

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 другий (магістерський)

Аналіз особливостей планування мереж для надання

послуг інтернет з використанням технології PON

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІзм-19-2

Ключко А.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації

та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____

«Інформаційно-мережна інженерія»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Харченко Н.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2021 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

/ Ключко А.В. /

Керівник

/ Харченко Н.А. /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання
 Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
 (повна назва)
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-наукова
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)
 Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ключко Андрію Володимировичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз особливостей планування мереж для надання послуг інтернет з використанням технології PON

затверджена наказом університету від 25 березня 2021 р. № 33 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 24 травня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Побудувати оптичну мережу доступу для міста Ватутіно Черкаської області, необхідно спланувати підключення абонентів методом доводження оптичної лінії до будинку. Використовувати OLT з SFP C++ модулями, ONT з оптичними трансиверами класу B+. Провести розробку плану мережі відповідно до територіального розміщення перспективних абонентів, та перевірити її працездатність у відповідності до розрахованих характеристик розгалужувачів та бюджету лінії. Провести аналіз етапів планування мережі та планування необхідних вимірювань. Обрати необхідне обладнання.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ та висновки

1 Аналіз особливостей побудови сучасних оптичних мереж доступу

2 Дослідження архітектури та принципу дії технології PON

3 Аналіз особливостей побудови оптичної мережі доступу на базі технології FTTH

4 Планування мережі доступу міста на основі технології FTTH PON

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва та мета роботи; архітектурні рішення технологій FTTx; організація FTTH на базі PON; технології PON нового покоління (NG-PON); проблеми при побудові PON і методи їх вирішення; загальний підхід до формування оптичної інфраструктури GPON; топологічна схема мережі доступу міста Ватутіно на основі технології GEPON; аналіз особливостей виявлення дефектів у лінії при тестуванні мереж PON; фактори, що впливають на якість передачі в PON; вимірювання оптичної потужності на виході передавальних пристроїв; вимірювання згасання в оптичному лінійному тракці; висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів атестаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	25.03.21	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	26.03.21	виконано
3	Вступ	10.04.21	виконано
4	Аналіз особливостей побудови сучасних оптичних мереж доступу	11.04-25.04.21	виконано
5	Дослідження архітектури та принципу дії технології PON	26.04-30.04.21	виконано
6	Аналіз особливостей побудови оптичної мережі доступу на базі технології FTTH	01.05-19.05.21	виконано
7	Планування мережі доступу міста на основі технології FTTH PON	20.05-04.06.21	виконано
8	Висновки	05.06.21	виконано
9	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	06.06-25.06.21	виконано

Дата видачі завдання 25 березня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Харченко Н.А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 90 с., 41 рис., 7 табл., 22 джерел, 2 додатки.

Об'єкт дослідження - локальна мережа доступу.

Мета роботи - побудова оптичної мережі доступу на базі технології PON.

Розглянуто принципи й особливості побудови сучасних оптичних мереж доступу, їх функціональні вузли й компоненти. Проаналізовано особливості побудови мереж доступу на базі технології PON. Обрано й обґрунтовано встаткування планованої мережі FTTH.

У практичній частині розроблена й обґрунтована схема мережі абонентського доступу FTTH у місті та проведено розрахунки бюджету лінії для перевірки працездатності розроблювальної мережі. Також проведено теоретичний аналіз дефектів, які проявлялися в процесі монтажу і налагодження мереж PON.

Робота становить інтерес у рамках побудови абонентських систем доступу, так як системи зв'язку архітектури FTTH на основі технології PON здатні забезпечити надання максимально можливої смуги пропускання та високої якості зв'язку абонентам мережі.

ВОЛОКНО ДО БУДИНКУ, ОПТИЧНИЙ ЛІНІЙНИЙ ТЕРМІНАЛ,
ОПТИЧНИЙ МЕРЕЖНИЙ ТЕРМІНАЛ, «ТОЧКА-БАГАТОТОЧКА», PON,
WDM, CPE, ТОПОЛОГІЯ, СПЛІТТЕР

THE ABSTRACT

Explanatory note: 90p., 41 fig., 7 tabl., 22 sources, 2 app.

The object of research - the local access network.

The purpose of work - construction of optical access network based on PON technology

Principles and features of modern optical access networks construction their optical submachines and components are considered. The model topological structures of access networks construction are analysed. Chosen and grounded equipment of local access network on the base of FTTH technology.

In the practical part the scheme of the FTTH subscriber access network in the city is developed and substantiated and calculations of the budget of the line for check of serviceability of the developing network are carried out. Theoretical analysis of defects that were manifested in the process of installation and adjustment of PON networks was also performed.

The work is of interest in the construction of subscriber access systems, as FTTH communication systems based on PON technology are able to provide the highest possible bandwidth and high quality communication to network subscribers.

FIBER TO THE HOME, OPTICAL LINE TERMINAL, OPTICAL NETWORK TERMINAL, POINT-TO-MULTIPOINT, PON, WDM, CPE, TOPOLOGY, SPLITTER

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ.....	12
1.1 Концепція розвитку сучасних мереж абонентського доступу.....	13
1.2 Загальна концепція розвитку оптичних мереж доступу.....	14
1.3 Тенденції розвитку мереж на основі PON.....	18
1.4 Архітектура й принцип дії PON.....	23
2 ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ТЕХНОЛОГІЇ PON.....	26
2.1 Основні елементи PON.....	26
2.2 Організація архітектурного рішення FTTH на базі PON.....	28
2.3 Основні принципи планування технології FTTH.....	34
3 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ FTTH.....	38
3.1 Проблеми при побудові PON і методи їх вирішення.....	38
3.1.1 Слабкий сигнал у абонента.....	38
3.1.2 Неконтрольоване випромінювання в дереві на довжині хвилі 1310 нм.....	39
3.1.3 Флуд.....	40
3.1.4 Застосування вимірювального встаткування в PON.....	41
3.1.5 Проблема побудови «останніх миль».....	42
3.2 Способи прокладки кабелю на «останній милі».....	43
3.3 Вибір і обґрунтування типу оптичного волокна.....	44
3.4 Вибір ділянок.....	46
3.5 Види сполучних роз'ємів у PON.....	47
3.6 Облаштування вузлів розподілу в PON.....	49
4 ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ МІСТА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ FTTH PON.....	51
4.1 Постановка завдання.....	51
4.2 Архітектура мережі PON.....	51
4.3 Пасивні елементи мережі.....	55
4.4 Кабель та його прокладка.....	57

4.5 Методика розрахунку оптичного бюджету потужності й бюджету втрат лінії.....	58
4.6 Аналіз особливостей виявлення дефектів у лінії при тестуванні мереж PON.....	63
4.7 Види вимірювань у PON.....	67
4.7.1 Будівельно-монтажні вимірювання на PON.....	68
4.7.2 Приймально-здавальні вимірювання на PON.....	72
4.7.3 Експлуатаційні вимірювання на PON.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	77
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	79
ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ.....	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- AWG - Arrayed Waveguide Grating - Ґрати на основі масиву хвилеводів;
- CPE – Customer Premise Equipment – [Телекомунікаційне обладнання](#), розташоване в приміщенні клієнта;
- FITB - Fiber In The Building - Організація розподільної мережі усередині будинку;
- FSAN - Full Service Access Network - Мережа доступу з повним набором послуг;
- FTTB - Fiber to the Building - Волокно до будинку;
- FTTC - Fiber to the Curb - Волокно до мікрорайону, кварталу або групи будинків;
- FTTH - Fiber to the Home - Волокно до будинку (квартири);
- FTTN - Fiber to the Node - Волокно до мережного вузла;
- FTTx - Fiber to the x - Волокно до x;
- INT - Integrated Network Terminal - Інтегрований мережний термінал;
- NAP - Network Access Protection - Пункт доступу до мережі;
- NAU - Network Access Unit - Модуль мережного доступу;
- NIM - Network Interface Module - Мережний інтерфейсний модуль;
- ODF - Optical Distribution Frame - Оптичний крос високої щільності;
- ODN - Optical distribution node - Оптичний розподільний вузол;
- OLT - Optical Line Terminal - Оптичний лінійний термінал;
- ONT - Optical Network Terminal - Оптичний мережний термінал;
- ONU - Optical Network Unit - Кінцевий оптичний мережний блок;
- P2MP - Point-to-Multipoint - Топологія «точка-багатоточка»;
- P2P - Point to Point - Топологія «точка-точка»;
- PAU - PON Access Unit - Модуль доступу PON;
- PON - Passive Optical Networking - Пасивна оптична мережа;
- SIM - Service Interface Module - Сервісний інтерфейсний модуль;
- SNI - Service Node Interfaces - Інтерфейс сервісних вузлів;
- TDMA - Time Division Multiple Access - Множинний доступ з часовим розподілом;
- WDM - Wavelength-division multiplexing - Хвильове спектральне мультиплексування;

АРП - Автоматичне регулювання підсилення;

ВОК - Волоконно-оптичний кабель;

ВОЛЗ - Волоконно-оптична лінія зв'язку;

ОВ - Оптичне волокно;

ОМД - Оптична мережа доступу;

ОП - Оптичний підсилювач;

СКС - Структурована кабельна система.

ВСТУП

На сьогоднішній день оптичне волокно за рахунок своєї практично необмеженої пропускної здатності є основним середовищем для передачі голосу й даних у інфокомунікаційних мережах. Бурхливий розвиток інтернету став можливим також за рахунок розповсюдження високошвидкісних оптичних ліній зв'язку між вузлами інтернет мережі. Використання волоконно-оптичних кабелів дозволило істотно збільшити якість обслуговування клієнтів телекомунікаційних мереж і запропонувати їм нові послуги. Першочергово, перехід на оптику відбувся в секторі мереж для бізнесу, як наслідок з'явилися віртуальні офіси, компанії з розподіленою структурою, загальні корпоративні бази даних у хмарних сховищах, віддалені робочі місця, й т.д. Все це стало можливо за рахунок швидкісного каналу передачі даних, що був організований по оптичному кабелю.

Хоча волоконно-оптичні лінії не мають значних обмежень у пропускній спроможності каналів, існує одна перешкода, що ускладнює, їхнє активне впровадження у приватний сектор і в малий бізнес - це висока вартість підключення окремого абонента. Адже чим більша кількість підключень типу «точка-точка» (найпростіший варіант реалізації підключення абонента), тим більше потрібно активних і пасивних компонентів, волоконно-оптичних кабелів з великою кількістю волокон. Вартість будівництва й експлуатації такої мережі буде занадто високою.

Для вирішення таких питань та підвищення економічної ефективності оптичних мереж доступу активно впроваджується технологія PON (Passive Optical Network) - пасивна оптична мережа, що складається тільки з пасивних елементів, які не потребують електричного живлення та відрізняються більш низькою вартістю. Розробка й впровадження таких систем є актуальним завданням, що підвищує ефективність використання волоконно-оптичних мереж зв'язку, як на магістральних, так і на абонентських ділянках.

Дана кваліфікаційна робота присвячена вивченню основних принципів побудови мереж абонентського доступу на основі пасивних мереж PON і побудова «останньої милі», що базується на концепції проведення волокна до дубинку користувача - FTTH.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

1.1 Концепція розвитку сучасних мереж абонентського доступу

Одним з головних факторів, що підкреслюють епоху стрімкого розвитку телекомунікаційних мереж, є безперервний ріст обсягів переданої інформації. Причому у найближчому майбутньому не передбачається зменшення темпів росту принаймні в найближчі 5-10 років. З табл. 1.1 видно, темпи зростання смуга пропускання в міру появи нових послуг та медіа-додатків. Це зобов'язує провайдерів при побудові сучасних абонентських мереж мати запас по нарощуванню, як з точки зору смуги пропускання каналів, так і зі сторони зайнятості портів мережного обладнання. Тому, не залежно від того, чи планується будувати нову мережу, чи мається на увазі реорганізація та нарощування існуючої, необхідно завжди враховувати ще й подальший розвиток мережі.

Сучасна абонентська мережа являє собою структуру, яка постійно розвивається. Вона може будуватися з нуля (наприклад, при облаштуванні нової житлової зони), або нарощуватися (тобто додаються нові служби, наприклад інтерактивне телебачення, закриті приватні канали кабельного телебачення й т.д.). Для ефективної побудови абонентської мережі або нарощування старої, необхідно врахувати безліч факторів, серед яких: концентрація абонентів у житловій зоні, пріоритетність відповідних послуг, ступінь їх розподілу між абонентами, наявність телебачення, обсяг необхідних капіталовкладень і ін.

Основними видами телекомунікаційного сервісу, доступного на сьогодні, є:

- телефонія аналогова, цифрова;
- телебачення широкомовне (ефірне), кабельне.

Більш рідкі реалізації:

- безпосередній прийом передач від супутника;
- використання існуючого телефонного каналу для підключення ПК до мережі Internet.

Таблиця 1.1 - Вимоги до смуги пропускання для різних медіа-додатків

Додаток	Тип передачі	Формат передачі	Структура передачі	Швидкість передачі без стиску	Швидкість передачі зі стиском
Мова й музика	Телефонія		8 Кз/с x 8 біт/з*	64 кбіт/с	8-32 кбіт/с
	Телеконференції		16 Кз/с x 8 біт/з*	128 кбіт/с	48-64 кбіт/с
	CD-аудіо		44,1 Кз/с x 16 біт/з*	705,6 кбіт/с	128 кбіт/с
Зображення	Зображення звичайного дозволу	SVGA	640 п/лін x 480 лін/с x 8 біт/п	2,458 Мбіт/с	24-245 кбіт/с
		JPEG	720 п/лін x 576 лін/с x 16 біт/п	6,636 Мбіт/с	104-830 кбіт/с
	Зображення високого дозволу		1280 п/лін x 1024 лін/с x 24 біт/п	31,46 Мбіт/с	300 кбіт/с -3 Мбіт/с
Бізнес-відео	Відеофон	QCIF (H.261)	176 п/лін x 144 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с**	9,115 Мбіт/с	p x 64 кбіт/с (p=1,2)
		MPEG-4 (H.320)	176 п/лін x 144 лін/к x 12 біт/п x 10 к/с	3,04 Мбіт/с	64 кбіт/с
	Відеоконференції	CIF (H.261)	352 п/лін x 288 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с***	36,45 Мбіт/с	m x 368 кбіт/с (m= 1,2,3,4,5)
		MPEG-1 (PAL)	352 п/лін x 288 лін/к x 12 біт/п x 25 к/с***	30,4 Мбіт/с	1, 15-3 Мбіт/с
		MPEG-1 (NTSC)	352 п/лін x 240 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с***	30,4 Мбіт/с	1, 15-3 Мбіт/с
Розважальне відео	VCR	CIF (MPEG-2)	352 п/лін x 240 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с***	30,4 Мбіт/с	4 Мбіт/с
	Широкомовне телебачення	MPEG-2 (PAL)	720 п/лін x 576 лін/к x 12 біт/п x 25 к/с***	124,4 Мбіт/с	15 Мбіт/с
		MPEG-2 (NTSC)	720 п/лін x 480 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с***	124,3 Мбіт/с	15 Мбіт/с
	Телебачення високого дозволу	HDTV	1920 п/лін x 1080 лін/к x 16 біт/п x 30 к/с***	994,3 Мбіт/с	135 Мбіт/с
		MPEG-3	1920 п/лін x 1080 лін/к x 12 біт/п x 30 к/с***	745,8 Мбіт/с	20-40 Мбіт/с

* з - зразок, ** к - кадр, п - піксель, лін - ліній

*** швидкість кадрів може бути 30, 15, 10 і 7,5 к/с

CIF (common intermediate format) - загальний проміжний формат; QCIF (quarter common intermediate format) - кварталний узагальнений проміжний формат; MPEG (moving pictures expert group) - набір стандартів, що забезпечують передачу змінного стислого відеозображення; JPEG (joint photographic expert group) - стандарт стиску відеокадру, розроблений групою експертів.

– Стрімкий розвиток інформатизації суспільства говорить про те, що

нові служби, які тільки-но з'явилися і ще практично не розвинені, у не далекій перспективі знайдуть масового свого споживача.

Телевізійні кабельні системи поки що переважно залишаються на мідних коаксіальних кабелях, очевидними достоїнствами якого є велика смуга пропускання при аналоговій передачі телевізійних каналів і відносно низька вартість кінцевого встаткування. Хоча на сьогодні мідний кабель поступово здає свої позиції, звільняючи дорогу волоконно-оптичному, поки що за кожним середовищем зв'язку залишається своя область застосування, а це означає подальше їх співіснування.

На сьогоднішній день для вирішення проблем побудови сучасних широкосмугових абонентських мереж, що охоплюють житлові зони кварталів, районів міста або сільської місцевості розроблено кілька концепцій, що враховують споживчі характеристики й платіжну спроможність абонентів. Практично всі вони використовують у тій або іншій ступені волоконно-оптичні лінії зв'язку, які значно збільшують пропускну здатність і дозволяють впроваджувати нові широкосмугові служби.

1.2 Загальна концепція розвитку оптичних мереж доступу

На сьогоднішній день, з урахуванням останніх тенденцій у сферах розвитку бізнесу та переходу все більшої кількості користувачів на віддалену працю, все більший розвиток одержують такі види послуг зв'язку, як передача технологічної, організаційної, фінансової інформації, телеконференції й телесемінари, дистанційні медичні послуги, інтерактивне цифрове телебачення і т.ін.

Описані процеси вимагають різкого підвищення пропускну здатності, гнучкості й оперативності реагування від міських і абонентських мереж доступу. Це завдання, як і у випадку з магістральними транспортними мережами, успішно вирішується з використанням волоконно-оптичних технологій у рамках розвитку оптичних мереж доступу (ОМД).

Для вирішення вказаних проблем оптичних мереж доступу наприкінці 80-х була розроблена концепція «останньої милі» або «волокна в будинок» (Fiber To The Home, FTTH) [1, 2]. Надалі в 1997 р. Міжнародний комітет з електрозв'язку - ITU-T розробив керівний документ - Рек. G.983, у якому дані

визначення оптичних мереж доступу, їхня топологія (архітектура), параметри й склад устаткування [3].

Fiber To The X (FTTx - оптичне волокно до точки X) - це загальний термін для будь-якої комп'ютерної мережі, у якій від вузла зв'язку до певного місця (точка X) доходить оптоволоконний кабель, а далі, до абонента, - мідний кабель (можливий і варіант, при якому оптика прокладається безпосередньо до абонентського пристрою). Таким чином, FTTx - це тільки фізичний рівень. Однак фактично дане поняття охоплює й велику кількість технологій каналного й мережного рівня. Із широкою смугою систем FTTx нерозривно пов'язана можливість надання великої кількості нових послуг [5, 6].

Донедавна рішення FTTx використовували в основному оператори, що не мають власної «мідної» інфраструктури, що пояснювалося високою вартістю побудови оптоволоконної мережі. Але останнім часом спостерігається підвищений інтерес до FTTx і з боку операторів, що вже розгорнули на своїх мережах рішення ADSL. Серед основних причин цього - розширення спектра надаваних послуг, поширення технологій сімейства Ethernet і пасивних оптичних мереж (Passive Optical Networks, PON), зниження цін на оптоволоконну продукцію. Мережні оператори до впровадження FTTx-технологій підходять неоднаково: одні будують мережу за принципом «оптика до будинку», інші переходять до надання послуг на базі FTTx замість використання традиційних DSL-технологій, а міжрегіональні компанії електрозв'язку надають спільні рішення надання DSL-послуг і FTTx [4].

Є багато різновидів архітектури FTTx (рис. 1.1), серед яких основними є:

- FTTH (Fiber To The Home) - доведення волокна до квартири;
- FTTB (Fiber To The Building) - доведення волокна до будинку, і варіанти, по суті, що дублюють FTTH і FTTB з невеликими змінами;
- FTTC (Fiber To The Curb) - доведення волокна до кабельної шафи.

Розвиток глобальної мережі Internet та поява нових, переважно мультимедійних, послуг зв'язку сприяє росту потоків даних, переданих по мережі. Це змушує операторів постійно шукати шляхи збільшення пропускної здатності транспортних мереж. Одним із варіантів вирішення даної проблеми є впровадження технології PON.

