

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«Відмовостійка архітектура транспортної мережі з
резервуванням DWDM/OTN для критичної інфраструктури в умовах
війни»**

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Андрій Пасошников
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти група ІСД-41

Андрій Пасошников
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
PhD

Дмитро Козлов
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК

“ _____ ” _____ 2026 року

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

Пасошникову Андрію Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Відмовостійка архітектура транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для критичної інфраструктури в умовах війни

керівник кваліфікаційної роботи: Дмитро Козлов PhD

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “ 20 ” лютого 2026 р. № 51

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «30» травня 2026 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Інформаційні ресурси та технічні засоби транспортних телекомунікаційних мереж;

2. Модулі організації оптичного мультиплексування та передавання даних у транспортній мережі, механізми взаємодії компонентів DWDM та OTN/OTH;

3. Нормативні та методичні матеріали щодо побудови відмовостійких телекомунікаційних систем, сучасні підходи до резервування транспортних мереж.

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

1. Аналіз предметної області та постановка задачі проєктування відмовостійкої транспортної мережі.
2. Огляд існуючих технологій , архітектурних рішень та засобів побудови транспортної мережі.
3. Проєктування , моделювання та оцінювання ефективності відмовостійкої архітектури транспортної мережі.
- 5.Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання « 20 » лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз предметної області та огляд сучасних технологій побудови транспортних оптичних мереж для критичної інфраструктури	24.02-03.03.26	
2.	Вивчення технічної документації технологій DWDM, OTN/OTH, MPLS-TP та засобів резервування транспортних мереж	04.03-17.03.26	
3.	Постановка задачі, визначення функціональних вимог до транспортної мережі та формування технічного завдання	18.03-31.03.26	
4.	Розробка архітектури відмовостійкої транспортної мережі, проєктування взаємодії компонентів DWDM/OTN та механізмів резервування	01.04-24.04.26	
5.	Моделювання транспортної мережі та реалізація механізмів моніторингу	25.04-16.05.26	
6.	Реалізація системи тестування відмовостійкості мережі, налаштування параметрів резервування та оцінювання продуктивності	19.05-20.05.26	
7.	Завершальне тестування транспортної мережі, перевірка ефективності механізмів резервування та підготовка демонстраційних матеріалів.	21.05-30.05.26	

Здобувач вищої освіти	Андрій Пасошников
(підпис)	(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
Керівник кваліфікаційної роботи	Дмитро Козлов
(підпис)	(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступня бакалавр: 67 стор., 29 рис., 30 джерел.

Об'єкт дослідження – транспортні телекомунікаційні мережі критичної інфраструктури на основі оптичних технологій передачі даних.

Предмет дослідження – методи та принципи побудови відмовостійких транспортних мереж із використанням технологій DWDM та OTN/OTH, а також механізмів резервування каналів і вузлів мережі.

Мета роботи – проектування відмовостійкої архітектури транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для забезпечення безперервності передачі даних у системах критичної інфраструктури.

Короткий зміст роботи. У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні підходи до побудови оптичних транспортних мереж на основі технологій DWDM/OTN, їх місце в телекомунікаційній інфраструктурі та роль у забезпеченні високошвидкісного передавання даних. Виокремлено ключові етапи еволюції транспортних мереж і показано, що перехід до багаторівневої оптичної архітектури є закономірною відповіддю на зростання обсягів трафіку, підвищення вимог до надійності та необхідність гнучкого керування ресурсами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

DWDM, OTN, OTH, ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ, РЕЗЕРВУВАННЯ, КРИТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА, ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ, MPLS-TP, OAM, TELECOMMUNICATION NETWORKS

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТРАНСПОРТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	11
1.1 Призначення транспортних мереж та вимоги до надійності систем критичної інфраструктури	11
1.2 Аналіз сучасних технологій транспортних мереж: SDH, MPLS-TP, DWDM та OTN	17
1.3 Принципи забезпечення відмовостійкості та резервування в оптичних транспортних мережах	26
2 ПРОЄКТУВАННЯ ВІДМОВОСТІЙКОЇ АРХІТЕКТУРИ DWDM/OTN МЕРЕЖІ	34
2.1 Архітектура оптичної транспортної мережі OTN/OTN та принципи взаємодії її компонентів	34
2.2 Проєктування системи DWDM-мультиплексування та резервування каналів передачі	41
2.3 Організація моніторингу, керування та автоматичного перемикання трафіку в аварійних ситуаціях	44
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ	53
3.1 Вибір та характеристика обладнання DWDM/OTN для побудови транспортної мережі	53
3.2 Функціональні можливості обладнання рівня оптичної секції передавання	54
3.3 Оцінювання ефективності, масштабованості та перспектив розвитку транспортної мережі	57
ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	69

ВСТУП

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням ролі телекомунікаційних мереж у забезпеченні функціонування критичної інфраструктури держави, особливо в умовах воєнних дій та підвищених ризиків пошкодження каналів зв'язку. Сучасні системи енергетики, державного управління, оборонного сектору, транспорту, банківської сфери та екстрених служб потребують безперервного й надійного обміну даними, що робить питання побудови відмовостійких транспортних мереж одним із ключових напрямів розвитку телекомунікаційної галузі.

В умовах війни в Україні суттєво зросла необхідність забезпечення стійкості мережевої інфраструктури до фізичних пошкоджень, аварій, перевантажень та кібератак. Порушення роботи транспортної мережі може призвести до втрати зв'язку між важливими об'єктами критичної інфраструктури, що створює значні ризики для безпеки держави та безперервності функціонування суспільно важливих сервісів. Саме тому особливої актуальності набуває використання технологій DWDM та OTN/OTH, які забезпечують високошвидкісну передачу даних, масштабованість, ефективне використання оптичних каналів і підтримку механізмів резервування.

Технологія DWDM дозволяє значно підвищити пропускну здатність оптичних ліній зв'язку шляхом одночасної передачі великої кількості спектральних каналів по одному волокну, тоді як OTN забезпечує стандартизоване транспортування даних, моніторинг стану мережі та підтримку механізмів автоматичного відновлення після відмов. Поєднання цих технологій створює основу для побудови сучасних транспортних мереж із високим рівнем надійності та відмовостійкості.

Таким чином, дослідження, пов'язане з проєктуванням відмовостійкої архітектури транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для критичної інфраструктури в умовах війни в Україні, є актуальним та має важливе практичне значення для забезпечення стабільності телекомунікаційних систем, підвищення

рівня інформаційної безпеки та підтримки безперервності функціонування критично важливих об'єктів.

Об'єкт дослідження – транспортні телекомунікаційні мережі критичної інфраструктури на основі оптичних технологій передачі даних.

Предмет дослідження – методи та принципи побудови відмовостійких транспортних мереж із використанням технологій DWDM та OTN/OTH, а також механізмів резервування каналів і вузлів мережі.

Мета роботи – проектування відмовостійкої архітектури транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для забезпечення безперервності передачі даних у системах критичної інфраструктури.

Наукові завдання:

1. Провести аналіз сучасних транспортних телекомунікаційних мереж та визначити особливості функціонування критичної інфраструктури в умовах воєнних загроз.
2. Дослідити принципи роботи технологій DWDM, OTN/OTH та MPLS-TP, а також визначити їх переваги й особливості застосування у транспортних оптичних мережах.
3. Проаналізувати сучасні підходи до забезпечення відмовостійкості та резервування каналів передачі даних у транспортних мережах.
4. Визначити функціональні та технічні вимоги до архітектури транспортної мережі для забезпечення безперервності передачі даних у критичній інфраструктурі.
5. Розробити архітектуру відмовостійкої транспортної мережі на основі технологій DWDM/OTN із використанням механізмів резервування каналів та вузлів мережі.
6. Реалізувати модель системи моніторингу стану транспортної мережі та автоматичного перемикавання трафіку при виникненні аварійних ситуацій.
7. Провести оцінювання ефективності, надійності та масштабованості запропонованої архітектури транспортної мережі в умовах можливих відмов і перевантажень.

8. Визначити перспективи розвитку та вдосконалення транспортних оптичних мереж для забезпечення стійкості критичної інфраструктури України.

Методи дослідження:

1. Аналіз сучасних транспортних мереж та технологій оптичної передачі даних.
2. Методи системного аналізу та моделювання архітектури транспортної мережі.
3. Методи проєктування телекомунікаційних систем із використанням технологій DWDM та OTN/OTH.
4. Методи оцінювання надійності та відмовостійкості транспортних мереж.

Розроблена архітектура транспортної мережі реалізує можливість безперервної передачі даних між об'єктами критичної інфраструктури із застосуванням технологій DWDM та OTN/OTH, що дозволяє забезпечити високу пропускну здатність, відмовостійкість та автоматичне резервування каналів зв'язку. Система демонструє можливість ефективної організації транспортної оптичної мережі з підтримкою механізмів моніторингу, автоматичного перемикавання трафіку та швидкого відновлення працездатності у випадку аварійних ситуацій або пошкодження окремих ділянок мережі. Запропоноване рішення може використовуватись для забезпечення стабільного функціонування телекомунікаційної інфраструктури державних установ, енергетичних об'єктів, центрів обробки даних та інших систем критичної інфраструктури в умовах воєнних загроз і підвищених навантажень.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТРАНСПОРТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Призначення транспортних мереж та вимоги до надійності систем критичної інфраструктури

Сучасний розвиток інформаційно-комунікаційних технологій супроводжується постійним зростанням обсягів передавання даних, збільшенням кількості цифрових сервісів та підвищенням залежності державних і комерційних структур від телекомунікаційної інфраструктури. Особливого значення набувають транспортні телекомунікаційні мережі, які забезпечують передачу інформаційних потоків між різними сегментами інформаційних систем, дата-центрами, вузлами зв'язку, державними установами, системами енергетики, оборони, банківськими структурами та іншими об'єктами критичної інфраструктури [1].

Транспортна мережа є базовим рівнем телекомунікаційної інфраструктури, основним призначенням якого є організація високошвидкісного, безпечного та безперервного передавання даних між вузлами мережі. Саме транспортний рівень забезпечує взаємодію між локальними мережами, магістральними каналами зв'язку та сервісними платформами. У сучасних умовах транспортні мережі використовуються для підтримки функціонування мобільного зв'язку, інтернет-послуг, корпоративних інформаційних систем, систем відеоспостереження, державних інформаційних ресурсів та сервісів електронного урядування.

Особливістю транспортних мереж є їхня здатність передавати великі обсяги трафіку на значні відстані з мінімальними затримками та високим рівнем надійності. На відміну від мереж доступу, транспортна мережа виконує функцію магістральної системи передавання даних, яка об'єднує різні регіони, міста та об'єкти інфраструктури в єдину інформаційну екосистему. Саме тому транспортні мережі повинні відповідати суворим вимогам щодо продуктивності, масштабованості, відмовостійкості та безпеки.

В умовах цифрової трансформації державного сектору транспортні мережі

стали невід’ємною частиною критичної інфраструктури. Критична інфраструктура включає сукупність об’єктів, систем та сервісів, порушення функціонування яких може призвести до значних економічних втрат, соціальної нестабільності, загроз національній безпеці або людським жертвам. До таких об’єктів належать:

- енергетичні системи;
- транспортні системи;
- системи державного управління;
- оборонна інфраструктура;
- банківський сектор;
- системи охорони здоров’я;
- системи цивільного захисту;
- центри обробки даних;
- телекомунікаційні мережі [2].

У сучасних умовах функціонування критичної інфраструктури безпосередньо залежить від стабільності та надійності телекомунікаційних систем. Наприклад, системи енергетики використовують транспортні мережі для передавання телеметричної інформації, системи військового управління — для координації підрозділів, а банківські системи — для синхронізації фінансових транзакцій між дата-центрами. Будь-яке порушення функціонування транспортної мережі може призвести до втрати зв’язку між важливими вузлами інфраструктури, що створює критичні ризики для держави.

Особливої актуальності питання надійності транспортних мереж набули в умовах війни в Україні. Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру, пошкодження магістральних ліній зв’язку, кібератаки та фізичне руйнування телекомунікаційних вузлів продемонстрували необхідність побудови мереж із високим рівнем відмовостійкості та резервування. У таких умовах транспортна мережа повинна забезпечувати:

- безперервність передавання даних;
- автоматичне резервування каналів зв'язку;
- швидке відновлення після аварій;
- підтримку критичних сервісів;
- стійкість до перевантажень;
- захист від фізичних та кібернетичних загроз.

Однією з ключових характеристик сучасної транспортної мережі є надійність. Надійність транспортної мережі визначається здатністю системи забезпечувати безперервне функціонування та підтримувати необхідний рівень якості передачі даних протягом визначеного періоду часу. Надійність включає декілька взаємопов'язаних складових, серед яких:

- відмовостійкість;
- доступність;
- живучість;
- резервування;
- ремонтпридатність;
- масштабованість;
- стабільність роботи.

Відмовостійкість є однією з найважливіших характеристик транспортної мережі. Вона визначає здатність мережі продовжувати функціонування навіть у випадку виходу з ладу окремих вузлів, каналів передачі або мережевого обладнання. Для забезпечення відмовостійкості використовуються механізми резервування каналів, дублювання обладнання, кільцеві топології мережі, автоматичне перемикавання трафіку та системи моніторингу.

Доступність мережі характеризує рівень готовності системи до роботи в будь-який момент часу. Для критичної інфраструктури цей показник повинен бути

максимально високим. У сучасних транспортних мережах часто використовується концепція “п’яти дев’яток”, що означає доступність на рівні 99,999 %. Такий рівень доступності допускає лише декілька хвилин простою протягом року [3].

Живучість транспортної мережі визначає здатність системи зберігати працездатність навіть у випадку масштабних аварій або зовнішніх впливів. У контексті воєнних загроз живучість стає критично важливим параметром, оскільки мережа повинна функціонувати навіть після пошкодження окремих ділянок інфраструктури. Для цього використовуються географічно рознесені вузли, резервні канали зв’язку та альтернативні маршрути передавання даних.

Резервування передбачає створення додаткових каналів зв’язку, вузлів або обладнання, які можуть автоматично використовуватись у випадку виникнення аварійної ситуації. Існують різні типи резервування:

- резервування каналів передачі;
- резервування мережевих вузлів;
- резервування джерел живлення;
- резервування маршрутизації;
- резервування оптичних трактів;
- резервування обладнання DWDM/OTN.

У сучасних транспортних мережах широко використовуються кільцеві топології, оскільки вони забезпечують високу відмовостійкість і підтримують механізми автоматичного перемикавання трафіку. У випадку пошкодження однієї ділянки мережі трафік автоматично перенаправляється альтернативним маршрутом, що дозволяє мінімізувати втрати даних та час простою системи (рис. 1.1).

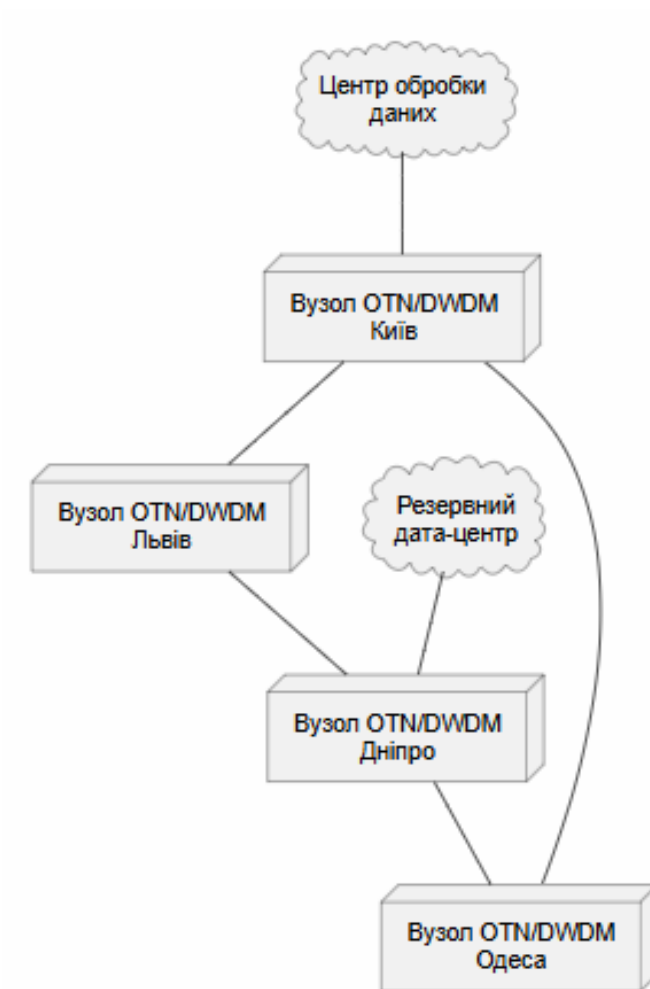


Рисунок 1.1 Загальний принцип організації транспортної мережі критичної інфраструктури

У представленій схемі реалізовано кільцеву топологію транспортної мережі, що забезпечує резервування каналів зв'язку між основними вузлами мережі. У випадку пошкодження одного з каналів передавання даних система автоматично перенаправляє трафік альтернативним маршрутом, що дозволяє забезпечити безперервність функціонування критичних сервісів [4].

Крім надійності та відмовостійкості, сучасні транспортні мережі повинні відповідати вимогам масштабованості. Масштабованість визначає можливість розширення мережі без суттєвої зміни її архітектури. Зростання кількості цифрових сервісів, хмарних платформ, систем відеоспостереження та IoT-пристроїв призводить до постійного збільшення обсягів трафіку, що потребує впровадження високошвидкісних технологій передавання даних.

Одним із ключових напрямів розвитку транспортних мереж є використання оптичних технологій передавання даних. Оптичні мережі мають низку переваг у порівнянні з традиційними електричними системами передачі:

- висока пропускна здатність;
- низькі затримки;
- стійкість до електромагнітних завад;
- можливість передавання даних на великі відстані;
- підтримка мультиплексування каналів;
- висока енергоефективність.

