Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Транспортна платформа мультисервісної METRO-мережі

(тема)

Виконав:
здобувач *4* року навчання,
групи *ТРІМІз-22-1*
Олександр ЛЯШОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми *освітньо-професійна*
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма *Інформаційно-мережна інженерія*
(повна назва освітньої програми)

Керівник *доц. Юрій КОЛТУН*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
В.о. завідувача кафедри _____ *Дарія ЧЕБОТАРЬОВА*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Здобувач / Олександр Ляшов /

Керівник / Юрій Колтун /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*

(код і повна назва)

Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма *«Інформаційно-мережна інженерія»*

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____»_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві *Ляшову Олександру Миколайовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Транспортна платформа мультисервісної METRO-мережі*

затверджена наказом університету від 18 травня 2026 р. № 73 Стз

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 14 липня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку мультисервісних транспортних мереж рівня міста; обґрунтувати вибір технології спектрального ущільнення CWDM та топології мережі; розробити структурну схему транспортної платформи METRO-мережі умовного міста; виконати розрахунок навантаження, необхідної кількості й ємності оптичних каналів; розрахувати енергетичний бюджет волоконно-оптичних ліній та оцінити показники надійності мережі; сформулювати рекомендації щодо конфігурування мережного обладнання та забезпечення якості обслуговування. Для планування мережі обрати місто з населенням 350 тис. осіб. Місто поділене на шість житлових районів різного розміру та щільності забудови, а також має центральну частину з підвищеною концентрацією ділового та комерційного трафіку. Надається повний спектр послуг: широкосмуговий доступ до Інтернету, телебачення, телефонію VoIP, а також послуги для корпоративних клієнтів - віртуальні приватні мережі та оренду каналів.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1. Аналіз сучасного стану мультисервісних транспортних METRO-мереж

2. Технологія CWDM та обґрунтування топології мережі

3. Розроблення структури транспортної платформи METRO-мережі

4. Розрахунок основних параметрів мережі

5. Реалізація та конфігурування мережі

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) *назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; багаторівнева модель мультисервісної мережі; технологія CWDM: план оптичних каналів; обґрунтування вибору CWDM; структурна схема мережі: кільце з відгалуженням; структурна схема вузла мережі; механізм захисного перемикання; розрахунок навантаження мережі; енергетичний бюджет оптичного тракту; надійність та відповідність вимогам; висновки*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	*Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.*	*18.05.26*	*виконано*
2	*Підбір літератури за темою роботи.*	*19.05-15.06.26*	*виконано*
3	*Аналіз сучасного стану мультисервісних транспортних METRO-мереж*	*16.06-26.06.26*	*виконано*
4	*Технологія CWDM та обґрунтування топології мережі*	*27.06-03.07.26*	*виконано*
5	*Розроблення структури транспортної платформи METRO-мережі*	*04.07-05.07.26*	*виконано*
6	*Розрахунок основних параметрів мережі*	*06.07-07.07.26*	*виконано*
7	*Реалізація та конфігурування мережі*	*08.07-10.07.26*	*виконано*
8	*Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК*	*11.07-14.07.26*	*виконано*

Дата видачі завдання _18_ ___травня__ 2026 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Юрій Колтун
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 77 с., 7 рис., 20 табл., 20 джерел, 3 додатки.

Об'єкт дослідження – мультисервісна мережа міста.

Мета роботи – методи побудови мультисервісної транспортної платформи METRO-мережі.

У роботі проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку транспортних мереж метрополійного рівня, обґрунтовано доцільність застосування технології CWDM для міської мультисервісної мережі, розроблено топологію кільця на вісім вузлів із відгалуженнями до житлових районів, виконано розрахунок навантаження, ємності каналів, енергетичного бюджету та коефіцієнта готовності. Запропоновано схему захисту трафіку рівня оптичного кільця, наведено рекомендації щодо конфігурування мережного обладнання.

Результати роботи можуть бути використані під час проектування транспортних сегментів міських мультисервісних мереж операторів зв’язку, а також у навчальному процесі під час вивчення дисциплін, пов’язаних з оптичними транспортними мережами.

МУЛЬТИСЕРВІСНА МЕРЕЖА, METRO-МЕРЕЖА, ТРАНСПОРТНА ПЛАТФОРМА, CWDM, СПЕКТРАЛЬНЕ УЩІЛЬНЕННЯ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, КІЛЬЦЕВА ТОПОЛОГІЯ, CARRIER ETHERNET, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БЮДЖЕТ, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ.

THE ABSTRACT

Explanatory slip 77 p., 7 fig., 20 tab., 20 sources, 3 attach.

Object of research - the city's multi-service network.

The purpose of the work - methods for Building a Multi-Service Transportation Platform for the METRO Network.

The work analyses the current state and development trends of metropolitan transport networks, substantiates the feasibility of using CWDM technology for an urban multiservice network, develops an eight-node ring topology with branches to residential districts, and calculates traffic load, channel capacity, power budget and availability factor. A ring-level traffic protection scheme is proposed, and recommendations for network equipment configuration are provided.

The results of the work can be used in the design of transport segments of urban multiservice networks of telecommunication operators, as well as in the educational process.

MULTISERVICE NETWORK, METRO NETWORK, TRANSPORT PLATFORM, CWDM, WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING, OPTICAL FIBER, RING TOPOLOGY, CARRIER ETHERNET, POWER BUDGET, QUALITY OF SERVICE.

ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 10
ВСТУП 12
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ METRO-МЕРЕЖ 14
1.1 Поняття та місце METRO-мережі в архітектурі телекомунікаційної мережі 14
1.2 Поняття мультисервісної мережі та вимоги до неї 15
1.3 Технології побудови транспортних METRO-мереж 17
1.4 Тенденції та рушійні чинники розвитку METRO-мереж 19
1.5 Показники якості обслуговування та їх нормування 20
1.6 Особливості трафіку мультисервісної мережі 21
1.7 Архітектурні принципи побудови мультисервісних мереж 22
1.8 Показники ефективності транспортної мережі 23
1.9 Методологія проектування транспортних мереж 24
1.10 Еволюція вимог до пропускної здатності 25
2 ТЕХНОЛОГІЯ CWDM ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ МЕРЕЖІ 26
2.1 Фізичні основи спектрального ущільнення каналів 26
2.2 Порівняння CWDM та DWDM для міської мережі 28
2.3 Топології транспортних мереж рівня міста 28
2.4 Компоненти систем CWDM 29
2.4.1 Оптичне волокно як середовище передавання 29
2.4.2 Джерела оптичного випромінювання 31
2.4.3 Мультиплексори та демультиплексори 31
2.4.4 Оптичні мультиплексори введення/виведення (OADM) 31
2.4.5 Транспондери та приймачі 32
2.4.6 Оптичні з’єднувачі та пасивна інфраструктура 32
2.4.7 Оптичні підсилювачі та регенерація сигналу 33
2.5 Надійність оптичних компонентів 34
2.6 Бюджет потужності та запас на старіння 35
2.7 Резервування оптичних волокон у кабельних системах 35

3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТРАНСПОРТНОЇ ПЛАТФОРМИ METRO-МЕРЕЖІ 37
3.1 Вихідні дані для проектування 37
3.2 Структурна схема транспортної мережі 38
3.3 Структура вузла мережі 39
3.4 Розрахунок кабельної інфраструктури 41
3.5. Механізми захисту кільця 42
3.6 Розрахунок абонентської ємності районів 43
3.7 Резервування обладнання вузлів 44
3.8 Забезпечення масштабованості структури 45
3.9 Розрахунок кількості обладнання доступу 45
4 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ 47
4.1 Розрахунок навантаження мережі 47
4.2 Розрахунок кількості та ємності оптичних каналів 49
4.3 Розрахунок енергетичного бюджету оптичної лінії 50
4.4 Розрахунок показників надійності мережі 52
4.5 Оцінка показників якості обслуговування 53
4.6 Прогнозування зростання навантаження 54
4.7 Візуалізація розрахункового навантаження 55
4.8 Візуалізація енергетичного бюджету 56
4.9 Зведене оцінювання відповідності вимогам 57
4.10 Детальний розрахунок навантаження центрального вузла 57
4.11 Зведене оцінювання ресурсів мережі 58
5 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА КОНФІГУРУВАННЯ МЕРЕЖІ 60
5.1 Вибір обладнання транспортної платформи 60
5.2 Рекомендації щодо конфігурування комутаційного рівня 61
5.3 Впровадження та розвиток мережі 61
5.4 Забезпечення інформаційної безпеки транспортної мережі 62
5.5 Узагальнення технічних рішень 63
5.6 Організація моніторингу мережі 63
ВИСНОВКИ 65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 67
ДОДАТОК А СПЕЦИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ ПЛАТФОРМИ 69

ДОДАТОК Б ЗВЕДЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ 70
ДОДАТОК В СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ 71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв’язку;

ВОСП – волоконно-оптична система передавання;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МСЕ – Міжнародний союз електрозв’язку;

ОК – оптичний кабель;

ОМ – одномодове (волокно);

ПЗ – програмне забезпечення;

ЯО – якість обслуговування;

CAPEX – Capital Expenditures – капітальні витрати;

CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing – розріджене спектральне ущільнення каналів;

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне спектральне ущільнення каналів;

EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier – ербієвий волоконно-оптичний підсилювач;

FE – Fast Ethernet – швидкий Ethernet (100 Мбіт/с);

GE – Gigabit Ethernet – гігабітний Ethernet;

GPON – Gigabit-capable Passive Optical Network – гігабітна пасивна оптична мережа;

IP – Internet Protocol – міжмережний протокол;

IPTV – Internet Protocol Television – телебачення за протоколом IP;

ITU-T – Telecommunication Standardization Sector of ITU – сектор стандартизації МСЕ;

MPLS – Multiprotocol Label Switching – багатопротокольна комутація за мітками;

MSTP – Multi-Service Transport Platform – багатосервісна транспортна платформа;

OADM – Optical Add-Drop Multiplexer – оптичний мультиплексор введення/виведення;

OPEX – Operational Expenditures – операційні витрати;

OTN – Optical Transport Network – оптична транспортна мережа;

QoS – Quality of Service – якість обслуговування;

SLA – Service Level Agreement – угода про рівень обслуговування;

VLAN – Virtual Local Area Network – віртуальна локальна мережа;

VoIP – Voice over IP – передавання голосу за протоколом IP;

VPN – Virtual Private Network – віртуальна приватна мережа;

WDM – Wavelength Division Multiplexing – спектральне ущільнення каналів.

ВСТУП

Стрімке зростання обсягів інформаційного трафіку, зумовлене масовим впровадженням широкосмугового доступу до мережі Інтернет, сервісів високої чіткості, хмарних обчислень та інтерактивних застосунків, актуалізує підвищення вимог до міських транспортних телекомунікаційних мереж. Мережі метрополійного рівня (METRO), виконуючи роль сполучної ланки між магістральною інфраструктурою та мережами абонентського доступу, стають ключовим сегментом для агрегації, транспортування та розподілу гетерогенного трафіку.

Історично міські мережі базувалися на технологіях плезіохронної та синхронної цифрових ієрархій (PDH/SDH), розрахованих на передавання голосових послуг з комутацією каналів. Проте перехід до пакетно-орієнтованих архітектур, конвергенція послуг та домінування IP-трафіку зумовили технологічну та економічну нерентабельність традиційних рішень. Сучасним стандартом стали мультисервісні транспортні платформи, що забезпечують передавання різнорідного трафіку з гарантованою якістю обслуговування (QoS).

Одним із перспективних напрямів побудови METRO-мереж є впровадження технології спектрального ущільнення (WDM), що дозволяє суттєво нарощувати пропускну здатність наявної волоконно-оптичної інфраструктури. З огляду на специфіку міських мереж, де критичним показником є ефективність капітальних інвестицій, особливої актуальності набуває технологія розрідженого спектрального ущільнення (CWDM). Вона забезпечує оптимальний баланс між вартістю обладнання та необхідною ємністю оптичних каналів для середовища міської забудови.

Актуальність даної кваліфікаційної роботи полягає в розробленні економічно доцільних та технічно досконалих рішень для формування транспортного сегмента міської мультисервісної мережі, здатної забезпечити надання широкого спектра сучасних інфокомунікаційних послуг із потенціалом подальшого масштабування.

Метою роботи є розроблення структурно-функціональних рішень транспортної платформи мультисервісної METRO-мережі умовного міста з

обґрунтуванням вибору технології CWDM, кільцевої топології з відгалуженнями за районами та виконанням розрахунків основних параметрів мережі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку мультисервісних транспортних мереж рівня міста;

– обґрунтувати вибір технології спектрального ущільнення CWDM та топології мережі;

– розробити структурну схему транспортної платформи METRO-мережі умовного міста;

– виконати розрахунок навантаження, необхідної кількості й ємності оптичних каналів;

– розрахувати енергетичний бюджет волоконно-оптичних ліній та оцінити показники надійності мережі;

– сформулювати рекомендації щодо конфігурування мережного обладнання та забезпечення якості обслуговування.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ METRO-МЕРЕЖ

1.1 Поняття та місце METRO-мережі в архітектурі телекомунікаційної мережі

Сучасна телекомунікаційна мережа загального користування базується на ієрархічній архітектурі, що включає три ключові рівні: магістральний (Core), міський (METRO) та рівень абонентського доступу (Access). Кожен із зазначених сегментів виконує специфічні функції та висуває відповідні вимоги до технічного забезпечення, протоколів і параметрів якості обслуговування [1].

Магістральний рівень відповідає за передавання агрегованих обсягів трафіку між віддаленими регіонами та містами. Цей рівень вирізняється використанням надвисоких швидкостей, застосуванням технологій щільного спектрального ущільнення (DWDM) з оптичними підсилювачами, а також стандартів оптичних транспортних мереж (OTN). Своєю чергою, рівень абонентського доступу забезпечує безпосередню взаємодію з кінцевими користувачами, базуючись переважно на технологіях пасивних оптичних мереж (GPON, XGS-PON), Ethernet-доступу або гібридних волоконно-коаксіальних системах.

Міська мережа (METRO) займає проміжне положення в цій архітектурі, виконуючи функції агрегації трафіку від вузлів доступу, його транспортування в межах міської інфраструктури та забезпечення сполучення з магістральною мережею. Саме на рівні METRO здійснюється концентрація потоків даних, класифікація послуг та впровадження механізмів резервування трафіку [1]. Роль METRO-мережі в загальній архітектурі та принципи її взаємодії з іншими рівнями відображено на рис. 1.1.