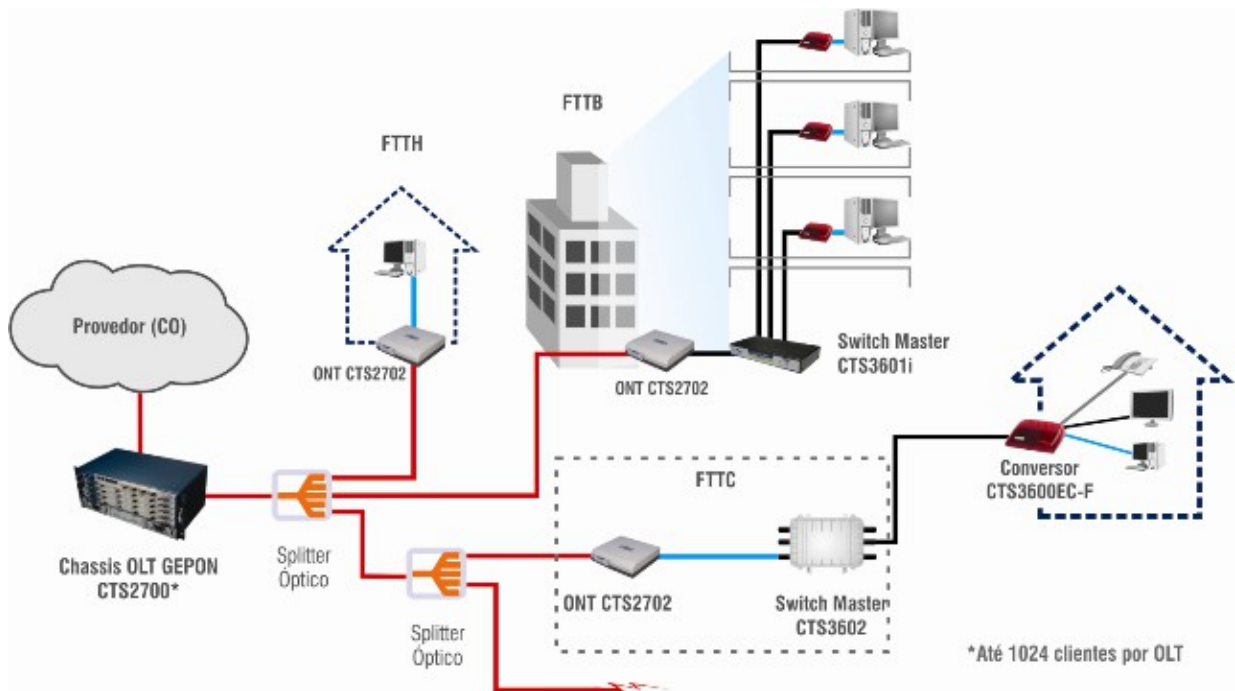


Рисунок 1.1 - Архітектурні рішення технологій FTTx

Початок розвитку технології PON було покладено в 1995 році, коли впливова група із семи компаній: British Telecom, France Telecom, Deutsche Telecom, NTT, KPN, Telefonica і Telecom Italia створила консорціум Full Service Access Network (FSAN) для того, щоб втілити в життя ідеї множинного доступу по одному волокну й активне виведення її на ринок. Метою FSAN була розробка загальних рекомендацій і вимог до встаткування PON для того, щоб виробники встаткування й оператори, могли співіснувати разом на конкурентному ринку систем доступу PON. До теперішнього часу при активній участі консорціуму FSAN були визначені кілька різновидів PON [6].

APON (Asynchronous Transfer Mode PON) - перший варіант технології, заснований на використанні протоколу ATM. Пізніше стандарт був удосконалений: швидкість збільшена до 622 Мбіт/с, реалізований динамічний розподіл ресурсів смуги пропускання - він одержав назву Broadband PON (BPON). Технологія BPON, стандартизована Міжнародним союзом електрозв'язку (International Telecommunications Union - Telecommunications sector, ITU-T), реалізує крім традиційних послуг часового ущільнення каналів (Time Division Multiplexing, TDM) велика кількість широкосмугових послуг, включаючи Ethernet і трансляцію аналогового й цифрового відео [7].

В 2001 р. в інституті IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) була утворена робоча група Ethernet in the First Mile (EFM), основні

зусилля якої спрямовані на стандартизацію симетричної технології Ethernet Passive Optical Networking (EPON), що забезпечує швидкість передачі до 1,25 Гбіт/с і призначеної для транспортування Ethernet-трафіка. Результатом діяльності групи з'явилося створення стандарту EPON.

В 2003 р. Консорціумом FSAN, що продовжує роботи зі стандартизації пасивних (понад 1 Гбіт/с) мереж PON, запропоновано рішення для побудови оптичних мереж доступу - Gigabit PON (GPON). Ця технологія, що володіє досить високою продуктивністю, вже стандартизована ІТУ-Т і призначена для реалізації мультисервісних послуг, як на базі протоколу ІР, так і на основі ТДМ.

Застосування технології PON у мережах доступу має чимало переваг:

- економія волокон в абонентських оптичних кабелях;
- значна економія оптичних випромінювачів на головній станції;
- можливість надання трьох видів інформації (відповідно до концепції Triple Play) - голосу, відео й даних;
- відсутня необхідність електроживлення мережних елементів (крім кінцевих);
- невеликі витрати на обслуговування;
- проста можливість підключення абонентів (навіть без перерви зв'язку);
- можливість динамічного розширення смуги - збільшення швидкості передачі працюючих абонентів за рахунок непрацюючих у цей момент;
- подальше збільшення швидкості передачі (до 10 Гбіт/с) і вище без заміни встаткування лінійного тракту (оптичні кабелі, розгалужувачі, з'єднувачі);
- наступна можливість значного збільшення швидкості передачі для кожного користувача за рахунок застосування технології грубого спектрального ущільнення каналів (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) або щільного спектрального ущільнення каналів (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) [3].

На сьогоднішній день PON є оптичною мережною технологією на рівні доступу, що найбільш динамічно розвивається. Гнучкість технології PON дозволяє успішно впроваджувати їх для вирішення завдань FTTx. Адже саме в FTTN проявляються всі переваги технології PON - відсутність активних елементів у мережі й спільне використання ресурсів (портів, волокон) значно знижує операційні витрати на експлуатацію й технічне обслуговування,

електроживлення й оренду площ. Архітектура FTTH на основі PON найбільш перспективна й економічно ефективна в довгостроковій перспективі [5].

1.3 Тенденції розвитку мереж на основі PON

На сьогоднішній день найбільш популярні різновиди PON це:

- Gigabit PON (GPON) - еволюція попереднього стандарту BPON. Використовує на другому рівні OSI власний метод інкапсуляції GEM для передачі TDM і Ethernet трафіку. Використовувані швидкості: 2,48 або 1,24 Гбіт/с до абонента та 622 Мбіт/с, 1,24 або 2,48 Гбіт/с від абонента до OLT. Для 32 ONT смуга на абонента складає - більше 70 Мбіт/с. Є реалізації з підтримкою до 128 абонентів на волокно. Стандартизований в 2003 році як ITU-T G.984.1 і G.984.2 [6].

- Ethernet PON (EPON) - стандарт IEEE 802.3ah (EFM). Використовує кадри Ethernet із симетричною швидкістю 1 Гбіт/с. Швидкість на абонента - приблизно 30 Мбіт/с (при 32 ONT).

Дальність зв'язку для обох систем стандартизована порядку 20 км.

Технологія EPON - домінує в Азії, а GPON - найбільш популярний у Європі й Північній Америці.

Головними привабливими характеристиками розгортання мереж PON є:

- тільки пасивні елементи оптики по всій мережі абонентського доступу;
- істотне скорочення кабелю й займаного простору у місці присутності провайдера;
- зниження витрат на експлуатацію мережі абонентського доступу, а саме, зниження витрат на електроживлення через відсутність активного встаткування в розподільчій мережі, а також малі витрати по обслуговуванню завдяки вбудованим засобам експлуатації та адміністрування;
- простота модернізації, масштабування та тривалий строк експлуатації мережі доступу.

Тенденції розвитку комунікаційних послуг такі, що через кілька років характеристики нинішніх PON-технологій можуть не задовольняти вимогам операторів. Тому провідні виробники разом з операторами активно займаються

розробкою та впровадженням систем PON наступного покоління - Next-gen PON (NG-PON).

Основні завдання NG-PON - збільшення бітової швидкості у каналі, радіуса дії та кількості користувачів, які можуть обслуговуватися у мережі. Також вирішуються питання оптимального переходу від існуючих GPON або EPON до нових стандартів NG-PON [8].

ITU-T та групою FSAN («Повносервісні мережі доступу» - консорціум з 80 світових операторів, виробників обладнання та випробувальних лабораторій, які розробляють специфікації для оптичних мереж) було визначено два сценарії впровадження NG-PON. Перший, під назвою NG-PON1, або «еволюційне зростання», передбачає сумісне існування 1G-PON та NG-PON у одній розподільчій мережі (ODN). При цьому, навіть якщо оператор потім повністю перейде на технологію нового покоління, він все одно має підтримувати або емулювати 1G-PON для тих абонентів, яких попереднє покоління задовольняє.

Другий сценарій - NG-PON2, або «революційна заміна», - допускає повне заміщення всієї інфраструктури разом з мережею доступу. Він найкраще підходить для операторів, що будують мережі PON «з нуля». Цей сценарій, у кінцевому підсумку, може використовуватися на другому етапі міграції тими компаніями, які розвивають PON вже зараз, оскільки даний сценарій передбачає ще більш високі швидкості.

Розглянемо пропоновані на сьогоднішній день рішення NG-PON.

10G GPON.

Для задоволення постійно зростаючих апетитів по збільшенню смуги пропускання, нинішні GPON-системи модернізуються для підтримки 10 Гбіт/с у спадному напрямку. Такі системи будуть здатні одночасно передавати більше тисячі потоків HDTV з дуже швидким часом перемикання між каналами внаслідок віщальної природи PON. Весь набір одноадресних персоналізованих послуг також буде підтримуватися [4].

При чому розглядають два варіанти розвитку GPON - XG-PON1 і XG-PON2, де «X» означає число «10». Перший варіант передбачає передачу даних зі швидкістю 10 Гбіт/с у низхідному потоці та 2,5 Гбіт/с у висхідному. Він стандартизований ITU-T - в 2010 році. Був прийнятий ряд рекомендацій з сімейства G.987, що визначають загальні вимоги до XG-PON1, специфікації волоконно-оптичної мережі і характер передачі, а також G.988, що описує інтерфейс управління й адміністрування абонентських блоків ONU. На сьогоднішній день вже існують стандарти XG-PON або XGS-PON (G.987.2 і

щоб потоки 10G-EPON і GEAPON, при передачі по одному волокну, не заважали один одному, використовується часовий розподіл сигналів з різними швидкостями («двошвидкісний TDMA»).

WDM-PON.

Майбутнє PON у довгостроковій перспективі - це WDM-PON, що використовує хвильову сітку DWDM для розміщення великої кількості паралельних високошвидкісних каналів поверх однієї структури PON. WDM-PON пропонує альтернативну схему передачі, де кожний ONT передає й приймає дані на певній, виділеній для нього, довжині хвилі. У типовій архітектурі WDM-PON пасивні сплітери буде замінено на хвильові селективні фільтри, які частіше за все реалізують вигляді як ґрат на основі масиву хвилеводів (Arrayed Waveguide Grating -AWG). Планується, що впровадження WDM-PON дозволить підвищити швидкість передачі на мережах доступу як мінімум до 40 Гбіт/с у низхідному потоці та до 10 Гбіт/с у висхідному.

NG-PON2, розроблена МСЄ в 2015 році, визначає нову архітектуру PON, здатну підтримувати загальну пропускну здатність мережі 40 Гбіт/с із використанням чотирьох симетричних висхідних/спадних довжин хвиль, доступних кожному абонентові. Стандарт NG-PON2 унікальний у використанні активних фільтрів, що настроюються, і лазера, що настроюються, встановлених у кожному ONU [4]. До такої технології відносять TWDM PON - Time Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networking, пасивні оптичні мережі з часовим і частотним (спектральним) мультиплексуванням (рис. 1.3).

Технологія TWDM-PON використовує для організації дуплексних каналів зв'язку чотири пари довжин хвиль у різних спектральних діапазонах. Для формування потоків upstream використовуються довжини хвиль ($\lambda_1 - \lambda_4$), для downstream ($\lambda_5 - \lambda_8$). У системах TWDM PON для передачі потоків може бути використано три частотних діапазони: 1270-1280/1570-1580 нм - XG-PON-Діапазон, 1535-1540/1553-1558 нм - C-band-діапазон, 1535-1540/1570-1580 нм - C+ L-band-діапазон. Передача сигналів TWDM PON у діапазонах C-band і C+ L-band дозволяє використовувати оптичні підсилювачі EDFA для збільшення оптичного бюджету траси [11].

Крім більшої кількості довжин хвиль, що використовуються для формування потоків up/downstream, TWDM PON також допускає використання оптичних передавачів, що перебудовуються, (tunable Tx) і селективних оптичних приймачів (selective Rx) у станційному й кінцевому устаткуванні (OLT і ONU/ONT). Використання компонентів, що перебудовуються, дозволяє

масштабувати та перебудовувати мережу TWDM PON на апаратному рівні без необхідності перепрокладки пасивних компонентів мережі передачі. TWDM PON дозволяє, крім гнучкого настроювання хвиль, робити тонке настроювання швидкості передачі в рамках одного каналу. Підтримуються як симетричні по швидкості передачі канали зв'язку 10G/10G і 2.5G/2.5G, так і несиметричні 10G/2.5G [11].

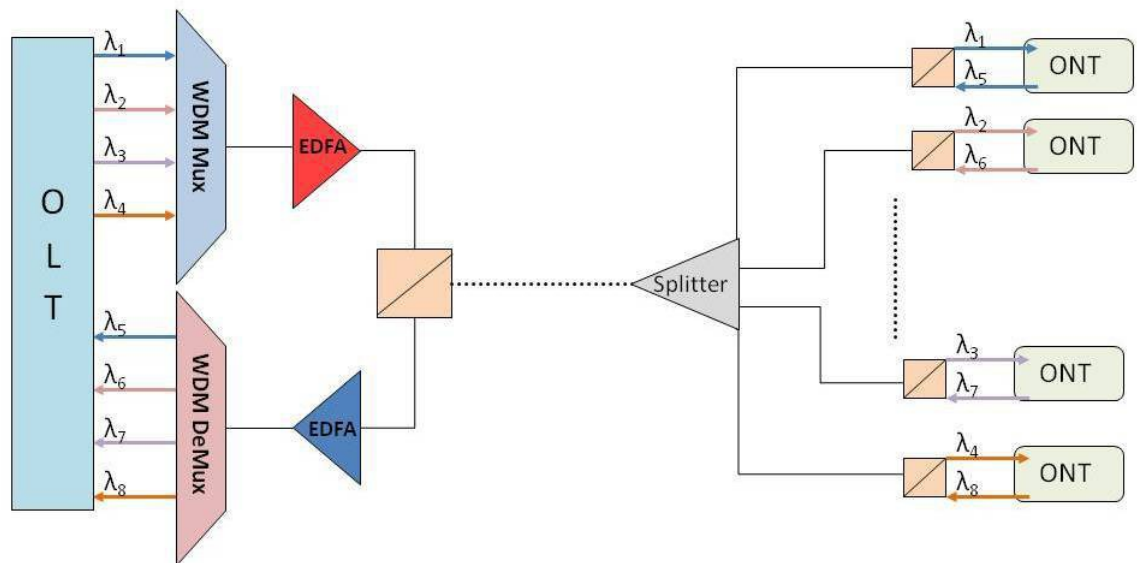


Рисунок 1.3 - Структура мережі TWDM PON

У мережах TWDM PON використовують діапазони довжин хвиль - XG-PON діапазон, C-band діапазон і C+ L-band діапазон. В XG-PON-діапазоні частотний план повністю повторює робочі діапазони XG-PON: 1270-1280 нм для upstream і 1570-1580 нм для downstream. Використання такого частотного плану дозволяє організовувати одночасну передачу: TWDM PON, GPON, CATV (Community Antenna Television), як показано на рис. 1.4.

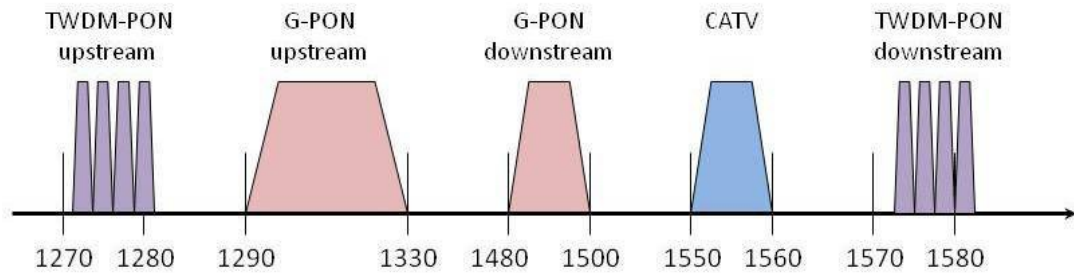


Рисунок 1.4 - XG-PON-діапазон

У даній частотній сітці неможливе використання оптичних підсилювачів EDFA, у зв'язку із цим максимальний оптичний бюджет системи становить 33 дБ.

Використання XG-PON-діапазону виправдано при необхідності вбудовувати нові канали передачі в існуючу систему GPON+CATV без необхідності збільшувати оптичний бюджет траси.

Частотний план у випадку C-band-діапазону являє собою стандартні значення: 1535-1540 нм для upstream і 1553-1558 нм для downstream. Використання такого частотного плану дозволяє організовувати передачу в рамках однієї мережі: TWDM PON, GPON, XG-PON (рис. 1.5). Мінусом використання даного частотного плану є його несумісність із існуючою мережею CATV.

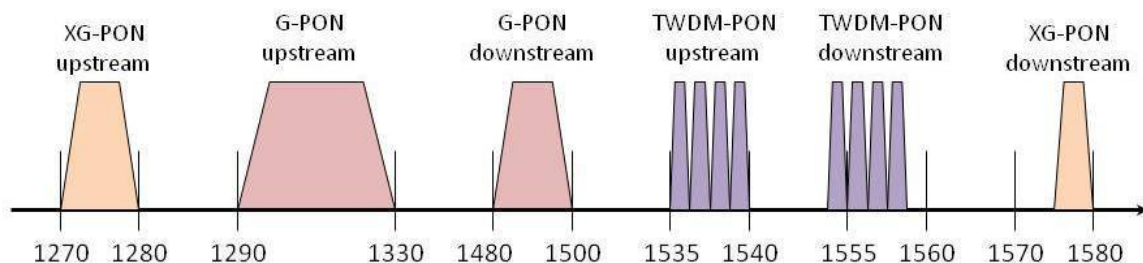


Рисунок 1.5 - C-band-діапазон

За рахунок використання довжин хвиль із C-band-діапазону з'являється можливість використовувати стандартні оптичні підсилювачі EDFA для DWDM-мереж з робочим діапазоном 1529-1561 нм. Використання EDFA дозволяє збільшити максимальний оптичний бюджет системи до значення в 38 дБ. Оптичні підсилювачі встановлюються на стороні головної станції, що дозволяє не міняти існуючої архітектури мережі й не вводити в пасивну мережу додаткові енергозалежні елементи [13].

C+ L-band-діапазон у частотному плані припускає використання Red-діапазону або C-minus Band 1535-1540 нм для upstream і L-minus Band 1570-1580 нм для downstream. Використання цього частотного плану дозволяє організовувати передачу в рамках однієї мережі: TWDM PON, GPON, CATV (рис. 1.6).

Використання даного частотного плану дозволяє розраховувати на оптичний бюджет до 38 дБ і одночасну передачу сигналів PON і CATV. Однак система TWDM PON на C+ L-band-діапазоні має свої особливості, головною з яких є необхідність використання L-band-підсилювачів для downstream. У даний момент EDFA L-band діапазону мало затребувані, тому що C-band повністю задовольняє потреби телекомунікаційного ринку.

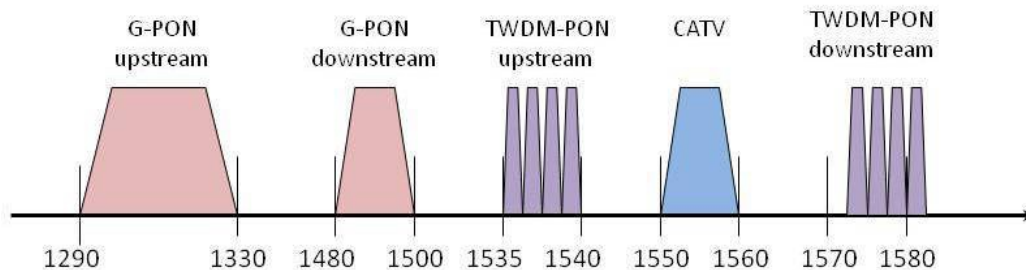


Рисунок 1.6 - C+ L-band-діапазон

XGS-PON є підвидом стандарту NG-PON2 для мереж TWDM-PON. На рис. 1.7 розглянуто деякі з аспектів мереж PON нового покоління.

	GPON	XG-PON (10G)	XGS-PON (40G)
Downstream 2.48 Gbps	1490 nm	1490 nm	1596–1603 nm
Downstream 10 Gbps		1577 nm	1596–1603 nm
Max DS # channels		2	4-8 @ 100GHz channel spacing
10G DS In-band crosstalk tolerance			35.3 dB
RF Overlay Downstream	1550 nm	1550 nm	1550 nm
Upstream 1.24 Gbps	1310 nm	1310 nm	1310 nm
Upstream 2.48 or 9.95328 Gbps		1270 nm	1524-1544 (wide band)
			1528-1540 (reduced band)
			1532-1540 (narrow band)
Upstream channel spacing			50-200 GHz
US crosstalk tolerance			31.9 (Type A link)
			27.9 (Type B link)
Max. fiber length ODN	≤ 20 km	≤ 20 km	≤ 20km (DD20)
Max TC layer fiber distance		≤ 20 km	≤ 40 km (DD20)
Max Differential fiber step		20 km	20 km
Max differential optical path loss			15 dB
Min ORL of ODN at R/S			32 dB
Max single element Reflectance			-35 dB
Dispersion delay limit		10 ps	10 ps

Рисунок 2.7 - Порівняльна характеристика технологій PON нового покоління

LR-PON.

