | | | |
|---|----------|---------|-------------------------------------|---------|
| ID: 103158 Название: Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних Добавлено в БД: 2022-04-28 Авторы: Душко Д.О. Руководители: Савенко О.С. Консультанты: Опоненты: | Документ | | Суммарное совпадение по Базе Данных | |
| | Символы | Лексемы | Символы | Лексемы |
| | 107870 | 826 | 337 (0%) | 5 (1%) |

Источник плагиата

| ID | Описание | Наличие плагиата в документе | |
|----|----------|------------------------------|---------|
| | | Символы | Лексемы |

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Душко Дмитро Олександрович

Тема: Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг дипломної роботи:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 79

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз бездротових оптичних технологій. У другому розділі запропоновано модель бездротових мереж центрів обробки даних. У третьому розділі представлено архітектуру бездротових стільникових центрів обробки даних. У четвертому розділі наведено архітектуру багато адресних оптичних перемикачів вільного простору.

4. Позитивні сторони роботи: Запропоновано архітектуру та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних.

5. Негативні сторони роботи: В дослідженні було б бажано провести оцінку ефективності запропонованих рішень

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: =

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому рівні.

8. Інші зауваження:

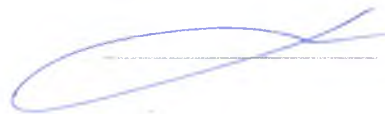
9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої дипломної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4.0 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

д.т.н., професор, зав. каф інженерії програмного забезпечення Бєратюк Л.П.

“ 4 ” 05 2022р.



Завідувачу кафедри КПС
д-р.техн.наук, проф. Говорущенко Т. О.

Душка Дмитра Олександровича

ІІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-20-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіатоповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiatism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

04.05.2022

дата

підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Архітектура та метод синтезу оптичних мереж центрів обробки даних

Автор: Душко Дмитро Олександрович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Березький Олег Миколайович, д.т.н, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту. | відповідає |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 0.90% і адресується до 126 періоджерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОІ

Завідувач кафедри КІС



О. М. Березький



О. С. Савенко



Т. О. Говорущенко