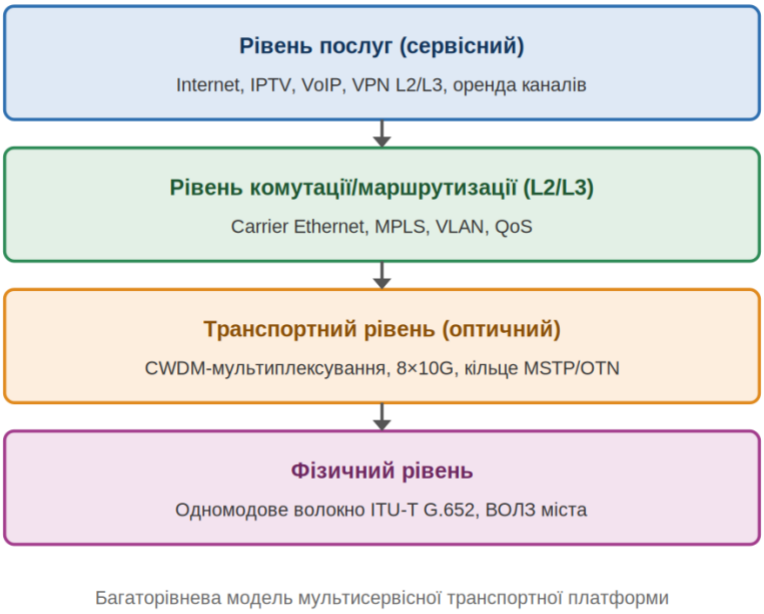


Рисунок 1.1 – Багаторівнева модель мультисервісної транспортної платформи METRO-мережі

Характерними ознаками мереж метрополітену (METRO-мереж) є обмежена протяжність між вузлами (зазвичай у межах від одиниць до десятків кілометрів), висока концентрація вузлів агрегування, а також необхідність підтримки широкого спектра послуг із диференційованими вимогами до параметрів затримки та смуги пропускання. Окрім того, такі мережі висувають підвищені вимоги до надійності, оскільки вихід із ладу навіть одного вузла може суттєво вплинути на якість обслуговування цілого міського сегмента.

1.2 Поняття мультисервісної мережі та вимоги до неї

Під мультисервісною мережею розуміють єдину телекомунікаційну інфраструктуру, що забезпечує одночасне надання послуг різного типу (передавання даних, голосового трафіку, відео) на базі спільного транспортного середовища з використанням уніфікованих принципів комутації та маршрутизації. Фундаментальний принцип мультисервісності полягає у переході від моделі побудови окремих спеціалізованих мереж під кожен вид послуг до концепції конвергентного рішення. У такій системі різнорідний трафік обробляється спільними каналами з чітким розмежуванням за класами обслуговування [2].

Мультисервісна мережа повинна відповідати таким ключовим вимогам [2]:

– підтримка розширеного переліку сервісів (доступ до мережі Інтернет, IPTV, VoIP, віртуальні приватні мережі, оренда каналів) на базі єдиної технологічної платформи;

– забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS) для кожного класу трафіку відповідно до параметрів угоди про рівень обслуговування (SLA);

– масштабованість, що передбачає можливість нарощування пропускної здатності та збільшення кількості вузлів без необхідності докорінного перепроектування мережевої архітектури;

– висока надійність та відмовостійкість із мінімізацією часу відновлення після збоїв;

– економічна ефективність експлуатації інфраструктури за оптимального балансу капітальних та операційних витрат;

– керованість за рахунок впровадження сучасних систем моніторингу та адміністрування.

Забезпечення якості обслуговування є пріоритетним завданням для мультисервісної мережі, що зумовлено специфічними, часто несумісними вимогами різних сервісів. Зокрема, послуги реального часу (телефонія, відеоконференцзв’язок) критично залежать від величини затримки та її варіації (джитера), проте є відносно стійкими до незначних втрат пакетів. Натомість сервіси передавання даних чутливі до втрат інформації, але допускають вищі показники затримки. Класифікацію трафіку та відповідні вимоги до них наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класи трафіку мультисервісної мережі та вимоги до них

Клас трафіку	**Приклад послуги**	**Затримка**	**Джитер**	**Втрати пакетів**
Реального часу	VoIP, відеодзвінки	< 150 мс	< 30 мс	< 1 %
Потокове відео	IPTV, VoD	< 400 мс	< 50 мс	< 0,5 %
Інтерактивний	веб, онлайн-ігри	< 300 мс	не критично	< 1 %
Передавання даних	файли, пошта	не критично	не критично	≈ 0 %
Службовий	керування, сигналізація	низька	не критично	≈ 0 %

Для розмежування трафіку в мультисервісних мережах застосовуються механізми пріоритезації та резервування ресурсів, зокрема: маркування пакетів за полями пріоритету, чергування з ваговими коефіцієнтами, а також обмеження та формування потоків. Транспортна інфраструктура METRO-мережі повинна забезпечувати прозоре передавання цих механізмів, зберігаючи параметри якості обслуговування (QoS), встановлені на рівнях доступу та агрегації.

1.3 Технології побудови транспортних METRO-мереж

За останні десятиліття технологічна архітектура міських транспортних мереж суттєво еволюціонувала. Нижче наведено огляд ключових технологій, що використовуються для побудови METRO-мереж, з аналізом їхніх переваг та експлуатаційних обмежень.

Синхронна цифрова ієрархія (SDH)

Тривалий час технологія SDH була фундаментом транспортних мереж завдяки надійним механізмам захисту, точній синхронізації та стандартизованим системам керування. Забезпечуючи механізми кільцевого захисту з часом відновлення до 50 мс, SDH залишається ефективною для критично важливих сервісів. Водночас орієнтація на комутацію каналів та жорстка ієрархія швидкостей зумовлюють низьку ефективність використання смуги пропускання при передаванні пакетного трафіку з пульсуючим характером навантаження [3].

Технологія Carrier Ethernet

Початково розроблений для локальних мереж, Ethernet завдяки економічній ефективності та простоті впровадження став стандартом операторського класу. Технологія Carrier Ethernet, регламентована MEF, інтегрувала в класичний Ethernet необхідні інструменти для операторів: підтримку SLA, масштабованість (VLAN, Provider Backbone Bridging), засоби адміністрування та захисту трафіку. Сьогодні Carrier Ethernet є домінуючою технологією комутації на рівні METRO [3].

Спектральне ущільнення каналів (WDM)

Технологія WDM дозволяє організувати передавання даних кількома незалежними оптичними каналами в межах одного волокна шляхом

використання окремих довжин хвиль для кожного потоку. Це забезпечує значне нарощування пропускної здатності мережі без розширення кабельної інфраструктури. Виділяють щільне (DWDM) та розріджене (CWDM) ущільнення, що розрізняються міжканальним інтервалом та ємністю. Оскільки WDM функціонує на фізичному рівні, вона є протокольно-незалежною, що робить її оптимальною транспортною основою для мультисервісних середовищ [3].

Сучасні METRO-мережі базуються на синергії цих технологій: WDM формує оптичний транспортний рівень, Carrier Ethernet та MPLS забезпечують комутацію і надання послуг, а елементи SDH/OTN застосовуються для інтеграції успадкованого трафіку та синхронізації мережевих вузлів. Порівняльні характеристики зазначених технологій наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика технологій транспортних METRO-мереж

Технологія	**Рівень**	**Пакетний трафік**	**Захист**	**Вартість**
SDH	канальний	неефективно	≤ 50 мс	висока
Carrier Ethernet	канальний (L2)	ефективно	50–200 мс	низька
DWDM	фізичний	прозоро	оптичний	висока
CWDM	фізичний	прозоро	оптичний	низька

Аналіз фахової літератури та практичного досвіду операторів телекомунікацій свідчить, що для міст середнього масштабу найбільш раціональним рішенням є інтеграція оптичного транспортного рівня CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) із кільцевою топологією та комутаційного рівня на базі технології Carrier Ethernet. Така архітектура забезпечує необхідну пропускну здатність, оптимізацію капітальних витрат, високий рівень відмовостійкості завдяки механізмам кільцевого захисту та ефективну підтримку мультисервісних рішень за рахунок прозорості оптичного рівня.

Наявні наукові розробки здебільшого стосуються окремих міських районів або застосування технології DWDM, яка є економічно доцільною переважно для великих мегаполісів. Для міста з населенням близько 350 тис. осіб необхідне збалансоване рішення, що враховує реальний профіль

навантаження, географічні особливості та економічні обмеження, що і визначає актуальність цієї кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є розроблення транспортної платформи мультисервісної METRO-мережі, що передбачає:

- обґрунтування застосування технології CWDM та кільцевої топології з відгалуженнями;
- проектування структурної схеми мережі та вузлового обладнання;
- моделювання навантаження та розрахунок ємності каналів;
- розрахунок енергетичного бюджету волоконно-оптичних ліній;
- аналіз показників надійності та формування рекомендацій щодо конфігурації обладнання і забезпечення якості обслуговування (QoS).

1.4 Тенденції та рушійні чинники розвитку METRO-мереж

Розвиток транспортних мереж міського рівня (METRO) зумовлений комплексом взаємопов’язаних чинників [4]:

1. Експоненційне зростання обсягів трафіку. Згідно з прогнозами профільних аналітичних агенцій, обсяг світового IP-трафіку демонструє стале подвоєння кожні два–три роки, насамперед через домінування відеосервісів. Це безпосередньо впливає на вимоги до пропускної здатності міської транспортної інфраструктури.

2. Трансформація структури трафіку. Спостерігається перехід від класичної моделі «клієнт–сервер» до домінування горизонтального трафіку між вузлами та симетричних потоків даних, зумовлених хмарними сервісами та інтерактивними комунікаціями. Це вимагає впровадження мережевих топологій, орієнтованих на ефективний обмін даними між периферійними вузлами.

3. Конвергенція мереж фіксованого та мобільного зв’язку. Впровадження стандартів мобільного зв’язку нових поколінь вимагає щільного розгортання базових станцій, що потребують надійного транспортного підключення з мінімальними затримками. METRO-мережа стає єдиною транспортною основою для мультисервісного середовища.

4. Економічна ефективність. В умовах високої ринкової конкуренції оператори мінімізують питомі витрати на одиницю трафіку. Технології

спектрального ущільнення (WDM) є ключовим інструментом збільшення ємності існуючої оптичної інфраструктури без суттєвих інвестицій у лінійні споруди.

5. Вимоги до якості та надійності (SLA). З огляду на високу критичність цифрових сервісів для життєдіяльності міста, сучасні мережі проектуються з інтегрованими системами резервування на всіх рівнях та протоколами швидкого відновлення (Self-healing).

Сукупність цих чинників формує попит на масштабовані, гнучкі та економічно виправдані транспортні платформи. Поєднання технології CWDM, кільцевої топології та комутації Carrier Ethernet відповідає стратегічним цілям побудови сучасних METRO-мереж для міст середнього розміру, що обґрунтовує вибір технічних рішень у даній роботі.

1.5 Показники якості обслуговування та їх нормування

Якість обслуговування (QoS) є багатофакторною категорією, що охоплює низку кількісних метрик, які відображають ключові аспекти передавання даних у мережі. Детальний аналіз цих показників та їхньої взаємозалежності є обов’язковою умовою для ефективного проектування транспортних платформ, оскільки саме вони формують технічні вимоги до обладнання та алгоритмів керування трафіком [5].

Пропускна здатність визначається як максимальний обсяг даних, що може бути переданий каналом за одиницю часу. Важливо розмежовувати номінальну пропускну здатність, зумовлену фізичними характеристиками середовища, та ефективну, яка враховує накладні витрати протоколів. Для стабільної роботи транспортної мережі необхідно забезпечити достатній ресурс пропускної здатності, спроможний витримувати пікові навантаження.

Затримка передавання - це часовий інтервал доставки даних від відправника до отримувача. Вона формується з тривалості поширення сигналу, часу обробки в мережевих вузлах та часу очікування в чергах [5]. Для сервісів реального часу критично важливою є одностороння затримка (One-Way Delay), граничні значення якої наведені в табл. 1.1.

Варіація затримки (джитер) відображає нестабільність часу надходження пакетів. Високий рівень джитера негативно впливає на роботу застосунків

реального часу, спричиняючи спорожнення або переповнення буферів відтворення. Хоча застосування буферів дозволяє мінімізувати вплив джитера, це водночас збільшує загальну затримку, тому завданням мережі є забезпечення мінімальних показників варіації на транспортному рівні [5].

Рівень втрат пакетів характеризує частку даних, що не були доставлені через помилки передавання, відмови обладнання або переповнення черг. В оптичних транспортних мережах CWDM фізичні помилки є мінімальними, тому головним фактором втрат стає перевантаження комутаційного обладнання. Ефективне планування пропускної здатності та впровадження механізмів керування чергами є основними методами оптимізації цього показника [3].

Коефіцієнт готовності (докладно розглянутий у розділі 4) відображає надійність мережевої інфраструктури. Для операторських мереж галузевим стандартом є рівень готовності «п’ять дев’яток» (99,999 %), що допускає сумарний час простою не більше п’яти хвилин на рік. Досягнення цього показника вимагає застосування технологій резервування та протоколів швидкого відновлення.

Взаємозалежність вищенаведених показників вимагає комплексного підходу до проектування мереж. Оскільки покращення однієї характеристики часто зумовлює погіршення іншої (наприклад, збільшення буферів зменшує втрати, але підвищує затримку та джитер), розробка транспортної платформи повинна бути спрямована на пошук збалансованого рішення, що відповідає вимогам усіх класів трафіку.

1.6 Особливості трафіку мультисервісної мережі

Аналіз статистичних властивостей трафіку є обов'язковою передумовою ефективного мережевого проектування, оскільки саме параметри потоків визначають вимоги до пропускної здатності та алгоритмів керування чергами. Мультисервісна мережа характеризується неоднорідною структурою трафіку, кожен компонент якої володіє специфічними характеристиками [6].

Трафік передавання даних вирізняється вираженою пульсацією та пачковістю, що створює передумови для ефективного статистичного мультиплексування. Цей механізм дозволяє оптимізувати використання

ресурсів, оскільки сумарна пікова потреба багатьох джерел є істотно меншою за арифметичну суму їхніх індивідуальних піків. Статистичне мультиплексування є економічним фундаментом пакетних мереж, що уможливлює обслуговування великої кількості джерел у межах спільного каналу з обмеженою ємністю [6].

Трафік потокового відео, на відміну від даних, характеризується відносно стабільним бітрейтом упродовж сеансу, проте створює значне загальне навантаження. Застосування технології групового передавання (multicast) для популярного контенту дозволяє суттєво оптимізувати використання пропускної здатності транспортної мережі шляхом одночасного обслуговування багатьох споживачів одним потоком [6].

Голосовий трафік має низькі та сталі показники швидкості, проте висуває суворі вимоги до показників затримки та джитера. Попри порівняно малу частку в загальному обсязі, цей тип трафіку потребує пріоритетного обслуговування, а його сумарне навантаження є добре прогнозованим завдяки застосуванню моделей теорії телетрафіку.

Сукупний трафік мультисервісної мережі демонструє властивість самоподібності - збереження структури пачковості при агрегуванні на різних часових масштабах. Це вимагає врахування пікових навантажень із відповідним запасом пропускної здатності та застосування коефіцієнтів одночасності під час інженерних розрахунків.

1.7 Архітектурні принципи побудови мультисервісних мереж

Проектування мультисервісної мережі базується на фундаментальних архітектурних принципах, що забезпечують її високу ефективність, гнучкість та оперативну придатність [7]:

1. Розділення функцій за рівнями: Мережа функціонує як ієрархічна структура з незалежними рівнями, що взаємодіють через стандартизовані інтерфейси. Такий підхід спрощує масштабування, модернізацію та забезпечує сумісність обладнання різних виробників.