GPON зі збільшеною дальністю. Багато операторів розглядають можливість консолідації своїх точок присутності для зменшення операційних витрат мережі доступу. Таким чином, пропозиція GPON зі збільшеною дальністю дозволить збільшити зону, що обслуговується оператором з однієї точки, і відмовитися від проміжних станційних точок присутності. Потенційно також збільшиться й кількість ONT на один OLT. Мова йде про розміри мережі доступу, обчислювальної десятками кілометрів. Так, рішення, засновані на використанні оптичних підсилювачів для збільшення оптичного бюджету, дозволяють досягти дальності в 60 км. Це, наприклад, дає можливість надавати послуги зв'язку у віддалені сільські райони, не розвертаючи там точок присутності оператора, що значно знижує витрати останнього [10].

2 ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ТЕХНОЛОГІЇ PON

2.1 Основні елементи PON

Основна ідея архітектури PON - використання лише одного прийомо-передавального модуля в центральному вузлі оператора для передачі інформації до абонентських пристроїв і прийому інформації від них.

На рис. 2.1 показані основні елементи архітектури PON.

Центральний вузол або оптичний лінійний термінал (OLT) - пристрій, що встановлюється у центральному офісі. Цей пристрій приймає дані з боку магістральних мереж через інтерфейси сервісних вузлів (Service Node Interfaces, SNI) і формує нисхідний потік до абонентських вузлів (прямий потік) по дереву PON [9].

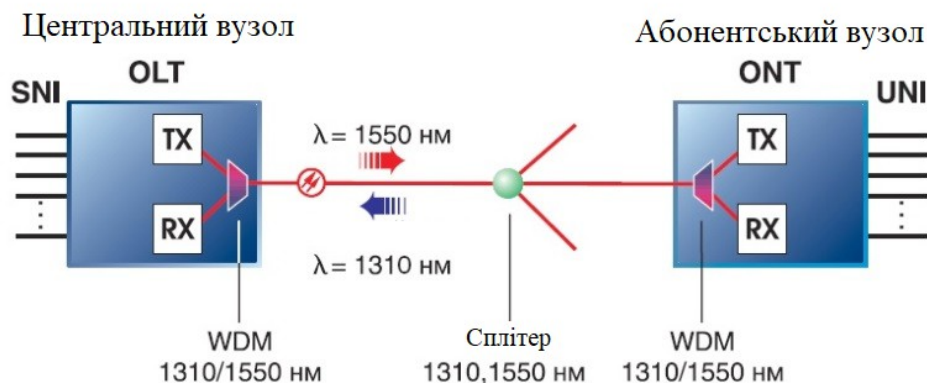


Рисунок 2.1 - Архітектура й основні елементи мережі PON

Абонентський вузол або оптичний мережний термінал (Optical Network Terminal, ONT) має, абонентські інтерфейси для підключення обладнання абонента, та інтерфейс для підключення до дерева PON. Передача ведеться на довжині хвилі 1310 нм (висхідний потік), а прийом - на довжині хвилі 1550 нм (нисхідний потік). ONT приймає дані від OLT, конвертує їх і передає абонентам через абонентські інтерфейси «користувач-мережа» (User Network Interfaces, UNI).

Оптичний розгалуджувач - це пасивний оптичний багатополіусник, що розподіляє потік оптичного випромінювання в одному напрямку й об'єднує

кілька потоків у зворотному напрямку. У загальному випадку у розгалуджувача може бути M вхідних і N вихідних портів (де N - кількість абонентів). У мережах PON найбільш часто використовують розгалуджувачі 1х з одним вхідним портом. Розгалуджувачі 2х можуть використовуватися в системі з резервуванням по волокну [2].

В OLT і ONT вбудовані мультиплексори WDM, що розділяють висхідні й низхідні потоки. Такі мультиплексори мають досить низькі внесені втрати та не вимагають температурної стабілізації.

Прямий (низхідний) потік є широкомовним. Кожний абонентський вузол ONT, считуючи адресні поля, виділяє призначену йому частину інформації із загального потоку (рис. 2.2).

Всі абонентські вузли ONT ведуть передачу у зворотному потоці на одній і тій же довжині хвилі, використовуючи концепцію множинного доступу з часовим розподілом (Time Division Multiple Access, TDMA). Для того, щоб виключити можливість перетинання сигналів від різних ONT, для кожного з них встановлюється свій індивідуальний розклад по передачі даних з урахуванням виправлення на затримку, пов'язану з віддаленням даного ONT від центрального вузла OLT [10].

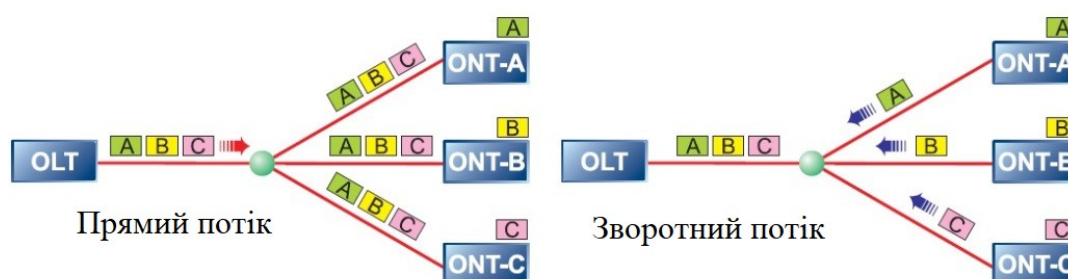


Рисунок 2.2 - Схема передачі низхідних і висхідних потоків в PON

Для підтримки присвоєння часових доменів за допомогою OLT, групою IEEE 802.3ah був розроблений протокол MPCP. Цей протокол базується на двох повідомленнях Ethernet: GATE і REPORT. Повідомлення GATE посилає від OLT до ONU і використовується для присвоєння часового домена. Повідомлення REPORT використовується ONU для інформування OLT про свій стан (заповнювання буфера й т.д.), щоб допомогти йому прийняти правильне рішення про виділення часового домена. Як GATE, так і REPORT-повідомлення є кадрами керування MAC (тип 88-08) [11].

Таким чином, алгоритм роботи мережі PON після настроювання виглядає як вказано на рис. 2.3:

- ONU «прослуховує лінію»;
- OLT одержує пакет стандарту IEEE 802.3 від глобальної мережі й модифікує його під стандарт IEEE P802.3ah;
- OLT відсилає пакет конкретному отримувачу (ONU);
- Всі ONU одержують пакет, але тільки отримувач залишає його в буфері
- інші пакет відкидають;
- ONU форматує пакет стандарту IEEE P802.3ah у стандарт IEEE 802.3 і пересилає його клієнтському ПК;
- Отримані пакети із клієнтського ПК ONU форматує зі стандарту IEEE 802.3 у стандарт IEEE P802.3ah і записує у буфер;
- OLT дозволяє передачу даних конкретній ONU;
- ONU передає накопичені пакети певну кількість часу, а потім «замовкає» й знову «слухає» лінію;
- OLT одержує від ONU пакет стандарту IEEE P802.3ah, перетворює його під стандарт IEEE 802.3, після чого передає його вищестоячому пристрою у глобальну мережу.



Рисунок 2.3 - Алгоритм роботи PON по перетворенню пакетів

2.2 Організація архітектурного рішення FTTH на базі PON

Для вирішення проблем побудови сучасних широкосмугових абонентських мереж наприкінці 80-х була розроблена концепція «останньої милі» або «волокна в будинок» (Fiber To The Home, FTTH). З існуючих топологій оптимальним вирішенням є фізична топологія «дерево з пасивними вузлами», що використовує рішення на основі логічної топології «точка-багатоточка» (Point-to-Multipoint, P2MP), що покладена в основу технології

PON під загальною назвою «дерево з пасивним оптичним розгалуджувачем PON» [13].

Технологія FTTH має на увазі доведення оптичного волокна до квартири або приватного будинку користувача (рис. 2.4).

На користь вибору побудови оптичної мережі доступу (ОМД) за допомогою FTTH виступає аналіз інвестицій у технології доступу й постійне зростання вимог до пропускної здатності каналів доступу. Він показує, що якщо технічні рішення, які знаходяться в основі побудови сегмента доступу мережі сьогодні, виявляться нездатними забезпечити абонентам швидкість 100 Мбіт/с, то моральне старіння встаткування відбудеться до закінчення інвестиційного циклу. Оператор повинен обов'язково враховувати ці дані, інакше він ризикує виявитися вразливим перед конкурентами у міру прагнення користувачів до одержання послуг усе більш високого класу.

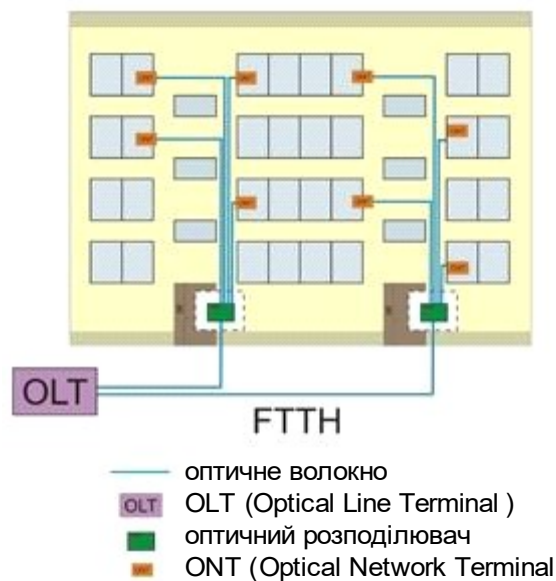


Рисунок 2.4 - Побудова ОМД за технологією FTTH

Переваги архітектури FTTH:

- вона забезпечує найбільшу смугу пропускання, та як оптичне волокно доводить до самої будівлі абонента;
- повністю стандартизований і найбільш перспективний варіант;
- рішення FTTH забезпечують обслуговування абонентів на відстані до 20 км від вузла зв'язку;

- дозволяє істотно скоротити експлуатаційні витрати - за рахунок зменшення площі технічних приміщень (необхідних для розміщення встаткування), зниження енергоспоживання й відповідно витрат на технічну підтримку.

Мережа FTTH за технологією PON складається з трьох основних частин (рис 2.5):

1) Станційна ділянка – це активне встаткування OLT (OLT – Optical Line Terminal) і оптичний крос високої щільності ODF (ODF – Optical Distribution Frame), змонтовані на вузлі зв'язку в приміщенні провайдера;

2) Абонентська ділянка – це персональне абонентське розведення одноволоконним дроп-кабелем (рідше двоволоконним) від елементів загальних розподільних пристроїв до оптичної розетки й активного встаткування ONT (ONT – Optical Network Terminal) у приміщенні абонента;

3) Лінійна ділянка – це волоконно-оптичний кабель, шафи, сплітери, конектори й з'єднувачі, що розташовуються між станційною й абонентською ділянкою.

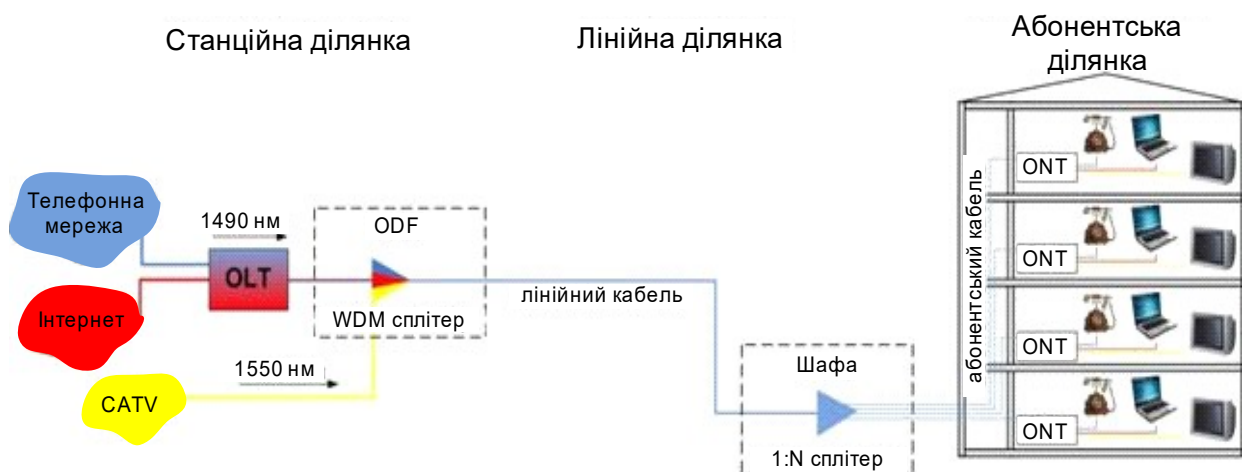


Рисунок 2.5 - Організація ОМД на базі рішення FTTH PON

Самою складною при побудові є лінійна ділянка, що складається з безлічі різноманітного пасивного встаткування й великої кількості будівельно-монтажних робіт, тому дуже важливе застосування найбільш оптимальних методів його побудови.

Лінійна ділянка при плануванні визначає топологію пасивної оптичної мережі. У розподільчій мережі PON від оптичних розподільних шаф до кінцевих пристроїв абонентів (ONT) передача даних здійснюється через пасивні

оптичні розгалуджувачі (сплітери), які встановлюються в оптичних розподільних коробках і/або в оптичних розподільних шафах чи муфтах.

На мережі може бути використана як однорівнева (однокаскадна) схема включення сплітерів, так і багатокаскадна схема з послідовним їх включенням один за одним (рис 2.6). Кількість рівнів каскадування залежить від сумарного внесеного згасання від сплітерів, коефіцієнта розгалуження PON інтерфейсів OLT (в GPON це 1:64) і вимог до смуги пропускання для кожного абонента.

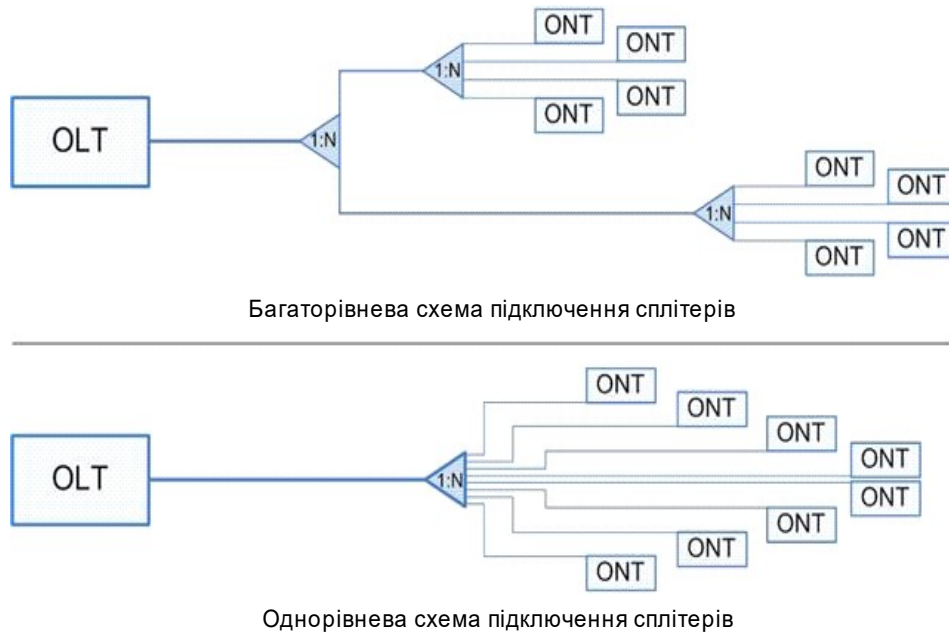


Рисунок 2.6 - Схеми включення сплітерів у мережі PON

ONT представляє із себе більш складний пристрій, чим CPE, що використовується в стандартних мережах Ethernet. Крім функцій надання широкосмугового доступу й підтримки сервісів, ONT повинен додатково мати:

- протокол керування доступом до PON;
- лазери пакетного режиму (burst-mode lasers), що забезпечують передачу даних ONT тільки у визначені терміналом OLT відрізки часу;
- підвищену потужність сигналу (потрібно враховувати втрати на сплітерах та ін.);
- шифрування;
- високу продуктивність.

Ці додаткові функції обумовлюють значно більш високу вартість пристрою ONT відносно CPE Ethernet.

Є три основних переваги для провайдерів, які розгортають мережі доступу на базі технології PON замість оптоволоконних мереж з топологією «точка-точка» (варіант P2P FTTH для технології Ethernet):

1) Економія кабелю. Найбільш істотним аспектом розгортання мереж FTTH на базі PON є економія оптоволоконних ліній на ділянці від оптичних розгалужувачів до точки присутності провайдера.

2) Економія портів в точці присутності, де виконується агрегація. Для точки присутності мережі на базі PON буде потрібно удвічі менше обладнання, чим для мережі Ethernet FTTH, так як OLT дозволяє на один свій порт підключити до 32/64 абонентів, у той час як оптичний Ethernet вимагає мати окремий порт під кожного користувача.

3) Накладення аналогового відеосигналу. Оскільки PON по своїй природі є широкомовним середовищем, його можна використовувати для передачі аналогового або цифрового телевізійного сигналу.

Проблематика побудови FTTH на базі PON:

1) Загальна смуга пропускання. Загальна смуга пропускання в дереві оптоволоконних ліній мережі PON використовується великим числом абонентів, що дозволяє знизити витрати на кожного абонента. Технологія GPON забезпечує загальну пропускну здатність спадного потоку на рівні 2,5 Гбіт/с, однак вона не зможе відповісти росту сервісів і майбутніх вимог абонентів у довгостроковій перспективі, оскільки потреби в пропускій здатності ростуть експоненційно.

2) Шифрування. Оскільки PON - це технологія із загальним середовищем передачі, то для підвищення безпеки даних необхідне їх шифрування.

У технології GPON проводиться шифрування тільки спадного потоку, а використання надійного вдосконаленого стандарту шифрування (Advance Encryption Standard, AES) з 256-розрядними ключами дозволяє підвищити безпеку особистої інформації кінцевих користувачів і надає сервісам-провайдерам можливість запобігти розкраданню послуг. Однак надійність стандарту AES обумовлює зниження продуктивності. Для шифрування необхідна передача істотного обсягу службової інформації разом з кожним пакетом, що може привести до помітного зниження корисної швидкості передачі даних в PON (залежно від сполучення різних видів трафіка) [14].

3) Не гнучкий розподіл робочої швидкості передачі даних. У зв'язку з використанням у пасивних оптичних мережах PON загального передавального

середовища, кожний кінцевий пристрій (ONT або OLT) змушений працювати на сукупній швидкості передачі даних. Незалежно від тарифного плану абонента кожна кінцева точка оптичної мережі (ONT) у дереві PON повинна працювати на одній для всіх швидкості, наприклад 2,5 Гбіт/с для GPON.

4) Необхідність великої потужності оптичного сигналу. При кожному розгалуженні в співвідношенні 1:2 енергетичний потенціал лінії зв'язку падає на 3,4 дБ. Отже, при розгалуженні в співвідношенні 1:64 енергетичний потенціал лінії зв'язку зменшується на 20,4 дБ. Таким чином, всі оптичні передавачі в архітектурі PON повинні забезпечувати значно більшу потужність оптичного сигналу в порівнянні з архітектурою FTTH «точка-точка» при передачі на ту ж відстань.

5) Доступ до абонентських ліній. Мережі PON мають тільки одну оптоволоконну лінію для підключення групи абонентів, що не може бути розділена на фізичному рівні. Ця особливість пасивної оптичної мережі на базі PON припускає масовий продаж послуг основного оператора без надання прямого абонентського доступу за допомогою відділення абонентських ліній.

6) Доступ до абонента. Зазвичай при розгортанні мережі FTTH виконується одночасне підключення оптоволоконних ліній для всіх потенційних абонентів у районі побудови мережі доступу. При побудові пасивної оптичної мережі всі оптоволоконні лінії потім підключаються до розгалуджувачів і збираються фідерним оптичним кабелем до точки присутності. При розгортанні послуг для приватних абонентів сервіс-провайдери рідко досягають 100-процентної підписки. Звичайно цей показник близький до 30 відсотків, що означає, що структура PON мережі використовується не оптимально, а вартість устаткування OLT для кожного абонента значно зростає [14].

7) Обслуговування, пошук і усунення несправностей. Пасивні оптичні розгалуджувачі не можуть передавати інформацію про несправності в центр керування мережею. Тому за допомогою звичайного оптичного часового рефлектометра (OTDR) дуже складно виявити несправність оптоволоконної лінії між розгалуджувачем і точкою термінації оптичної мережі (ONT) абонента. Це значно ускладнює пошук і усунення несправностей у мережах PON і підвищує витрати на їхню експлуатацію.

8) Стійкість. При ушкодженні точки термінації оптичної мережі (ONT) вона може передавати в дерево PON постійний світловий сигнал, що приводить

до порушення зв'язку для всіх абонентів цієї мережі, причому знайти ушкоджений пристрій досить важко.