Саме тому сучасні транспортні мережі критичної інфраструктури будуються переважно на базі технологій DWDM та OTN, які забезпечують високошвидкісне передавання даних і підтримують механізми резервування та автоматичного відновлення після відмов.

Технологія DWDM дозволяє передавати десятки або навіть сотні незалежних оптичних каналів по одному волокну шляхом використання різних довжин хвиль світла. Це дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність транспортної мережі без необхідності прокладання додаткових волоконно-оптичних ліній.

У свою чергу технологія OTN забезпечує стандартизоване транспортування даних, контроль помилок, моніторинг стану мережі та підтримку механізмів автоматичного перемикавання трафіку. Використання OTN дозволяє підвищити ефективність управління транспортною мережею та забезпечити високий рівень надійності передавання інформації.

Для забезпечення ефективного функціонування транспортної мережі критичної інфраструктури необхідно враховувати комплекс вимог, які наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні вимоги до транспортних мереж критичної інфраструктури

Вимога	Характеристика
Надійність	Забезпечення стабільної роботи мережі
Відмовостійкість	Підтримка роботи при аваріях
Масштабованість	Можливість розширення мережі
Безпека	Захист від кібератак та несанкціонованого доступу
Резервування	Наявність резервних каналів і вузлів
Продуктивність	Висока пропускна здатність мережі
Живучість	Стійкість до фізичних пошкоджень
Моніторинг	Контроль стану мережі в реальному часі

Транспортні телекомунікаційні мережі є критично важливим елементом сучасної цифрової інфраструктури держави. В умовах війни та постійного зростання кібернетичних і фізичних загроз особливого значення набуває забезпечення високого рівня надійності, відмовостійкості та резервування транспортних мереж. Використання сучасних оптичних технологій DWDM та OTN створює основу для побудови високошвидкісних транспортних мереж, здатних забезпечити безперервне функціонування критичної інфраструктури навіть у складних умовах експлуатації.

1.2 Аналіз сучасних технологій транспортних мереж: SDH, MPLS-TP, DWDM та OTN

Транспортні телекомунікаційні мережі є основою функціонування глобальної цифрової інфраструктури та забезпечують передачу значних обсягів інформації між дата-центрами, операторами зв'язку, державними структурами, промисловими підприємствами та об'єктами критичної інфраструктури. Постійне зростання трафіку, розвиток хмарних сервісів, мобільних мереж 5G, систем відеоспостереження та IoT-платформ потребують використання високошвидкісних технологій передачі даних із підтримкою масштабованості, резервування та автоматичного керування трафіком.

Протягом останніх десятиліть у транспортних мережах використовувались різні технології передачі даних, кожна з яких мала власні особливості, переваги та обмеження. Найбільш поширеними серед них стали:

- SDH (Synchronous Digital Hierarchy);
- MPLS-TP (Multiprotocol Label Switching – Transport Profile);
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing);
- OTN (Optical Transport Network) [5].

Зазначені технології виконують різні функції в архітектурі транспортної мережі та часто використовуються комплексно для забезпечення високої продуктивності, відмовостійкості та ефективного управління каналами передачі даних.

На початкових етапах розвитку магістральних телекомунікаційних систем основною технологією транспортних мереж була SDH. Технологія SDH була розроблена для організації синхронної передачі цифрових потоків у телекомунікаційних мережах та стала основою побудови транспортної інфраструктури операторів зв'язку у 1990-х роках.

SDH забезпечує передачу даних у вигляді синхронних транспортних модулів STM (Synchronous Transport Module). Основною перевагою цієї технології стала можливість об'єднання декількох цифрових потоків у єдиний транспортний канал із централізованою системою синхронізації.

Основними характеристиками SDH є:

- синхронна передача даних;
- стандартизована структура кадрів;
- підтримка резервування каналів;
- висока надійність;
- підтримка кільцевих топологій;
- централізоване управління мережею.

Технологія SDH активно використовувалась у транспортних мережах операторів зв'язку завдяки підтримці механізмів автоматичного перемикання трафіку при аваріях. У випадку пошкодження основного каналу система автоматично активувала резервний маршрут, що забезпечувало безперервність передачі даних.

Одним із найбільш поширених механізмів резервування в SDH є схема MSP (Multiplex Section Protection), яка дозволяє автоматично перемикати трафік між основним та резервним каналами. Також використовувались кільцеві топології типу SNCP (Subnetwork Connection Protection), що забезпечували високу відмовостійкість мережі (рис. 1.2).

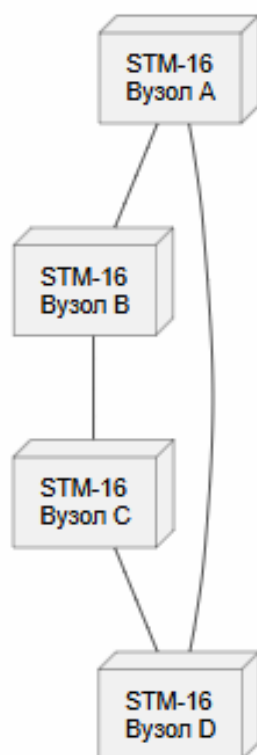


Рисунок 1.2 Принципи організації транспортної мережі SDH

Незважаючи на високу надійність, технологія SDH має низку суттєвих обмежень. Головним недоліком є недостатня ефективність при передачі пакетного IP-трафіку, який став домінуючим у сучасних мережах. Крім того, SDH має обмежену масштабованість та нижчу пропускну здатність у порівнянні з сучасними оптичними технологіями.

У зв'язку зі стрімким розвитком IP-мереж та пакетної передачі даних виникла необхідність створення транспортної технології, здатної забезпечити високу надійність SDH та ефективність маршрутизації IP-трафіку. Саме такою технологією стала MPLS-TP.

MPLS-TP є транспортним профілем технології MPLS, адаптованим для використання у транспортних мережах операторського класу. Основною особливістю MPLS-TP є поєднання принципів комутації міток MPLS із механізмами надійності та керування, характерними для SDH [6].

Технологія MPLS-TP забезпечує:

- передачу пакетного трафіку;
- резервування маршрутів;
- підтримку OAM-механізмів;
- моніторинг стану мережі;
- контроль затримок;
- підтримку QoS;
- автоматичне відновлення після відмов.

На відміну від класичного MPLS, MPLS-TP орієнтована на використання в транспортних мережах із високими вимогами до стабільності та передбачуваності роботи. Технологія підтримує статичні транспортні канали, що дозволяє операторам контролювати маршрути передачі даних та мінімізувати ризики перевантаження мережі.

Однією з ключових переваг MPLS-TP є підтримка механізмів OAM (Operations, Administration and Maintenance), які забезпечують:

- моніторинг працездатності каналів;
- виявлення аварій;
- контроль продуктивності;

- вимірювання затримок;
- автоматичне перемикання трафіку (рис. 1.3).

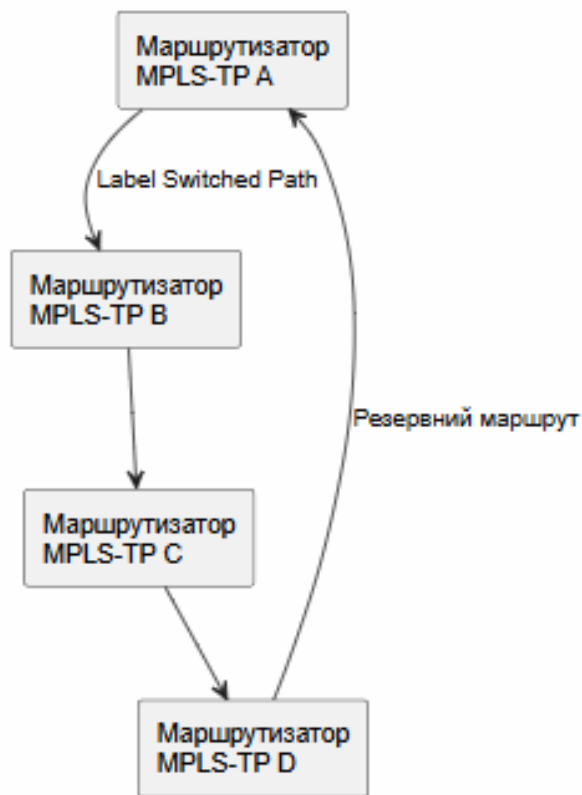


Рисунок 1.3 Принцип роботи MPLS-TP мережі

Важливою перевагою MPLS-TP є підтримка передачі різних типів трафіку:

- IP;
- Ethernet;
- відеотрафіку;
- сервісів дата-центрів;
- голосових сервісів;
- трафіку мобільних мереж [7].

Проте MPLS-TP має певні недоліки. Технологія є складною в конфігурації та потребує використання потужного мережевого обладнання. Крім того, MPLS-TP не вирішує проблему фізичного обмеження пропускної здатності оптичних

каналів, тому для сучасних магістральних мереж активно використовуються технології оптичного мультиплексування.

Однією з найважливіших технологій сучасних транспортних мереж є DWDM. Технологія DWDM забезпечує передачу великої кількості незалежних оптичних каналів по одному волоконно-оптичному кабелю шляхом використання різних довжин хвиль світла.

Принцип роботи DWDM базується на спектральному мультиплексуванні, при якому кожен інформаційний потік передається окремою довжиною хвилі. Це дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність транспортної мережі без необхідності прокладання додаткових волокон.

Основними перевагами DWDM є:

- надзвичайно висока пропусчна здатність;
- ефективне використання оптичного волокна;
- підтримка великої кількості каналів;
- масштабованість;
- підтримка магістральних мереж;
- можливість передачі трафіку на великі відстані.

Сучасні DWDM-системи підтримують передачу десятків або навіть сотень оптичних каналів зі швидкістю:

- 10 Гбіт/с;
- 40 Гбіт/с;
- 100 Гбіт/с;
- 400 Гбіт/с;
- 800 Гбіт/с.

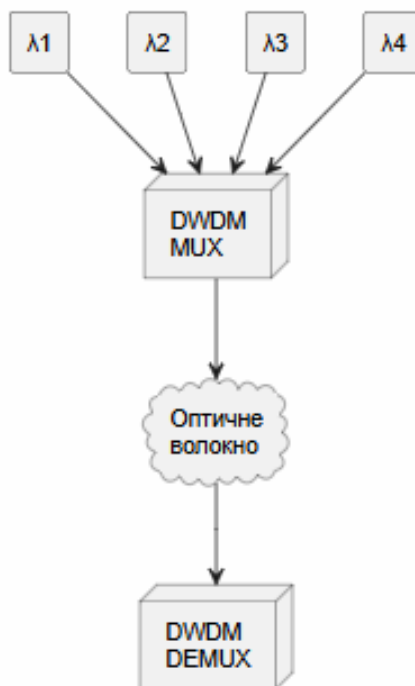


Рисунок 1.4 Принцип роботи DWDM

Технологія DWDM є критично важливою для побудови сучасних магістральних мереж операторів зв'язку та систем критичної інфраструктури. Вона дозволяє суттєво зменшити витрати на розгортання мережі та забезпечити передачу величезних обсягів даних між дата-центрами, містами та країнами.

Однак DWDM переважно виконує функцію фізичного транспортування оптичних каналів і не забезпечує достатніх механізмів моніторингу, контролю помилок та стандартизованого керування трафіком. Для вирішення цих проблем використовується технологія OTN.

OTN (Optical Transport Network) є сучасною технологією побудови транспортних оптичних мереж, яка забезпечує стандартизовану передачу даних, моніторинг каналів, контроль помилок та підтримку механізмів резервування [8].

Технологія OTN часто називається “цифровою оболонкою” для DWDM, оскільки вона забезпечує логічний рівень управління оптичними каналами.

Основними функціями OTN є:

- транспортування цифрових потоків;
- контроль помилок FEC;

- моніторинг стану мережі;
- підтримка OAM;
- резервування каналів;
- мультиплексування клієнтських сигналів;
- автоматичне відновлення після аварій.

У мережах OTN використовуються спеціальні транспортні контейнери:

- ODU (Optical Data Unit);
- OTU (Optical Transport Unit);
- OPU (Optical Payload Unit).

Кожен із цих рівнів виконує окрему функцію в процесі передачі даних:

- OPU відповідає за корисне навантаження;
- ODU забезпечує маршрутизацію та керування;
- OTU виконує передачу сигналу та контроль помилок.

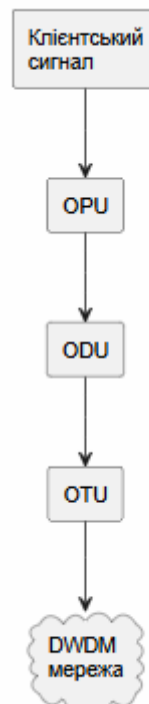


Рисунок 1.5 Структура OTN

Однією з головних переваг OTN є підтримка механізмів FEC (Forward Error Correction), які дозволяють виявляти та виправляти помилки передачі без необхідності повторного надсилання пакетів. Це особливо важливо для магістральних транспортних мереж із великою протяжністю каналів зв'язку.

Крім того, OTN підтримує високий рівень автоматизації управління мережею та дозволяє реалізувати ефективні механізми резервування транспортних каналів.

У сучасних телекомунікаційних системах технології DWDM та OTN найчастіше використовуються спільно. DWDM забезпечує фізичне мультиплексування оптичних каналів, а OTN виконує функції логічного транспортування, моніторингу та управління мережею [9].

Для кращого розуміння особливостей розглянутих технологій доцільно провести їх порівняльний аналіз (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняння сучасних технологій транспортних мереж

Технологія	Тип передачі	Основні переваги	Основні недоліки
SDH	Синхронна	Надійність, резервування	Низька ефективність для IP
MPLS-TP	Пакетна	OAM, QoS, резервування	Складність налаштування
DWDM	Оптична	Дуже висока пропускну здатність	Відсутність логічного контролю
OTN	Оптична транспортна	FEC, моніторинг, масштабованість	Висока вартість обладнання

Аналіз сучасних транспортних технологій показує, що кожна з них виконує власну функцію у транспортній інфраструктурі. SDH забезпечила основу розвитку надійних транспортних мереж, MPLS-TP дозволила ефективно передавати пакетний трафік, DWDM забезпечила надвисоку пропускну здатність оптичних каналів, а OTN створила універсальну платформу для управління сучасними транспортними мережами.

В умовах війни та постійного зростання навантаження на телекомунікаційну інфраструктуру найбільш перспективним рішенням є використання комплексної архітектури DWDM/OTN. Поєднання цих технологій дозволяє забезпечити:

- високу пропускну здатність;
- масштабованість мережі;
- резервування транспортних каналів;
- автоматичне перемикавання трафіку;
- моніторинг стану мережі;
- підтримку критичних сервісів;
- стійкість до аварій та пошкоджень.

Транспортні мережі поступово переходять від традиційних SDH-систем до високошвидкісних оптичних платформ на базі DWDM та OTN, які забезпечують необхідний рівень продуктивності, відмовостійкості та ефективності для функціонування критичної інфраструктури держави.

1.3 Принципи забезпечення відмовостійкості та резервування в оптичних транспортних мережах

Сучасні транспортні оптичні мережі є критично важливим компонентом інформаційно-комунікаційної інфраструктури держави, оскільки саме вони забезпечують передавання даних між центрами обробки інформації, державними установами, системами енергетики, оборонними об'єктами, банківськими системами та іншими елементами критичної інфраструктури. В умовах зростання кібернетичних загроз, збільшення навантаження на мережі та фізичних пошкоджень телекомунікаційної інфраструктури особливого значення набуває забезпечення високого рівня відмовостійкості та резервування транспортних мереж.

Відмовостійкість транспортної мережі визначається здатністю системи

підтримувати працездатність та забезпечувати безперервне передавання даних навіть у випадку виникнення аварійних ситуацій, виходу з ладу окремих вузлів, пошкодження оптичних каналів або перевантаження мережі. Для критичної інфраструктури відмовостійкість є одним із найважливіших параметрів, оскільки навіть короточасне порушення зв'язку може призвести до серйозних наслідків:

- втрати доступу до державних інформаційних ресурсів;
- порушення роботи енергетичних систем;
- зупинки банківських сервісів;
- втрати керування системами безпеки;
- порушення координації аварійних служб;
- втрати телеметричної інформації [10].

Особливої актуальності питання забезпечення відмовостійкості транспортних мереж набули в умовах війни в Україні, коли телекомунікаційна інфраструктура піддається як фізичним пошкодженням, так і кібератакам. У таких умовах транспортна мережа повинна забезпечувати:

- автоматичне резервування каналів;
- швидке перемикання трафіку;
- збереження працездатності мережі;
- ізоляцію аварійних ділянок;
- підтримку критичних сервісів;
- стійкість до перевантажень.

Основою забезпечення відмовостійкості є використання резервування. Резервування передбачає створення додаткових каналів передачі, дублювання мережевого обладнання або організацію альтернативних маршрутів передавання даних. Головною метою резервування є мінімізація часу простою мережі та забезпечення безперервності функціонування критичних сервісів.

У сучасних транспортних мережах застосовуються різні типи резервування:

- резервування каналів зв'язку;
- резервування транспортних вузлів;
- резервування оптичних трактів;
- резервування джерел живлення;
- резервування маршрутизації;
- резервування мережевого обладнання;
- резервування систем керування.

Одним із найбільш поширених методів забезпечення відмовостійкості є резервування каналів передачі даних. У цьому випадку між вузлами мережі створюється декілька фізичних або логічних маршрутів, які можуть використовуватись для передавання трафіку у випадку аварії основного каналу (рис. 1.6).