2. Відокремлення транспортних послуг від сервісних: Транспортна мережа зосереджується на передаванні даних незалежно від їхнього змісту, тоді як логіка надання послуг реалізується на вищих рівнях. Це дозволяє

впроваджувати нові сервіси без реконфігурації інфраструктури, що реалізовано, зокрема, через прозорість оптичного рівня CWDM.

3. Масштабованість: Здатність мережі до нарощування продуктивності та кількості вузлів забезпечується завдяки модульності обладнання та резервуванню інфраструктурних ресурсів на етапі проектування.

4. Надійність та відмовостійкість: Досягаються шляхом впровадження механізмів резервування критичних вузлів та ліній зв'язку, зокрема використання кільцевих топологій із автоматичним захисним перемиканням.

5. Керованість: Забезпечення централізованого моніторингу, конфігурування та діагностики мережевих елементів через розвинені системи керування.

Дотримання цих принципів при проектуванні транспортної платформи METRO-мережі забезпечує створення інженерно обґрунтованого рішення, здатного до довготривалої експлуатації в умовах зростання трафіку та диверсифікації послуг.

1.8 Показники ефективності транспортної мережі

Оцінювання якості проектних рішень ґрунтується на застосуванні системи показників ефективності, що дозволяють порівнювати альтернативні варіанти та забезпечувати відповідність встановленим вимогам. Показники ефективності транспортної мережі класифікуються на технічні, економічні та експлуатаційні [6].

Технічні показники відображають спроможність мережі реалізовувати функцію передавання даних із заданими параметрами якості. До них належать пропускна здатність, дальність передавання, метрики якості обслуговування (затримка, джитер, втрати пакетів) та надійності (коефіцієнт готовності, час відновлення). Розрахунки, наведені у розділі 4, підтверджують технічну придатність запропонованого рішення.

Економічні показники характеризують витрати на побудову та експлуатацію мережі у співвідношенні з очікуваною ефективністю. Сюди входять капітальні та операційні витрати, питомі витрати на передавання одиниці трафіку, а також термін окупності проекту. Економічну доцільність

обраного технологічного рішення (CWDM) порівняно з альтернативним (DWDM) обґрунтовано в підрозділі 5.5.

Експлуатаційні показники визначають рівень зручності впровадження, адміністрування та подальшого розвитку мережі, охоплюючи масштабованість, керованість, ремонтопридатність та енергоефективність. Розроблене рішення забезпечує високі експлуатаційні характеристики завдяки уніфікації вузлів, впровадженню централізованого управління, використанню надійних пасивних компонентів та закладеному потенціалу масштабування. Комплексний аналіз зазначених показників гарантує збалансованість проектного рішення [6].

1.9 Методологія проектування транспортних мереж

Проектування транспортної мережі є багатоетапним процесом, що потребує системного підходу. Дотримання визначеної методології забезпечує обґрунтованість проектних рішень та становить основу структури даної роботи.

Перший етап передбачає аналіз вихідних умов та формування вимог: визначення характеристик території, прогнозування навантаження та переліку послуг. Результатом є технічне завдання, що формалізує вимоги до мережі. У роботі даний етап представлений аналізом стану галузі та визначенням вихідних даних [7].

Другий етап охоплює вибір технологічних рішень. З огляду на сформульовані вимоги обираються технології транспортного та комутаційного рівнів, топологія мережі та принципи побудови. Обґрунтування базується на порівняльному аналізі альтернатив за техніко-економічними критеріями, зокрема виборі технології CWDM та кільцевої топології [7].

Третій етап присвячено розробленню структури мережі: визначенню локацій та функцій вузлів, схем з’єднань, конфігурації обладнання та механізмів захисту. Результатом є структурна схема мережі [7].

Четвертий етап включає розрахунок параметрів: навантаження, ємності, енергетичного бюджету, надійності та якості обслуговування, що підтверджує працездатність системи [7].

П’ятий етап полягає у формуванні практичних рекомендацій щодо реалізації, конфігурування та експлуатації мережі. Послідовна реалізація кожного з етапів забезпечує комплексність та логічну цілісність проекту [7].

1.10 Еволюція вимог до пропускної здатності

Вимоги до пропускної здатності транспортних мереж зазнали суттєвих трансформацій протягом останніх десятиліть, аналіз яких дозволяє здійснювати обґрунтоване прогнозування майбутніх потреб. Динаміка цих змін визначає необхідний резерв потужностей та потенціал масштабованості мережевих рішень.

Поширення технологій широкосмугового доступу зумовило зростання вимог до абонентських підключень на рівні одиниць–десятків Мбіт/с, а до транспортних мереж - на рівні сотень Мбіт/с та Гбіт/с, що спричинило перехід до використання стандартів синхронної цифрової ієрархії (SDH) та впровадження перших систем спектрального ущільнення. Подальше поширення сервісів потокового відео та високошвидкісного доступу нового покоління підвищило ці показники до десятків–сотень Мбіт/с для абонентів та десятків–сотень Гбіт/с для магістральних мереж [8].

На сучасному етапі розвитку галузі вимоги до абонентського підключення досягають сотень Мбіт/с та одиниць Гбіт/с, тоді як пропускна здатність транспортних мереж вимірюється сотнями Гбіт/с і Тбіт/с. Проєктована мережа з пропускною здатністю каналів 10 Гбіт/с та сумарним навантаженням близько 165 Гбіт/с відповідає актуальним потребам інфраструктури міста середнього розміру. Забезпечений технічний потенціал, що передбачає нарощування кількості каналів та впровадження технології DWDM, гарантує відповідність майбутнім вимогам. Таким чином, врахування еволюції технологічних потреб підтверджує доцільність обраного запасу пропускної здатності.

Висновки до розділу. У розділі розглянуто місце METRO-мережі в ієрархії телекомунікаційної мережі, сформульовано поняття та вимоги до мультисервісної мережі, проаналізовано основні технології побудови транспортних міських мереж. Установлено, що для умовного міста середнього розміру найдоцільнішим є поєднання оптичного рівня CWDM з кільцевою топологією та комутаційного рівня Carrier Ethernet.

2 ТЕХНОЛОГІЯ CWDM ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ МЕРЕЖІ

2.1 Фізичні основи спектрального ущільнення каналів

Технологія спектрального ущільнення каналів (WDM) базується на забезпеченні одночасного передавання кількома незалежними оптичними несучими з різними довжинами хвиль через одне оптичне волокно без їхньої взаємодії. Кожна довжина хвилі формує окремий оптичний канал для передавання індивідуального потоку даних. Процес об’єднання окремих каналів у груповий оптичний сигнал на стороні передавання здійснюється мультиплексором, тоді як демультиплексор на стороні приймання забезпечує розділення сигналу на окремі довжини хвиль для подальшого спрямування до відповідних приймачів [9].

Пропускна здатність волокна визначається його спектральними характеристиками, зокрема залежністю коефіцієнта згасання від довжини хвилі. Одномодове волокно (стандарт ITU-T G.652) має два традиційні вікна прозорості (близько 1310 нм та 1550 нм). Сучасні типи волокон з усуненим водним піком (ITU-T G.652.D) забезпечують низький рівень загасання в діапазоні 1260–1625 нм, що дозволяє реалізувати повний спектр каналів CWDM [9].

Ключовою відмінністю між технологіями ущільнення є міжканальний інтервал. У системах зі щільним ущільненням (DWDM) інтервал становить 0,8 нм (100 ГГц) або менше, що дає змогу задіяти сотні каналів, проте потребує застосування лазерів із термостабілізацією та прецизійних вузькосмугових фільтрів. Технологія розрідженого спектрального ущільнення (CWDM) характеризується інтервалом у 20 нм, що суттєво зменшує вимоги до точності та стабільності довжин хвиль випромінювачів [10].

Технологія CWDM стандартизована згідно з рекомендацією ITU-T G.694.2, яка визначає сітку центральних довжин хвиль із кроком 20 нм у діапазоні 1271–1611 нм (загалом 18 каналів). Використання широкого міжканального інтервалу дозволяє застосовувати нетермостабілізовані лазери з розподіленим зворотним зв'язком та широкосмугові тонкоплівкові фільтри, що забезпечує значну економічну ефективність порівняно з рішеннями DWDM.

Для проектованої мережі обрано стандартний набір із восьми каналів CWDM у довгохвильовій частині спектра (1470–1610 нм), що характеризується мінімальним згасанням та відсутністю впливу водного піку навіть при використанні волокон типу G.652. План розподілу довжин хвиль представлено на рис. 2.1, а їхні числові значення наведено в табл. 2.1.

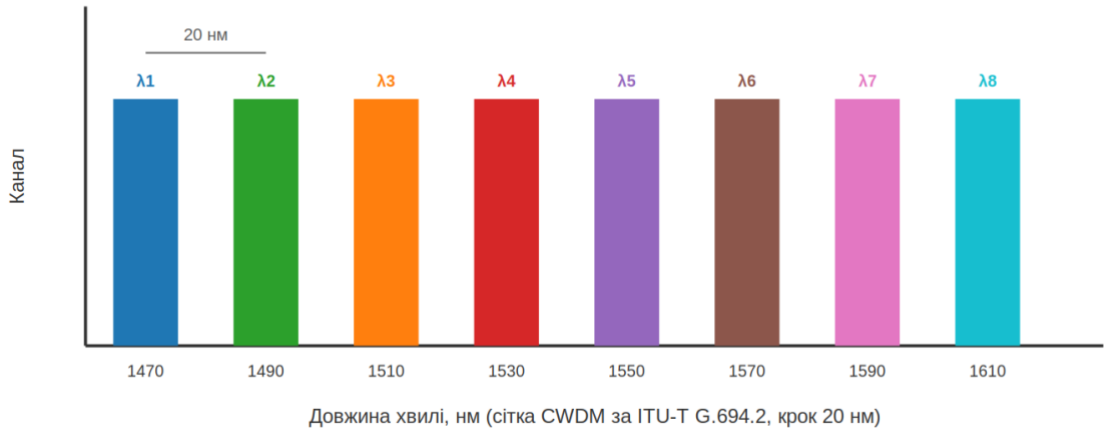


Рисунок 2.1 – План розподілу оптичних каналів CWDM (сітка ITU-T G.694.2)

Таблиця 2.1 – Параметри обраного набору каналів CWDM

Канал	**Довжина хвилі, нм**	**Згасання волокна, дБ/км**	**Призначення**
λ1	1470	0,26	агрегування, район А
λ2	1490	0,25	агрегування, район Б
λ3	1510	0,24	IPTV, район В
λ4	1530	0,22	дані, район Г
λ5	1550	0,21	магістральний вихід
λ6	1570	0,21	дані, район Д
λ7	1590	0,22	резерв/район Е
λ8	1610	0,24	службовий канал

Застосування восьми каналів забезпечує достатню кількість незалежних оптичних трактів для обслуговування всіх вузлів кільця та відгалужень за наявного навантаження, залишаючи резерв для подальшого розвитку. За

потреби набір може бути розширений до шістнадцяти чи вісімнадцяти каналів без заміни оптичного кабелю - достатньо доукомплектувати мультиплексори та встановити додаткові транспондери.

2.2 Порівняння CWDM та DWDM для міської мережі

Вибір між технологіями CWDM та DWDM для METRO-мережі є компромісом між пропускною здатністю та вартістю. DWDM забезпечує значно більшу кількість каналів та можливість оптичного підсилення, проте потребує дорожчого обладнання з термостабілізацією. CWDM пропонує помірну кількість каналів за суттєво нижчої вартості, що для міста середнього розміру з обмеженими відстанями є визначальним [11]. Порівняння технологій за ключовими критеріями наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння технологій CWDM та DWDM

Критерій	**CWDM**	**DWDM**
Міжканальний інтервал	20 нм	0,8 нм і менше
Кількість каналів	до 18	40, 80 і більше
Термостабілізація лазера	не потрібна	обов’язкова
Оптичне підсилення	обмежене	EDFA, широко
Дальність без регенерації	до 80 км	сотні км
Відносна вартість каналу	низька	висока
Сфера застосування	доступ, METRO	магістраль, METRO

Наведене порівняння підтверджує доцільність застосування CWDM для транспортної платформи міської мультисервісної мережі: за наявних відстаней до кількох десятків кілометрів технологія забезпечує необхідну пропускну здатність та дальність за мінімальних капітальних витрат, що є вирішальним для оператора міського масштабу.

2.3 Топології транспортних мереж рівня міста

Топологія мережі визначає спосіб з’єднання вузлів та безпосередньо впливає на надійність, вартість і масштабованість. Для транспортних мереж

застосовують топології «зірка», «шина», «кільце» та повнозв’язну (комірчасту) топологію. Порівняння основних топологій за характеристиками наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики топологій транспортної мережі

Характеристика	**Зірка**	**Кільце**	**Шина**	**Комірчаста**
Захист від відмови лінії	низький	високий	низький	дуже високий
Витрата волокна	середня	низька	низька	висока
Масштабованість	обмежена	добра	обмежена	добра
Складність керування	низька	середня	низька	висока
Відносна вартість	середня	низька	низька	висока

Кільцева топологія забезпечує оптимальний для рівня METRO баланс між надійністю та економічною ефективністю. Замикання вузлів у кільце дозволяє здійснювати передачу трафіку у двох напрямках, завдяки чому при виникненні розриву волокна або відмові сегмента мережі трафік автоматично перенаправляється зустрічним шляхом, забезпечуючи безперервність зв’язку між усіма вузлами. При цьому використання волоконно-оптичного ресурсу залишається помірним, а розширення мережі реалізується шляхом інтеграції нових вузлів до кільця або створення відгалужень [12].

Для проектованої мережі обрано топологію кільця з використанням територіальних відгалужень. Основу мережі складають вісім вузлів агрегації, розташованих у ключових локаціях міста, до яких підключені відгалуження, що обслуговують житлові райони. Зазначений гібридний підхід поєднує високу надійність кільцевої структури в опорній мережі з економічністю деревоподібних архітектур на периферійних ділянках. Детальний опис структури мережі наведено у наступному розділі.

2.4 Компоненти систем CWDM

2.4.1 Оптичне волокно як середовище передавання

Фундаментальним елементом волоконно-оптичних систем передавання даних є оптичне волокно - діелектричний хвилевід, спроможний забезпечувати трансляцію оптичного випромінювання на значні відстані з мінімальними

втратами. Глибокий аналіз фізичних та оптичних характеристик волокна є критично важливим для прецизійного проектування транспортних мереж, оскільки саме ці параметри визначають граничну дальність передавання, спектральну ємність системи та її пропускну здатність [13].

Структурно оптичне волокно складається з осердя з підвищеним показником заломлення та оболонки з меншим показником. Завдяки явищу повного внутрішнього відбиття на межі поділу середовищ оптичне випромінювання локалізується всередині осердя та поширюється вздовж волокна. Залежно від геометричних параметрів осердя класифікують багатомодове волокно, що підтримує поширення множинних просторових мод, та одномодове волокно, де реалізується режим поширення лише однієї фундаментальної моди.