9) Міграція технологій. Через деякий час наступить момент, коли необхідно буде оновити розгорнуте встаткування PON новою технологією, що забезпечить більшу смугу пропускання. У цьому випадку способи міграції з однієї технології PON на іншу припускають або заміну всіх кінцевих пристроїв або установку фільтрів довжини хвилі на всіх кінцевих пристроях (у випадку використання WDM).

2.3 Основні принципи планування технології FTTH

При побудові мережі на базі FTTH високе енергетичне завантаження лінії зв'язку має на увазі під собою виконання трьох основних умов:

1) Робота при гранично низьких вхідних оптичних потужностях.

Для FTTH характерна заміна кожного з будинкових підсилювачів на оптичні приймачі (ОПр). Так, якщо при FTTC один оптичний передавач навантажується на 4–6 ОПр, то при FTTH навантаження досягає до 20...30...30 ОПр (табл. 2.1). Звідси видно що, вхідна потужність ОПр знизиться на 7...8 дБ.

Будьяке зниження вхідної оптичної потужності $P_{вх}$ на 1 дБ викликає таке ж зниження відношення сигнал/шум (C/N), наприклад, з 51...54...54 дБ до 43...48 дБ.

Таблиця 2.1 - Порівняльні характеристики мереж FTTC, FTTB, FTTH

Найменування параметра	Архітектура		
	<i>FTTC</i>	<i>FTTB</i>	<i>FTTH</i>
Число ОПр	4...6...6	12...18...18	20...30...30
Число абонентів на ОПр	200.....1000	60.....300	1.....150
$P_{вх}$, дБм	+1...-2	-2...-5	-5...-10
C/N, дБ	51...54...54	48...51...51	43...48...48
$U_{вых}$, дБм	100.....105	105.....110	110.....120
CSO, дБ	62...68...68	58...62...62	54...58...58
СТВ, дБ	64...72...72	58...64...64	54...58...58

2) Робота з підвищеним індексом оптичної модуляції (ОМІ або m).

Для компенсації зниження C/N при зниженні рівня вхідної оптичної потужності $P_{вх}$, цілком логічно збільшити рівень вхідного модулюючого сигналу на Δ децибел, що викличе збільшення C/N також на Δ децибел (рис. 2.7). Тому величина m , що залежить від рівня вхідної напруги та модулює $U_{вх}$, повинна бути оптимальною для кожного конкретного випадку. Зазвичай для її визначення використовують машинні методи розрахунку.

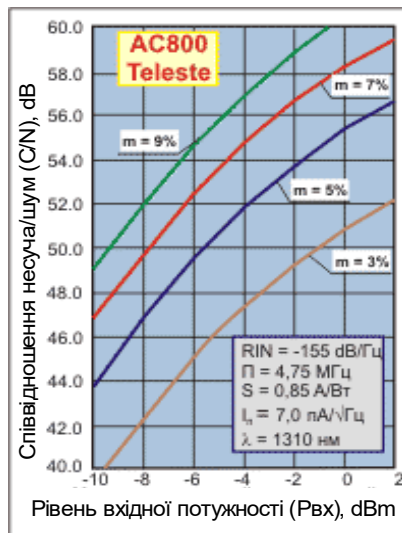


Рисунок 2.5 - Графіки залежності вхідної оптичної потужності від C/N

Більше того, збільшення m приводить і до збільшення рівня вихідного сигналу ОП (рис. 2.6).

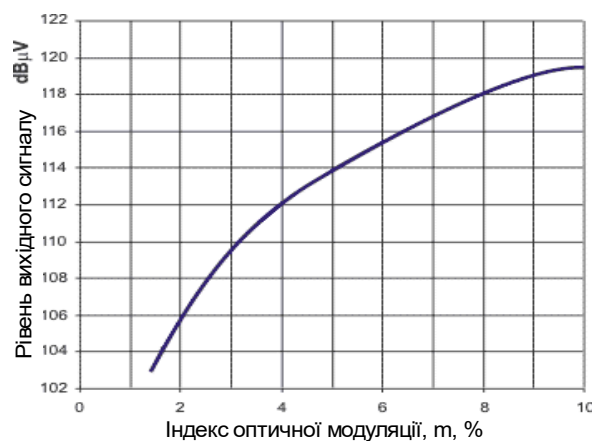


Рисунок 2.6 - Графік залежності індексу модуляції від рівня вихідного сигналу

3) Робота при максимально можливому вихідному рівні - $U_{вих}$.

Зрозуміло, що зі збільшенням рівня вихідного сигналу збільшується абонентська зона охопту. Але при цьому збільшуються й нелінійні

перекручування (CSO/CTB), що виникають тільки в підсилювачі, що використовується в ОПр. Як правило, при використанні технології FTTH, вихідний підсилювач встановлюють у режим максимально можливого вихідного рівня за критерієм припустимих перекручувань. При цьому вибирають компроміс між максимально припустимим вихідним рівнем U_{max} (перекручування в ОПр) і індексом оптичної модуляції m (перекручування в передавачі). Варто також додати, що ОПр в FTTH звичайно використовують глибоке еквалазування (не менш 7...8 дБ), що дозволяє також додатково збільшити вихідний рівень сигналу зі збереженням припустимого рівня інтермодуляційних перекручувань.

Таким чином, з урахуванням того факту, що ОПр в FTTH працюють на гранично низьких вхідних оптичних потужностях (рівень вихідного сигналу знижується на 2 дБ при кожному зниженні вхідної потужності на 1 дБ, рис. 2.7), можна дати рекомендацію про вибір оптичного підсилювача з максимально можливим коефіцієнтом підсилення (тобто здатності забезпечити максимально можливий вихідний рівень при мінімальній вхідній потужності).

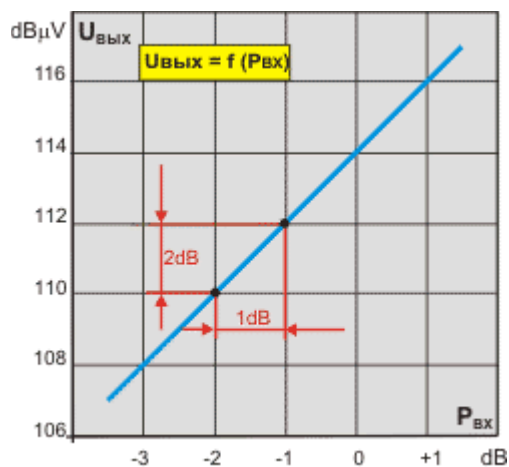


Рисунок 2.7 - Коефіцієнт передачі для ОПр FTTH

З метою мінімізації фінансових витрат, не слід також використовувати ОПр з вбудованою системою автоматичного регулювання підсилення (АРП) в силу того, що сам оптичний кабель має досить високу стабільність характеристик, а активні пристрої (передавач і приймач), як правило, встановлюються в приміщенні. Тобто, рівень сигналу у абонентській розетці буде змінюватися не більше (звичайно не перевищує 1 дБ) самої зміни вхідного сигналу (наприклад, з виходу головної станції). Значно важливіше правильно

вибрати місце установки ОПр з урахуванням подальшого абонентського кабельного розведення.

Варто також додати, що в якості ОПр для технологій FTTH зручно поєднувати дешеві малогабаритні оптичні приймачі та традиційні будинкові підсилювачі.

Таким чином при виборі технології FTTx безпосередній вплив мають запланований набір послуг і необхідна для їхнього надання смуга пропускання. Чим вище пропускна здатність та більший набір послуг, тим ближче до абонентського терміналу повинна підходити оптика, а тобто оптимальним буде використання технології FTTH. Саме вона забезпечує найбільшу смугу пропускання, є повністю стандартизованою й забезпечує масове обслуговування абонентів на відстані до 20 км.

Особливостями FTTH є: більш висока надійність, простота переконфігурації й побудови паралельних мереж, значне зниження шумів інгресії в реверсному каналі, можливість відмови від реверсного каналу й високе енергетичне навантаження мережі.

3 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ FTTH

Відповідно до технічного завдання на кваліфікаційну роботу для організації мережі PON у місті запропоновано використовувати технологію GPON з можливістю подальшого переходу на 10G-PON, аналіз архітектурних і функціональних особливостей якої представлений у другому розділі. На підставі даного аналізу й аналізу основних компонентів і елементів мереж PON, проведемо вибір і обґрунтування необхідного встаткування для організації такої мережі.

Основними вимогами до обираного обладнання, пропонується використовувати загальні мережні параметри технології GPON, до яких можна віднести наступні:

- швидкість передачі (смуга пропускання прямого каналу) - до 2,5 Гбіт/с (ідеальний варіант з погляду використання додатків IPTV);
- наявність стандартів як на технологію GPON, так і на керуючі протоколи (G.984.1-G.984.4);
- використання симетричного й асиметричного варіантів каналів передачі;
- висока ефективність використання смуги пропускання (>90%);
- збільшення до 28 дБм (FSAN Class B+) оптичного бюджету потужності;
- максимальне число абонентських вузлів до 64 на одне волокно (максимальний радіус мережі: 10 км при коефіцієнті розгалуження 1:64; 20 км - при 1:32).

У першу чергу розглянемо більш детально основні проблеми, що виникають при побудові мереж за технологією GPON.

3.1 Проблеми при побудові PON і методи їх вирішення

3.1.1 Слабкий сигнал у абонента

Якщо при установці ONU (або її повторному включенні/перезавантаженню з боку клієнта) вона не змогла зареєструватися в мережі - велика ймовірність того, що ушкоджено оптичний кабель на стороні клієнта й сигнал згасає вище розрахованого. Ушкодження може бути пов'язане

як з неякісним зварюванням або випадковим перегином волокна на вузлі розподілу, так і зі зловмисним втручанням.

Для вирішення цієї проблеми потрібно, у першу чергу, перевірити стан всіх ONU на абонентському розгалуженні, до якого підключена й проблемна ONU. ONU має функції моніторингу рівня сигналу на своєму приймачі, а також потужності свого передавача, ці дані по запиту відсилаються на OLT. Якщо проблема є у всіх абонентів – необхідно рухатися убік центрального вузла дерева, розширюючи радіус пошуку й перевіряючи, на якому рівні «вкладення» існує проблема.

Як тільки буде знайдено розподільник, у якого є якийсь проблемний вихід, а інші – у робочому стані, можна сказати, що проблема вирішена. З імовірністю 95% ця проблема знаходиться на гілці, що зв'язує два вузли: центральний напівробочий і дочірній неробочий. Цю лінію досить просто перевірити рефлектометром, якщо PON побудована на конекторах, і зовсім непросто зробити це, якщо дерево змонтоване за допомогою зварних з'єднань.

3.1.2 Неконтрольоване випромінювання в дереві на довжині хвилі 1310 нм

Трапляються ситуації, коли ONU вийшла з ладу (буває вкрай рідко) і постійно випромінює сигнали в загальний канал на довжині хвилі 1310 нм, або несумлінний користувач включив у дерево замість своєї ONU медіаконвертер, що випромінює на тій же довжині хвилі (1310 нм). У цих випадках у висхідному потоці дерева буде постійно присутнє випромінювання, яке не даватиме можливості іншим ONU передавати свої дані до OLT. Як результат - дерево не функціонуватиме.

Є два варіанти вирішення проблеми. Перший – обійти кожний будинок у надії знайти несправність або чудом виявити зловмисника.

Другий варіант, що використовується для PON, побудованих з використанням конекторів, - локалізація випромінювання шляхом послідовного відключення гілок дерева від «кореня» (OLT) до «листів» (абонентів, ONT). При цьому проводиться наступна послідовність дій:

- на кореневому ділянці відключаються (і для вірності перевіряються на наявність випромінювання) гілки, що йдуть «вниз» по дереву;

- при знаходженні гілки, у якій присутнє паразитне випромінювання, вона відключається від дерева (інша частина дерева знаходиться в робочому стані) і рухаються вниз по цій гілці до наступного діляника;

- повторювати доти, поки проблема не локалізується до самого останнього (далекого/нижнього в ієрархії) діляника. Далі відключаються послідовно клієнтські з'єднання на даному ділянику, поки не знайдемо джерело випромінювання.

3.1.3 Флуд

Флуд - проблема будь-якої міської мережі. Найчастіше флудять пристрої з підгорілими портами, рідше - користувальницькі комп'ютери, заражені вірусами. Також навмисно флудити можуть користувачі, які виражають якийсь соціальний протест, або мережі, що мають із непрацездатності лінії, якісь вигоди. Основна проблема флуда - неможливість віддалено добратися до встаткування, що його породжує, або логічно локалізувати джерело.

Підгорілі порти - проблема, в основному, міського типу, і до PON має лише часткове відношення. Як відомо, чим довше мідний кабель, тим більше на нього наводяться електромагнітні поля. Дерево PON побудоване на оптичному волокні та, відповідно, не піддається впливу електромагнітних наведень. Проблема може виникнути в тому випадку, якщо до однієї ONU по мідному кабелю підключено декілька користувачів, територіально віддалених один від одного.

Із флудерами й вірусами теж все зрозуміло: перші користуються демократичними свободами, другі зневажають всіма законами робототехніки. Методи боротьби й з тими, і з іншими відомі, але для початку потрібно локалізувати їх шкідливу діяльність.

Мережа PON - система із централізованим керуванням. Всі потоки, що виходять від клієнтів, приходять на OLT. Тільки OLT може дати дозвіл ONU на передачу даних, і вона ж може заборонити будь-які контакти ONU із зовнішнім світом. Відсутність активного встаткування в дереві PON значно полегшує боротьбу із флудом - не створюється прецедентів з нескінченним пересиланням пакетів з неправильними контрольними сумами між двома сусідніми вузлами комутації та, відповідно, відсутнє переповнення їх буферів.

OLT завжди підключений до вищестоячого деякого пристрою глобальної мережі (наприклад, L3 роутер), тому доступ до нього є завжди. Вищестоящий

пристрій не піддається впливу флуда від клієнтів у дереві PON, оскільки OLT виділяє певний діапазон часу кожній ONU і дозволяє/забороняє їй віщання, а відповідно, ONU не може безконтрольно передавати на порт OLT і вищестоячий пристрій пакети. Аналогічна ситуація відбувається з трафіком, що нескінченно передається по мережі: його просто не буде, тому що кожна ONU має доступ до своїх сусідів-клієнтам тільки через OLT.

Крім того, для захисту мережі від вірусної активності, у якій є присутнім безконтрольне розмноження MAC-адрес, OLT має функціонал, що забороняє мати первній (або всім) ONU більш ніж N активних MAC-адрес одночасно.

3.1.4 Застосування вимірювального встаткування в PON

Для виміру оптичних показників в PON найкраще використовувати найпростіший оптичний вимірювач потужності. Його функціональних можливостей цілком вистачає на те, щоб перевірити рівень вхідного в дерево (або його гілки) сигналу з однієї сторони й рівень вихідного сигналу з іншої.

Застосування стандартного рефлектометра в PON обмежено прольотами між ділянками (знаходження розривів у гілці або перевірка якості зварювань). Все дерево стандартний рефлектометр «освітити» не зможе - після першого ділянка показання перетворяться в «кашу». Варто також враховувати той факт, що при вимірі прольоту «знизу-нагору» по топології дерева, у волокні не повинно бути випромінювання, а виходить, необхідно або виключити модуль OLT (тим самим «покласти» все дерево), або відключити конкретну гілку дерева. При вимірі гілки дерева від вузла до вузла «зверху-вниз» (від кореня до гілок) проблеми з небажаним випромінюванням у волокні бути не повинно - ONU «мовчать» доти, поки OLT не дозволить їм віщання [16].

Чи потрібні виміряні показники потужності передавача ONU? Практично без цих знань цілком можна обійтися: якщо ONU не реєструється в дереві, де вже є справно працюючі ONU, то варіантів усього два.

Варіант №1 найпростіший: поганий лінк від абонентського діляника до абонента. Перевіряється згасання на проблемній ділянці й порівнюється з показниками «шостого почуття». Якщо воно (почуття) підказує, що з лінком є проблеми - їх треба усунути.

Якщо ж з волокном усе в порядку - тоді варіант №2: ONU неробоча. У цьому випадку знання або незнання того, наскільки погано випромінює

передавач ONU, ніяк не вплине на рішення про повернення неробочого обладнання постачальникові з метою заміни його на робоче.

Існує ще один метод виміру оптичних сигналів у дереві PON. Він базується на тому факті, що кожна ONU вміє видавати інформацію на OLT про потужність свого передавача й рівні сигналу на своєму приймачі. OLT, у свою чергу, може видавати таку ж інформацію про свої оптичні порти. За допомогою цього функціоналу можна займатися моніторингом уже працездатного дерева.

3.1.5 Проблема побудови «останніх миль»

При величезній розмаїтості останніх миль, що відрізняються довжиною й числом абонентських закінчень - масштаб останньої милі в місті становить 1-3 км, за містом 3-10 км, а в котеджному селищі 100-1000 м - існує загальна проблема, вірніше, важко розв'язуване завдання - створення економічної розподільної мережі доступу [15].

Головною проблемою є висока вартість кабельної системи у розрахунку на одного абонента. Саме кабельна складова в мережі PON представляється найбільш затратною, складною по будівництву та консервативною. Тому вагомим активом компаній, що виконують монтаж телекомунікаційних кабельних інфраструктур абонентських мереж доступу є те, наскільки ефективно й економічно виконується монтаж, та яку технологію будівництва було обрано. У той же час самі кабельні інфраструктури доступу до абонентів є одним з головних активів оператора провідного зв'язку.

Завдання становиться більш складним, коли мова йде про волоконно-оптичні мережі доступу. З урахуванням появи нових широкосмугових послуг, наприклад, затребувані сьогодні розширені послуги відео (VoD) і перспективні послуги, типу ТВЧ (телебачення високої чіткості), стає зовсім ясным, що єдиним правильним вирішенням є будівництво волоконно-оптичних кабельних інфраструктур. При цьому оптичний кабель (ОК) повинен підходити до кожного будинку. Такі інфраструктури дозволяють згодом багаторазово й безболісно збільшувати швидкість передачі у мережі. Крім того, можна впевнено сказати, що через 5–10 років на території (міста чи селища) буде домінувати той оператор, який матиме більш розгалужені волоконно-оптичні мережі доступу та охоплюватиме більше число клієнтів. На сьогодні технології PON, Gigabit Ethernet, CWDM вже забезпечують загальний потік трафіка в мережі доступу до 10 Гбіт/с. Через кілька років на останній милі будуть

впроваджуватись NG-PON, 10-Gigabit Ethernet, DWDM, а обсяг трафіка на точку присутності зростає до 40-100 Гбіт/с.

Прокладка ОК у міській кабельній каналізації або в ґрунт уже зрівнялася за вартістю із прокладкою кабелю із кручених пар або коаксіального кабелю. У той же час, розгалуження ОК значно затратніше, чим мідного кабелю. Тому, головна проблема, що постає сьогодні при облаштуваності останніх миль - як створити оптимальну розподільну оптичну кабельну систему, що має гнучкі можливості по нарощуванню й розгалуженню [15].

3.2 Способи прокладки кабелю на «останній милі»

Конструкції кабелів для побудови мережі визначаються, у першу чергу, умовами їхньої прокладки й експлуатації. Існує три основних методи прокладки кабелів:

- прокладка оптичного кабелю в ґрунт. При такій прокладці ОК застосовуються звичайні методи прокладки, такі як і для електричних кабелів зв'язку. Прокладка може здійснюватися ручним способом у раніше вириту траншею або у безтраншейний спосіб за допомогою ножових кабелеукладачів. Для безпосередньої прокладки в ґрунт обираються ОК, що мають стрічкову броню або броню зі сталевих дротів. Один із найдорожчих та складних методів прокладки;

- прокладка по підземній кабельній каналізації. Будівництво кабельної каналізації обходиться дорожче, ніж прокладка кабелю безпосередньо в ґрунт, але потім її використання значно спрощує додавання й видалення кабелів. Крім того, у цьому випадку можна використовувати більше легкі кабелі з меншою кількістю захисних оболочок. Найчастіше такий варіант прокладки доступний у містах, де кабельна каналізація вже створена;

- прокладка ВОК по повітрю. Для будівництва ВОЛЗ методом підвісу в населених пунктах широко використовується підвіс ОК до сталевих тросів, натягнутого між опорами на консолях, а також підвіска ОК з вбудованим в нього тросом на консолях спеціальної конструкції (рис. 3.1, 3.2). Найкращий варіант з точки зору швидкості та простоти монтажу лінії. Частіше за все використовується для побудови мереж доступу у селищах та котеджних містечках.



Рисунок 3.1 - Підвіс оптичного кабелю на опорах



Рисунок 3.2 - Підвіс ОК до сталевого троса

3.3 Вибір і обґрунтування типу оптичного волокна

У якості середовища передачі для широкосмугових мереж доступу, як правило, використовуються багатомодові або одномодові волоконні світловоди. Багатомодові волокна застосовуються в локальних мережах для передачі інформації на короткі відстані й побудови структурованої кабельної системи (СКС) усередині будинків, одномодові волокна знайшли широке застосування на магістральних лініях, а також у міських і регіональних мережах [18].

Типова залежність згасання від довжини хвилі для кварцових волокон, легованих германієм, представлена на рис. 3.3.