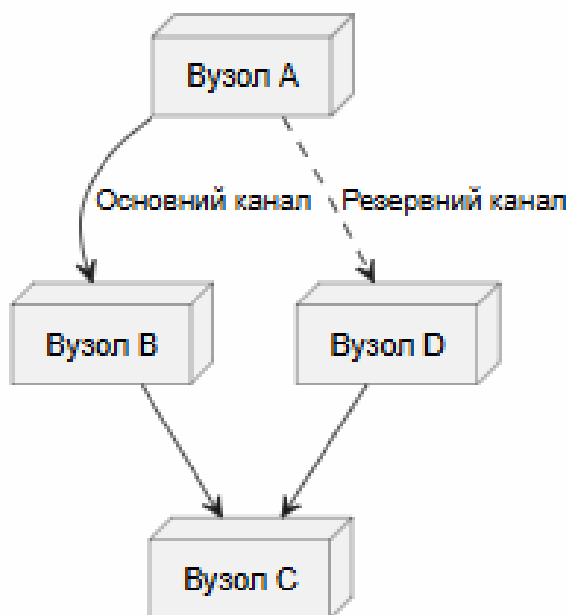


Рисунок 1.6 Принцип резервування каналів передачі даних у транспортній мережі

У представленій схемі між вузлами мережі організовано основний та резервний маршрут передавання даних. У випадку пошкодження основного каналу

трафік автоматично перенаправляється резервним маршрутом, що дозволяє уникнути втрати зв'язку між вузлами мережі.

Для забезпечення високої відмовостійкості транспортних мереж широко використовуються кільцеві топології. Кільцева архітектура дозволяє організувати двосторонню передачу трафіку між вузлами мережі та забезпечує автоматичне перенаправлення потоків даних у випадку аварії.

Основними перевагами кільцевої топології є:

- підтримка резервування;
- висока надійність;
- автоматичне перемикавання маршрутів;
- простота масштабування;
- можливість локалізації аварій.

У транспортних мережах SDH широко використовувались механізми кільцевого резервування типу SNCP та MSP. У сучасних DWDM/OTN мережах реалізуються більш складні механізми автоматичного відновлення каналів та інтелектуального керування трафіком [11].

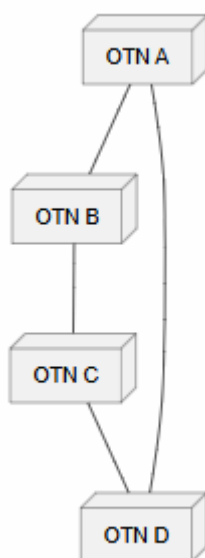


Рисунок 1.7 Приклад кільцевої топології транспортної мережі

У випадку пошкодження одного з каналів система автоматично визначає альтернативний маршрут передачі трафіку. Це дозволяє підтримувати функціонування мережі навіть після виходу з ладу окремих ділянок інфраструктури.

Важливим елементом забезпечення відмовостійкості є механізми автоматичного перемикавання трафіку. Автоматичне перемикавання дозволяє мережі самостійно перенаправляти трафік резервними маршрутами без втручання адміністратора.

У сучасних транспортних мережах використовуються такі механізми:

- APS (Automatic Protection Switching);
- FRR (Fast Reroute);
- OTN Protection Switching;
- MPLS Fast Recovery;
- GMPLS Recovery [12].

Головною перевагою автоматичного перемикавання є мінімізація часу простою системи. У більшості сучасних транспортних мереж перемикавання резервного маршруту відбувається менш ніж за 50 мс, що практично непомітно для користувачів і сервісів.



Рисунок 1.8 демонструє загальний алгоритм автоматичного перемикання трафіку

У сучасних DWDM/OTN мережах важливу роль відіграє моніторинг стану транспортної інфраструктури. Системи моніторингу дозволяють:

- контролювати стан каналів передачі;
- виявляти деградацію сигналу;
- визначати перевантаження мережі;
- аналізувати рівень помилок;
- виявляти аварійні ситуації;
- прогнозувати можливі відмови.

Для моніторингу транспортних мереж використовуються механізми OAM (Operations, Administration and Maintenance), які забезпечують централізований контроль мережевої інфраструктури та автоматичне виявлення проблем.

У технології OTN додатково використовуються механізми FEC (Forward Error Correction), які дозволяють автоматично виявляти та виправляти помилки передачі даних без повторної передачі пакетів. Це особливо важливо для магістральних каналів великої протяжності.

Географічне резервування передбачає розміщення резервних вузлів та дата-центрів у різних регіонах для мінімізації ризику одночасного пошкодження основної та резервної інфраструктури [13].

Умови воєнного часу демонструють важливість такого підходу, оскільки фізичне пошкодження телекомунікаційних вузлів може призвести до втрати зв'язку між регіонами. Географічне резервування дозволяє:

- забезпечити безперервність сервісів;
- мінімізувати ризики втрати даних;
- реалізувати аварійне відновлення;
- забезпечити живучість інфраструктури.

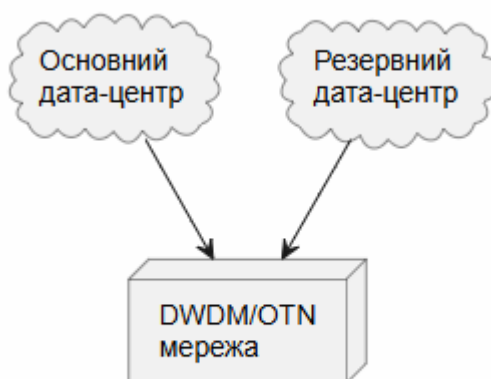


Рисунок 1.9 Принцип географічного резервування транспортної мережі

Важливим аспектом забезпечення надійності транспортних мереж є резервування обладнання. Для цього використовуються:

- дубльовані контролери;
- резервні комутатори;
- резервні блоки живлення;
- дубльовані оптичні модулі;
- резервні системи керування.

У критичних системах часто використовується схема резервування N+1 або 1+1. У схемі 1+1 резервний компонент постійно дублює роботу основного елемента, тоді як у схемі N+1 один резервний модуль може замінити декілька основних пристроїв.

Таблиця 1.3 демонструє основні методи забезпечення відмовостійкості транспортних мереж.

Метод	Призначення
Резервування каналів	Забезпечення альтернативних маршрутів
Кільцева топологія	Автоматичне перенаправлення трафіку
Географічне резервування	Захист від фізичних пошкоджень
FEC	Виправлення помилок передачі
OAM	Моніторинг та контроль мережі
APS	Автоматичне перемикання каналів
Резервування обладнання	Захист від відмов мережевих вузлів

У сучасних транспортних мережах також важливу роль відіграє інформаційна безпека. Транспортна інфраструктура повинна бути захищена не лише від фізичних пошкоджень, а й від кібератак, несанкціонованого доступу та спроб порушення роботи мережі.

Для цього використовуються:

- системи контролю доступу;
- сегментація мережі;
- шифрування каналів;
- моніторинг аномальної активності;
- системи SIEM;
- резервне копіювання конфігурацій [14].

Комплексне поєднання механізмів резервування, автоматичного перемикання, моніторингу та захисту дозволяє створити транспортну мережу з високим рівнем надійності та живучості.

Таким чином, забезпечення відмовостійкості та резервування є одним із

ключових принципів побудови сучасних транспортних оптичних мереж для критичної інфраструктури. Використання кільцевих топологій, резервних каналів, механізмів автоматичного перемикавання, географічного резервування та систем моніторингу дозволяє забезпечити безперервність передачі даних навіть в умовах аварій, перевантажень або фізичних пошкоджень інфраструктури. Особливо важливого значення такі механізми набувають в умовах воєнного часу, коли стабільність телекомунікаційної інфраструктури безпосередньо впливає на функціонування державних систем, енергетики, оборонного сектору та інших об'єктів критичної інфраструктури.

2 ПРОЄКТУВАННЯ ВІДМОВОСТІЙКОЇ АРХІТЕКТУРИ DWDM/OTN МЕРЕЖІ

У другому розділі кваліфікаційної роботи розглядаються практичні аспекти проєктування відмовостійкої транспортної мережі на основі технологій DWDM та OTN/OTH для забезпечення безперервної роботи об'єктів критичної інфраструктури. Побудова архітектури транспортної мережі, організації взаємодії її компонентів, механізмів резервування каналів передачі даних, а також системам моніторингу й автоматичного перемикання трафіку в аварійних ситуаціях.

2.1 Архітектура оптичної транспортної мережі OTN/OTH та принципи взаємодії її компонентів

У сучасних умовах цифровізації державних та корпоративних систем транспортні мережі повинні забезпечувати високу пропускну здатність, стабільність функціонування, масштабованість і підтримку механізмів відмовостійкості. Саме тому для побудови магістральних мереж критичної інфраструктури дедалі частіше використовуються технології DWDM та OTN, які дозволяють організувати високошвидкісну передачу даних із підтримкою резервування, моніторингу та автоматичного керування транспортною інфраструктурою.

Технологія OTN (Optical Transport Network) є сучасною транспортною платформою для організації передавання цифрових потоків у магістральних оптичних мережах. Основною особливістю OTN є використання багаторівневої архітектури, що дозволяє стандартизувати процес передачі інформації, забезпечити контроль стану каналів зв'язку, виявлення помилок та підтримку механізмів резервування [15].

Архітектура OTN побудована за модульним принципом та складається з декількох функціональних рівнів:

- клієнтський рівень;

- рівень корисного навантаження OPU;
- рівень цифрового контейнера ODU;
- транспортний рівень OTU;
- оптичний рівень DWDM.

Кожен із цих рівнів виконує окремі функції у процесі передавання інформації транспортною мережею.

Клієнтський рівень забезпечує підключення зовнішніх сервісів та інформаційних систем до транспортної мережі. Як клієнтські сигнали можуть використовуватись:

- Ethernet;
- IP-трафік;
- SDH;
- Fibre Channel;
- відеотрафік;
- сигнали мобільних мереж;
- трафік дата-центрів.

На наступному рівні формується контейнер OPU (Optical Payload Unit), який відповідає за інкапсуляцію клієнтського сигналу у транспортний формат OTN. OPU виконує функцію підготовки даних до передачі транспортною мережею.

Рівень ODU (Optical Data Unit) забезпечує логічне транспортування інформації, підтримує механізми маршрутизації, мультиплексування та моніторингу каналів зв'язку. Саме на цьому рівні реалізуються механізми керування транспортними потоками та резервування каналів передачі даних.

Рівень OTU (Optical Transport Unit) відповідає за фізичну передачу сигналу оптичними каналами зв'язку. На цьому рівні реалізуються механізми:

- контролю помилок;

- FEC-кодування;
- синхронізації;
- моніторингу якості сигналу;
- автоматичного відновлення після аварій.

Передавання даних між вузлами OTN виконується через DWDM-систему, яка забезпечує мультиплексування великої кількості спектральних каналів по одному волоконно-оптичному кабелю.

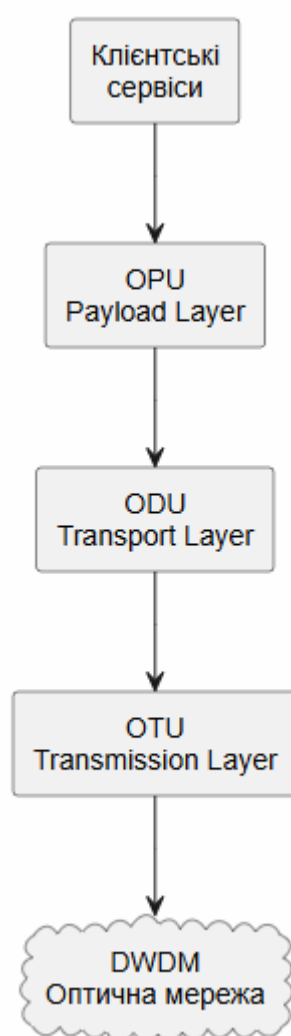


Рисунок 2.1 Загальна архітектура транспортної мережі OTN/DWDM

Представлена архітектура демонструє багаторівневу модель передачі даних у транспортній мережі. Такий підхід дозволяє реалізувати ефективне керування трафіком, контроль помилок та масштабованість мережевої інфраструктури.

Однією з ключових переваг OTN є підтримка мультиплексування клієнтських потоків. Завдяки цьому декілька незалежних сервісів можуть одночасно передаватись одним транспортним каналом. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність використання мережевої інфраструктури та зменшити витрати на побудову транспортної мережі.

У сучасних транспортних мережах OTN використовується спільно з DWDM, оскільки ці технології доповнюють одна одну. DWDM забезпечує фізичне мультиплексування оптичних каналів, а OTN виконує функції:

- логічного транспортування;
- моніторингу;
- резервування;
- контролю помилок;
- управління транспортними потоками.

Важливим елементом архітектури OTN є використання механізмів FEC (Forward Error Correction). FEC дозволяє автоматично виявляти та виправляти помилки передачі без необхідності повторної передачі даних. Це особливо важливо для магістральних каналів великої протяжності, де можуть виникати спотворення сигналу через:

- затухання;
- дисперсію;
- електромагнітні завади;
- деградацію оптичного сигналу.

Використання FEC дозволяє:

- підвищити якість передачі;
- збільшити дальність оптичних каналів;
- мінімізувати втрати пакетів;

- зменшити вплив шумів на канал зв'язку.



Рисунок 2.2 Принцип взаємодії компонентів транспортної мережі OTN

У представленій схемі клієнтський трафік передається через OTN-комутатор до DWDM-системи, де виконується мультиплексування спектральних каналів. Після передачі оптичним каналом дані демультиплексуються та передаються до кінцевого вузла мережі.

Однією з головних вимог до транспортної мережі критичної інфраструктури є підтримка механізмів резервування. Саме тому архітектура OTN повинна

забезпечувати:

- резервування каналів;
- дублювання транспортних вузлів;
- підтримку кільцевих топологій;
- автоматичне перемикавання маршрутів;
- географічне резервування дата-центрів.

Для цього у транспортних мережах широко використовуються кільцеві та mesh-топології. Кільцева топологія забезпечує простоту резервування та автоматичне перемикавання трафіку у випадку аварії, тоді як mesh-архітектура дозволяє створити велику кількість альтернативних маршрутів передачі даних.

У випадку пошкодження одного з каналів система автоматично перенаправляє трафік альтернативним маршрутом кільця. Це дозволяє мінімізувати час простою мережі та забезпечити безперервність передачі даних [16].

Особливу роль у сучасних OTN-мережах відіграють системи моніторингу та керування транспортною інфраструктурою. Для цього використовуються ОАМ-механізми, які забезпечують:

- контроль стану каналів;
- виявлення аварій;
- вимірювання затримок;
- моніторинг продуктивності;
- аналіз помилок передачі;
- централізоване керування мережею.

Система моніторингу дозволяє оператору оперативно виявляти проблеми транспортної мережі та автоматично активувати резервні маршрути передачі даних.

У сучасних OTN/DWDM мережах також активно використовуються SDN-підходи (Software Defined Networking), які дозволяють централізовано керувати транспортною мережею через програмний контролер. Використання SDN забезпечує:

- автоматизацію конфігурації мережі;
- централізоване управління;
- динамічний розподіл трафіку;
- автоматичне резервування маршрутів;
- підвищення ефективності використання каналів.

Таблиця 2.1

демонструє основні компоненти архітектури OTN та їх функції.

Компонент	Основна функція
OPU	Інкапсуляція клієнтських даних
ODU	Логічне транспортування та маршрутизація
OTU	Передача сигналу та FEC-кодування
DWDM	Мультиплексування оптичних каналів
OTN-комутатор	Керування транспортними потоками
OAM	Моніторинг та контроль мережі
SDN-контролер	Централізоване керування мережею

В умовах війни в Україні транспортна інфраструктура повинна забезпечувати високий рівень живучості та підтримку роботи критичних сервісів навіть у випадку фізичних пошкоджень мережі. Саме тому архітектура транспортної мережі повинна враховувати:

- географічне резервування;
- дублювання вузлів;
- резервні джерела живлення;
- автоматичне відновлення маршрутів;

- централізований моніторинг інфраструктури.

Таким чином, архітектура транспортної мережі OTN/DWDM забезпечує ефективне поєднання високошвидкісної передачі даних, масштабованості, моніторингу та резервування каналів зв'язку. Використання багаторівневої структури OTN дозволяє стандартизувати процес транспортування інформації, реалізувати механізми автоматичного контролю помилок та забезпечити високий рівень відмовостійкості транспортної інфраструктури. Поєднання технологій OTN та DWDM створює основу для побудови сучасних транспортних мереж критичної інфраструктури, здатних забезпечити безперервне функціонування цифрових сервісів в умовах підвищених навантажень, аварій та воєнних загроз.

2.2 Проєктування системи DWDM-мультиплексування та резервування каналів передачі

Спектральне ущільнення каналів, або WDM (Wavelength Division Multiplexing), є технологією, що забезпечує одночасну передачу кількох незалежних інформаційних потоків одним оптичним волокном за рахунок використання різних довжин хвиль оптичної несучої. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність використання волоконно-оптичної інфраструктури та збільшити сумарну пропускну здатність лінії зв'язку без прокладання додаткових волокон [18].

Ключовою перевагою WDM є формування в межах одного волокна набору оптично прозорих каналів, кожен з яких може передавати сигнали різних типів і форматів. Це означає, що в одній транспортній системі можуть паралельно передаватися синхронні, асинхронні та аналогові потоки, тоді як у системах із часовим ущільненням (TDM) зазвичай висуваються жорсткіші вимоги до уніфікації структури сигналу.