У сучасних транспортних мережах використовується виключно одномодове волокно, що обумовлено відсутністю міжмодової дисперсії та можливістю забезпечення високошвидкісного передавання на великі дистанції. Найбільш розповсюдженим є стандарт ITU-T G.652, який передбачає діаметр осердя приблизно 9 мкм та оптимізацію характеристик для діапазону 1310 нм із можливістю ефективної експлуатації в діапазоні 1550 нм [14].

До ключових параметрів, що визначають ефективність проектування мережі, належать коефіцієнт згасання та дисперсійні характеристики. Коефіцієнт згасання, що вимірюється в дБ/км, відображає інтенсивність втрат потужності сигналу залежно від довжини хвилі. Мінімальні значення (близько 0,2 дБ/км) досягаються в спектральному діапазоні поблизу 1550 нм. Спектральна залежність згасання та розташування вікон прозорості є визначальними факторами при виборі діапазону для систем CWDM [14].

Дисперсія, своєю чергою, спричиняє часову деградацію оптичних імпульсів, обмежуючи максимальну швидкість та дальність передавання. У межах одномодового волокна переважає хроматична дисперсія, зумовлена залежністю групової швидкості від довжини хвилі. Для волокна G.652 у діапазоні 1550 нм показник хроматичної дисперсії становить близько 17 пс/(нм·км). Для міських мереж (METRO) протяжністю в десятки кілометрів рівень накопиченої дисперсії при швидкості 10 Гбіт/с зазвичай не виходить за межі допустимих значень, що дозволяє уникнути використання систем компенсації дисперсії.

Окремим аспектом є оптимізація властивостей волокна в зоні «водного піку» - локального збільшення згасання поблизу 1383 нм, викликаного впливом гідроксильних груп. У застарілих типах волокон цей ефект обмежував використання частини спектра CWDM. Сучасні вдосконалені волокна (специфікація G.652.D) із придушеним водним піком забезпечують стабільно низьке згасання в усьому діапазоні CWDM, що дає змогу повноцінно використовувати всі вісімнадцять каналів сітки передавання.

2.4.2 Джерела оптичного випромінювання

Джерелом випромінювання в системах CWDM виступають напівпровідникові лазери з розподіленим зворотним зв’язком, що генерують сигнал на фіксованій довжині хвилі з вузькою спектральною характеристикою. Ключовою перевагою технології CWDM є використання широкого міжканального інтервалу (20 нм), що усуває необхідність термостабілізації лазерів. Навіть за умов температурних коливань дрейф довжини хвилі залишається в межах, значно менших за інтервал між каналами, що запобігає їх перекриттю. Це суттєво оптимізує вартість та конструкцію обладнання [15].

2.4.3 Мультиплексори та демультиплексори

Мультиплексор забезпечує об’єднання оптичних сигналів різних довжин хвиль у груповий потік для передавання спільним волокном, тоді як демультиплексор виконує зворотну операцію розділення. У системах CWDM ці пристрої базуються переважно на тонкоплівкових інтерференційних фільтрах, які пропускають задану довжину хвилі, відбиваючи решту. Каскадна топологія фільтрів дає змогу послідовно вводити або виводити окремі канали. CWDM-мультиплексори є пасивними пристроями, що не потребують живлення та характеризуються високим рівнем надійності [15].

2.4.4 Оптичні мультиплексори введення/виведення (OADM)

Оптичний мультиплексор введення/виведення (OADM) є критично важливим компонентом вузлів кільцевих мереж. Він дозволяє на проміжних вузлах виділяти з групового сигналу визначені довжини хвиль для локальної обробки, заміщуючи їх новими сигналами аналогічних довжин хвиль, при цьому інші канали проходять транзитом без оптоелектронного перетворення.

Завдяки OADM досягається висока економічна ефективність мережі, оскільки кожен вузол опрацьовує виключно призначений для нього трафік [15].

2.4.5 Транспондери та приймачі

Транспондер здійснює перетворення клієнтського оптичного або електричного сигналу у формат відповідної довжини хвилі CWDM і навпаки. Він складається з приймача клієнтського сигналу, модуля обробки та передавача на цільовій довжині хвилі. Приймальний тракт транспондера включає фотодетектор, що перетворює оптичний сигнал в електричний, та підсилювальний каскад. Чутливість приймача - мінімальна потужність сигналу, необхідна для забезпечення заданої достовірності передавання - є ключовим параметром при розрахунку енергетичного бюджету.

Сукупність зазначених компонентів формує цілісну систему передавання CWDM. Ефективність функціонування мережі та гранична дальність передавання залежать від прецизійного підбору характеристик обладнання (потужності передавача, чутливості приймача, загасання мультиплексорів), що детально розглянуто у розділі 4.

2.4.6 Оптичні з’єднувачі та пасивна інфраструктура

Попри відсутність активних елементів, пасивна оптична інфраструктура суттєво впливає на технічні параметри мережі, зокрема на енергетичний бюджет та показники надійності. До складу цієї інфраструктури входять оптичні з’єднувачі, зварні з’єднання, оптичні кроси та розподільчі панелі.

Оптичні з’єднувачі забезпечують можливість роз’єднання волокон у точках комутації та підключення обладнання. Кожне роз’ємне з’єднання спричиняє загасання на рівні 0,3–0,5 дБ та є потенційним осередком втрат у разі забруднення або фізичного зносу. Тому кількість роз’ємних з’єднань мінімізується, а вимоги до якості комплектуючих залишаються високими. У розрахунках енергетичного бюджету враховано шість роз’ємних з’єднань на тракті [16].

Зварні з’єднання забезпечують нероз’ємну комутацію волокон із мінімальним загасанням (близько 0,05 дБ) і застосовуються для з’єднання будівельних відрізків кабелю. Вони вирізняються високою надійністю, проте потребують використання спеціалізованого монтажного обладнання.

Розрахунок передбачає наявність дванадцяти зварних з’єднань на тракті, що є стандартним показником для лінії довжиною близько 30 км.

Оптичні кроси та розподільники забезпечують упорядковану комутацію волокон, зручність доступу до обладнання та проведення діагностичних вимірювань. Належне проектування пасивної інфраструктури є запорукою простоти експлуатації та обслуговування мережі. Сумарні втрати в пасивних елементах враховані при розрахунку енергетичного бюджету, що підкреслює важливість дотримання технологічних стандартів монтажу.

2.4.7 Оптичні підсилювачі та регенерація сигналу

На великих відстанях передавання сигналу загасання може перевищувати енергетичний бюджет системи, що зумовлює необхідність підсилення або регенерації сигналу. Попри те, що для розглянутої METRO-мережі, яка охоплює відстані до кількох десятків кілометрів, підсилення не є обов’язковим, глибоке розуміння цих механізмів є критично важливим для оцінки перспектив масштабування мережевої інфраструктури.

Оптичне підсилення дозволяє збільшити потужність сигналу без попереднього перетворення в електричну форму, що забезпечує можливість одночасного підсилення всіх спектральних каналів. Найбільш поширеним рішенням є ербієві волоконно-оптичні підсилювачі (EDFA), які ефективно функціонують у діапазоні 1550 нм. Однак обмежена смуга пропускання цих підсилювачів не охоплює весь діапазон CWDM, що обмежує їх застосування в системах із розрідженим спектральним ущільненням переважно каналами в межах 1550 нм [17].

У цьому полягає фундаментальна відмінність між технологіями CWDM та DWDM: у щільних системах (DWDM), зосереджених у діапазоні 1550 нм, оптичне підсилення є стандартом, тоді як у широкосмугових системах CWDM його використання обмежене. Для збільшення дальності передавання в мережах CWDM зазвичай застосовують електричну регенерацію окремих каналів або обмежуються використанням каналів, що потрапляють у смугу підсилення.

Електрична регенерація передбачає перетворення оптичного сигналу на електричний, його відновлення та зворотну модуляцію в оптичний сигнал. Хоча такий підхід забезпечує повне відновлення якості сигналу, він потребує окремого обладнання для кожного каналу, що зумовлює додаткові капітальні

витрати. Перевагою обраного рішення для METRO-мережі є відсутність потреби у складних системах підсилення чи регенерації завдяки оптимізованим відстаням передавання, що спрощує архітектуру та підвищує економічну ефективність проєкту. У разі подальшого розширення мережі та збільшення відстаней ці механізми можуть бути впроваджені як додаткові інструменти.

2.5 Надійність оптичних компонентів

Надійність мережевої інфраструктури безпосередньо залежить від технічних характеристик використаних оптичних компонентів. Аналіз показників надійності є ключовим етапом проектування стабільної та відмовостійкої системи.

Пасивні оптичні компоненти, такі як волокно, з’єднувачі та мультиплексори, вирізняються високим рівнем надійності, що зумовлено відсутністю активних елементів та рухомих частин. Їхній середній час напрацювання на відмову (MTBF) вимірюється сотнями тисяч і мільйонами годин, що гарантує безперебійну роботу протягом усього терміну експлуатації мережі. Ця характеристика є вагомою перевагою оптичних систем, зокрема побудованих на технології CWDM.

Активні компоненти (джерела випромінювання, приймачі, електронне обладнання) мають дещо нижчі показники надійності через фізичні процеси деградації активних елементів. Проте сучасні компоненти цього класу також забезпечують високу тривалість роботи з MTBF у сотні тисяч годин. Найбільш чутливими до старіння є джерела випромінювання, параметри яких можуть поступово змінюватися в процесі експлуатації.

Для нівелювання ризиків деградації компонентів під час проектування закладається енергетичний запас та передбачається резервування критичних вузлів. Розрахований енергетичний бюджет із запасом близько 7 дБ гарантує працездатність мережі в межах нормативних значень навіть за умови поступового погіршення характеристик джерел та зростання загасання в компонентах протягом усього життєвого циклу мережі.

2.6 Бюджет потужності та запас на старіння

Належне проектування оптичної системи передавання даних вимагає врахування не лише початкових технічних характеристик компонентів, а й їхньої динаміки протягом усього життєвого циклу. Експлуатаційне погіршення параметрів оптичних елементів є неминучим процесом, який необхідно компенсувати шляхом закладення відповідного резерву в бюджеті оптичної потужності.

Основним чинником деградації системи є поступове зниження вихідної потужності джерел випромінювання. Крім того, протягом терміну експлуатації можливе зростання загасання в оптичних з’єднаннях, що зумовлено накопиченням забруднень, механічними впливами та природною деградацією матеріалів. Оскільки сумарне погіршення характеристик може сягати кількох децибелів, ці показники повинні бути інтегровані в проектні розрахунки [18].

Для забезпечення стабільної роботи системи до кінця терміну служби в бюджеті потужності передбачається експлуатаційний запас. У межах даного проекту закладено запас у розмірі 3 дБ, що відповідає галузевим стандартам і забезпечує компенсацію прогнозованої деградації. Залишковий запас (близько 7 дБ) додатково підвищує стійкість системи до непередбачуваних чинників.

Регулярний моніторинг оптичних параметрів дозволяє ефективно відстежувати стан системи та своєчасно вживати заходів у разі наближення значень до гранично допустимих. Комплексний підхід, що поєднує стратегічне планування енергетичного бюджету та періодичний контроль, є запорукою надійності та довговічності оптичної мережі.

2.7 Резервування оптичних волокон у кабельних системах

Раціональний розподіл волоконно-оптичного ресурсу є ключовим аспектом проектування, що визначає потенціал масштабованості мережі та рівень її відмовостійкості. У розробленій архітектурі мережі застосовуються такі принципи резервування:

Кабельні траси кільцевих ділянок містять щонайменше вісім волокон. Дві пари використовуються для організації двонапрямленого кільця із захистом, тоді як решта волокон формує оперативний резерв. Наявність резервних

потужностей дозволяє нарощувати пропускну здатність мережі шляхом інтеграції нових систем передавання, підключати додаткові сервіси, а також проводити швидку заміну пошкоджених ліній без необхідності виконання масштабних будівельних робіт.

З економічної точки зору закладання резерву волокон на етапі будівництва є цілком виправданим, оскільки вартість кабельної інфраструктури значно перевищує витрати на додаткові оптичні волокна. Такий підхід забезпечує довгостроковий захист інвестицій і надає можливість розвитку мережі без повторних інженерних робіт.

Важливою умовою експлуатації є ведення чіткого обліку та документування волокон, що запобігає виникненню колізій під час планування мережевих ресурсів. Впровадження сучасних систем керування інфраструктурою дозволяє автоматизувати процес моніторингу та раціонального використання оптичного ресурсу, забезпечуючи високу гнучкість розвитку мережі та оперативність відновлювальних робіт.

Висновки до розділу. Розглянуто фізичні основи спектрального ущільнення та параметри технології CWDM за рекомендацією ITU-T G.694.2. Обґрунтовано вибір набору з восьми каналів у діапазоні 1470–1610 нм. На підставі порівняння з DWDM показано доцільність застосування CWDM для міської мережі. Проаналізовано топології транспортних мереж та обґрунтовано вибір кільцевої топології з відгалуженнями за районами як оптимальної за критерієм «надійність/вартість» для умовного міста.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТРАНСПОРТНОЇ ПЛАТФОРМИ METRO-МЕРЕЖІ

3.1 Вихідні дані для проектування

Проектування транспортної платформи виконується для умовного міста з населенням близько 350 тис. осіб. Місто поділене на шість житлових районів різного розміру та щільності забудови, а також має центральну частину з підвищеною концентрацією ділового та комерційного трафіку. Оператор надає повний спектр послуг: широкосмуговий доступ до Інтернету, телебачення за протоколом IP, телефонію VoIP, а також послуги для корпоративних клієнтів - віртуальні приватні мережі та оренду каналів.

Основні вихідні дані для проектування узагальнено в табл. 3.1. Кількість абонентів визначено з урахуванням середнього складу домогосподарства та прогнозованого рівня проникнення послуг.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для проектування мережі

Параметр	**Значення**
Населення міста	≈ 350 000 осіб
Кількість районів	6
Кількість домогосподарств	≈ 130 000
Рівень проникнення послуг доступу	≈ 65 %
Кількість абонентів широкосмугового доступу	≈ 84 500
Частка абонентів IPTV	≈ 55 %
Частка абонентів VoIP	≈ 40 %
Кількість корпоративних клієнтів	≈ 1 200
Кількість вузлів кільця	8
Технологія транспортного рівня	CWDM, 8 каналів
Швидкість оптичного каналу	10 Гбіт/с (10GE)
Тип волокна	одномодове ITU-T G.652.D

3.2 Структурна схема транспортної мережі

Транспортна платформа мережі METRO спроєктована за топологією оптичного кільця, що об’єднує вісім вузлів агрегації. Один із вузлів функціонує як центральний, забезпечуючи підключення до магістральної мережі оператора та розміщення основного обладнання керування. Решта сім вузлів виконують функції агрегації на районному рівні. Периферійні райони інтегровані через деревоподібні відгалуження, що забезпечують пряме сполучення оптичних трактів із вузлами доступу в житлових масивах.

Загальна структурна схема мережі з кільцевою топологією та зональними відгалуженнями представлена на рис. 3.1. Суцільними лініями позначено робоче оптичне волокно кільця, штриховими - резервний канал для захисту трафіку, а лініями відгалужень — канали приєднання районних вузлів доступу.