Розглянемо вплив типу оптичного волокна на характеристики мережі зв'язку, що будується. Проектна вартість, а також ціна за «право проходу» і власне прокладку кабелю, досить значні в міських умовах, що збільшує загальну вартість будівництва мережі. Тому вартість оптичного волокна в кабелі становить невелику частку (порядку 2-5%) від загальної вартості оптичної лінії зв'язку.

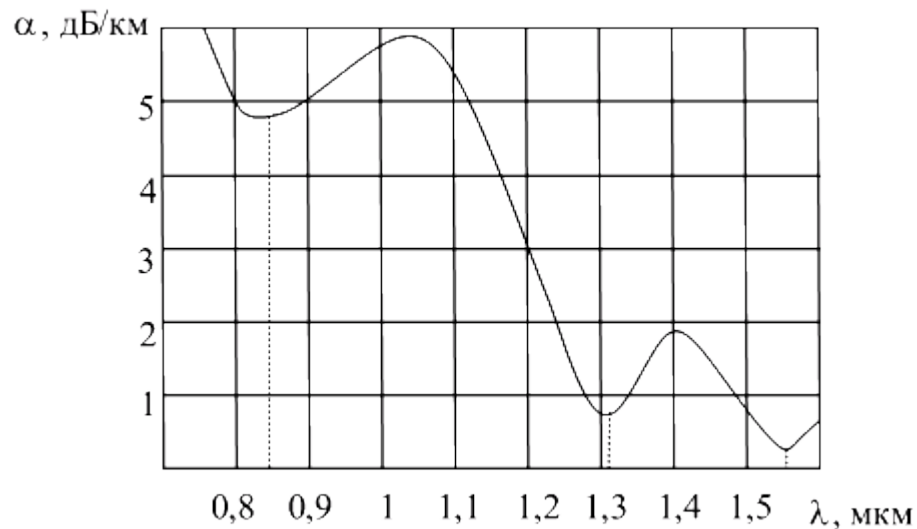


Рисунок 3.3 - Залежність загасання від довжини хвилі у волоконних світловодах

Деякі ключові вимоги до волокна для мереж доступу, повинні включати наступні характеристики:

- підтримку стандартних систем SDH на довжині хвилі 1310 нм, а також транспорт Ethernet і їхню спільну роботу в діапазоні швидкостей від 10 Мбіт/с до 10 Гбіт/с;
- підтримку систем DWDM на довжині хвилі 1550 нм;
- можливість використання рішень мережного доступу, таких, як FTTH-PON з розширеною смугою.

Волокно типу ZWPF стало практично новим стандартним волокном, тому що воно задовольняє всім перерахованим вище вимогам при конкурентоспроможній ціні в порівнянні з SMF.

Волокно ZWPF, що також називають волокном ITU-T G.652.A (табл. 3.1), задовольняє вимогам стандартів IEC (МЕК - Міжнародної електротехнічної

комісії) на величину втрат в області водяного піка навіть після застосування водневого старіння. Тому можна бути впевненим у тому, що високі втрати в області цього піка не виникнуть протягом строку експлуатації волокна.

Таблиця 3.1 - Оптичні характеристики волокна G.652.A

Характеристика	Значення
Коефіцієнт загасання	• на довжині хвилі 1310 нм: ≤ 0.35 дБ/км • на довжині хвилі 1383 нм: ≤ 0.31 дБ/км • на довжині хвилі 1550 нм: ≤ 0.21 дБ/км • на довжині хвилі 1625 нм: ≤ 0.23 дБ/км
Коефіцієнт хроматичної дисперсії	• при вимірі в діапазоні довжин хвиль 1285 - 1330 нм: ≤ 3.5 пс/(нм × км) • при вимірі в діапазоні довжин хвиль 1270 - 1340 нм: ≤ 5.3 пс/(нм × км) • при вимірі на довжині хвилі 1550 нм: ≤ 18 пс/(нм × км)
Довжина хвилі нульової дисперсії	1300 - 1324 нм
Нахил нульової дисперсії	≤ 0.092 пс/(нм × км)
Довжина хвилі відсічення	1260 нм
Поляризаційна модова дисперсія (PMD)	≤ 0.2 пс/км
Діаметр модового поля	• на довжині хвилі 1310 нм: 9.2 ± 0.4 мкм; • на довжині хвилі 1550 нм: 10.4 ± 0.8 мкм
Механічні характеристики:	
Діаметр оболонки	125.0 ± 0.7 мкм
Погрішність концентричності серцевини	≤ 0.5 мкм
Погрішність концентричності оболонки/покриття	≤ 12 мкм
Зусилля зняття покриття	1.3 - 8.9 Н
Діаметр покриття	245 ± 5 мкм
Неокруглість покриття	$\leq 1.0\%$
Випробування на міцність (proof-test)	$\geq 1.0\%$ (0.7 ГПа)
Радіус вигину волокна	≥ 4.0 м

3.4 Вибір дільників

Топологія PON стандартно є деревоподібною. Виходячи з положення клієнтів (яких краще знаходити й позначати на карті), вибираються дільники, яких існує велика кількість варіантів.

Дільники бувають Х- і Y-образні, зварені (сплавні) та планарні. Розрізняються вони технологією виробництва й показниками згасань на кожному виході після розподілу сигналу та кількістю входів. Х-образні

дільники в PON загалом використовуються для «додавання» у спадний потік сигналів телебачення, Y-образні - для стандартної побудови дерева.

Зварені розгалужувачі, що виконані за технологією FBT (англ. Fused Biconical Taper) формуються наступним чином: два волокна з видаленими зовнішніми оболонками сплавляють в елемент із двома входами й двома виходами (2/2), після чого один вхід відрізають і закривають безвідбивними матеріалами, формуючи розгалуджувач 1/2. При цьому потужність сигналу на кожному виході дільника дорівнює якійсь процентній частині від потужності сигналу на вході в дільник (зазвичай 50%/50%). Можна забезпечити розподіл потужності в різних пропорціях, наприклад 30%/70% (30% потужності сигналу йде в одне плече, а 70% - в інше). Зварені розгалуджувачі звичайно мають від одного до трьох вікон прозорості (1310 нм, 1490 нм або 1550 нм).

Планарні розгалуджувачі PLC (англ. Planar Lightwave Circuit) виготовляються в кілька етапів. Перший з них полягає в нанесенні на деяку підложку відбиваючого шару-оболонки. На даний шар наноситься матеріал хвилеводу (скло), на якому згодом формується маска для травлення. Результатом процесу травлення є система хвилеводів, що є, по суті, оптичним дільником. Система планарних хвилеводів покривається другим відбиваючим шаром-оболонкою. До вже готових планарних хвилеводів приварюються пігтейли, після чого пристрій розміщується в корпус із пластику або металу. Необхідна кількість розгалужень PLC-сплітера досягається сполученням дільників 1×2. Планарна технологія дозволяє виготовляти компактні й надійні розгалуджувачі із числом вихідних волокон до 64. Планарні розгалуджувачі мають більш стабільні й точні характеристики на виходах, працюють у широкосмуговому діапазоні хвиль 1260 нм...1650 нм і мають менше загасання на порт (у порівнянні зі звареними при розподілі більш ніж на 2) [14].

По підсумку, планарні розподільники звичайно мають рівні показники згасань після розподілу й рівномірно ділять вхідний сигнал на 2N виходів (наприклад, 1x2, 1x4...1x64), зварені ж бувають 1x2 і мають не рівномірне згасання на виходах (зварені дільники з кількістю виходів, відмінним від 2 - це результат комбінації дільників 1x2 зі співвідношенням вихідної потужності від 1/99 до 50/50).

3.5 Види сполучних роз'ємів у PON

Існує два методи фізичної побудови дерева: використання сполучних роз'ємів (типу SC/APC або SC/UPC) між волокном і розподільниками та використання безпосереднього зварювання двох волокон. Природно, все волокно, що прокладене між OLT і розподільником, двома сусідніми розподільниками, розподільником і ONU, зварюється стандартним чином. Для зварювання волокна й розподільника (сплітера) використовуються неокінцьовані сплітери.

Види оптичних конекторів:

- SC/UPC (англ. Subscriber (Square / Standard) Connector/Ultra Polished Connector) – стандартний квадратний конектор синього кольору для одномодового волокна (або сірого – для багатомодового);

- SC/APC (англ. Subscriber (Square / Standard) Connector/Angle Polished Connector) – стандартний квадратний конектор зеленого кольору для одномодового волокна.

Крім кольору, розрізняються вони фєрулою – керамічним (рідше пластиковим) сердечником, що в UPC відполірований під кутом 90° до поздовжньої осі фєрули, а в APC – скошений під кутом 8° . APC призначений для того, щоб зменшити вплив відбитого сигналу на сигнал у волокні (рис. 3.4).

Під кожний вид конекторів є й свої адаптери (відповідно UPC та APC). Не слід забувати, що UPC і APC конектори між собою з'єднувати не можна. Їх можна пошкодити (рис. 3.3) або одержати на цьому з'єднанні велике згасання (близько 6дБм).

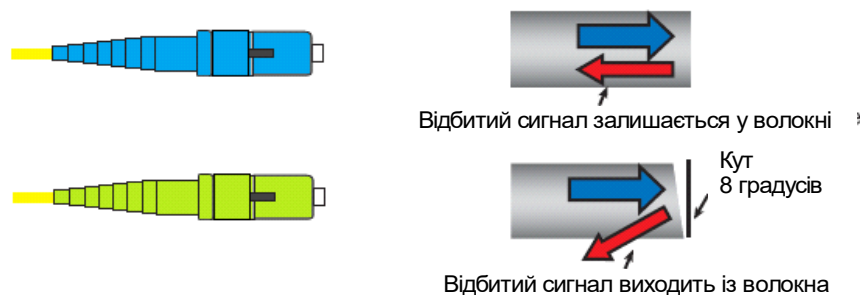


Рисунок 3.4 - Різниця SC/UPC і SC/APC конекторів

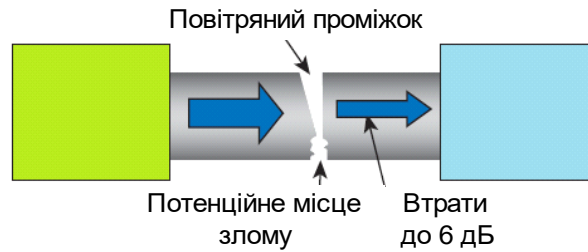


Рисунок 3.5 - Неправильне з'єднання двох типів конекторів

Конектори типу APC краще використовувати в тому випадку, якщо в дереві PON планується використання CATV, у противному випадку можна використовувати стандартні UPC конектори.

Тепер варто відзначити, чи потрібні конектори взагалі. Теоретично – ні, так як конектори вносять додаткові згасання в місцях з'єднання, можуть ненавмисно відключитися від роз'єму адаптера. З цього погляду, зварювання набагато надійніше. Згасань менше, дерево – стійкіше. Але з іншого боку, якщо в дереві виникає будь-яка проблема, то для її пошуку та усунення доведеться посегментно відключаючи гілки дерева на сплітерах, починаючи від OLT. У випадку з використанням конекторів відключення гілок можна буде зробити швидко та зручно, а у випадку повністю звареного дерева розібрати дерево не вийде, або буде вкрай проблематично.

3.6 Облаштування вузлів розподілу в PON

Вузол розподілу являє собою точку в просторі, де сходяться разом (і з'єднуються за допомогою сплітера) оптичні кабелі від провайдера та від абонентів. В усьому цивілізованому світі місце розподілу прийнято захищати як від погоди й фауни, так і від сторонніх очей і рук. Є кілька підходів.

Перший підхід - береться стандартний негерметичний короб для активного встаткування (наприклад, ВК-520), усередині розташовуються патчпанелі (наприклад, 4x16), короб розміщується в приміщенні, заводиться туди ж кабель і вішається замок. Достоїнством такого підходу є масштабованість точки розподілу: завели в точку розподілу волокно - поставили в патчпанелі, сплітер 1x16 - розвели всім абонентам. Абонентів стало більше, ніж 16 - завели друге волокно й повторили попередній пункт. Недоліком є те, що встановити короб можна не завжди й не скрізь (на стовпі він

буде погано захищений від зовнішніх факторів, а також буде псувати архітектурний ансамбль житлового сектора), а крім того, покупка відразу всіх патчпанелів у зборі й установка їх може не виправдати себе (якщо клієнтів буде менше розрахованого) [13].

Другий підхід - використання герметичних оптичних муфт на два або чотири кабельних вводи. У муфтах є місце під сплайс-касети під волоконні світловоди. Незручність даного рішення в тому, що при технічних роботах ковпак муфти треба знімати, а це не завжди зручно. Крім того, муфта має не так багато вільного місця під ковпаком, а значить можуть виникнути проблеми при розміщенні під ним сплітера високої ємності (наприклад, 1x16).

Третій підхід – використання спеціальних герметичних пластикових коробів – наприклад: FTTH/PONBox-12 і FTTH/PONBox-16 на 2 кабельних входи й 12/16 виходів відповідно. Їх достоїнства: герметичні, замикаються, зручно відкриваються, малі розміри, можна прикріпити на любую поверхню (з торця коробка є місце для кріплення бандажної стрічки), усередині – місце для установки сплайс-касет і додаткові місця під гільзи (рис. 3.6).

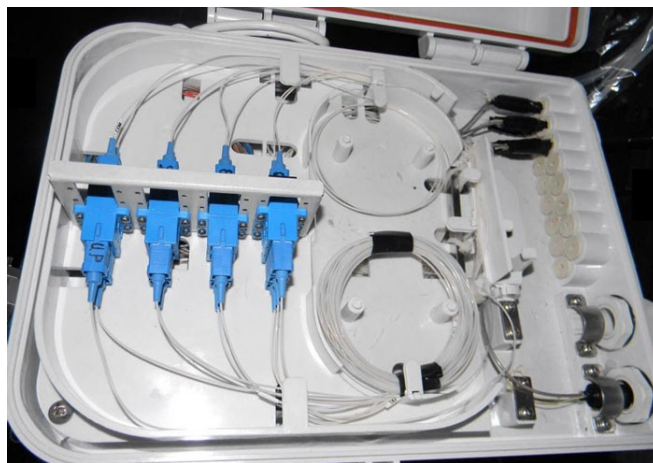
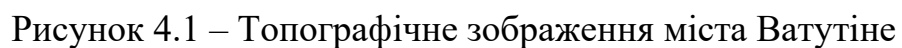


Рисунок 3.6 - Структура короба 1x8 в FTTH/PONBox 16

Крім того, білий пластик (досить міцний і легкий для своєї товщини) нагрівається значно менше, ніж метал, і досить добре поглинає УФ-випромінювання.

Застосування FTTH/PONBox не обмежене розміщенням у них стільки сплітерів. Короб можна використовувати для розміщення в ньому активного встаткування, наприклад, ONU, медіаконвертерів, некерованих світчей і іншого [13].

У відповідності до технічного завдання планується підключення абонентів міста Ватутіне Черкаської області (рис 4.1) до мережі абонентського доступу на базі технології PON. Кількість населення – 16200 чол.; площа – 10,89 км²; ландшафт – рівнинний, водних перешкод для прокладки кабелю немає.



Існують два основних типи архітектури побудови зовнішньої мережі - із централізованим і розподіленим розміщенням сплітерів. Останню схему часто називають каскадною. Головна перевага централізованої архітектури - її висока гнучкість: до будь-якого виходу будь-якого сплітера через розподільну мережу можна підключити будь-якого абонента. Це дозволяє поступово, у міру росту числа абонентів, додавати мережні елементи, а виходить, заощаджувати засобу на початковому етапі. Важливою перевагою централізованої архітектури є й

більше простий перехід у майбутньому до систем WDM PON, у яких пропускна здатність мережі буде збільшена за рахунок додавання спектральних каналів. При побудові мережі за каскадною схемою повинні бути встановлені відразу всі сплітери, а встаткування OLT розгорнуте для обслуговування розрахункового числа підключень. До переваг каскадної схеми звичайно відносять зменшення числа волокон у розподільній мережі, прямим наслідком чого є, зокрема, зниження витрат на їхнє зварювання. Однак варто помітити, що вартість прокладки оптичного кабелю (а це істотна стаття витрат при побудові будь-якої інфраструктури) не сильно залежить від числа волокон у ньому, тому в цій частині на економію розраховувати не доводиться. А от розміри блоків (наприклад, муфт), у яких розміщаються сплітери, при каскадній схемі побудови мережі можуть бути серйозно зменшені, що розширює можливості при виборі місця їхнього розміщення. Необхідність установки досить великого монтажного конструктива (шафи) у місці централізованої установки сплітерів у ряді випадку серйознішає недоліком централізованої архітектури. Наприклад, у деяких проектах провайдер-провайдер-сервіси-провайдер не мають можливості встановлювати громіздка вулична шафа, у цьому випадку вихід може бути знайдений у підземному або повітряному розміщенні компактних каскадних сплітерів [12].

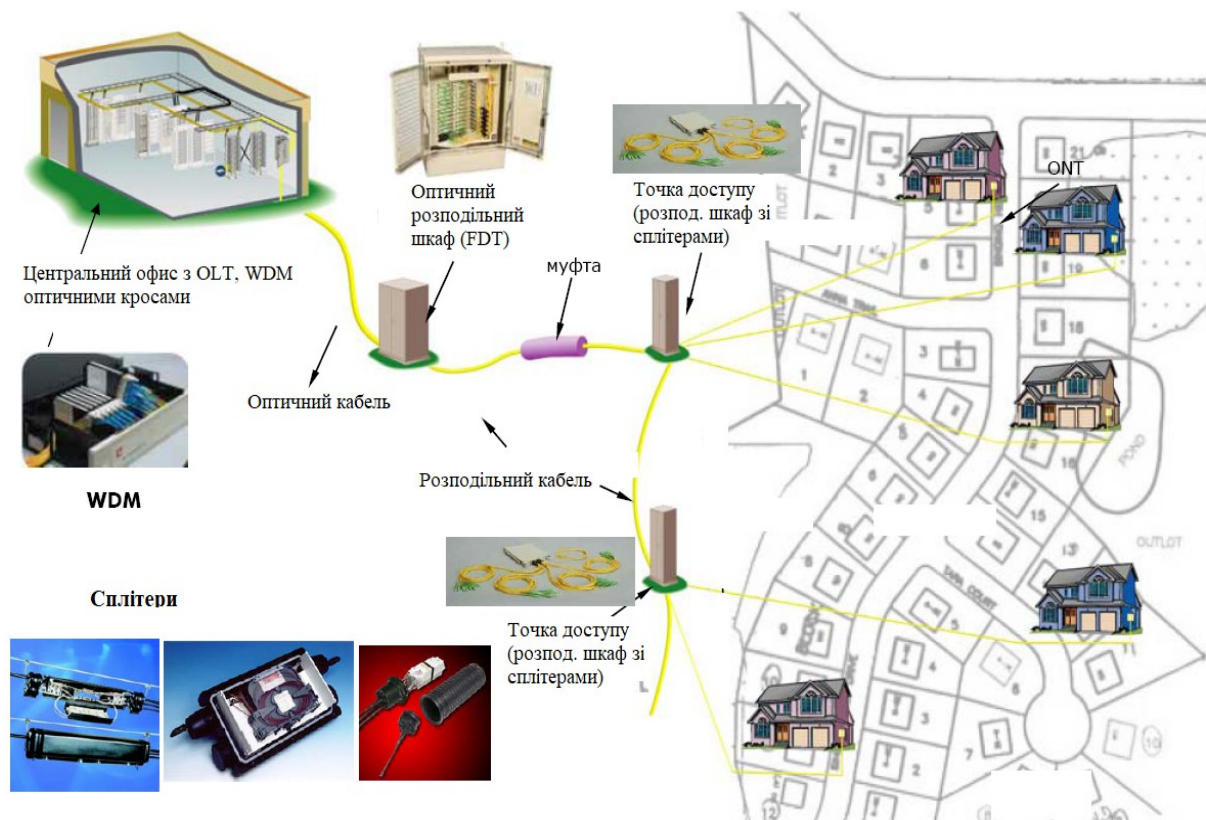


Рисунок 4.2 – Загальний підхід до формування оптичної інфраструктури GPON

Згідно технічного завдання, розроблювана волоконно-оптична мережа доступу використовує для побудови «останньої милі» технологію FTTH. Розглянемо більш детально організацію мережі доступу в місті.

Проектована мережа доступу повинна забезпечити присутність оператора зв'язку по всьому місту, для подальшого підключення всіх бажаючих абонентів до оптичної мережі. В першу чергу мережа орієнтована на сектор із багатоповерхівками (жовті та сині позначення на схемі).

Найбільше вигідно розташувати все активне приймальнопередавальне обладнання (OLT з SFP C++ PON модулями) в одному місці (центральный офіс), а по району розташувати сплітери, організувавши, таким чином, легко масштабовану економічно вигідну мережу доступу. В будинках абонентів будуть встановлюватися ONT з оптичними трансиверами класу B+.

На деяких розгалужувачах залишені точки росту, це дозволить підключати нових абонентів без реконфігурації інших сегментів мережі.