Технологія DWDM (Dense WDM) є розвитком WDM і характеризується щільнішим розміщенням каналів у спектрі (типові міжканальні інтервали – 100 ГГц, 50 ГГц і менше). Завдяки цьому DWDM-системи забезпечують значно більшу

масштабованість за кількістю каналів і загальною ємністю транспортної мережі. Застосування DWDM-компонентів у волоконно-оптичних системах передачі дає змогу:

- підвищити пропускну здатність існуючої лінійної інфраструктури;
- організувати одночасну передачу кількох оптичних каналів по спільному волокну;
- реалізувати введення/виведення окремих довжин хвиль;
- виконувати крос-комутацію оптичних каналів [19, 20].

Під час проектування ділянки мережі на базі DWDM окрему увагу слід приділяти резервуванню каналів передачі, оскільки саме воно визначає відмовостійкість транспортного сегмента. Резервування може реалізовуватися на рівні оптичного тракту (лінійний захист), на рівні окремих довжин хвиль (канальний захист) або комбіновано, що забезпечує безперервність надання послуг при пошкодженні волокна чи відмові обладнання.

Структурну схему ділянки мережі DWDM наведено на рис. 2.3.

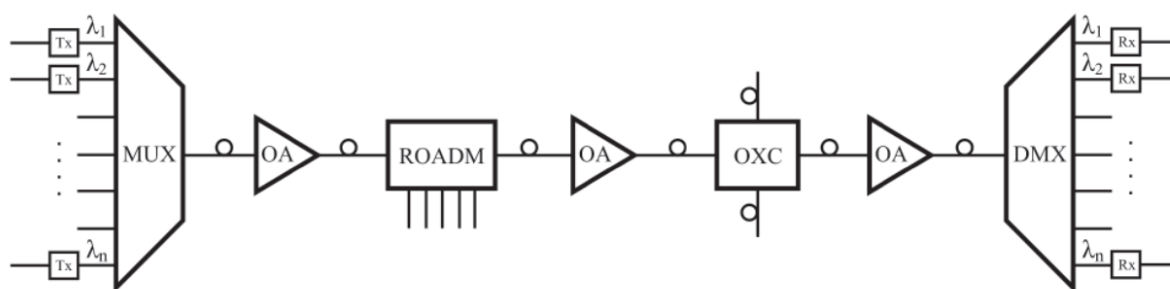


Рисунок 2.3 – Структурна схема ділянки DWDM-мережі з ROADM/OXC-вузлами та оптичними підсилювачами

Оптичний мультиплексор (MUX) об'єднує сигнали різних довжин хвиль, сформовані «кольоровими» передавачами інтерфейсів SDH, GE, 10GE і транспондерів, у єдиний багатоканальний оптичний потік, який передається спільним волокном.

Оптичний демультиплексор (DMX) виконує зворотну операцію: на приймальному боці мультиплексної секції розділяє складений оптичний сигнал на окремі каналні сигнали за довжинами хвиль.

Реконфігурований оптичний мультиплексор введення/виведення (ROADM) забезпечує програмне додавання та виділення будь-яких комбінацій спектральних каналів у вузлі мережі, що істотно підвищує гнучкість маршрутизації трафіку.

Оптичний крос-комутатор (OXC) застосовується у вузлах із високою концентрацією трафіку (зазвичай від трьох і більше напрямків) та виконує крос-комутацію оптичних каналів між різними напрямками, тобто реалізує їх оптичну маршрутизацію.

Компенсатор хроматичної дисперсії (DCM/DC) вводиться до складу лінійного тракту DWDM для зменшення дисперсійних спотворень і відновлення форми імпульсів цифрового сигналу.

Оптичні підсилювачі (OA) – вихідні (booster), лінійні (line) та попередні (pre-amplifier) – встановлюються на ділянках великої довжини для компенсації загасання у волокні та втрат у пасивних елементах DWDM-тракту.

Оптичні компоненти DWDM працюють на стандартизованій частотній сітці відповідно до рекомендації ITU-T G.694.1, що забезпечує сумісність обладнання різних виробників і спрощує масштабування мережі.

Технологія DWDM є базовою для магістральних і внутрішньозонових мереж, де необхідно передавати значні обсяги даних на великі відстані із застосуванням оптичного підсилення.

До основних переваг DWDM належать [21]:

- висока сумарна пропускна здатність (до 3,2 Тбіт/с і вище залежно від конфігурації);
- технологічна незалежність каналів (можливість передавання різних сервісів у різних λ -каналах);
- одночасне підсилення групи каналів одним оптичним підсилювачем.

Разом із тим DWDM має і низку обмежень:

- міжканальні нелінійні завади та підвищені вимоги до керування оптичною потужністю передавачів;
- не завжди ефективне використання спектрального ресурсу за нерівномірного завантаження каналів;
- складність централізованого моніторингу без впровадження розвиненої системи керування мережею;
- необхідність окремого проєктування резервування та механізмів автоматичного захисного перемикання (APS);
- ускладнена оперативна локалізація аварій без чіткого секціонування траси та засобів оптичного контролю якості в реальному часі.

2.3 Організація моніторингу, керування та автоматичного перемикання трафіку в аварійних ситуаціях

Для забезпечення надійної передачі в OTN-мережах у контейнері ODUk використовується розвинений службовий overhead для моніторингу тракту, контролю якості та підтримки захисного перемикання. Заголовок моніторингу тракту РМ (Path Monitoring) ODUk розміщується в рядку 3, стовпцях 10-12 і має обсяг 3 байти. Додатково для РМ/ТСМ застосовується службовий біт 7 байта в рядку 2, стовпці 3.

Заголовок РМ містить, зокрема, такі елементи.

1. ТТІ (Trail Trace Identifier) - однобайтовий ідентифікатор, що використовується в циклі ТТІ обсягом 64 байти.

Положення ТТІ-циклів синхронізоване з циклікою ODUk/OTUk, завдяки чому формується надцикл із 256 циклів ODUk/OTUk. Отже, в одному надциклі передаються: $256 / 64 = 4$ цикли ТТІ по 64 байти кожен.

2. Структура ТТІ-циклу:

- перші 16 байтів - SAPI (Source Access Point Identifier), ідентифікатор точки доступу джерела;
- наступні 16 байтів - DAPI (Destination Access Point Identifier), ідентифікатор точки доступу призначення.

Байти SAPI[0] і DAPI[0] завжди мають нульове значення, а решта 15 байтів містять власне ідентифікатор точки доступу (див. таблицю 2.4).

Ідентифікатор точки доступу складається з 15 символів (байтів): 3 символи міжнародного сегмента та 12 символів національного сегмента. Кодування виконується у 7-бітному форматі відповідно до ITU-T T.50 [22, 23].

Міжнародний сегмент містить трибуквений код країни за ISO 3166 (наприклад, UKR, USA, FRA).

Національний сегмент складається з:

- ICC (ITU Carrier Code) оператора зв'язку за ITU-T M.1400;
- UAPC (Unique Access Point Code) - унікального коду точки доступу.

Таке структурування РМ/ТТІ дає змогу однозначно ідентифікувати кінці тракту, виявляти помилки маршрутизації та забезпечувати коректну роботу систем моніторингу, керування й автоматичного захисного перемикавання трафіку під час аварій.

Таблиця 2.2

Структура ідентифікатора точки доступу (SAPI/DAPI) в ODUk TTI

Номер байта SAPI/DAPI														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Міжнародний сегмент			Національний сегмент											
CC			ICC	UAPC										
CC			ICC			UAPC								
CC			ICC				UAPC							
CC			ICC						UAPC					
CC			ICC							UAPC				
CC			ICC								UAPC			

2. BIP-8 (Bit Interleaved Parity) - механізм контролю парності з перемежуванням, що застосовується для оцінювання якості передавання сигналу OPUk у межах корисного навантаження ODUk. Принцип обчислення контрольної суми BIP-8 загалом відповідає підходу, який використовується в SDH. Водночас для ODUk характерна особливість часової прив'язки: контрольне слово, сформоване в циклі i , передається із затримкою в циклі $(i + 2)$ (див. рисунок 2.4).

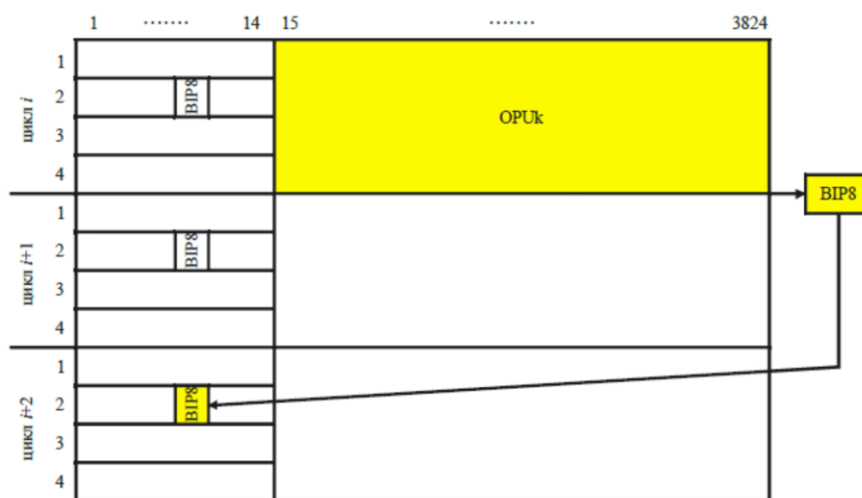


Рисунок 2.4 – Передавання контрольного слова BIP-8 у заголовку ODUk

3. BDI (Backward Defect Indication) - однобітове поле індикації дефекту у зворотному напрямку, призначене для передавання аварійного статусу, сформованого на приймальному кінці тракту. За наявності аварії встановлюється

4. $BDI = 1$, за нормального стану - $BDI = 0$. BEI (Backward Error Indication) - поле зворотної індикації помилок, яке передає у вихідному напрямку інформацію про кількість помилок, виявлених механізмом

5. BIP-8. Поле BEI може приймати значення в діапазоні 0...8. STAT (Status bits) - біти стану, що відображають наявність сигналів технічного обслуговування та експлуатаційного стану тракту (див. таблицю 2.3) [23, 24].

Таблиця 2.3

Інтерпретація бітів статусу STAT для ODUk

Біти 6-8 байта №3 поля РМ	Статус
000	Зарезервовано для стандартизації в майбутньому
001	Сигнал тракту в нормальному режимі
010-100	Зарезервовано для стандартизації в майбутньому
101	Сигнал обслуговування: ODUK-LCK
110	Сигнал обслуговування: ODUK-OCI
111	Сигнал обслуговування: ODUK-AIS

У складі службового поля РМ/TCM передбачено біт DMP, призначений для визначення затримки поширення сигналу в тракті ODUk. Принцип роботи базується на зміні його логічного стану: у звичайному режимі біт має фіксоване значення, а в момент старту вимірювання примусово інвертується.

Саме фронт цієї зміни ($0 \rightarrow 1$ або $1 \rightarrow 0$) використовується як часовий маркер початку вимірювальної процедури. Після перемикання біт зберігає новий стан протягом усього інтервалу спостереження і не змінюється до запуску наступного циклу тесту. Такий підхід дає змогу однозначно визначити точку відліку та коректно оцінити затримку в оптичному тракті.



Рисунок 2.5 – Ілюстрація принципу вимірювання затримки в тракті ODUk за сигналом DMP

Передавальний модуль мережного елемента 1 у момент t_1 змінює логічний стан біта DMP. На віддалений кінець тракту (вхід приймача мережного елемента 2)

цей перехід надходить у момент t_2 , після чого сигнал повертається через організований шлейф каналу DMr. Повернений інверсний стан фіксується приймачем мережного елемента 1 у момент t_3 .

Важливо враховувати, що для мереж OTN одностороння затримка, як правило, не визначається як половина двосторонньої: $t_2 - t_1 \neq t_3 - t_2$.

Це пов'язано з тим, що маршрути формуються за симплексною логікою і прямий та зворотний шляхи можуть бути несиметричними.

На відміну від класичного підходу SDH, де контроль здійснювався для віртуального контейнера та його секцій, у мережах OTN маршрут часто охоплює інфраструктуру кількох операторів і навіть різних країн. Тому наскрізний тракт ODUk практично реалізується як каскад секцій із різною адміністративною належністю.

У наведеному прикладі оператор А має два ізольовані фрагменти мережі, а для їх об'єднання використовує транзитні ресурси оператора Б. Саме в таких сценаріях особливо важливі поля PM і TCM, які дозволяють виконати логічне секціонування траси та контролювати якість на різних рівнях відповідальності.

Засобами заголовків TCM в OTN підтримується до шести рівнів тандемного моніторингу.

Це дає змогу одночасно розмежувати функції клієнта й операторів:

- TCM1 – контроль QoS з боку клієнта;
- TCM2 – контроль наскрізної якості на ділянці оператора А;
- TCM3 – моніторинг якості в межах окремого операторського сегмента;
- TCM4 – супровід процедур захисного перемикавання в мережі оператора А.

Водночас регламент міжоператорного адміністрування рівнів TCM уніфікований не повністю: технічна можливість реалізації є, але детальні правила взаємодії здебільшого визначаються домовленостями між операторами [25].

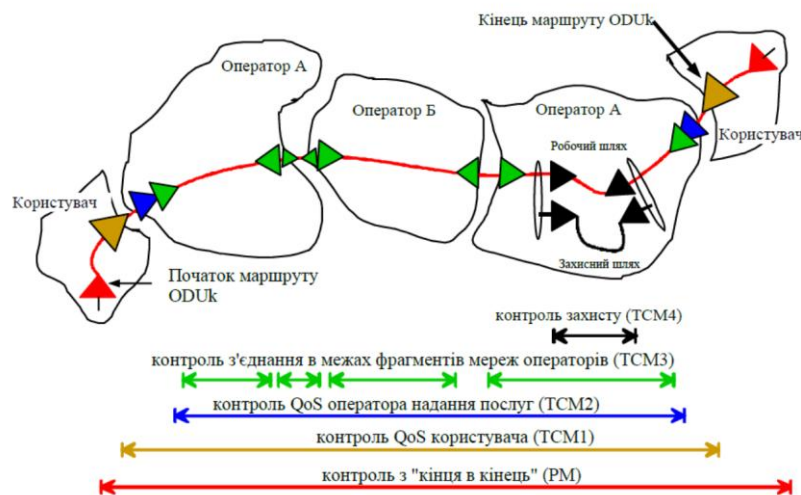


Рисунок 2.6 – Використання полів РМ і ТСМ для секціонування ODUk в багатоператорській мережі

Поля ТСМ також забезпечують моніторинг з'єднань ODUk у низці типових мережних сценаріях (відповідно до ITU-T G.805 та ITU-T G.872), зокрема для:

- з'єднань UNI-UNI – наскрізного контролю через транспортну мережу загального користування від точки входу до точки виходу;
- з'єднань NNI-NNI – контролю ODUk-тракту в межах мережі оператора між міжмережними інтерфейсами;
- моніторингу підрівня для схем лінійного захисту 1+1, 1:1, 1:n з метою виявлення відмов сигналу або погіршення його параметрів;
- моніторингу підрівня ODU під час реалізації захисного перемикавання SPRing, а також для фіксації пошкоджень і деградації якості;
- моніторингу тандемного з'єднання оптичного каналу з локалізацією місця погіршення/втрати сигналу та ініціюванням автоматичного відновлення з'єднання в аварійних режимах.

У межах одного маршруту ODUk кількість контрольованих ТСМ-з'єднань може становити від 0 до 6. За логікою побудови вони поділяються на три типи: перекриті, каскадні та вкладені. Для прикладу, з'єднання A1-A2/B1-B2/C1-C2 і A1-A2/B3-B4 належать до вкладених, тоді як B1-B2/B3-B4 є каскадними.

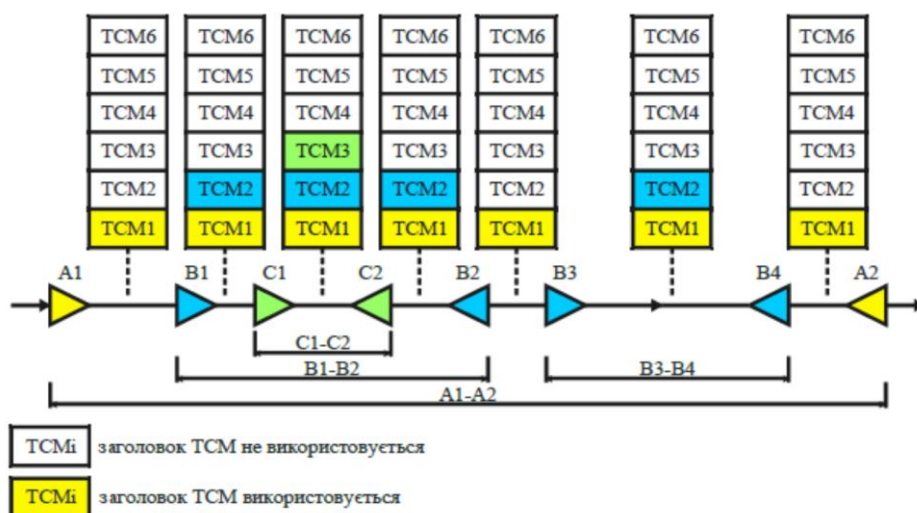


Рисунок 2.7 – Приклад моніторингу вкладених і каскадних TCM-з'єднань уздовж маршруту ODUk

Приклад реалізації моніторингу для перекритих з'єднань B1-B2 та C1-C2 наведено на рисунку 2.8.