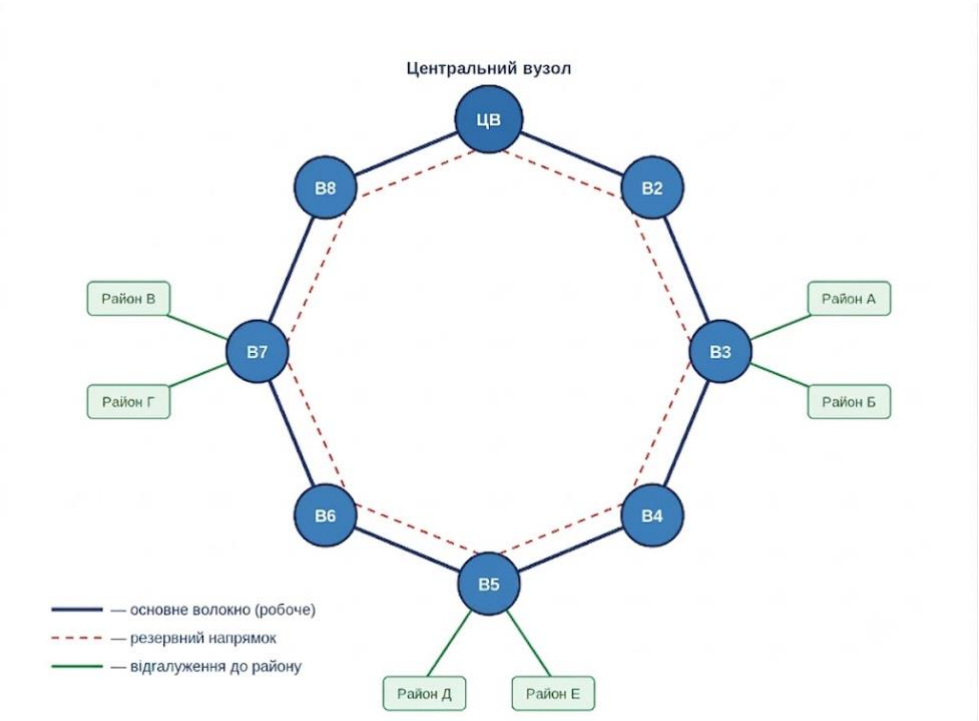


Рисунок 3.1 – Структурна схема транспортної платформи METRO-мережі з кільцевою топологією та відгалуженнями за районами

Кільце прокладається наявною або новоспорудженою волоконно-оптичною кабельною каналізацією міста. Для забезпечення захисту використовується щонайменше дві волоконні пари, розведені за можливості різними трасами, щоб уникнути одночасного пошкодження робочого та

резервного шляхів. Загальна довжина кільця для розглянутого міста становить близько 42 км, а довжина окремих відгалужень - від 2 до 8 км.

Розподіл вузлів мережі за районами та їхнє орієнтовне навантаження наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розподіл вузлів мережі за районами

Вузол	**Район / зона**	**Абонентів доступу**	**Довжина відгалуження, км**
ЦВ	центральна ділова зона	8 200	-
В2	район А	14 500	3,5
В3	район Б	12 800	5,0
В4	район В	11 200	4,2
В5	район Г	13 600	6,0
В6	район Д	10 400	8,0
В7	район Е	9 800	2,0
В8	приміська зона	4 000	7,5

3.3 Структура вузла мережі

Кожен мережевий вузол кільцевої топології розгортається за уніфікованою схемою, що оптимізує процеси експлуатації та резервування обладнання. До складу вузла входять такі ключові функціональні елементи: оптичний мультиплексор введення/виведення (OADM), транспондери, комутатор Carrier Ethernet та обладнання доступу. Структурна схема типового вузла представлена на рис. 3.2.

Функціональне призначення оптичного мультиплексора (OADM) полягає у вибірковому введенні та виведенні визначених довжин хвиль у межах кожного вузла. При цьому транзитні канали проходять крізь вузол без здійснення оптоелектронного перетворення. Така архітектурна особливість забезпечує економічну ефективність системи за рахунок мінімізації кількості необхідних транспондерів: обробка здійснюється виключно для довжин хвиль, призначених для відповідного вузла, тоді як решта сигналів спрямовується транзитом далі по кільцю.

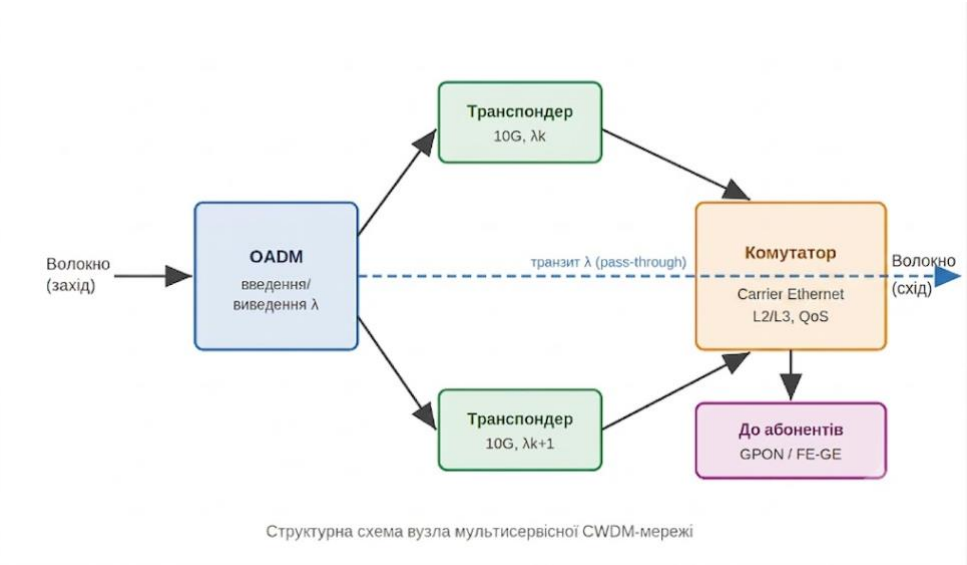


Рисунок 3.2 – Структурна схема вузла мультисервісної CWDM-мережі

Транспондери здійснюють конвертацію клієнтських сигналів у формат відповідної довжини хвилі CWDM і навпаки, при цьому кожен пристрій підтримує швидкість передавання даних 10 Гбіт/с. Комутатор Carrier Ethernet виконує агрегацію трафіку від обладнання доступу, його маркування за класами обслуговування (CoS), комутацію на основі VLAN, а також спрямування в оптичні канали. Обладнання доступу (GPON-термінали та комутатори доступу) забезпечує підключення кінцевих абонентів та передачу їхнього трафіку до вузла агрегації [15].

На центральному вузлі розміщується обладнання сполучення з магістральною мережею, система керування мережею та сервери надання послуг. Уніфікована структура вузлів забезпечує взаємозамінність компонентів та оптимізує формування резервного фонду обладнання.

Вибір локацій для розміщення вузлів агрегації є стратегічним етапом проектування, що безпосередньо впливає на довжину оптичних трактів, капітальні витрати на прокладання кабельних ліній та якість надання послуг. Розташування вузлів здійснюється на основі наступних критеріїв: наближеність до зон концентрації абонентів, наявність технічних приміщень з надійною системою електроживлення, доступність кабельної каналізації та забезпечення геометричної рівномірності розподілу вузлів у межах кільцевої структури.

У представленій топології вузли розміщені таким чином, щоб кожен із них обслуговував окремий житловий масив або компактну групу кварталів. Центральний вузол локалізовано в діловому центрі міста, де зосереджено

основний сегмент корпоративних клієнтів та розташовано точку виходу до магістральної мережі оператора. Таке рішення дозволяє мінімізувати протяжність критичних трактів для корпоративного трафіку та магістральних потоків.

Дистанцію між суміжними вузлами кільця визначено в межах 3-7 км, що сприяє рівномірному розподілу навантаження та відповідає вимогам енергетичного бюджету оптичних ліній. Загальна довжина кільця становить близько 42 км, що є стандартом для міст середнього розміру та дозволяє здійснювати передачу даних за технологією CWDM без застосування оптичних підсилювачів. Відгалуження до споживачів реалізовані за деревоподібною структурою, що забезпечує ефективне використання волоконно-оптичного ресурсу.

При проектуванні кабельних трас враховано вимогу щодо просторового рознесення робочого та резервного напрямків кільця. Впровадження принципу прокладання волокон робочого та резервного шляхів різними трасами кабельної каналізації мінімізує ризики одночасного пошкодження обох каналів під час проведення ремонтних чи аварійних робіт, що є обов'язковою умовою забезпечення відмовостійкості кільцевої топології.

3.4 Розрахунок кабельної інфраструктури

Кабельна інфраструктура є фундаментом транспортної мережі та її найбільш капіталомістким компонентом. Розрахунок потреби в оптичному кабелі здійснюється на основі затвердженої топології з урахуванням протяжності магістральних кілець, довжини відгалужень та необхідної ємності волокон.

Кількість волокон у кабелі визначається вимогами до організації кільцевого захисту та стратегією перспективного розвитку мережі. Для реалізації двонаправленого кільця із захистом необхідно щонайменше дві пари волокон. Враховуючи потреби системи керування, резервування та надання додаткових послуг, проект передбачає використання кабелю ємністю не менше восьми волокон для магістральних ділянок та чотирьох волокон — для відгалужень. Такий підхід є економічно доцільним, оскільки різниця у вартості

кабелю з більшою кількістю волокон є мінімальною порівняно із загальними витратами на проведення монтажних робіт.

Загальна довжина оптичного кабелю розраховується як сума довжини кільцевих ділянок та всіх відгалужень із урахуванням технологічних запасів на прокладання, з’єднання та ремонтні вставки. Для об’єкта дослідження довжина кільця складає близько 42 км, сумарна довжина відгалужень - 36 км; з урахуванням 15-відсоткового запасу загальна протяжність кабельної траси становить близько 90 км. Цей показник є базовим для оцінки вартості інженерних робіт.

Прокладання кабелю виконується переважно з використанням існуючої міської кабельної каналізації; у разі її відсутності застосовуються методи підвісу на опорах або безпосереднього прокладання в ґрунт. Вибір методу прокладання безпосередньо впливає на надійність та кошторисну вартість проекту. З метою забезпечення ефективності кільцевого захисту під час планування мережі обов’язково враховується географічне рознесення трас робочого та резервного напрямків.

3.5. Механізми захисту кільця

Для аналізу функціонування кільцевого захисту слід розглянути роботу мережі в штатному режимі та в режимі аварійного відновлення після розриву волокна. У нормальному режимі передача трафіку здійснюється робочим напрямком за найкоротшим маршрутом між вузлами. У разі виникнення пошкодження система моніторингу фіксує втрату сигналу та ініціює процедуру захисного перемикання, спрямовуючи трафік резервним шляхом в обхід пошкодженої ділянки. Графічну ілюстрацію зазначених режимів наведено на рис. 3.3.

Як показано на рисунку, у штатному режимі передача трафіку між вузлами A та B здійснюється безпосередньо через суміжну ділянку кільця. У разі виникнення пошкодження на цій ділянці відбувається автоматичне перенаправлення трафіку в протилежному напрямку через вузли D та C, що забезпечує безперервність зв'язку між усіма вузлами мережі. Час виявлення відмови та перемикання не перевищує 50 мс, що є критично важливим для послуг реального часу та повністю відповідає стандартам операторського

класу. Зазначена особливість гарантує високий коефіцієнт готовності мережі, розрахунок якого наведено у розділі 4.

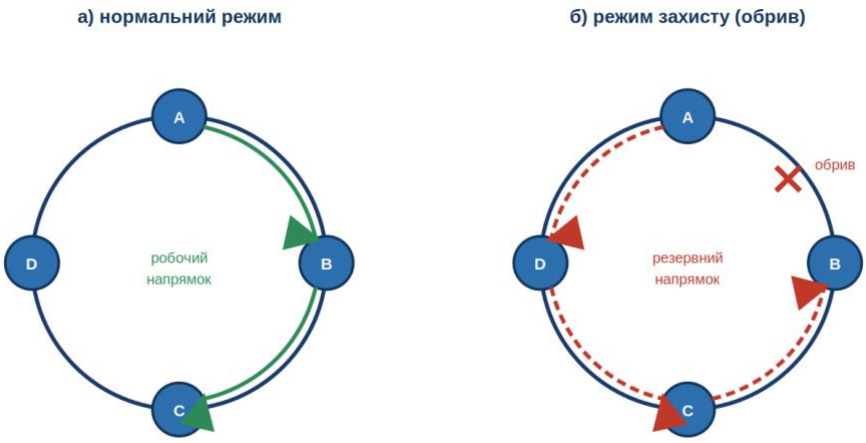


Рисунок 3.3 – Механізм захисного перемикання кільцевої мережі: а) нормальний режим; б) режим захисту після обриву волокна

3.6 Розрахунок абонентської ємності районів

Визначення кількості потенційних абонентів району базується на показнику кількості домогосподарств, який розраховується шляхом ділення чисельності населення району на середній розмір домогосподарства. Для досліджуваного міста встановлено середній розмір домогосподарства на рівні 2,7 особи, що відповідає стандартним значенням для міських поселень середнього масштабу. Загальна кількість абонентів доступу в районі визначається добутком кількості домогосподарств на коефіцієнт проникнення послуг широкосмугового доступу.

Рівень проникнення послуг корелює із соціально-економічними характеристиками території, щільністю забудови та кон’юнктурою конкурентного середовища. У центральних, густонаселених районах із переважно багатоквартирною забудовою рівень проникнення сягає 70 %, тоді як у приміських зонах із переважанням приватної забудови цей показник становить близько 50 %. Середній рівень проникнення для міста визначено на рівні 65 %, що відповідає вихідним даним табл. 3.1.

Частка споживачів окремих послуг у структурі абонентської бази залежить від попиту на конкретну послугу та маркетингової стратегії оператора. Зокрема, для послуг телебачення цей показник становить приблизно 55 % від загальної кількості абонентів доступу, для телефонії - близько 40 %. Зазначені частки використовуються при розрахунках навантаження кожної складової у розділі 4. Абонентська ємність районів, обчислена за цією методикою, наведена в табл. 3.2 та є базовою для подальшого проектування навантаження та розподілу мережевих ресурсів.

3.7 Резервування обладнання вузлів

На додаток до резервування трактів на рівні оптичного кільця, ключовою складовою забезпечення надійності мережі є резервування обладнання в межах вузла. З метою мінімізації часу простою внаслідок відмови окремих модулів, усі критичні елементи вузла підлягають резервуванню.

Найбільш вразливим елементом є система електроживлення, вихід з ладу якої спричиняє зупинку роботи всього активного обладнання вузла. Для забезпечення безперебійної роботи встановлюються джерела безперебійного живлення з акумуляторними батареями, що гарантують функціонування вузла протягом визначеного часу при відсутності зовнішнього живлення. На вузлах вищого рівня критичності додатково передбачається використання резервних генераторів, що запобігає масовому перериванню надання послуг абонентам у разі збоїв в енергомережі.