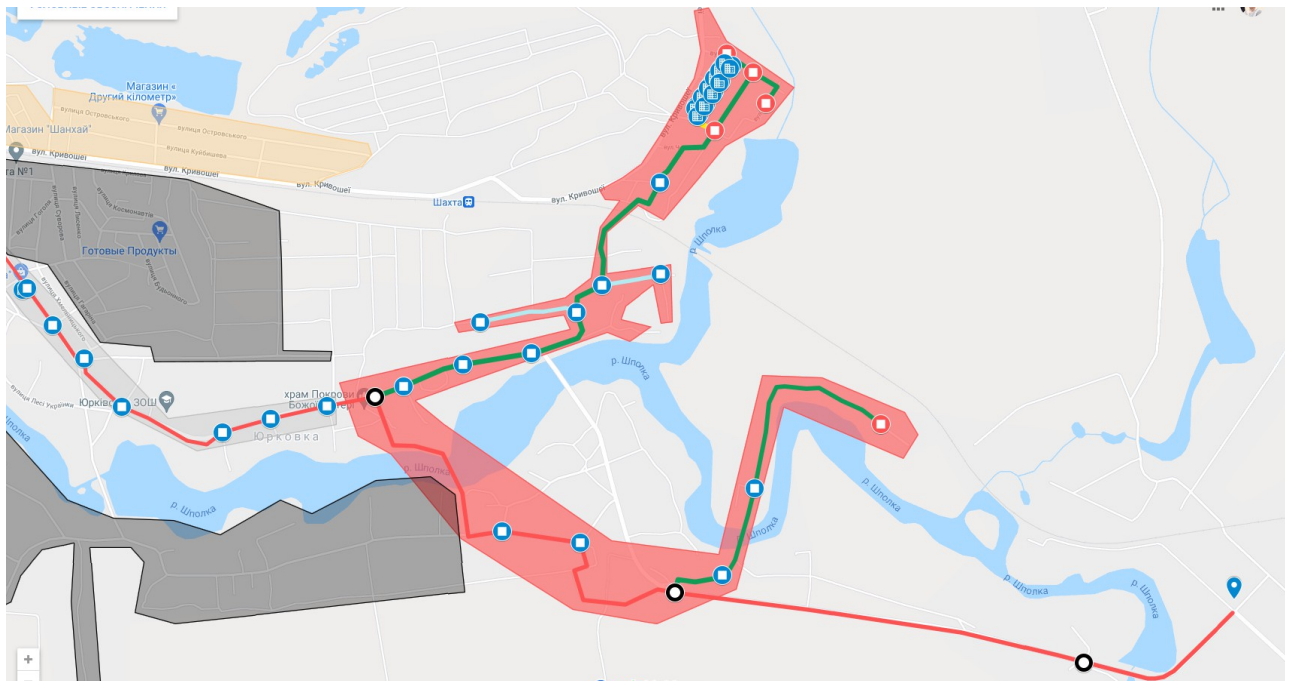
У схемі на магістральній і розподільній ділянках буде використаний оптичний кабель із оптичним волокном G.652, а на абонентській ділянці FTTH-кабель G.657A, що має підвищену стійкість до вигинів.

З урахуванням географічного розташування будинків було ухвалено рішення використовувати топологію пасивного дерева.

Структурна схема організації мережі доступу показана на рис. 4.6 та 4.7.



Рисунок 4.6 - Топологічна схема мережі доступу міста Ватутіно на основі технології GERON (вид зі супутника)



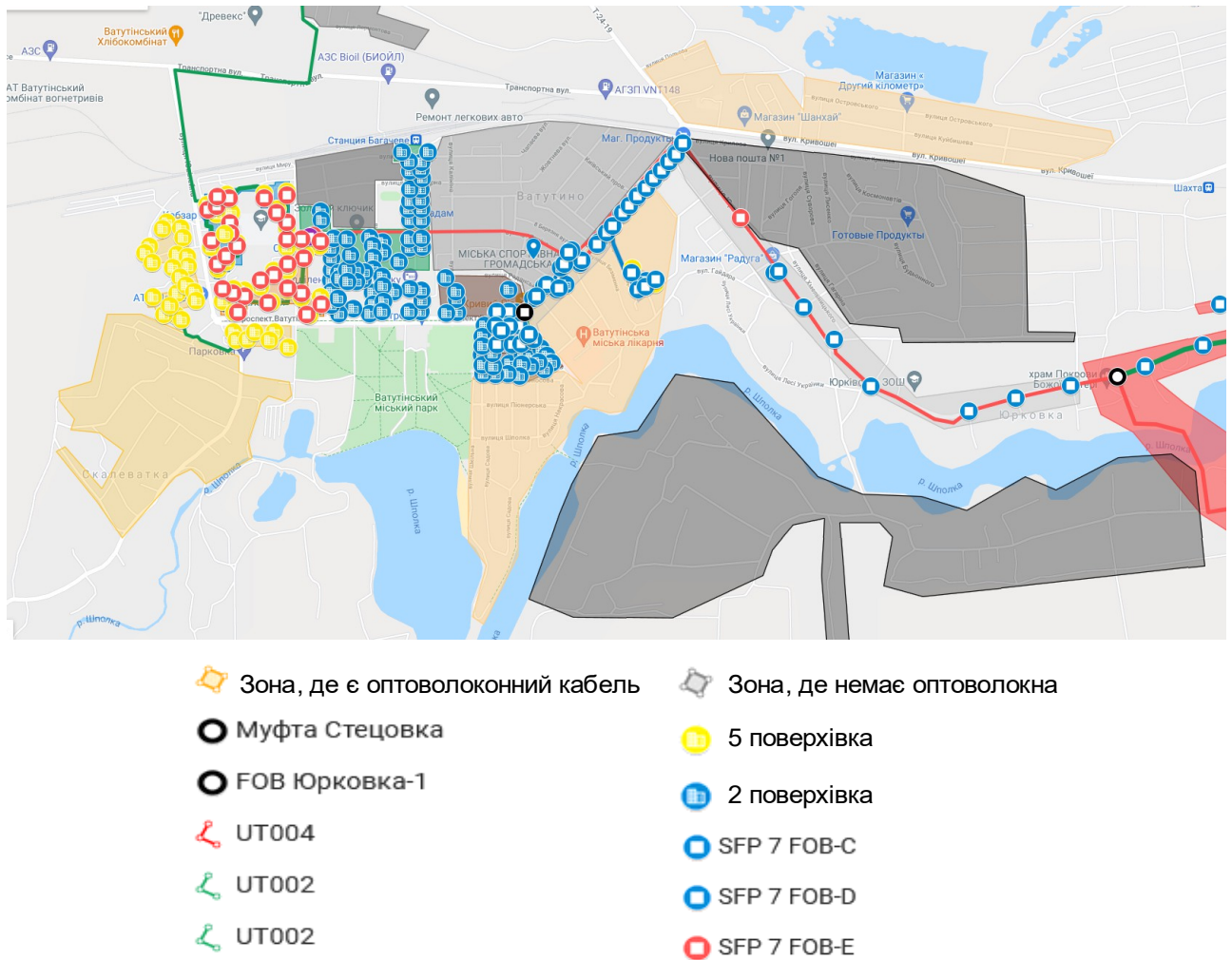


Рисунок 4.7 - Топологічна схема мережі доступу міста Ватутіно на основі технології GERON

4.3 Пасивні елементи мережі

Розподільні блоки встановлюються на границі між магістральним і розподільною ділянкою мережі PON. У мережі, побудованій по централізованій архітектурі, такий блок звичайно являє собою вуличну шафу з устаткуванням, що забезпечує обслуговування необхідної кількості портів. У мережах з каскадною архітектурою такий блок цілком може бути виконаний у коробці меншого розміру або взагалі в муфті (рис. 4.8), установленій під землею або на стовпі.



Рисунок 4.8 - Оптична муфта

У місці установки розподільного блоку в магістральному кабелі робиться надріз, з нього витягає один модуль, волокна якого підключаються до сплітера. З виходу сплітерів волокна через зону комутації підключаються до волокон розподільного кабелю. У випадку централізованої архітектури ці волокна, з'єднуючись із волокнами абонентських кабелів у відповідному терміналі, без якого-небудь додаткового розподілу приходять до портів пристроїв ONT. У каскадній схемі у відповідному терміналі теж установлюються сплітери, які розділяють сигнал ще один раз. Конструкція розподільної шафи в мережі із централізованою архітектурою повинна гарантувати зручний доступ до з'єднань для їхньої перевірки, тестування мережі, реалізації різного роду змін і доповнення (наприклад, при підключенні нових абонентів) [20].

Для побудови мережі будуть використані оптичні міні-бокси SFP 7 FOB-C/D/E.

Сталеві настінні оптичні міні-бокси FOB-C (рис. 4.9) дозволяють зрощувати до 48 оптичних волокон. Допускається введення двох оптичних кабелів. Дозволяє встановити змінну лицьову панель FC-08 або SC-08, для установки до восьми адаптерів FC або SC типу.

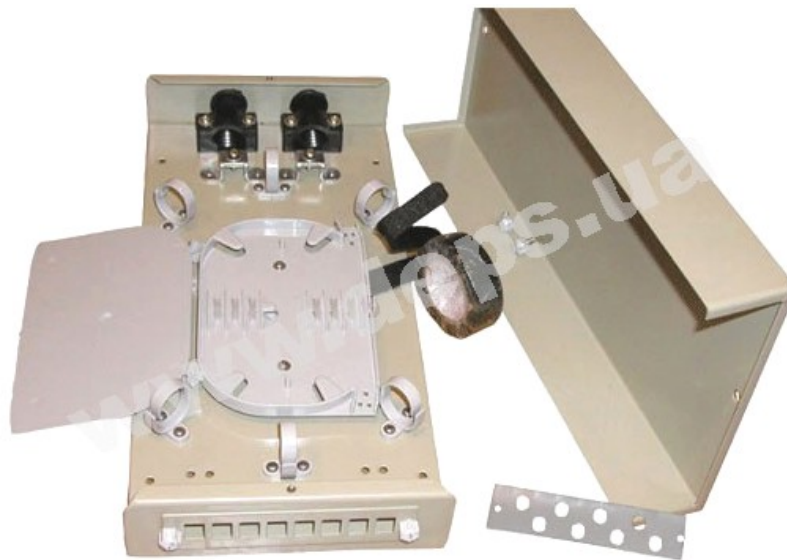


Рисунок 4.9 – Міні-бокс SFP 7 FOB-C

Відвідні термінали (drop terminal) встановлюються на границі між розподільною оптичною мережею й кабелями, що слугують безпосередньо для підключення абонентів. Як правило, конструкції таких терміналів дозволяють встановлювати в них невеликі сплітери (наприклад, 1:4 або 1:8). Чим більше абонентів підключається до одного відвідного терміналу, тим більше довжина абонентських кабелів, що збільшить витрати на їхню інсталяцію. Тому зазвичай кількість абонентів, що обслуговуються через один drop-термінал, обмежують у межах 6-10, залишаючи декілька портів у резерві. Відвідні термінали можуть встановлюватися в різних місцях, наприклад на телеграфному стовпі або під землею. Установка цих елементів на стовпах полегшує доступ до них і знижує вимоги до захисту від несприятливих впливів навколишнього середовища. Як відвідні термінали можуть використовуватися вже розглянуті вище муфти або міні-бокси (тільки, звісно, меншої ємності).

4.4 Кабель та його прокладка

Значна частина витрат при розгортанні будь-якої мережі FTTH пов'язана з безпосереднім підключенням абонентів та активацією обраного ними сервісу (рис. 4.10).

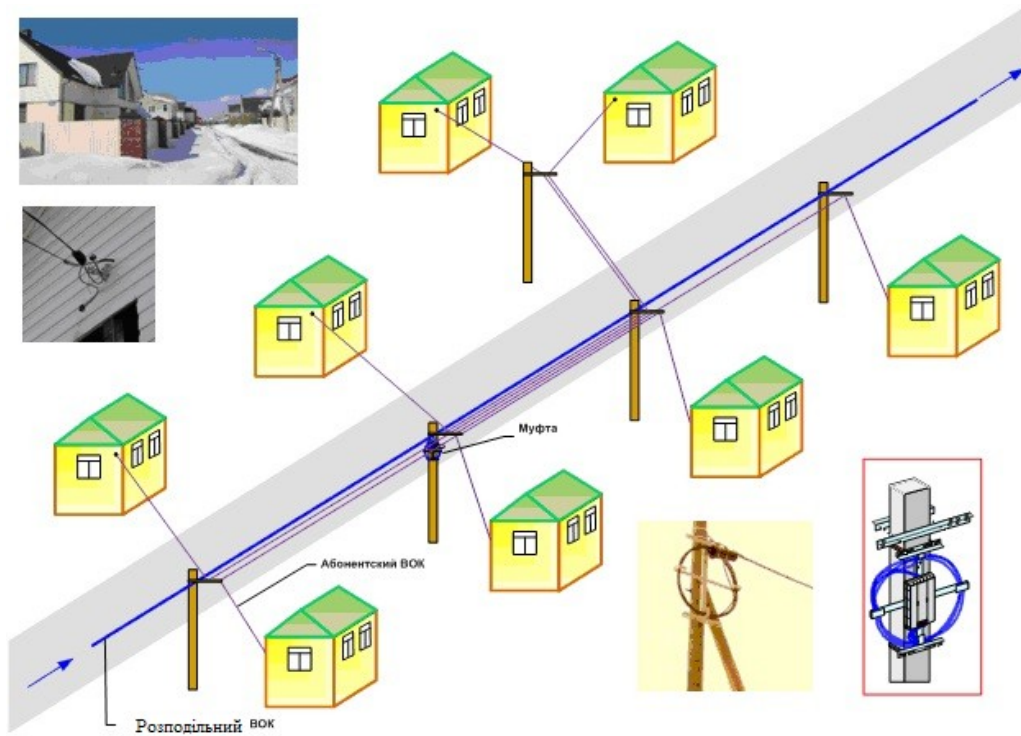


Рисунок 4.10 - Підключення приватних будинків методом повітряної підвіски оптичного кабелю

Відвідні (drop) кабелі забезпечують з'єднання між відвідним терміналом і будинком або квартирою абонента (рис. 4.10).

У мережі PON такий кабель може служити для підключення одного житлового будинку на одну родину, офісу або багатоквартирного будинку. Загальною рекомендацією є використання зварювання для підключення drop-кабелю у відвідному терміналі, так як зварене з'єднання в drop-терміналі гарантує надійне й високоякісне з'єднання на увесь час експлуатації оптичної мережі.

Однак існують ситуації, коли вигідніше використовувати претерміновані кабелі, за допомогою яких можна знизити вартість інсталяції. Використання у відвідному терміналі роз'ємних з'єднань, звичайно, створює додаткову потенційну крапку відмови, але дає й свої переваги. Таке з'єднання можна використовувати для тестування, що особливо важливо, коли немає доступу до другого кінця drop-кабелю. Крім того, застосування претермінованих кабелів дозволяє максимально швидко здійснити підключення без необхідності виконання зварювальних робіт. Підключення drop-кабелю на стороні абонента

виконується дуже просто, коли встаткування ONT розміщується для приватного будинку. У цьому випадку самий складний момент - підключити це встаткування до електроживлення й забезпечити якісне заземлення. При підключенні багатоквартирних будинків можливий варіант підключення декількох оптичних волокон з урахуванням використання декількох ONT або сплітерів усередині будинку. У багатьох проектах усередині будинку, наприклад у підвальному приміщенні, встановлюють розподільний блок зі сплітером, від якого волокна вже прокладають в окремі квартири.

Для зовнішньої прокладки було обрано кабель Utex UT004, та UT002.

Підвісний оптичний ADSS кабель Utex ОКП (з2) Т 2 кН, призначений для підвішування на опорах ліній зв'язку, ліній електропередач, стовпах освітлення, між будівлями і спорудами, по зовнішньому фасаду будівель, а також для прокладки в кабельних лотках, кабельних каналах, кабельної каналізації, трубах, блоках, тунелях. Допустиме розтягуюче зусилля 1 кН. Оболонку з УФ-стабілізованого поліетилену високої щільності, 2 арамідно-пластикових силових елемента і зміцнюючі скловолокно (рис. 4.11). Несучий елемент виконаний з 1,6 мм оцинкованого дроту для якісної надійної поздовжнього натягу. Повністю діелектричний, що виключає можливість електромагнітних впливів на кабель, не вимагає вирішення питання заземлення. Захищений від попадання вологи. Армуюче скловолокно зміцнює конструкцію, мінімізує можливість фізичного ушкодження під час прокладання та експлуатації, в тому числі захищає від пошкодження гризунами [20].

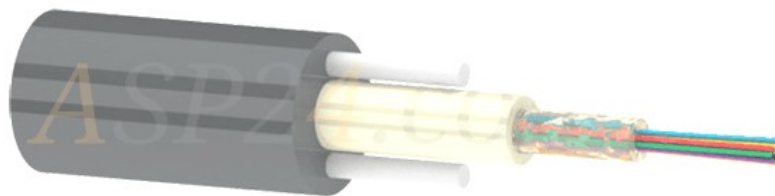


Рисунок 4.11 - Оптичний кабель Utex ОКП (з2) Т 2 кН

4.5 Методика розрахунку оптичного бюджету потужності й бюджету втрат лінії

Технологію FTTN на базі пасивної оптичної мережі в плані побудови локальних мереж ми розглядаємо як засіб для вирішення завдань здешевлення надання телекомунікаційних послуг по оптоволокну для клієнта.

Для того, щоб грамотно побудувати дерево PON, необхідно враховувати, у першу чергу, оптичні втрати, що привносяться пасивним устаткуванням.

На основі аналізу основних характеристик сучасних дільників потужності і експериментальних досліджень можна отримати вирази для розрахунку внесених втрат оптичних симетричних і несиметричних дільників потужності з довільними коефіцієнтами ділення N в другому вікні прозорості для двох класів точності, клас А ($\Delta\lambda \pm 20$ нм) і клас В ($\Delta\lambda \pm 40$ нм) [17].

Так, емпіричне вираження для симетричного розподільника має вигляд:

$$\alpha_{\text{внос}} = 10 \cdot \lg N + \beta \cdot \lg [N(N-1)] \text{ дБ}, \quad (4.1)$$

Залежно від виду розподільника поправочний коефіцієнт β має різні числові значення, які визначені відповідно до результатів експериментів, аналізом паспортних даних, а також з роботами інших авторів [19]. Експериментальні дослідження планарних симетричних дільників потужності 1x2, 1x3, 1x16, 1x32 були проведені у другому вікні прозорості.

Параметри коефіцієнта вказані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнту β

Дільник		1x2	1x3	1x4	1x8	1x12	1x16	1x24	1x32	1x64
β	Клас А	0,15	0,25	0,25	0,3	0,35	0,35	0,15	0,4	0,4
	Клас В	0,2	0,35	0,4	0,55	0,65	0,7	0,85	0,85	0,8

Чим більш багатокаскадний розподільник, тим вище чисельне значення поправочного коефіцієнта і внесених втрат, через так звану інтерференцію в структурі самого розподільника.

Нижче наведені результати розрахунку внесених втрат симетричного розподільника в залежності від числа вихідних портів відповідно до (4.1) (табл. 4.2):

Різниця чисельних значень внесених втрат, виміряних експериментально і розрахованих відповідно до (4.1) становить 0,05-0,2 дБ.

Вираз для несиметричного розподільника потужності з кількістю вихідних портів N:

$$\alpha_{\text{внос}} = 10 \cdot \lg \frac{100}{P} + \beta \cdot \lg \left[\frac{100}{P} (N - 1) \right] \text{ дБ},$$

де β - коефіцієнт для класу А дорівнює 0,15, а для класу В - 0,25; P - відсоток потужності, виведеної в даний порт у %.

Таблиця 4.2 – Втрати симетричного розподільника

Число вихідних портів N	Втрати для симетричного розподільника, що вносяться, дБ	
	Для класу А	Для класу В
2	3,485	3,762
3	5,718	6,097
4	6,968	7,536
6	8,918	9,486
8	10,167	11,115
16	13,368	14,693
32	16,567	18,272

Різниця чисельних значень внесених втрат, виміряних експериментально і розрахованих відповідно до (4.1) становить 0,05-0,2дБ і (2) - максимально 0,3дБ.

Отримані вирази дозволяють розрахувати величину втрат, що вносяться з похибкою не більше 5%.

Таблиця 4.3 – Втрати, що вносяться несиметричним розподільником потужності

Процент потужності, що виводиться на кожен порт, %	Втрати, що вносяться, дБ			
	Клас А, $\beta = 0,15$		Клас В, $\beta = 0,25$	
40/60	4,039	2,252	4,079	2,274
30/70	5,307	1,572	5,36	1,588
20/80	7,095	0,984	7,164	0,993
10/90	10,15	0,464	10,25	0,469

Проведемо розрахунок працездатності мережі PON для конкретного випадку.

Теоретичний радіус мережі PON становить 20км. Практично – все залежить від бюджету втрат на конкретній гілці дерева. Для розрахунків необхідно обирати самі гірші показники згасань, чутливості й потужності випромінювання передавачів.

Стандартно при розрахунках використовують таблиці згасань для сплітерів, приймають: 0,05 дБм згасання на зварюванні; 0,36 дБм/км згасання у волокні на довжині хвилі 1310 нм (для 1550 нм згасання у волокні дорівнює 0,22 дБм/км), згасання на механічному з'єднанні приймають рівним 0,5 дБм, згасання при перегині варіюється від 0,15 дБм до 7 дБм і більше (визначається приладом на місці).