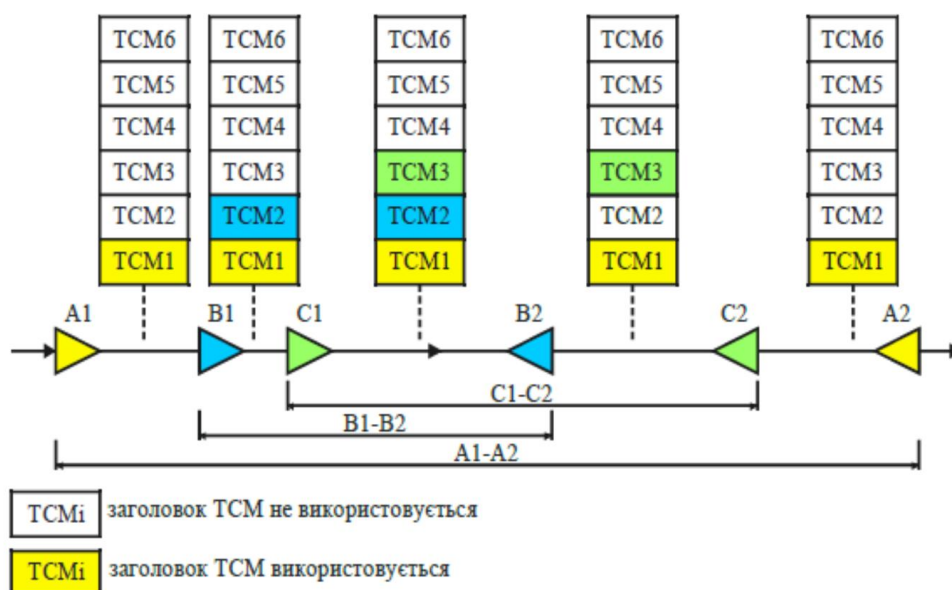


Рисунок 2.8 – Приклад з'єднань, що перекриваються

Оптичний службовий канал OSC (Optical Supervisory Channel) використовується для передавання службової інформації, яка в архітектурі OTN належить до рівнів нижче OTU. Відповідно до ITU-T G.709, через OSC транспортуються заголовки OTS-O, OMS-O, OCh-O та OTSiG-O.

Водночас на практиці для цих структур не встановлено повністю уніфікованих параметрів на рівні ITU (детальної побітової організації, фіксованої швидкості та єдиного формату передавання). Тому конкретна реалізація OSC часто визначається виробником обладнання та узгоджується під вимоги мережі оператора.

У каналі OSC можуть передаватися такі категорії даних:

- службові повідомлення загального керування зв'язком COMMS (General Management Communications);
- експлуатаційна інформація, зокрема голосові службові канали, сигналізація, а також передавання/оновлення програмного забезпечення;
- повідомлення синхронізації OSMC (OTN Synchronisation Message Channel), включно з SSM і даними PTP (Precision Time Protocol);
- службові заголовки рівнів OTS-O, OMS-O, OCh-O, OTSiG-O.

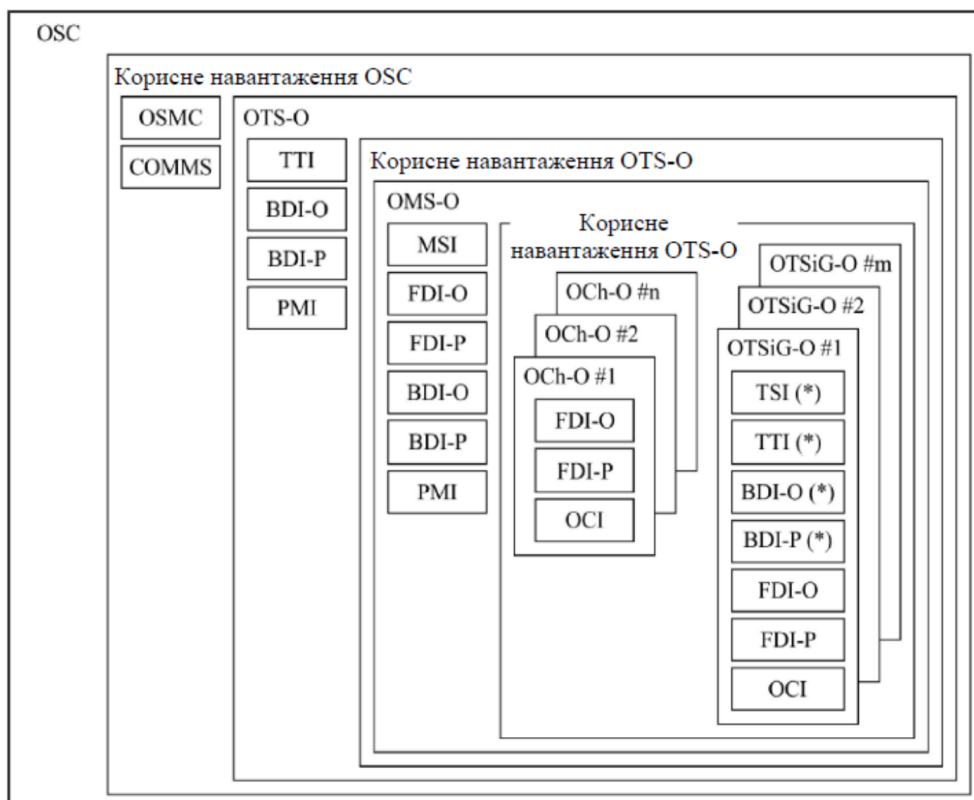


Рисунок 2.9 - Узагальнена структура службової інформації в оптичному каналі керування OSC

Заголовок OTS-O переносить службову (неасоційовану) інформацію, що супроводжує корисне навантаження OTS-P. Його призначенням є підтримка експлуатації та технічного обслуговування оптичної секції передавання OTS. Точки термінації OTS-O розміщуються в місцях введення/виведення сигналу OTS-P.

До складу OTS-O входять:

- ідентифікатор траси OTS-TTI;
- індикація дефекту зворотного напрямку OTS-BDI-P і OTS-BDI-O;
- індикатор відсутності корисного навантаження OTS-PMI (Payload Missing Indication), який підтверджує, що payload не було введено, і тим самим запобігає хибному формуванню тривоги про втрату сигналу.

Заголовок OMS-O також містить неасоційовані службові дані, що супроводжують OMS-P, та забезпечує інформаційну підтримку роботи оптичної мультиплексної секції OMS. Формування OMS-O виконується у вузлах введення/виведення сигналу OMS-P.

Основні елементи OMS-O:

- OMS-FDI-P;
- OMS-FDI-O;
- OMS-BDI-P;
- OMS-BDI-O;
- OMS-PMI;
- OMS-MSI.

Сигнал FDI (Forward Defect Indication) використовується для контролю стану рівня OMS і передавання ознаки пошкодження у прямому напрямку. Це дозволяє уникати каскадного виникнення аварійних повідомлень на суміжних рівнях у випадках, коли деградація вже виникла на серверному рівні та вплинула на приймання клієнтського payload.

Поле BDI (Backward Defect Indication) передається у зворотному напрямку та повідомляє про проблеми з прийманням OMS-P, виявлені на стороні завершення тракту.

Параметр MSI (Multiplex Structure Identifier) застосовується для опису структури мультимплексування: у передавальному напрямку він кодує формат OCh-P/OTSiG і відповідні частотні слоти OMS-P. На приймальній стороні цей параметр використовується для виявлення невідповідності структури сигналу між передавачем і приймачем.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Вибір та характеристика обладнання DWDM/OTN для побудови транспортної мережі

Під час вибору обладнання DWDM/OTN ключовою вимогою є підтримка багаторівневої транспортної моделі OTN з можливістю масштабування пропускної здатності, резервування та централізованого керування. Практична цінність такої архітектури полягає в тому, що в одному мережевому рішенні поєднуються функції передавання, мультиплексування, оптичної комутації, моніторингу та захисту сервісів. Саме тому для сучасних магістральних і регіональних сегментів доцільно застосовувати модульні платформи, у яких апаратна частина тісно інтегрована з програмними механізмами керування трактами OTS/OMS/OCh/OTUk/ODUk [26, 27].

Функціональна побудова такого обладнання базується на наборі процесів, що забезпечують стійку роботу транспортного каналу: скремблювання даних, циклова та надциклова синхронізація, контроль якості сигналу, FEC-корекція, визначення структури навантаження, обробка аварійних станів і формування оптичного сигналу на лінійному інтерфейсі. У реальних вузлах ці задачі реалізуються комбінацією оптичних модулів, високошвидкісних інтерфейсних плат і програмованої логіки, що дає змогу гнучко налаштовувати мережу під різні профілі трафіку та вимоги SLA.

З технічної точки зору доцільно обирати обладнання, яке підтримує не лише базову передачу DWDM-каналів, а й розвинені OTN-функції: адаптацію клієнтських сигналів у OTUk/ODUk, крос-комутацію OCh, онлайн-моніторинг параметрів оптичного тракту, а також сценарії захисного перемикавання. Додатковою перевагою є наявність розвиненого каналу службового керування (OSC), підтримка синхронізації мережі та інтеграція з NMS/SDN-рівнем. Такий

підхід формує основу для побудови керованої, відмовостійкої та масштабованої транспортної мережі.

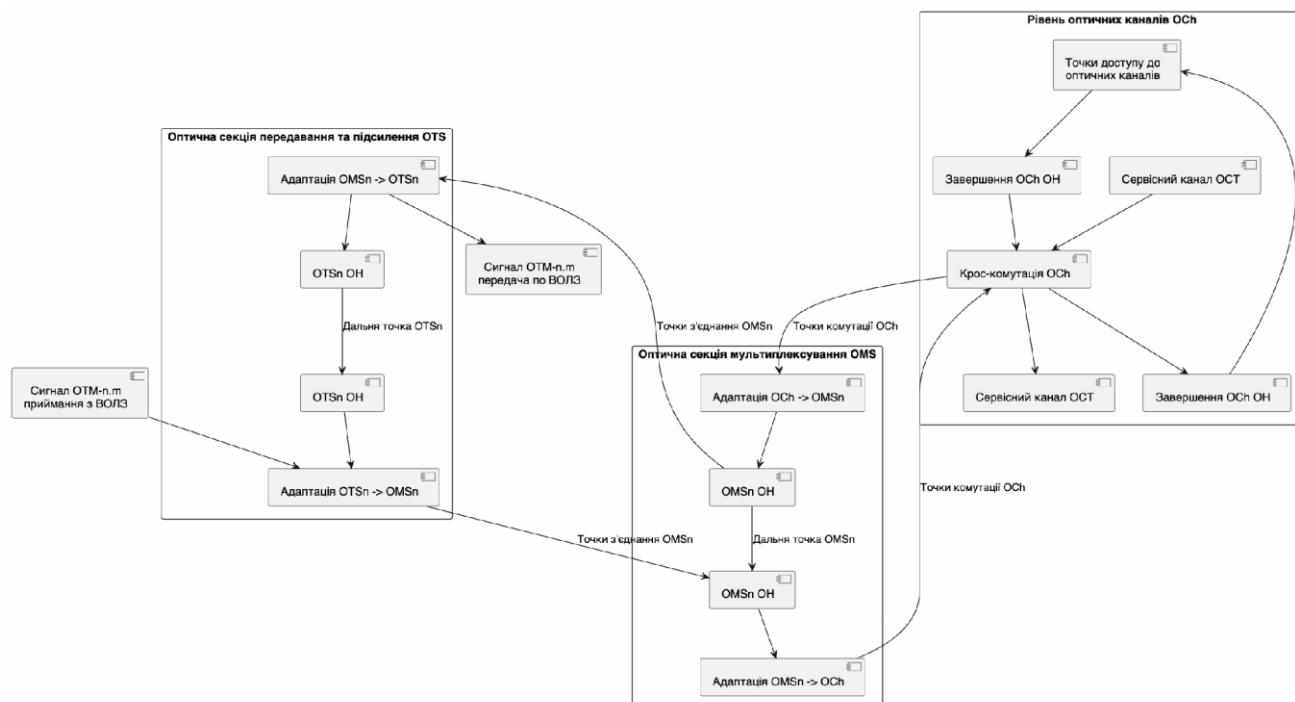


Рисунок 3.1 - Загальна функціональна архітектура апаратури OTN

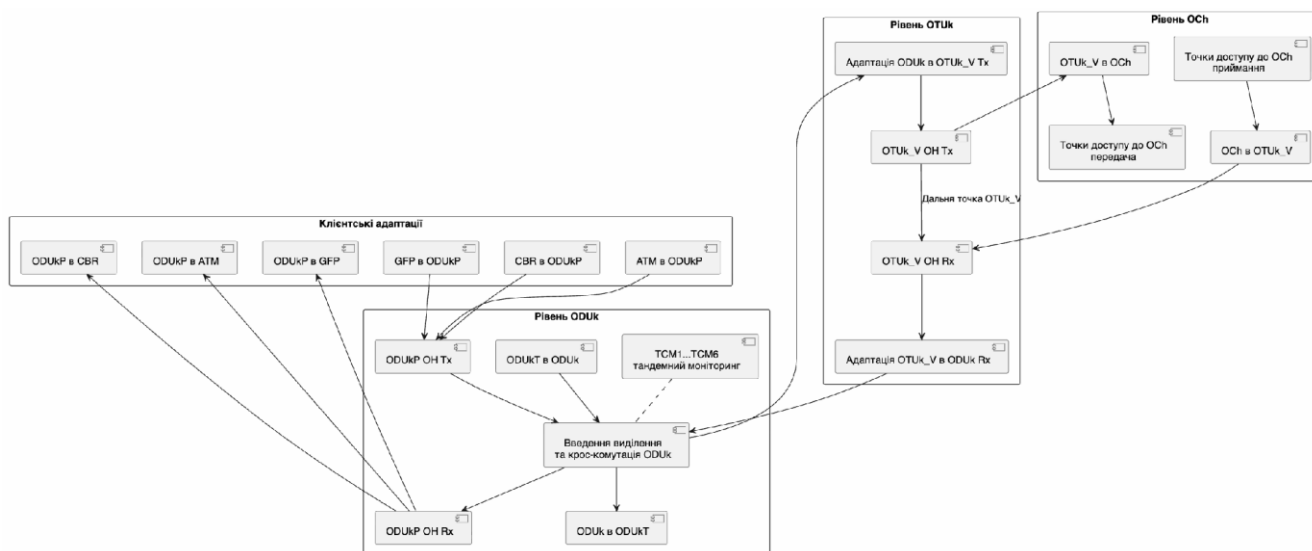


Рисунок 3.2 - Загальна функціональна архітектура рівня оптичного каналу OCh апаратури OTN

3.2 Функціональні можливості обладнання рівня оптичної секції передавання

До рівня OTS належать дві базові групи функцій: формування секції передавання шляхом додавання службового заголовка OTSn OH, а також функції адаптації, що забезпечують узгодження даних секції мультиплексування в точці доступу OTSn AP із параметрами секції передавання OTSn (див. рисунок 3.3) [27].

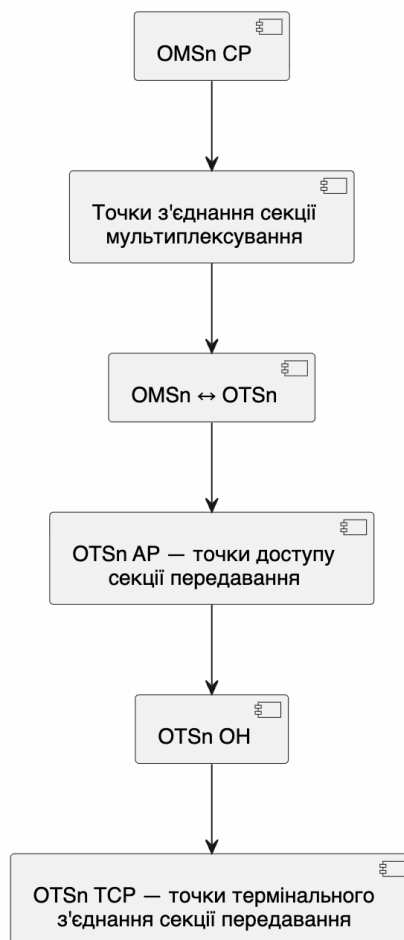


Рисунок 3.3 - Функції обладнання рівня оптичної секції передавання (OTS)

На рівні OTS виконується об'єднання та подальше розділення трафікових оптичних сигналів із службовим оптичним каналом OSC (Optical Supervisory Channel). Через OSC передаються службові повідомлення для рівнів OTS, OMS і OCh (див. рисунок 3.4). У результаті сумісної передачі трафіку та OSC формується оптичний транспортний модуль OTM (OTM_{n,m}), який виступає модулем лінійного передавання. Службова інформація, що передається в OSC для супроводу OTS/OMS/OCh, утворює заголовкову частину OTM, тобто OOS (OTH Overhead Signal).

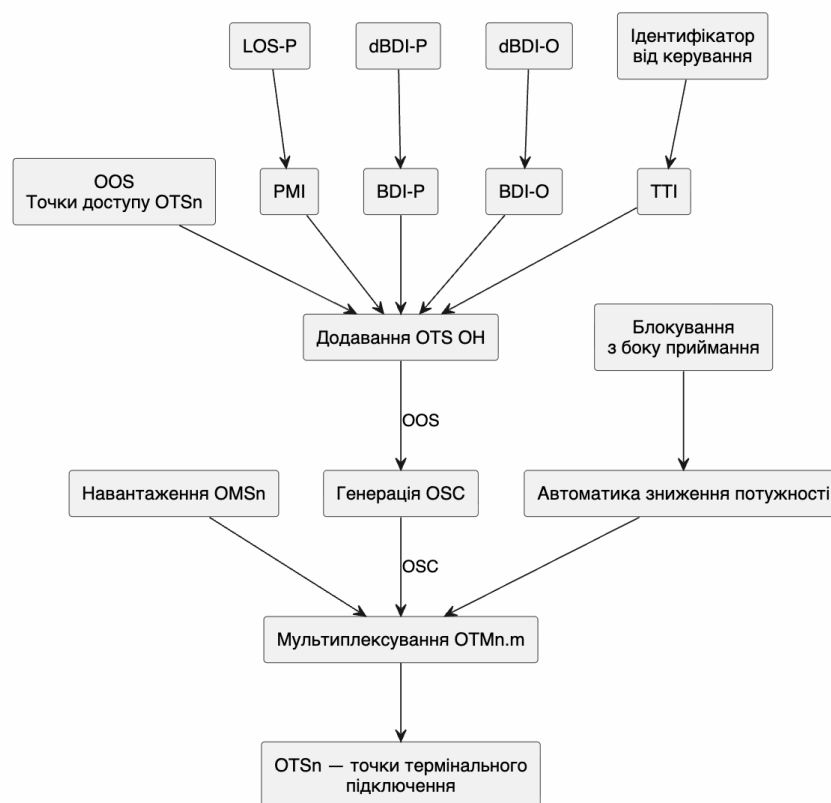


Рисунок 3.4 – Процес формування оптичного транспортного модуля OTMn.m на рівні OTS

У процесі формування OTMn.m до багатоканального (багатохвильового) оптичного сигналу навантаження додається службовий канал OSC, у якому вже сформовано поля заголовків OTS, OMS, OCh та інших службових даних. На етапі зворотної обробки (розпакування OTSn) виконується розділення трафікового сигналу і каналу OSC. Із заголовка OOS виділяється OTS OH, інформація якого використовується для ідентифікації TTI, кореляції дефектних станів, процедур керування та формування сигналів наслідків аварій (зокрема TSF-P, TSF-O та ін.).