Стратегія резервування комутаційного обладнання диференціюється залежно від ієрархічної важливості вузла. На центральних вузлах та вузлах із високим навантаженням застосовується принцип дублювання комутаторів та їхніх ключових модулів. На менш навантажених об’єктах достатнім є формування резервного фонду обладнання для оперативного відновлення працездатності в разі виникнення несправностей. Пасивні оптичні компоненти (мультиплексори та модулі введення/виведення) характеризуються високим рівнем надійності та забезпечують транзит трафіку через кільце навіть у разі відмови активного обладнання.

3.8 Забезпечення масштабованості структури

Масштабованість є однією з фундаментальних вимог до транспортної мережі, зумовленою постійним зростанням навантаження та розширенням спектра послуг протягом усього життєвого циклу системи. Запропонована архітектура забезпечує багаторівневу масштабованість, що дає змогу нарощувати функціональні можливості мережі без потреби в кардинальній реконструкції інфраструктури [18].

Масштабованість пропускної здатності досягається завдяки можливості поетапного збільшення кількості оптичних каналів. Початкова конфігурація з восьми каналів CWDM може бути розширена до вісімнадцяти шляхом модернізації мультиплексорів та встановлення додаткових приймально-передавальних модулів. Це дозволяє збільшити ємність оптичного рівня більш ніж удвічі без втручання в кабельні мережі, забезпечуючи необхідний резерв для майбутнього зростання навантаження.

Масштабованість на рівні вузлів реалізується через можливість інтеграції нових вузлів у кільцеву топологію або створення відгалужень від існуючих вузлів. Процедура додавання вузла до кільця передбачає його розмикання, при цьому завдяки механізмам резервування переривання в наданні послуг зведено до мінімуму. Підключення нових відгалужень до наявних вузлів здійснюється без впливу на функціонування основного кільця [18].

Масштабованість за кількістю послуг та абонентів забезпечується гнучкістю комутаційного рівня, що дозволяє активувати нові сервіси та підключати абонентів програмними засобами в межах наявної пропускної здатності. У разі вичерпання ресурсів здійснюється нарощування пропускної здатності описаними вище методами. Комплексний підхід до масштабованості забезпечує довгострокову стійкість мережі до розвитку та оптимізацію інвестиційних витрат, що є стратегічною перевагою розробленого рішення.

3.9 Розрахунок кількості обладнання доступу

Процес планування мережі передбачає визначення обсягів обладнання доступу, необхідного для підключення абонентів у кожному окремому районі.

Розрахунок є базовим етапом для формування специфікації обладнання та проведення техніко-економічного обґрунтування проекту.

Кількість терміналів пасивної оптичної мережі (PON) розраховується з урахуванням кількості абонентів у районі та технічної ємності термінала. Одиниця обладнання підтримує певну кількість абонентських підключень відповідно до коефіцієнта розгалуження (split ratio). Загальна кількість терміналів для району визначається шляхом ділення сумарної кількості абонентів на ємність одного термінала з відповідним округленням до цілого значення в бік збільшення.

Зокрема, для району, що обслуговується вузлом B2 (14 500 абонентів), при ємності термінала близько 1000 підключень, необхідно інсталювати 15 терміналів. Для інших районів кількість обладнання розраховується пропорційно. Сумарна кількість обладнання для всієї мережі, визначена за результатами підсумовування показників усіх районів, представлена у специфікації (додаток А).

До складу обладнання доступу, окрім терміналів PON, входять оптичні розподільники, призначені для розгалуження сигналу, а також абонентські пристрої (ONT/ONU). Точний розрахунок загальної кількості обладнання є критично важливим для планування закупівель, оцінки капітальних витрат (CAPEX) та забезпечення високого ступеня достовірності бюджетування проекту.

Висновки до розділу. Визначено вихідні дані для проектування транспортної платформи METRO-мережі умовного міста. Розроблено структурну схему мережі з кільцевою топологією на вісім вузлів та відгалуженнями за районами. Запропоновано уніфіковану структуру вузла на основі OADM, транспондерів та комутатора Carrier Ethernet. Розроблено схему захисту трафіку рівня оптичного кільця з часом перемикання до 50 мс.

4 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ

4.1 Розрахунок навантаження мережі

Розрахунок навантаження виконується з метою визначення сумарної смуги пропускання, яку має забезпечити транспортна платформа. Навантаження формується трьома основними складовими: трафіком широкосмугового доступу до Інтернету, трафіком телебачення IPTV та трафіком телефонії VoIP. Для корпоративного сегмента навантаження враховується окремою складовою.

Смуга пропускання, потрібна для обслуговування абонентів широкосмугового доступу одного вузла, визначається за виразом (4.1):

$$B_{дост} = N_{аб} \cdot V_{аб} \cdot k_{од}, \tag{4.1}$$

де $N_{аб}$ - кількість абонентів доступу вузла; $V_{аб}$ - середня гарантована швидкість на одного абонента; $k_{од}$ - коефіцієнт одночасності, що враховує неодночасність користування послугою.

Приймаючи середню гарантовану швидкість $V_{аб}$ = 20 Мбіт/с та коефіцієнт одночасності $k_{од}$ = 0,15, для вузла з найбільшим навантаженням (район А, 14 500 абонентів) отримуємо смугу доступу

$$B_{дост} \approx 14\,500 \cdot 20 \cdot 0{,}15 = 43\,500 \text{ Мбіт/с} \approx 43{,}5 \text{ Гбіт/с у пікові години.}$$

З урахуванням статистичного мультиплексування та профілю реального навантаження ефективна смуга становить близько 22 Гбіт/с.

Смуга, потрібна для послуги IPTV, визначається кількістю одночасно активних потоків та бітрейтом одного потоку за виразом (4.2):

$$B_{IPTV} = N_{TV} \cdot k_{акт} \cdot V_{потоку}\,, \tag{4.2}$$

де N_{TV} - кількість абонентів IPTV вузла; $k_{акт}$ - частка одночасно активних абонентів; $V_{потоку}$ - середній бітрейт одного відеопотоку. Приймаючи частку абонентів IPTV 55 %, частку активних $k_{акт}$ = 0,4 та середній бітрейт потоку 8

Мбіт/с (з урахуванням каналів високої чіткості), для того самого вузла отримуємо

$$B_{IPTV} \approx 14\,500 \cdot 0{,}55 \cdot 0{,}4 \cdot 8 \approx 25\,500 \text{ Мбіт/с}.$$

Застосування групового передавання (multicast) для популярних каналів суттєво знижує це значення до близько 6 Гбіт/с.

Смуга для телефонії VoIP розраховується за виразом (4.3):

$$B_{VoIP} = N_{VoIP} \cdot k_{ерл} \cdot V_{кодека}\,, \tag{4.3}$$

де N_{VoIP} - кількість абонентів VoIP; $k_{ерл}$ - питоме телефонне навантаження на абонента в Ерлангах; $V_{кодека}$ - смуга одного розмовного каналу з урахуванням службових заголовків. Внесок VoIP у сумарну смугу порівняно невеликий і для розглянутого вузла не перевищує 0,4 Гбіт/с.

Сумарне навантаження вузла визначається як сума складових усіх послуг. Результати розрахунку навантаження для всіх вузлів мережі наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахункове навантаження вузлів мережі

Вузол	**Доступ, Гбіт/с**	**IPTV, Гбіт/с**	**VoIP, Гбіт/с**	**Разом, Гбіт/с**
ЦВ	12,4	3,6	0,2	16,2
В2	22,0	6,0	0,4	28,4
В3	19,3	5,3	0,3	24,9
В4	16,9	4,6	0,3	21,8
В5	20,5	5,6	0,4	26,5
В6	15,7	4,3	0,3	20,3
В7	14,8	4,0	0,3	19,1
В8	6,0	1,6	0,1	7,7

Аналіз таблиці показує, що навантаження окремих вузлів перевищує пропускну здатність одного оптичного каналу 10 Гбіт/с, тому для найбільш завантажених вузлів передбачається розподіл трафіку між кількома довжинами хвиль з подальшим агрегуванням каналів засобами Carrier Ethernet.

4.2 Розрахунок кількості та ємності оптичних каналів

Кількість оптичних каналів, потрібних для обслуговування вузла, визначається відношенням його сумарного навантаження до пропускної здатності одного каналу за виразом (4.4):

$$n_к = ceil(B_{вузла} / V_{каналу}), \quad (4.4)$$

де $B_{вузла}$ - сумарне навантаження вузла; $V_{каналу}$ = 10 Гбіт/с - пропускна здатність одного каналу; ceil - округлення до більшого цілого. Для найбільш завантаженого вузла B2 із навантаженням 28,4 Гбіт/с потрібно

$$n_к = \text{ceil}(28{,}4 / 10) = 3 \text{ канали}.$$

Сумарна ємність транспортної платформи визначається сумою навантажень усіх вузлів з урахуванням трафіку, що виходить на магістральну мережу, та резерву на розвиток. Загальне навантаження мережі становить близько 165 Гбіт/с. За наявних восьми каналів CWDM по 10 Гбіт/с сукупна ємність кільця в одному напрямку становить 80 Гбіт/с, а з урахуванням двонапрямленого передавання та просторового повторного використання довжин хвиль на різних ділянках кільця досяжна ємність істотно зростає.

Ключовою властивістю кільцевої мережі є можливість повторного використання довжин хвиль: канал, що завершується на певному вузлі, може бути знову задіяний на наступній ділянці для іншого трафіку. Завдяки цьому вісім довжин хвиль забезпечують обслуговування всіх вузлів за умови раціонального планування розподілу каналів. Розподіл довжин хвиль між вузлами та ділянками кільця наведено в табл. 4.2.

Наведений розподіл забезпечує обслуговування розрахункового навантаження з достатнім запасом. Восьмий канал λ_8 виділено під службовий трафік системи керування мережею, що ізолює керувальний трафік від інформаційного та підвищує стійкість системи адміністрування.

Таблиця 4.2 – Розподіл оптичних каналів між вузлами

Вузол	**Призначені λ**	**Кількість каналів**	**Ємність, Гбіт/с**
ЦВ	λ5 (магістраль)	2	20
В2	λ1, +2 агрег.	3	30
В3	λ2, +1 агрег.	3	30
В4	λ3, +1 агрег.	3	30
В5	λ4, +1 агрег.	3	30
В6	λ6, +1 агрег.	3	30
В7	λ7	2	20
В8	λ1 (повт.)	1	10

4.3 Розрахунок енергетичного бюджету оптичної лінії

Енергетичний бюджет волоконно-оптичної лінії визначає максимально допустиму відстань передавання, за якої потужність оптичного сигналу на вході приймача залишається не нижчою за поріг чутливості. Розрахунок виконується для найдовшої ділянки тракту — від центрального вузла до найвіддаленішого вузла кільця з урахуванням відгалуження.

Умова працездатності оптичного тракту записується у вигляді виразу (4.5):

$$P_{пер} - A_{заг} \geq P_{пр.min} + M_{екс}, \tag{4.5}$$

де $P_{пер}$ - рівень потужності передавача; $A_{заг}$ - сумарне згасання тракту; $P_{пр.min}$ - чутливість приймача; $M_{екс}$ - експлуатаційний запас на старіння елементів та деградацію. Сумарне згасання тракту визначається за виразом (4.6):

$$A_{заг} = \alpha \cdot L + A_{рз} \cdot n_{рз} + A_{знз} \cdot n_{знз} + A_{мкс}, \tag{4.6}$$

де α - коефіцієнт згасання волокна; L - довжина тракту; $A_{рз}$ - згасання рознімного з'єднувача; $n_{рз}$ - кількість рознімних з'єднувачів; $A_{знз}$ - згасання зварного з'єднання; $n_{знз}$ - кількість зварних з'єднань; $A_{мкс}$ - сумарне згасання мультиплексорів/демультиплексорів CWDM у тракті.

Вихідні дані для розрахунку енергетичного бюджету наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані для розрахунку енергетичного бюджету

Параметр	**Позначення**	**Значення**
Рівень потужності передавача	P_пер	+3 дБм
Чутливість приймача (10 Гбіт/с)	P_пр_min	−23 дБм
Коефіцієнт згасання волокна	α	0,25 дБ/км
Довжина тракту (найдовший)	L	29 км
Згасання рознімного з’єднувача	A_рз	0,5 дБ
Кількість рознімних з’єднувачів	n_рз	6
Згасання зварного з’єднання	A_знз	0,05 дБ
Кількість зварних з’єднань	n_знз	12
Згасання пари мультиплексорів CWDM	A_мкс	5,0 дБ
Експлуатаційний запас	M_екс	3,0 дБ

Підставляючи наведені значення у вираз (4.6), обчислюємо сумарне згасання тракту:

$$A_{заг} = 0{,}25 \cdot 29 + 0{,}5 \cdot 6 + 0{,}05 \cdot 12 + 5{,}0 = 7{,}25 + 3{,}0 + 0{,}6 + 5{,}0 = 15{,}85 \text{ дБ}.$$

Перевіряємо умову працездатності за виразом (4.5): доступний бюджет становить $P_{пер} - P_{пр.min} = 3 - (-23) = 26$ дБ. Витрачено на згасання та запас $A_{заг} + M_{екс} = 15{,}85 + 3{,}0 = 18{,}85$ дБ.

Оскільки 18,85 дБ < 26 дБ, умова працездатності виконується із залишковим запасом близько 7,15 дБ. Це підтверджує, що обране обладнання забезпечує стійке передавання на найдовшому тракті мережі без застосування оптичних підсилювачів, а наявний запас достатній для подальшого розвитку мережі та компенсації деградації.

Окрім згасання, для швидкості 10 Гбіт/с необхідно врахувати обмеження, зумовлене хроматичною дисперсією волокна. Для одномодового волокна G.652 на відстанях до кількох десятків кілометрів накопичена дисперсія залишається значно нижчою за граничну для формату передавання 10 Гбіт/с, тому дисперсійних компенсаторів не потрібно. Таким чином, дальність тракту обмежується саме енергетичним бюджетом, а не дисперсією.

4.4 Розрахунок показників надійності мережі

Надійність транспортної мережі оцінюється коефіцієнтом готовності, який характеризує ймовірність перебування мережі в працездатному стані. Для окремого елемента коефіцієнт готовності визначається за виразом (4.7):

$$K_г = T_{напр} / (T_{напр} + T_{відн}) \quad (4.7)$$

де $T_{напр}$ - середнє напрацювання на відмову; $T_{відн}$ - середній час відновлення. Значення показників надійності основних елементів мережі наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Показники надійності елементів мережі

Елемент	$T_{напр}$**, год**	$T_{відн}$**, год**	$K_г$
Оптичний кабель (на 100 км)	125 000	12	0,999904
Оптичний мультиплексор OADM	500 000	4	0,999992
Транспондер 10G	200 000	3	0,999985
Комутатор Carrier Ethernet	150 000	3	0,999980
Джерело живлення вузла	100 000	2	0,999980

Для послідовного з’єднання елементів (наприклад, у межах тракту без резервування) результуючий коефіцієнт готовності визначається добутком коефіцієнтів готовності окремих елементів за виразом (4.8):

$$K_{г.посл} = K_{г1} \cdot K_{г2} \cdot \ldots \cdot K_{гn}. \quad (4.8)$$

Застосування кільцевої топології з резервуванням суттєво підвищує надійність, оскільки відмова однієї ділянки не призводить до втрати зв’язності. Для системи з резервуванням, у якій робочий та резервний шляхи з’єднані паралельно, результуючий коефіцієнт неготовності визначається за виразом (4.9):

$$Q_{г.рез} = Q_{г1} \cdot Q_{г2}, \quad (4.9)$$

де $Q_г = 1 - K_г$ - коефіцієнт неготовності. Приймаючи коефіцієнт неготовності одного напрямку кільця $Q_{г1} = Q_{г2} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-4}$, для резервованої ділянки отримуємо $Q_{г.рез} \approx (1{,}5 \cdot 10^{-4})^2 = 2{,}25 \cdot 10^{-8}$, що відповідає коефіцієнту готовності $K_{г.рез} \approx 0{,}99999998$.