Далі, необхідно врахувати й підсумувати всі місця, у яких є елементи, що привносять згасання в лінію між головною станцією OLT та абонентським комплектом ONT. До отриманого значення додають згасання на волокні по всій довжині лінії від самого далекого абонента до OLT. Таким чином, можна вирахувати бюджет втрат в PON.

Наступний крок - розрахунок оптичного бюджету потужності, але його частіше за все приймають рівним 30 дБм (гарантія від виробника обладнання, оптичний бюджет потужності, рівний 30 дБм). Усе, що понад 30 дБм - необхідно тестувати.

Дерево буде гарантовано працездатне, якщо бюджет втрат нижче бюджету потужності.

Окремо слід враховувати передачу CATV та зварені розподільники, тут телевізійний сигнал має потужність від 7 дБм (найгірший варіант) до 24 дБм (дорогі передавачі або EDFA підсилювачі), а на телевізійний приймач (окремий або в складі ONU) цей сигнал повинен прийти з мінімальною потужністю -12 дБм. Тому, при використанні зварених розподільників, варто бути гранично

обережним і щораз перед новим підключенням перераховувати дерево PON для того, щоб переконатися, що у кожного абонента сигнал однаковий і не виходить за межі чутливості телевізійного приймача.

Вихідні дані для розрахунку:

- Максимальна відстань від OLT до ONT у дереві = 250 м;
- Вихідна потужність: SFP OLT модуля: “SFP TX PWR” = +5 дБ, ONT SFP B+ TX = +2 дБ;
- Чутливість приймача: ONU: “ONU RX SENS” = -28 дБ, OLT SFP C+ + RX = -32 дБ;

Відповідно оптичний бюджет лінії буде дорівнювати

$$\text{OLT} \rightarrow \text{ONT}: (P=+5-5-(-28))=33 \text{ дБ};$$

$$\text{ONT} \rightarrow \text{OLT}: (P=+2-2-(-32))=34 \text{ дБ};$$

- Втрати на роз'ємних з'єднаннях (конектори) = 0,15 (0,3) дБ;
- Втрати на нероз'ємних з'єднаннях (зварювання) = 0,05 (0,15) дБ;
- Згасання в стандартному волокні G.652.D на кілометр на довжині хвилі 1310 = 0,36 дБ/км;
- Згасання в стандартному волокні G.652.D на кілометр на довжині хвилі 1550 = 0,22 дБ/км;
- Експлуатаційний запас = 3 дБ.

Таблиця згасань для оптичних сплітерів з рівномірним розподілом представлена нижче (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 - Усереднені загасання на виходах планарних дільників (без урахування конекторів)

Дільник 1х	Згасання на кожному виході, дБ
PLC 1x2	3,4
PLC 1x4	7,0
PLC 1x8	10,3
PLC 1x16	14,1
PLC 1x32	16,9

Проведемо розрахунок максимального можливого згасання в дереві при використанні сплітерів по схемі:

$$\text{OLT} \rightarrow 1x8 \rightarrow 1x8 \rightarrow \text{ONT}$$

У цьому випадку використовуються 2 конекторних з'єднання, 4 зварені з'єднання, 2 сплітера 1x8 та лінія довжиною 250 м.

Максимально можливе згасання складе: -0,15 (конектор OLT) - 0,05 (зварювання) - 10,3 (загасання сплітера) - 0,05 (зварювання) - 0,05 (зварювання) - 10,3 (загасання сплітера) - 0,05 (зварювання) - 0,15 (конектор ONT) - 0,075 (втрати в кабелі на 250 м) - 3(експлуатаційний запас) = -24,175 дБ.

Визначимо працездатність лінії:

$$33 - 24,175 = 8,825 \text{ дБ.}$$

Проведені розрахунки показують, що всі параметри задовольняють нормам, дерево PON робоче й має запас в 8,825 дБ.

4.6 Аналіз особливостей виявлення дефектів у лінії при тестуванні мереж PON

Тестування розподільних мереж PON, виявлення і усунення дефектів при будівництві та під час приймально-здавальних робіт є важливими і досить трудомісткими завданнями. Це обумовлено особливістю мережі PON, яка полягає в розгалуженості мережі та великій кількості точок тестування (абонентських портів), особливо в багатоповерхових, багатоквартирних будинках.

Аналіз дефектів, які проявлялися в процесі монтажу і налагодження мереж PON, показав, що найбільш частими причинами несправностей у нових мережах є надлишкові втрати, які викликані вигинами оптичного волокна (порушення при прокладанні кабелю) і надлишкові втрати в оптичних роз'ємах за рахунок нещільної фіксації з'єднувачів (порушення при монтажі мережі).

Розуміння фізичної природи виникнення втрат обумовлених даними дефектами дозволяє впевнено розрізняти їх, що значно прискорює локалізацію дефектів і зменшить час на їх усунення.

Практика пошуку та усунення несправностей при монтажі мереж PON показала, що наявність надлишкової кількості вигинів оптичного волокна призводить до більших втрат на довжині хвилі 1625 нм у порівнянні з довжиною хвилі 1310 нм. Тоді як недостатньо щільна фіксація оптичних роз'ємів сильніше позначається на згасання випромінювання на довжині хвилі 1310 нм. Описувана

особливість найбільш яскраво проявляється при використанні оптичного волокна стандарту G.657A, яке використовується в складі оптичного кабелю при будівництві розподільної мережі PON.

Для пояснення цієї особливості був проведений теоретичний аналіз втрат на макровигинах оптичного волокна і втрат на поздовжньому зміщенні для різних довжин хвиль, що використовуються в мережах PON.

Для розрахунку використовувалися паспортні характеристики оптичного волокна FUJIKURA G.657A:

- довжина хвилі відсічення $\lambda_c = 1260$ нм;
- діаметр модового поля $2W_0$ (1310 нм) = 8,6 нм.

З урахуванням цих параметрів були розраховані діаметри модового поля для довжин хвиль 1310 нм і 1625 нм. При розрахунку використовувалася формула Маркузе [1]:

$$2 \cdot W_0 = 2 \cdot a \cdot \left[0,65 + 0,434 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{3/2} + 0,0149 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \right].$$

Це дозволило побудувати залежність діаметра модового поля від довжини хвилі в спектральному діапазоні мережі PON (рис. 4.12).

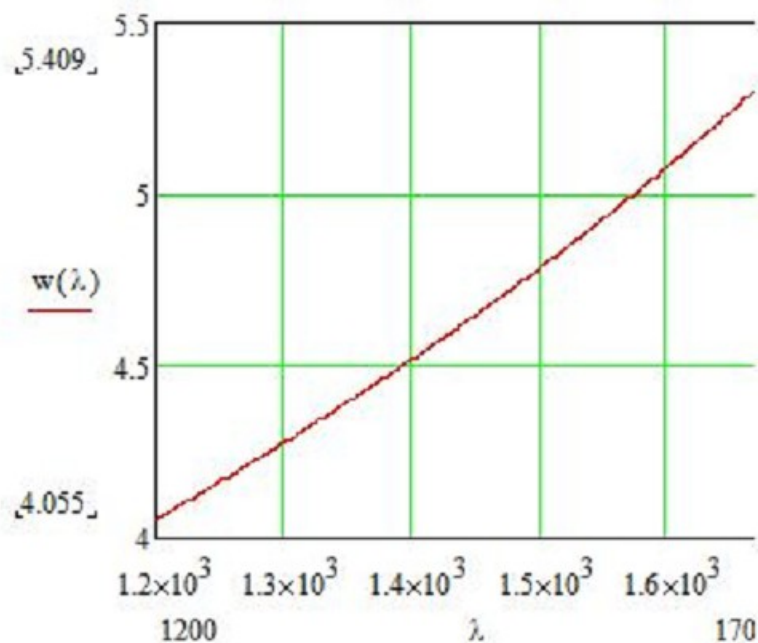


Рисунок 4.12 - Залежність діаметра модового поля від довжини хвилі

У свою чергу, діаметр модового поля дозволяє розрахувати як втрати на поздовжньому зміщенні в роз'ємному з'єднувачі, так і втрати на макровигині оптичного волокна.

При розрахунку втрат на поздовжньому зміщенні в роз'ємі використовувалася апроксимація хвилі, випромінюваної торцем одномодового волокна, як гаусового пучка з заданим параметром $2W_0$, що відповідає каустиці пучка. При відомій довжині хвилі λ величина W_0 повністю визначає релєєвську довжину пучка Z_0 , що відповідає відстані уздовж осі пучка, на якій площа поперечного перерізу пучка збільшується вдвічі [19]:

$$Z_0 = \frac{\pi \cdot (W_0)^2}{2},$$

і геометрія поведінки пучка в зазорі може бути описана схемою (рис. 4.13).

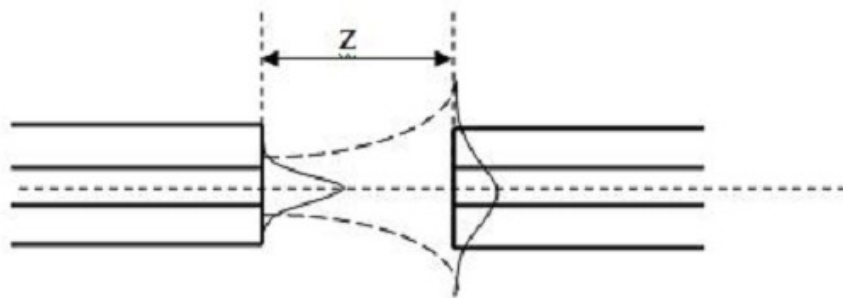


Рисунок 4.13 - Геометрія поведінки пучка в зазорі оптичних волокон

Для такої схеми частка потужності η , що переноситься пучком світла через площу радіусом W_0 (на торці приймального волокна при відстані z між торцями) може бути описана формулою:

$$\eta(z) = 1 - e^{\left[\frac{-2 \cdot W_0^2}{w^2(z)}\right]},$$

де $w(z)$ - радіус гауссового пучка на торці приймального волокна (на відстані z від торця передавального волокна):

$$w^2(z) = W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2 \right].$$

Так як і W_0 , і Z_0 залежать від довжини хвилі λ , то і втрати в поздовжньому зсуві також будуть залежати від довжини хвилі λ . Ці залежності наведені на графіку (рис. 4.14).

Втрати для довжини хвилі 1310 нм (верхня крива) при однаковій величині поздовжнього зсуву помітно більші, ніж для довжини хвилі 1625 нм (нижня крива).

Ця різниця особливо помітна при великих поздовжніх зазорах (понад 60 нм).

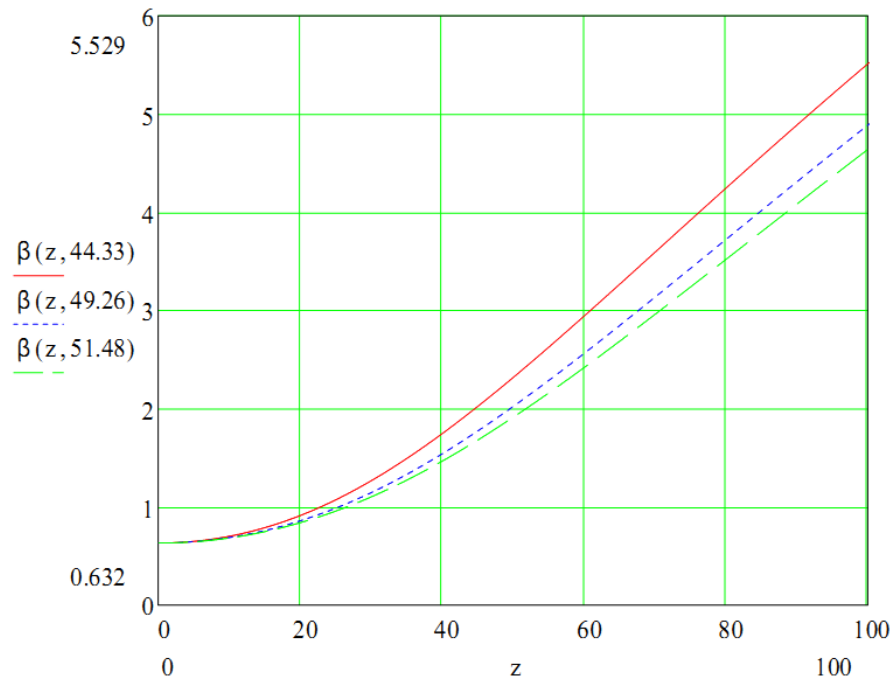


Рисунок 4.14 - Залежність втрат в поздовжньому зсуві роз'ємного з'єднання

Втрати на макровигинах радіуса R для одномодового волокна з показником заломлення серцевини n_1 можуть бути розраховані за формулою [16]:

$$\alpha = 10 \lg \left[1 - (k \cdot n_1)^4 \cdot \frac{(W_0)^6}{8 \cdot R^2} \right], \text{ дБ}$$

де $k = 2\pi/\lambda$, хвильове число оптичної хвилі, що розповсюджується по волокну.

З формули видно, що втрати на макровигинах складним чином залежать від довжини хвилі випромінювання (так як і k , і W_0 залежать від λ). Графіки цих залежностей для трьох довжин хвиль наведені на рис. 4.15.

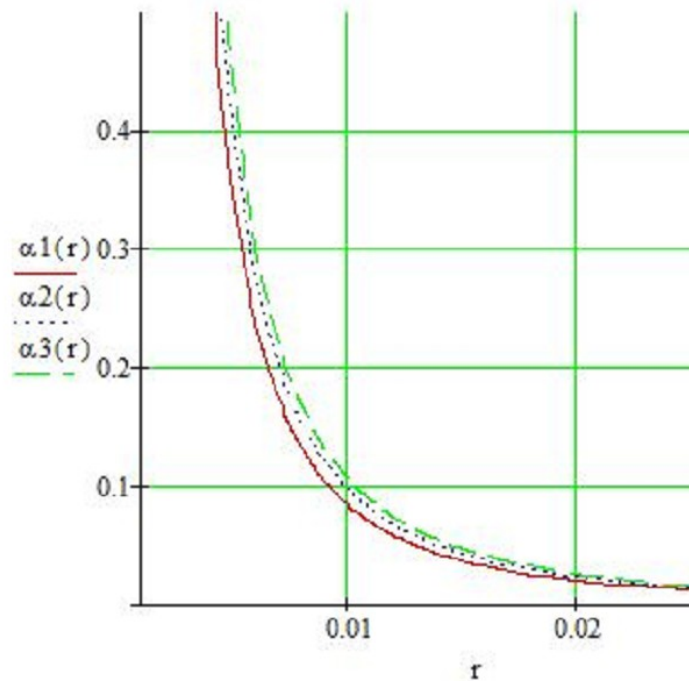


Рисунок 4.15 - Залежність втрат на макровигині оптичного волокна

Аналіз розрахункових кривих показує, що випромінювання з довжиною хвилі 1625 мкм (верхня крива) виявляється більш чутливим до макровигинів волокна, ніж випромінювання з довжиною хвилі 1310 мкм (нижня крива), особливо при малих радіусах вигину (менше 10 мм).

Таким чином, проведений теоретичний аналіз показав, що різні за своєю природою дефекти монтажу викликають збільшення втрат випромінювання, які істотно залежать від природи дефекту. Вигини волокна призводять до більшого зростання втрат на довжині хвилі тисячі шістсот двадцять п'ять мкм, тоді як недостатньо щільна фіксація оптичних роз'ємів істотно сильніше позначається на загасанні випромінювання 1310 нм.

Таким чином, порівнюючи рівні втрат в різних спектральних діапазонах, можна ідентифікувати характер пошкодження, швидше і точніше локалізувати його місце знаходження і зменшити час на наладки змонтованої мережі PON.

4.7 Види вимірювань у PON

Побудова сучасної якісної оптичної мережі неможлива без високої якості її тестування. Воно дозволяє підтвердити основні параметри, що забезпечують якість передачі інформації, а при необхідності - допомогти інсталятору визначити характер і місце пошкодження. У пасивних оптичних мережах вимірювання пов'язані з чималими витратами часу і коштів. Тому вимірювальні прилади повинні бути ретельно підібрані з урахуванням особливостей саме таких мереж, а етапи і методи вимірювань повинні відповідати міжнародним стандартам для PON.

На різних етапах побудови та використання PON можуть проводитися такі вимірювання:

- вхідний контроль;
- будівельно-монтажні;
- приймально-здавальні;
- експлуатаційні.

Вхідний контроль параметрів компонентів мережі проводиться перед початком будівництва. Його завдання - перевірити відповідність параметрів кабелю, шнурів, разветвителей і інших пристроїв заявленим значенням. Однак, при будівництві невеликих абонентських мереж це не завжди доцільно, тому що повноцінний вхідний контроль всіх складових PON потребують великої кількості часу і досить дорогого обладнання. Простіше провести вибірковий контроль (наприклад, коефіцієнта загасання декількох будівельних довжин кабелю) і довіритися гарантійними зобов'язаннями постачальника [15].

В процесі інсталяції мережі проводяться вимірювання, що дозволяють оцінити якість *будівельно-монтажних* робіт, наприклад, підвісу відрізка повітряного оптичного кабелю на опорах, зварного з'єднання оптичних волокон і т.п.

Приймально-здавальні вимірювання проводяться після закінчення будівельно-монтажних робіт для підтвердження заданих параметрів мережі, що забезпечують якість передачі інформації. *Експлуатаційні* вимірювання проводяться в тих випадках, коли в процесі роботи PON відбувається погіршення параметрів сигналів або пошкодження в будь-якій точці мережі, а також після проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

4.7.1 Будівельно-монтажні вимірювання на PON

В процесі будівельно-монтажних робіт можуть знадобитися виміри, пов'язані з контролем якості компонентів і якості самої інсталяції PON. До них відносяться вимірювання погонного згасання будівельних довжин оптичного кабелю, втрат в зварних з'єднаннях, затуханий і втрат на відбиття пасивних компонентах (роз'ємів, сплітерів).

Для цієї мети найкращим чином підходить оптичний рефлектометр, який підключається з одного кінця лінії і дозволяє отримати розподіл відбитої потужності по її довжині. В результаті вимірювань формується графічна залежність (рефлектограмм), яка характеризує розподіл потужності оптичного сигналу по довжині лінії. Таким чином, за нахилом характеристики на лінійних ділянках можна визначити величину коефіцієнта загасання оптичного кабелю (в дБ/км), а для локальних неоднорідностей (зварні і роз'ємні з'єднання, вигини волокон і т.п.) можна визначити втрати, що вносяться, і втрати на відбиття (рис. 4.16).

Після закінчення будівельно-монтажних робіт на окремих сегментах мережі доцільно зробити на них рефлектометричні вимірювання (якщо є можливість, то на двох довжинах хвиль) і зберегти опорні рефлекторам. При подальшій експлуатації для визначення місць пошкодження (або неоднорідності) дуже корисним буде накладення вихідної опорної рефлекторам на «аварійну» (багато моделей рефлектометрів мають таку функцію). Іноді це дозволяє швидше зрозуміти характер несправності і виявити її місце розташування.

Також рекомендується знімати рефлекторам при зміні топології мережі (підключення нового абонента, заміни розгалужувача і т.п.).

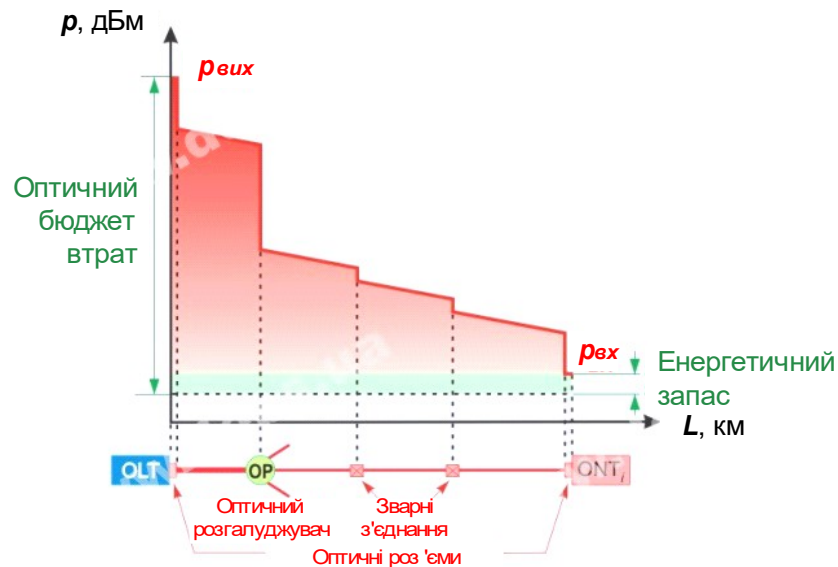


Рисунок 4.16 – Приклад рефлектограми

Фактори, що впливають на якість передачі в PON

При проведенні приймально-здавальних робіт зазвичай проводять виміри параметрів, що характеризують швидкість передачі, відсутність помилок і інші показники, які характеризують якість сигналу. Основними факторами, що діють в лінійному тракті (між передавачем і приймачем) і обмежують показники якості є: згасання, дисперсія (хроматична і поляризаційна) і нелінійні ефекти.