Сигнали TSF-P (Trail Signal Fail-Payload) і TSF-O (Trail Signal Fail-Overhead) відображають пошкодження відповідно корисного навантаження або службової частини тракту секції передавання. Додатково при пошкодженні волоконно-оптичної лінії можуть виникати індикації dLOS-O та dLOS-P, які запускають механізм зниження потужності передавання. Така реакція є критично важливою з погляду техніки безпеки під час експлуатації аварійних ВОЛЗ. Робота всіх OTS-процесів виконується під контролем системи керування, яка реєструє стани,

аналізує відхилення та формує команди коригувального впливу.

Між точками доступу секції передавання OTSn AP і точками з'єднання секції мультиплексування OMSn CP реалізується адаптація багатоканального оптичного сигналу. Саме ці процедури визначають узгодження параметрів між рівнями OTS і OMS та забезпечують коректну взаємодію секцій (див. рисунок 3.5) [27, 28].

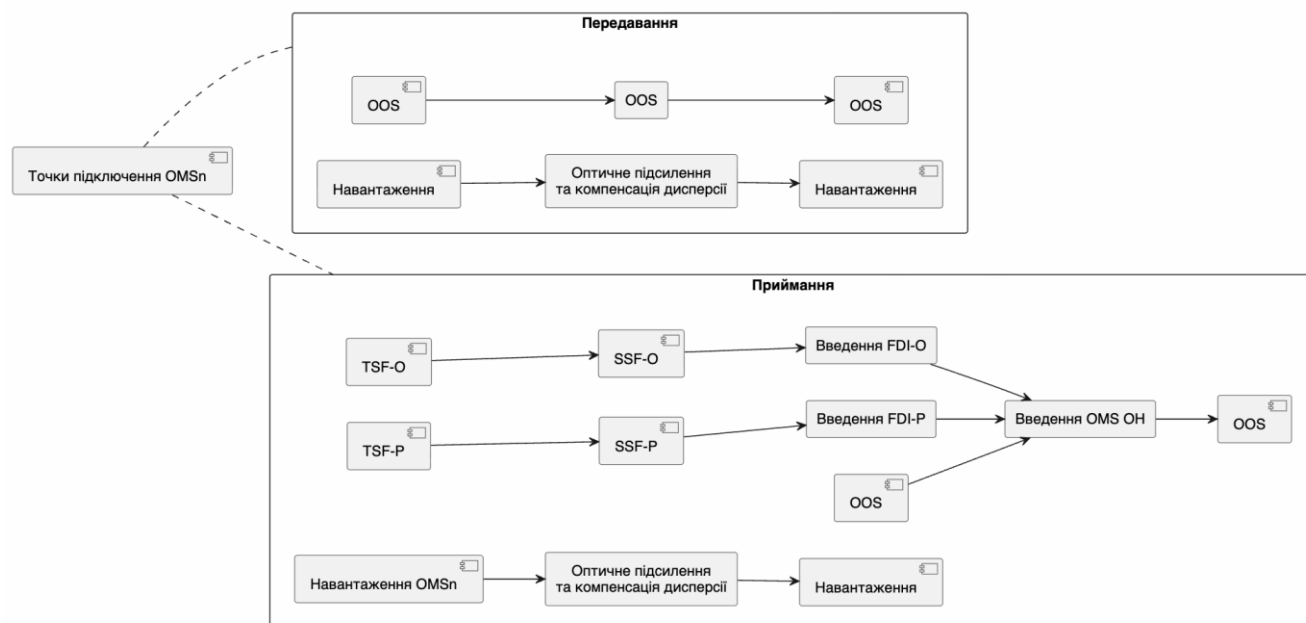


Рисунок 3.5 – Процеси адаптації OTSn ↔ OMSn у точках підключення OMSn

У процесах адаптації OTSn ↔ OMSn можуть реалізовуватися такі функції: оптичне підсилення багатохвильового сигналу з компенсацією дисперсійних спотворень, керування блокуванням передавання корисного навантаження, а також формування повідомлень FDI-O і FDI-P на основі сигналів TSF-P та TSF-O.

3.3 Оцінювання ефективності, масштабованості та перспектив розвитку транспортної мережі

Оцінювання транспортної мережі DWDM/OTN доцільно виконувати як

комплексний аналіз трьох взаємопов'язаних складових:

1. ефективність використання ресурсу (ємність, спектр, порти, енергоспоживання);
2. масштабованість архітектури (швидкісний ріст, кількість каналів/сервісів, гнучкість комутації);
3. перспективність розвитку (готовність до автоматизації, SDN/TSDN, подальшого переходу до вищих швидкостей).

За матеріалами твого PDF (розділ 3: функції OTS/OMS/OCh, OTUk/ODUk, керування, FPGA-реалізація, приклад OSN 8800) найбільш стійкою є багаторівнева модель, у якій розділено функції транспорту, моніторингу та комутації. Це дозволяє окремо оптимізувати лінійний тракт, сервісну адаптацію і процедури відновлення [29].

Критерії оцінювання ефективності

Для практичної оцінки пропонується використовувати такі KPI:

- Коефіцієнт використання спектра

$$K_{spec} = \frac{N_{active}}{N_{total}} \quad (3.1)$$

де N_{active} – кількість задіяних λ -каналів, N_{total} – доступна кількість каналів у частотному плані.

- Транспортна ефективність вузла

$$K_{node} = \frac{C_{client}}{C_{line}} \quad (3.2)$$

де C_{client} – сумарна швидкість клієнтських сервісів, C_{line} – лінійна ємність DWDM-секції.

- Доступність сервісу (Availability)

$$A = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{down}} \quad (3.3)$$

Операційна стійкість: частота аварійних подій LOS/LOF/TSF, середній час локалізації дефекту, середній час відновлення (MTTR).

З урахуванням OTN-overhead (PM/TCM, BIP-8, BDI/BEI, TTI, OSC) мережа отримує додаткове службове навантаження, але саме воно дає контроль якості й швидке відновлення, тому в операторській практиці це виправданий компроміс [29, 30].

Аналіз ефективності архітектури OTS/OMS/OCh/ODUk

На рівні OTS/OMS досягається ефективна передача багатохвильового сигналу з оптичним підсиленням і компенсацією дисперсії. На рівні OCh/ODUk ефективність визначається якістю адаптації клієнтських потоків та логікою крос-комутації.

Ключові висновки:

- Використання DWDM з OTN-обгорткою дає високу щільність трафіку на одне волокно.
- Розділення рівнів OTS/OMS/OCh спрощує експлуатацію: аварії локалізуються швидше, ніж у “плоскій” архітектурі.
- Механізми PM/TCM дозволяють контролювати QoS наскрізно та на тандемних ділянках (важливо для багатодомених маршрутів).
- OSC-канал підвищує керованість, оскільки забезпечує службову сигналізацію, синхронізацію і телеметрію.

Оцінювання масштабованості

Масштабованість мережі оцінюється по трьох напрямках:

- Швидкісна масштабованість: перехід 10G/40G/100G і вище без повної заміни транспортної архітектури.
- Топологічна масштабованість: додавання нових вузлів/напрямків через ROADM/OXC з мінімальною перебудовою існуючих сервісів.

- Функціональна масштабованість: розширення мережеских функцій (моніторинг, автоматичне перемикавання, SDN-керування) без зупинки сервісу.

У контексті розділу 3 твого PDF перспективним є застосування програмованої логіки (FPGA/гнучкі платформи), що дозволяє адаптувати мережескі функції під нові профілі трафіку і нові формати інтерфейсів без повного апаратного редизайну.

Відмовостійкість і резервування як фактор ефективності

Ефективність транспортної мережі не зводиться лише до “біт/с”. Для оператора критичні:

- час виявлення деградації;
- швидкість APS/захисного перемикавання;
- збереження SLA після перемикавання;
- стабільність роботи системи керування під час аварії.

Схема 1+1 має максимальну швидкодію відновлення, 1:1 – кращу ресурсну ефективність, кільцеві механізми – вищу живучість у багатовузлових топологіях. Отже, оптимальний вибір залежить від класу сервісу й цільового SLA.

Перспективи розвитку мережі

На основі функціональних можливостей, описаних у PDF (управління OTN, телеметрія, сучасна елементна база, OSN-платформи), перспективні напрямки такі:

- перехід до інтелектуального керування (SDN/TSDN);
- впровадження прогностичного обслуговування за телеметрією BER/OSNR/потужності;
- ширше використання автоматизованих сценаріїв відновлення;
- подальше ущільнення каналів і перехід до вищих швидкостей із гнучкою спектральною політикою.

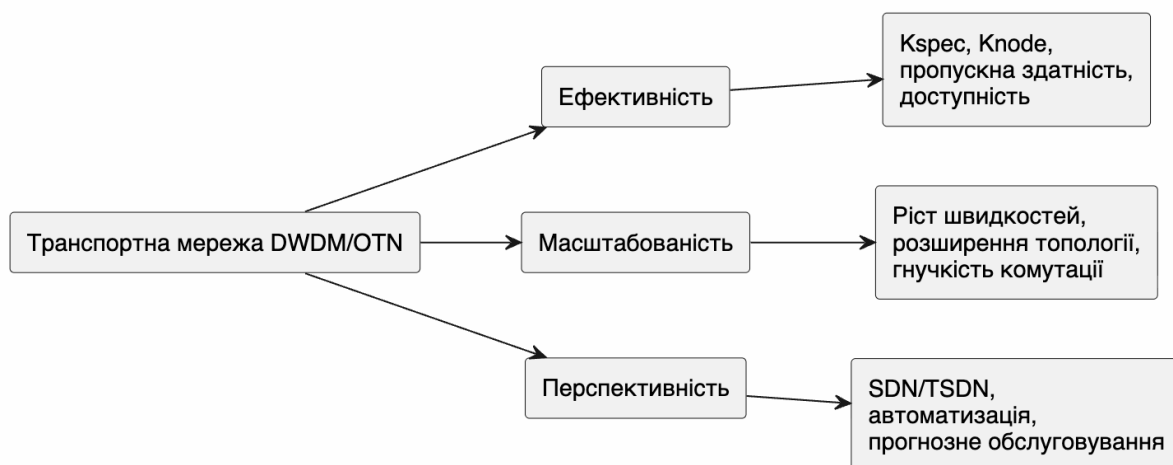


Рисунок 3.9 – Модель комплексного оцінювання DWDM/OTN

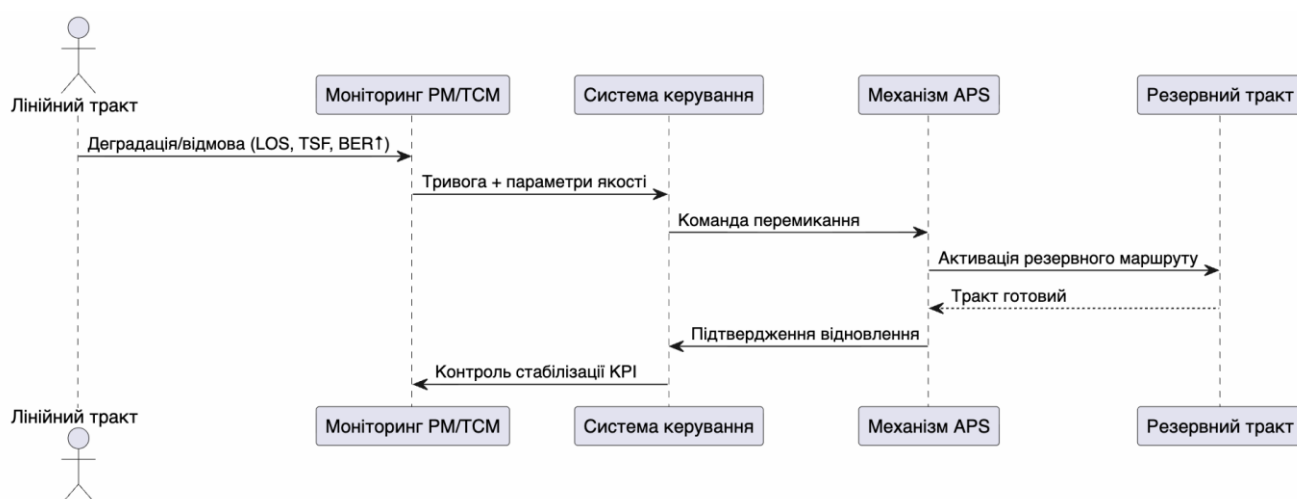


Рисунок 3.10 – Сценарій аварії та автоматичного відновлення

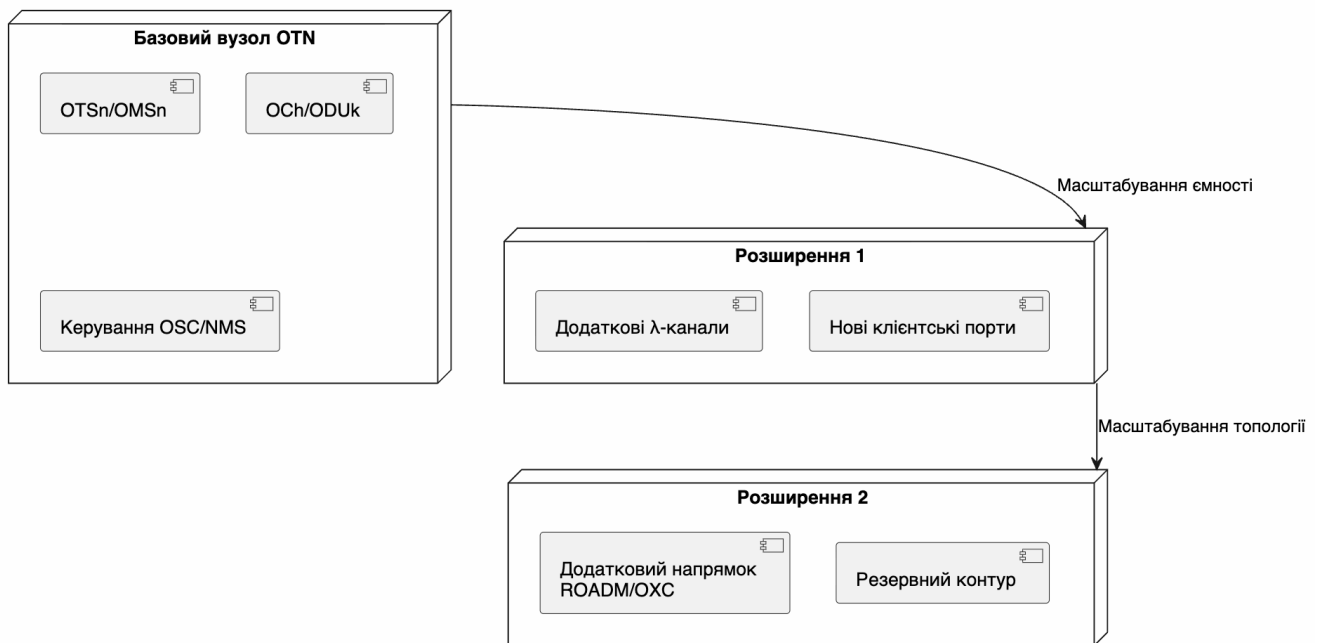


Рисунок 3.11 – Масштабування мережі за модульним принципом

Приклад фрагмента логіки (псевдокод) для керування перемиканням

if (LOS or TSF_P or TSF_O or BER > THRESHOLD) then

raise_alarm()

if reserve_path_available then

execute_APS_switch()

verify(OSNR, BER, latency)

if KPIs_normal then

commit_route()

else

rollback_and_escalate()

end if

else

start_degradation_mode()

end if

end if

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні підходи до побудови оптичних транспортних мереж на основі технологій DWDM/OTN, їх місце в телекомунікаційній інфраструктурі та роль у забезпеченні високошвидкісного передавання даних. Виокремлено ключові етапи еволюції транспортних мереж і показано, що перехід до багаторівневої оптичної архітектури є закономірною відповіддю на зростання обсягів трафіку, підвищення вимог до надійності та необхідність гнучкого керування ресурсами.

У роботі проаналізовано функціональну структуру OTN/OTH, принципи мультиплексування та адаптації сигналів на рівнях OTS, OMS, OCh, OTUk і ODUk. Розглянуто призначення службових заголовків і механізмів моніторингу, зокрема PM/TCM, TTI, BIP-8, BDI/BEI, а також роль службового каналу OSC у передачі інформації керування, синхронізації та експлуатаційного супроводу. Виокремлено, що саме поєднання транспортних і сервісних функцій у єдиній системі забезпечує контроль стану мережі в реальному часі.