Отримане значення коефіцієнта готовності відповідає рівню надійності операторського класу «п’ять дев’яток» і навіть перевищує його. Це означає, що сумарний час недоступності захищеної ділянки мережі не перевищує кількох хвилин на рік, що є прийнятним для надання послуг з гарантованою якістю обслуговування.

4.5 Оцінка показників якості обслуговування

Транспортна платформа має забезпечувати виконання вимог до якості обслуговування, сформульованих у розділі 1. Сумарна затримка передавання складається із затримки поширення сигналу волокном, затримки в комутаційному обладнанні та затримки в чергах. Затримка поширення визначається за виразом (4.10):

$$t_{пош} = L / v = L \cdot n / c, \tag{4.10}$$

де L - довжина тракту; v - швидкість поширення світла у волокні; $n \approx 1{,}468$ - показник заломлення серцевини; c - швидкість світла у вакуумі. Для найдовшого тракту 29 км затримка поширення становить

$$t_{пош} = 29 \cdot 10^3 \cdot 1{,}468 / (3 \cdot 10^8) \approx 142 \text{ мкс},$$

що є мізерним значенням порівняно з допустимою затримкою послуг реального часу (150 мс).

Затримка в комутаційному обладнанні та чергах за належного планування пропускної здатності та застосування механізмів пріоритезації не перевищує кількох мілісекунд для трафіку реального часу. Таким чином, сумарна затримка в транспортній мережі є значно меншою за граничні значення, наведені в табл. 1.1, що гарантує виконання вимог якості обслуговування для всіх класів трафіку.

Для гарантування якості обслуговування в мережі застосовуються механізми маркування трафіку за класами, пріоритетне обслуговування черг та резервування смуги для послуг реального часу. Оптичний транспортний рівень CWDM забезпечує детерміновану затримку та відсутність втрат на фізичному рівні, тож якість обслуговування визначається переважно налаштуванням комутаторів Carrier Ethernet.

4.6 Прогнозування зростання навантаження

Проектування транспортної мережі повинно враховувати не лише поточне, а й перспективне навантаження, оскільки термін експлуатації мережної інфраструктури становить багато років, а обсяги трафіку протягом цього періоду істотно зростають. Недооцінка перспективного навантаження призводить до передчасного вичерпання ресурсу мережі та потреби в дорогій позаплановій модернізації, тоді як надмірне резервування збільшує початкові капітальні витрати.

Для прогнозування зростання навантаження застосовують модель експоненційного зростання, за якою обсяг трафіку в майбутньому визначається за виразом (4.11):

$$B(t) = B_0 \cdot (1 + r)^t, \tag{4.11}$$

де B_0 - поточне навантаження; r - середньорічний темп приросту; t - період прогнозування в роках. Приймаючи середньорічний темп приросту трафіку r = 0,3 (30 % на рік, що відповідає спостережуваним тенденціям), за п’ять років навантаження зросте у $(1,3)^5 \approx 3,7$ раза.

Результати прогнозування сумарного навантаження мережі на п’ятирічну перспективу наведено в табл. 4.5. Розрахунок показує, що поточне навантаження близько 165 Гбіт/с за п’ять років може перевищити 600 Гбіт/с.

Наведений прогноз обґрунтовує закладену в проект масштабованість. Початковий набір із восьми каналів CWDM з можливістю розширення до вісімнадцяти забезпечує понад дворазовий запас ємності оптичного рівня, а подальше зростання може бути покрите переходом на щільніше ущільнення DWDM зі збереженням кабельної інфраструктури та кільцевої топології. Це

гарантує тривалий термін ефективної експлуатації мережі без докорінної перебудови.

Таблиця 4.5 – Прогноз зростання сумарного навантаження мережі

Рік експлуатації	**Коефіцієнт зростання**	**Навантаження, Гбіт/с**
0 (початковий)	1,00	165
1	1,30	215
2	1,69	279
3	2,20	363
4	2,86	472
5	3,71	612

4.7 Візуалізація розрахункового навантаження

Для наочного порівняння навантаження вузлів мережі результати розрахунку, наведені в табл. 4.1, подано у вигляді діаграми на рис. 4.1. Діаграма дозволяє візуально оцінити розподіл навантаження між вузлами та виявити найбільш завантажені вузли, що потребують виділення кількох оптичних каналів.

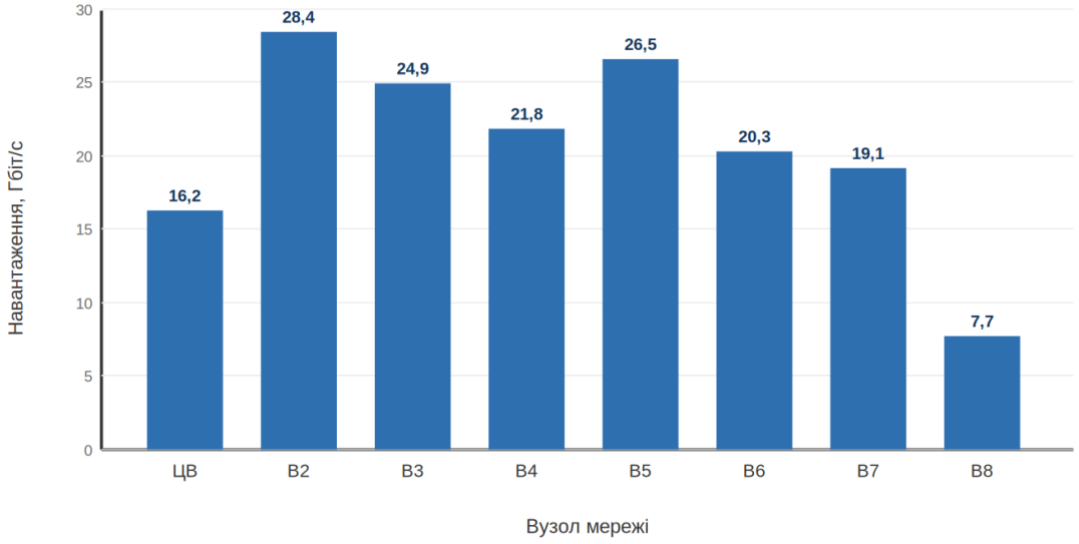


Рисунок 4.1 – Розподіл розрахункового навантаження за вузлами мережі

З діаграми чітко видно, що найбільше навантаження припадає на вузол В2, який обслуговує найгустіше населений район А, а також на вузли В5 та В3. Ці вузли потребують виділення трьох оптичних каналів кожен. Вузол В8, що обслуговує приміську зону з малою щільністю абонентів, має найменше навантаження й обслуговується одним каналом. Такий нерівномірний розподіл є типовим для реальних міст та врахований під час планування розподілу довжин хвиль у табл. 4.2.

4.8 Візуалізація енергетичного бюджету

Для наочного подання розрахунку енергетичного бюджету, виконаного в підрозділі 4.3, побудовано діаграму зміни рівня оптичної потужності вздовж тракту, наведену на рис. 4.2. Діаграма показує послідовне зменшення потужності сигналу на кожному елементі тракту - від рівня передавача до рівня на вході приймача - та ілюструє наявний запас відносно чутливості приймача.

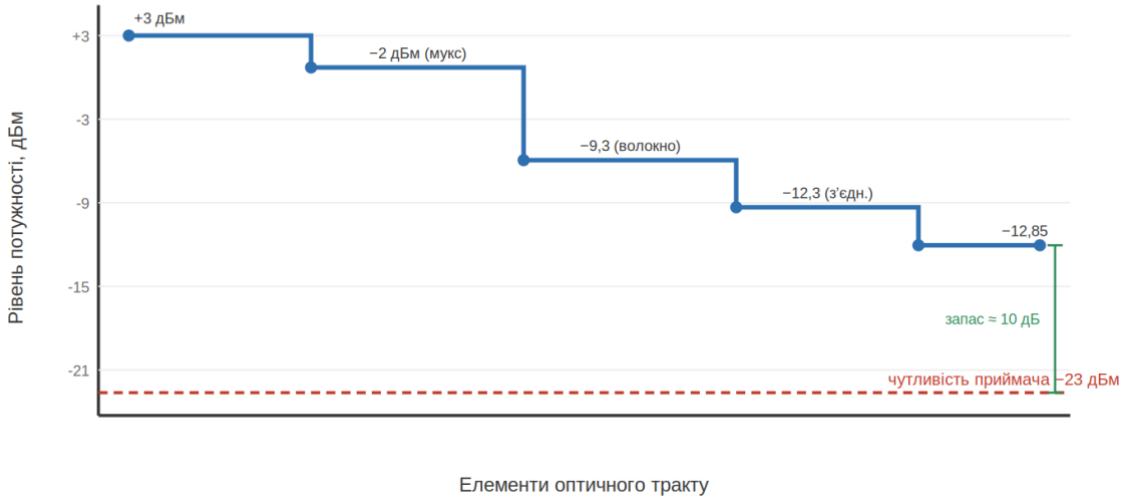


Рисунок 4.2 – Зміна рівня оптичної потужності вздовж оптичного тракту

Діаграма наочно демонструє, що навіть після проходження всього тракту з урахуванням згасання волокна, з’єднувачів та мультиплексорів рівень сигналу на вході приймача залишається вищим за поріг чутливості з відчутним запасом. Це підтверджує правильність вибору обладнання та працездатність мережі на найдовшому тракті без застосування оптичних підсилювачів. Наявний запас

забезпечує стійкість до деградації елементів у процесі експлуатації та можливість подальшого розвитку мережі.

4.9 Зведене оцінювання відповідності вимогам

Завершуючи розрахункову частину, доцільно зіставити отримані результати з вимогами, сформульованими на етапі постановки задачі, та підтвердити відповідність розробленого рішення цим вимогам. Таке зіставлення є критерієм успішності проектування.

Щодо пропускної здатності: розраховане навантаження мережі близько 165 Гбіт/с повністю забезпечується вісьмома каналами CWDM з урахуванням їх повторного використання, причому із запасом на перспективне зростання. Вимога щодо пропускної здатності виконується. Щодо дальності: розрахунок енергетичного бюджету підтвердив працездатність найдовшого тракту із запасом близько 7 дБ без оптичних підсилювачів. Вимога щодо дальності виконується.

Щодо надійності: застосування кільцевого резервування забезпечує коефіцієнт готовності захищених ділянок на рівні «п’ять дев’яток», що відповідає вимогам операторського класу. Вимога щодо надійності виконується. Щодо якості обслуговування: розрахована сумарна затримка значно менша за граничні значення для послуг реального часу, а достовірність передавання відповідає вимогам усіх послуг. Вимога щодо якості обслуговування виконується.

Таким чином, усі основні вимоги до транспортної платформи, сформульовані на етапі постановки задачі, виконуються розробленим рішенням. Це підтверджує коректність обраних технологічних та архітектурних рішень і завершує розрахункове обґрунтування проекту. Отримані кількісні результати узагальнено в додатку Б.

4.10 Детальний розрахунок навантаження центрального вузла

Для ілюстрації методики розрахунку навантаження розглянемо детально розрахунок для центрального вузла, який має особливу структуру навантаження через переважання корпоративного трафіку та функцію виходу на магістральну мережу.

Центральний вузол обслуговує ділову зону міста з 8200 абонентами доступу та значною кількістю корпоративних клієнтів. Складова навантаження від абонентів доступу розраховується за виразом (4.1) з тими самими параметрами, що й для інших вузлів: за середньої гарантованої швидкості 20 Мбіт/с та коефіцієнта одночасності 0,15 ефективна смуга доступу становить близько 12,4 Гбіт/с з урахуванням статистичного мультиплексування.

Складова навантаження від телебачення для центрального вузла менша через меншу частку житлової забудови та становить близько 3,6 Гбіт/с з урахуванням групового передавання. Складова телефонії становить близько 0,2 Гбіт/с. Окремою значною складовою є корпоративний трафік та трафік віртуальних приватних мереж, який для ділової зони є суттєвим, проте частково враховується в складовій доступу через спільні механізми передавання.

Особливістю центрального вузла є агрегування трафіку, що виходить на магістральну мережу. Через центральний вузол проходить значна частина трафіку доступу до зовнішніх ресурсів мережі Інтернет усіх районів міста, оскільки саме тут розташована точка виходу на магістральну мережу оператора. Цей транзитний трафік обслуговується виділеними каналами λ_5 та враховується під час планування пропускної здатності виходу на магістраль. Сумарне власне навантаження центрального вузла становить близько 16,2 Гбіт/с, як зазначено в табл. 4.1, проте з урахуванням транзитного магістрального трафіку загальна пропускна здатність вузла має бути істотно більшою.

4.11 Зведене оцінювання ресурсів мережі

Для узагальнення результатів розрахункової частини доцільно навести зведене оцінювання ресурсів мережі, яке відображає ступінь використання наявних ресурсів та наявні резерви. Таке оцінювання є основою для прийняття рішень щодо розвитку мережі.

За спектральним ресурсом мережа використовує вісім каналів CWDM з можливістю розширення до вісімнадцяти, що означає використання близько 44% потенційного спектрального ресурсу. Наявний резерв забезпечує понад дворазове нарощування ємності оптичного рівня без зміни кабельної інфраструктури. За пропускною здатністю поточне навантаження близько 165

Гбіт/с обслуговується наявними каналами з урахуванням повторного використання із запасом на зростання.

За енергетичним ресурсом найдовший тракт використовує близько 73% доступного енергетичного бюджету, залишаючи запас близько 27% на деградацію елементів та розвиток. За ресурсом надійності мережа забезпечує коефіцієнт готовності на рівні «п’ять дев’яток», що відповідає найвищим вимогам операторського класу. За ресурсом кабельної інфраструктури закладено запас волокон, достатній для тривалого розвитку мережі.

Зведене оцінювання ресурсів показує, що розроблена мережа має збалансований розподіл ресурсів із достатніми резервами на всіх напрямах для тривалої експлуатації та розвитку. Відсутність вичерпаних ресурсів свідчить про правильність проектних рішень, а наявність резервів забезпечує гнучкість розвитку. Це узагальнене оцінювання підтверджує обґрунтованість та збалансованість розробленого проектного рішення в цілому.