Згасання сигналу в оптичних кабелях, шнурах, роз'ємах, розгалужувачах і інших компонентах PON призводить до зменшення рівня сигналу на вході фотоприймача і, відповідно, погіршення співвідношення сигнал/шум, збільшення коефіцієнта помилок. Загальне згасання в лінійному тракті обов'язково вимірюється на відповідність розрахованому бюджету втрат. Також можуть проводитися вимірювання втрат, що вносяться окремими компонентами мережі [13].

Дисперсія оптичних сигналів пов'язана з різними швидкостями поширення різних спектральних (хроматична) або поляризаційних (поляризаційно-модова) складових. Вона приводить до розширення форми імпульсів або фазовим спотворенням аналогових сигналів в оптичних волокнах (рис. 4.17). Досить велика дисперсія призводить до помилок розпізнавання сигналів фотоприймачем і, знову ж таки, до погіршення співвідношення сигнал/шум, збільшення коефіцієнта помилок або спотворень ТБ сигналу (SCO).

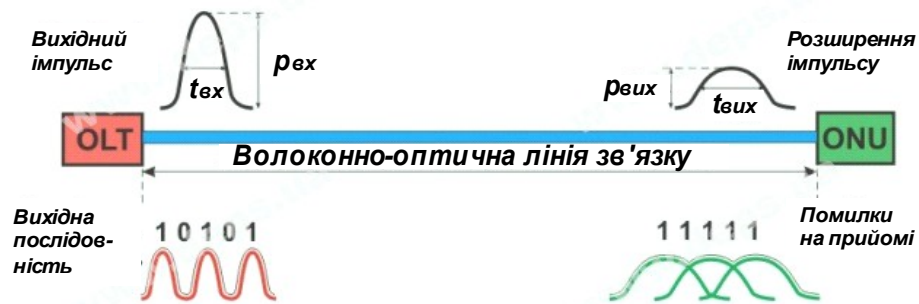


Рисунок 4.17 – Дисперсія у оптичному волокні

Більша з двох складових - хроматична дисперсія - залежить від довжини лінії, довжини хвилі сигналу і параметрів волокна. Така дисперсія реально робить істотний вплив на форму сигналу на довгих лініях (десятки, сотні км) при високій швидкості передачі (більше 1 Гбіт/с), особливо на довжині хвилі 1550 нм. Розрахункове значення хроматичної дисперсії може використовуватися при проектних розрахунках (особливо GPON), але вимірювання цього параметра при будівництві та експлуатації, як правило, не проводяться [13].

Нелінійні ефекти в оптичних волокнах виникають при чималій величині оптичної потужності, що вводиться в волокно. Зазвичай це відбувається при використанні в PON виділеної оптичної несучої 1550 нм для передачі ТВ сигналів. При перевищенні деякого порогового рівня потужності, внаслідок нелінійних видів розсіювання сигналу (Мандельштама-Брілюєна, рис. 4.18, Рамана, рис. 4.19) в волокні виникають нові частотні складові, які мають зустрічний і попутний напрямки. По суті, відбувається виведення частини оптичної потужності зі спектру, що детектується, тобто додаткові втрати сигналу, який передається на основній оптичній несучій. А назад поширюється паразитний сигнал здатний погіршити роботу оптичного передавача. В цьому випадку відбувається зменшення співвідношення несуча/шум ТВ сигналу. Однак прояви нелінійних ефектів відбувається при рівнях потужності більше 7 - 10 дБ, а сучасні оптичні передавачі ТВ сигналів часто мають систему придушення таких ефектів навіть при рівнях до 18 дБм.

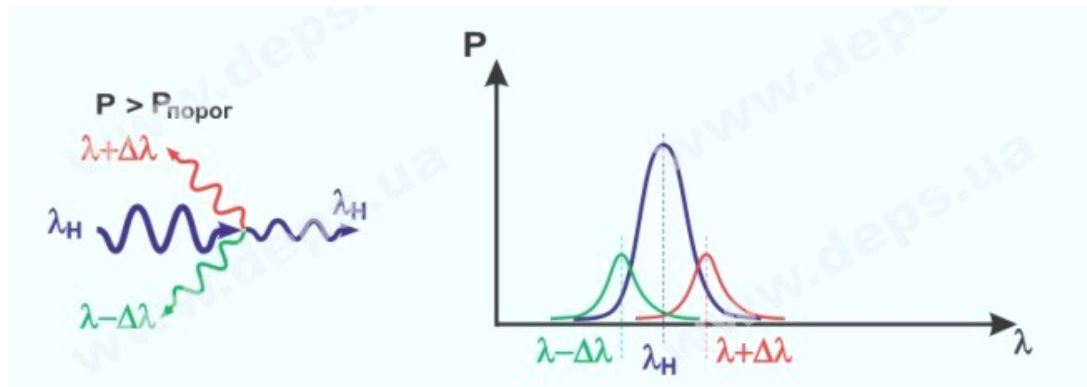


Рисунок 4.18 – Ефект розсіювання Мандельштама-Бріллюєна

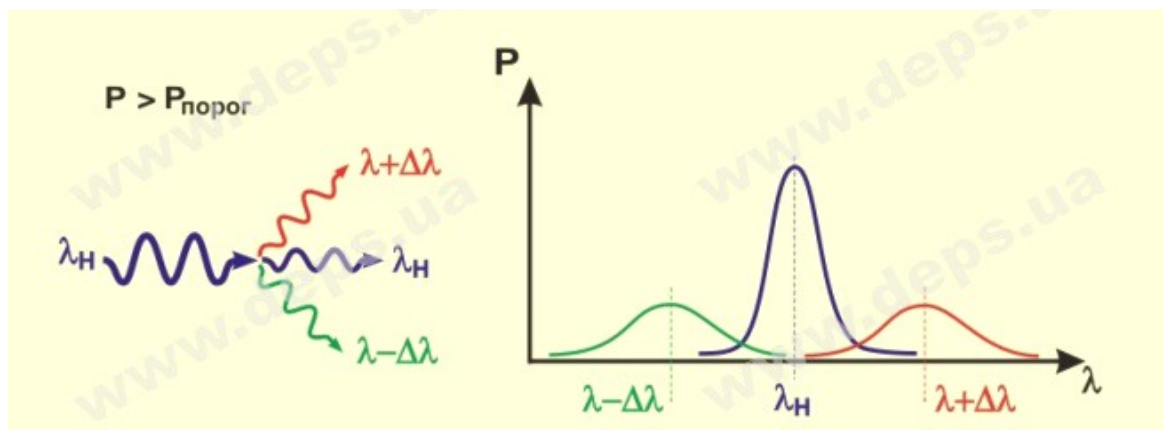


Рисунок 4.19 – Ефект розсіювання Рамана

4.7.2 Приймально-здавальні вимірювання на PON

Для приймально-здавальних випробувань на PON принциповими є тільки вимірювання, пов'язані з розподілом потужності в мережі. Тому принципово важливо провести два види вимірювань:

- вимірювання оптичної потужності на виході передавальних пристроїв;
- вимірювання згасання в оптичному лінійному тракті.

Для простоти можна провести вимірювання оптичної потужності передавачів в кросі після мультиплексора WDM на довжині хвилі 1490 нм (випромінювач OLT) і на 1550 нм (передавач ТВ-сигналів). У разі невідповідності отриманих значень проектними даними слід провести вимірювання безпосередньо на виході обох передавачів, а також на виході оптичного підсилювача. Також доцільно провести вимірювання потужності на вході оптичних приймачів лінійного і мережевого терміналів (рис. 4.20).

Потужність на виході WDM потрібно вимірювати приладом, що має вбудовані фільтри для роздільного вимірювання кожної довжини хвилі, тому що

звичайний вимірювач потужності покаже якусь сумарну величину, що не характеризує різні передавачі.

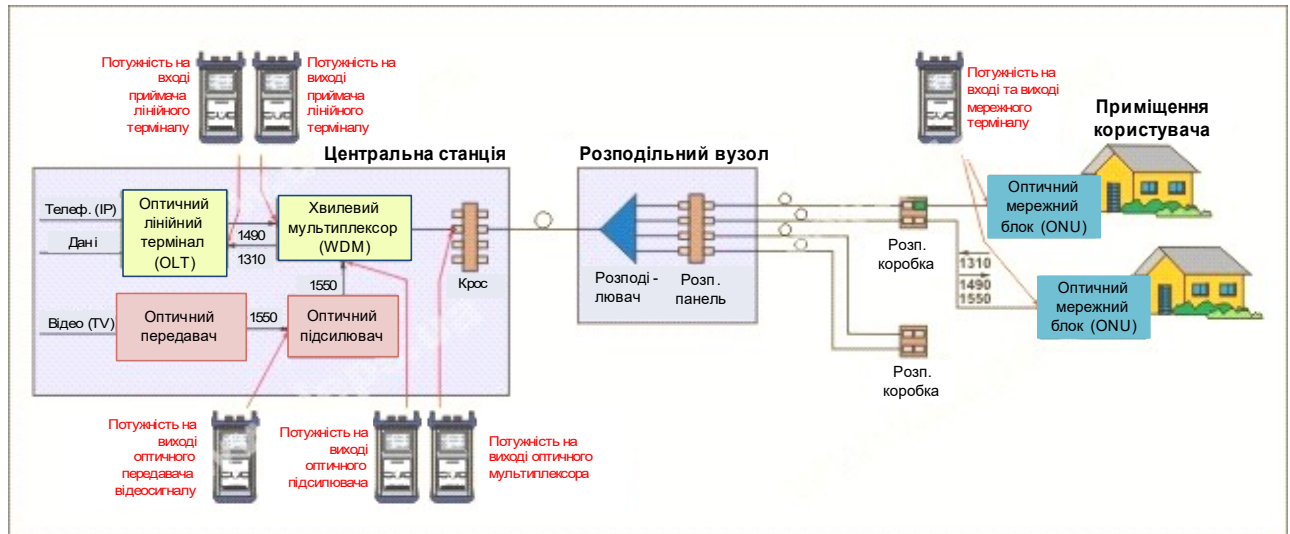


Рисунок 4.20 - Вимірювання оптичної потужності на виході передавальних пристроїв

Обов'язково необхідно провести вимірювання загального згасання в лінійному тракті для всіх гілок пасивної оптичної мережі. А при отриманні значення втрат вище розрахункового слід провести вимірювання величини втрат сигналу в окремих характерних точках мережі (рис. 4.21). Вимірювання загасання оптичної мережі або її сегмента зазвичай проводиться методом внесених втрат (IEC 61280-4-2, Method 1) за допомогою каліброваного джерела випромінювання і оптичного вимірювача потужності або оптичного тестера, який поєднує обидва таких пристрої в одному корпусі.

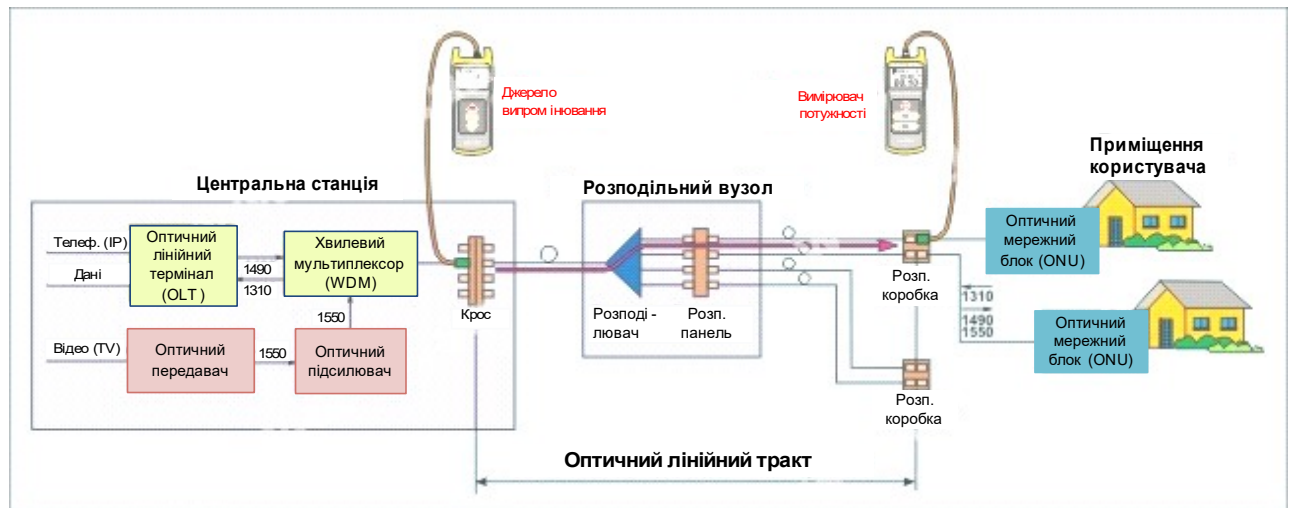


Рисунок 4.21 - Вимірювання величини втрат сигналу в окремих характерних точках мережі

При відсутності каліброваного джерела випромінювання у вигляді окремого приладу, в крайньому випадку, для вимірювання згасання в різних точках лінійного тракту можна використовувати передавач OLT (на 1490 нм) або оптичний передавач ТВ-сигналу (на 1550 нм). Вважаючи їх випромінювання практично безперервним, потрібно спочатку виміряти потужність на виході передавача, а потім - в заданій точці лінійного тракту. Різниця рівнів (в дБ) і покаже згасання вимірюваного ділянки мережі.

4.7.3 Експлуатаційні вимірювання на PON

Зазвичай експлуатаційні вимірювання в оптичних мережах зв'язку діляться на планові і аварійні. Планові вимірювання проводяться періодично з метою контролю основних параметрів мережі та прогнозування можливого погіршення якості передачі. Однак при реальній експлуатації PON нагальна потреба в вимірах виникає лише в разі аварійної (або передаварійної) ситуації. У цьому випадку основне завдання експлуатаційних вимірювань - швидко виявити причину погіршення параметрів сигналу або пошкодження. Знаючи характер пошкодження зазвичай можна спрогнозувати її причину, але не завжди. Наприклад, зменшення рівня сигналу на прийомі може бути пов'язано як з деградацією лазера оптичного передавача, так і з проблемами в лінійному тракту: вигин кабелю або патч-корду з неприпустимо малим радіусом, надмірне натягнення волокон в повітряному кабелі тощо Тому для початку потрібно скористатися можливостями системи діагностики OLT і оптичного передавача

КТВ. Обидва пристрої дозволяють проконтролювати вихідний рівень лазерного джерела, його струм накачування, температуру та ін. параметри. Система управління OLT також здатна ідентифікувати кожен абонентський термінал ONU і контролювати його працездатність в мережі. Виявивши кількість і місцезнаходження непрацюючих ONU, відразу можна локалізувати пошкоджений сегмент мережі. Однак, не можна забувати, що відключений від мережі живлення термінал буде так само сприйматися системою управління OLT непрацюючим, як і ONU, непрацюючий через обрив в мережі.

Для пошуку несправності в лінії, при відсутності рефлектометра, можна просто провести вимірювання рівня потужності в окремих точках мережі вимірником потужності, використовуючи джерело випромінювання або передавач OLT. Але такий метод не придатний для мереж, в яких застосовуються безкорпусні оптичні розгалужувачі, а таких випадках - застосування корпусних розветвителей з роз'ємними з'єднувачами вносить в тракт чималі втрати. Найбільш точно встановити місце несправності в лінії можна тільки за допомогою оптичного рефлектометра (OTDR).

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведено огляд технологій побудови оптичних мереж доступу, обрана архітектура для побудови мережі та проведено аналіз особливостей планування та побудови технології FTTH PON.

Для вирішення проблем побудови сучасних широкосмугових абонентських мереж доступу наприкінці 80-х була розроблена концепція «останньої милі» або «волокна в будинок» (Fiber To The Home, FTTH). З існуючих топологій для таких мереж оптимальним рішенням буде фізична топологія «дерево з пасивними вузлами», що покладена в основу технології пасивних оптичних мереж - PON.

При виборі технології FTTH безпосередній вплив мають запланований набір послуг і необхідна для їхнього надання смуга пропускання. Чим вище необхідна швидкість передачі та чим більше набір послуг, тим ближче до терміналу користувача повинна підходити оптика.

У даній роботі проводився аналіз існуючих технологій PON та подальших перспектив її розвитку, досліджено методи впровадження нових технологій та відзначено перспективи технологій 10G-EPON та WDM-PON. Проведено аналіз принципів побудови оптичних мереж доступу, розглянуто можливі проблеми та методи їх вирішення.

На основі технічного завдання проведено планування мережі абонентського доступу с. Ватутіно, обрано необхідні для побудови пасивні елементи та принцип прокладки кабелю.

Проведено розрахунки оптичного бюджету потужності й бюджету втрат лінії. Після проведених розрахунків бюджету лінії зроблено висновки, що проектувана мережа працездатна й має запас в 8,825 дБ.

Розглянуто методи контролю оптичної лінії.

Проведено теоретичний аналіз дефектів, які проявлялися в процесі монтажу і налагодження мереж PON. Він показав, що різні за своєю природою дефекти монтажу викликають збільшення втрат випромінювання, які істотно залежать від природи дефекту. Вигини волокна призводять до більшого зростання втрат на довжині хвилі 1625 нм, тоді як недостатньо щільна фіксація оптичних роз'ємів істотно сильніше позначається на згасанні випромінювання 1310 нм.

Таким чином, порівнюючи рівні втрат в різних спектральних діапазонах, можна ідентифікувати характер пошкодження, швидше і точніше локалізувати його місце знаходження і зменшити час на наладки змонтованої мережі PON.

Результати теоретичних досліджень підкріплено практичними вимірами на реалізованій мережі. Також проведені у роботі дослідження знайшли апробацію у докладі та тезах для одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», що відбулася 8-9 квітня 2021 року у м.Харків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. - М.: Эко-Тренз, 1998. - 268с.
2. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 272 с.
3. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
4. Алексеев Е.Б., Заркевич Е.А., Складов О.К., Устинов С.А. Эволюция сети доступа на основе применения волоконно-оптических технологий // Электросвязь, №9, 2003. – С. 20 – 23.
5. Дэвид Гринфилд. Оптические сети. Diasof. Москва, С-Петербург, Киев, 2002.
6. Петренко И.И., Убайдуллаев Р.Р. Пассивные оптические сети PON. Часть 1. Архитектура и стандарты // LightWave Russian Edition, №1, 2004. – С. 22 – 28.
7. Андреев В.А., Бурдин В.А., Попов Б.В., Польников А.И. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи:, 1995.– 200 с.
8. Петренко И.И., Убайдуллаев Р.Р. Пассивные оптические сети PON. Часть 2. Ethernet на первой миле // LightWave Russian Edition, №2, 2004. – С. 25 – 32.
9. Д. Гарьепи, М. Леблан, Б. Массон, Б. Рюше Тестирование сетей FTTx // LightWave Russian Edition, №4, 2004 – С. 35-41.
10. Б. Дойч, Р. Уитман, К. Мазали Оптимизация пассивных оптических сетей FTTN продолжается // LightWave Russian Edition, №1, 2005. – С. 20-34.
11. М. Величко Технологии строительства сетей доступа // LightWave Russian Edition, №3, 2005. – С. 31-33.
12. Основы оптоэлектроники / Суэмацу Я., Катаока С., Кисино К. и др. Пер. с яп. – М.: Мир, 1998. – 288 с., ил.
13. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 672с.
14. Сайт deps.ua Измерения в пассивных оптических сетях (PON) [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://deps.ua/knowledgeable-base->

ru/articles/464-izmerenija-v-passivnyh-opticheskikh-setjah-pon.html - 15.05.2021 г. - Загл. с экрана.

15. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: Учебное пособие для ВУЗов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 464 с.

16. Ефанов В.И. Оптические и электрические направляющие среды. Учебное пособие. — Томск: Эль Контент, 2013. — 306 с.

17. Кауфман М., Сидман А. Практическое руководство по расчётам схем в электронике: справ. В 2 т. Т. 2.: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993. 288 с.

18. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: пер. с англ. В 2 т. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. Т. 1. 760 с.

19. Астахов А.В. Анализ неисправностей в сетях PON. Теория и практика // А.В. Астахов, В.Р. Сумкин / ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ № 1, 2016 год С 18-22.

20. Сайт mounblan.com.ua Обладнання для мереж PON [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://mounblan.com.ua/pon-ua/optovolokonnij-kabel-ua/pidvisnij-optichnij-adss-kabel-okps2t-04-okps15t-01-ua> - 20.05.2021 г. - Загл. с экрана.

21. Дацько С.В. Внедрение систем мониторинга в пассивные оптические сети для повышения качества предоставляемых услуг / С.В. Дацько, Ю.П. Бойко, Н.А. Харченко, М.С. Чекулаева // Наукомісткі технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія / під загальною редакцією В. М. Безрука, В. В. Баранніка. — Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. — 33-38 с.

22. Ключко А.В. Вплив нелінійних спотворень, що викликані вимушеним розсіюванням Мандельштама-Брілюена, в каналах пасивних мереж PON / А.В. Ключко, Н.А. Харченко // тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» 8-9 квітня 2021 року., Харків, Т1 секції 1,2, С. 92.