Розроблено узагальнену модель функціонування ділянки DWDM/OTN із урахуванням процесів формування оптичного транспортного модуля, секціонування траси та міжрівневої адаптації сигналів. Розроблено структурні схеми, що відображають взаємодію основних вузлів мережі, порядок обробки корисного навантаження і службової інформації, а також логіку організації точок доступу та точок з'єднання в межах транспортного тракту.

У роботі проаналізовано сценарії деградації та відмов, а також механізми резервування й автоматичного захисного перемикавання трафіку. Виокремлено практичну доцільність застосування схем 1+1, 1:1 і кільцевого захисту залежно від вимог до доступності сервісу, вартості ресурсу й умов експлуатації. Показано, що використання засобів раннього виявлення дефектів і централізованого керування дозволяє скорочувати час локалізації пошкоджень і підвищувати стійкість мережі до аварійних впливів.

Розроблено підхід до оцінювання ефективності та масштабованості

транспортної мережі за сукупністю технічних критеріїв: використання спектрального ресурсу, пропускної здатності, керованості, відмовостійкості та готовності до подальшої модернізації. Проаналізовано перспективи розвитку таких рішень у напрямі автоматизації, програмно-керованої взаємодії та інтеграції з інтелектуальними системами експлуатації.

Отже, досягнуто поставленої мети роботи: розглянуто теоретичні засади, проаналізовано принципи функціонування, розроблено структурно-функціональні рішення та виокремлено практичні рекомендації щодо побудови ефективної, масштабованої і відмовостійкої DWDM/OTN-транспортної мережі. Отримані результати можуть бути використані під час проектування та модернізації операторських і корпоративних оптичних мереж зв'язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cisco Systems. Optical Networking Technologies and Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/optical-networking/index.html> (дата звернення: 17.05.2026).
2. Ciena Corporation. Introduction to Optical Transport Networks (OTN) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ciena.com/insights/what-is/what-is-otn.html> (дата звернення: 17.05.2026).
3. Dell'Oro Group. Optical Transport Market Report 2025 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.delloro.com> (дата звернення: 17.05.2026).
4. Huawei Technologies. DWDM Technology White Paper [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.huawei.com/en/technology-insights/industry-insights/optical-networking> (дата звернення: 17.05.2026).
5. ITU-T. Recommendation G.709/Y.1331: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN). – Geneva : International Telecommunication Union, 2020. – 356 p.
6. ITU-T. Recommendation G.872: Architecture of Optical Transport Networks. – Geneva: International Telecommunication Union, 2021. – 94 p.
7. Juniper Networks. MPLS Transport Profile Technology Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/junos/mpls/topics/topic-map/mpls-transport-profile.html> (дата звернення: 17.05.2026).
8. Kreutz D., Ramos F., Verissimo P. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, № 1. – P. 14–76.
9. Nokia Corporation. Optical Transport Networks for Critical Infrastructure [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nokia.com/networks/optical-networking/> (дата звернення: 17.05.2026).

10. Open Networking Foundation. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://opennetworking.org> (дата звернения: 17.05.2026).
11. Richardson M. Optical Network Design and Planning. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2019. – 412 p.
12. Stallings W. Data and Computer Communications. – 11th ed. – New York : Pearson, 2020. – 912 p.
13. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. – 6th ed. – Boston : Pearson, 2021. – 960 p.
14. The Linux Foundation. OpenDaylight SDN Controller Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.opendaylight.org> (дата звернения: 17.05.2026).
15. Uyar M., Fecko M., Samtani A. MPLS-TP Survivability and Network Reliability // IEEE Communications Magazine. – 2018. – Vol. 56, № 7. – P. 142–149.
16. Zhang X., Jue J. P. Optical Networks: A Practical Perspective. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2018. – 624 p.
17. Zyxel Communications. Modern Optical Transport Networks and Resilient Architectures [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zyxel.com/global/en/solutions/optical-networking> (дата звернения: 17.05.2026).
18. ITU-T. Recommendation G.709/Y.1331: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709> (дата звернения: 17.05.2026).
19. ITU-T. Recommendation G.798: Characteristics of Optical Transport Network hierarchy equipment functional blocks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.798> (дата звернения: 17.05.2026).
20. ITU-T. Recommendation G.872: Architecture of Optical Transport Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.872> (дата звернения: 17.05.2026).
21. ITU-T. Recommendation G.694.1: Spectral grids for WDM applications:

DWDM frequency grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1> (дата звернения: 17.05.2026).

22. ITU-T. Recommendation G.874: Management aspects of optical transport network elements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.874> (дата звернения: 17.05.2026).

23. ITU-T. Recommendation G.874.1: Optical Transport Network (OTN): Protocol-neutral management information model for network elements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.874.1> (дата звернения: 17.05.2026).

24. ITU-T. Recommendation G.805: Generic functional architecture of transport networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.805> (дата звернения: 17.05.2026). ITU-T. Recommendation G.806: Characteristics of transport equipment – Description methodology and generic functionality [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.806> (дата звернения: 17.05.2026).

25. ITU-T. Recommendation G.7710: Common equipment management function requirements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.7710> (дата звернения: 17.05.2026).

26. Cisco Systems. OTN Switching and Transport Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/optical-networking.html> (дата звернения: 17.05.2026).

27. Huawei Technologies. OptiX OSN 8800 Intelligent Optical Transport Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://carrier.huawei.com/en/products/optical-network/optix-osn-8800> (дата звернения: 17.05.2026).

28. Nokia. Optical Transport Networks (OTN) Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nokia.com/networks/optical-networks/> (дата звернения: 17.05.2026).

29. Infinera. Optical Transport Network (OTN) Technology and Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infinera.com/solutions/optical->

transport/ (дата звернення: 17.05.2026).

30. IEEE Standards Association. IEEE 802.3 Ethernet Standard [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7071/> (дата звернення: 17.05.2026).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Проектування відмовостійкої архітектури транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для критичної інфраструктури в умовах війни в Україні»

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ІСД-41 **Андрій ПАСОШНИКОВ**

Керівник: доктор філософії (PhD) **Дмитро КОЗЛОВ**

Київ – 2026

Мета роботи

Проектування відмовостійкої архітектури транспортної мережі з резервуванням DWDM/OTN для забезпечення безперервності передачі даних у системах критичної інфраструктури.

Об'єкт дослідження

Транспортні телекомунікаційні мережі критичної інфраструктури.

Предмет дослідження

Методи та принципи побудови відмовостійких транспортних мереж із використанням технологій DWDM та OTN/OTH, а також механізмів резервування каналів і вузлів мережі.

Наукові завдання:

- Провести аналіз транспортних мереж критичної інфраструктури та сучасних технологій DWDM, OTN/OTH і MPLS-TP.
- Дослідити методи забезпечення відмовостійкості та резервування транспортних мереж.
- Розробити архітектуру DWDM/OTN-мережі з механізмами автоматичного захисного перемикання (APS).
- Оцінити ефективність, надійність і масштабованість запропонованої архітектури

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

Таблиця 1 – Порівняння сучасних технологій транспортних мереж

Технологія	Тип передачі	Основні переваги	Основні недоліки
SDH	Синхронна	Надійність, стандартизоване резервування	Низька ефективність для IP-трафіку
MPLS-TP	Пакетна	OAM, QoS, підтримка резервування	Складність налаштування
DWDM	Оптична	Дуже висока пропускна здатність (до 100×100 Гбіт/с)	Відсутність логічного контролю
OTN/OTH	Оптична транспортна	FEC, моніторинг PM/TCM, масштабованість	Висока вартість обладнання

Таблиця 2 – Вимоги до транспортних мереж критичної інфраструктури

Вимога	Характеристика	Вимога	Характеристика
Надійність	Стабільна робота (99,999%)	Резервування	Резервні канали та вузли
Відмовостійкість	Робота при аваріях ($APS \leq 50$ мс)	Продуктивність	Висока пропускна здатність
Масштабованість	Розширення без зміни архітектури	Живучість	Стійкість до фізичних пошкоджень
Безпека	Захист від кібератак	Моніторинг	OAM у реальному часі

ЗАГАЛЬНА АРХІТЕКТУРА АПАРАТУРИ OTN: РІВНІ OTS, OMS, OCh

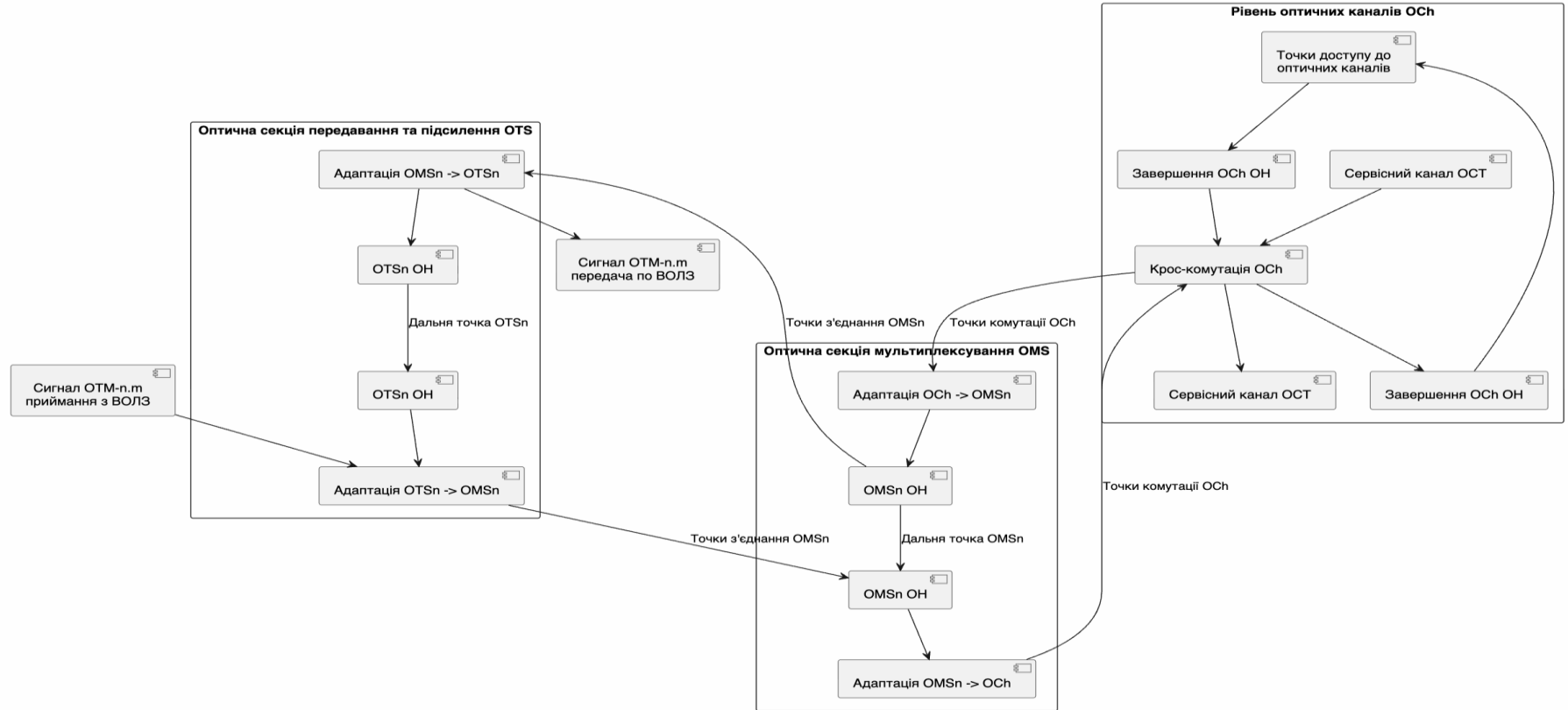


Рисунок 1 – Загальна функціональна архітектура апаратури OTN із секціями OTS, OMS та рівнем OCh

ФУНКЦІОНАЛЬНА АРХІТЕКТУРА РІВНІВ ODUK ТА OTUK

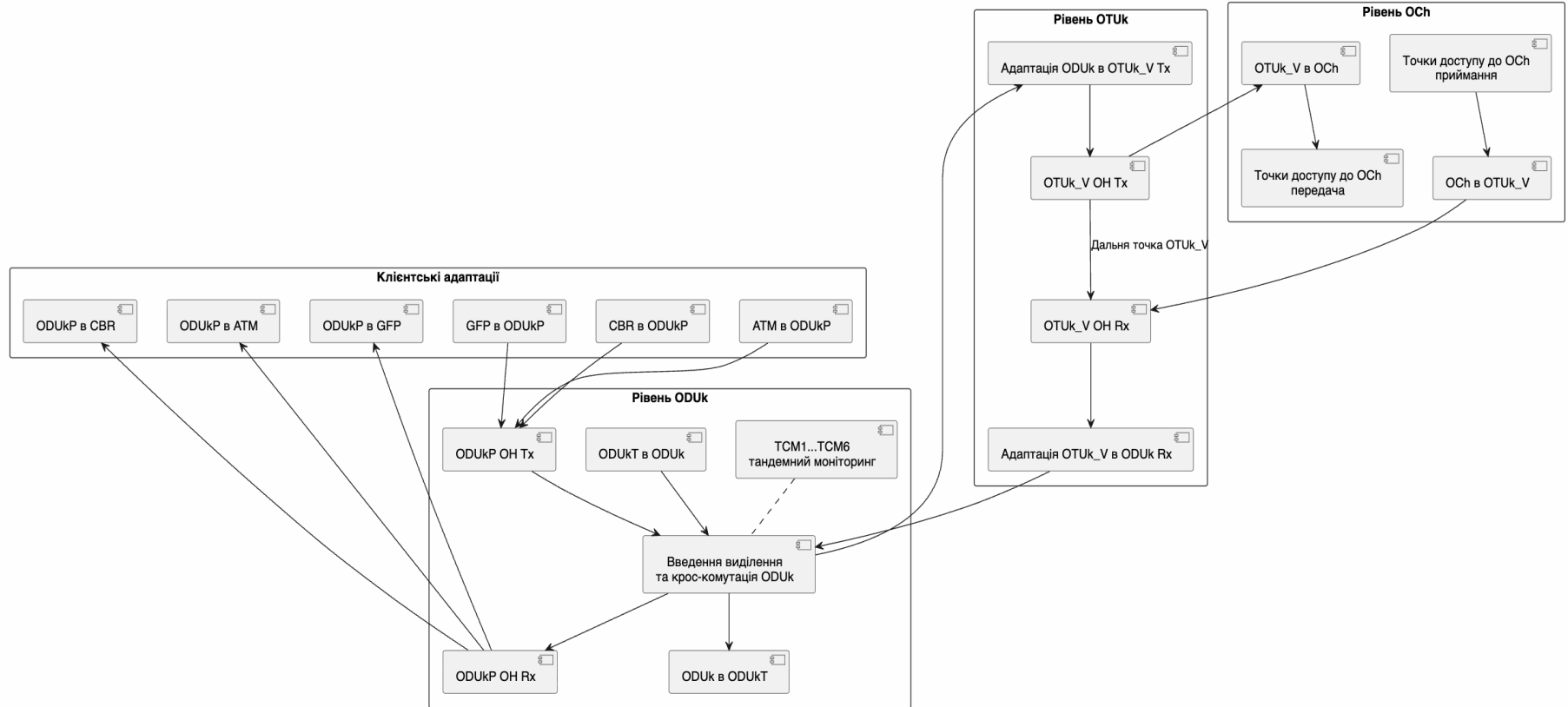


Рисунок 2 – Функціональна архітектура рівня оптичного каналу OCh: блоки ODUk, OTUk та клієнтські адаптації