Висновки до розділу. Виконано розрахунок навантаження вузлів мережі, яке становить у сумі близько 165 Гбіт/с. Визначено потрібну кількість оптичних каналів та розподіл довжин хвиль з урахуванням повторного використання. Розраховано енергетичний бюджет найдовшого тракту, який підтвердив працездатність мережі із запасом близько 7 дБ без оптичних підсилювачів. Оцінено показники надійності: застосування кільцевого резервування забезпечує коефіцієнт готовності на рівні «п’ять дев’яток». Показано, що сумарна затримка в транспортній мережі значно менша за граничні значення, що гарантує виконання вимог якості обслуговування.

5 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА КОНФІГУРУВАННЯ МЕРЕЖІ

5.1 Вибір обладнання транспортної платформи

Реалізація запроектованої мережі потребує вибору обладнання, що відповідає обраній технології CWDM та швидкості каналів 10 Гбіт/с. Основними позиціями є пасивні мультиплексори/демультиплексори CWDM, оптичні мультиплексори введення/виведення OADM, транспондери 10G, а також комутатори Carrier Ethernet із підтриманням оптичних інтерфейсів для встановлення кольорових оптичних модулів [20].

Пасивні CWDM-мультиплексори не потребують живлення та є високонадійними компонентами, що позитивно позначається на загальній надійності мережі. Для кільцевих вузлів застосовуються OADM-модулі, що дозволяють вивести на вузлі одну–три довжини хвилі, пропустивши решту транзитом. Транспондери реалізуються у вигляді змінних оптичних модулів формату SFP+ із фіксованими довжинами хвиль CWDM, що встановлюються безпосередньо в порти комутаторів агрегування [20].

Орієнтовний перелік основного обладнання одного вузла кільця наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Основне обладнання типового вузла кільця

Обладнання	**Кількість**	**Призначення**
Модуль OADM CWDM	2	введення/виведення λ, захист кільця
Комутатор Carrier Ethernet	1	агрегування та комутація трафіку
Оптичний модуль CWDM SFP+ 10G	3–6	транспондери каналів
Обладнання доступу (OLT/комутатор)	1–2	підключення абонентів
Джерело безперебійного живлення	1	резервування живлення
Оптичний кросовий розподільник	1	комутація волокон

5.2 Рекомендації щодо конфігурування комутаційного рівня

Комутаційний рівень мережі базується на використанні комутаторів Carrier Ethernet, що забезпечують агрегацію трафіку, його класифікацію відповідно до вимог QoS та розподіл за цільовими оптичними каналами. Для логічного сегментування трафіку в межах спільного фізичного середовища застосовується технологія віртуальних локальних мереж (VLAN), де кожна послуга або група абонентів ідентифікується унікальним тегом VLAN.

Для гарантування якості обслуговування (QoS) на комутаційному рівні впроваджено маркування пакетів із використанням пріоритетних полів та механізмів черговості (queuing). Трафік реального часу (VoIP, сигналізація) отримує найвищий пріоритет із резервуванням смуги пропускання; потокове відео обробляється з середнім пріоритетом, тоді як трафік передавання даних обслуговується за залишковим принципом. Такий підхід забезпечує дотримання жорстких вимог щодо затримки та відсутності втрат для критично важливих сервісів навіть за умов пікових навантажень.

Забезпечення відмовостійкості на комутаційному рівні досягається шляхом інтеграції протоколів швидкого відновлення кільця, синхронізованих із механізмами захисту оптичного рівня. Це дозволяє досягти часу відновлення зв’язності, що є критично важливим для сервісів реального часу. Централізоване управління мережею здійснюється через виділений службовий канал (λ8), що забезпечує повну ізоляцію керувального трафіку від інформаційного.

5.3 Впровадження та розвиток мережі

Реалізація проекту здійснюється поетапно. На першому етапі розгортається оптичне кільце та вводиться в експлуатацію обладнання центрального вузла й ключових вузлів у найбільш завантажених районах, що забезпечує швидкий запуск надання послуг. Другий етап передбачає підключення решти вузлів кільця та розвиток периферійної інфраструктури. На третьому етапі проводиться масштабування пропускної здатності відповідно до динаміки зростання навантаження.

Архітектура мережі передбачає природну масштабованість. Збільшення пропускної здатності досягається шляхом встановлення додаткових довжин хвиль у мультиплексори та інсталяції додаткових транспондерів без необхідності заміни оптичного кабелю. У разі вичерпання ресурсу восьми каналів CWDM, система може бути розширена до вісімнадцяти каналів або переведена на технологію DWDM зі збереженням існуючої кільцевої топології та кабельної інфраструктури.

5.4 Забезпечення інформаційної безпеки транспортної мережі

Враховуючи критичний статус транспортної мережі оператора зв’язку, інформаційна безпека є фундаментальною складовою проекту. Загрози класифікуються за рівнями: фізичний (несанкціоноване втручання у волоконно-оптичну лінію), рівень управління (неавторизований доступ до систем адміністрування) та рівень трафіку (перехоплення або спотворення даних).

На фізичному рівні захист забезпечується суворим контролем доступу до кабельної інфраструктури, постійним моніторингом оптичних параметрів для виявлення сторонніх підключень за змінами характеристик згасання та використанням оптичного шифрування для високопріоритетних каналів. Використання технології VLAN гарантує логічну ізоляцію клієнтських сегментів у межах спільної інфраструктури [19].

Захист рівня управління реалізується шляхом виділення службового каналу в окрему довжину хвилі, впровадження протоколів аутентифікованого доступу до обладнання, диференціації прав адміністраторів та ведення системних журналів аудиту (audit logs). Ізоляція керувального трафіку суттєво підвищує стійкість системи до атак з боку інформаційної мережі [19].

Безпека інформаційного трафіку абонентів базується на комплексному підході: окрім базових гарантій ізоляції, що надаються транспортною мережею, корпоративним клієнтам пропонуються рішення на базі віртуальних приватних мереж (VPN), які забезпечують надійну логічну ізоляцію трафіку протягом усього маршруту проходження.

5.5 Узагальнення технічних рішень

Підсумовуючи аналіз практичних аспектів реалізації, доцільно узагальнити ключові технічні рішення, використані при розробці транспортної платформи, та їхнє обґрунтування.

На фізичному рівні застосовано одномодове оптичне волокно з нульовим піком поглинання (Zero Water Peak), прокладене за кільцевою топологією з територіальним рознесенням трас основного та резервного напрямків. Такий підхід забезпечує мінімальні показники затухання в усьому діапазоні CWDM та високу ефективність захисту. На оптичному рівні обрано технологію CWDM (вісім каналів у діапазоні 1470–1610 нм), що забезпечує необхідну пропускну здатність за оптимізованих капітальних витрат завдяки використанню нетермостабілізованих випромінювачів та пасивних мультиплексорів.

Комутаційний рівень базується на технології Carrier Ethernet, яка гарантує ефективну агрегацію пакетного трафіку, гнучку сегментацію послуг із використанням VLAN та підтримку механізмів QoS. Обрана мережева топологія - восьмивузлове кільце з радіальними відгалуженнями - забезпечує оптимальний баланс надійності та вартості для міської інфраструктури середнього масштабу. Захист трафіку здійснюється на рівні оптичного кільця зі швидкістю перемикання, що не перевищує 50 мс.

Система керування мережею реалізована за централізованим принципом із виділеним службовим каналом, що гарантує керованість та стабільність адміністрування. Відмовостійкість системи досягається шляхом комплексного резервування на рівні кільцевих сегментів та вузлового обладнання. Зазначені рішення підтверджені відповідними розрахунками та аналітичними даними, сформованими в попередніх розділах, і разом утворюють цілісну, збалансовану та економічно доцільну платформу мультисервісної METRO-мережі, що відповідає встановленим вимогам.

5.6 Організація моніторингу мережі

Ефективна експлуатація мережі потребує впровадження розвиненої системи моніторингу, яка забезпечує безперервний контроль стану інфраструктури, оперативну ідентифікацію інцидентів та накопичення даних

для подальшого аналізу. Організація системи моніторингу є невід'ємним компонентом загальної архітектури управління мережею.

Моніторинг охоплює кілька ключових аспектів:

- контроль доступності: відстеження працездатності вузлів і ліній зв'язку з негайною сигналізацією про відмови та ініціюванням процедур відновлення;

- контроль продуктивності: моніторинг параметрів навантаження каналів, затримок, відсотків втрат пакетів та інших показників якості обслуговування (QoS), що дозволяє діагностувати перевантаження та деградацію сервісів до їх впливу на кінцевого споживача;

- моніторинг оптичних параметрів: аналіз рівнів потужності та затухання сигналів у лініях. Це надає змогу виявляти деградацію оптичного тракту на ранніх етапах. Зокрема, фіксація поступового зростання затухання є індикатором можливих пошкоджень, що дозволяє виконувати профілактичне обслуговування до виникнення аварійних ситуацій.

Дані моніторингу консолідуються для аналізу тенденцій, стратегічного планування розвитку мережі та оптимізації розподілу ресурсів. Аналіз історичних даних щодо навантаження дозволяє прогнозувати динаміку зростання трафіку та завчасно здійснювати модернізацію ємності. Впровадження сучасних систем моніторингу з елементами автоматизованого аналізу та машинного виявлення аномалій є фундаментом для переходу до моделі проактивної експлуатації, що дозволяє запобігати виникненню інцидентів, а не обмежуватися лише їх усуненням.

Висновки до розділу. Здійснено вибір обладнання транспортної платформи на основі пасивних CWDM-мультиплексорів, модулів OADM, транспондерів 10G та комутаторів Carrier Ethernet. Сформульовано рекомендації щодо конфігурування комутаційного рівня із застосуванням VLAN та механізмів забезпечення якості обслуговування. Запропоновано поетапну стратегію впровадження та обґрунтовано можливості подальшого масштабування мережі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання розроблення транспортної платформи мультисервісної METRO-мережі міста з населенням близько 350 тис. осіб на основі технології розрідженого спектрального ущільнення CWDM та кільцевої топології з відгалуженнями за районами. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку транспортних мереж метрополійного рівня. Установлено, що для міста середнього розміру найбільш раціональним є поєднання оптичного транспортного рівня на основі CWDM з кільцевою топологією та комутаційного рівня на основі технології Carrier Ethernet, яке забезпечує оптимальне співвідношення пропускної здатності, надійності та вартості.

2. Обґрунтовано вибір технології CWDM за рекомендацією ITU-T G.694.2 з набором восьми каналів у діапазоні 1470–1610 нм. Порівняння з технологією DWDM підтвердило, що для наявних міських відстаней CWDM забезпечує потрібну пропускну здатність за суттєво нижчих капітальних витрат завдяки застосуванню нетермостабілізованих джерел випромінювання.

3. Розроблено структурну схему транспортної платформи у вигляді оптичного кільця на вісім вузлів агрегування із відгалуженнями до шести житлових районів. Запропоновано уніфіковану структуру вузла на основі оптичного мультиплексора введення/виведення, транспондерів 10G та комутатора Carrier Ethernet, що спрощує експлуатацію та резервування обладнання.

4. Виконано розрахунок навантаження мережі, яке в сумі становить близько 165 Гбіт/с. Визначено потрібну кількість оптичних каналів та розроблено раціональний розподіл довжин хвиль з урахуванням їх повторного використання на різних ділянках кільця.

5. Розраховано енергетичний бюджет найдовшого оптичного тракту завдовжки 29 км. Сумарне згасання тракту становить 15,85 дБ за доступного бюджету 26 дБ, що забезпечує працездатність мережі із залишковим запасом близько 7 дБ без застосування оптичних підсилювачів.

6. Оцінено показники надійності мережі. Застосування кільцевого резервування з часом перемикання до 50 мс забезпечує коефіцієнт готовності

захищених ділянок на рівні «п’ять дев’яток», що відповідає вимогам операторського класу.

7. Показано, що сумарна затримка передавання в транспортній мережі значно менша за граничні значення для послуг реального часу, що гарантує виконання вимог до якості обслуговування для всіх класів трафіку.

8. Сформульовано рекомендації щодо вибору обладнання, конфігурування комутаційного рівня та поетапного впровадження мережі. Обґрунтовано можливості подальшого масштабування шляхом нарощування кількості каналів та переходу на DWDM зі збереженням кабельної інфраструктури.

9. Виконано оцінювання економічної та експлуатаційної ефективності розробленого рішення. Показано, що застосування CWDM забезпечує економію капітальних витрат близько третини порівняно з рішенням на основі DWDM за задоволення тих самих технічних вимог, а також низькі експлуатаційні витрати завдяки енергоефективності пасивних оптичних компонентів та високій надійності мережі. Розроблене рішення забезпечує захищеність інвестицій та тривалий життєвий цикл завдяки збереженню кабельної інфраструктури за модернізації активного обладнання.

Отримані результати та розроблена методика розрахунку можуть бути використані під час проектування транспортних сегментів міських мультисервісних мереж операторів зв’язку, а також у навчальному процесі під час вивчення дисциплін, пов’язаних з оптичними транспортними мережами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко О. В. Оптичні телекомунікаційні системи: підручник. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019. 356 с.

2. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Телекомунікаційні мережі: підручник. Київ : Техніка, 2018. 792 с.

3. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи передавання: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 284 с.

4. ITU-T Recommendation G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. Geneva : ITU, 2003. 8 p.

5. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Geneva: ITU, 2016. 24 p.

6. ITU-T Recommendation G.671. Transmission characteristics of optical components and subsystems. Geneva: ITU, 2019. 62 p.

7. ITU-T Recommendation G.8032. Ethernet ring protection switching. Geneva: ITU, 2020. 92 p.

8. MEF 6.3. Subscriber Ethernet Services Definitions. Los Angeles: Metro Ethernet Forum, 2019. 118 p.

9. MEF 10.4. Subscriber Ethernet Service Attributes. Los Angeles: Metro Ethernet Forum, 2018. 96 p.

10. IEEE Std 802.3-2018. IEEE Standard for Ethernet. New York: IEEE, 2018. 5600 p.

11. IEEE Std 802.1Q-2018. Bridges and Bridged Networks. New York: IEEE, 2018. 1993 p.

12. Ramaswami R., Sivarajan K., Sasaki G. Optical Networks: A Practical Perspective. 3rd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2010. 928 p.

13. Keiser G. Optical Fiber Communications. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. 656 p.

14. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2010. 626 p.

15. Гуртовцев А. Л. Технології транспортних мереж WDM. Зв’язок. 2019. № 3. С. 12–19.

16. Корнейчук В. І., Панфілов І. П. Оптичні системи передачі: навч. посібник. Одеса : ОНАЗ, 2017. 208 с.

17. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Сучасні телекомунікаційні системи. Київ: Наукова думка, 2018. 400 с.

18. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Комп’ютерні мережі. Принципи, технології, протоколи. Київ: BHV, 2020. 944 с.

19. Гринфилд Д. Оптичні мережі: пер. з англ. Київ : ДиаСофт, 2018. 256 с.

20. Величко М. А., Скляров О. К. Волоконно-оптична техніка та системи зв’язку. Харків: ХНУРЕ, 2019. 312 с.