ФУНКЦІЇ РІВНЯ OTS ТА СТРУКТУРА ОПТИЧНОЇ СЕКЦІЇ ПЕРЕДАВАННЯ

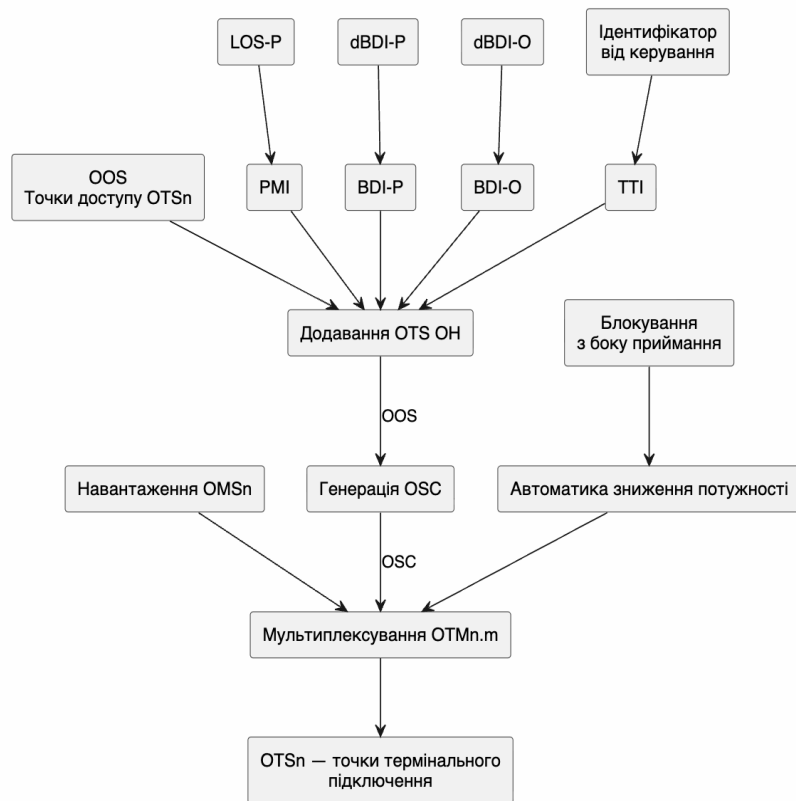


Рисунок 3 – Функції обладнання рівня OTS: формування OTS OH та генерація OSC

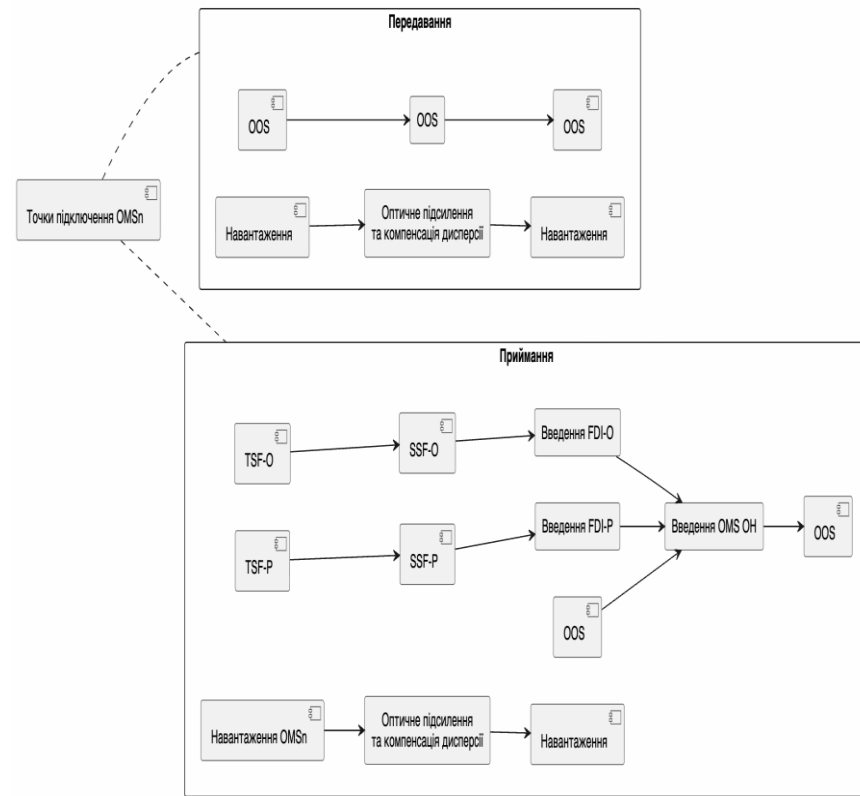


Рисунок 4 – Адаптація OTSn ↔ OMSn: передавання та приймання сигналу OTM

МЕХАНІЗМИ МОНІТОРИНГУ PM/TSM У БАГАТООПЕРАТОРНІЙ МЕРЕЖІ

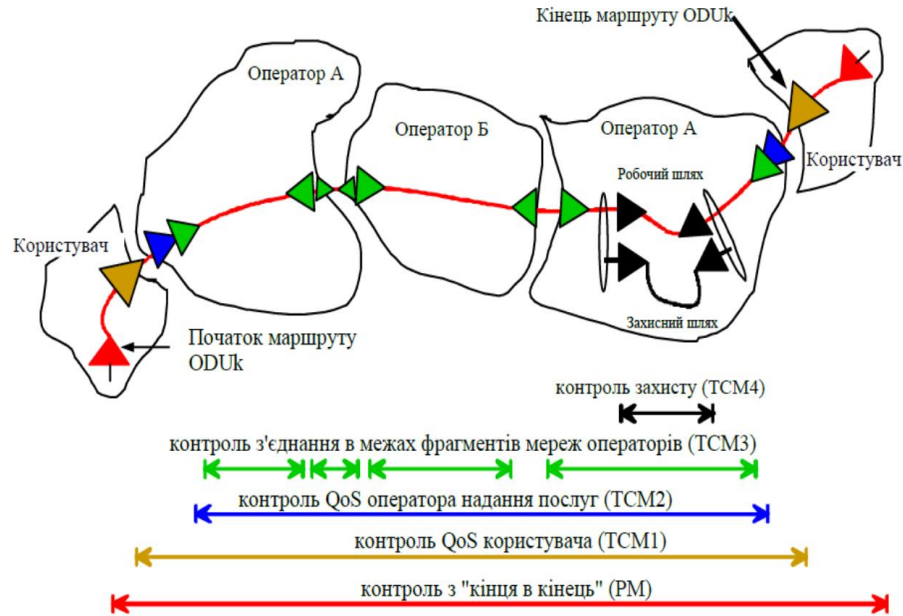


Рисунок 5 – Використання PM/TSM-моніторингу вздовж маршруту ODUk у багатооператорській мережі

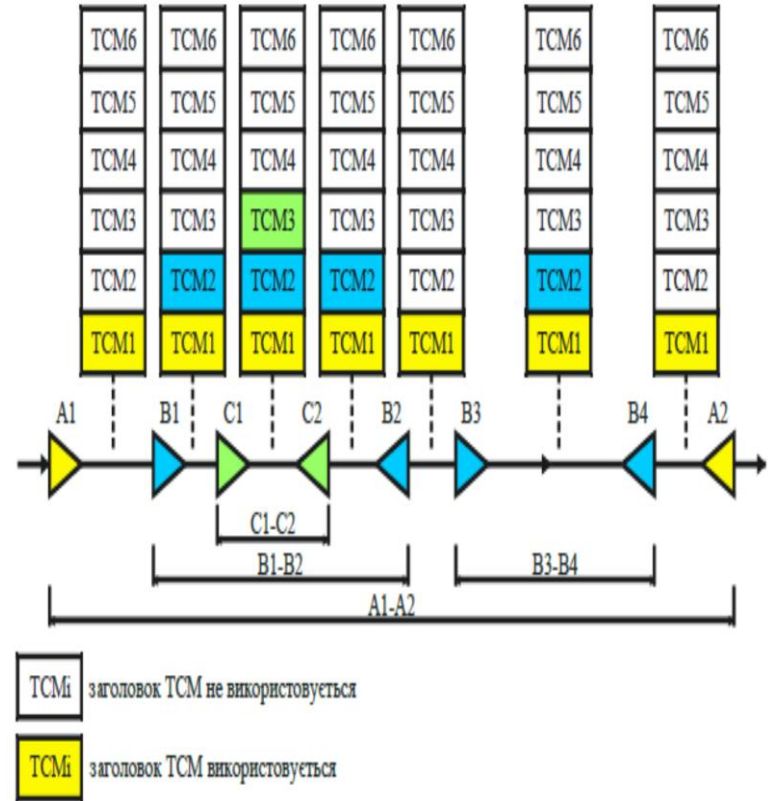


Рисунок 6 – Перекривні TCM-з'єднання: контроль QoS на різних рівнях мережі

СЛУЖБОВИЙ ОПТИЧНИЙ КАНАЛ КЕРУВАННЯ OSC

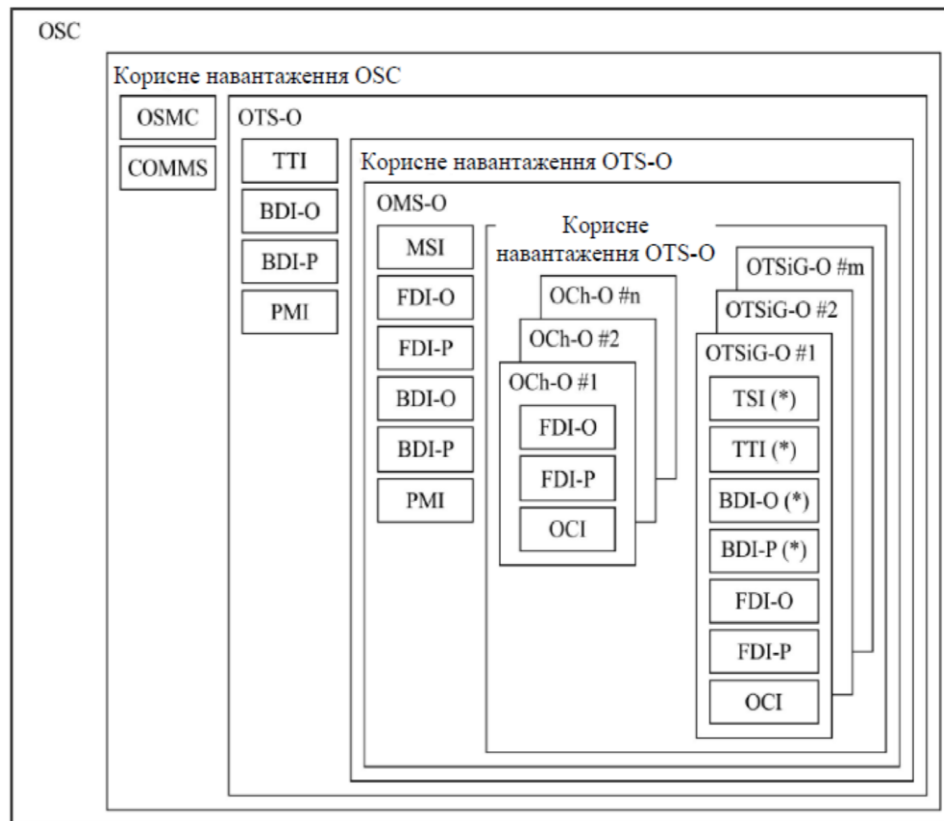


Рисунок 7 – Узагальнена структура службової інформації в оптичному каналі керування OSC (OTS-O, OMS-O, OCh-O)

АВТОМАТИЧНЕ ЗАХИСНЕ ПЕРЕМИКАННЯ ТРАФІКУ (APS)

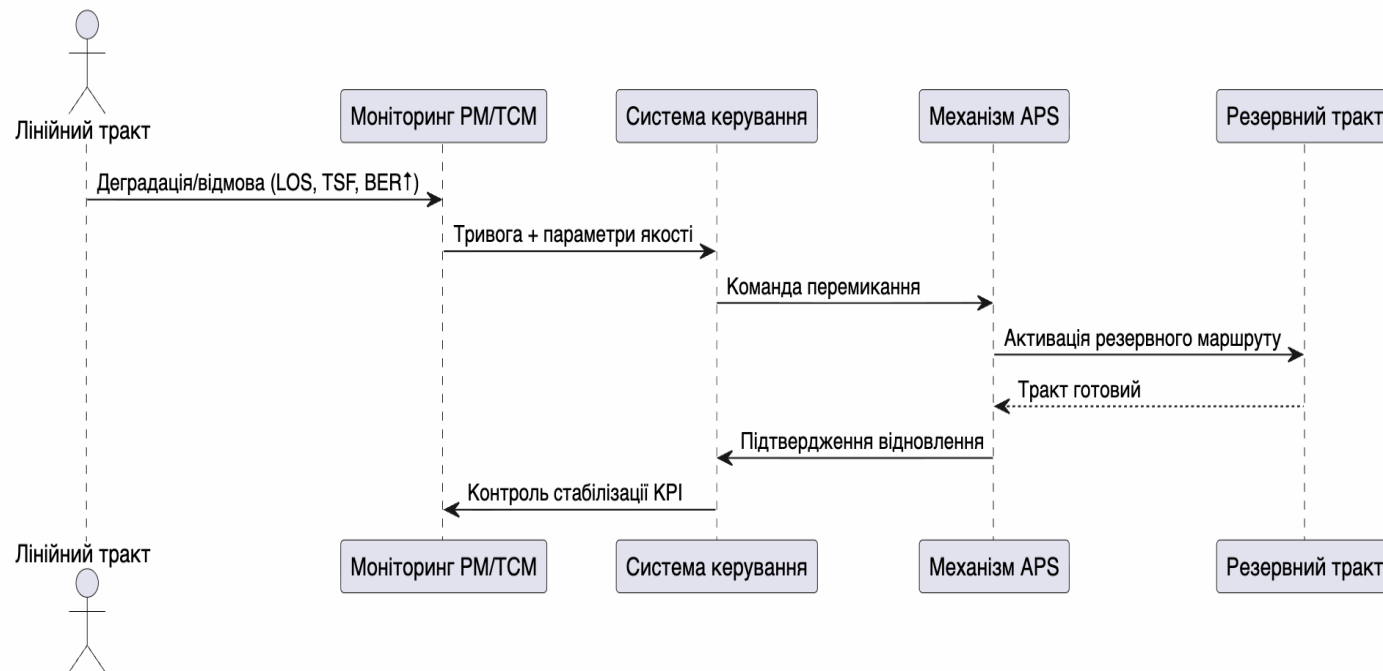
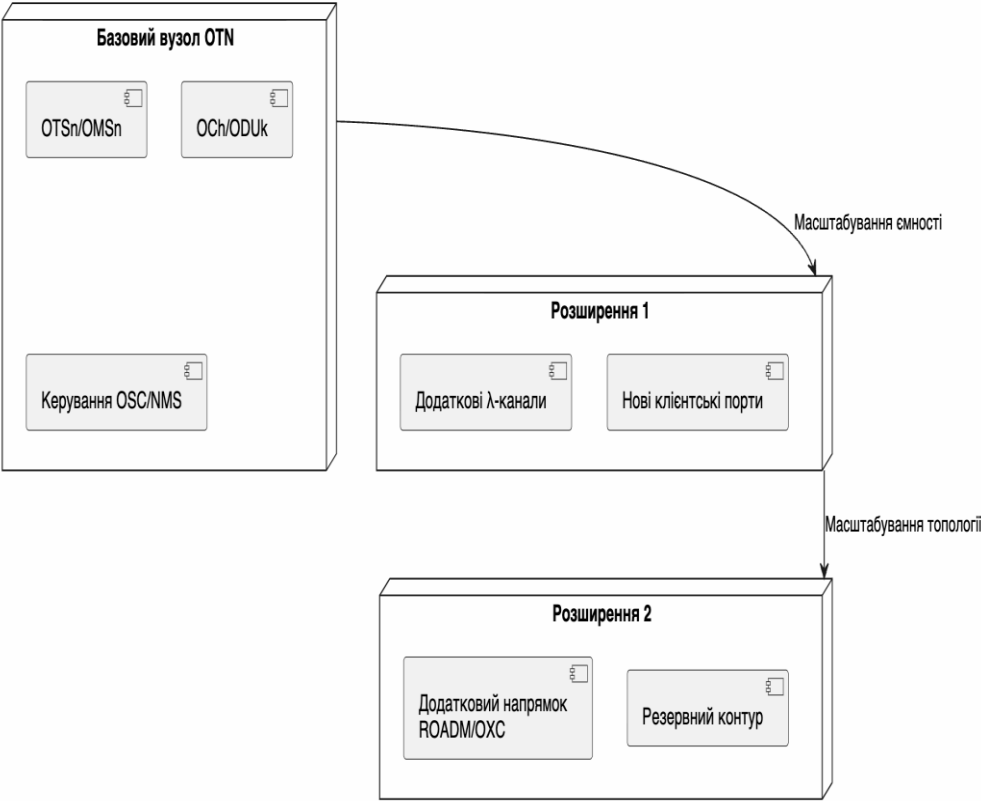


Рисунок 8 – UML-діаграма послідовності: процес виявлення відмови та автоматичного захисного перемикання (APS)

МАСШТАБУВАННЯ МЕРЕЖІ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ



Критерії оцінювання ефективності:

Критерій	Формула
Спектральна ефективність	$K_{spec} = N_{active} / N_{total}$
Використання вузла	$K_{node} = C_{client} / C_{line}$
Коефіцієнт готовності	$A = T_{up} / (T_{up} + T_{down})$
Час відновлення APS	$\leq 50 \text{ мс (ITU-T G.873.1)}$
Доступність мережі	99,999% («п'ять дев'яток»)

Рисунок 9 – Масштабування мережі за модульним принципом: ємність та топологія

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

Таблиця 3 – Порівняння методів забезпечення відмовостійкості

Метод резервування	Схема	Час відновлення	Використання ресурсу	Застосування
Дедикований захист	1+1	< 50 мс	200% (резерв завжди активний)	Критичні сервіси (державне управління, оборона)
Розподілений захист	1:1	< 50 мс	100% (резерв пасивний)	Магістральні канали операторів
Кільцевий захист	SNCP / MSSP	< 50 мс	50% спектру кільця	Регіональні мережі критичної інфраструктури
Сітчаста маршрутизація	Mesh restoration	< 2 с	~30–40% надлишку	Великі мережі з динамічним трафіком
Географічне резервування	Geo-redundant	< 10 хв	Подвоєні вузли та ВОЛЗ	ЦОД, державні об'єкти

Рекомендація: для критичної інфраструктури України (енергетика, оборона, держуправління) — схема 1+1 із часом відновлення до 50 мс та географічним резервуванням вузлів.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано транспортні мережі критичної інфраструктури та встановлено, що в умовах воєнних загроз DWDM/OTN є найбільш ефективним рішенням для забезпечення безперервності зв'язку.
2. Досліджено функціональну структуру OTN/OTH: рівні OTS, OMS, OCh, OTUk, ODUk; механізми моніторингу PM/TCM, TTI, BIP-8/BDI/BEI та службовий канал OSC.
3. Розроблено структурно-функціональні схеми взаємодії вузлів DWDM/OTN-мережі, включаючи модель міжрівневої адаптації та секціонування транспортного тракту.
4. Проаналізовано методи резервування (1+1, 1:1, кільцевий захист, Mesh) та визначено оптимальні схеми для об'єктів критичної інфраструктури — схема 1+1 із часом APS ≤ 50 мс.
5. Розроблено модель автоматичного захисного перемикання (APS): виявлення деградації (LOS/TSF/BER $\uparrow$) $\rightarrow$ сигналізація PM/TCM $\rightarrow$ команда APS $\rightarrow$ активація резервного тракту.
6. Розроблено підхід до оцінювання ефективності мережі за критеріями: спектральна ефективність (Kspec), використання вузла (Knode), коефіцієнт готовності ($A \geq 99,999\%$) та масштабованість за модульним принципом.

Дякую за увагу!